

Prototipo de una microturbina hidráulica tipo Savonius fabricada por manufactura aditiva con PLA para generar energía eléctrica

Prototype of a Savonius Type Micro Hydraulic Turbine Manufactured by Additive Manufacturing with PLA to Generate Electric Energy

Beltrán Sánchez Flavio Joe ^a, López Bravo Yuen Keynes ^b

^{a,b} Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Señor de Sipán, email: bsanchezflavioj@uss.edu.pe, lbravoykey@uss.edu.pe

DOI: <https://doi.org/10.15332/24222399.3038>

Resumen— La presente investigación tiene como objetivo principal el desarrollo de un prototipo de microturbina hidráulica tipo Savonius, fabricada mediante manufactura aditiva con PLA (ácido poliláctico), para la generación de energía eléctrica. La fabricación del prototipo se llevó a cabo utilizando PLA, un material de impresión 3D conocido por su biodegradabilidad y facilidad de uso en manufactura aditiva. Las pruebas experimentales se realizaron para medir el rendimiento del prototipo bajo diferentes condiciones de flujo de agua, determinando su capacidad para generar energía eléctrica de manera eficiente. Finalmente, se evaluó la viabilidad técnica y económica del prototipo.

Palabras clave— Microturbina, hidráulica, manufactura, aditiva, energía.

Abstract— The main objective of this research is the development of a prototype of a Savonius-type hydraulic microturbine, manufactured by additive manufacturing with PLA (polylactic acid), for the generation of electrical energy. The fabrication of the prototype was carried out using PLA, a 3D printing material known for its biodegradability and ease of use in additive manufacturing. Experimental tests were carried out to measure the performance of the prototype under different water flow conditions, determining its capacity to generate electrical energy efficiently. Finally, the technical and economic feasibility of the prototype was evaluated.

Keywords— Microturbine, hydraulics, manufacturing, additive, energy.

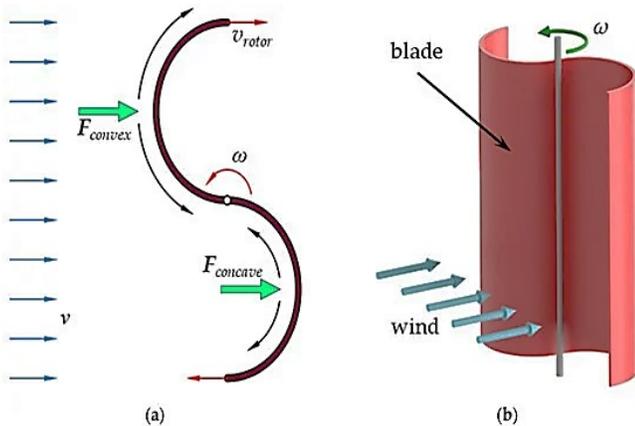
I. INTRODUCCION

La turbina Savonius fue creada por el ingeniero finlandés Sigurd Johannes Savonius en 1922. Este tipo de turbina se

clasifica como una máquina de arrastre, ya que el viento entrante “arrastra” la pala, haciéndola girar alrededor de su eje vertical (ver figura 1-b) [1].

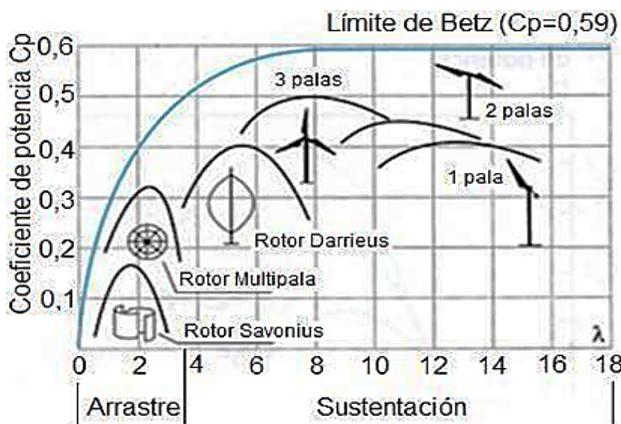
La fuerza de arrastre generada por el viento entrante actúa en ambos lados de la pala del rotor. No obstante, la fuerza en el lado convexo es mayor que en el lado cóncavo, lo que produce una fuerza neta que impulsa el rotor (ver figura 1-a) [1].

Figura 1: Principio de funcionamiento del rotor Savonius [2].



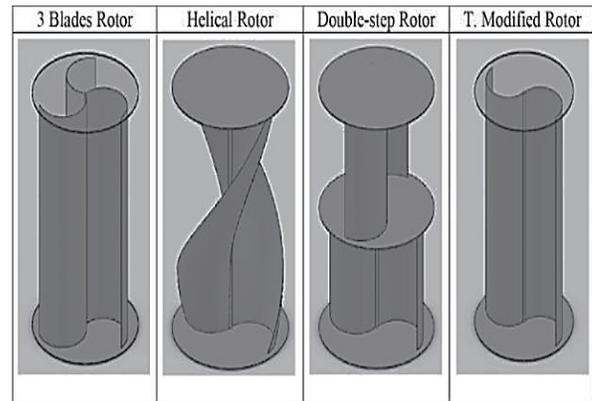
El rotor Savonius es menos eficiente que otros rotores, con una eficiencia máxima entre el 10% y el 30%, alcanzada a velocidades específicas de 0.5 a 1 [3]. La menor eficiencia de las turbinas tipo Savonius, comparadas con otros diseños, puede atribuirse a la dinámica contrapuesta de sus aspas, mientras una resiste el flujo del viento, la otra u otras se mueven en la misma dirección que éste [4].

Figura 2: Coeficiente de potencia vs velocidad del fluido [3].



Los valores de eficiencia varían ampliamente debido a la falta de consenso y a las distintas configuraciones del rotor Savonius, “como los de 2 palas, 3 palas, multipala, helicoidales y los de varios pisos, como se muestra en la figura 2”. La eficiencia también depende del diámetro (D), la altura (H), y el espaciado (e) entre las palas [3]. En la figura 3 se presenta los distintos tipos de rotores Savonius:

Figura 3: Tipos de rotores Savonius [3].



No obstante, estas turbinas de viento gozan de gran popularidad debido a su capacidad para funcionar eficazmente incluso con corrientes de aire de baja intensidad [5]. La micro-generación eléctrica favorece ampliamente el uso de estos dispositivos, dado que su construcción resulta relativamente accesible y económica. Además, tanto su instalación como su mantenimiento requieren menos esfuerzo en comparación con otras variantes de generadores eólicos [6].

El presente estudio se centra en el desarrollo de un prototipo de microturbina hidráulica tipo Savonius, fabricada mediante manufactura aditiva utilizando PLA (ácido poliláctico).

La investigación abarca desde el diseño y la fabricación del prototipo hasta la realización de pruebas experimentales para evaluar su rendimiento. A través de estas pruebas, se mide la eficiencia del prototipo en la generación de energía eléctrica, analizando su capacidad para convertir la energía hidráulica en energía eléctrica.

II. DESARROLLO DEL ARTÍCULO

A. NECESIDAD PRIMITIVA

Diseñar e implementar un prototipo de microturbina hidráulica tipo Savonius utilizando la manufactura aditiva con PLA para generar energía eléctrica, la necesidad de desarrollar tecnologías sostenibles y cambiar el ámbito a ser micro o pequeñas generaciones de energía eléctrica es cada vez más urgente debido a la creciente conciencia sobre el impacto ambiental y los límites de los recursos energéticos tradicionales.

B. ANÁLISIS DE LA NECESIDAD PRIMITIVA

El análisis de la necesidad primitiva revela que la generación de energía hidráulica es una alternativa atractiva para la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y la mitigación del cambio climático. Además, la energía hidráulica puede ser generada en pequeña escala, lo que la hace adecuada

para comunidades rurales y áreas remotas que no tienen acceso a redes eléctricas convencionales.

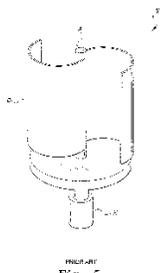
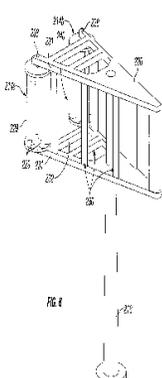
C. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

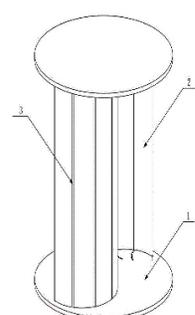
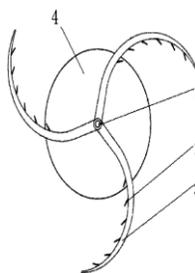
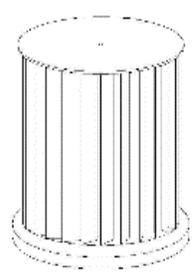
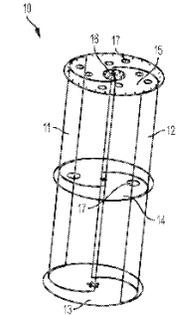
A pesar de las ventajas de la energía hidráulica, la tecnología actual es limitada por su complejidad y costos. La fabricación de componentes hidráulicos tradicionales requiere materiales costosos y procesos laboriosos, lo que aumenta significativamente el costo final. Además, la mayor parte de las tecnologías hidráulicas actuales requieren de grandes cantidades de agua y de una gran cantidad de energía para su funcionamiento, lo que puede ser un problema en áreas donde el agua es escasa.

D. REVISIÓN DE SOLUCIONES EN EL PASADO

La siguiente tabla 1, presenta un resumen de las patentes más relevantes encontradas, incluyendo un dibujo de la patente con su respectiva referencia y un breve resumen del contenido de cada una. Esta información proporcionará una visión general de las innovaciones y avances previos en el campo, lo que permitirá identificar oportunidades para mejorar y adaptar la tecnología a las necesidades específicas de este proyecto.

Tabla 1: Patentes.

#PATENTE	RESUMEN	FIGURA DE PATENTE
US20170107972A1	La turbina vertical está equipada con una carcasa de paletas giratorias montada entre un disco de leva superior y un disco de base inferior, con el disco de base montado en un eje [7].	
US8167533B2	Este sistema tiene un conjunto de soporte y una estructura exterior que rodea dicho conjunto. La estructura se estrecha desde una región trasera más ancha hacia una región delantera más estrecha. Una o más turbinas están montadas en el soporte cerca de la región trasera o en el punto más ancho [8].	

<p>CN108661856B</p>	<p>En la figura se muestra una turbina Savonius, incluye una placa terminal superior y una inferior dispuestas simétricamente a través del eje. Las palas de turbina están divididas en dos grupos, cada uno con una pala estática y cuatro palas móviles, conectadas mediante varillas de soporte para formar una superficie semicilíndrica [9].</p>	
<p>CN201963471U</p>	<p>El modelo de la turbina, caracteriza por un diseño que incluye un eje giratorio fijado en un disco base, con palas dispuestas uniformemente en la periferia del disco y cuyas superficies laterales se unen al eje giratorio. Además, cuenta con unas hojas salientes donde llega a captar mejor el fluido para el impulso del rotor [10].</p>	
<p>KR20110136262A</p>	<p>La invención aborda, la instalación de alas fijas alrededor de los discos, comprimiendo así la velocidad del viento al bloquear el viento. Este acelerador mejorara la velocidad del viento en un área más pequeña que el área total del viento [11].</p>	
<p>US10704532B2</p>	<p>Esta turbina Savonius compuesto por al menos dos palas de turbina curvas y al menos dos discos de soporte conectados a estas palas. Esta turbina tiene dos conjuntos de rotores con palas dispuestas para girar en direcciones opuestas, aumentando así su eficiencia [11].</p>	

Fuente: Elaboración propia.

E. ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

Para el análisis de factibilidad se brinda diversas alternativas de solución que sirven para seleccionar la mejor opción mediante la matriz de decisión:

- **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.

Figura 4: Alternativa 1.

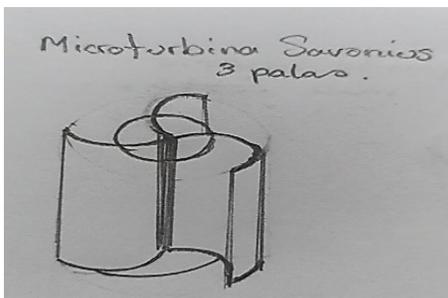


Fuente: Elaboración propia.

- **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.

Figura 5: Alternativa 2.



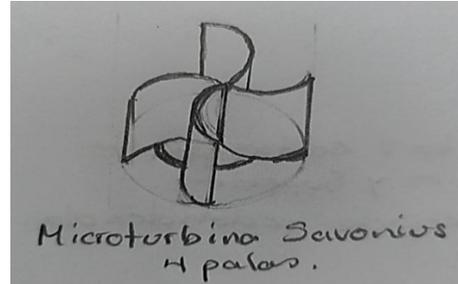
Fuente: Elaboración propia.

- **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.

Figura 6: 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.

Figura 7: Alternativa 4.

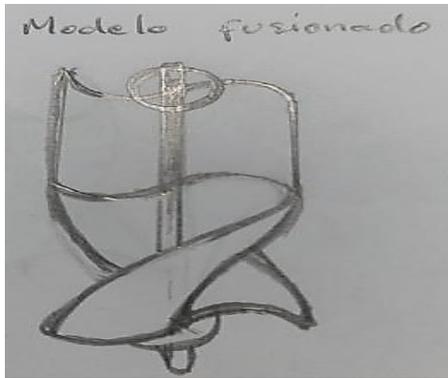


Fuente: Elaboración propia.

- **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.

Figura 8: Alternativa 5.

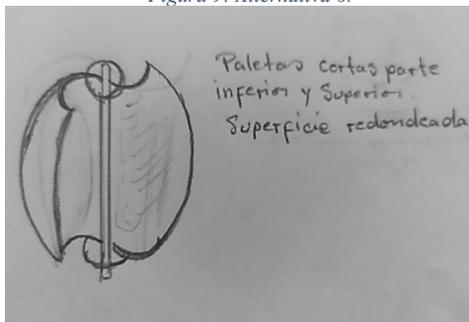


Fuente: Elaboración propia.

• **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.

Figura 9: Alternativa 6.



Fuente: Elaboración propia.

F. MATRIZ DE DECISIÓN

La presente matriz de decisión tiene como objetivo seleccionar la configuración óptima del diseño de una microturbina Savonius que será implementada mediante impresión 3D utilizando fabricación aditiva con material PLA. 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.

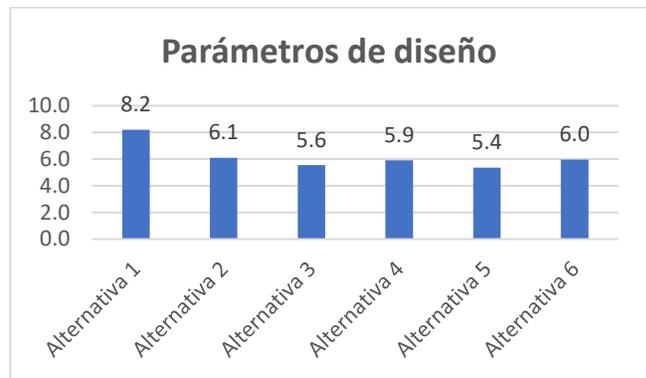
- P3. Espacio ocupado.
- P4. Complejidad de la construcción y montaje.
- P5. Potencia requerida.
- P6. Usabilidad y seguridad.
- P7. Durabilidad.
- P8. Ergonomía y estética.

Tabla 2: Matriz de decisión.

	Parámetros de diseño								Total
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
	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 10: Selección de alternativas.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 10 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.

III. DISEÑO Y FABRICACIÓN

A. CÁLCULOS PARAMÉTRICOS DEL SISTEMA

En este subcapítulo presentamos los cálculos necesarios previos al diseño de la microturbina hidráulica Savonius, se empieza realizando el cálculo de la relación de superposición de la microturbina hidráulica Savonius:

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

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].

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

El cálculo de la área barrida del rotor de la microturbina, 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 mediante la ecuación:

$$A_F = 2R \times H$$

Donde:

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

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, se realizará de la siguiente forma:

$$D_p = 1.1 \times D$$

Donde:

D_p : Diámetro del plato, [m].

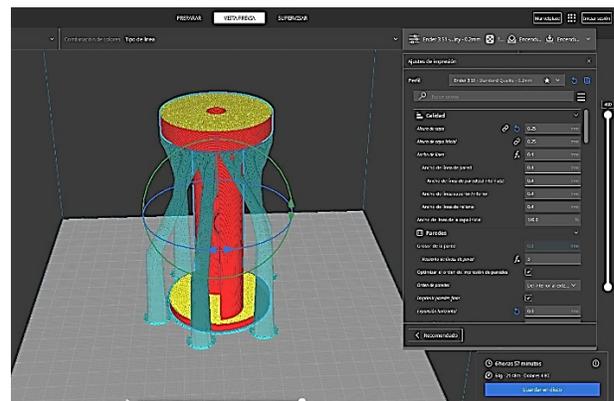
D : Diámetro del rotor, [0.6 cm = 0.06m].

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

B. FABRICACIÓN DEL ROTOR CON PLA

La figura 11 muestra la configuración de impresión 3D para el rotor de una microturbina hidráulica tipo Savonius utilizando una impresora 3D marca Ender modelo 3 S1 con material ácido poliláctico (PLA).

Figura 11: Configuración para la impresión 3D con PLA.



Fuente: Elaboración propia.

El rotor de la microturbina hidráulica, impreso con material ácido poliláctico (PLA), tendrá una apariencia estética tal como se observa en la figura 12. Este material no solo proporciona un

acabado visual atractivo, sino que también asegura durabilidad y precisión en los detalles del diseño del rotor.

Figura 12: Rotor de la microturbina hidráulica Savonius.

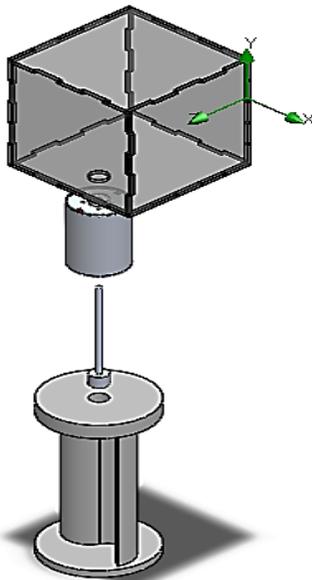


Fuente: Elaboración propia.

ENSAMBLAJE DE LA MICROTURBINA

La figura 13 muestra el diseño en SolidWorks mostrándose de una forma despiece de la microturbina hidráulica Savonius, indicando las diferentes partes que componen la microturbina, incluyendo el rotor fabricado en PLA y los componentes de ensamble necesarios para su construcción.

Figura 13: Despiece de la microturbina Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

La figura 14 presenta la microturbina hidráulica Savonius ya fabricada y ensamblada. Se observa el rotor de PLA, así como el plástico protector utilizado para resguardar el generador eléctrico de posibles filtraciones de agua. Esta figura muestra el prototipo en su estado final, listo para su operación.

Figura 14: Microturbina hidráulica Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para iniciar las pruebas experimentales de la microturbina hidráulica Savonius elaborada, se presenta el prototipo en la figura 15. Este prototipo incluye un rotor fabricado con PLA, un generador eléctrico de corriente continua, un medidor de voltaje y un protector interno para el generador eléctrico.

Figura 15: Pruebas experimentales.



Fuente: Elaboración propia.

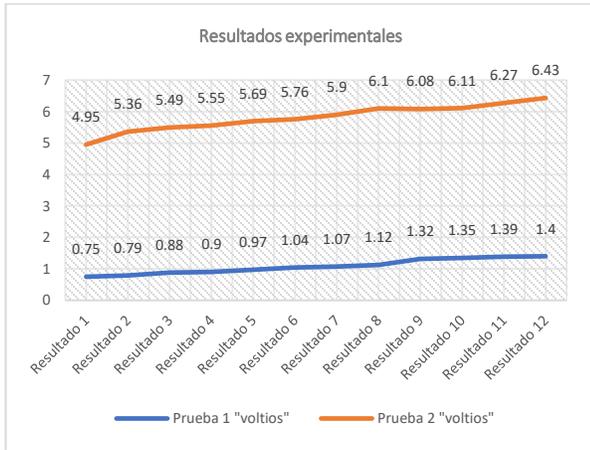
Los resultados de las pruebas experimentales se muestran en la tabla 3:

Tabla 3: Resultados de las pruebas experimentales.

Descripción	Prueba 1			Prueba 2		
	Voltios	Potencia	Eficiencia	Voltios	Potencia	Eficiencia
Resultado 1	0.75	1.50	0.29	4.95	9.90	0.64
Resultado 2	0.79	1.58	0.31	5.36	10.72	0.69
Resultado 3	0.88	1.76	0.34	5.49	10.98	0.71
Resultado 4	0.90	1.80	0.35	5.55	11.10	0.72
Resultado 5	0.97	1.94	0.38	5.69	11.38	0.74
Resultado 6	1.04	2.08	0.40	5.76	11.52	0.74
Resultado 7	1.07	2.14	0.41	5.90	11.80	0.76
Resultado 8	1.12	2.24	0.43	6.10	12.20	0.79
Resultado 9	1.32	2.64	0.51	6.08	12.16	0.79
Resultado 10	1.35	2.70	0.52	6.11	12.22	0.79
Resultado 11	1.39	2.78	0.54	6.27	12.54	0.81
Resultado 12	1.40	2.80	0.54	6.43	12.86	0.83

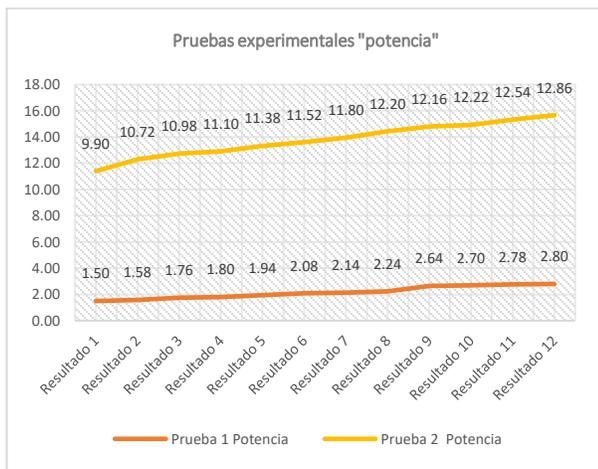
Fuente: Elaboración propia.

Figura 16: Resultados prueba 1 y 2 "voltaje".



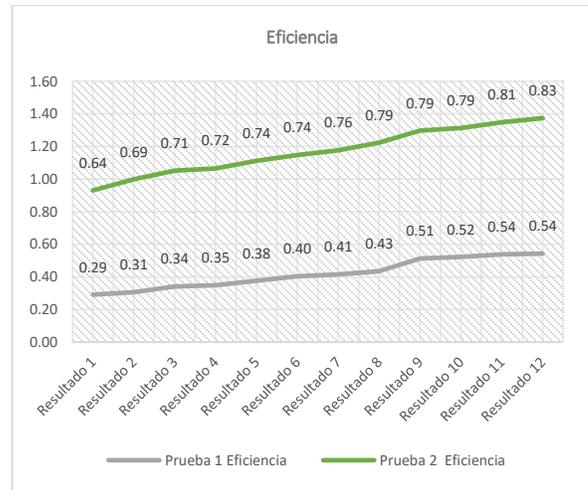
Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: Resultados pruebas experimentales "potencia".



Fuente: Elaboración propia.

Figura 18: Resultados de la eficiencia de la microturbina Savonius.



Fuente: Elaboración propia.

EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para determinar la inversión en la microturbina hidráulica tipo Savonius si resulta rentable, se realizará un análisis financiero que compare los costos de la inversión con los beneficios que se pueda obtener a lo largo plazo:

- Costos de inversión

En el presente proyecto, los costos reales se desglosan en 2 categorías principales: el costo de material, que asciende a S/. 2,644.00 soles y el costo de fabricación representan S/. 781.20 soles; y, en consecuencia, el costo total de la fabricación de la microturbina hidráulica Savonius, alcanza un total de S/. 3,425.20 soles.

- Valor actual neto

Para calcular el valor actual neto (VAN) en el proyecto de la microturbina hidráulica, se utilizará la ecuación:

$$VAN = -K_0 + \sum_{i=1}^n \frac{fc_i}{(1 + D)^i}$$

Donde:

VAN: Valor actual neto.

K_0 : Inversión o capital inicial, [S/. 3,425.20].

fc_i : Flujo de caja en el año i, [S/. 1,000.00].

D : Tasa de descuento, [10% = 0.10].

n : Número de periodos, [5 años].

$$VAN = 365.58$$

El VAN es de S/. 365.59. Este valor positivo indica que el proyecto es rentable, ya que los flujos de caja futuros superan la inversión inicial.

- Tasa interna de retorno

La tasa interna de retorno (TIR) se calcula aplicando la ecuación:

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

Donde:

VAN: Valor actual neto. [365.58].

K_0 : Inversión o capital inicial, [S/. 3,425.20].

fc_i : Flujo de caja en el año i , [S/. 1,000.00].

D : Tasa de descuento, [10% = 0.10 y 20% = 0.20].

n : Número de periodos, [5 años].

Para una tasa de descuento de baja de 10%

$$\sum_{i=1}^n \frac{fc_i}{(1 + TIR)^i} = 3,790.78$$

Ahora se procede a calcular el TIR tasa baja para un 10 %

$$VAN_{10\%} = -3,425.20 + 3,790.78 = 365.58$$

Para una tasa de descuento alto de 20%

$$\sum_{i=1}^n \frac{fc_i}{(1 + TIR)^i} = 2,990.60$$

Ahora se procede a calcular el TIR para un 20 %

$$VAN_{20\%} = -3,425.20 + 2,990.60 = -434.60$$

Utilizamos la interpolación lineal para encontrar una tasa de descuento más precisa que hace que el VAN sea cero.

$$TIR = \text{Tasa baja} + \left(\frac{VAN \text{ baja}}{VAN \text{ baja} - VAN \text{ alta}} \right) \times (\text{Tasa alta} - \text{Tasabaja})$$

$$TIR = 0.10 + \left(\frac{365.58}{365.58 - (-434.60)} \right) \times (0.20 - 0.10)$$

$$TIR = 0.10 + \left(\frac{365.58}{798.10} \right) \times 0.10$$

$$TIR = 0.10 + 0.0458$$

$$TIR = 0.1458$$

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es aproximadamente 14.10%. Esta tasa es mayor que la tasa de descuento utilizada (10%), lo que refuerza la viabilidad del proyecto al indicar una rentabilidad superior al costo del capital.

- Análisis de costo – beneficio

Para el cálculo de costo-beneficio, se utilizará la ecuación:

$$C/B = \frac{\text{Beneficio neto}}{\text{Costos de inversión}}$$

Donde:

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

Beneficio neto: S/. 5,000.00 en 5 años

Costo de inversión: S/. 3,425.20

$$C/B = \frac{5,000.00}{3,425.20} = 1.46$$

El valor del costo-beneficio es 1.46, esto significa que, por cada sol invertido, se obtiene un retorno de S/. 1.46, lo que también indica la rentabilidad del proyecto.

El análisis económico muestra que el proyecto de la microturbina hidráulica tipo Savonius es viable y rentable con un VAN positivo de S/. 365.59, una TIR del 14.10%, y un costo-beneficio de 1.46. Estos resultados sugieren que invertir en este proyecto generará beneficios económicos y es una opción atractiva desde el punto de vista financiero.

RECOMENDACIONES

- Se debe optimizar el diseño del rotor y otros componentes para mejorar la eficiencia en la conversión de energía cinética del agua en energía mecánica, explorando diferentes materiales y formas.
- En cuanto a la tecnología de fabricación, se recomienda considerar el uso de materiales más resistentes que el PLA y mejorar las técnicas de impresión 3D para aplicaciones a largo plazo.
- Para la implementación y escalabilidad, se sugiere desarrollar un plan de instalación en áreas remotas y capacitar al personal local, evaluando la producción en masa.

- Finalmente, fomentar la colaboración con instituciones académicas, ONG y comunidades locales para promover el uso y desarrollo continuo de esta tecnología.

IV. CONCLUSIONES

- Mediante los cálculos precisos aseguró una construcción robusta y eficiente para maximizar la conversión de energía cinética del agua.
- La fabricación del rotor con tecnología aditiva y PLA fue exitosa y eficiente, logrando alta precisión y calidad mediante una impresora 3D Ender 3 S1 y configuraciones específicas.
- Las pruebas experimentales, simulaciones CFD y análisis estructural confirmaron la eficiencia y funcionalidad del prototipo en la generación de energía eléctrica, validando el diseño.
- La evaluación técnica y económica del prototipo demostró su viabilidad, con un costo total de S/. 3,425.20, un VAN de S/. 365.59, y una TIR de 14.10%, indicando rentabilidad y sostenibilidad.

V. REFERENCIAS

- [1] S. Worasinchai and K. Suwannakij, "Performance characteristics of the Savonius turbine," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Feb. 2018. doi: 10.1088/1757-899X/297/1/012056.
- [2] W. Łyskawiński, K. Kowalski, and R. M. Wojciechowski, "Experimental Assessment of Suitability of Darrieus and Savonius Turbines for Obtaining Wind Energy from Passing Vehicles," *Energies* 2024, Vol. 17, Page 1558, vol. 17, no. 7, p. 1558, Mar. 2024, doi: 10.3390/EN17071558.
- [3] C. Diago Vidal, "Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico," *Universitat Politècnica de València*, Valencia, 2019.
- [4] Z. Driss, O. Mlayeh, S. Driss, D. Driss, M. Maaloul y M. S. Abid, "Study of the bucket design effect on the turbulent flow around unconventional Savonius wind rotors", *Energy*, vol. 89, pp. 708-729, 2015.
- [5] S. Roy y U. K. Saha, "Wind tunnel experiments of a newly developed two-bladed Savonius-style wind turbine", *Applied Energy*, vol. 137, p. 117-125, 2015.
- [6] G. Ferrari, D. Federici, P. Schito, F. Inzoli y R. Mereu, "CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis", *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 722-734, 2017.
- [7] W. Husam and T. Allan, "US20170107972A1 - Vertical wind turbine - Google Patents," *Google Patentes*. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/US20170107972A1/en?q=\(savonius+turbine\)&oq=savonius+turbine](https://patents.google.com/patent/US20170107972A1/en?q=(savonius+turbine)&oq=savonius+turbine).
- [8] L. Dan, B. Michael, G. Colin, and B. Nick, "US8167533B2 - Wind energy system," *Google Patentes*. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/US8167533B2/en?q=\(savonius+turbine\)&oq=savonius+turbine](https://patents.google.com/patent/US8167533B2/en?q=(savonius+turbine)&oq=savonius+turbine).
- [9] Ji Yan et al., "CN108661856B - Efficient vertical-axis Savonius wind turbine," *Google Patentes*. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/CN108661856B/en?q=\(savonius\)&oq=savonius++&page=6](https://patents.google.com/patent/CN108661856B/en?q=(savonius)&oq=savonius++&page=6).
- [10] Zhang Jeff, Du Yipeng, Hu Guang, Song Xiaowen, and He Hongbin, "CN201963471U - Blade of magnetic levitation savonius rotor wind driven generator," *Google Patentes*. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/CN201963471U/en?q=\(Savonius+rotor\)&oq=Savonius+rotor&page=4](https://patents.google.com/patent/CN201963471U/en?q=(Savonius+rotor)&oq=Savonius+rotor&page=4).
- [11] Perdomo, C. M. V., Salazar, A. O., Velasquez, M. N. M., & Patiño, A. P. (2018). Estado del arte; del uso de la eichhornia crassipes en la fitorremediación de aguas residuales industriales. *Ingenio Magno*, 9(2), 105-130.
- [12] Doohwan Kim, "KR20110136262A - Wind-acceleration device for windmill," *Google Patentes*. Accessed: May 29, 2024. [Online]. Available: [https://patents.google.com/patent/KR20110136262A/en?q=\(Savonius+rotor\)&oq=Savonius+rotor&page=9](https://patents.google.com/patent/KR20110136262A/en?q=(Savonius+rotor)&oq=Savonius+rotor&page=9).