

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

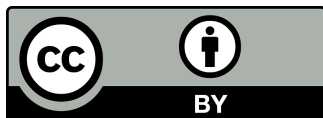
**Implementación de un sistema microhidráulico
portátil tipo tornillo de Arquímedes para iluminar
hogares en el distrito de Sicaya, Huancayo, 2024**

Enmanuel Aliaga Villanueva
Pamela Diana Inga Canales

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Kareem Grimalda Ibarra Hinostroza
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 24 de Marzo de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MICROHIDRÁULICO PORTÁTIL TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA ILUMINAR HOGARES EN EL DISTRITO DE SICAYA, HUANCAYO 2024

Autores:

1. Enmanuel Aliaga Villanueva – EAP. Ingeniería Ambiental
2. Pamela Diana Inga Canales – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 10 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- | | | |
|---|--|--|
| • Filtro de exclusión de bibliografía | SI ☒ | NO ☐ |
| • Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 15 | SI ☒ | NO ☐ |
| • Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante | SI ☐ | NO ☒ |

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original
(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

ASESORA

Ing. Karem Grimalda Ibarra Hinostroza

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la fuerza que nos proporcionó para enfrentar los retos. A nuestras familias, por estar siempre a nuestro lado con su apoyo. A los docentes de la Facultad de Ingeniería, E.A.P. de Ingeniería Ambiental, por su valiosa orientación y apoyo en esta investigación.

DEDICATORIA

Dedicamos esta investigación a nuestras familias, por su apoyo constante y comprensión a lo largo de este proceso. Asimismo, a todos aquellos que, a través de su trabajo y dedicación, contribuyen a forjar un futuro sostenible y equilibrado para nuestro entorno.

ÍNDICE

ASESORA	III
AGRADECIMIENTO	V
DEDICATORIA	VI
ÍNDICE	VII
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
RESUMEN	XII
ABSTRACT.....	XIII
INTRODUCCION	XIV
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Problema general.....	2
1.1.2. Problemas específicos	2
1.2. Objetivos de la investigación	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Social.....	3
1.3.2. Económico.....	3
1.3.3. Ambiental.....	4
1.3.4. Importancia	4
1.4. Delimitación del proyecto	4
1.5. Hipótesis y variables	5
1.5.1. Hipótesis general.....	5
1.5.2. Hipótesis específicas	5
1.5.3. Variables	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1. Antecedentes del problema	7
2.1.1. Internacionales	7
2.1.2. Nacionales	10
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. Energías renovables.....	12

2.2.1.1. Energías renovables	13
2.2.2. Generación de energía eléctrica	15
2.2.3. Desarrollo energético sostenible	15
2.2.4. Concepto de energía hidráulica	16
2.2.4.1. Energía potencial del agua	17
2.2.4.2. Energía cinética del agua	17
2.2.5. Centrales hidroeléctricas	18
2.2.5.1. Componentes de una central hidroeléctrica	19
2.2.5.2. Tipos de centrales hidroeléctricas	20
2.2.6. Conversión de energía mecánica a eléctrica.....	23
2.2.7. Turbinas hidráulicas	23
2.2.7.1. Elementos de una turbina hidráulica	23
2.2.7.2. Tipos de turbinas hidráulicas	24
2.2.8. Selección de la turbina	27
2.2.9. Tornillo de Arquímedes	28
2.2.9.1. Ventajas del tornillo de Arquímedes.....	28
2.2.9.2. Principio de funcionamiento	29
2.2.9.3. Componentes del tornillo de Arquímedes.....	30
2.2.10. Parámetros geométricos e hidráulicos.....	34
2.2.10.1. Diseño geométrico del tornillo.....	35
2.2.11. Dimensiones y especificaciones.....	36
2.2.11.1. Longitud y diámetro.....	36
2.2.11.2. Ángulo de inclinación	37
2.2.11.3. Área de contacto	38
2.2.11.4. Volumen de agua transportado	38
2.2.11.5. Potencia hidráulica.....	39
2.2.11.6. Eficiencia del tornillo de Arquímedes	39
2.3. Definición de conceptos clave.....	39
2.3.1. Energía eléctrica.....	39
2.3.2. Energía renovable.....	40
2.3.3. Sistema microhidráulico.....	40
2.3.4. Tornillo de Arquímedes	40
2.3.5. Electrificación rural.....	40

2.3.6. Cambio climático	40
2.3.7. Combustibles fósiles	40
2.3.8. Energías no renovables.....	41
2.3.9. Descarbonización	41
2.3.10. Pico-hidroeléctrico	41
2.3.11. Sistema híbrido de energías renovables	41
2.3.12. Eficiencia energética	41
2.3.13. Desarrollo Sostenible	41
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	42
3.1. Método, tipo o alcance de la investigación	42
3.2. Diseño de la investigación.....	42
3.3. Población y muestra	45
3.4. Materiales	45
3.5. Metodología específica.....	48
3.5.1. Reconocimiento de campo	48
3.5.2. Construcción del sistema microhidráulico	48
3.6. Recolección de datos	49
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1. Resultados	51
4.2. Discusión de resultados	61
CONCLUSIONES	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66
ANEXOS	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas UTM.....	4
Tabla 2. Clasificación de centrales hidroeléctricas según su capacidad de potencia.	19
Tabla 3. Clasificación de las centrales hidroeléctricas basada en la altura de la caída.	22
Tabla 4. Diseño factorial completo.	43
Tabla 5. Criterios y valores numéricos para el método de Cowan.....	44
Tabla 6. Materiales de construcción para la turbina hidráulica.	45
Tabla 7. Equipos para la construcción de turbina hidráulica.	47
Tabla 8. Características técnicas del generador eléctrico.....	51
Tabla 9. Registro de datos en el segmento seleccionado del río.....	52
Tabla 10. Resultados de cada perfil transversal.	53
Tabla 11. Especificaciones del cauce.....	54
Tabla 12. Prueba de normalidad de la pendiente de caída.	55
Tabla 13. Prueba de normalidad del área mojada.	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona estudiada.	5
Figura 2. Energías renovables.	13
Figura 3. Central hidroeléctrica de pasada.	21
Figura 4. Planta hidroeléctrica de embalse.	21
Figura 5. Diagrama de una central hidroeléctrica de bombeo.	22
Figura 6. Diagrama conceptual del funcionamiento de una turbina.	23
Figura 7. Esquema de una turbina Pelton de dos inyectores.	24
Figura 8. Estructura de una turbina Francis.	25
Figura 9. Rotor de turbina Kaplan.	26
Figura 10. Esquema de una turbina Michell-Banki.	27
Figura 11. Diagrama de flujo vs cabeza de velocidad.	27
Figura 12. Dimensiones del tornillo de Arquímedes de tres hilos.	29
Figura 13. Conversión de la energía cinética del agua en energía eléctrica.	30
Figura 14. Componentes de un tornillo de Arquímedes.	31
Figura 15. Diferentes tipos de hojas de tornillo de Arquímedes.	31
Figura 16. Generador acoplado a un tornillo de Arquímedes.	33
Figura 17. Vista lateral del tornillo de Arquímedes.	34
Figura 18. Vista lateral del tornillo de Arquímedes.	37
Figura 19. Cuadro que precisa sobre el área de contacto.	38
Figura 20. Turbina tipo tornillo de Arquímedes.	49
Figura 21. Configuración completa de la geometría del río.	53
Figura 22. Potencial eléctrico en relación con la pendiente de caída.	56
Figura 23. Velocidad de rotación en relación con la pendiente de caída.	56
Figura 24. Potencial eléctrico en relación con el área mojada.	58
Figura 25. Velocidad de rotación en relación con el área mojada.	58
Figura 26. Voltaje e intensidad de corriente del sistema microhidráulico.	59
Figura 27. Potencial eléctrico en función de la pendiente de caída y el área mojada.	60
Figura 28. Velocidad de rotación en función de la pendiente de caída y el área mojada.	61
Figura 29. Evaluación de la correlación entre la velocidad de rotación y el potencial eléctrico.	61

RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo implementar un sistema microhidráulico portátil tipo Tornillo de Arquímedes, con parámetros adecuados para iluminar hogares en el distrito de Sicaya. Puesto que, en la región de Junín, diversas provincias rurales, como Sicaya, carecen de acceso a energía eléctrica doméstica. A pesar de contar con recursos hídricos que podrían aprovecharse para la generación de energía, los cuales no han sido explotados de manera eficiente.

Este sistema consta de un diseño mecánico y eléctrico que utiliza el potencial y la energía cinética del agua para generar energía y se convierta en una fuente sostenible, siendo almacenada en una fuente de energía continua. Para la implementación del sistema microhidráulico, se calculó el potencial mecánico y el torque de la turbina tipo Tornillo de Arquímedes, lo que permitió la selección del generador eléctrico adecuado. Asimismo, se evaluó la eficiencia energética de la turbina en cuerpos de agua con bajo aforo volumétrico dentro del distrito de Sicaya. Además, se analizó la influencia de la pendiente de caída y el área mojada del flujo de agua sobre el potencial eléctrico generado por el sistema microhidráulico. A través del diseño experimental factorial 2^2 , se recopilaron y procesaron datos provenientes del canal de riego de Sicaya, utilizando el software estadístico MiniTab. Los resultados mostraron que tanto el área mojada del agua en contacto con la turbina como la pendiente de caída tienen un efecto significativo sobre la velocidad de rotación del sistema, lo cual influye directamente en el potencial eléctrico generado. La presente investigación demuestra la viabilidad de implementar un sistema microhidráulico portátil tipo Tornillo de Arquímedes en canales con escaso caudal, como una solución para proveer energía eléctrica a zonas rurales que carecen de acceso a la red eléctrica

Palabras clave: Tornillo de Arquímedes, energía eléctrica, microhidráulico, sostenibilidad.

ABSTRACT

The objective of this work was to implement a portable microhydraulic system of the Archimedes screw type, with appropriate parameters to illuminate homes in the district of Sicaya. In the Junín region, various rural provinces, such as Sicaya, lack access to domestic electrical energy. Despite having water resources that could be utilized for energy generation, these have not been efficiently exploited.

This system consists of a mechanical and electrical design that uses the potential and kinetic energy of water to generate energy, turning it into a sustainable source, stored as continuous energy. For the implementation of the microhydraulic system, the mechanical potential and torque of the Archimedes screw turbine were calculated, allowing for the selection of the appropriate electric generator. Additionally, the energy efficiency of the turbine was evaluated in bodies of water with low volumetric flow within the district of Sicaya. Furthermore, the influence of the fall slope and the wetted area of the water flow on the electrical potential generated by the microhydraulic system was analyzed. Through a 2² factorial experimental design, data were collected and processed from the Sicaya irrigation canal, using MiniTab statistical software. The results showed that both the wetted area of water in contact with the turbine and the fall slope have a significant effect on the rotation speed of the system, which directly influences the electrical potential generated. This research demonstrates the feasibility of implementing a portable microhydraulic system of the Archimedes screw type in channels with low flow as a solution to provide electrical energy to rural areas lacking access to the electrical grid.

Keywords: Archimedes screw, electrical energy, microhydraulic, sustainability.

INTRODUCCION

La energía eléctrica es un recurso fundamental para el desarrollo económico y social, facilitando el acceso a la educación, la salud y la comunicación. A nivel global, la demanda energética sigue en aumento debido al crecimiento poblacional y la industrialización. Se estima que el consumo de electricidad aumentará en un 50 % entre 2021 y 2040, lo que ha generado preocupación por la sostenibilidad de las fuentes de energía utilizadas. Actualmente, la generación de electricidad depende en gran medida de los combustibles fósiles, lo que contribuye a un incremento significativo en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y agrava los efectos del cambio climático.

En este contexto, las energías renovables se han convertido en una alternativa viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar el impacto ambiental de la generación de energía. Sin embargo, en diversas regiones rurales del mundo, la electrificación sigue siendo un desafío. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), 760 millones de personas carecen de acceso a la electricidad, lo que limita su desarrollo y bienestar.

En el Perú, la brecha energética es particularmente crítica en zonas rurales, donde la extensión de la red eléctrica es costosa y poco viable. En la región Junín, específicamente en el distrito de Sicaya, muchas comunidades aún no cuentan con acceso a electricidad, afectando su calidad de vida y restringiendo su acceso a servicios esenciales. A pesar de contar con cuerpos de agua como canales de riego y ríos de bajo caudal, estos recursos no han sido aprovechados para la generación de energía, lo que representa una oportunidad para desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles.

Las tecnologías microhidráulicas han demostrado ser una opción eficiente para la generación de electricidad en comunidades rurales, aprovechando pequeños cuerpos de agua sin necesidad de grandes infraestructuras. Entre estas tecnologías, el Tornillo de Arquímedes destaca por su facilidad de instalación, bajo impacto ambiental y capacidad de operar en caudales reducidos. Sin embargo, pocos estudios han explorado su implementación en zonas rurales del Perú y su eficiencia en condiciones hidrológicas específicas como las de Sicaya.

La mayoría de los estudios previos han centrado sus esfuerzos en la implementación de sistemas hidroeléctricos de mayor escala, dejando de lado soluciones descentralizadas y portátiles que podrían adaptarse a comunidades aisladas. Además, se ha explorado poco la relación entre parámetros hidráulicos clave, como la pendiente de caída y el área mojada del flujo de agua, y su impacto en la generación de energía mediante esta tecnología.

Estas limitaciones resaltan la necesidad de investigar la viabilidad de un sistema microhidráulico portátil basado en el Tornillo de Arquímedes, evaluando su eficiencia en escenarios reales y su potencial para ser replicado en otras comunidades con características similares.

La presente investigación tiene como objetivo principal diseñar e implementar un sistema microhidráulico portátil tipo Tornillo de Arquímedes, adaptado a las condiciones hidrológicas del distrito de Sicaya, con el fin de proveer energía eléctrica a hogares sin acceso a la red convencional. Para ello, se analizan los siguientes aspectos clave, como el cálculo del potencial mecánico y el torque de la turbina para determinar el generador eléctrico más adecuado, la evaluación de la influencia de la pendiente de caída y el área mojada en la generación de energía eléctrica y el análisis de la eficiencia del sistema a través de pruebas experimentales en cuerpos de agua del distrito de Sicaya.

La investigación sigue un enfoque cuantitativo y experimental, aplicando un diseño factorial de 2^2 para evaluar la influencia de las variables hidráulicas en el rendimiento del sistema. Se utilizan herramientas de análisis de datos como el software MiniTab, con el fin de obtener resultados precisos y validados estadísticamente.

Este estudio contribuye al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles en comunidades rurales, promoviendo el uso de tecnologías limpias y descentralizadas. La implementación del sistema microhidráulico portátil tipo Tornillo de Arquímedes en Sicaya representa una alternativa innovadora para la electrificación rural, con potencial de replicabilidad en otras localidades del país. Además, los resultados obtenidos servirán como base para futuras investigaciones en el campo de las energías renovables y la microhidráulica en entornos de bajo caudal.

En un contexto donde el acceso a la electricidad sigue siendo un reto para muchas comunidades, esta investigación busca generar conocimiento aplicable y soluciones viables que contribuyan a reducir la brecha energética en el Perú y a fortalecer la resiliencia de las poblaciones frente a la crisis energética y climática global.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

Actualmente, la demanda global de energía eléctrica ha aumentado significativamente, y la capacidad de energía disponible no logra satisfacer las demandas de la sociedad (1). En muchos países, la dependencia hacia los combustibles fósiles sigue siendo alta, lo que contribuye al calentamiento global con la emisión masiva de CO₂. Desde finales del siglo XVIII, el dióxido de carbono gaseoso (CO₂) en la atmósfera aumentó de 280 ppm a más de 410 ppm en 2023 (2). En la Unión Europea, en el año 2022, el 69.65 % de energía se basó principalmente de fuentes de combustibles fósiles, mientras que solo el 21.34 % se generaba a partir de energías renovables mediante centrales hidroeléctricas (3).

La electrificación de las áreas rurales en naciones en desarrollo sigue siendo un desafío considerable, como se menciona para el 2030 dentro de los objetivos sostenibles (ODS), formulados por las Naciones Unidas (ONU). A pesar de los avances tecnológicos y las políticas gubernamentales destinadas a reducir la brecha energética, millones de personas siguen sin acceso a una fuente de electricidad confiable (4). La dependencia de combustibles no renovables como el gas, el carbón y el petróleo, continúa afectando gravemente al medio ambiente, promoviendo la degradación ambiental y perpetuando la dependencia de estos recursos (5). Por lo tanto, la aplicación de tecnologías de energía renovable como microhidráulica, se presenta como una alternativa viable para reducir la huella de carbono y promover el desarrollo sostenible en zonas rurales con acceso limitado a la energía eléctrica.

La energía hidroeléctrica, con una capacidad global instalada de 1360 GW y una generación de 4250 TWh/a en 2021, se posiciona como la principal fuente de electricidad renovable y uno de los más efectivos para disminuir las emisiones de carbono (6). Hoy en día se utilizan frecuentemente tres tipos de turbinas para la producción de energía hidráulica; Pelton, Francis, Kaplan; cada una de estas turbinas se adaptan al caudal y desnivel. La empresa Japonesa Sumino Co, ubicada en la ciudad de Ena, es una de las primeras empresas en sistemas microhidráulicos (7). La turbina de Arquímedes es conocida por su eficiencia, debido a que pueden convertir gran parte de la energía del agua en energía mecánica. Se destaca porque posee un diseño sencillo, permitiendo un mayor flujo de agua y una menor pérdida de energía. Dispone de una velocidad lenta de rotación, permitiendo aprovechar recursos hídricos a menor escala como agua de regadíos, riachuelos y pequeños saltos de agua (8).

En Perú, los desafíos energéticos reflejan la situación energética de muchos países en vía de desarrollo, todavía depende de fuentes de energía de recursos no renovables. Existe una disparidad en el acceso a la electricidad en los sectores urbanos y rurales. De acuerdo con la Dirección General de Electrificación Rural (DGER), en el año 2024, en Perú el número de viviendas rurales que carecen de servicio eléctrico asciende a 257 144 representando el 16.7 % (9). La implementación de recursos hídricos a pequeña escala mediante diversas tecnologías podrían ser una solución efectiva, por el aprovechamiento de los recursos hídricos renovables en la generación de energía. En el distrito de Sicaya, se observa cierta particularidad en cuanto a la provisión de energía. Aunque las áreas urbanas del distrito disfrutan de un suministro eléctrico relativamente estable, los lugares más distantes y rurales no tienen acceso a este servicio.

1.1.1. Problema general

- ¿Cuáles son los parámetros adecuados para implementar un Sistema Microhidráulico Portátil tipo Tornillo de Arquímedes para iluminar Hogares en el Distrito de Sicaya, Huancayo 2024?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es el potencial mecánico y torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico?
- ¿Cuál es la influencia de la pendiente de caída y el área mojada en el potencial eléctrico que genera el sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024?
- ¿Cuál es la influencia de la pendiente de caída y el área mojada respecto a la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

- Diseñar un Sistema Microhidráulico Portátil tipo Tornillo de Arquímedes para determinar los parámetros adecuados para su implementación en la iluminación de Hogares en el Distrito de Sicaya, Huancayo 2024.

1.2.2. Objetivos específicos

- Calcular el potencial mecánico y el torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico.

- Evaluar la influencia de la pendiente de caída y el área mojada en el potencial eléctrico que genera el sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.
- Evaluar la influencia de la pendiente de caída y el área mojada respecto a la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.

1.3. Justificación

1.3.1. Social

Durante las últimas décadas, el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía no renovables ha incrementado significativamente, lo que ha resultado en diversos daños ambientales. Para abordar estos problemas, se ha promovido el uso de energías renovables como una alternativa viable. En este contexto, la energía eléctrica generada por sistemas microhidráulicos ha surgido como una forma de energía renovable y sostenible. Esta forma de energía se considera un vector energético prometedor para el futuro debido a su carácter no contaminante y su creciente relevancia en la actualidad. En el proceso de reducción de carbono en la economía, la energía microhidráulica se presenta como una opción favorable debido a sus características de limpieza, sostenibilidad, renovabilidad y amigabilidad con el medio ambiente (10).

1.3.2. Económico

La energía eléctrica generada por el sistema microhidráulico se considera una energía renovable y limpia, que no emite CO₂, y la producción en grandes cantidades, se plantea como una alternativa sostenible para futuras generaciones. La energía microhidráulica tiene un potencial significativo para aportar en la reducción y emisión de gases contaminantes y para generar una nueva industria que aporte valor a las economías locales; además está adquiriendo una gran importancia debido a sus dimensiones pequeñas que puede aprovechar cuerpos de agua con escaso caudal, así abasteciendo de energía a un hogar. Su producción puede impulsar el PIB y generar empleo adicional. A largo plazo, las energías renovables, incluyendo la microhidráulica, pueden garantizar una mayor estabilidad del suministro energético, reducir la dependencia de proveedores extranjeros y disminuir los costos asociados a la salud por la contaminación ambiental (11).

1.3.3. Ambiental

La presente investigación se enfoca en la energía microhidráulica como una alternativa renovable a la producción energética actual, que se sustenta predominante de recursos convencionales, con el propósito de ayudar a la preservación del entorno natural y a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. La producción de energía microhidráulica se destaca por ser limpio, ecológico, renovable y sostenible, lo que contribuye a mejorar la calidad del aire, así como fortalecer la seguridad energética. Su producción es esencial para minimizar la huella de carbono (12).

1.3.4. Importancia

Esta investigación sobre la construcción de un sistema microhidráulico portátil basado en una turbina tipo tornillo de Arquímedes en cuerpos de agua de escaso aforo volumétrico para la iluminación de hogares aledaños es imprescindible para adoptar tecnologías renovables. La energía microhidráulica, se destaca en un contexto global donde la dependencia de combustibles fósiles contribuye a la degradación ambiental y al cambio climático. La turbina de Arquímedes emerge como una alternativa eficiente y sostenible para aprovechar recursos hídricos de menor escala, como riachuelos, ofreciendo una solución viable para comunidades rurales con limitaciones en el acceso a la electricidad. Su implementación en países emergentes, como Perú, podría ser un avance significativo hacia un futuro energético más sostenible y equitativo (11).

1.4. Delimitación del proyecto

La delimitación del presente estudio se centra en la aplicación del sistema microhidráulico en un riachuelo ubicado en el distrito de Sicaya para las distintas pruebas que se detallan en el capítulo de metodología.

Tabla 1. *Coordenadas UTM.*

Proyección UTM de la ubicación del sistema microhidráulico	
Zona UTM	18 L
Este	470771.29
Norte	8670621.79



Figura 1. Mapa de ubicación de la zona estudiada.

1.5. Hipótesis y variables

1.5.1. Hipótesis general

Los parámetros necesarios por considerar en el diseño de un sistema microhidráulico para su implementación en la iluminación de hogares son el potencial mecánico, eficiencia energética y la influencia de la pendiente de caída y el área mojada.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Calcular el potencial mecánico y el torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico.
- H_0 : La pendiente de caída y el área mojada influyen en el potencial eléctrico del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.
- H_1 : La pendiente de caída y el área mojada no influyen en el potencial eléctrico del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.
- H_0 : La pendiente de caída y el área mojada influyen en la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.
- H_1 : La pendiente de caída y el área mojada no influyen en la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.

1.5.3. Variables

A. Variable dependiente:

Potencial eléctrico.

Velocidad de rotación.

Eficiencia energética.

B. Variable independiente:

Pendiente de caída.

Área mojada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1. Internacionales

El artículo científico titulado “Design of a micro-hydraulic generation system based on an Archimedes screw”, planteó como objetivo construir un sistema de generación microhidráulica de carácter didáctico basado en un tornillo hidrodinámico que permite aprovechar el flujo del agua como energía cinética para abastecer varias cargas de iluminación. La metodología tiene un enfoque de desarrollo en dos etapas, el diseño mecánico y el diseño del sistema eléctrico, en cuanto al diseño mecánico, se emplea un tronco con tres hilos y un soporte metálico para dirigir y acumular el flujo de agua; mientras que, el sistema eléctrico utiliza un generador eléctrico de imanes permanentes conectado a un circuito para rectificar el voltaje; así dando como resultado que el sistema diseñado tiene una potencia de 8 watts que abastece a luminarias de 6 voltios (7). El antecedente recomienda que, en caso de épocas de sequía, es necesario contar con un sistema de almacenamiento de energía.

El artículo científico titulado “Sustainable power generation using Archimedean screw turbine: influence of blade number on flow and performance”, planteó como objetivo analizar la cantidad óptima de palas para mejorar el rendimiento de la turbina. La metodología tiene un enfoque experimental donde se construyeron tres turbinas con un tornillo de una pala hasta tres palas, con material ABS para determinar su influencia principalmente de la velocidad de rotación y el torque de la turbina; así dando como resultado que la turbina de tres palas tiene un mejor funcionamiento que la turbina de una pala cuando la velocidad de rotación es baja, donde el principal parámetro para tener en consideración respecto a la eficiencia general de la turbina es el factor de llenado (13). El antecedente recomienda que, en caso de construir una turbina de tornillo de Arquímedes, se debe considerar el uso de un número optimizado de palas para mejorar su capacidad y eficiencia de generación de energía respecto al factor de llenado y aplicación de bajo cabezal.

En el artículo “Sustainable manufacturability of Archimedes screw turbines: a critical review”, se planteó como objetivo abordar los diversos métodos de fabricación de los tornillos de Arquímedes, determinando la capacidad de fabricación que tienen los tornillos de Arquímedes. La turbina tornillo de Arquímedes representa una solución segura para generar energía hidroeléctrica en

áreas con biodiversidad acuática, poseen dos componentes principales: las láminas del tornillo helicoidal y el eje del tornillo. La turbina tornillo de Arquímedes utiliza la función de los tornillos de Arquímedes, valga la redundancia, a la inversa para generar energía hidroeléctrica. El agua ingresa al canal de entrada de la turbina, haciendo girar las aspas del tornillo, en consecuencia, gira el eje del tornillo, el cual está acoplado a un generador para producir energía eléctrica. Diversas investigaciones muestran que los tornillos de Arquímedes se realizan con métodos convencionales para turbinas grandes y para las pequeñas a través de impresoras 3D (14). Como resultado se menciona que los métodos tradicionales de fabricación requieren un alto nivel de competencia. Mientras que los métodos de impresión 3D para pequeñas turbinas de Arquímedes se encuentran en las etapas iniciales del desarrollo. De acuerdo a las investigaciones sostenibles mencionan que la fabricación aditiva posee un impacto ambiental menor que la fabricación convencional de álabes de turbina.

En el artículo “Development and testing of a laboratory model of a two-turbine small hydroelectric power plant” se tuvo por objetivo elaborar nuevas propuestas de solución técnica para turbinas de chorro de tornillo adaptados a bajo caudal de agua. La turbina tipo tornillo de Arquímedes, es una tecnología que promueve la sostenibilidad ambiental y ofrece viabilidad económica. Pueden funcionar a alturas desde hasta 5 m en flujos de agua a baja presión y diferentes caudales con una alta eficiencia. Se elaboró una muestra de laboratorio de una pequeña central hidroeléctrica con dos turbinas de Arquímedes y se estudiaron las turbinas de tornillos de Arquímedes con diversos parámetros. Para el cambio de potencia, se determinó el número de palas, el ángulo de inclinación y la altura de la presión. Como resultado nos menciona que, al aumentar la velocidad del agua, también aumenta la velocidad de la rueda hídrica y a su vez aumenta la energía eléctrica de la central microhidroeléctrica (15).

El artículo "Archimedean screw based Micro Hydro Power Plant (MHPP) prototype with turbine elevation angle parameters" tuvo como objetivo determinar los valores más altos de voltaje, potencia, corriente, rpm, eficiencia y torque según el ángulo de inclinación de la turbina (20°, 25°, 30° y 35°). Se midieron las características eléctricas y mecánicas del generador de la turbina de Arquímedes, manteniendo constantes el caudal y la altura del agua, y variando el ángulo de inclinación de la turbina y la resistencia de la carga eléctrica. Para medir el torque se utilizó un resorte, y para las rpm, un tacómetro. La medición del voltaje y la corriente generada se realizó con un generador BLDC trifásico de bajas revoluciones, basado en la

conversión de CA a CC. Con los datos obtenidos de corriente y voltaje, se calculó la energía eléctrica generada. Como resultado el prototipo de microcentral hidroeléctrica (MHPP) con una turbina de tres palas mostró que el ángulo óptimo de inclinación de la turbina es de 20° , logrando los valores más altos de rpm, torque, corriente y voltaje (8).

El artículo "A new methodology to design sustainable Archimedean screw turbines as green energy generators" tuvo como objetivo principal el desarrollo de un diseño eficiente y ecológico para las turbinas de tornillo de Arquímedes, las cuales son empleadas en la producción de energía hidroeléctrica en entornos de baja caída de agua. El estudio se basa en una analogía con los elevadores de cangilones para proponer una hipótesis teórica sobre la eficiencia de las turbinas tipo tornillo de Arquímedes, analizando tanto el rendimiento teórico como experimental de esta tecnología. Para ello, se construyeron y probaron dos prototipos, uno a pequeña escala y otro a escala real, en diferentes regiones de España. Los resultados experimentales mostraron que la eficiencia de las turbinas de Arquímedes se puede maximizar manteniendo un nivel de llenado óptimo de los cangilones del 85 %, y reduciendo las pérdidas por fugas de agua. Estas medidas permitieron alcanzar una eficiencia de hasta el 80 %. Además, se destaca la viabilidad de las turbinas de Arquímedes como una tecnología adecuada para la generación de energía verde en áreas con bajas alturas de caída de agua. Finalmente, los autores concluyen que esta nueva metodología contribuye a la mejora de la eficiencia y sostenibilidad de las turbinas de tornillo de Arquímedes, recomendando que los futuros diseños se enfoquen en la minimización de pérdidas por fugas y en el control del nivel de llenado para maximizar el rendimiento energético (16).

En el artículo titulado "Hydrodynamic screw parameter optimization for maximum power output" se planteó como objetivo realizar una investigación sobre la optimización de los tornillos hidrodinámicos para mejorar la generación de energía en condiciones de laboratorio. Utilizando dos tornillos con diferentes características, los autores analizaron el impacto de variables como el número de palas, el paso entre palas y la inclinación de instalación. El estudio empleó el software Design Expert y la metodología de superficie de respuesta (RSM) con el fin de mejorar los parámetros y reducir las pruebas experimentales necesarias. Los resultados mostraron que un mayor número de palas y un paso más corto aumentan significativamente el rendimiento, mientras que factores como la descarga de agua y la pendiente de instalación también juegan un papel crucial en la potencia generada. Como resultado los investigadores descubrieron que el tornillo con la

mejor configuración alcanzó una salida de 66.71 W, mientras que el segundo tornillo, con una mayor inclinación y caudal, generó solo 12.96 W. Esto evidenció la importancia de encontrar la combinación adecuada entre los parámetros físicos y las condiciones ambientales para maximizar la eficiencia de los tornillos hidrodinámicos. Estos hallazgos son especialmente relevantes para la aplicación de esta tecnología en áreas rurales o de difícil acceso, donde las soluciones convencionales de generación de energía pueden no ser factibles (17).

En el artículo titulado “Archimedes Screw Pump Efficiency Based on Three Design Parameters using Computational Fluid Dynamics Software – Ansys CFX.” se estableció como objetivo mejorar la eficiencia de las bombas de tornillo de Arquímedes, utilizadas para la mitigación de inundaciones en áreas urbanas afectadas por lluvias intensas. El estudio se basó en la simulación de tres parámetros clave: el ángulo de inclinación, el número de palas y la velocidad angular, utilizando el software de dinámica de fluidos computacional ANSYS-CFX. Los resultados indicaron que la mayor eficiencia, del 24.04 %, se alcanzó con una configuración de una pala giratoria, un ángulo de inclinación de 20° y una velocidad de rotación de 40 RPM. Los autores resaltaron que, aunque estos parámetros ofrecen resultados significativos, futuras investigaciones deberían explorar otras combinaciones para optimizar aún más la eficiencia del sistema. Se observó como resultados que la eficiencia del tornillo de Arquímedes está influenciada por el ángulo de inclinación, ya que una menor inclinación permite un mejor aprovechamiento de la fuerza gravitacional, reduciendo la pérdida de energía hidráulica, sin embargo, los investigadores enfatizan que este resultado debe ser validado a través de pruebas experimentales antes de su implementación en aplicaciones reales. De esta manera, el uso de este tipo de bombas podría representar una solución sostenible y de bajo costo para proyectos de ingeniería orientados a la gestión de aguas y al control de inundaciones en diversas regiones vulnerables (18).

2.1.2. Nacionales

En el artículo “Evaluación de parámetros de funcionamiento para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas de tornillo en zonas altoandinas del Perú”, se tuvo como objetivo experimentar el principio de la generación de energía mecánica de la turbina hidráulica de tornillo. La energía que se genera es utilizada para la electrificación de toda la zona del canal de riego de Alto Cunas del valle del Mantaro. Los tornillos de Arquímedes funcionan en poca profundidad de agua y la velocidad de entrada del agua se encuentran relacionados. Pueden funcionar en una

profundidad menor de 5 m y en una gama de caudales con eficiencias prácticas del 60 % al 80 % y pueden generar hasta de potencia 355 kW (11). En esta investigación se evaluó la generación de potencia mecánica de los canales de riego del valle del Mantaro para la generación de energía eléctrica.

En el artículo “Archimedes screw to generate hydroelectricity at moderate flow, Tucumachay-Huancavelica”, se detalla que el objetivo de estudio fue generar energía hidroeléctrica con bajo caudal y poca altitud, utilizando el tornillo de Arquímedes para convertir la energía cinética del agua en movimiento en energía mecánica. Se realizó en el centro de investigación de “Lachocc” ubicado entre la carretera de Huancavelica y Pisco. Se realizaron pruebas de estudio de laboratorio y campo; se utilizó un prototipo que tuvo unas aspas de 10 cm de diámetro y se obtuvo como resultado que la potencia eléctrica teórica incrementó de 9.84 a 12 vatios, dato fundamental (10). Mediante esta investigación se determinó que para generar mayor potencia mecánica se debe de utilizar aspas anchas, el eje de la turbina debe estar en posición horizontal y la estructura debe estar fija.

En la tesis "Diseño de una turbina tipo tornillo de Arquímedes en la comunidad de Muquiyauyo" se tuvo como objetivo la creación de un proyecto comunal para generar energía hidráulica, aprovechada en la extracción de recursos naturales, lo que permitirá el desarrollo económico de la comunidad. El proyecto es viable debido a que la comunidad cuenta con un recurso hídrico de pequeño salto. Para seleccionar la turbina adecuada, se utiliza el diagrama de selección de turbinas hidráulicas. Según los parámetros del canal de la comunidad, se ha determinado que una turbina tipo tornillo de Arquímedes es la más apropiada. Los resultados de esta investigación incluyen cálculos, especificaciones técnicas y planos necesarios para el funcionamiento de la turbina tipo tornillo de Arquímedes (19).

En el artículo científico "Energía solar como agente para la descarbonización de la matriz energética: una propuesta para la región Lambayeque (Perú)", se planteó como objetivo la instalación de un sistema solar fotovoltaico autónomo en una comunidad rural de Lambayeque para cubrir la demanda eléctrica, aprovechando los recursos solares de la región. El sistema consta de paneles solares y baterías de almacenamiento, con lo que se busca eliminar el uso de generadores diésel, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero en 2110.40 kg de CO₂eq/año. Este estudio resalta la importancia de replicar esta tecnología en otras zonas rurales del país, promoviendo tanto la sostenibilidad energética como la mitigación del cambio climático. La propuesta se considera viable desde una

perspectiva técnica y económica, contribuyendo significativamente a la descarbonización de la matriz energética peruana. Como resultado el sistema solar fotovoltaico propuesto es una solución eficiente para comunidades rurales que no tienen acceso a la red eléctrica nacional, lo que reduce la brecha de acceso a la energía. Los autores destacan que este tipo de proyectos pueden ser parte de una estrategia más amplia para descarbonizar el sector energético en el Perú. La implementación de este sistema en Lambayeque también ofrece un ejemplo práctico de cómo las energías renovables pueden utilizarse para mejorar la calidad de vida en áreas remotas, sin generar los impactos negativos asociados a los combustibles fósiles (12).

En la tesis “Análisis de la turbina hidrotornillo para mejorar la producción de energía eléctrica en la picocentral hidroeléctrica de Raquina-Huancayo, 2021”, se estableció como objetivo el uso de una turbina tipo hidrotornillo para mejorar la generación de energía en una picocentral hidroeléctrica previamente abandonada por su baja eficiencia. El estudio propuso esta tecnología como una alternativa viable para incrementar la capacidad de producción, aprovechando el recurso hídrico local sin la necesidad de grandes obras civiles. Los resultados mostraron un aumento significativo en la potencia eléctrica, de 101.312 kW a 254.82 kW, lo que demuestra el potencial del hidrotornillo para operar eficientemente con bajos caudales. Además de mejorar la capacidad energética, el análisis destacó la facilidad de instalación y mantenimiento del sistema, lo que lo hace adecuado para otras zonas rurales con características similares. Esta tecnología ofrece una solución más económica y ambientalmente sostenible en comparación con las turbinas tradicionales, al reducir las emisiones de CO₂ y promover el uso de fuentes de energía renovables. La investigación concluyó que la integración de este sistema al mercado energético nacional no solo contribuiría al uso de energías renovables, sino que también proporcionaría una mayor seguridad energética, especialmente en áreas de difícil acceso (20).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Energías renovables

Las energías renovables se distinguen por utilizar recursos naturales que no se agotan, como el agua, la biomasa, el sol y el viento. Estos recursos están presentes en gran cantidad alrededor del mundo y, a diferencia de los combustibles fósiles, se regeneran de manera constante. Por ello, las energías renovables representan una alternativa fundamental para la sostenibilidad ambiental, ya que no generan un

agotamiento de los recursos ni provocan niveles significativos de contaminación. Por otro lado, este tipo de energía no se fundamenta en la combustión de combustibles fósiles, lo cual es vital para disminuir las emisiones de gases que ocasionan el aumento de la temperatura global. Entre los tipos de energía renovable, la solar convierte la radiación solar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos, mientras que la eólica aprovecha el viento para producir energía mecánica a través de aerogeneradores. Por otro lado, la energía hidráulica utiliza el flujo del agua en ríos o presas para mover turbinas, produciendo electricidad en procesos sostenibles. También está la biomasa, que convierte material orgánico en energía, un proceso que puede ser gestionado de manera renovable siempre que se mantengan prácticas de reforestación o cultivos sostenibles (21).



Figura 2. Energías renovables.

Fuente: Orozco (21).

2.2.1.1. Energías renovables

Hay diversas clases de energía renovable que pueden emplearse para producir electricidad y combustible. Tienen las siguientes características:

A. Energía solar: se obtiene a través de la recolección de la radiación proveniente del sol a través de paneles solares, que transforman esta energía en electricidad o calor. Estos sistemas pueden ser fotovoltaicos, que producen energía solar o térmicos, que producen calor para calentar agua o espacios. La capacidad de los paneles solares para aprovechar la abundante radiación solar convierte esta fuente en una de las alternativas más limpias y sostenibles para generar energía sostenible. La energía solar no solo es una opción viable para reducir la dependencia a los combustibles fósiles, sino que contribuye a reducir el calentamiento global (22).

- B. Energía eólica: se genera al aprovechar la fuerza del viento mediante turbinas que, al girar por efecto del movimiento del aire, convierten la energía cinética en electricidad. Este tipo de energía es un recurso natural inagotable y su aprovechamiento no produce emisiones contaminantes. Las turbinas eólicas, instaladas en zonas con corrientes de viento consistentes, son capaces de generar grandes cantidades de electricidad de manera eficiente, ayudando a disminuir la dependencia de las fuentes de combustibles fósiles y minimizando el impacto ambiental. Además, la energía eólica es especialmente valiosa para regiones geográficas con acceso limitado a otras fuentes de energía, promoviendo una alternativa limpia y sostenible para la generación de electricidad (21).
- C. Energía hidráulica: se genera aprovechando el desplazamiento del agua, ya sea de ríos, embalses o mareas, y se transforma en energía eléctrica mediante turbinas hidráulicas. Este proceso implica la utilización de la energía de movimiento y la energía almacenada del agua para mover las palas de las turbinas, lo que a su vez activa un generador que produce electricidad. Esta forma de energía renovable se distingue por su habilidad para producir grandes volúmenes de electricidad de manera constante, siendo una fuente clave en la matriz energética de muchos países. Las plantas hidroeléctricas, que pueden variar en tamaño desde instalaciones a pequeña escala hasta grandes represas (21).
- D. Energía geotérmica: se obtiene del calor que la tierra produce internamente, el cual puede ser aprovechado para generar electricidad mediante turbinas geotérmicas. Este calor natural, que proviene de procesos radiactivos y de la descomposición de minerales en el interior de la Tierra, puede ser utilizado para calentar agua, generando vapor que hace girar las turbinas conectadas a un generador eléctrico. Las plantas geotérmicas se instalan en áreas geológicas específicas donde el calor terrestre es más accesible, como cerca de volcanes o en regiones con actividad tectónica. Este tipo de energía renovable es altamente eficiente y tiene un bajo impacto ambiental (21).
- E. Energía de biomasa: se produce mediante la combustión o el proceso de fermentación de materia orgánica, como la madera, los residuos agrícolas o los desechos sólidos urbanos. Este tipo de energía renovable aprovecha los recursos biológicos que provienen de plantas y animales,

convirtiéndolos en electricidad, calor, o biocombustibles a través de diversos procesos tecnológicos. La biomasa puede transformarse en energía de varias maneras. La combustión directa es uno de los métodos más comunes, en el que la materia orgánica se quema para generar calor, que luego puede utilizarse para producir electricidad. Otro enfoque es la fermentación de residuos orgánicos, que producen biogás como el metano (21).

2.2.2. Generación de energía eléctrica

Es el proceso mediante el cual se transforma la energía de diversas fuentes en electricidad, un recurso fundamental para la sociedad moderna. Este proceso puede llevarse a cabo a través de diferentes tecnologías que utilizan fuentes tanto sostenibles como no renovables. Tradicionalmente, la mayor parte de la electricidad se emite mediante la combustión de recursos energéticos no renovables, incluyendo carbón, gas natural y petróleo, en plantas de energía térmica. En estas instalaciones, el calor producido por la combustión se emplea para calentar agua, creando vapor que mueve las turbinas vinculadas a los generadores eléctricos. Sin embargo, este enfoque tiene importantes desventajas, como la producción de gases que contribuyen al calentamiento global y que favorecen a la disminución de los recursos no renovables (23).

2.2.3. Desarrollo energético sostenible

En 1987, la noción crecimiento sostenible tomó relevancia por primera vez con la publicación del informe Brundtland, un documento clave que subrayó el impacto que el desarrollo económico y la creciente globalización tendrían sobre el medio ambiente. Este informe no solo introdujo la preocupación por el deterioro ambiental, sino que también planteó una definición que ha guiado las políticas globales desde entonces. Según el informe Brundtland, el crecimiento sostenible se refiere a satisfacer los requerimientos fundamentales de la generación actual sin satisfacer las necesidades de uno mismo y sin poner en peligro a las futuras generaciones (24). Este concepto de desarrollo sostenible ha sido adoptado a nivel mundial como un principio rector para el desarrollo a largo plazo. En esencia, se basa en tres pilares fundamentales que deben ser equilibrados para lograr un futuro sostenible: el desarrollo económico y el progreso en las condiciones sociales y la protección del entorno natural. El desarrollo económico asegura que las sociedades crezcan de manera que se creen oportunidades y bienestar material para todos, sin comprometer los recursos. El desarrollo social es elevar el nivel de vida y promover la equidad y

la imparcialidad, incentivando una repartición equitativa de los beneficios económicos, garantizando al mismo tiempo la facilidad para acceder a servicios indispensables, como la educación y atención sanitaria (24).

2.2.4. Concepto de energía hidráulica

La energía hidráulica es una forma renovable de energía que se adquiere aprovechando el movimiento del agua, específicamente su flujo y caída desde alturas determinadas. Este tipo de energía se utiliza mediante estructuras como presas, embalses y centrales hidroeléctricas, que controlan y dirigen el flujo del agua para generar electricidad. El proceso de generación involucra la conversión de la energía de posición y energía de movimiento del agua, mediante el uso de turbinas, que luego se transforma en energía eléctrica mediante generadores (21).

La energía hidráulica se clasifica como renovable porque depende del ciclo hidrológico natural, que es continuo e inagotable. Esta forma de energía destaca por su alta eficiencia y capacidad para producir grandes cantidades de electricidad con mínimas emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo significativamente a mitigar el cambio climático. Además, proporciona una fuente de energía flexible y confiable, capaz de adaptarse rápidamente a las fluctuaciones en la demanda de electricidad (21).

El proceso de generación de energía hidroeléctrica implica varias etapas:

- a. Captación del agua: se realiza en una presa o embalse, donde se acumula el agua que servirá para la generación de energía. La presa regula el flujo de agua, garantizando un suministro constante para el funcionamiento del sistema hidroeléctrico y permitiendo un mejor control de los recursos hídricos (21).
- b. Conducción del agua: el agua se transporta desde la presa hasta la turbina a través de tuberías o canales. Durante este proceso, energía almacenada y dinámica del agua debido al movimiento, lo que maximiza la eficiencia en la generación de energía (21).
- c. Turbina: convierte energía almacenada y dinámica del agua mediante el movimiento de sus palas. Las turbinas más comunes son las Pelton, Francis y Kaplan, que se utilizan según las características del flujo de agua, optimizando así el rendimiento del sistema (21).
- d. Generador: la turbina mueve el rotor del generador, lo que transforma la energía mecánica en energía eléctrica mediante un campo magnético. Este proceso es fundamental, ya que es donde se produce la electricidad que alimentará a las comunidades y empresas (21).

- e. Transformador: ajusta el voltaje de la electricidad generada para que pueda ser transportada eficientemente por la red de transmisión a largas distancias. Esto es crucial para garantizar que la energía llegue en condiciones óptimas a los consumidores finales (21).
- f. Distribución: la electricidad se distribuye desde la central hidroeléctrica hasta los consumidores finales a través de la red de transmisión y distribución. Este sistema de distribución asegura que la energía generada sea accesible para el uso doméstico e industrial, promoviendo así el desarrollo sostenible de las comunidades (21).

2.2.4.1. Energía potencial del agua

La energía potencial del agua almacenada en una represa o en un cuerpo de agua a una altura específica se debe a la fuerza de gravedad y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$E_p = m * g * h$$

Donde: E_p es la energía potencial, m es la cantidad de masa del agua, g es la aceleración provocada por la fuerza gravitacional (aproximadamente 9.8 m/s^2), y h es la altura desde la cual desciende el agua.

En el contexto de generar energía hidroeléctrica, la energía potencial del agua se acumula en embalses o reservorios creados artificialmente a través de la construcción de presas. Cuando el agua es liberada desde una altura considerable en un embalse, donde la energía potencial se transforma en energía de movimiento a medida que desciende (23).

2.2.4.2. Energía cinética del agua

La energía cinética del agua se genera a partir del movimiento de las masas de agua y depende tanto de su velocidad como de su masa en movimiento. Esta forma de energía puede ser transformada en energía mecánica y eléctrica mediante dispositivos especializados como turbinas hidráulicas y ruedas de agua (23).

Cuando el agua es liberada y desciende, su energía almacenada y dinámica del agua, la cual puede ser expresada matemáticamente como:

$$E_k = \frac{1}{2} m * v^2$$

Donde: E_k es la energía cinética y v es la velocidad del agua en movimiento. En el contexto del agua, esta fórmula se aplica tanto a las corrientes de ríos como a las olas y mareas del océano (23).

La explotación de la energía cinética del agua conlleva diversos beneficios ambientales y económicos. Al ser una forma de energía renovable, reduce el consumo de los recursos convencionales y contribuye a cuidar el medioambiente, mediante la reducción de gases que generan el cambio climático. Además, las tecnologías que emplean la energía cinética del agua suelen tener un impacto ambiental menor en comparación con las grandes represas hidroeléctricas, dado que no requieren la construcción de embalses y no perturban significativamente los ecosistemas acuáticos (23).

2.2.5. Centrales hidroeléctricas

Son instalaciones diseñadas para funcionar de manera efectiva dentro de un rango específico de caudal. Estas plantas permiten una gestión más distribuida y requieren períodos de construcción relativamente cortos. Las estructuras de ingeniería civil necesarias para su edificación suelen ser bastante simples. Estas centrales integran tanto tecnologías tradicionales como avanzadas, ajustándose y simplificándolas para adaptarse a las condiciones operativas reales con pocas variaciones. Además, tienen un impacto ambiental mínimo (25).

Las características clave para identificar el desarrollo energético de una central hidroeléctrica son las siguientes (25):

- a) Está diseñada para operar con flujos dentro de un rango permitido.
- b) Permite una administración descentralizada.
- c) Exige tiempos de construcción relativamente cortos.
- d) Las estructuras de ingeniería civil para su construcción suelen ser simples.
- e) Combina tecnologías locales y sofisticadas, adaptándolas y simplificándolas para ajustarse a las condiciones reales de funcionamiento con mínimas variaciones.
- f) Genera un impacto ambiental reducido.

Las centrales hidroeléctricas pueden clasificarse según su capacidad de potencia instalada (24), como se observa en la tabla siguiente.

Tabla 2. *Clasificación de centrales hidroeléctricas según su capacidad de potencia.*

CATEGORÍA	RANGO DE POTENCIA
Hidroeléctrica de pico	Hasta 5 kW
Hidroeléctrica micro	De 5 kW a 50 kW
Hidroeléctrica mini	De 50 kW a 500 kW
Hidroeléctrica pequeña	De 500 kW a 30 MW
Hidroeléctrica mediana	De 30 MW a 50 MW
Hidroeléctrica grande	Más de 50 MW

Fuente: Saro (24).

2.2.5.1. Componentes de una central hidroeléctrica

Los componentes esenciales de una central hidroeléctrica permiten transformar la energía contenida en el agua en electricidad de manera eficiente y sostenible. A continuación, se detallan los principales elementos que conforman una central hidroeléctrica (24).

- A. Embalse o presa: la presa es una estructura fundamental que permite almacenar grandes cantidades de agua en un embalse. Su propósito es controlar el caudal de agua, garantizando un flujo estable y regulado. El agua acumulada en el embalse tiene energía potencial que se aprovecha al liberarla de forma controlada (24).
- B. Tubería forzada: esta tubería transporta el agua desde el embalse hasta las turbinas. A medida que el agua desciende, la energía almacenada se transforma en energía cinética, gracias a la gravedad y la presión. Este conducto debe ser lo suficientemente resistente para soportar altas presiones y mantener un flujo constante y eficiente (24).
- C. Casa de máquinas: es el edificio donde se ubican los equipos principales de la central. En su interior están los generadores y las turbinas, los cuales transforman la energía del agua en electricidad. Esta estructura es clave para el proceso de generación eléctrica (24).
- D. Turbina hidráulica: la turbina es el dispositivo que convierte la energía del agua en movimiento mecánico. Existen varios tipos de turbinas, como las Pelton, Francis o Kaplan, que se seleccionan según las características del agua. Las turbinas giran con el paso del agua, generando así energía mecánica (24).

- E. Generador eléctrico: acoplado a la turbina, el generador convierte el movimiento mecánico en energía eléctrica. Al girar la turbina, se produce una rotación que genera un campo magnético, induciendo la corriente eléctrica que será distribuida (24).
- F. Transformador: su función es aumentar el voltaje de la electricidad generada para que pueda ser transportada a grandes distancias sin pérdidas significativas de energía. Es un componente crucial para la distribución eficiente de la energía (24).
- G. Canal de descarga: tras pasar por las turbinas, el agua es liberada de vuelta al río o cauce natural a través del canal de descarga. Este componente permite devolver el agua sin causar daños al medio ambiente ni alterar su curso natural (24).
- H. Compuertas y válvulas: estos dispositivos regulan el flujo de agua. Las compuertas controlan el volumen de agua que ingresa desde el embalse hacia la turbina, mientras que las válvulas de seguridad protegen el sistema de sobrepresión (24).
- I. Subestación eléctrica: en esta sección, la electricidad generada es acondicionada y preparada para su distribución. Aquí se ajusta el voltaje para ser enviado de manera segura a la red eléctrica que abastece a los consumidores (24).
- J. Sistema de control y supervisión: es un sistema avanzado que monitorea y regula la operación de la planta. Permite ajustar el caudal de agua y la producción de energía según la demanda, asegurando una operación eficiente y segura (24).

2.2.5.2. Tipos de centrales hidroeléctricas

A. Centrales hidroeléctricas de pasada:

Aprovechan el caudal natural en la generación de electricidad sin requerir enormes embalses de agua. Son instalaciones de menor tamaño, con un impacto ambiental reducido, especialmente adecuadas para regiones donde el flujo del agua es constante y no se requieren cambios significativos en el curso del río. Se trata de plantas hidroeléctricas que aprovechan el caudal disponible del río según las condiciones ambientales para su turbinado. Presentan una diferencia de altura entre aguas relativamente baja y necesitan un flujo constante para su funcionamiento (25).

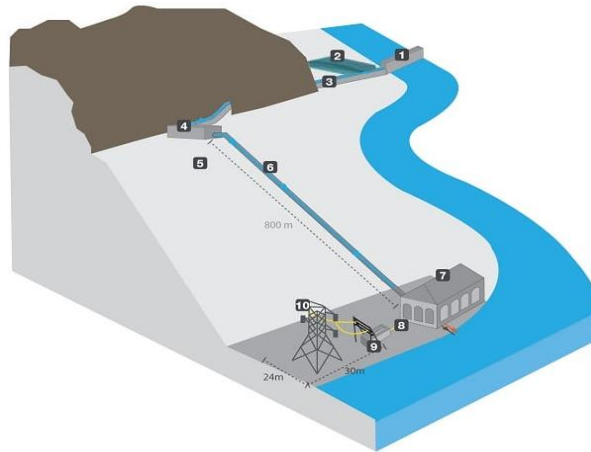


Figura 3. Central hidroeléctrica de pasada.

Fuente: Orozco (21).

B. Centrales hidroeléctricas con embalse de reserva:

Usan agua almacenada para generar electricidad. El embalse controla el flujo para ajustar la producción de energía según la necesidad. El agua se libera a turbinas para producir electricidad. Aunque son eficientes, su construcción puede tener un gran impacto ambiental y social debido a la inundación de áreas. Son centrales hidroeléctricas que almacenan un volumen específico de agua por una presa hidroeléctrica. Ello regula los niveles de agua que chocan con las turbinas, lo que permite generar energía eléctrica de manera constante de manera anual, sin considerar el caudal (25).

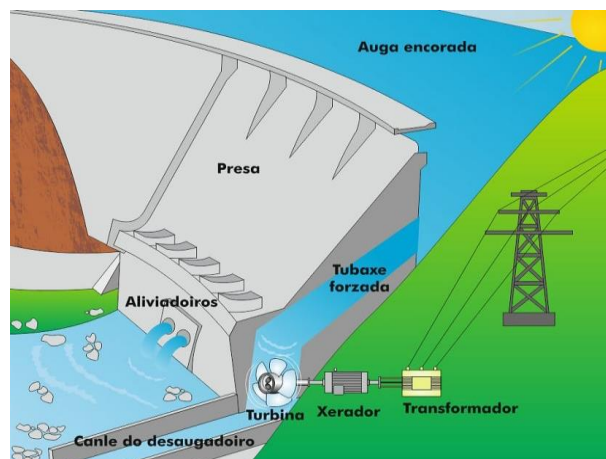


Figura 4. Planta hidroeléctrica de embalse.

Fuente: Orozco (21).

C. Centrales hidroeléctricas de bombeo:

Acumulan energía bombeando agua a embalses superiores en períodos de baja demanda, luego la liberan para generar electricidad cuando la necesidad aumenta, ofreciendo flexibilidad al sistema eléctrico estas centrales hidroeléctricas cuentan con dos embalses a diferentes alturas y se emplean para satisfacer requerimientos adicionales de electricidad.

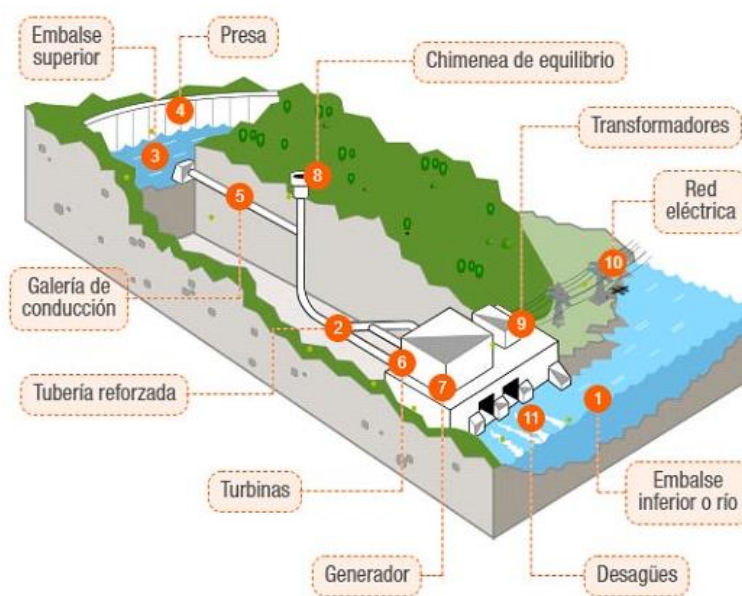


Figura 5. Diagrama de una central hidroeléctrica de bombeo.

Fuente: Orozco (21).

De acuerdo con la Organización Latinoamericana de Desarrollo (OLADE), las centrales hidroeléctricas en Latinoamérica y el Caribe se categorizan según su altura de caída. Esta clasificación, propuesta por OLADE (25), incluye las categorías mostradas en la tabla siguiente.

Tabla 3. Clasificación de las centrales hidroeléctricas basada en la altura de la caída.

CAÍDA EN METROS			
	BAJA	MEDIA	ALTA
Micro	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequeña	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fuente: OLADE, citado por Samaniego (25).

2.2.6. Conversión de energía mecánica a eléctrica

Para transformar la energía potencial del agua se transforma en energía cinética antes de convertirse en energía mecánica, se utilizan dispositivos llamados turbinas hidráulicas. Estas turbinas están diseñadas para aprovechar el flujo del agua y convertirlo en movimiento de rotación. Dicho movimiento rotatorio se usa luego para accionar un generador eléctrico mediante el principio de inducción electromagnética, el generador realiza la transformación de energía mecánica en energía eléctrica. Esto ocurre cuando un conductor, al moverse dentro de un campo magnético, produce una corriente eléctrica. Esta corriente es la energía eléctrica que se puede utilizar para alimentar distintos dispositivos (26).

2.2.7. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son equipos mecánicos que transforman la energía del fluido de trabajo en energía mecánica. En el campo de las máquinas hidráulicas, se consideran aquellas en las que el impacto de la elasticidad del fluido es insignificante. Ejemplos típicos de estas máquinas son las bombas, las norias y el tornillo de Arquímedes. Las ruedas hidráulicas de paletas, precursoras de las turbomáquinas actuales, marcaron un avance significativo en la ingeniería hidráulica. Destacados ingenieros como Burdín, Fourneyron, Sablukow, Pelton, Francis y Kaplan han contribuido de manera fundamental al desarrollo de diversas máquinas hidráulicas a lo largo de la historia (27).



Figura 6. Diagrama conceptual del funcionamiento de una turbina.

Fuente: Tadeo (19).

2.2.7.1. Elementos de una turbina hidráulica

- a) Distribuidor: es un componente estático cuyo propósito es dirigir el flujo de agua hacia el rodete, asegurando un flujo óptimo y eficiente hacia la parte móvil de la turbina (19).
- b) Rodete: es el componente donde se lleva a cabo la transformación de energía almacenada del salto de agua en energía mecánica. El flujo del agua, dirigido por el distribuidor, hace girar el rodete generando movimiento rotativo, fundamental para la producción de energía (19).

- c) Tubo de aspiración: es la sección que conecta la cámara del rodete con el conducto de descarga. Aquí se produce una presión negativa (o succión), lo cual ayuda a mantener el flujo continuo del agua, siendo una característica común en las turbinas de reacción (19).
- d) Carcasa: se encarga de proteger el rodete y de dar soporte a todos los demás elementos de la turbina. Su diseño permite no solo la protección, sino también la estabilidad estructural del sistema (19).

2.2.7.2. Tipos de turbinas hidráulicas

Existen varios tipos de turbinas según la altura de caída y el volumen de agua. Entre las más comunes se encuentran las turbinas Pelton, Francis, A. Turbina tipo Michell-Banki. y Kaplan:

A. La turbina Pelton:

Se utiliza para alturas elevadas y bajos caudales, aprovechando la energía cinética del agua mediante cucharas montadas en la periferia de una rueda. Este tipo de turbinas se utiliza generalmente para grandes caídas de agua con pequeños caudales (28). Su funcionamiento implica que el agua llega primero a la cámara de distribución, que la distribuye entre varios distribuidores. Luego, el agua pasa a través de una o más boquillas o inyectores, acelerándose antes de golpear las palas de la turbina, lo que provoca la rotación del eje. Las palas están diseñadas para que el chorro de agua cambie su dirección casi 180°, saliendo a una velocidad reducida debido a la transferencia de la mayor parte de su energía cinética al eje de la turbina como energía mecánica (28).

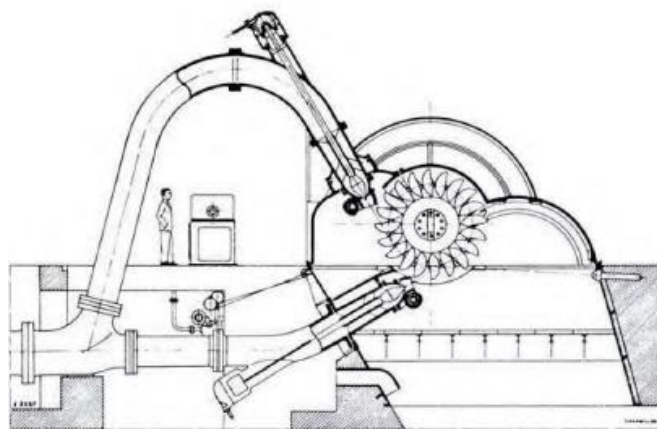


Figura 7. Esquema de una turbina Pelton de dos inyectores.

Fuente: Rojas (20).

B. La turbina Francis:

Adecuada para alturas intermedias y caudales moderados, opera como una turbina de reacción impulsada por el flujo de agua a través de un rotor. Es la turbina más frecuentemente utilizada en los sistemas hidroeléctricos. Su adaptabilidad permite su implementación en sistemas hidroeléctricos de escala micro, pequeña, mediana y grande, operando eficientemente en un rango de 10 a 650 metros aproximadamente (28). Esta turbina posee un rodete de flujo radial o mixto radial/axial, que usualmente se encuentra montado en una carcasa en espiral con paletas guía internas ajustables. El sistema de paletas guía es crucial para el funcionamiento eficiente de la turbina, ya que facilita el ajuste del ángulo de ataque del flujo, permitiendo una adaptación efectiva a variaciones en el caudal. Esto no solo mejora la conversión de energía hidráulica a energía mecánica, sino que también promueve una operación más estable y confiable bajo diversas condiciones de carga (28).

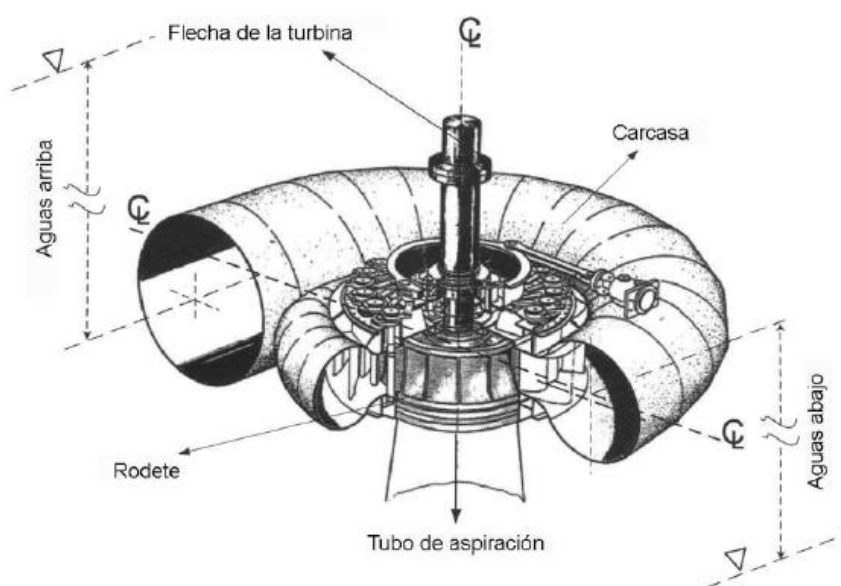


Figura 8. Estructura de una turbina Francis.

Fuente: Tadeo (19).

C. La turbina Kaplan:

Diseñada para bajas alturas y altos caudales, se asemeja a una hélice ajustada al flujo de agua para su aprovechamiento eficiente. Las turbinas Kaplan se utilizan frecuentemente en plantas hidroeléctricas de baja elevación, con alturas que varían entre 5 y 70 metros (28). El número de paletas usualmente oscila entre 3 y 7, y el ángulo máximo de la paleta

varía desde algunos grados negativos hasta 40 grados, medido desde la dirección circunferencial (28). Gracias a su ángulo de paleta ajustable, la turbina Kaplan alcanza una elevada eficiencia no solo en condiciones de operación previstas, sino también en cargas parciales y sobrecargas.

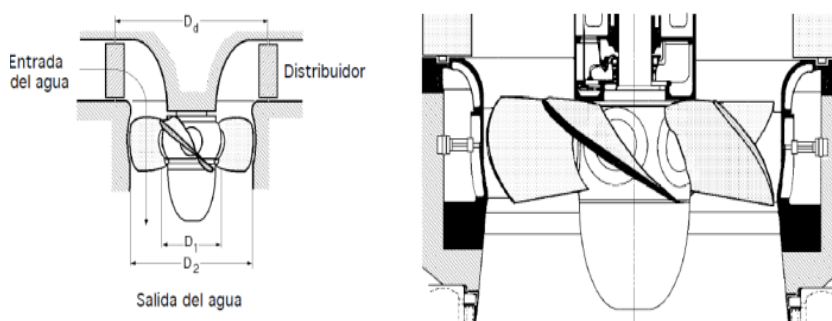


Figura 9. Rotor de turbina Kaplan.

Fuente: Analuca y Quinga (28).

D. Turbina de Michell-Banki:

Según el ITDG (19), el tornillo de Arquímedes cuenta con una boquilla de sección rectangular que permite la entrada del flujo de manera radial, la cual se regula mediante una paleta directriz. El rodete de esta turbina presenta una forma cilíndrica, en la que varios discos separan un conjunto de álabes curvados. Estos álabes están sólidamente sujetos al eje de la turbina mediante soldadura, lo que permite que el dispositivo opere de manera eficiente con caudales mayores. Además, se destaca que esta turbina es especialmente adecuada para pequeñas centrales hidroeléctricas, dado que tiene la habilidad de aprovechar caídas de agua intermedias y de gestionar diferentes caudales, siempre que se lleven a cabo las modificaciones requeridas en sus elementos. Su diseño también se caracteriza por ser de fácil manufactura, ya que la transforma como una opción factible para la producción de energía en comunidades rurales. Aunque presenta una eficiencia mediana, su versatilidad y facilidad de producción la hacen valiosa en contextos donde se requiere una solución energética práctica y económica (19).

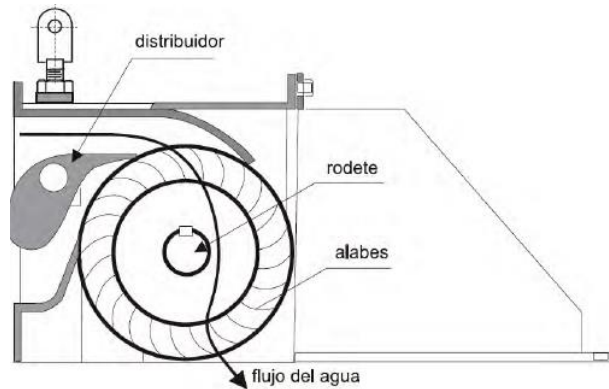


Figura 10. Esquema de una turbina Michell-Banki.

Fuente: Tadeo (19).

2.2.8. Selección de la turbina

La elección adecuada de una turbina hidráulica es un proceso fundamental que se basa en diversos factores relacionados con las características del recurso hídrico disponible. Esta selección se puede llevar a cabo utilizando gráficos específicos, que requieren información de entrada como el salto hidráulico y el caudal del agua. El salto hidráulico se describe como la variación de altura entre el nivel del agua en la parte de entrada de la turbina y el nivel en la salida, mientras que el caudal indica el volumen de agua que circula a través del sistema en un determinado periodo de tiempo (20). Para facilitar esta selección, se utilizan diagramas que relacionan el aumento de la eficacia en la producción de energía. La velocidad del flujo de agua con la cabeza, lo que permite a los ingenieros identificar la turbina más adecuada para este proceso implica un análisis detallado que tiene en cuenta tanto las condiciones del sitio como las especificaciones técnicas de las turbinas disponibles en el mercado.

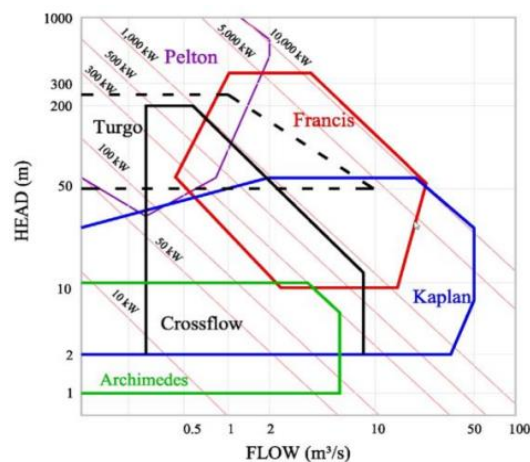


Figura 11. Diagrama de flujo vs cabeza de velocidad.

Fuente: Pérez (27).

2.2.9. Tornillo de Arquímedes

Es conocido también como tornillo sin fin, es considerado una de las invenciones más notables y duraderas en el ámbito de la tecnología. Su origen se atribuye al célebre matemático y físico griego Arquímedes de Siracusa, quien lo diseñó en el siglo III a.C. Este ingenioso dispositivo ha evolucionado a lo largo de los siglos y ha encontrado diversas aplicaciones en varios campos, destacándose en el sector agrícola y en la creación de energía (20).

Su funcionamiento se basa en un diseño helicoidal que permite elevar líquidos o materiales granulares mediante la rotación del tornillo. Esta característica hace que se convierta en una herramienta eficiente para bombear agua en terrenos agrícolas, facilitando el riego en áreas que carecen de acceso directo a fuentes hídricas. Además, su implementación en sistemas microhidráulicos ha permitido aprovechar corrientes de agua para generar energía, contribuyendo así a la sostenibilidad y al uso de recursos renovables. A lo largo de la historia, el tornillo de Arquímedes ha demostrado ser una solución innovadora que combina la simplicidad de su diseño con una efectividad notable, reafirmando su relevancia en la ingeniería ambiental moderna (20).

2.2.9.1. Ventajas del tornillo de Arquímedes

- **Energía sostenible:** es una de las características principales del tornillo de Arquímedes es una solución eficaz para la generación de energía sostenible, ya que utiliza recursos hídricos renovables. Este sistema contribuye a la producción de electricidad de forma ecológica, aprovechando el potencial del agua sin agotar los recursos naturales. Coste de mantenimiento bajo (27).
- **Eficiencia en bajos caudales:** la capacidad de operar eficientemente con caudales bajos es una característica destacada del tornillo de Arquímedes. Esta característica hace que sea una opción atractiva para regiones donde el flujo de agua no es constante o abundante, garantizando así que se pueda generar energía incluso en condiciones desafiantes (27).
- **Bajo coste de mantenimiento:** uno de los aspectos más positivos de esta turbina es su bajo coste de mantenimiento. Su diseño robusto y simple permite un fácil acceso a los componentes, lo que reduce tanto el tiempo como el dinero requerido para su mantenimiento regular y reparación (27).

- Facilidad de mantenimiento y control: el mantenimiento y control de este sistema son relativamente simples. Esto lo hace accesible para comunidades que pueden no tener recursos técnicos avanzados, permitiendo su operación con un personal mínimamente capacitado (27).
- Portabilidad: además, su diseño portátil le permite ser trasladado a diferentes ubicaciones según las necesidades energéticas de las comunidades, facilitando así el acceso a fuentes de energía renovable en áreas remotas o rurales donde la infraestructura eléctrica puede ser limitada (27).

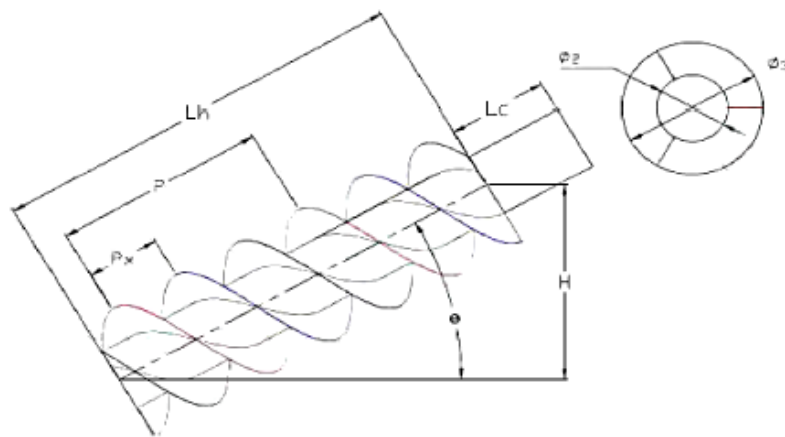


Figura 12. Dimensiones del tornillo de Arquímedes de tres hilos.

Fuente: Rojas (20).

De la figura 12:

*H: representa la altura.

*Nh: corresponde a la cantidad de hélices.

*Lh: se refiere a la longitud de la hélice.

*Lc: denota el eje.

2.2.9.2. Principio de funcionamiento

El tornillo de Arquímedes se compone de una hélice helicoidal colocada dentro de un tubo cilíndrico. Al girar la hélice, se genera un movimiento helicoidal que permite elevar el material desde un nivel inferior a uno superior. Este mecanismo utiliza los principios de la física de los fluidos y la mecánica para realizar su función de manera eficiente (7). La transformación de energía en movimiento del agua en energía eléctrica a través de un tornillo de Arquímedes es el proceso mediante el cual la energía cinética del flujo de agua se convierte en energía mecánica al hacer girar el

tornillo. Este dispositivo utiliza la forma helicoidal del tornillo para captar el movimiento del agua y elevarlo a una altura superior. Esta energía mecánica se transmite entonces a un generador eléctrico conectado al eje del tornillo, donde se convierte en energía eléctrica utilizable. Este método aprovecha de manera eficiente el potencial energético del agua en movimiento para generar electricidad de manera renovable y limpia, contribuyendo así a la producción sostenible de energía sin generar Emisiones de gases que contribuyen al calentamiento global durante su funcionamiento (7).

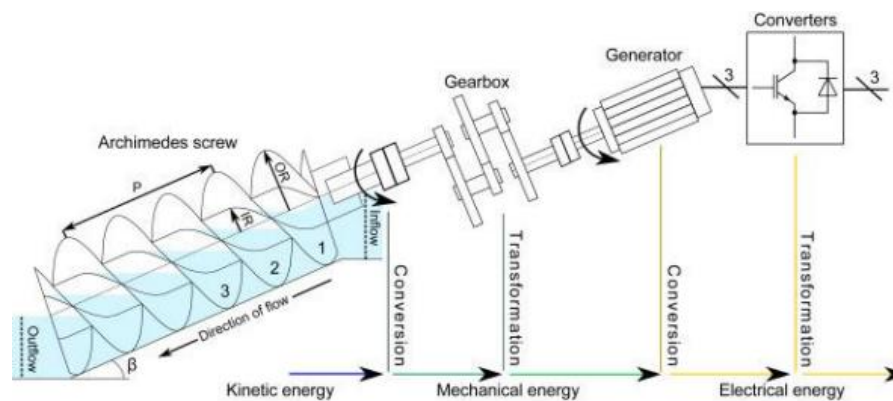


Figura 13. Conversión de la energía cinética del agua en energía eléctrica.

Fuente: Saro (24).

2.2.9.3. Componentes del tornillo de Arquímedes

El tornillo sin fin es un dispositivo que utiliza el movimiento del agua, es ingeniosa y antigua empleada para elevar agua y otros materiales granulares. En aplicaciones contemporáneas, este dispositivo ha sido adaptado para la producción de energía y su distribución de fluidos en diversas industrias. Un modelo portátil de tornillo de Arquímedes, especialmente diseñado para la producción de electricidad en áreas rurales, incluye varios componentes esenciales. A continuación, se describen estos elementos, sus funciones y características (29).

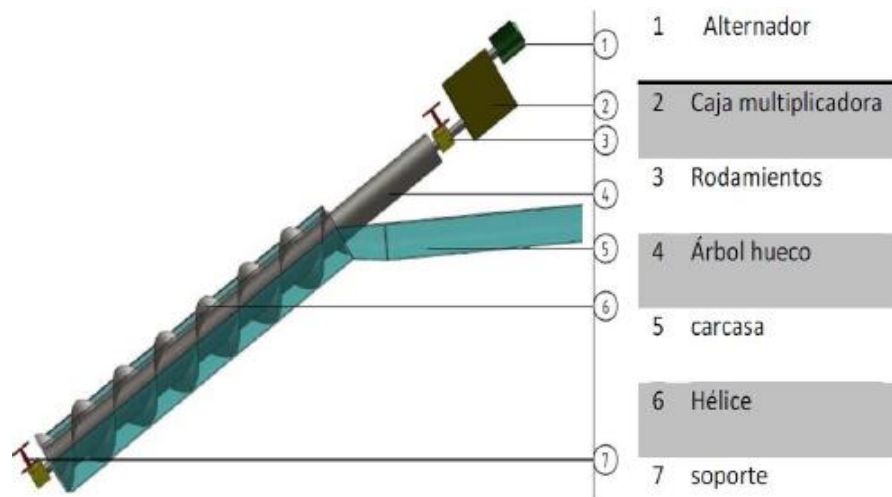


Figura 14. Componentes de un tornillo de Arquímedes.

Fuente: Rojas (26).

A. Hélice helicoidal:

La parte central del tornillo de Arquímedes es la hélice helicoidal, una estructura en forma de espiral que se extiende a lo largo del eje del tornillo. Su función principal es capturar y transportar agua o material mientras gira (29):

- **Diseño y materiales:** la hélice debe diseñarse con un ángulo de inclinación óptimo para maximizar la eficiencia en el transporte de agua. Los materiales comúnmente empleados para la hélice incluyen metales como el acero inoxidable que son resistentes a la corrosión, o polímeros duraderos (29).
- **Ángulo de inclinación:** el ángulo de la hélice es crucial para su desempeño. Un ángulo adecuado garantiza que se transporte la mayor cantidad posible de agua en cada rotación (29).

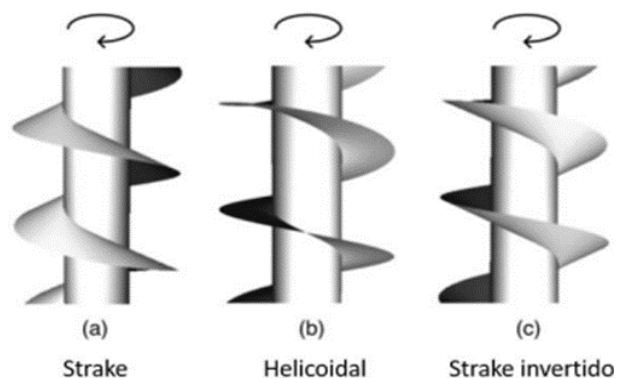


Figura 15. Diferentes tipos de hojas de tornillo de Arquímedes.

Fuente: Lopes *et al.* (30).

B. Cilindro hueco:

El cilindro hueco cumple la función de ser la estructura externa que sostiene y guía el movimiento del tornillo. Es esencial para proporcionar una superficie de soporte contra la cual el agua puede ser desplazada hacia arriba.

- Espacio de funcionamiento: el espacio entre la hélice y el cilindro debe ser lo suficientemente estrecho para minimizar las pérdidas de agua, pero lo bastante amplio para permitir el movimiento fluido de la hélice (29).
- Materiales: los materiales del cilindro deben ser duraderos y resistentes a la corrosión, típicamente metales o plásticos de alta resistencia (29).

C. Eje central:

El eje central es el componente alrededor del cual se enrolla la hélice helicoidal, proporcionando el soporte estructural esencial para el funcionamiento del tornillo.

- Resistencia y durabilidad: el eje debe fabricarse con materiales capaces de soportar las fuerzas mecánicas y resistir la corrosión. El acero tratado es una opción frecuentemente utilizada debido a su robustez y resistencia (29).

D. Manivela o motor:

Dependiendo de la aplicación y tamaño del sistema, el tornillo puede ser accionado manualmente mediante una manivela o automáticamente mediante un motor.

- Manivela: para aplicaciones de menor tamaño, una manivela permite operar el tornillo de forma manual (31).
- Motor: en sistemas modernos y de mayor envergadura, se emplea un motor eléctrico para proporcionar una rotación continua y controlada. Este motor puede funcionar mediante corriente alterna (CA) o corriente continua (CC) (29).

E. Generador eléctrico:

Para transformar la energía mecánica producida por el tornillo en electricidad, se incorpora un generador eléctrico.

- Variantes de generadores: los generadores pueden ser de tipo corriente alterna (AC) o corriente continua (DC), adaptándose según los requisitos específicos del sistema (29).
- Rendimiento: es fundamental elegir un generador altamente eficiente para optimizar la generación de energía eléctrica (29).

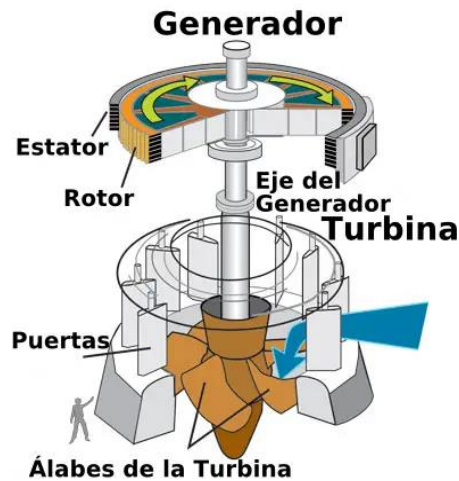


Figura 16. Generador acoplado a un tornillo de Arquímedes.

Fuente: Orozco (21).

F. Sistema de soporte y anclaje:

El sistema de soporte y anclaje garantiza la estabilidad del tornillo de Arquímedes, asegurando su correcto funcionamiento (29).

- Configuración: el diseño del soporte debe contemplar aspectos como vibraciones, fuerzas de torsión y resistencia a las condiciones del entorno (29).
- Movilidad: en aplicaciones móviles, el sistema de soporte debe ser ligero y fácil de montar, sin comprometer la estabilidad ni la eficiencia del dispositivo (29).

G. Mecanismo de almacenamiento energético

Un sistema para almacenar energía es esencial para conservar la energía generada y suministrar electricidad de manera continua (29).

- Baterías: las baterías recargables son habitualmente empleadas para almacenar la energía producida por el tornillo (29).

- Capacidad y durabilidad: se debe optar por baterías de alta capacidad y larga duración para garantizar la fiabilidad del sistema (29).

H. Sistema de distribución eléctrica:

Una vez almacenada, la energía debe ser distribuida de manera eficiente a las residencias u otras aplicaciones.

- Inversores: en caso de utilizar un generador de corriente continua (DC), se requerirán inversores para transformar la energía a corriente alterna (AC) (29).
- Reducción de pérdidas: un adecuado diseño del sistema de distribución minimiza las pérdidas de energía durante la transmisión (29).

2.2.10. Parámetros geométricos e hidráulicos

Son aspectos fundamentales en el diseño y funcionamiento de sistemas o dispositivos que operan con fluidos. Los parámetros geométricos se refieren a las dimensiones y proporciones físicas del componente o sistema, tales como diámetros, longitudes, ángulos y relaciones espaciales entre sus partes (32). Estos parámetros determinan la configuración estructural y el comportamiento mecánico de dicho sistema. Por otro lado, los parámetros hidráulicos están vinculados al movimiento y manejo de fluidos dentro del sistema, incluyendo variables como el caudal, la presión y el salto de agua (32). Estos parámetros influyen directamente en el desempeño y eficiencia del sistema en términos de transferencia de energía, control de flujo y optimización del rendimiento hidráulico. La correcta interacción entre los parámetros geométricos e hidráulicos es esencial para garantizar un diseño eficiente y un funcionamiento adecuado del sistema.

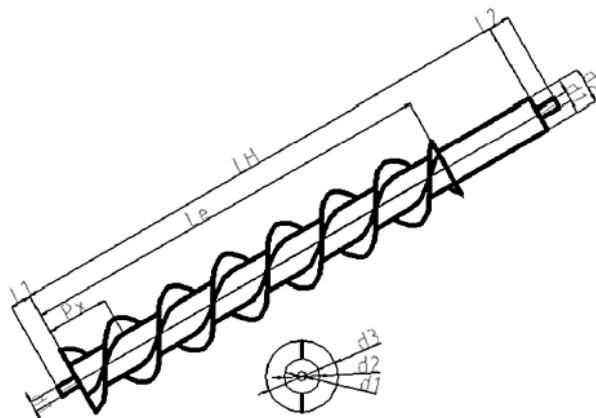


Figura 17. Vista lateral del tornillo de Arquímedes.

Fuente: Rojas (20).

La simbología de la figura 17 corresponde a (20):

- * α : ángulo de inclinación exterior de la hélice.
- * β : ángulo de inclinación interior de la hélice.
- * θ : ángulo de pendiente del tornillo o rotor.
- * Q : Flujo volumétrico o caudal:
- * $d1$: Diámetro del eje sólido y compacto.
- * $L1$: Medida del tramo inferior del eje sólido.
- * Px : Distancia entre las espiras del tornillo (paso).
- * Le : Longitud total de la hélice o espiral.
- * LH : Medida del eje interno vacío.
- * $d2$: Diámetro del eje interno hueco.
- * $d3$: Diámetro externo de la estructura del tornillo.
- * H : Altura del desnivel o salto.
- * R : Radio superficial de la hélice.
- * r : Radio del eje interno hueco.
- * N : Cantidad de hilos o aspas de la hélice.

2.2.10.1. Diseño geométrico del tornillo

El diseño geométrico del tornillo de Arquímedes también implica cálculos específicos para determinar el diámetro del tornillo (D), la longitud de la hélice (L) y el paso de la hélice (p) (20).

A. Diámetro del tornillo:

El diámetro del tornillo se puede calcular en función del caudal y la velocidad de rotación. Una aproximación para el diámetro es (20):

$$D \approx \sqrt[3]{4Q / \pi n}$$

Donde:

- * D es el diámetro del tornillo (m).
- * Q es el caudal (m^3/s).
- * n es la velocidad de rotación (rps, revoluciones por segundo).

B. Longitud de la hélice:

La longitud de la hélice depende del ángulo de inclinación y la altura de elevación. Se puede calcular como (20):

$$L = h / \sin(\theta)$$

Donde:

*L es la longitud de la hélice (m).

*h es la altura de elevación del agua (m).

* θ es el ángulo de inclinación (rad).

C. Paso de la hélice:

El paso de la hélice representa la distancia que una vuelta completa de la hélice avanza a lo largo del eje del tornillo. Se puede definir como (20):

$$p = L/n$$

Donde:

*p es el paso de la hélice (m).

*L es la longitud de la hélice (m).

*n es el número de vueltas de la hélice.

D. Cálculo del ángulo óptimo:

Determinar el ángulo óptimo implica encontrar un equilibrio entre mejorar la eficiencia del transporte de agua y reducir las pérdidas por fricción y derrame. Este proceso puede abordarse matemáticamente mediante ecuaciones que vinculan el ángulo de inclinación con estos parámetros críticos para su análisis detallado (20).

Volumen de Agua Transportado (Q):

$$Q = A \cdot v \cdot \cos(\theta)$$

En el cual (33):

*A representa la sección transversal del tornillo.

*v es la velocidad del fluido en el recorrido de la hélice.

* θ es el ángulo de inclinación.

2.2.11. Dimensiones y especificaciones

2.2.11.1. Longitud y diámetro

La longitud del tornillo de Arquímedes es un aspecto crucial que influye directamente en su capacidad de elevación y en la cantidad de agua que puede transportar. En aplicaciones móviles y portátiles, se recomienda que la longitud varía típicamente entre 1 y 5 metros. Una longitud mayor facilita

el transporte de mayores volúmenes de agua, aunque conlleva un incremento en el peso y la complejidad del dispositivo (33).

El diámetro del tornillo también juega un papel fundamental en su eficiencia y capacidad de transporte de agua. En aplicaciones portátiles, es común encontrar diámetros que varían entre 10 y 50 centímetros. Un diámetro mayor permite mover más agua por cada rotación, pero también implica un aumento en el peso y la necesidad de una mayor resistencia mecánica (33).

2.2.11.2. Ángulo de inclinación

El ángulo de inclinación del tornillo de Arquímedes es crucial para asegurar su funcionamiento eficiente. Este ángulo determina la velocidad a la cual el agua se desplaza a lo largo de la hélice y tiene un impacto directo en su capacidad de elevación (30).

- Ángulo óptimo: se recomienda un ángulo de inclinación óptimo que generalmente oscila entre 30 y 45 grados. Este rango facilita el transporte eficiente del agua al mismo tiempo que minimiza las pérdidas de energía debidas a la fricción (30).
- Adaptabilidad: en aplicaciones portátiles, puede ser ventajoso diseñar el tornillo con un ángulo de inclinación ajustable. Esto permite adaptarse de manera efectiva a diferentes entornos y requisitos específicos, optimizando así el rendimiento del dispositivo en diversas condiciones operativas (30).

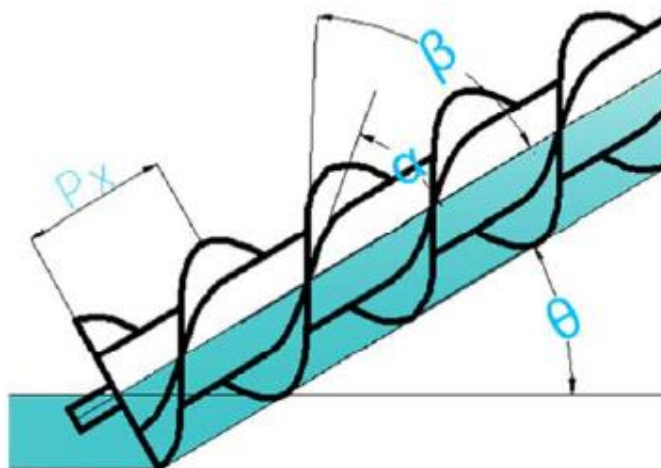


Figura 18. Vista lateral del tornillo de Arquímedes.

Fuente: Lopes *et al.* (30).

2.2.11.3. Área de contacto

La cantidad de agua transportada por el tornillo de Arquímedes en un período específico es un aspecto clave para la eficiencia del sistema. Este volumen está influenciado por la geometría del tornillo, la velocidad de giro y el ángulo de inclinación (20).

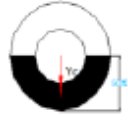
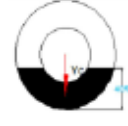
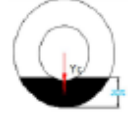
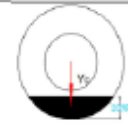
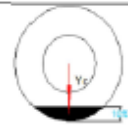
Área de contacto	área	porcentaje	y_c
	$A = \frac{3}{8}\pi R^2$	50%	$y_c = 0.4951 R$
	$A = \frac{3}{10}\pi R^2$	40%	$y_c = 0.6037 R$
	$A = \frac{9}{40}\pi R^2$	30%	$y_c = 0.6907 R$
	$A = \frac{3}{20}\pi R^2$	20%	$y_c = 0.7544 R$
	$A = \frac{3}{40}\pi R^2$	10%	$y_c = 0.8471 R$

Figura 19. Cuadro que precisa sobre el área de contacto.

Fuente: Rojas (20).

2.2.11.4. Volumen de agua transportado

La cantidad de agua transportada por el tornillo de Arquímedes en un período específico es un aspecto clave para la eficiencia del sistema. Este volumen está influenciado por la geometría del tornillo, la frecuencia de rotación y el ángulo de declinación (30).

La fórmula básica para el volumen de agua transportado por unidad de tiempo (Q) es:

$$Q = A \cdot v \cdot \cos(\theta)$$

Donde:

*Q es el caudal (m³/s).

*A representa la sección transversal del tornillo (m²).

*v corresponde la velocidad del agua a lo largo de la hélice (m/s).

*θ es el ángulo de inclinación del tornillo respecto a la horizontal.

2.2.11.5. Potencia hidráulica

La potencia hidráulica disponible en el sistema depende del caudal de agua y la altura desde la cual el agua es transportada. La fórmula para la potencia hidráulica (P) es (30):

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot h$$

Donde:

*P es la potencia hidráulica (W).

*ρ es la medida de la densidad del líquido agua (kg por m³).

*g indica la aceleración causada por la gravedad (9.81 m/s²).

*Q es el caudal (m³/s).

*h es la altura de elevación del agua (m).

2.2.11.6. Eficiencia del tornillo de Arquímedes

La eficiencia (η) de un tornillo de Arquímedes se describe como la proporción entre la energía efectiva generada y la energía hidráulica accesible. Esta eficiencia puede ser influenciada por elementos como la fricción, las pérdidas por derrame y el diseño del tornillo (30).

$$\eta = P_{\text{útil}} / P_{\text{hidráulica}} \times 100\%$$

Donde:

*P_{útil} es la potencia útil generada (W).

*P_{hidráulica} es la potencia hidráulica disponible (W).

2.3. Definición de conceptos clave

2.3.1. Energía eléctrica

La electricidad se produce a través del movimiento de electrones o cargas eléctricas, y puede emplearse para realizar trabajo o transformarse en otras formas de energía. Esta electricidad puede originarse de fuentes renovables, como el agua, la luz solar o el viento, así como de fuentes que no se regeneran, como el carbón o el gas natural (4).

2.3.2. Energía renovable

Hace alusión a las fuentes de energía que se renuevan de manera continua y natural, como la energía, geotérmica, eólica, hidráulica y solar. Estas fuentes son inagotables en términos de la escala humana y no emiten gases contaminantes, lo que las convierte en una opción clave para el desarrollo sostenible (13).

2.3.3. Sistema microhidráulico

Este sistema de generación de energía a pequeña escala utiliza el flujo de agua para producir electricidad. Es particularmente adecuado para ser utilizado en bajos caudales y tiene un impacto ambiental menor comparado con proyectos hidroeléctricos a gran escala (8).

2.3.4. Tornillo de Arquímedes

Es un dispositivo diseñado para elevar agua o generar electricidad mediante el uso de un tornillo helicoidal. Se utiliza en instalaciones hidroeléctricas a pequeña escala por su eficiencia operativa en condiciones de bajo caudal y baja altura (7).

2.3.5. Electrificación rural

Este término se refiere al proceso de llevar electricidad a áreas rurales que no tienen acceso a la red eléctrica. La electrificación es crucial para optimizar las condiciones de vida y fomentar el desarrollo económico en comunidades remotas, y suele lograrse mediante tecnologías híbridas o renovables, como los sistemas microhidráulicos (9).

2.3.6. Cambio climático

Hace alusión a las variaciones significativas y duraderas en los patrones climáticos globales, generadas en gran medida por acciones humanas, como la incineración de combustibles fósiles, que aumenta las emisiones de CO₂ en la atmósfera (5).

2.3.7. Combustibles fósiles

Los recursos fósiles, son utilizados de forma tradicional a lo largo de los años, perjudicando al medio ambiente. Aunque han sido las fuentes predominantes de energía durante siglos, su utilización libera emisiones de CO₂ y otros contaminantes que fomentan el cambio climático (2).

2.3.8. Energías no renovables

son aquellas que derivan de recursos limitados en la naturaleza, formados durante extensos períodos de tiempo originados por la descomposición de restos orgánicos. Entre estas se encuentran los recursos convencionales, los cuales han sido utilizados de manera extensiva en todo el mundo para generar electricidad (3).

2.3.9. Descarbonización

Proceso orientado a recortar las emanaciones de CO₂ en el sector energético, sustituyendo los combustibles fósiles por energías renovables. La descarbonización resulta fundamental para enfrentar el cambio climático y lograr las metas globales de sostenibilidad (5).

2.3.10. Pico-hidroeléctrico

Estos sistemas de generación de energía son de capacidad muy pequeña, generalmente menor a 5 kW. Son ideales para proveer electricidad a comunidades pequeñas o a lugares específicos en zonas rurales donde el acceso a la red eléctrica no es factible (13).

2.3.11. Sistema híbrido de energías renovables

Consiste en la combinación de dos o más fuentes renovables, como la solar, eólica o hidráulica, para proporcionar un suministro eléctrico estable y continuo. Este enfoque es especialmente útil en lugares con variabilidad climática, ya que garantiza una disponibilidad constante de energía (34).

2.3.12. Eficiencia energética

Hace referencia a la reducción del consumo de energía para llevar a cabo una actividad. Mejorar la eficiencia energética es fundamental para disminuir tanto el gasto energético como las emisiones de CO₂ sobre todo en sectores como la generación eléctrica (6).

2.3.13. Desarrollo Sostenible

Se enfoca en satisfacer las exigencias actuales sin perjudicar la facultad de las generaciones por venir para cubrir sus necesidades. En el ámbito energético, implica el uso de fuentes renovables y tecnologías limpias para minimizar los impactos ambientales y fomentar la equidad social (31).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método, tipo o alcance de la investigación

La metodología de investigación es científica. Según Hernández-Sampieri (35) ofrece un enfoque sistemático y riguroso para llevar a cabo investigaciones de manera efectiva. Esta investigación está establecida en esta metodología, ya que consta de una serie de pasos fundamentales para obtener resultados confiables y válidos. Uno de los primeros pasos es la identificación y definición clara del problema de investigación. En el presente estudio, se ha identificado un problema específico que requiere ser investigado y abordado de manera científica. La utilización de esta metodología garantiza un enfoque sistemático y riguroso, lo cual permite obtener resultados que aportan al campo de estudio (35).

El tipo de investigación es aplicada; tiene como propósito abordar las necesidades específicas de iluminación en hogares ubicados en áreas con recursos energéticos limitados, mediante el desarrollo e implementación de un sistema microhidráulico basado en una turbina tipo tornillo de Arquímedes. Este enfoque aplicado busca traducir los principios teóricos de la hidrodinámica en soluciones efectivas y accesibles para comunidades en situaciones de escasez energética (35).

El presente estudio se enmarca en un nivel de investigación correlacional-descriptivo, cuyo objetivo principal es especificar las propiedades, características y perfiles de un fenómeno o conjunto de elementos que están sujetos a análisis; este enfoque investigativo busca examinar y comprender el grado, la relación de asociación de conceptos, o variables. El enfoque correlacional-descriptivo permite establecer una perspectiva amplia y detallada de las causas y factores, que influyen en el rendimiento y la eficacia de los sistemas microhidráulicos en cuerpos de agua con bajos niveles de flujo volumétrico, brindando una base sólida para futuras investigaciones y a las tomas de decisiones (35).

3.2. Diseño de la investigación

Se llevó a cabo un diseño experimental para investigar de manera sistemática y rigurosa el desempeño del sistema microhidráulico en diferentes escenarios. Considerando que la turbina tiene una configuración inalterable y será instalada en cuerpos de agua de escaso aforo volumétrico, se determinaron dos factores independientes. Estos factores son la pendiente de caída (PC) y el área mojada (A_m), cada factor cuenta con dos valores de nivel; se tuvo el propósito de investigar su influencia en el potencial eléctrico que es la variable dependiente y para contrastar su influencia también se determinó la velocidad de

rotación de la turbina. Para este fin, se implementó un diseño factorial completo de 2k, donde k representa el número de factores independientes, que en este caso es 2.

Los factores independientes que se plantearon son:

- Factor PC: donde PC1 es la pendiente de caída a baja escala y PC2 es a alta escala.
- Factor Am: donde Am1 es el área mojada en menor cantidad y Am2 en gran cantidad.

Tabla 4. *Diseño factorial completo.*

Número de corrida	Pendiente de caída	Área mojada	Repetición		
			I	II	III
1	PC1	Am1	PC1Am1	PC1Am1	PC1Am1
2	PC1	Am2	PC1Am2	PC1Am2	PC1Am2
3	PC2	Am1	PC2Am1	PC2Am1	PC2Am1
4	PC2	Am2	PC2Am2	PC2Am2	PC2Am2

En cuanto a los valores de nivel, se consideró que la pendiente inicial de la turbina coincida con la pendiente natural del río, y para el segundo valor se utilizó un bloque de una determinada altura. Para el área mojada, la turbina se ubicará en diferentes puntos, logrando así un área mojada menor y otra similar al ideal. Esto va a permitir realizar las cuatro combinaciones posibles del diseño experimental; se harán tres repeticiones a cada combinación para obtener datos más representativos.

Pendiente de caída:

Para determinar la pendiente natural del río, se utilizó la siguiente ecuación que representa la fórmula de Manning (36):

$$n = \frac{1}{V_f} * Rh^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde V_f representa velocidad del flujo en (m/s), Rh es el radio hidráulico del cauce en (m), S es la pendiente expresada en (%) y n es el coeficiente de rugosidad, cuyo valor se obtuvo aplicando el método de Cowan.

$$Rh = \frac{Ah}{P}$$

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m_5$$

Donde Ah representa el área hidráulica en (m²) y P es el perímetro en (m), ambos correspondientes a la sección total mojada (37).

Para determinar el valor de cada variable del método de Cowan se utilizó la tabla 5, considerando las condiciones del cauce observadas en el estudio de campo.

Tabla 5. *Criterios y valores numéricos para el método de Cowan.*

Condición del cauce			Valores
Material considerado	Tierra	n0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variación de la sección transversal	Gradual	n2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto de las obstrucciones	Insignificante	n3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-1.000
Cantidad de meandros	Menor	n5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severa		1.300

Fuente: Díaz-Salas *et al.* (36).

Potencial mecánico:

Para calcular el potencial teórico que podría alcanzar el diseño del tornillo de Arquímedes, se empleó la siguiente ecuación, que representa la energía disponible en el agua que fluye a través del sistema microhidráulico para transformar energía mecánica en eléctrica (14):

$$P_H = T * w$$

En esta fórmula, P_H es el potencial teórico en (W), T es el torque obtenido de utilizando otra ecuación en (Nm), y w es la velocidad angular en (rad/s), calculada mediante la siguiente ecuación:

$$T = \rho * g * LT * Am * \sin(\theta) * \tan(\alpha) * Yc$$

$$w = \frac{Q * \tan(\alpha)}{Am * Yc}$$

En este caso T representa el par generado en (Nm), ρ es la densidad del agua, siendo de 1000 kg/m^3 , g es la aceleración debido a la gravedad, equivalente a 9.81 m/s^2 , LT es la longitud total de la turbina (m), Am corresponde al área mojada del agua en contacto con las palas de la turbina en (m^2), θ es el ángulo de inclinación de la turbina en grados ($^\circ$), α indica el ángulo de inclinación de las palas también en ($^\circ$), Yc representa la inercia de la pala en metros (38).

Además, Q representa el caudal que ingresa a la turbina en (m^3/s), α es el ángulo de inclinación de las palas en ($^\circ$), Yc es la inercia de la pala en (m), y Am es el área mojada del agua en contacto con las palas de la turbina en (m^2).

3.3. Población y muestra

La población del estudio comprende los cuerpos de agua presentes en el distrito de Sicaya, mientras que la muestra específica seleccionada para el análisis fue un riachuelo de Sicaya. Este cuerpo de agua fue elegido debido a sus características representativas y su adecuación para evaluar el desempeño del sistema microhidráulico propuesto.

3.4. Materiales

Tabla 6. *Materiales de construcción para la turbina hidráulica.*

N°	CANT.	MATERIALES	IMAGEN	COSTO
01	2 unid.	Tubo rectangular de acero de 1"		S/ 76.00
02	4 m	Tubo pvc de 4"		S/ 50.00
03	2 unid.	Tapas pvc de 4"		S/ 18.40
04	1 unid.	Plancha de pvc flexible		S/ 60.00

05	1 unid.	Varilla roscada 3/8 x 1 m		S/ 9.00
06	1 doc.	Tuercas hexagonales de 3/8		S/ 1.50
07	1 doc.	Arandela delgada de 3/8		S/ 2.70
08	2 unid.	Rodamientos de 3/8		S/ 28.00
09	1 unid.	Polea dentada para eje de 8 mm		S/ 36.90
10	1 unid.	Polea dentada para eje de 14 mm		S/ 36.90
11	1 unid.	Faja dentada HTD-3M		S/ 25.90
12	1 unid.	Pegamento instantáneo		S/ 160.00
13	5 unid.	Pegamento epóxico		S/ 67.50
14	1 unid.	Plancha de acrílico de 5 mm		S/ 275.00

Tabla 7. *Equipos para la construcción de turbina hidráulica.*

N°	CANT.	EQUIPOS	IMAGEN	COSTO
01	1 unid.	Multímetro		Recurso propio
02	1 unid.	Pistola de calor		S/ 189.90
03	1 unid.	Taladro		S/ 169.00
04	1 unid.	Servomotor de corriente continua		S/ 369.90
05	1 unid.	Amoladora		Recurso propio
06	1 unid.	Disco de corte		Recurso propio
07	1 unid.	Correntómetro		Recurso de la universidad

3.5. Metodología específica

3.5.1. Reconocimiento de campo

Para determinar el área de trabajo donde se implementó el sistema microhidráulico, se caracterizó la provincia de Huancayo para determinar las zonas con mayor potencial hidráulico, siendo el distrito de Sicaya una de las zonas con mayor potencial hidráulico.

Se realizó una inspección general del distrito, donde se encontraron varios canales de agua para riego sobre la producción agrícola de la localidad, también se encontró varios riachuelos que desembocan en la cuenca del Mantaro, siendo uno de estos riachuelos nuestra área de estudio.

Se evaluaron los distintos tramos del riachuelo teniendo en cuenta las condiciones físicas del terreno, con el fin de manipular los factores independientes al colocar el sistema microhidráulico en el cuerpo de agua.

3.5.2. Construcción del sistema microhidráulico

La construcción del sistema microhidráulico se dividió en dos etapas:

- Sistema mecánico.
- Sistema eléctrico.

Diseño mecánico:

El diseño mecánico se basó en una turbina tipo tornillo de Arquímedes, el cual se dividió en dos secciones principales. La sección interna consiste en un cuerpo central construido con PVC de 4" y tiene una longitud de 83 cm; se colocaron las dos palas opuestas que fueron previamente elaboradas, para moldear las palas de forma helicoidal como se observa en la figura 20, se utilizó la pistola de calor y como medida de seguridad se utilizó guantes térmicos; estas dos palas que serán colocadas de manera opuesta a lo largo del eje servirán como medio para aprovechar la energía cinética del agua, además el eje roscado interno que atraviesa el cuerpo central permite el movimiento a medida que el agua ingrese por el sistema.

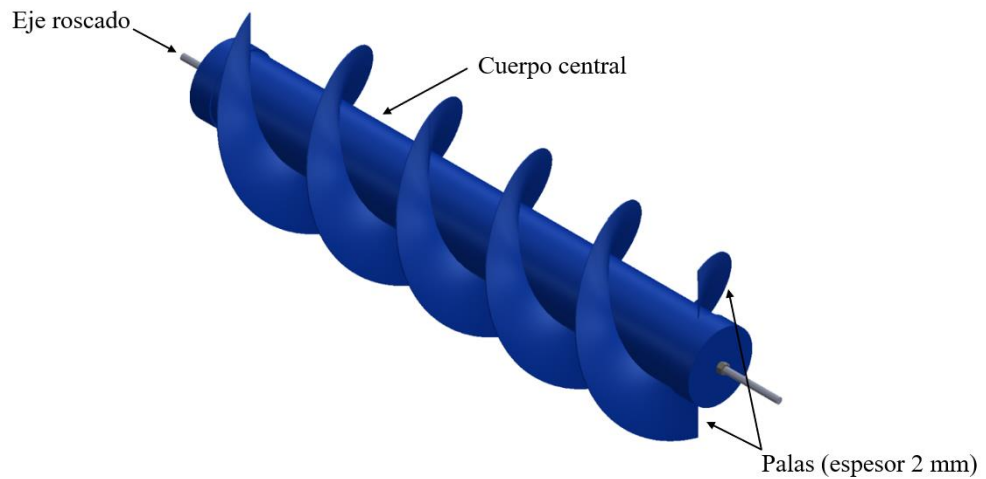


Figura 20. Turbina tipo tornillo de Arquímedes.

La sección externa fue la estructura de soporte que sostuvo la turbina; el eje roscado se colocó en soportes auxiliares con rodamientos. La estructura también tuvo la función de servir como medio de sujeción del sistema eléctrico y de las paredes de acrílico que sostuvieron el canal por donde circuló el agua.

Sistema eléctrico:

Para la conversión de la energía mecánica en eléctrica, se utilizó un generador eléctrico de corriente continua (CC), considerando dos criterios para su elección: el tipo de aplicación y el par teórico producido por la turbina. El tipo de aplicación se refirió a la finalidad del generador.

3.6. Recolección de datos

Una vez que se seleccionó el diseño de investigación adecuado, la siguiente etapa consistió en recolectar los datos pertinentes sobre los atributos, conceptos o variables de las unidades de análisis, en este caso, los elementos del sistema microhidráulico tipo tornillo de Arquímedes y las condiciones ambientales del distrito de Sicaya, Huancayo. La recolección de datos implicó la determinación de los datos *in situ* mediante instrumentos claves, centrados en evaluar el rendimiento energético y la eficiencia del sistema propuesto para iluminar hogares en zonas rurales.

Para la recolección de datos, se utilizó un tacómetro para medir la velocidad de rotación del mecanismo de la turbina tipo tornillo de Arquímedes. Este instrumento, permitió registrar la velocidad en revoluciones por minuto (RPM), proporcionando datos precisos sobre el rendimiento mecánico del sistema. La medición de la velocidad de rotación fue fundamental para analizar la eficiencia del sistema y relacionar el caudal de agua con la potencia generada.

Además, se empleó un multímetro digital para medir magnitudes eléctricas como el voltaje y la intensidad de corriente en el sistema microhidráulico. Este instrumento, también conocido como polímetro, permitió realizar mediciones tanto en corriente continua (DC) como en corriente alterna (AC), obteniendo datos clave sobre la generación de energía eléctrica. El uso del multímetro digital facilitó la precisión y claridad en las lecturas, siendo crucial para evaluar el desempeño eléctrico del sistema. Se determinó el potencial eléctrico (P_e) de la turbina utilizando la siguiente ecuación

$$P_e = Volt * I_c \quad (M)$$

Donde: I_c es la intensidad de corriente en (A) y Volt es el voltaje en (V).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

Hipótesis específica 1:

Potencial mecánico:

Se calculó el potencial teórico del sistema microhidráulico mediante la ecuación descrita anteriormente, determinando que el potencial eléctrico máximo que la turbina puede alcanzar es de 620.25 W.

Torque teórico:

Para determinar el torque teórico de la turbina, se utilizó la ecuación descrita en el capítulo anterior, adicionalmente se empleó otra ecuación necesaria para determinar el torque teórico siendo:

$$Yc = 0.4951 * Rhe$$

Donde Rhe es el radio de la pala en (m); asimismo, se consideró un 50 % de área mojada para maximizar la eficiencia (38). Con ello se efectuó el cálculo teniendo en cuenta los criterios del diseño de la sección interna, en los que se fijaron θ y α en 30° y 40°, respectivamente, ya que estos ángulos permiten que la turbina alcance una eficiencia del 80 % y optimizan su rendimiento (39). Al realizar la sustitución en la fórmula, se obtuvo un torque teórico de 3.79 Nm.

Por otra parte, en base a estos dos criterios, se decidió utilizar un generador eléctrico de corriente continua (CC), cuyas principales características se detallan a continuación.

Tabla 8. *Características técnicas del generador eléctrico.*

Tipo	Generador eléctrico CC con cepillo
Modelo	XD-3420
Potencia nominal (W)	30
Tensión nominal (V)	12
Velocidad nominal (RPM)	3500
Corriente (A)	0.5
Torque de torsión (kgf*cm)	1

Hipótesis específica 2:

Aforo volumétrico:

Debido a la naturaleza del experimento, no fue posible realizar simulaciones en laboratorio, por lo que se optó por una evaluación directa en campo. En este contexto, resultó fundamental llevar a cabo un aforo volumétrico in situ en un riachuelo ubicado en el distrito de Sicaya. Para ello, se aplicó la metodología descrita en el capítulo anterior, permitiendo determinar con precisión el caudal del río en la zona de estudio. El trabajo de campo se realizó el 30 de noviembre de 2023, efectuándose seis mediciones en el transcurso de una hora, con intervalos de 10 minutos durante la mañana. Este procedimiento permitió evaluar la estabilidad del flujo y minimizar el margen de error en los cálculos. En la tabla 9 se presentan los valores obtenidos, los cuales fueron fundamentales para la correcta evaluación del sistema microhidráulico en condiciones reales de operación.

El proceso comenzó con la medición del ancho del río, empleando un flexómetro para asegurar precisión en los resultados. Este ancho se dividió posteriormente en cuatro secciones transversales, con el fin de obtener un perfil más detallado de la distribución del flujo. Además, se midió la velocidad del flujo de agua y la profundidad en cada sección, utilizando un correntómetro (Global Water FP111), un instrumento especializado que garantiza la exactitud de las mediciones.

Tabla 9. *Registro de datos en el segmento seleccionado del río.*

Ancho (m)	Cantidad de secciones	Profundidad (m)	Velocidad del flujo (m/s)
4.35	4.00	0.24	0.00
		0.13	0.80
		0.30	1.10
		0.23	1.30
		0.28	0.00

Para procesar los datos recopilados, se utilizó el software HidroEsta como una herramienta que facilita y simplifica diversos cálculos hidrológicos. Este software permitió la inserción de los datos obtenidos, lo que posibilitó el cálculo preciso del aforo volumétrico del río (ver tabla 10). HidroEsta se destacó por su eficiencia en generar resultados confiables y detallados, convirtiéndose en una herramienta esencial para el análisis y la gestión de los recursos hídricos en el estudio realizado.

Tabla 10. Resultados de cada perfil transversal.

Sección	Área (m ²)	Velocidad media (m ² /s)	Caudal (m ³ /s)
1	0.20	0.40	0.08
2	0.18	0.95	0.17
3	0.23	1.20	0.28
4	0.28	0.65	0.18

Según los datos procesados, se determinó que el aforo volumétrico total de la sección del río es de 0.7118 m³/s. Además, el software HidroEsta proporcionó una representación detallada de la geometría completa del río, la cual se puede observar en la figura 21. Esta información es crucial para entender mejor las características hidrodinámicas del río en el área de estudio.

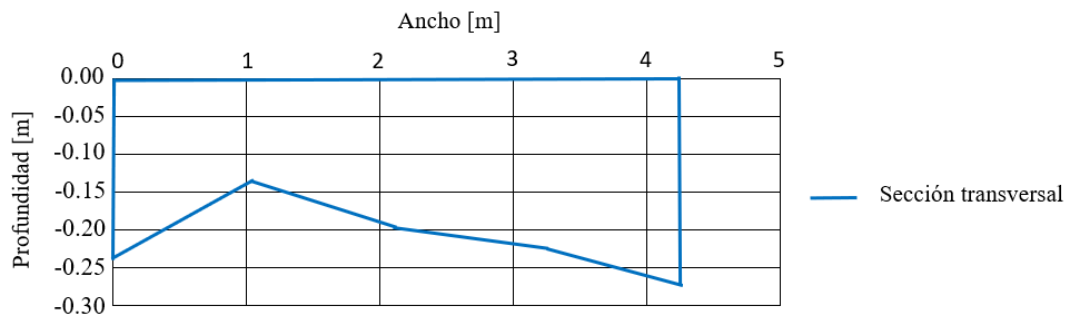


Figura 21. Configuración completa de la geometría del río.

Es necesario agregar que por naturaleza los ríos y riachuelos experimentan variaciones en su caudal a lo largo del año debido a factores estacionales, como la temporada de lluvias (diciembre-marzo) y la estación seca (junio-septiembre). Sin embargo, en el riachuelo estudiado no se dispone de registros hidrológicos históricos, ya que no cuenta con una estación de monitoreo instalada. Por esta razón, no es posible determinar con precisión la variabilidad del caudal a lo largo del año. A pesar de esta limitación, el aforo volumétrico obtenido es representativo de las condiciones en las que se llevó a cabo la prueba experimental y proporciona información clave para determinar el desempeño del sistema microhidráulico en un escenario real. Este dato experimental es crucial, ya que el propósito del estudio no es analizar la variación anual del caudal, sino determinar los parámetros óptimos para la implementación del sistema en un entorno específico.

No obstante, para futuras investigaciones y una implementación a mayor escala, se recomienda realizar aforos adicionales en distintas épocas del año, lo que permitiría evaluar con mayor detalle la variabilidad del caudal y su impacto en la eficiencia del sistema microhidráulico.

Pendiente de caída:

Las características del cauce se detallan en la tabla 11. La velocidad de flujo promedio del tramo seleccionado se calculó utilizando los datos presentados en la tabla 10. El área hidráulica y el perímetro se determinaron a partir de la geometría del río mostrada en la figura 21. El radio hidráulico se obtuvo mediante la ecuación descrita anteriormente, y el coeficiente de rugosidad de Manning se calculó utilizando la ecuación detallada en el capítulo anterior haciendo uso de la tabla 5, considerando que los valores de cada variable fueron determinados conforme a las condiciones observadas en el cauce. Utilizando estos valores, se aplicó la fórmula de Manning, lo que resultó en una pendiente de 2.91 %, que, expresado en grados, es equivalente a 1.67°.

Tabla 11. *Especificaciones del cauce.*

Características	Valor
Velocidad del flujo (m/s)	0.80
Área hidráulica (m ²)	0.89
Perímetro (m)	9.20
Radio hidráulico (m)	0.10
Coeficiente de rugosidad de Manning	0.045

Para el segundo valor de nivel, se tomó como base la pendiente natural del cauce, la cual es de 2.91 %. Esto implica que, por cada 100 metros horizontales, la elevación es de 2.91 metros verticales. Al aplicar esta pendiente a la longitud de la turbina, se calculó que por cada 1.1495 metros horizontales, la elevación es de 0.0336 metros verticales, resultando en una diagonal de 1.15 metros, que corresponde a la longitud de la turbina. Con estas dimensiones, se añadió un bloque de 14.5 cm en la base. Esta modificación incrementó la pendiente de caída a 8.83°. Este ajuste es crucial para mejorar el rendimiento de la turbina, asegurando que la inclinación sea óptima para maximizar la eficiencia del sistema hidroeléctrico en las condiciones específicas del cauce del río.

Prueba de normalidad:

Se realizó una prueba de normalidad sobre los datos muestrales de cada indicador para determinar posteriormente la prueba de hipótesis. Para hacer estas pruebas existen distintas pruebas de normalidad, esto dependerá de la cantidad de muestra que se trabaja, para ello existe la prueba de normalidad de “Kolmogorov-Smimov” que se aplica a muestras mayores a 50 y la prueba de normalidad de “Shapiro-Wilk” que se aplica cuando la muestra es menor igual a 50.

Para el valor de significancia debe de ser mayor a 0.05 entonces se considera que los datos tienen una distribución normal, en caso contrario los datos se consideran distribución no normal. Se realizó la prueba de normalidad de la pendiente de caída y área mojada respecto al potencial eléctrico y la velocidad de rotación. A continuación, se presenta la tabla 12 que muestra los resultados adquiridos por el análisis de normalidad utilizando la técnica de Shapiro-Wilk para un tamaño de muestra de $n = 8$, que es inferior a 50 datos.

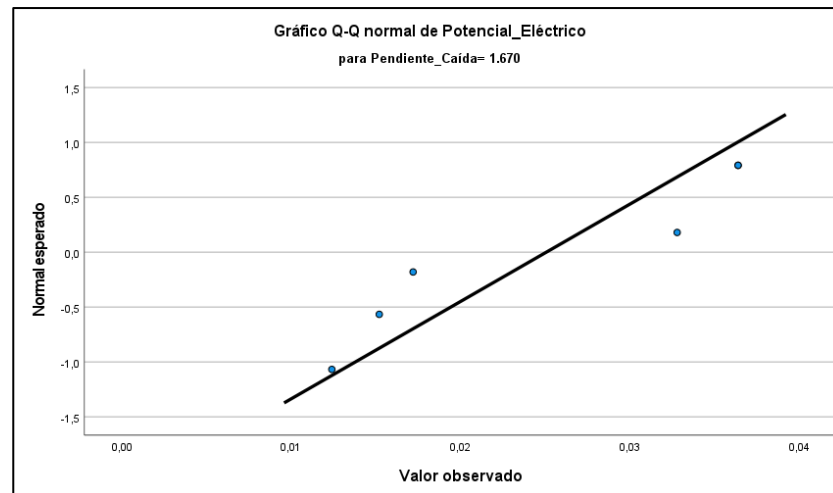
Tabla 12. *Prueba de normalidad de la pendiente de caída.*

Pruebas de normalidad							
	Pendiente_Caída	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Potencial_Elctrico	1,670	,257	6	,200 [*]	,814	6	,078
	8,830	,275	6	,174	,818	6	,084
Velocidad_Rotación	1,670	,285	6	,138	,802	6	,061
	8,830	,209	6	,200 [*]	,892	6	,331

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Interpretación: se observa que el potencial eléctrico y la velocidad de rotación respecto a los dos valores de nivel de la pendiente de caída tiene valores Sig. (0.078, 0.084, 0.061, 0.331) con valores superiores a 0.05 de significancia, por lo tanto, se afirma que muestran una distribución normal, así que se usaran pruebas paramétricas para determinar la influencia.



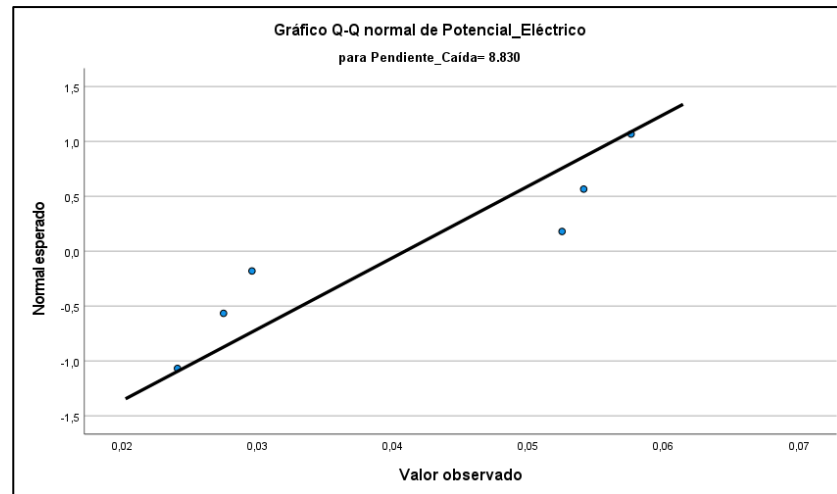


Figura 22. Potencial eléctrico en relación con la pendiente de caída.

Interpretación: se observa que los puntos siguen la línea de referencia con una leve desviación, especialmente en los valores extremos, lo que sugiere la normalidad en cada valor de nivel de la pendiente de caída.

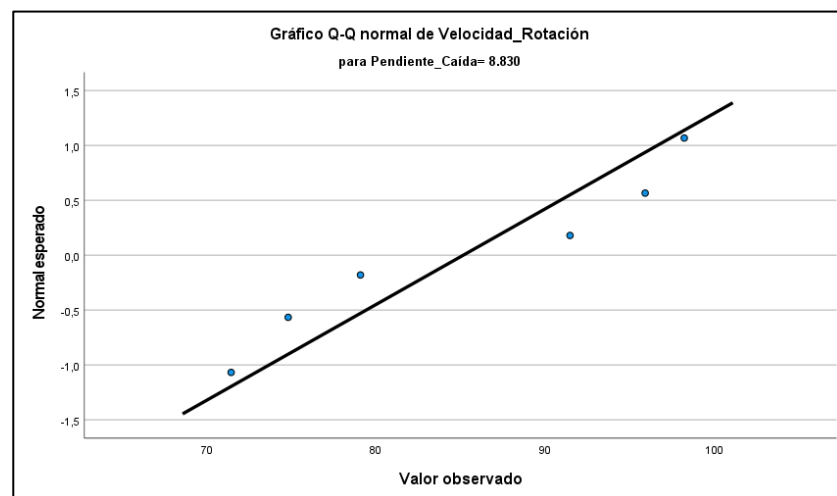
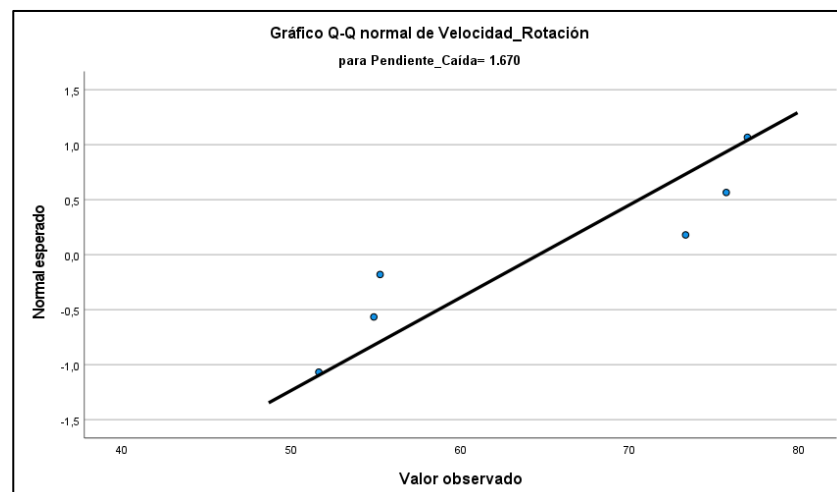


Figura 23. Velocidad de rotación en relación con la pendiente de caída.

Interpretación: se aprecia que los datos siguen la línea de referencia, especialmente en los valores más extremos, lo cual indica una tendencia hacia la normalidad en cada nivel de la pendiente de caída.

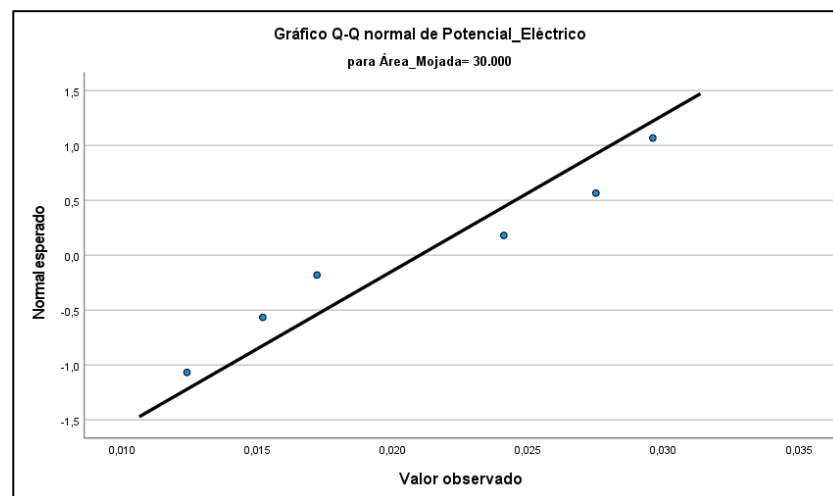
Tabla 13. *Prueba de normalidad del área mojada.*

Pruebas de normalidad							
	Área_Mojada	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Potencial_Elétrico	30,000	,205	6	,200 [*]	,922	6	,523
	51,000	,284	6	,142	,839	6	,128
Velocidad_Rotación	30,000	,281	6	,149	,856	6	,177
	51,000	,272	6	,189	,847	6	,148

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de significación de Lilliefors

Interpretación: se observa que el potencial eléctrico y la velocidad de rotación presenta valores Sig. (0.523, 0.128, 0.177, 0.148) respecto a los dos valores de nivel del área mojada, siendo valores superiores a 0.05 de significancia, lo cual indica que muestran una distribución normal, por lo tanto, se usaran pruebas estadísticas paramétricas para determinar la influencia.



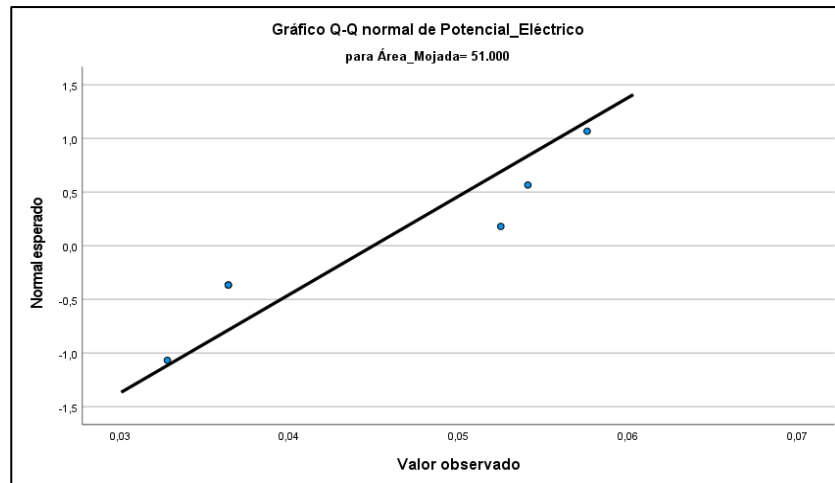


Figura 24. Potencial eléctrico en relación con el área mojada.

Interpretación: la disposición de los puntos indica que los datos se aproximan a una distribución normal, aunque no de manera perfecta. Esto sugiere que los datos del potencial eléctrico para los dos valores de nivel del área mojada tienen una tendencia hacia la normalidad, pero con pequeñas desviaciones.

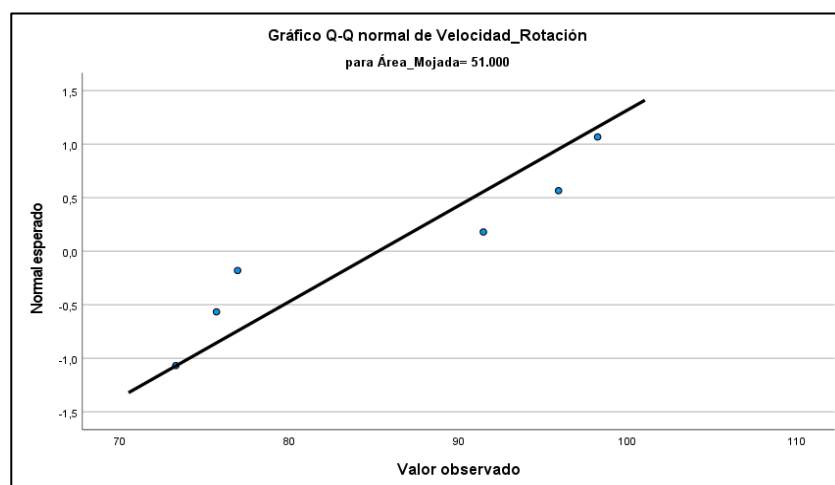
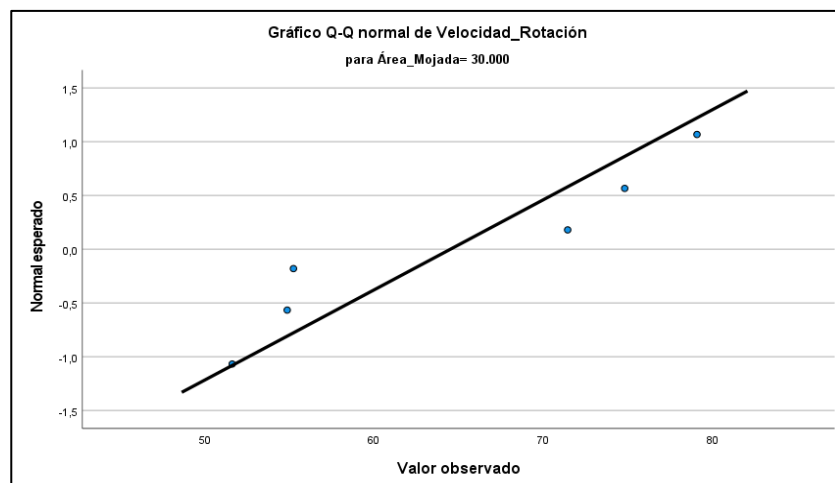


Figura 25. Velocidad de rotación en relación con el área mojada.

Interpretación: la distribución de los puntos sugiere que los datos se acercan a una distribución normal, aunque con ciertas imperfecciones. Esto indica que los valores de la velocidad de rotación para los dos niveles del área mojada presentan una tendencia hacia la normalidad, aunque con ligeras desviaciones.

Influencia del área mojada y la pendiente de caída respecto al potencial eléctrico:

En esta etapa, el área mojada se expresa en porcentaje (%), y se determinó de acuerdo al contacto del agua con las palas de la turbina. Un 50 % de área mojada indica que el contacto del agua tiene una altura igual al radio de las palas. Para medir el nivel del agua respecto a la altura del sistema, se utilizó un medidor de altura en centímetros adherido a la base de entrada, el cual indica la altura del nivel del agua. Posteriormente, se colocó el sistema microhidráulico en dos puntos diferentes, determinándose que había un área mojada del 30 % y del 51 %, respectivamente.

Con los valores de nivel determinados para cada variable independiente, se realizaron pruebas en campo para medir el voltaje (Volt) y la corriente (Ic), como se puede observar en la figura 26. Estas mediciones son esenciales para calcular el potencial eléctrico del sistema.

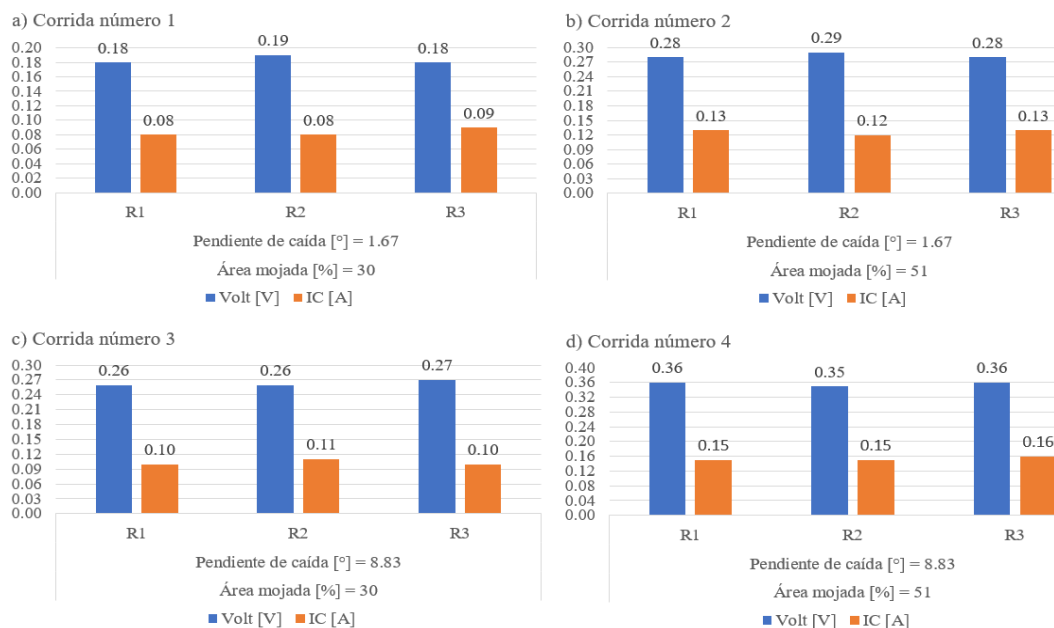


Figura 26. Voltaje e intensidad de corriente del sistema microhidráulico.

Para simular la interacción entre la pendiente de caída y el área mojada con la velocidad de rotación y el potencial eléctrico, se empleó el software Minitab para realizar un diseño factorial completo. En este análisis, se efectuaron dos interacciones, insertando doce datos en cada una. El p-valor resultó significativo, al ser menor a 0.05, lo cual demuestra que estos factores tienen un efecto sobre las variables dependientes.

En esta interacción se muestra el impacto de los factores en la variable de interés, que en este caso es el potencial eléctrico. Los valores de cada corrida se calcularon mediante la ecuación descrita en el capítulo anterior utilizando los datos de la figura 26. En la figura 27 se observa que el sistema microhidráulico genera un potencial eléctrico mínimo de 0.015 W cuando la pendiente es de 1.67° y el área mojada es del 30 %, mientras que alcanza 0.055 W con una pendiente de 8.83° y un área mojada del 51 %, siendo estos los valores óptimos de los factores para producir electricidad. Se concluye que el sistema microhidráulico presenta mayor eficiencia con una mayor pendiente de caída y área mojada. Asimismo, se afirma que existe influencia de las variables independientes en la variable dependiente deseada.

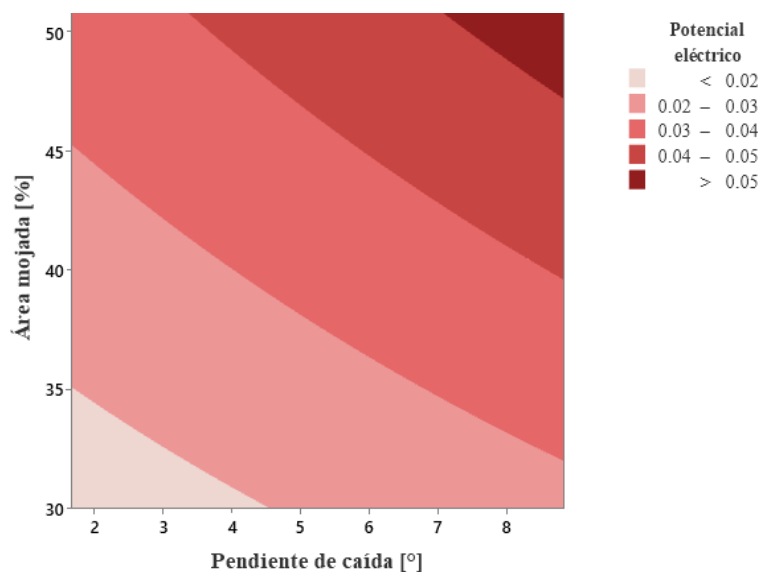


Figura 27. Potencial eléctrico en función de la pendiente de caída y el área mojada.

Hipótesis específica 3:

A continuación, se presenta la interacción entre la pendiente de caída y el área mojada con la velocidad de rotación. La turbina alcanza su menor velocidad de rotación, de 50 RPM, cuando la pendiente es de 1.67° y el área mojada es del 30 %. En contraste, se registra una velocidad de 96 RPM cuando la pendiente es de 8.83° y el área mojada es del 51 %, lo cual representa los valores más eficientes de los factores. Esto indica que un aumento en la pendiente de caída y en el área mojada resulta en una mayor velocidad de rotación. Finalmente se infiere con la prueba estadística que la pendiente de caída y el área mojada influyen en la velocidad de rotación del sistema microhidráulico.

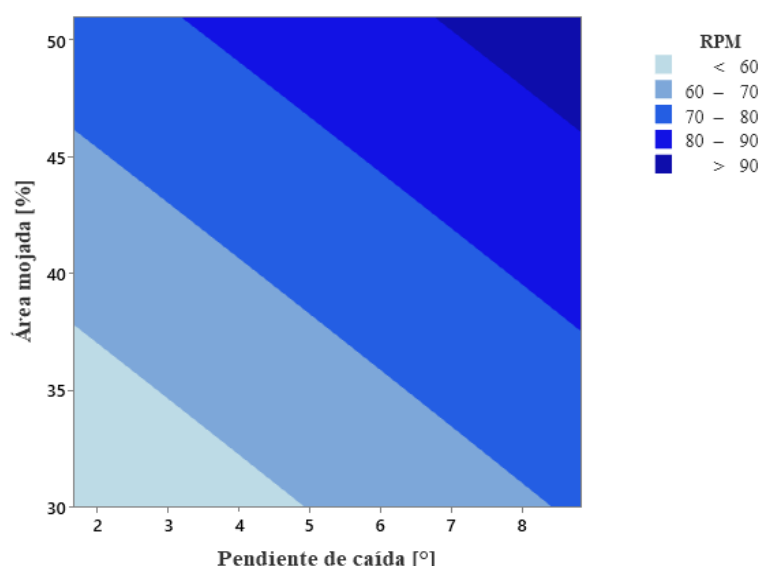


Figura 28. Velocidad de rotación en función de la pendiente de caída y el área mojada.

Influencia del área mojada y la pendiente de caída respecto a la velocidad de rotación:

Además, se realizó una prueba Rho de Spearman para evaluar la correlación entre la velocidad de rotación y el potencial eléctrico (ver figura 29). Se encontró que la velocidad de rotación, mostrada, está relacionada con el potencial eléctrico generado por el sistema microhidráulico, indicando que a mayor RPM se produce una mayor cantidad de electricidad.

			Potencial eléctrico	Velocidad de rotación
Rho de Spearman	Potencial eléctrico	Coefficiente de correlación	1,000	1,000**
		Sig. (bilateral)	.	.
	Velocidad de rotación	N	4	4
		Coefficiente de correlación	1,000**	1,000
		Sig. (bilateral)	.	.
		N	4	4

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Figura 29. Evaluación de la correlación entre la velocidad de rotación y el potencial eléctrico.

4.2. Discusión de resultados

En este estudio, el sistema microhidráulico portátil tipo tornillo de Arquímedes alcanzó una generación máxima de 0.055 W y 0.15 A, obtenido a partir de mediciones experimentales en campo. Estos valores fueron registrados utilizando un multímetro digital conectado al generador, midiendo la potencia y la corriente generada en condiciones reales de operación en el riachuelo seleccionado, sin embargo, es bajo en términos de potencia en comparación con otras turbinas similares (38). Esto se atribuye al uso de un generador de corriente continua (CC) con las características previamente descritas. La implementación de un sistema microhidráulico portátil tipo tornillo de Arquímedes para

generar electricidad destinada a la iluminación de hogares en el distrito de Sicaya, mediante los resultados obtenidos indican que el sistema, aunque eficiente en el aprovechamiento del caudal y la pendiente de la zona, genera una potencia relativamente baja en comparación con otras turbinas microhidráulicas de mayor capacidad. Por ejemplo, en el estudio consignado en un capítulo anterior denominado “Design of a micro-hydraulic generation system based on an Archimedes screw” (7), se diseñó un sistema con una potencia de 8 W, suficiente para alimentar luminarias de 6 V. La diferencia en la potencia generada en nuestro estudio se debe principalmente a la selección del generador de corriente continua, que limita la conversión eficiente de la energía mecánica disponible en electricidad. Esta limitación impacta en el tiempo de carga necesario para alimentar fuentes de iluminación de manera continua.

Por otro lado, el estudio “Sustainable power generation using Archimedean screw turbine: influence of blade number on flow and performance” (13) reportó que la eficiencia del sistema microhidráulico está directamente influenciada por el número de palas y el factor de llenado, determinando que una turbina de tres palas tiene un mejor rendimiento a bajas velocidades de rotación en comparación con una de una sola pala, debido a una mayor captación del flujo de agua. En contraste, en la presente investigación se optó por un diseño con dos palas, considerando que en caudales bajos una turbina con más palas podría generar una mayor resistencia al flujo, afectando la eficiencia del sistema. Mientras que el estudio citado enfatiza que un mayor número de palas mejora la conversión de energía en ciertos escenarios, los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que en condiciones de caudal moderado ($0.7118 \text{ m}^3/\text{s}$), una turbina de dos palas permite un equilibrio entre eficiencia y menor resistencia hidráulica, optimizando la velocidad de rotación sin comprometer la estabilidad del flujo. Esta diferencia de enfoque resalta la importancia de adaptar el diseño del tornillo de Arquímedes a las condiciones hidrodinámicas específicas del entorno de aplicación.

El artículo “Archimedean screw based Micro Hydro Power Plant (MHPP) prototype with turbine elevation angle parameters” (8) determinó que un ángulo de inclinación de 20° optimiza el torque, la corriente y el voltaje generados, mejorando la eficiencia del sistema. En contraste, en el presente estudio la inclinación utilizada fue de 8.83° , lo que responde a las condiciones específicas del riachuelo analizado, donde la profundidad limitada y la ausencia de saltos de agua impidieron una mayor elevación del tornillo de Arquímedes. Mientras que en el estudio citado la mayor inclinación permitió una mejor captación del flujo de agua, en este caso el ángulo de 8.83° fue el máximo posible para garantizar el funcionamiento del sistema dentro del contexto hidrológico disponible. Esta diferencia resalta la importancia de adaptar el diseño del sistema microhidráulico a las características

del entorno, priorizando la viabilidad estructural y operativa sobre los valores óptimos determinados en estudios previos.

A nivel nacional, el estudio “Evaluación de parámetros de funcionamiento para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas de tornillo en zonas altoandinas del Perú” (11) indicó que los tornillos de Arquímedes pueden operar con una eficiencia del 60 % al 80 %, generando hasta 355 kW, lo que evidencia su potencial en la generación de energía renovable en entornos rurales. En contraste, en la presente investigación, la potencia obtenida fue de 0.055 W, con una corriente de 0.15 A, valores significativamente menores debido a las diferencias en el caudal disponible y la pendiente del riachuelo estudiado. Mientras que el estudio citado se desarrolló con una estructura fija, diseñada para operar en una ubicación específica con condiciones hidráulicas favorables, el sistema propuesto en esta investigación es portátil, lo que le otorga una ventaja significativa en la adaptación a distintos entornos con bajo caudal y sin infraestructura hidráulica preexistente. El sistema fue probado en un riachuelo con un aforo volumétrico de 0.7118 m³/s, condición que limitan la capacidad de generación de energía. Sin embargo, los resultados experimentales demostraron que, a pesar de esta restricción, el sistema logró convertir la energía hidráulica en electricidad funcional, validando su viabilidad en escenarios rurales con condiciones similares. La portabilidad del sistema permite su reubicación en diferentes canales de agua, maximizando su aprovechamiento en diversas condiciones sin la necesidad de intervenciones estructurales permanentes. A pesar de que la potencia generada es menor en comparación con sistemas fijos, esta característica lo convierte en una solución flexible y accesible, adecuada para comunidades rurales con acceso limitado a la energía eléctrica, diferenciándolo de tecnologías que requieren mayores recursos de instalación y mantenimiento.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron determinar los parámetros adecuados para la implementación de un sistema microhidráulico portátil tipo tornillo de Arquímedes en el distrito de Sicaya, Huancayo. A través del análisis experimental y estadístico, se concluyó que los factores más influyentes en el rendimiento del sistema son el torque (3.79 Nm), la pendiente de caída (8.83°) y el área mojada (51 %), ya que afectan significativamente la conversión de energía hidráulica en eléctrica. Los valores experimentales obtenidos demostraron que, bajo estas condiciones, el sistema generó una potencia eléctrica máxima de 0.055 W, con una intensidad corriente de 0.15 A y una velocidad de rotación de 96 RPM. El análisis de correlación indicó que la pendiente de caída y el área mojada tienen un impacto positivo en la eficiencia del sistema, con una relación significativa entre la velocidad de rotación y la potencia generada debido a que el coeficiente de correlación es 1. Estos resultados confirman que el diseño del sistema debe optimizarse considerando estos parámetros para maximizar su rendimiento en entornos de bajo caudal.

Los cálculos realizados determinaron que el potencial mecánico del sistema es de 620.25 W, lo que representa la capacidad máxima teórica de conversión de energía hidráulica en mecánica y un torque de 3.79 Nm. Sin embargo, en las pruebas experimentales, la potencia eléctrica generada alcanzó un valor máximo de 0.055 W, con una intensidad de corriente de 0.15 A. Esta diferencia se debe a la limitación del generador de corriente continua (CC) utilizado, el cual no aprovechó completamente el potencial mecánico disponible. Para optimizar la eficiencia del sistema, se recomienda seleccionar un generador eléctrico con una capacidad acorde al potencial mecánico estimado, lo que permitiría mejorar significativamente el rendimiento energético del sistema.

El análisis experimental, realizado mediante un diseño factorial completo en Minitab, demostró que la pendiente de caída y el área mojada tienen una influencia significativa en la generación de energía eléctrica. Se efectuaron doce mediciones por cada interacción factorial, y el p-valor obtenido en el análisis de varianza (ANOVA) fue menor a 0.05, lo que confirma que ambos factores afectan significativamente al potencial eléctrico. Los resultados mostraron que, al operar con una pendiente de caída de 8.83° y un área mojada del 51 %, el sistema alcanzó su máxima eficiencia, con una generación de 0.055 W. Lo que indica que, a una mayor pendiente de caída y área mojada, mayor es la capacidad del sistema para convertir la energía hidráulica en eléctrica. Sin embargo, debido a las condiciones físicas del riachuelo, no fue posible incrementar más la inclinación del sistema.

Asimismo, el análisis estadístico de los datos confirmó que el incremento de la pendiente de caída y el área mojada tiene un efecto significativo en la velocidad de rotación de la turbina, lo

que a su vez mejora la conversión de energía hidráulica en eléctrica. En este estudio, el p-valor obtenido fue menor a 0.05, lo que evidencia que ambos factores influyen significativamente en la velocidad de rotación. Se determinó que, bajo las condiciones de prueba, el sistema alcanzó una velocidad máxima de 96 RPM cuando el área mojada fue del 51 % y la pendiente de caída de 8.83°, estos siendo los valores óptimos obtenidos. En contraste, cuando estos parámetros fueron mínimos, la turbina registró su menor velocidad de rotación, alcanzando solo 50 RPM. Este resultado es clave, ya que demuestra la importancia de optimizar la geometría y configuración del tornillo de Arquímedes para maximizar su rendimiento en distintas condiciones hidráulicas.

En conclusión, este estudio confirma que la pendiente de caída y el área mojada son factores clave para la eficiencia de un sistema microhidráulico tipo tornillo de Arquímedes, especialmente en entornos rurales como el distrito de Sicaya. Estos factores no solo influyen en el potencial eléctrico y la velocidad de rotación, sino que también determinan la eficiencia energética general del sistema. La implementación adecuada de este sistema no solo satisface las necesidades de iluminación en hogares rurales, sino que también ofrece la posibilidad de expandir su uso a dispositivos de bajo consumo, promoviendo la sostenibilidad y la autonomía energética en comunidades con acceso limitado a la red eléctrica. Los resultados obtenidos confirman que el sistema microhidráulico portátil tipo tornillo de Arquímedes es una alternativa viable para la generación descentralizada de energía en comunidades rurales. Su portabilidad le otorga una ventaja significativa, permitiendo su instalación en diversos entornos con bajo caudal, diferenciándose así de las turbinas fijas estudiadas en investigaciones previas. Si bien la potencia generada en este experimento es menor en comparación con sistemas de mayor escala, su optimización permitiría alcanzar valores suficientes para cubrir las necesidades de iluminación en hogares rurales, estimadas entre 100 y 300 W, lo que lo convierte en una solución práctica y adaptable a diferentes condiciones hidráulicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LI, R., y otros. Review of the progress of energy saving of hydraulic control systems. *Processes*, 2023, 11(12). ISSN: 2227-9717.
2. MICHAELIDES, E. Decarbonization of the electricity generation sector and its effects on sustainability goals. *Sustainable Energy Research*, 2023, 10(10).
3. GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, F., y otros. An experimental investigation of various control systems for an Archimedes Screw turbine in a micro-hydropower plant. *Applied Sciences*, 2024, 14(2). ISSN: 2076-3417.
4. SILINTO, B., y otros. Hybrid renewable energy systems for rural electrification in developing countries: a review on energy system models and spatial explicit modelling tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 207. ISSN: 1364-0321.
5. FATHI, E., ARCENTALES, D. y BELYADI, F. Impacts of different operation conditions and geological formation characteristics on CO₂ sequestration in Citronelle Dome, Alabama. *Energies*, 2023, 16(7). ISSN: 1996-1073.
6. QUARANTA, E., BERGAMIN, R. y SCHLEISS, A. How to estimate the weight of hydropower electro-mechanical equipment? Available evidence, novel equations and challenges for engineering applications. *Results in Engineering*, 2023, 18. ISSN: 2590-1230.
7. CUENCA, A., FARINANGO, W. y MURILLO, J. Design of a micro-hydraulic generation system based on an Archimedes screw. *Ingenius*, 2023, (29), 98-107 pp. ISSN: 1390-860X.
8. INDARTO, B., KUMALASARI, D. y BUSTOMI, M. Archimedean screw based Micro Hydro Power Plant (MHPP) prototype with turbine elevation angle parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2623(1). ISSN: 1742-6596.
9. MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS [En línea]. Más electrificación rural, 2024. Disponible en: <https://www.elperuano.pe/noticia/232575-mas-electrificacion-rural>
10. CASTRO, P., y otros. Archimedes screw to generate hydroelectricity at moderate flow, Tucumachay-Huancavelica. *Migration Letters*, 2024, 21(S2), 168-179 pp. ISSN: 1741-8992.
11. LAZO, B., LAZO, D. y CONDEZO, D. Evaluación de parámetros de funcionamiento para optimizar el rendimiento de turbinas hidráulicas de tornillo en zonas altoandinas del Perú. *Prospectiva Universitaria*, 2024, 20(1), 23-30 pp. ISSN: 1990-7044.
12. CAMARENA-GAMARRA, C. y NAHUI, J. Energía solar como agente para la descarbonización de la matriz energética: una propuesta para la región Lambayeque (Perú). *South Sustainability*, 2024, 5(1). ISSN: 2708-7077.

13. ERINOFIARDI, E., y otros. Sustainable power generation using Archimedean screw turbine: influence of blade number on flow and performance. *Sustainability*, 2022, 14(23). ISSN: 2071-1050.
14. UBANDO, A., y otros. Sustainable manufacturability of Archimedes screw turbines: a critical review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2022, 6(6). ISSN: 2504-4494.
15. DAVIROV, A., y otros. Development and testing of a laboratory model of a two-turbine small hydroelectric power plant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, 1142. ISSN: 1755-1315.
16. ALONSO-MARTÍNEZ, M., y otros. A new methodology to design sustainable Archimedean screw turbines as green energy generators. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(24). ISSN: 1660-4601.
17. ESKANDARIUN, H., y otros. Hydrodynamic screw parameter optimization for maximum power output. *International Journal of Energy and Water Resources*, 2021, 5(1), 413-423 pp. ISSN: 2522-0101.
18. CHAN, W., JAMALUDIN, U. y AZAHARI, N. Archimedes screw pump efficiency based on three design parameters using computational fluid dynamics software - ansys CFX. *Journal of Physics Conference Series*, 2024, 2688(1). ISSN: 1742-6596.
19. TADEO, F. Diseño de una turbina tipo tornillo de Arquímedes en la comunidad de Muquiyauyo. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2022.
20. ROJAS, E. Análisis de la turbina hidrotornillo para mejorar la producción de energía eléctrica en la picocentral hidroeléctrica de Raquina-Huancayo, 2021. Tesis (Título de Ingeniero Electricista). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2022.
21. OROZCO, A. Implementación de un sistema de hidro-generación eléctrica mediante una turbina helicoidal para la recuperación de energía aplicado en peceras decorativas. Trabajo de titulación (Grado Académico de Ingeniero de Electrónica y Automatización). Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2023.
22. CARRIÓN, G. y GONZÁLES, J. Generador hidroeléctrico de bajo caudal basado en tornillo de Arquímedes para satisfacer demanda eléctrica en viviendas rurales del Perú. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico Electricista). Chiclayo: Universidad César Vallejo, 2021.
23. TOMAIRO, K. Evaluación del potencial hidroeléctrico, para abastecer la demanda de energía eléctrica de la planta de tratamiento de aguas residuales Huamanga 2021. Tesis (Título de Ingeniero Electricista). Huancayo: Universidad Continental, 2022.

24. SARO, C. Diseño de un tornillo de Arquímedes para la pico generación de energía eléctrica. Tesis de grado (Ingeniero de Tecnologías Industriales). España: Universidad de Oviedo, 2023.
25. SAMANIEGO, J. Análisis del sistema hidrológico para la generación de energía hidroeléctrica en el río Muyo-distrito San Juan-Cutervo-Cajamarca. Tesis (Título de Ingeniero Agrícola). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2023.
26. PONZONI, L., y otros. Implementación de un micro generador de energía hidroeléctrica. Revista Argentina de Ciencia y Tecnología, 2022, 1(9).
27. PÉREZ, J. Desarrollo de un prototipo de un generador de energía hidráulica utilizando una turbina tipo tornillo de Arquímedes. México: Universidad Iberoamericana Puebla, 2022.
28. ANALUCA, C. y QUINGA, J. Diseño y simulación de una turbina hidráulica con un caudal de 10 l/s para la estación de investigación de Cayambe mediante software especializado. Trabajo de titulación (Título de Ingeniero Mecánico). Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2023.
29. BENAVIDES, J. y GORDILLO, J. Propuesta de un manual de diseño, estandarización y fabricación de turbinas tipo tornillo de Arquímedes para pequeñas centrales hidroeléctricas. Trabajo de titulación (Título de Ingeniero Mecánico). Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
30. LOPES, P., SUENAGA, L. y MARTINS, V. Desenvolvimento e simulação do parafuso de Arquimedes. Trabajo de conclusión de curso (Título de Ingeniero Mecánico). Brasil: Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, 2023.
31. MONTEIRO, E., y otros. The role of renewable energies in combating poverty in Brazil: a systematic review. Sustainability, 2024, 16. ISSN: 2071-1050.
32. SOSA, J. Generador hidroeléctrico con un tornillo de Arquímedes para una estación de carga para uso doméstico. México: Universidad Iberoamericana Puebla, 2023.
33. KHAN, N., y otros. Development of a sustainable portable Archimedes screw turbine for hydropower generation. Scientific Reports, 2025, 15(1). ISSN: 2045-2322.
34. AGA, W., y otros. Rural electrification with hybrid renewable energy-based off-grid technology: a case study of Adem Tuleman, Ethiopia. Energy, Ecology and Environment, 2023, 8(5), 420-438 pp. ISSN: 2363-8338.
35. HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ-COLLADO, C. y BAPTISTA, P. *Metodología de la investigación*. México: McGrawHill, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
36. DÍAZ-SALAS, A., GUEVARA-PÉREZ, E. y ROSALES-CUEVA, J. Modelo de estimación del coeficiente de rugosidad de Manning en función de la granulometría en el río Santa, sector Recuay-Carhuaz, Áncash, Perú. Revista Ingeniería UC, 2020, 27(3), 328-342 pp. ISSN: 1316-6832.

37. ISLAM, A., y otros. Can an annual flood induce changes in channel geomorphology? *Natural Hazards*, 2021, 111(1), 1019-1046 pp. ISSN: 1573-0840.
38. SETIAWAN, Y., y otros. Experimental investigation of Archimedes screw hydro turbine rotation with and without deflector. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 926. ISSN: 1755-1315.
39. DRAGOMIRESCU, A. Design considerations for an Archimedean screw hydro turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 664. ISSN: 1755-1315.

ANEXOS

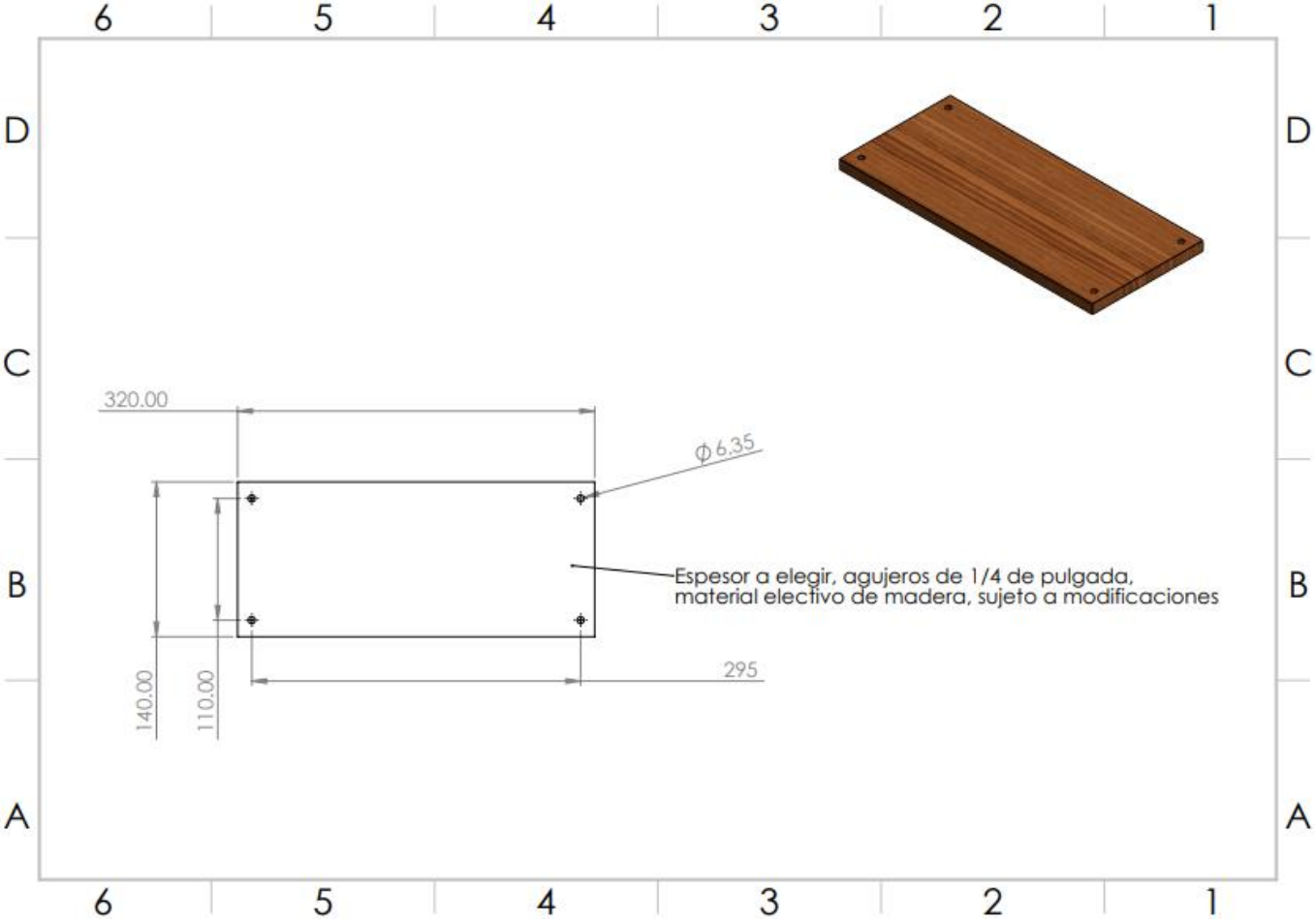
Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	FACTORES	METODOLOGÍA
GENERAL ¿Cuáles son los parámetros adecuados para implementar un Sistema Microhidráulico son los parámetros adecuados Portátil tipo Tornillo de Arquímedes para iluminar Hogares en el Distrito de Sicaya, Huancayo 2024? ESPECÍFICOS *¿Cuál es el potencial mecánico y torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico? *¿Cuál es la influencia de la pendiente de caída y el área mojada en el potencial eléctrico que genera el sistema microhidráulico el distrito de Sicaya Huancayo - 2024? *¿Cuál es la influencia de la pendiente de caída y el área mojada respecto a la velocidad de rotación del sistema microhidráulico el distrito de Sicaya Huancayo - 2024?	GENERAL Diseñar un Sistema Microhidráulico Portátil tipo Tornillo de Arquímedes para determinar los parámetros adecuados para su implementación en la iluminación de Hogares en el Distrito de Sicaya, Huancayo 2024. ESPECÍFICOS *Calcular el potencial mecánico y el torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico. *Evaluar la influencia de la pendiente de caída y el área mojada en el potencial eléctrico que genera el sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024. *Evaluar la influencia de la pendiente de caída y el área mojada respecto a la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.	GENERAL Los parámetros necesarios a considerar en el diseño de un Sistema Microhidráulico para su implementación en la iluminación de hogares son el potencial mecánico, eficiencia energética y la influencia de la pendiente de caída y el área mojada. ESPECÍFICOS Calcular el potencial mecánico y el torque de la turbina tipo tornillo de Arquímedes para la selección de un generador eléctrico. H0: La pendiente de caída y el área mojada influyen en el potencial eléctrico del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024. H1: La pendiente de caída y el área mojada no influyen en el potencial eléctrico del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024. H0: La pendiente de caída y el área mojada influyen en la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024. H1: La pendiente de caída y el área mojada no influyen en la velocidad de rotación del sistema microhidráulico en el distrito de Sicaya Huancayo - 2024.	Variable Dependiente: X1: Potencial eléctrico X2: Velocidad de rotación X3: Eficiencia energética Variable Independiente: Y1: Pendiente de caída Y2: Área mojada	Voltaje RPM Intensidad de corriente 30° 50° 30 % 51 %	TIPO: Tecnológico NIVEL: Correlacional - descriptivo MÉTODO: Método científico inductivo DISEÑO: Experimental/Transversal. INSTRUMENTOS: Multímetro digital Tacómetro digital TÉCNICA: Generación de energía eléctrica POBLACIÓN: Cuerpos de agua de Sicaya MUESTRA: Riachuelo de Sicaya.

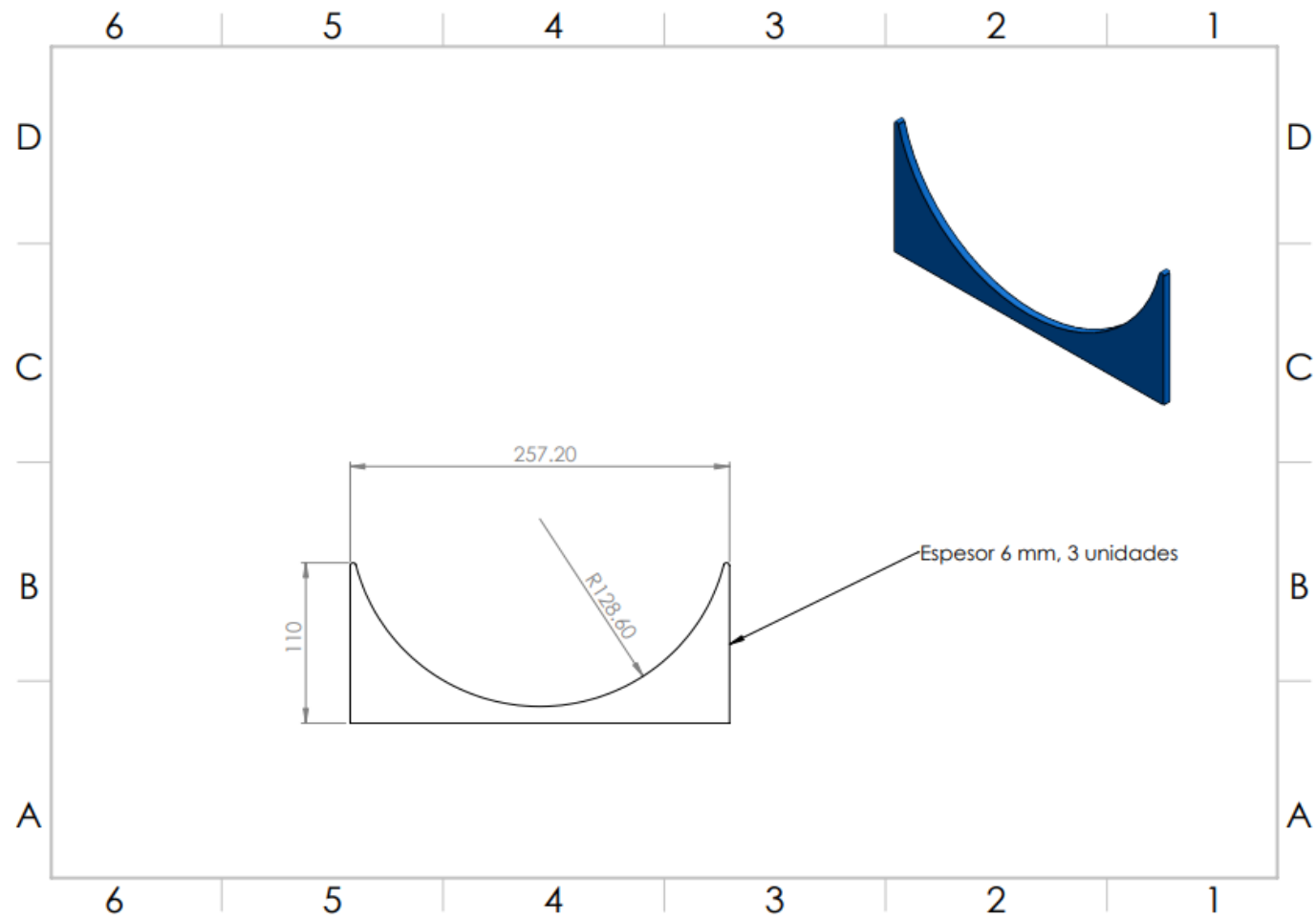
Anexo 2. Matriz de operacionalización de variables.

Tipo de variable	Dimensiones	Definición Conceptual	Indicador	Unidad de medida	Indicadores
Variable independiente	Pendiente de caída	Pendiente de caída: Inclinación de un elemento lineal, natural o constructivo respecto de la horizontal.	Pendiente de caída Bajo < 30° Alto >= 30°	Pendiente de caída °	Cuantitativo
	Área mojada	Área mojada: Área de contacto entre el agua y las hélices de la turbina hidráulica.	Área mojada Bajo < 50% Alto >= 50%	Área mojada %	
Variable dependiente	Potencial eléctrico	Potencial eléctrico: Es una magnitud física que mide la cantidad de energía eléctrica que se transfiere o consume por unidad de tiempo en un circuito eléctrico.	Potencial eléctrico Voltaje Intensidad de corriente	Voltaje: V Intensidad de corriente: A	Cuantitativo
	Velocidad de rotación	Velocidad de rotación: Es una medida de la rapidez con la que un objeto gira o rota alrededor de un eje.	Velocidad de rotación	RPM	
	Eficiencia energética	Eficiencia energética: Es la relación entre la cantidad de energía útil obtenida de un proceso o sistema y la cantidad de energía invertida en dicho proceso o sistema.	Eficiencia energética	%	

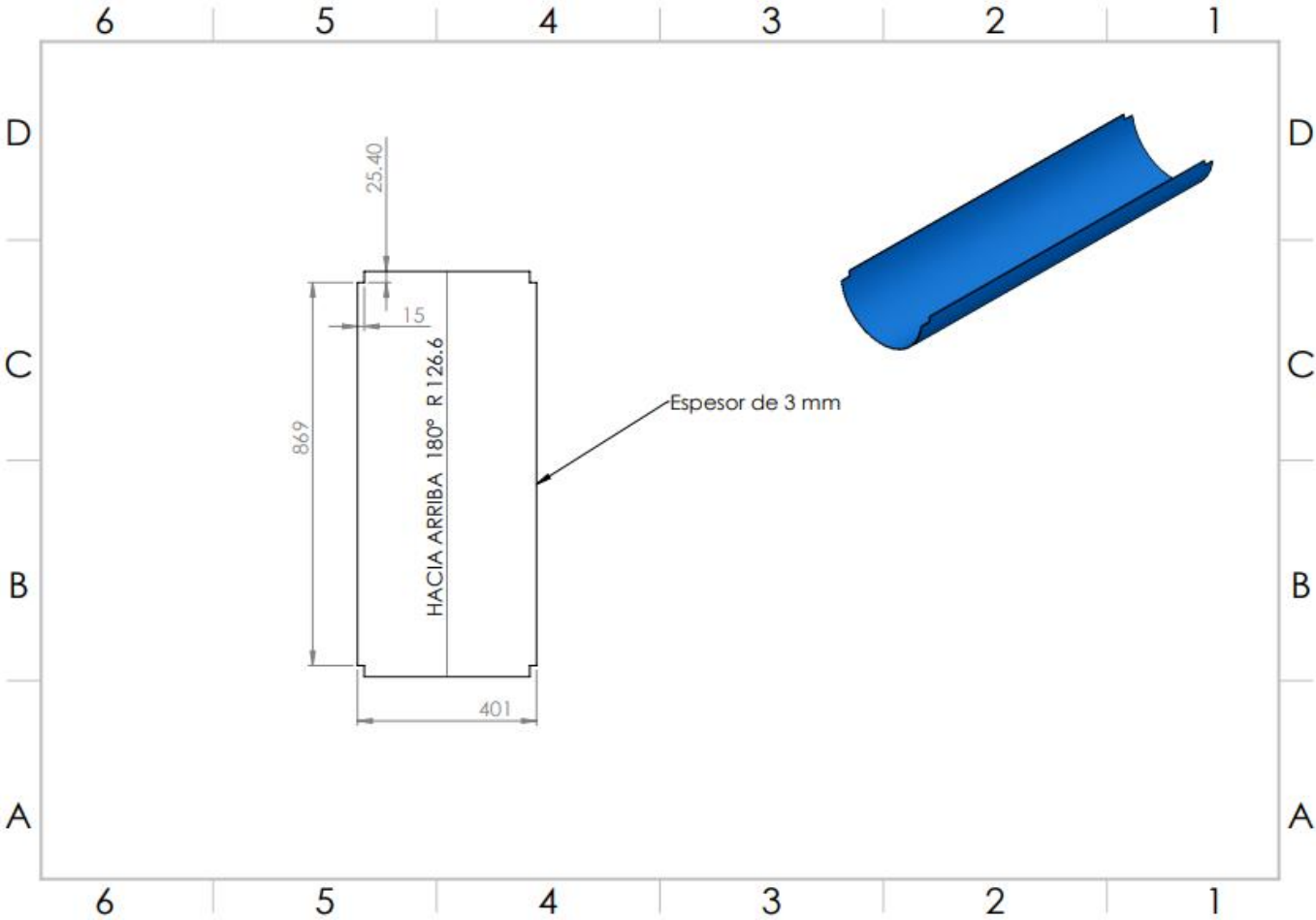
Anexo 3. Plano de base de madera.



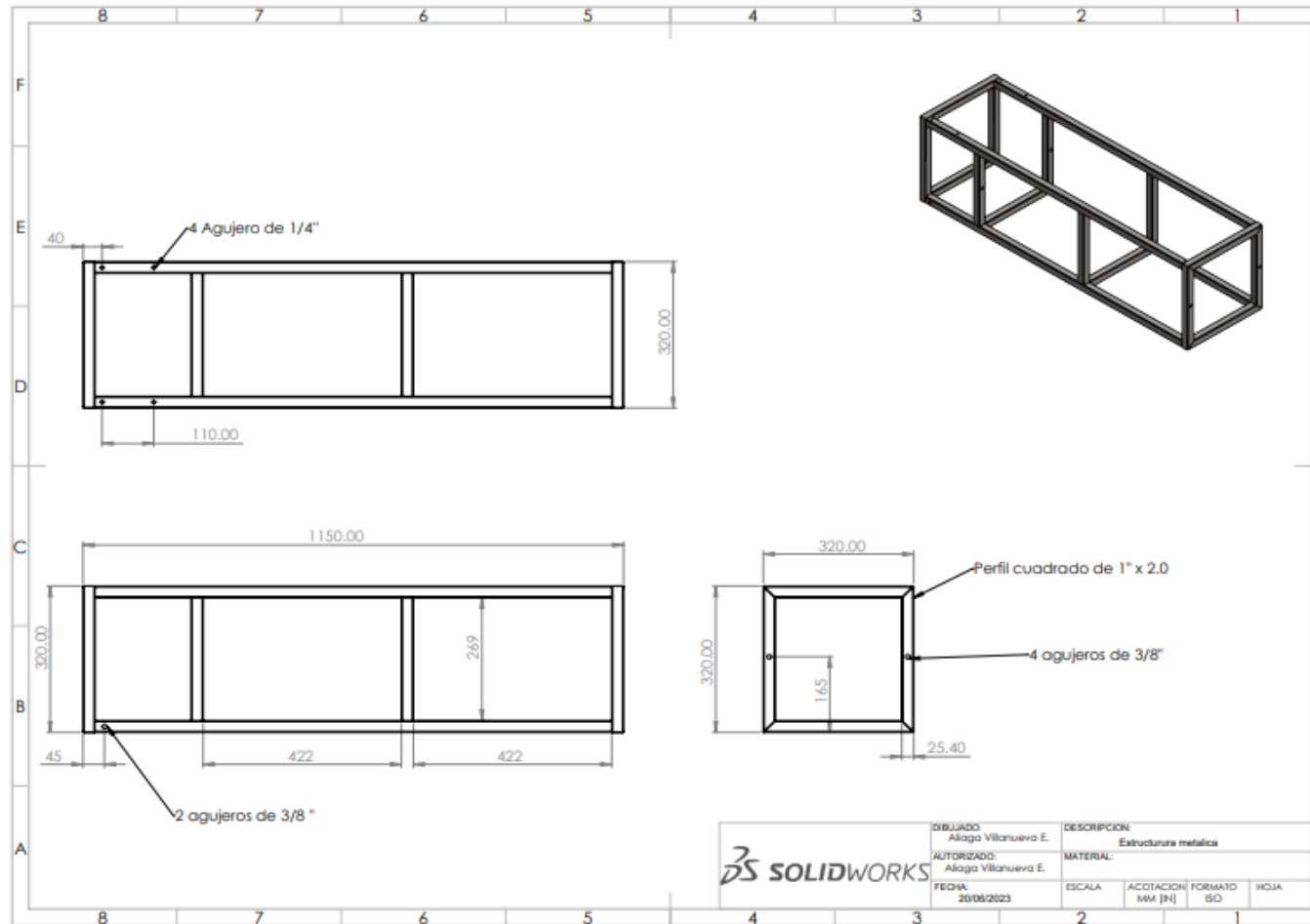
Anexo 4. Plano de base de soporte.



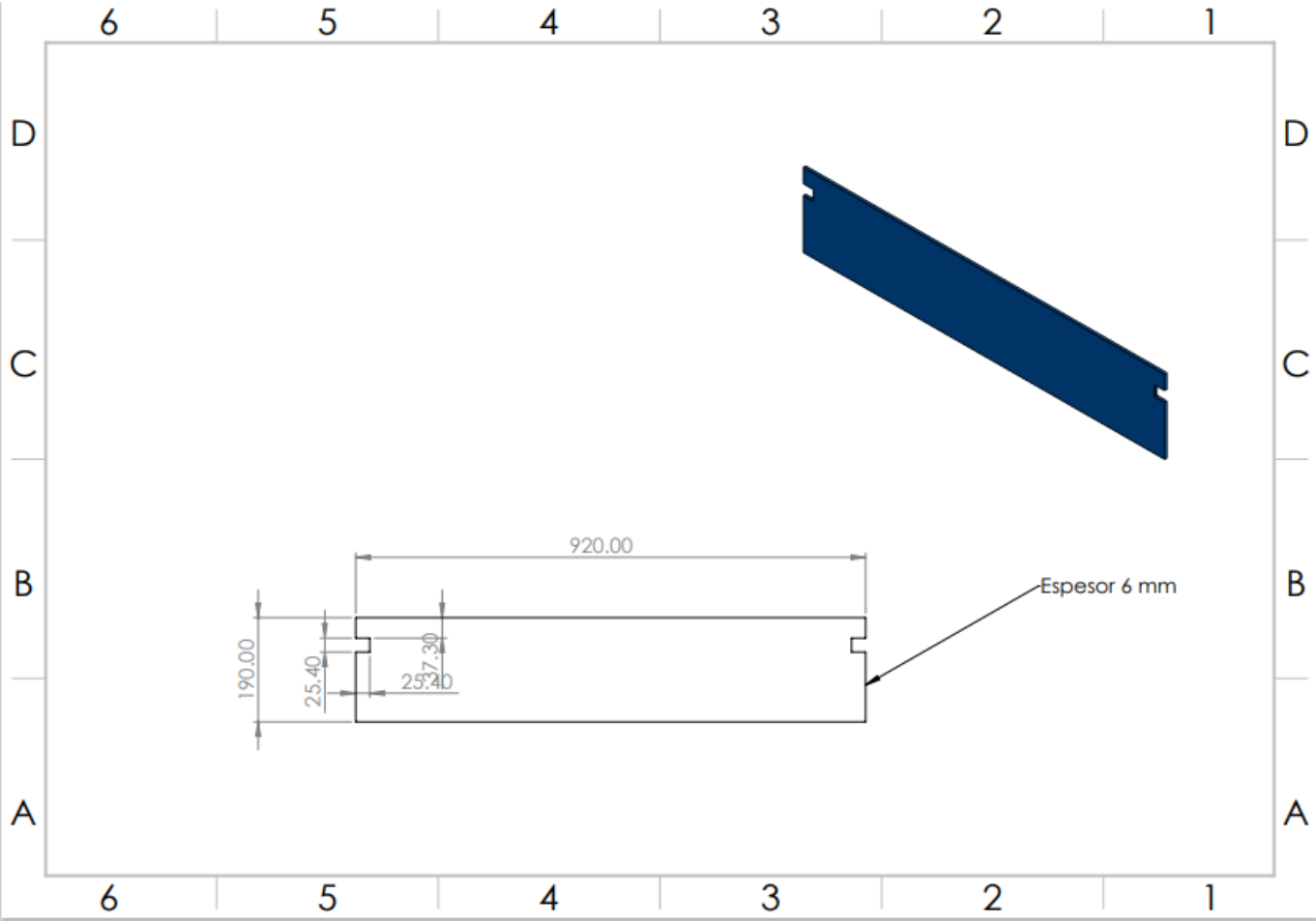
Anexo 5. Plano de canal de circulación del agua.



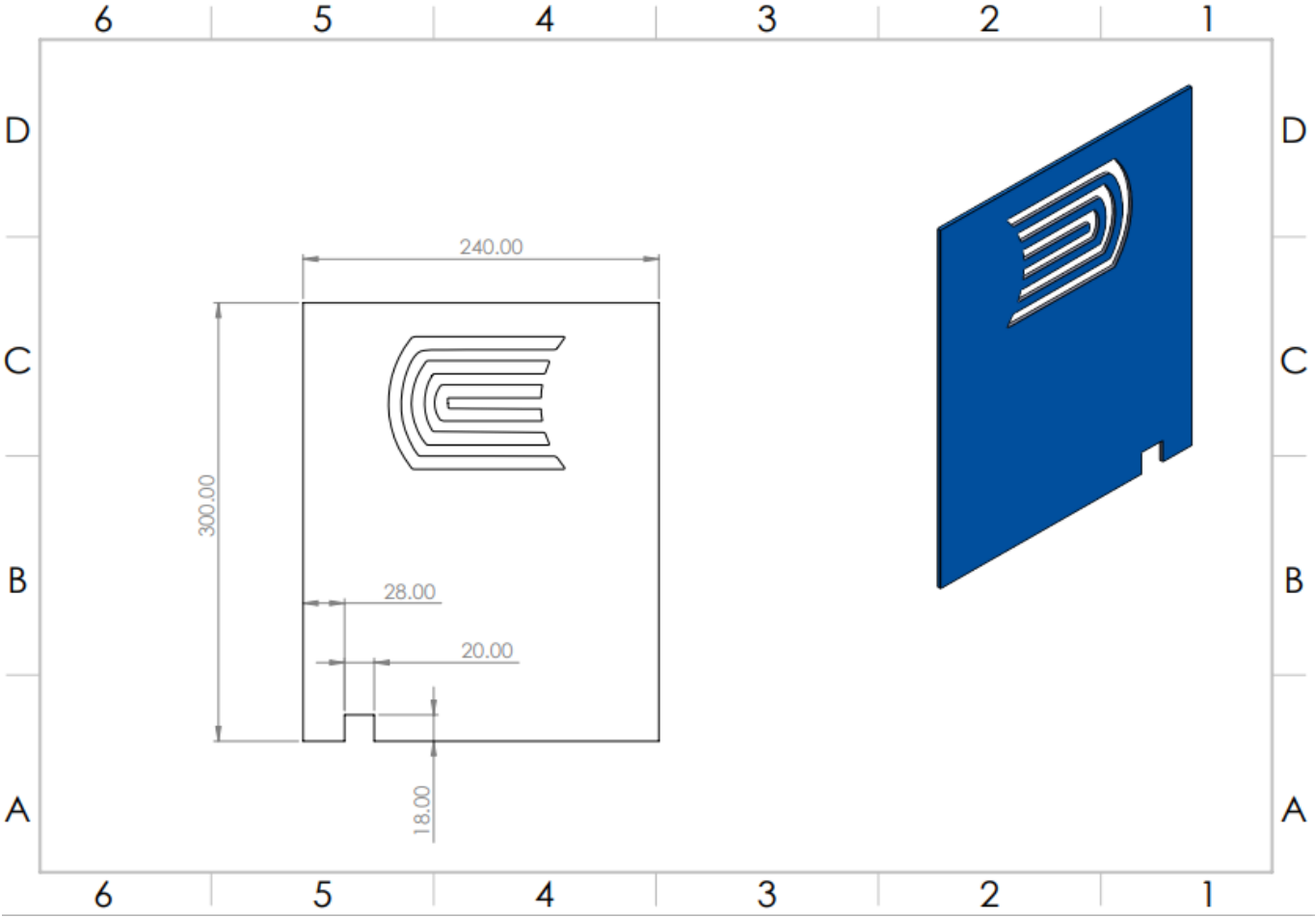
Anexo 6. Plano de la estructura metálica.



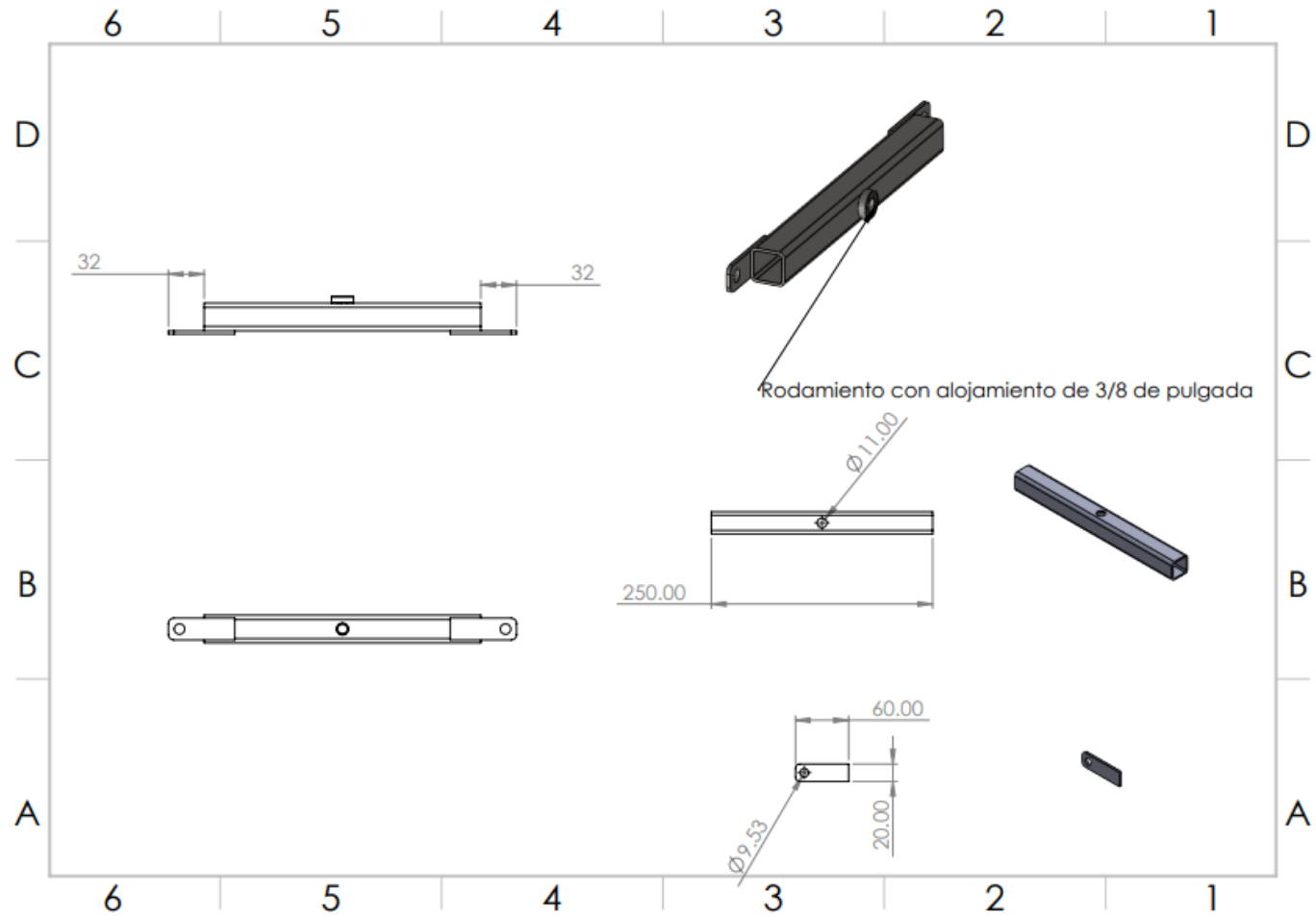
Anexo 7. Plano lateral inferior.



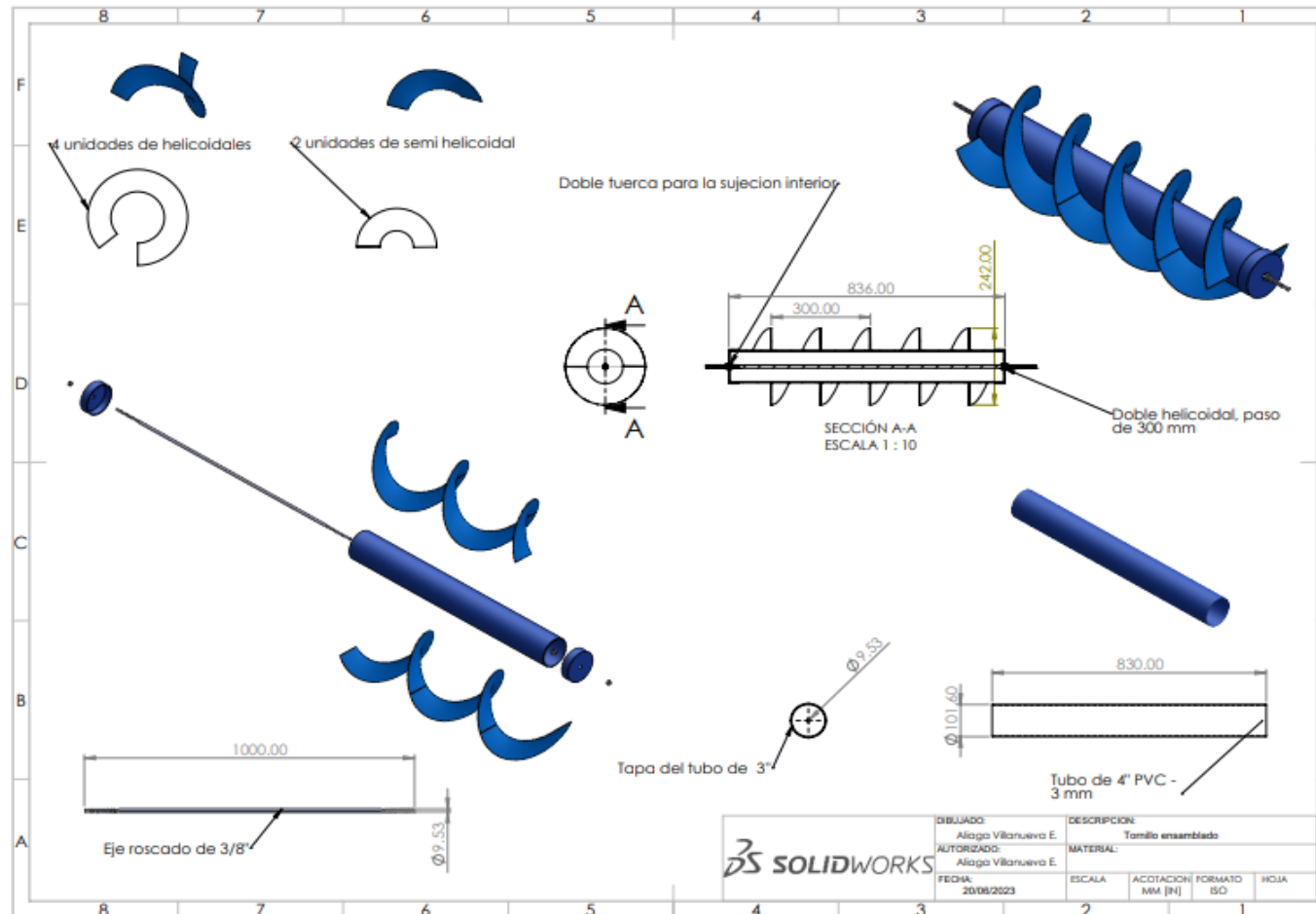
Anexo 8. Plano de lateral superior.



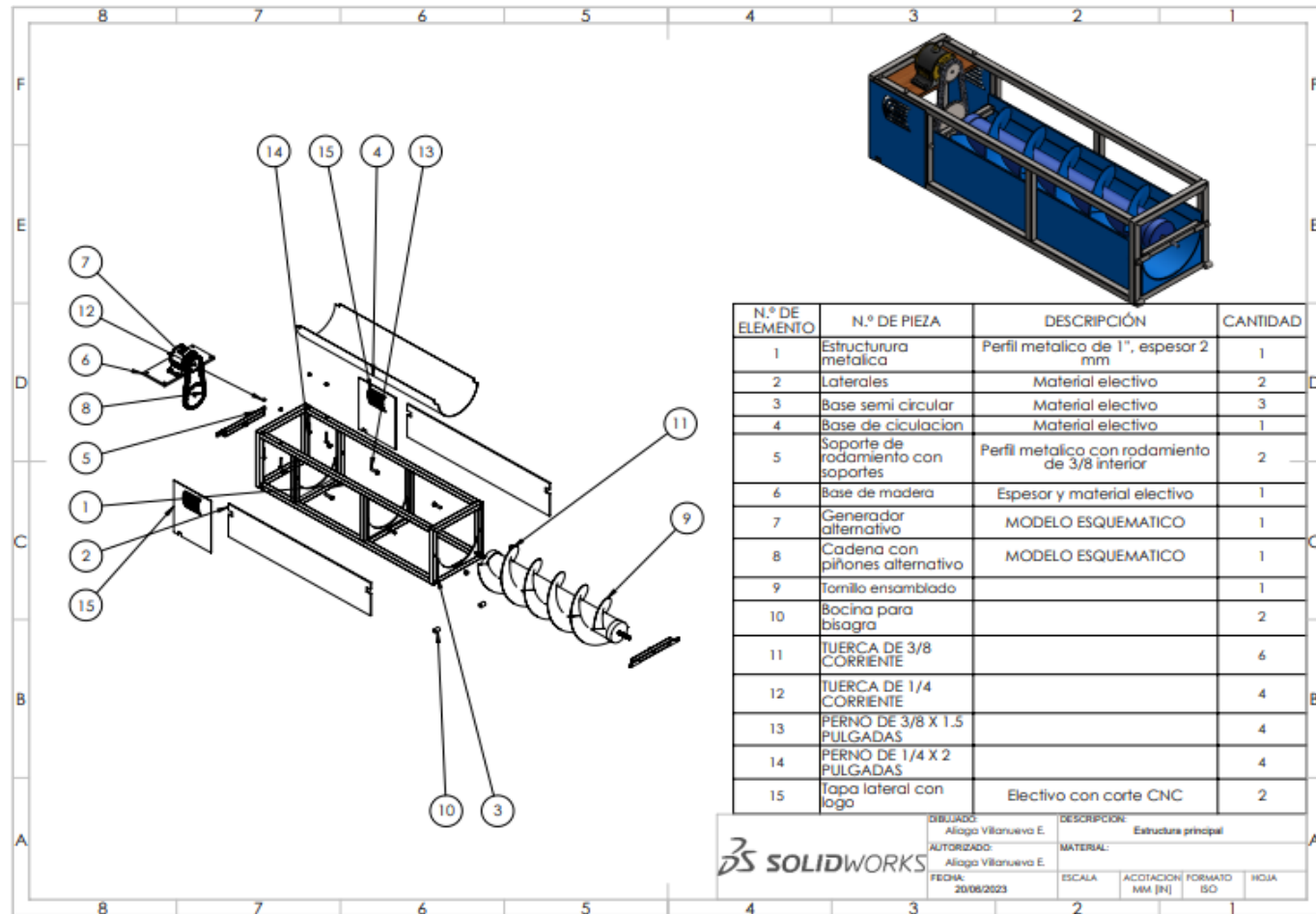
Anexo 9. Plano de soporte del rodamiento.



Anexo 10. Plano de tornillo ensamblado.



Anexo 11. Plano de explosión de la estructura principal.



Anexo 12. Vista isométrica de tornillo de Arquímedes.

