



Escuela de Ingeniería
Ingeniería Civil Eléctrica

Comparación experimental de desempeño entre dos turbinas hidrocinéticas de eje vertical.

Kevin Samir Milla Rubio
Profesor Guía: Daniel Casagrande
Profesor Co-guía: Enrique Ortiz
Comisión Evaluadora: Alfonso Ehijo
Gustavo Castillo

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico

Rancagua, Chile

Enero, 2024

Agradecimientos

Agradezco de corazón a mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional en el desarrollo de mi carrera. También agradezco a los profesores Don Daniel Casagrande y Don Enrique Ortiz, junto al equipo del laboratorio pertenecientes a Fábrica digital O'Higgins, por proporcionarme el espacio y las herramientas necesarias para llevar a cabo este trabajo.

Tabla de Contenidos

Agradecimientos	2
Abreviaturas	5
Resumen	6
1. Introducción	7
2. Objetivos	9
2.1 Objetivo general	9
2.2 Objetivos específicos	9
2.3 Alcances y Limitaciones	9
3. Marco Teórico y Revisión de Literatura	10
3.1 Turbinas Hidrocinéticas	10
3.2 Elección de Generador	15
3.3 Potencia Generada por Turbinas Hidrocinéticas	16
3.4 Aspect Ratio	18
3.5 Overlap Ratio	18
3.6 Blockage Ratio	18
3.7 Coeficiente de potencia	19
3.8 Ley de Betz	19
3.9 Tip Speed Ratio	19
3.10 Coeficiente de torque	20
3.11 Desempeño de Turbinas Hidrocinéticas	21
4. Marco Metodológico	22
4.1 Medición de Voltaje y Potencia	22
4.2 Medición de Torque	23
4.3 Medición de Velocidad Angular	23
4.4 Medición de velocidad del agua	24
5. Diseño y Construcción del Experimento	26
5.1 Diseño y Construcción del Canal	28
5.2 Diseño y Fabricación de Turbinas Hidrocinéticas	29
5.3 Generador	30
5.4 Montaje de Turbina y Generador	31
6. Adquisición de Datos	33

7.	Análisis de Resultados.....	35
8.	Conclusión.....	37
	Referencias.....	39
	Anexos.....	41
10.1	Anexo 1. Carga Resistiva Conexión Triángulo.....	41
10.2	Anexo 2. Sistema de Medición de Torque Mecánico en Turbinas.....	42
10.3	Anexo 3. Vista Lateral de Canal.....	43
10.4	Anexo 4. Diseño de Turbinas Descartadas.....	44
10.5	Anexo 5. Montaje de Turbinas.....	45
10.6	Anexo 6. Sistema de medición del Experimento.....	46

Abreviaturas

TSR: *Tip Speed Ratio.*

IEA: *International Energy Agency.*

CEN: Coordinador Eléctrico Nacional.

TH: Turbinas Hidrocinéticas.

AR: *Aspect Ratio.*

OR: *Overlap Ratio.*

BR: *Blockage Ratio.*

Resumen

En Chile y el resto del mundo se encuentra en una etapa de transición energética, en la que se busca que la matriz energética este compuesta en una gran proporción de fuentes de energías renovables. La topografía de Chile se caracteriza por tener una cantidad considerable de ríos y canales de riegos los cuales poseen un gran potencial en la generación de energías renovables. En este trabajo, se realiza experimentalmente la comparación en el desempeño de dos turbinas hidrocínicas (TH) con el objetivo de determinar cuál presenta mejor rendimiento para aplicaciones en canales de riego. Se realiza una revisión del estado del arte, donde se encuentra que los diseños más estudiados en aplicaciones en canales son las turbinas de eje vertical específicamente las del tipo Savonius. Para la realización de los experimentos, se diseña y fabrica un canal rectangular a pequeña escala y dos turbinas hidrocínicas, para probar en condiciones controladas el rendimiento de las turbinas. Donde se determina que los diseños de mejor operación para el canal en específico son las turbinas tipo Savonius de cuatro hélices, convencional y helicoidal. En la comparación, se encuentra que la turbina Savonius convencional de cuatro hélices presenta un mejor rendimiento en coeficiente de potencia en un 14,6% respecto a la turbina helicoidal. En base a los resultados obtenidos, se concluye que su aplicabilidad en canales de riego a escala real resulta inviable con la tecnología actual, debido a la baja eficiencia presentes en los diseños.

Palabras clave: turbinas hidrocínicas, canales de riego, energías renovables, rendimiento en turbinas.

1. Introducción

Según las proyecciones del World Energy Outlook 2023, elaborado por el International Energy Agency (IEA), se anticipa un aumento significativo, del 80% al 150%, en la demanda mundial de electricidad para el año 2040 [1]. Destaca que, en el año 2020, solo el 30% de la energía eléctrica producida a nivel global provino de fuentes renovables. Sin embargo, en Chile este porcentaje asciende, al 63,7% de su capacidad instalada para el año 2023 [2]. Aproximándose bastante a las metas establecidas por la política energética del país, para año 2050 [3]. Junto a la hoja de ruta de transición acelerada, propuesta por el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) para el año 2030 [4]. Las cuales proponen respectivamente, alcanzar un 70% y un 100% de generación de energía a partir de fuentes renovables. Las políticas nacionales e internacionales buscan mitigar los efectos del cambio climático originados por las emisiones de gases de efecto invernadero. Las estimaciones del aumento en la demanda energética subrayan la urgencia de innovar en sistemas los sistemas de generación para reducir la dependencia energética de combustibles fósiles para fomentar el desarrollo y autonomía de las comunidades.

De las tecnologías emergentes relacionadas a las energías renovables no convencionales existe la generación de energía eléctrica partir del uso de turbinas hidrocínéticas (TH). Estas turbinas se definen como dispositivos electromecánicos que obtienen la energía cinética a partir del flujo del agua provenientes de ríos, canales artificiales o mareas oceánicas, sin la necesidad de implementar una represa [5]. Esta tecnología se caracteriza por tener un impacto ambiental mínimo y un bajo costo, lo que presenta una gran oportunidad en el desarrollo de sistemas sustentables aislados a la red eléctrica nacional, permitiendo autoabastecer comunidades rurales como puede ser los canales de riego, utilizados principalmente en la agricultura o comunidades aisladas a la red.

Para determinar la turbina más adecuada se realiza una revisión bibliográfica de los tipos de turbinas hidrocínéticas existentes, donde se pueden clasificar en dos tipos esenciales, turbinas de eje vertical y horizontal. Estos dos tipos de turbinas corresponden a la orientación que tiene el flujo del agua respecto al eje de rotación de la turbina (Figura 1). Se determina que, para la

implementación en canales de riego, las turbinas de eje vertical son preferibles debido a que presentan un diseño de montaje más simple y requieren de menor mantención.

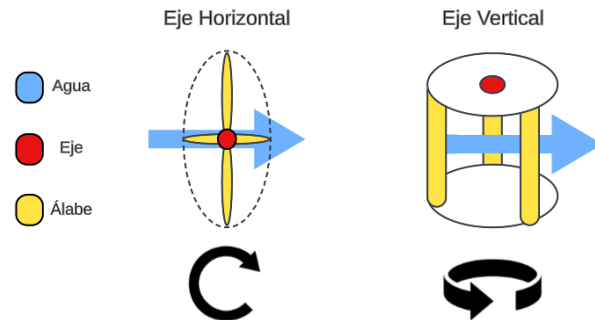


Figura 1. Configuraciones del eje en turbinas hidrocínéticas, elaboración propia.

Las investigaciones se enfocan principalmente en análisis computacionales y experimentales para evaluar la capacidad de las TH en la conversión de energía hídrica extraída del agua en potencia mecánica. La eficiencia de este proceso está estrechamente vinculada al diseño de la turbina, lo que motiva a la convergencia de estudios hacia la propuesta y evaluación de diseños específicos. Entre los diversos diseños identificados, se seleccionan los diseños correspondientes a las TH de eje vertical de tipo Savonius. El propósito de este trabajo es comparar el rendimiento de los diseños funcionales y determinar cuál de ellas es más adecuada para su implementación en canales. Para llevar a cabo su evaluación, se diseñan, fabrican y prueban de forma experimental las turbinas en un canal abierto a pequeña escala. En este entorno controlado, se mide el desempeño de las turbinas a través de parámetros como la potencia generada, el coeficiente de potencia, el coeficiente de torque y el *Tip Speed Ratio* (TSR) para poder caracterizar la eficiencia de las turbinas, con el objetivo de proporcionar resultados concluyentes sobre su viabilidad y eficacia de los diseños.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Comparar experimentalmente en laboratorio el desempeño de dos turbinas hidrocínéticas de eje vertical, en un canal de sección rectangular a pequeña escala.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica de las turbinas hidrocínéticas de eje vertical existentes.
- Diseñar y fabricar las turbinas hidrocínéticas determinando los parámetros dimensionales y adimensionales que permitan su correcto funcionamiento de las turbinas en un rango medición aceptable para el canal considerado.
- Definir e implementar los sistemas de medición y adquisición de datos, para la evaluación de su desempeño.
- Comparar y analizar el rendimiento de las turbinas, a partir de la caracterización del coeficiente de potencia, coeficiente de torque, *Tip Speed Ratio* y su potencia eléctrica producida.

2.3 Alcances y Limitaciones

- Se realizan los experimentos en un canal a escala utilizando agua como fluido.
- El análisis se centra exclusivamente en aplicaciones en canales artificiales para riego.
- La eficiencia del generador se asume de un 100%, en la conversión de potencia mecánica a potencia eléctrica.
- Las turbinas son diseñadas e impresas en 3D.

3. Marco Teórico y Revisión de Literatura

3.1 Turbinas Hidrocinéticas

El presente estado del arte busca identificar y seleccionar dos diseños de turbinas que se caracterizan por tener un diseño simple, un costo relativamente bajo y que su implementación no implique alterar significativamente el canal.

En el año 2009 se hizo una revisión bibliográfica sobre turbinas TH [6], donde se clasificaron las diferentes tipologías de turbinas, utilizadas principalmente en ríos y océanos. En el artículo se puede destacar un cuadro conceptual que clasifica las T.H, según su tipo de rotor, como se muestra en la Figura 2, donde en la sección de eje vertical explica los tipos de turbinas más frecuentes, mientras que la sección del diagrama llamada eje horizontal, se aprovecha de presentar en el mismo esquema los tipos de montaje en el que las turbinas pueden estar orientadas. El artículo además ilustra las diferentes orientaciones del eje del rotor pueden ser instalada (Figuras 2 y 3).

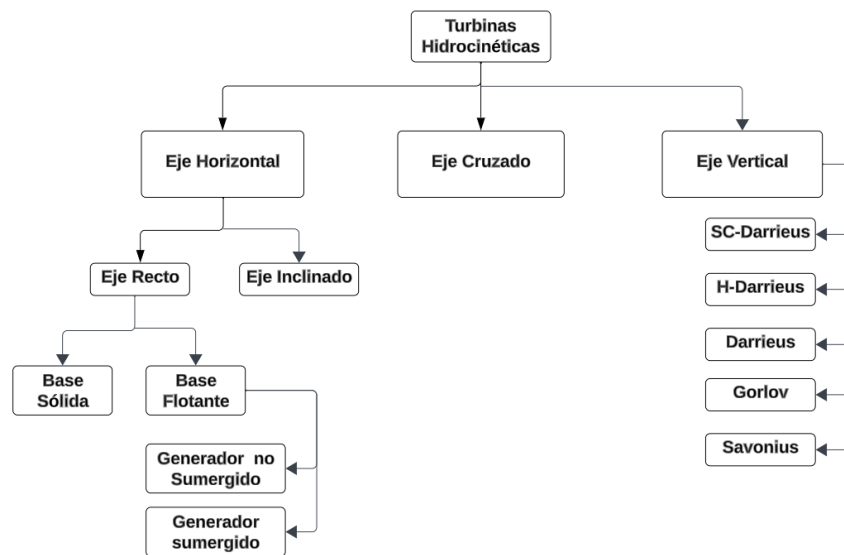


Figura 2. Clasificación de rotores de turbinas Hidrocinéticas, adaptado de [6].

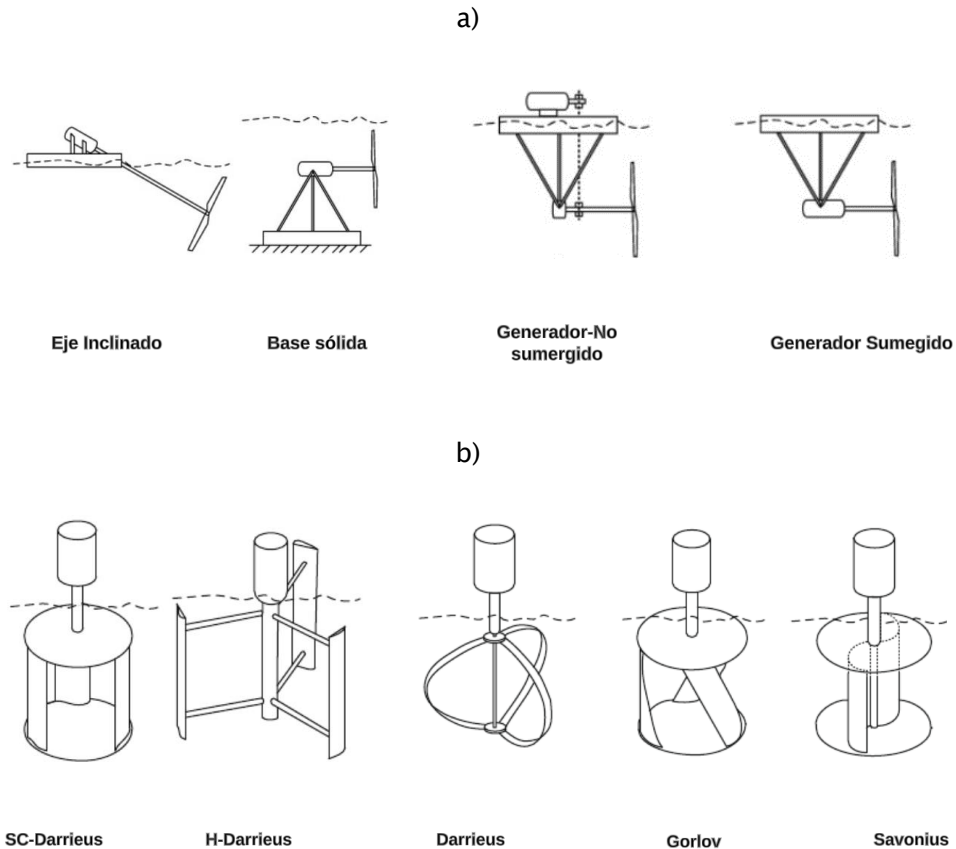


Figura 3. Configuraciones del eje. a) Turbinas de eje Horizontal. b) Turbinas de eje Vertical.

El artículo sugiere algunas ventajas que poseen las TH de eje vertical respecto a las de eje horizontal. Establece, por ejemplo, que en las turbinas de eje vertical es más fácil acoplar el rotor con el generador, ya que, para el caso de eje horizontal se debería buscar un engranaje de ángulo recto que conecte el rotor y el generador, significando un costo adicional. Otra de las ventajas de las turbinas del eje vertical es la facilidad para montar el generador, debido a que puede ubicarse directamente fuera del agua sin tener la necesidad de que el generador deba estar sumergido, como lo es en el caso de las turbinas de eje horizontal, esto reduce la complejidad de construcción, la cantidad de fallas, su mantención y por consecuencia, su costo [7]. Estudios posteriores sostienen lo anterior y añaden que las turbinas el eje vertical logran ser más silenciosas y requieren de menor mantención [8], [9]. Se han realizado varias comparaciones donde caracterizan las desventajas que poseen las turbinas de eje vertical, principalmente estas presentan menor eficiencia y torque de arranque, sin embargo, siguen siendo preferibles para

aplicaciones en ríos y canales donde hay bajos niveles de agua [10]. Su simple diseño e instalación, conlleva a un bajo coste y poca intervención en los canales, hacen este tipo de turbinas ideales para implementar.

Las TH de eje vertical del tipo Savonius han sido muy populares en la utilización en canales, se han hecho varios experimentos donde se evalúa su desempeño modificando determinados parámetros adimensionales, como el *Aspect Ratio* (AR) y el *Overlap Ratio* (OR) [11]. Mientras que el primer parámetro mencionado, corresponde a la relación entre la altura de las hélices de la turbina respecto a su radio, el *Overlap Ratio*, se define como la relación del espacio entre los álabes en el centro con el radio de la turbina. En su diseño, también se ha comparado su rendimiento aplicando variaciones en su diseño [12]. Por ejemplo, en el año 2022 se realizó una comparación experimental en el desempeño de dos turbinas [13], entre una normal de dos hélices y la otra de tres, donde se concluyó que la turbina de dos hélices presenta un mejor desempeño. Para las turbinas hidrocínéticas existen una gran variedad de diseños posibles, las cuales han sido comparadas en diversos estudios. En la Figura 4, se presentan más ejemplos de estudios experimentales hacia la turbina Savonius con variaciones en su diseño.



Figura 4. Estudios experimentales en el diseño de turbina Savonius. **a)** Número de Hélices [14], **b)** Proporción de Hélices [15], **c)** Forma de Hélices [16], **d)** Turbina con dos Niveles [17].

En la Figura 4, letra a), se analizó el desempeño de turbinas de 2, 3, 4, 6 y 8 hélices concluyendo que la turbina Savonius de 6 hélices fue la de mejor desempeño. En la letra b) se hizo un análisis computacional entre la turbina Savonius normal con dos diseños nuevos de arco semicircular y el otro parabólico, donde este último presentó alrededor de un 12% más de eficiencia respecto al diseño normal. En la letra d), se diseñó una turbina Savonius convencional de dos niveles, donde se concluye que su diseño mejoró en el torque de arranque.

El diagrama de la Figura 5, hace resumen los parámetros de optimización más estudiados que afectan el desempeño en las turbinas hidrocínéticas.

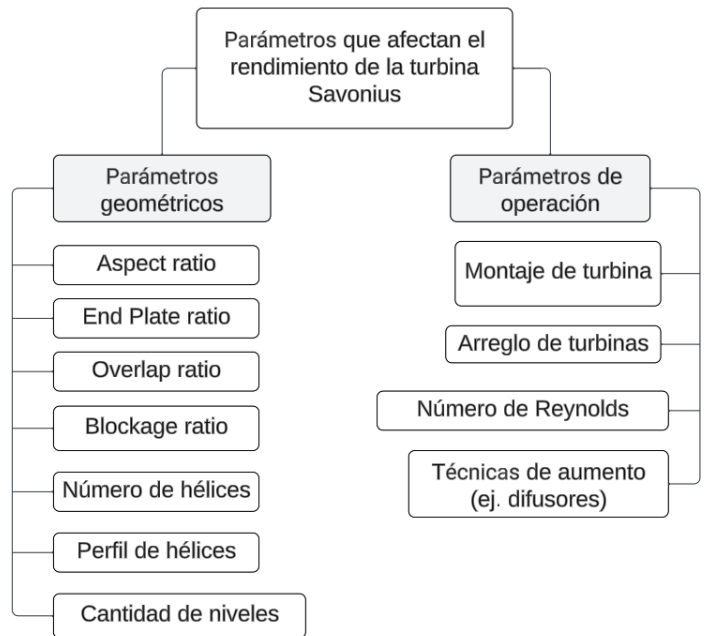


Figura 5. Parámetros que Afectan el Rendimiento, adaptado de [18].

A diferencia de la turbina Savonius convencional, la turbina Savonius helicoidal presenta sus hélices en forma de espiral (helicoidal), muy similar al diseño de la turbina tipo Gorlov. Los estudios convergen a que tiene mejor desempeño en eficiencia respecto al modelo normal [19]. Establecen que en general su diseño presenta una mejora en la generación de potencia, en el torque autoarranque y el torque negativo, principales inconvenientes que posee la turbina Savonius normal [20].

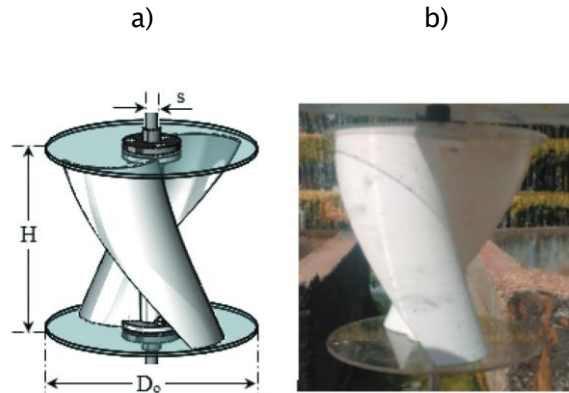


Figura 6. Turbina Savonius Helicoidal [21]. a) Modelo 3D, b) Impresión 3D.

La turbina de eje vertical tipo Gorlov es similar a la turbina Savonius Helicoidal y se caracteriza por tener tres hélices con perfil aerodinámico del tipo NACA [22], los experimentos de rendimiento realizados con este tipo de turbinas son mayoritariamente computacionales y también están enfocados en el diseño como por ejemplo, en el perfil aerodinámico de sus álabes [23] y a su índice de revolución [24], entre otros factores. Una investigación realizada en el año 2022 comparó experimentalmente una turbina tipo Gorlov versus una SC-Darrieus (Figura 7) de idénticas dimensiones [25], en un canal de vidrio de 0,5 m de alto, 0,3 m de ancho y 1,5 m de largo a bajas velocidades, de entre 0,60 y 0,65 m/s. Donde la turbina tipo Gorlov presentó un mejor rendimiento en cuanto a generación de potencia.

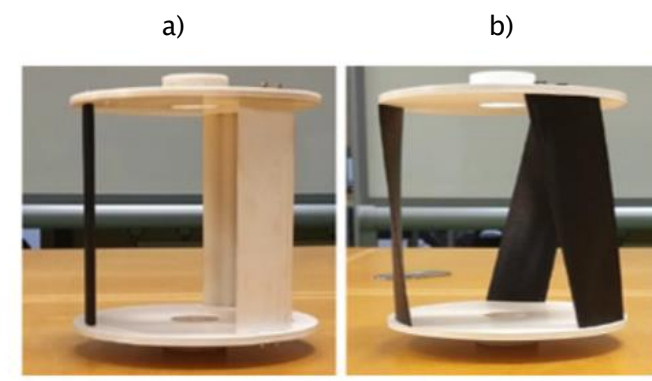


Figura 7. Rotores comparados [25]. a) Turbina SC-Darrieus, b) Turbina Gorlov.

3.2 Elección de Generador

El generador eléctrico permite transformar la energía mecánica de las turbinas en energía eléctrica, la cual representa el rendimiento de la turbina y provee parámetros para medir el desempeño de la turbina en términos de generación de electricidad, por ese motivo, para la realización del experimento, es necesario elegir el generador adecuado para este tipo de sistemas. Trabajos previos indican que la mejor opción en la generación de corriente eléctrica para este tipos de sistemas, es el generador de imanes permanentes síncrono [26], [27]. Además, en el año 2016 se diseñó y fabricó una turbina de eje horizontal junto con un generador síncrono de imanes permanentes para un canal de 2,3 m/s y para una generación de 5 kW [28], en el trabajo se realizó un análisis exhaustivo para la selección un generador que ofreciera las mejores prestaciones para la microrred, proceso resumido en la Figura 8.

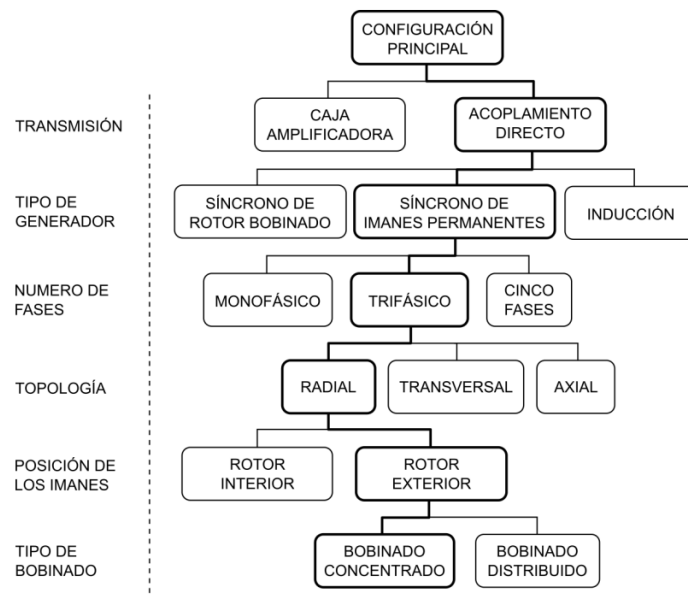


Figura 8. Proceso de Selección del Generador [28].

Del proceso de selección realizado, se puede destacar que los criterios más relevantes para el autor fueron reducir la complejidad del sistema, como, por ejemplo, elegir un acoplamiento directo y evitar usar escobillas, como lo es en el caso de la utilización de un

generador síncrono de rotor bobinado, con el objetivo de que el sistema presente menor cantidad de fallas y menor mantención.

La investigación realizada permite identificar las TH y el generador adecuado para un uso en bajos niveles de caudal (con velocidades inferiores a 2 m/s), en aplicaciones como canales o pequeños ríos, donde los criterios de selección considerados fueron: La simplicidad en el diseño, construcción y montaje, un bajo costo, menor mantención del sistema y baja o nula intervención hacia el canal. Se encontró que las turbinas que mejor cumplen las características mencionadas son las Savonius Helicoidal y Gorlov, mientras que, para el caso del generador la literatura indica que el generador de imanes permanentes es la mejor opción para la conversión de energía mecánica para este tipo de sistemas.

3.3 Potencia Generada por Turbinas Hidrocinéticas.

Las TH obtienen la energía proveniente del agua que fluye a través de ellas, dicha energía proporcionada se puede cuantificar como energía cinética, mediante la fórmula:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde:

m : Corresponde a la cantidad de masa del fluido en kilogramos.

v : Es la velocidad del fluido en metros sobre segundo.

Para dicha cantidad de masa, que en este trabajo se trata de agua, se puede caracterizar su naturaleza a partir de su densidad y volumen. A partir de ello, se establece una relación entre la masa, la densidad y el volumen del fluido, con la siguiente ecuación:

$$m = \rho V$$

En base anterior, se puede redefinir la energía cinética producida por un fluido como:

$$E = \frac{1}{2}(\rho V)v^2 \quad (2)$$

La ecuación (2) establece que la energía obtenida también depende de la cantidad de volumen de fluido que la turbina es capaz de aprovechar. El volumen de agua que se puede obtener como energía, está determinado por el diseño constructivo de las turbinas, como lo es el área transversal que cubren sus alabes dentro del fluido, por lo que resulta conveniente, utilizar la siguiente relación para el volumen:

$$V = Ad \quad (3)$$

Donde A es el área de los alabes del rotor y d es la distancia recorrida por el fluido a través de la turbina. Si a continuación definimos que la distancia recorrida por las partículas de agua va a una velocidad v , en un pequeño intervalo de tiempo Δt se tiene que:

$$d = v\Delta t$$

Entonces, la ecuación (4) se redefine como el cambio del volumen de agua en un tiempo Δt , como sigue:

$$\Delta V = Av\Delta t$$

Por lo que la ecuación (5) para la energía cinética producida por un fluido, la masa Δm quedaría expresada como:

$$E = \frac{1}{2}(\rho Av\Delta t)v^2$$

Ahora, si consideramos que la potencia se define como la energía transferida en un intervalo de tiempo Δt , y dividimos la ecuación anterior por Δt , es posible obtener la energía generada por unidad de tiempo, es decir, la potencia total P_t que una turbina hidrocínéticas puede aprovechar:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

Donde:

ρ : Es la densidad del agua en kilogramo por metro cúbico.

A : Es el área de los álabes de la turbina en el fluido en metros cuadrado.

v : Es la velocidad del fluido en metros sobre segundo.

3.4 Aspect Ratio

El *Aspect Ratio* se define como la relación entre la altura H de la turbina con su diámetro D y se define como:

$$AR = \frac{H}{D}$$

3.5 Overlap Ratio

El *Overlap Ratio* se refiere a la razón entre el espacio e existente entre las hélices en relación con el radio d de la turbina, y es definida como:

$$OR = \frac{e}{d}$$

3.6 Blockage Ratio

El *Blockage ratio* es la relación entre el área frontal que cubre la turbina y el área transversal de agua del canal:

$$BR = \frac{H \cdot D}{h_w \cdot W_c}$$

Donde:

H : es la altura de la turbina en metros.

D : es el diámetro de la turbina en metros.

h_w : corresponde a la profundidad del agua en metros.

W_c : corresponde el ancho del canal en metros.

3.7 Coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia, denotado C_p es un parámetro adimensional que mide la eficiencia con la que las turbinas aprovechan la energía proporcionada por el flujo de agua. Este parámetro expresa el porcentaje de la potencia total disponible que es convertida en una potencia mecánica P_m definida como:

$$P_m = \tau \cdot \omega \quad (4)$$

Donde τ es el par generado por el rotor y ω es su velocidad angular con el que gira la turbina. En base a todo lo anterior, se define el coeficiente de potencia como la relación entre la potencia mecánica generada por el rotor de la turbina y la potencia total extraíble del agua que pasa a través de ella, dicha relación se expresa mediante la ecuación:

$$C_p = \frac{P_m}{P_t} = \frac{\tau \cdot \omega}{\frac{1}{2} \rho A v^3}$$

3.8 Ley de Betz.

El coeficiente de potencia tiene un máximo teórico, debido a que no se puede transformar toda la energía cinética del agua en energía mecánica, pues implicaría frenar su flujo hasta detenerlo, fenómeno muy poco práctico debido a que se necesita que la turbina gire. Por ese motivo, la ley de Betz determina que el máximo coeficiente de potencia extraíble por una turbina del 0,593, es decir, que el máximo porcentaje de energía cinética que puede ser extraída del agua como energía mecánica es alrededor del 59,3% para turbinas sin ducto.

3.9 Tip Speed Ratio

El *Tip Speed Ratio* o TSR es un parámetro adimensional utilizado para medir el desempeño en la conversión a energía eléctrica de la turbina, este parámetro relaciona la velocidad tangencial

de la punta de la hélice, con la velocidad del agua. El TSR matemáticamente se denota λ y se define como:

$$TSR = \lambda = \frac{\omega_r \cdot r}{v}$$

Donde:

ω_r : Es la velocidad angular en la punta del álabe, en radianes sobre segundo.

r : corresponde al radio de la turbina desde el rotor a la punta del álabe, en metros.

v : Es la velocidad del agua incidente, en metros sobre segundo.

En el *TSR*, los parámetros de diseño que mayor influyen en su valor son el número de hélices y el perfil hidrodinámico de las mismas, cabe mencionar que a gran escala y en altos valores de *TSR*, se pueden experimentar problemas como altos niveles de ruido y vibraciones [29].

3.10 Coeficiente de torque

El coeficiente de torque es un parámetro adimensional que permite evaluar el porcentaje de energía aprovechada en términos de torque del rotor, dicho parámetro para el diseño constructivo de la turbina tipo Savonius, Las ecuaciones (5) y (6) permiten graficar el coeficiente de potencia y el coeficiente de torque, ambos función del *Tip Speed Ratio*.

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{4\tau}{\rho D H^2 v^2} \quad (5)$$

$$C_p = C_t \cdot \lambda \quad (6)$$

3.11 Desempeño de Turbinas Hidrocinéticas

Los estudios se centran en la optimización de la eficiencia de las TH, para la mejora y análisis de su desempeño, se analiza típicamente el gráfico de C_p versus TSR (coeficiente de potencia versus *Tip Speed Ratio*), debido a que el coeficiente de potencia varía significativamente en función del TSR , ya que, el C_p depende de la velocidad del fluido y los parámetros de diseño de las turbinas, por ese motivo, el gráfico C_p versus TSR se utiliza para caracterizar su rendimiento en diferentes condiciones de velocidades y diseños, lo que permite identificar el punto de operación de máxima eficiencia en un rango determinado. Por ejemplo, en la Figura 9 se compara en un gráfico de C_p en función del TSR el desempeño de varios tipos de turbinas eólicas, delimitadas por límite de Betz, denotado en la gráfica por la línea de color rojo .

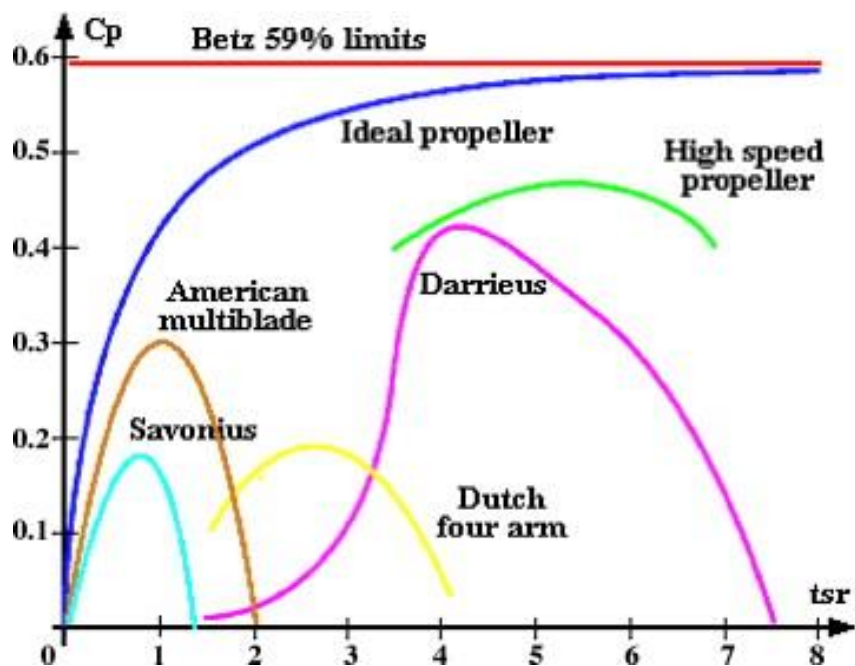


Figura 9. Coeficiente de potencia vs TSR de diferentes turbinas [30].

Los parámetros de medición que permiten caracterizar el rendimiento están determinados por las ecuaciones (5) y (6), de los cuales en la operación de la turbina se destaca: el torque generado por el rotor, la velocidad del fluido, su densidad y la velocidad en revoluciones por minuto en la que gira la turbina.

4. Marco Metodológico.

4.1 Medición de Voltaje y Potencia.

Para la medición del voltaje producido por el generador y la potencia eléctrica de las turbinas, se conecta una carga compuesta por tres resistencias en configuración triángulo, como se aprecia en la Figura 10. Para obtener el voltaje generado y en consecuencia su potencia generada, se cuantifica la potencia generada a partir de la medición del voltaje RMS de línea conectada en una de sus resistencias, con el uso de un osciloscopio conectado en paralelo. Para ver la conexión real, ver Anexo 1.

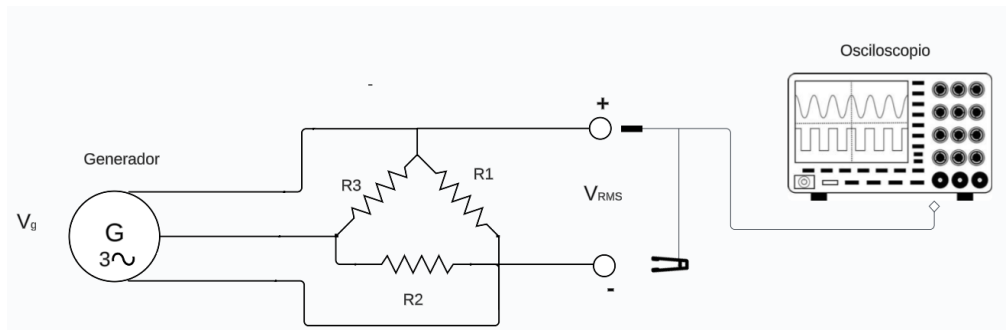


Figura 10. Circuito de medición para potencia Trifásica.

Si el sistema es balanceado y el voltaje medio es el voltaje de línea en la conexión triángulo, entonces su potencia trifásica total producida, denotada P_e se obtiene a partir la siguiente fórmula:

$$P_e = 3 \frac{V_{RMS}^2}{R_1} \quad (7)$$

Donde:

V_{RMS} : Es el voltaje RMS de línea de la resistencia R, en Volts.

R_1 : Corresponde a cualquiera de las resistencias 1, en Ohms .

4.2 Medición de Torque.

La medición del torque en turbinas hidrocinéticas y eólicas se basan en la ley de fuerza del torque, el cual relaciona el torque y el brazo de momento producido, para ver el método a detalle, ver Figura 21 en el Anexo 2. El método de medición consiste en utilizar un sistema mecánico con poleas que mide el torque mediante variaciones de la carga y la carga de un resorte con dinamómetro. Por ejemplo, en un estudio de turbinas eólicas compararon las turbinas Savonius convencional, elíptica y combinada (normal-elíptica), en donde la turbina combinada proporciono una mejora del 11% en la eficiencia de parte de respecto a la convencional, y un 5,5% respecto a la elíptica [31], utilizando el método de fuerza de torque. Sin embargo, en este trabajo, para la obtención del torque mecánico, se mide la potencia mecánica P_m producida por la turbina a partir de la potencia eléctrica P_e , asumiendo que, el generador tiene una eficiencia C_{eff} del 100% en la transformación de potencia mecánica a eléctrica, es decir:

$$C_{eff} = \frac{P_e}{P_m} = 1$$

De esta manera, se hace la obtención del torque mecánico por medio de la ecuación (4), que relaciona el torque, la potencia mecánica y la velocidad angular de la TH a partir de la medición de la potencia eléctrica obtenida con la ecuación (7):

$$\tau = \frac{P_m}{\omega}$$

donde $P_m = P_e$.

4.3 Medición de Velocidad Angular.

Para la adquisición de la velocidad angular se utiliza comúnmente un artefacto de medición llamado tacómetro, sin embargo, en este trabajo se mide utilizando el sensor de efecto HALL MLX90393 conectado en un ARDUINO R4 MINIMA mediante el protocolo de comunicación I²C. El sensor Hall se caracteriza por detectar la intensidad del campo magnético producidos por los imanes, este sensor es capaz de detectar la orientación del campo magnético del imán en sus

tres dimensiones. El método de medición de la velocidad angular consiste en incorporar dos imanes ubicados en las turbinas en dos de las cuatro hélices, orientados de forma opuesta, el motivo de la utilización de dos imanes es dar estabilidad mecánica a la turbina, manteniendo su centro de masa en el centro. El sensor detecta los imanes cada vez que la turbina de una vuelta completa obteniendo así las revoluciones por minuto. En la Tabla 1 se muestran sus especificaciones generales.

Tabla 1. Especificaciones generales del Sensor de Efecto Hall.

Sensor	Voltaje de alimentación	Sensor de Magnetismo Eje Z	Sensibilidad
MLX90393	2,2 V - 3,6 V	5862 μ T/LSB - 0.263 μ T/LSB	< \pm 1%

4.4 Medición de velocidad del agua.

En la obtención de la velocidad del agua que fluye en el canal se procede con implementar la ecuación de continuidad presente en los fluidos, la cual establece para este caso, la siguiente relación entre el caudal, la velocidad del agua y el área transversal del fluido, asumiendo que presenta flujo incompresible:

$$Q_{ca} = A_c v$$

Donde:

v : corresponde a la velocidad del agua en metros sobre segundo .

A_c : corresponde al área transversal del agua en metros cuadrados.

Si de la ecuación anterior se despeja la velocidad v , y se convierte el caudal de ingreso de litros por segundo a metro cúbico por segundo, se obtiene la velocidad v en metros por segundo, como:

$$v = \frac{Q_{ca} \cdot 0.001}{h_w \cdot W_c} \quad (8)$$

Donde:

h_w : corresponde a la profundidad del agua en metros.

W_c : corresponde el ancho del canal en metros.

Para la obtención de la velocidad mediante el uso de la ecuación de continuidad, se tienen como parámetros conocidos el ingreso de caudal Q_{ca} y el ancho W_c del área transversal del agua. Mientras que el primer parámetro se conoce gracias a un caudalímetro analógico, el ancho del canal se conoce debido a que es un valor constante, teniendo en su área como única variable la profundidad del agua, por consecuencia, es posible obtener la velocidad del agua en función del caudal de ingreso y la profundidad h_w del agua, mediante la ecuación (8). La Tabla 2 hace descripción a especificaciones generales del caudalímetro. La estimación de la velocidad en este método asumió además que el fluido presenta flujo estacionario en régimen permanente

Tabla 2. Especificaciones generales de Caudalímetro.

Sensor Analógico	Rango de Medición	Precisión	Temperatura Agua
Caudalímetro DN50	0,0002–999,999 m^3/s	$\pm 2\% - \pm 5\%$	0,1–40 °C

5. Diseño y Construcción del Experimento

El experimento consiste en un canal abierto de forma rectangular por donde circula el agua proveniente de un estanque de 200 L de capacidad. Primeramente, el agua es extraída e impulsada de manera independiente por dos bombas centrífugas, donde ambas se conectan en un punto en común para dirigir el agua hacia el caudalímetro. Desde ese punto liberan el agua desde el extremo izquierdo del canal por medio de una manguera, para finalmente retornar nuevamente por el otro extremo hacia el estanque (ver Figura 11).

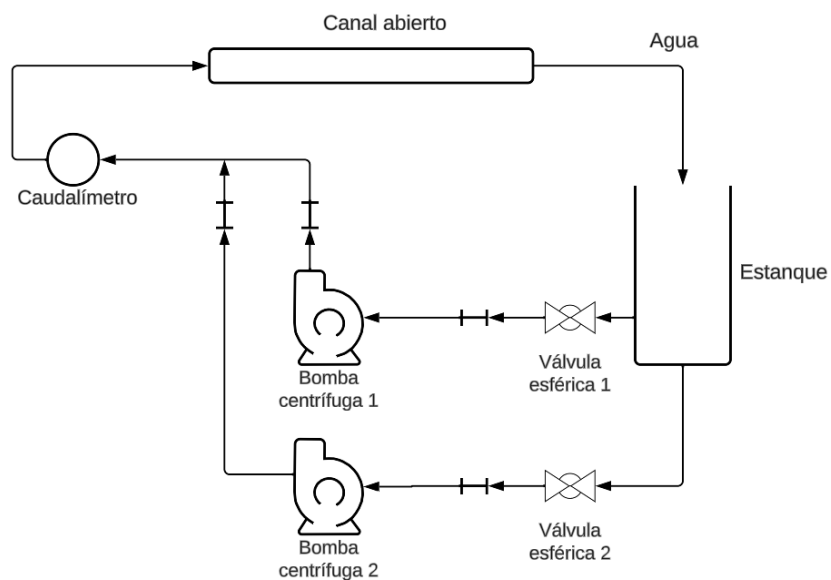


Figura 11. Esquema simplificado del experimento.

El flujo del canal es controlable por medio de un variador de frecuencia que está conectado a las bombas centrífugas, ambas de 1 HP de potencia, permitiendo configurar el caudal del agua a distintas frecuencias, variando como consecuencia su velocidad. La conexión de dos bombas en paralelo permite aumentar el caudal de ingreso hacia el canal. El variador de 3 HP de potencia posee alimentación monofásica AC desde la red y proporciona a las bombas corriente trifásica AC, como se ilustra en la Figura 12.

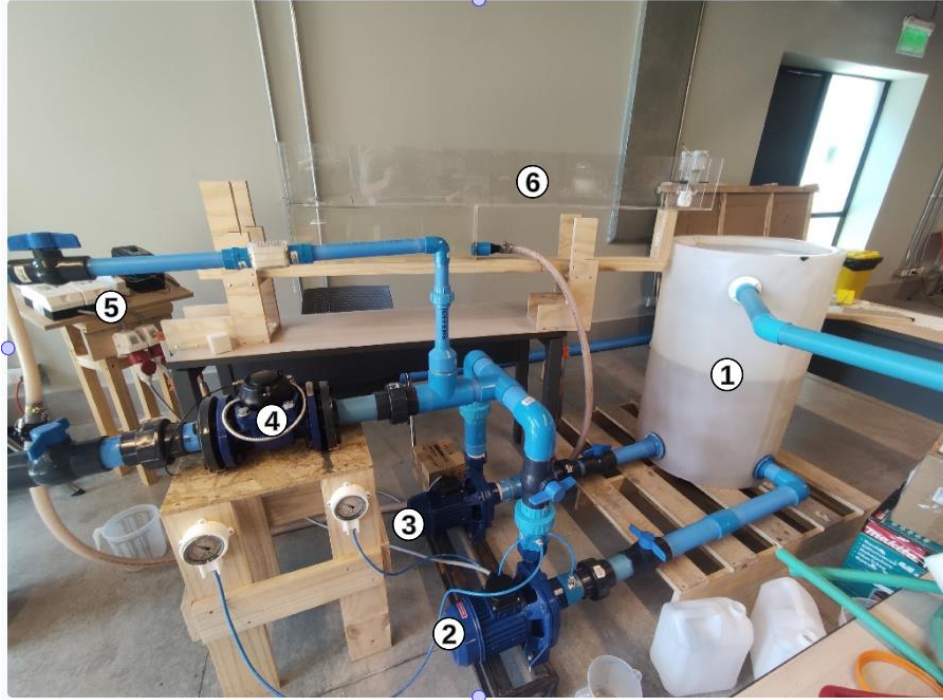


Figura 12. Montaje experimental.

A continuación, se presenta en la Tabla 3, las partes de montaje del experimento.

Tabla 3. Partes del experimento

Sección	Parte
①	Estanque
②	Bomba Centrífuga 1
③	Bomba Centrífuga 2
④	Caudalímetro
⑤	Variador de Frecuencia
⑥	Canal

5.1 Diseño y Construcción del Canal

El canal posee una forma rectangular y su composición se divide en tres secciones: el canal rectangular, la cámara de llenado y el tubo de acceso. La cámara de llenado es una pequeña cámara por el cual el agua hace ingreso a través de un tubo de PVC, llamado el tubo de acceso por donde ingresa el agua hacia la cámara hasta llenarse, una vez se llena, el fluido emerge hacia el canal por medio apertura rectangular de 15 cm de largo y 5,8 cm de ancho, ubicada entre el canal rectangular y la cámara de llenado. Una vez que emerge el agua de la cámara desde el extremo izquierdo, el agua empieza a fluir por el canal rectangular producto de la gravedad, simulando el comportamiento de los canales de irrigación, ver Figura 12. En el Anexo 3 se presenta el canal real fabricado.

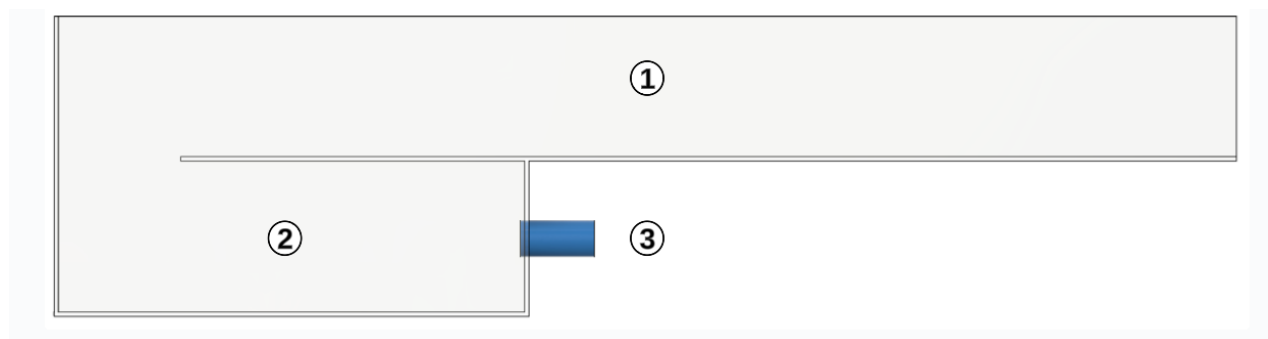


Figura 13. Vista Lateral del canal (Anexo 3).

Para el control de la velocidad del agua, que fluye se ajusta tanto la inclinación del canal como a la frecuencia del variador, debido a que la inclinación afecta la velocidad con la que el agua cae en el canal, mientras que el variador es el responsable controlar el caudal de ingreso hacia la cámara de llenado, teniendo como consecuencia una variación en la salida del agua desde la cámara. En la Tabla 4, se describen las tres secciones que conforman el canal junto a sus dimensiones, teniendo la figura 13 como referencia.

Tabla 4. Partes y Dimensiones del Canal.

Sección	Parte	Longitud	Altura	Ancho	Diámetro
①	Canal Rectangular	144 cm	18 cm	5.8 cm	//
②	Cámara de llenado	30 cm	17.5 cm	58.5 cm	//
③	Ingreso de Agua	//	//	//	1 pulgada

5.2 Diseño y Fabricación de Turbinas Hidrocinéticas.

Se fabricaron y probaron varios diseños de turbinas utilizando la herramienta de diseño para impresión 3D fusión 360, con la finalidad de obtener un diseño funcional que opere el tiempo adecuado para la adquisición de datos. Se fabricaron un total de ocho diseños: Las TH Savonius convencional y helicoidal de dos, tres y cuatro hélices con un Overlap Ratio igual a 0, el Anexo 4 presenta los diseños probados descartados. De los ocho diseños probados en el canal, se escogieron las turbinas Savonius de cuatro hélices con una apertura en su centro y con un OR de 0.705 (Figura 13).

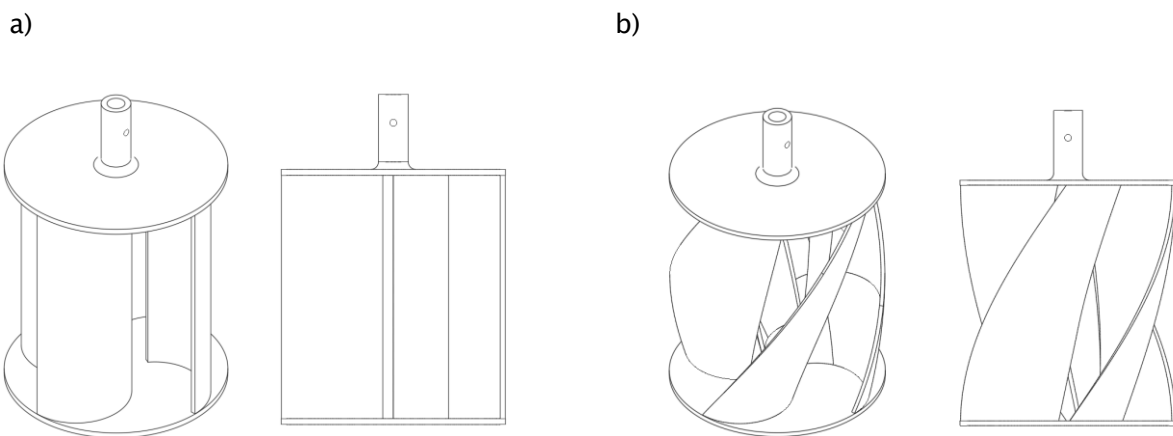


Figura 14. Vista isométrica y Frontal de Turbinas Seleccionadas. a) Savonius convencional de 4 hélices, b) Savonius Helicoidal de 4 hélices.

Ambas turbinas tienen incorporado a medida un eje mecánico que se acopla directamente con el eje del generador, y son capaces de funcionar continuamente dentro del canal. A

continuación, se presentan en la Tabla 5 una comparativa de los parámetros de diseño para las TH Savonius y Savonius helicoidal, con apertura al flujo de agua en su centro.

Tabla 5. Parámetros de diseño de las turbinas.

Parámetro	Savonius Convencional	Savonius Helicoidal
Altura	0,05 m	0,05 m
Diámetro	0,045 m	0,045 m
Aspect Ratio (AR)	1,11	1,11
Overlap Ratio (OR)	0,3	0,3
Hélices	4	4
Blockage Ratio	0,705	0,705
Helicidad	0°	25°

5.3 Generador

El generador seleccionado proporciona potencia eléctrica trifásica de corriente alterna y se compone de tres partes: El rotor, el estator y la conexión fuente de alimentación trifásica, como se puede apreciar en la Figura 16.



Figura 16. Generador Seleccionado. a) Rotor y Estator Separados, b) Rotor y Estator Ensamblados.

En cuanto a su topología, se clasifica como un generador síncrono de imanes permanentes de ocho polos, con una transmisión de acoplamiento directo, de bobinado concentrado, tiene una topología de flujo radial y sus imanes son de rotor exterior. A continuación, se presentan en la Tabla 6, sus principales especificaciones.

Tabla 6. Especificaciones Técnicas del Generador.

Fabricante	Voltaje de Salida	Corriente de Salida	Potencia Nominal	Revoluciones por minuto
CrocSee	3-24V	0,1 -1A	0,5-12W	300-6000 RPM

5.4 Montaje de Turbina y Generador.

Para la instalación de la turbina en el canal se diseñó un soporte configurado en las paredes laterales del canal, acoplamiento entre la turbina y el generador se configura dentro del canal, para así evitar la inestabilidad mecánica en el eje, producto de un eje de acoplamiento demasiado extenso.

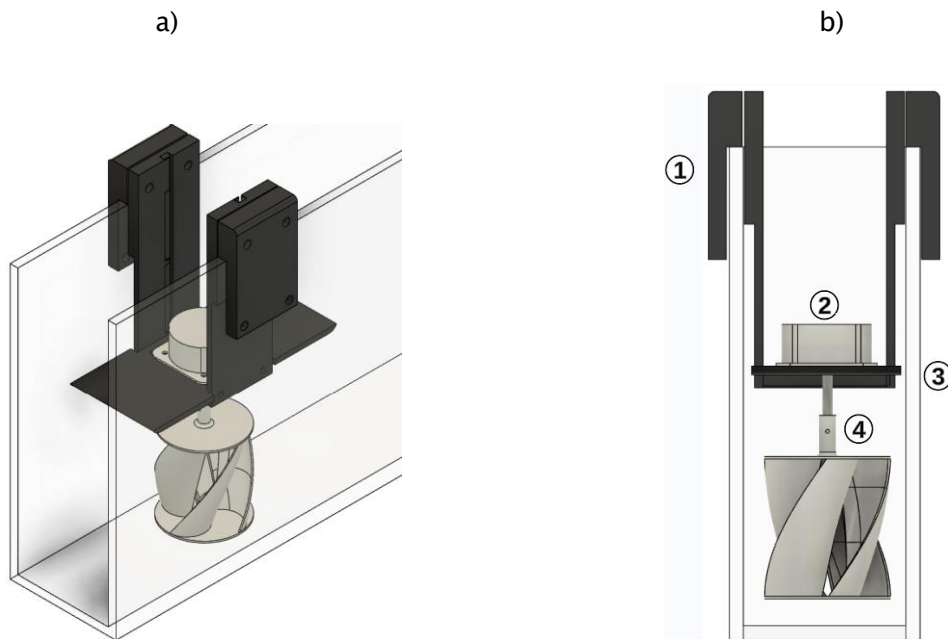


Figura 17. Estructura para montaje de turbinas. a) Vista Isométrica, b) Vista Frontal seccionada.

Para el montaje del generador se diseñó una protección externa para el generador y el soporte turbina–generador cuenta con 4 cm de extensión hacia ambos lados a lo largo del canal con la finalidad de prevenir salpicaduras hacia el generador, debido a la velocidad con el que el agua puede impactar en las turbinas, para ver el montaje fabricado, revisar Anexo 5.

Tabla 7. Piezas de montaje para turbinas.

Sección	Pieza
①	Soporte Lateral
②	Protección Externa Generador
③	Soporte Turbina–Generador
④	Acople Turbina–Generador

6. Adquisición de Datos

Para caracterizar el desempeño de las turbinas se utiliza el gráfico de C_p función del TSR, mediante el modelamiento de la función de la ecuación (6). Las mediciones se obtienen desde el Arduino, el cual recibe las mediciones del sensor de efecto HALL, por otro lado, Mediante el uso de un osciloscopio conectado a la carga resistiva conectada en triangulo en en *Protoboard*, se obtiene el voltaje rms generado y la potencia trifásica del generador. El caudalímetro permite estimar la velocidad del agua en el canal. A partir de los datos obtenidos desde el ARDUINO, el osciloscopio y el caudalímetro, se modela utilizando como lenguaje de programación Python para calcular la potencia generada, el torque, la velocidad del agua , junto con el *Tip Speed Ratio* mediante el uso de la ecuación (5) para caracterizar finalmente el coeficiente de potencia de ambas turbinas. El procesamiento de los datos obtenidos consiste en enviar los datos desde Arduino y almacenarlos posteriormente en un archivo de Excel en formato .csv, para ser procesados y graficados en Python, utilizando las librerías Pandas, Numpy y Matplotlib. En la etapa de experimentación, se realizan un total de cinco mediciones a diferentes velocidades un rango de entre 1,04 a 1,45 m/s, con el objetivo de obtener un gráfico concluyente en su desempeño en un rango permisible del sistema. Se realiza mediante el ajuste de la inclinación del canal y el variador de frecuencia. Se procede a hacer registro a la de elevación del canal, la inclinación y la frecuencia del variador. Las tablas 8 y 9 hace presenta las mediciones obtenidas en las pruebas realizadas a las turbinas Savonius convencional y helicoidal, respectivamente, en las cuales se establecen las diferentes configuraciones de operación que permiten establecer el rango de velocidades similares para su comparación en el Anexo 6, se especifica la configuración del sistema de medición de los datos.

Tabla 8. Mediciones de Turbina Convencional.

SAVONIUS CONVENCIONAL	UNIDAD	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5
RPM	Rev./min	91	126	149	213	252
VOLTAJE RMS	miliVolts	290,5	330	340	351	412
CAUDAL	m ³ /s	0,0019	0,001315	0,001236	0,001351	0,001239
FRECUENCIA VARIADOR	Hz	26	30,7	29	31,65	29,29
VELOCIDAD DEL AGUA	m/s	1,04	1,16	1,21	1,29	1,47
INCLINACIÓN	Grados	3,6	3,6	4,5	5,4	8,5

Tabla 9. Mediciones de Turbina Helicoidal.

SAVONIUS HELICOIDAL	UNIDAD	MEDICIÓN 1	MEDICIÓN 2	MEDICIÓN 3	MEDICIÓN 4	MEDICIÓN 5
RPM	Rev./min	83	118	138	183	223
VOLTAJE RMS	miliVolts	270,7	308,9	320	335	385
CAUDAL	m ³ /s	0,001638	0,001296	0,001212	0,001323	0,001203
FRECUENCIA VARIADOR	Hz	26	30,7	29	31,65	29,20
VELOCIDAD DEL AGUA	m/s	1,04	1,18	1,19	1,3	1,42
INCLINACIÓN	Grados	3,6	3,6	4,5	5,4	8,4

7. Análisis de Resultados.

El gráfico de la Figura 18, indica que la turbina hidrocínética convencional alcanza un coeficiente de potencia máximo de aproximadamente 4,7%, con una generación de potencia máxima de 70 mW a 238 revoluciones por minuto. Por otro lado, la turbina helicoidal logró producir un coeficiente de potencia máximo del 4,1%, generando 60 mW a 223 revoluciones, lo que significa que la turbina hidrocínética convencional, presentó rendimiento del 14,6% superior en el coeficiente de potencia, mientras que en la generación de potencia alcanzó un 16,7%, respecto a la turbina Helicoidal, sin embargo, el desempeño general de ambos diseños demuestra ser bastante ineficientes.

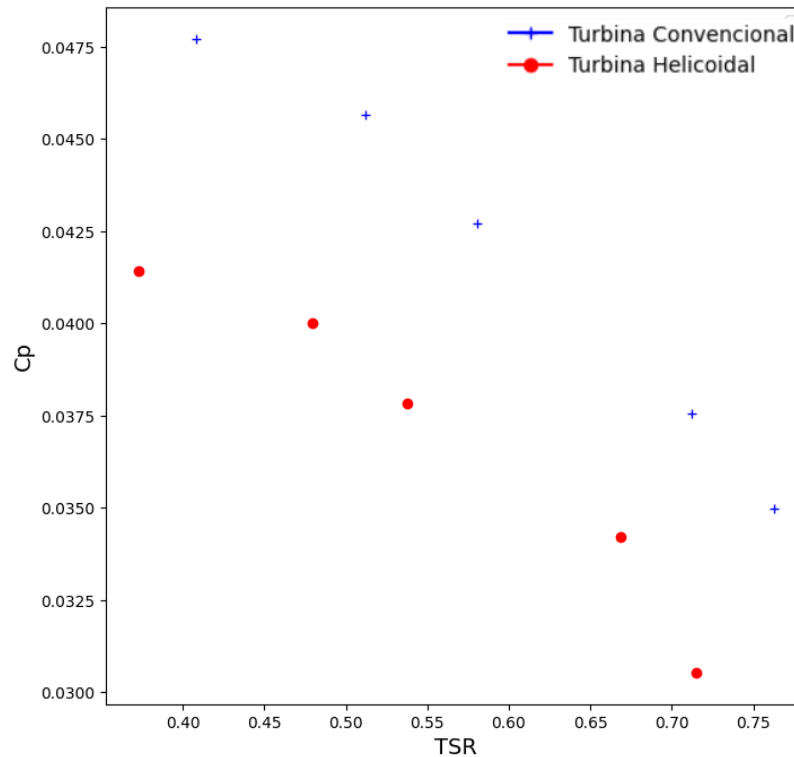


Figura 18. Gráfica de Coeficiente de Potencia Versus TSR de las turbinas.

En cuanto al coeficiente de torque de las turbinas, se puede apreciar que en la Figura 19, la turbina convencional presentó un mejor coeficiente de torque.

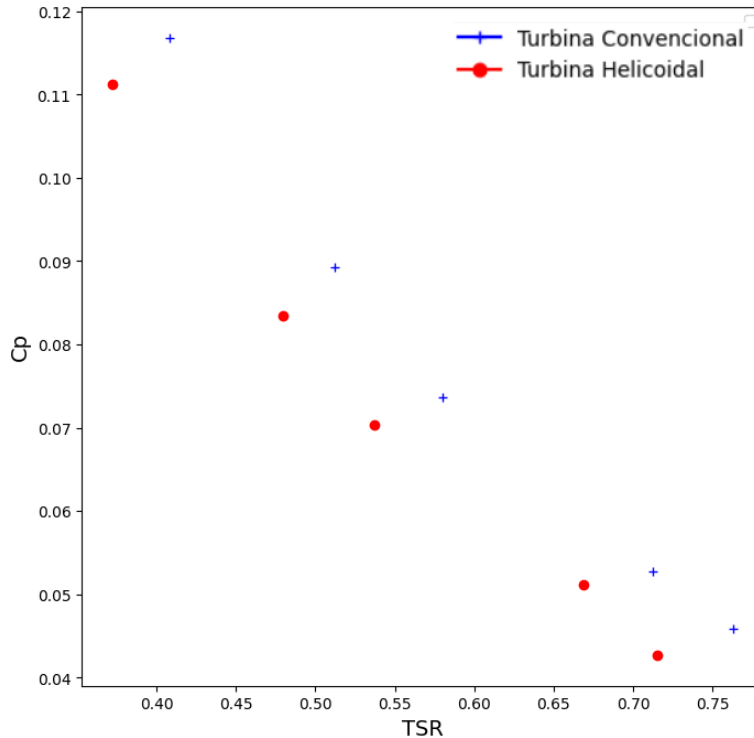


Figura 19. Gráfica de Coeficiente de Torque Versus TSR de las turbinas.

En las observaciones del proceso experimental, se pudo notar que el agua presenta un nivel bajo en altura, en relación con la turbina, que tiene una altura de 5 cm. El nivel promedio del agua mostró una profundidad de alrededor de 2 cm. Este fenómeno se atribuyó a la inclinación mínima de 3,6° con la cual las turbinas comienzan a operar de manera continua, lo que causa que su profundidad disminuya.

Este bajo nivel de agua explica en gran medida los resultados poco eficientes de las turbinas. Debido a que logran capturar aproximadamente un 30% del agua disponible. Esta limitación en la captura de agua puede estar vinculada al hecho de que el rango de operación óptimo para este tipo turbinas suele situarse entre 0,5 y 2 m/s.

En consecuencia, la eficiencia comprometida de las turbinas durante el experimento resalta la importancia de mantener niveles de agua adecuados y condiciones de operación óptimas para maximizar el rendimiento.

8. Conclusión

Los resultados obtenidos mostraron que la turbina hidrocínética convencional presentó un coeficiente de potencia máximo de un 4,7%, siendo un 14,6% superior respecto a la turbina Savonius helicoidal. En cuanto a la generación máxima de potencia eléctrica la turbina convencional fue de un 16,7% superior. En las observaciones realizadas durante la comparación experimental se pudieron apreciar que, en el rango de velocidades cercanas a los 1,02 m/s, la turbina helicoidal se mostró con mejor autoarranque y estabilidad en el eje turbina–generador respecto al diseño convencional. Entonces, un aspecto favorable de la turbina helicoidal es que en un largo periodo de funcionamiento requeriría de menor mantención y ayudas externas para comenzar su giro.

En el proceso de diseño de las turbinas, se probaron un total de ocho diseños diferentes, donde solo dos lograron funcionar de forma continua: los diseños Savonius convencional y helicoidal de cuatro hélices con apertura de ingreso de agua en el centro, y de un *Overlap Ratio* de 0,3. Las pruebas realizadas a las turbinas de dos, tres y cuatro hélices, sin apertura al agua en el centro y con un *Overlap Ratio* igual a 0, no lograron girar correctamente, esto debido al alto *Blockage Ratio* que poseen los diseño (de alrededor de un 70% del área del flujo del canal). La necesidad de tener un *Blockage Ratio* tan alto se debió a que la turbina tenía que ser lo suficientemente grande como para superar la inercia de arranque del eje del generador, por consecuencia, los diseños fabricados que no lograban superar la inercia de arranque fueron posteriormente descartados. Para el caso de las turbinas de dos y tres hélices, no lograron una revolución completa y se procedió a fabricar las dos turbinas de cuatro hélices.

En el proceso de diseño y fabricación de turbinas hidrocínéticas, para la obtención su óptimo rendimiento depende considerablemente de los parámetros dimensionales del canal en el que operan. Parámetros como el largo del canal, el ancho, la profundidad agua, su velocidad e inclinación, determinan el tipo de generador y sistema de montaje adecuados para su correcta instalación y funcionamiento. Finalmente se corrobora de manera

experimental la baja eficiencia que presentan este tipo de turbinas (a lo más un 20%) y su implementación en canales de riego no sería viable con la tecnología actual, debido a los desafíos que implica implementar un diseño en específico teniendo en cuenta la gran variedad de canales existentes y la cantidad de factores físicos a considerar en cada una de ellas. Es importante recalcar que el generador escogido puede no haber sido el más óptimo, debido a que su rango de generación es superior al rango de revoluciones probadas, y el torque requerido para que las turbinas arranquen implicó aumentar el tamaño de estas, afectando directamente en el *Blockage Ratio*, por lo que se recomienda fabricar un generador a escala o cotizar uno más adecuado, para mantener una mejor proporción entre turbina y canal.

Para futuras investigaciones relacionadas a la comparación experimental o al desempeño de las TH, se sugiere tener un sistema de medición de la velocidad más preciso y un canal que permita fluir el agua con la suficiente profundidad para que la turbina capture la mayor cantidad de energía cinética disponible a una menor velocidad. Se sugiere además realizar los experimentos a una mayor escala, lo más cercano posible a la escala real de las TH reales para hacer un análisis técnico económico.

Para la mejora en la eficiencia se recomienda probar el uso de toberas o difusores, como también el uso de una caja multiplicadora. Por último, *el Blockage Ratio* resulta un parámetro muy importante al momento de diseñar las dimensiones de la turbina, debido a que en valores muy altos este puede ser ineficiente y lleve a realizar más pruebas de las necesarias, por ello se recomienda no tener un *Blockage Ratio* mayor al 30%.

Referencias

- [1] «World Energy Outlook 2023 – Analysis», IEA. Accedido: 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [2] «Boletín Generadoras de Chile - Octubre 2023», Generadoras de Chile. Accedido: 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://generadoras.cl/documentos/boletines/boletin-generadoras-de-chile-octubre-2023>
- [3] M. de Energía, «Energía 2050, Política Energética de Chile», *Minist. Energ.*, ene. 2017, Accedido: 6 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/611>
- [4] «Hoja de Ruta para una Transición Energética Acelerada | Coordinador Eléctrico Nacional». Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.coordinador.cl/desarrollo/documentos/estudios-de-planificacion/hoja-de-ruta-para-una-transicion-energetica-acelerada/>
- [5] M. I. Yuce y A. Muratoglu, «Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 72-82, mar. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.037.
- [6] M. J. Khan, G. Bhuyan, M. T. Iqbal, y J. E. Quaicoe, «Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review», *Appl. Energy*, vol. 86, n.º 10, pp. 1823-1835, oct. 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.02.017.
- [7] «An up-to-date review of large marine tidal current turbine technologies». Accedido: 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7037903/>
- [8] W. I. Ibrahim, M. R. Mohamed, R. M. T. R. Ismail, P. K. Leung, W. W. Xing, y A. A. Shah, «Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review», *Energy Rep.*, vol. 7, pp. 2021-2042, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.04.003.
- [9] K. A. H. Al-Gburi, F. B. I. Alnaimi, B. A. Al-quraishi, E. Sann Tan, y M. M. Maseer, «A comparative study review: The performance of Savonius-type rotors», *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 343-349, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.226.
- [10] L. I. Lago, F. L. Ponta, y L. Chen, «Advances and trends in hydrokinetic turbine systems», *Energy Sustain. Dev.*, vol. 14, n.º 4, pp. 287-296, dic. 2010, doi: 10.1016/j.esd.2010.09.004.
- [11] V. Patel, G. Bhat, T. I. Eldho, y S. V. Prabhu, «Influence of overlap ratio and aspect ratio on the performance of Savonius hydrokinetic turbine», *Int. J. Energy Res.*, vol. 41, n.º 6, pp. 829-844, 2017, doi: 10.1002/er.3670.
- [12] G. Cereijido López, «Estudio experimental de una turbina hidrocínética Savonius», jun. 2022, Accedido: 22 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/63976>
- [13] M. S. M. Shamsuddin, N. A. Mu'in, y N. M. Kamaruddin, «Experimental Investigation of the Savonius Turbine for Low-Speed Hydrokinetic Applications in Small Rivers», *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 94, n.º 2, Art. n.º 2, abr. 2022, doi: 10.37934/arfmts.94.2.2946.
- [14] K.-T. Wu, K.-H. Lo, R.-C. Kao, y S.-J. Hwang, «Numerical and Experimental Investigation of the Effect of Design Parameters on Savonius-Type Hydrokinetic Turbine Performance», *Energies*, vol. 15, n.º 5, Art. n.º 5, ene. 2022, doi: 10.3390/en15051856.
- [15] R. Alipour, R. Alipour, F. Fardian, S. S. R. Kolor, y M. Petrú, «Performance improvement of a new proposed Savonius hydrokinetic turbine: a numerical investigation», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 3051-3066, nov. 2020, doi: 10.1016/j.egy.2020.10.072.

- [16] Y. Zhang, C. Kang, Y. Ji, y Q. Li, «Experimental and numerical investigation of flow patterns and performance of a modified Savonius hydrokinetic rotor», *Renew. Energy*, vol. 141, pp. 1067-1079, oct. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.071.
- [17] M. S. M. Shamsuddin y N. M. Kamaruddin, «Experimental study on the characterization of the self-starting capability of a single and double-stage Savonius turbine», *Results Eng.*, vol. 17, p. 100854, mar. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100854.
- [18] M. Badrul Salleh, N. M. Kamaruddin, y Z. Mohamed-Kassim, «Savonius hydrokinetic turbines for a sustainable river-based energy extraction: A review of the technology and potential applications in Malaysia», *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 36, p. 100554, dic. 2019, doi: 10.1016/j.seta.2019.100554.
- [19] Md. M. Kamal y R. P. Saini, «A numerical investigation on the influence of savonius blade helicity on the performance characteristics of hybrid cross-flow hydrokinetic turbine», *Renew. Energy*, vol. 190, pp. 788-804, may 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.03.155.
- [20] T. S. A. Rengma y P. M. V. B. Subbarao, «Water Flow Velocity Driven Modified Savonius Hydrokinetic Turbine», *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, pp. 296-303, 2022, doi: 10.18178/ijmerr.11.5.296-303.
- [21] M. Mosbahi, S. Elgasri, M. Lajnef, B. Mosbahi, y Z. Driss, «Performance enhancement of a twisted Savonius hydrokinetic turbine with an upstream deflector», *Int. J. Green Energy*, vol. 18, n.º 1, pp. 51-65, ene. 2021, doi: 10.1080/15435075.2020.1825444.
- [22] P. K. Talukdar, V. Kulkarni, y U. K. Saha, «Field-testing of model helical-bladed hydrokinetic turbines for small-scale power generation», *Renew. Energy*, vol. 127, pp. 158-167, nov. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2018.04.052.
- [23] «Numerical Investigation of the Effect of Blade Profile of a Darrieus Hydrokinetic Turbine». Accedido: 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8597073/>
- [24] V. Jayaram y B. Bavanish, «Design and analysis of gorlov helical hydro turbine on index of revolution», *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 47, n.º 77, pp. 32804-32821, sep. 2022, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.07.181.
- [25] R. Espina-Valdés, A. Gharib-Yosry, R. Ferraiuolo, A. Fernández-Jiménez, y V. M. Fernández-Pacheco, «Experimental Comparison between Hydrokinetic Turbines: Darrieus vs. Gorlov», *Environ. Sci. Proc.*, vol. 21, n.º 1, Art. n.º 1, 2022, doi: 10.3390/environsciproc2022021026.
- [26] H. Kanchev, B. Gilev, y N. Hinov, «Modeling of Small-Scale Hydrokinetic Turbine for Distributed Generation», en *2022 13th National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, may 2022, pp. 1-4. doi: 10.1109/ELECTRONICA55578.2022.9874411.
- [27] J. P. Mesa Beleño, «Simulación y análisis de turbinas hidrocínéticas y generadores de imanes permanentes en una microrred : modelación, impacto eléctrico y análisis económico aplicado al caso colombiano», masterThesis, Escuela de Ingenierías, 2020. Accedido: 27 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/4971>
- [28] J. F. Arrau Soza, «Diseño del generador de una turbina hidrocínética de pequeña escala», 2016, Accedido: 27 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.7764/tesisUC/ING/16881>
- [29] R. Carriveau, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. BoD – Books on Demand, 2011.
- [30] M. S. Guney, «Evaluation and measures to increase performance coefficient of hydrokinetic turbines», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, n.º 8, pp. 3669-3675, oct. 2011, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.009.
- [31] A. Sanusi, S. Soeparman, S. Wahyudi, y L. Yulianti, «Experimental Study of Combined Blade Savonius Wind Turbine», *Int. J. Renew. Energy Res. IJRES*, vol. 6, n.º 2, Art. n.º 2, jun. 2016.

Anexos

10.1 Anexo 1. Carga Resistiva Conexión Triángulo.

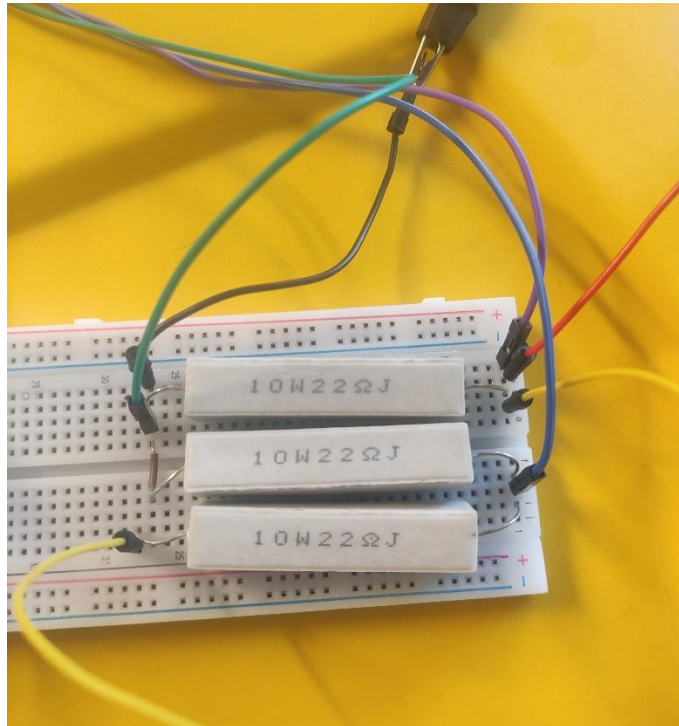


Figura 20. Sistema de Medición del Experimento.

Tabla 10. Valores de funcionamiento las resistencias cerámicas.

Potencia máxima	Resistencia
10 watts	22 Ohm

10.2 Anexo 2. Sistema de Medición de Torque Mecánico en Turbinas.

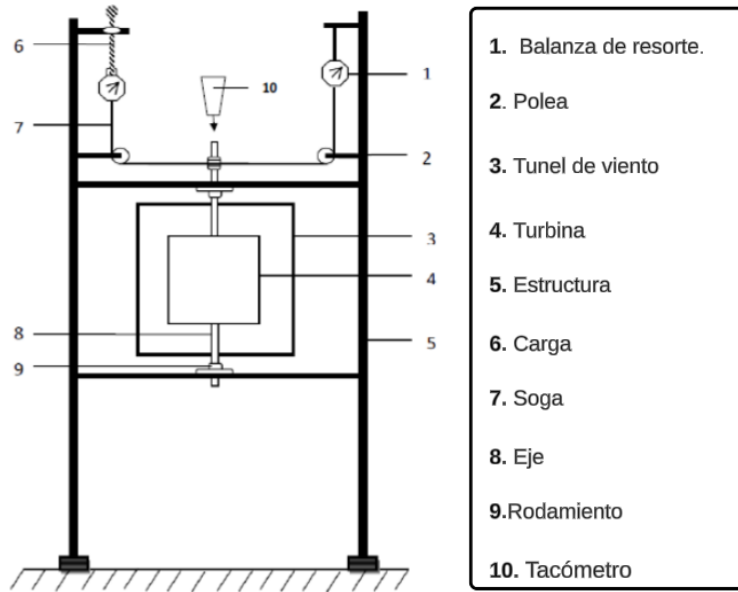


Figura 21. Medición del torque en turbinas Savonius eólicas, adaptado de [31].

10.3 Anexo 3. Vista Lateral de Canal.



Figura 22. Vista lateral del canal.

10.4 Anexo 4. Diseño de Turbinas Descartadas.



Figura 23. Turbinas probadas y descartadas.

10.5 Anexo 5. Montaje de Turbinas.



Figura 24. Sistema de Montaje de turbina Helicoidal en canal, diferentes vistas.

10.6 Anexo 6. Sistema de medición del Experimento.

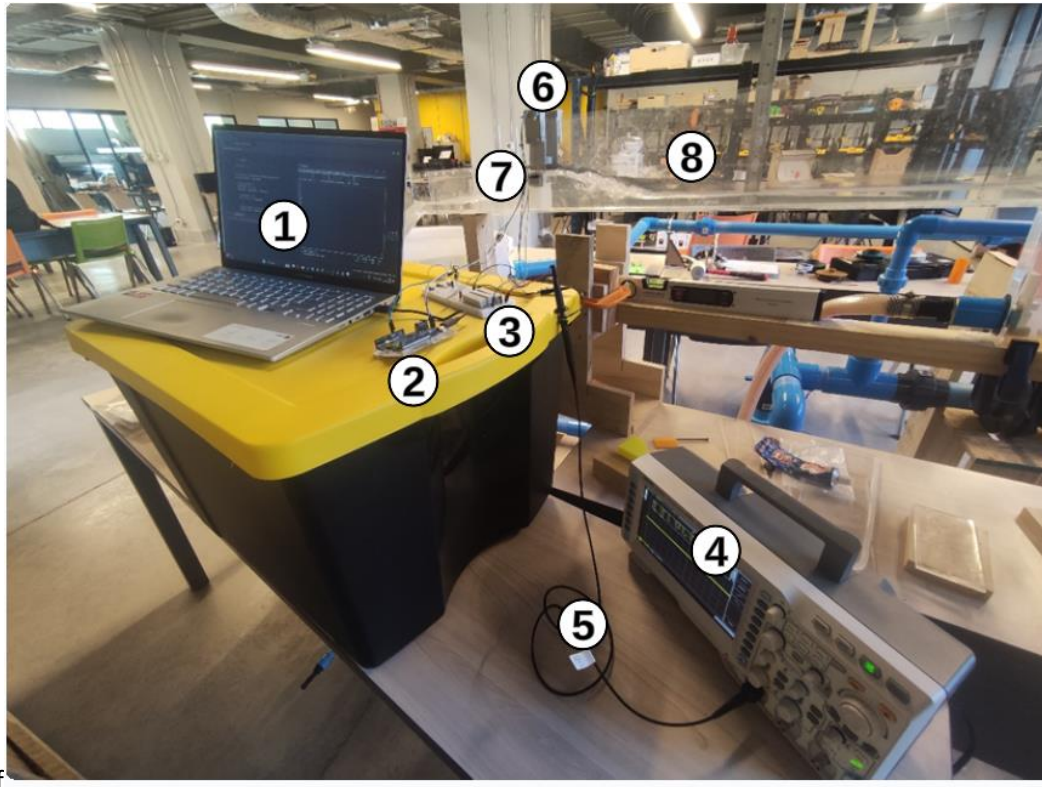


Figura 25. Sistema de medición del experimento.

Tabla 11. Partes del Sistema de mediciones del experimento.

Sección	Parte		
①	Computadora Receptora de los Datos.	⑤	Medición de osciloscopio a Carga Resistiva.
②	Conexión Arduino UNO	⑥	Montaje Turbina-Generador
③	Conexión a Carga del Generador.	⑦	Sensor de Efecto Hall
④	Osciloscopio	⑧	Canal