

Estudio de la generación eléctrica de una turbina hidroeléctrica de baja potencia
ante modificaciones de los parámetros operativos del sistema

Duver Arley Champutis Gomez

Johan Sebastian Mera Cabrera

Universidad CESMAG

Facultad de ingeniería

Programa de Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2026

Estudio de la generación eléctrica de una turbina hidroeléctrica de baja potencia ante modificaciones de los parámetros operativos del sistema

Duver Arley Champutis Gomez

Johan Sebastian Mera Cabrera

Informe final de trabajo de grado presentado al Comité Curricular del Programa de Ingeniería Electrónica, en la modalidad estancia en línea para obtener el título de Ingeniero Electrónico

Asesor

Francisco Javier Eraso Checa

Universidad CESMAG
Facultad de ingeniería
Programa de Ingeniería Electrónica
San Juan de Pasto

2026

Nota de aceptación

Aprobado por el Comité de
Investigación y Proyección Social en
Cumplimiento de los Requisitos
exigidos por la Universidad CESMAG
Para optar al título de Ingeniería
Electrónica.

Mag. Franciso Javier Erazo Checa

Asesor

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, abril 2026

Página de Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

“El pensamiento que se expresa en esta obra es exclusivamente responsabilidad de sus autores y no compromete la ideología de la Universidad CESMAG”

Resumen

La adopción de fuentes de energía renovables se ha vuelto cada vez más importante para el desarrollo sostenible, particularmente mediante el uso de alternativas no convencionales como la energía hidroeléctrica. En este contexto, los sistemas hidroeléctricos a pequeña escala representan una solución viable, especialmente en regiones con abundantes recursos hídricos. Sin embargo, su implementación presenta desafíos técnicos relacionados con la eficiencia y la estabilidad debido a las variaciones en el caudal y las condiciones estructurales.

Este estudio tiene como objetivo evaluar la respuesta de las variables eléctricas (voltaje, corriente y potencia) de un generador hidroeléctrico de baja potencia ante variaciones en los parámetros operativos. Se implementó un sistema microhidroeléctrico experimental en la Universidad CESMAG, donde se analizaron variables como el caudal, el tipo de turbina y las condiciones hidráulicas. Se consideraron dos tipos de turbinas, Pelton y Michell-Banki, a nivel teórico, seleccionándose la turbina Pelton para la validación experimental.

La metodología incluyó el diseño, la construcción y la caracterización del sistema, incluyendo el uso de una bomba hidráulica para simular condiciones de flujo controlado. El sistema se instrumentó con sensores para monitorear variables clave en tiempo real, con la adquisición de datos gestionada por un microcontrolador e integrada en una plataforma de monitoreo educativo.

Los resultados permitieron comparar el rendimiento teórico y experimental, identificando la influencia de los parámetros operativos en la eficiencia del sistema. Este proyecto contribuye a la comprensión de la generación hidroeléctrica de baja potencia y proporciona una plataforma experimental funcional para fines académicos y de investigación en sistemas de energías renovables.

Palabras clave: microhidroeléctrica, turbina Pelton, energía renovable, caudal, variables eléctricas, sistema experimental

Dedicatoria

El presente proyecto está dedicado a mi familia, especialmente a mis padres, Pedro Champutis y Yuli Gómez, quienes han sido un apoyo incondicional en mi vida. Su cariño, dedicación, fortaleza y enseñanzas han sido la base que me ha permitido avanzar. Consejos, palabras de ánimo y regaños se transformaron en la motivación necesaria para no rendirme y perseverar en el camino hacia esta meta.

De manera muy especial, a mi abuela Mery Champutis, quien ha sido una de mis mayores motivaciones, cada abrazo y bendición que me brindaba se convirtieron en mi mayor fortaleza. A mis demás familiares, por su apoyo constante y por confiar en mis capacidades, incluso en aquellos momentos en los que yo mismo dudaba. Su presencia, respaldo y cariño han sido esenciales para continuar este camino con determinación.

A mis amigos, quienes se convirtieron en un gran soporte, por brindarme ánimo y compartir momentos de alegría, enojo y tristeza que hicieron parte de este proceso, y que contribuyeron a sobrellevar esta etapa.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por ser parte fundamental en la culminación de este logro y por acompañarme a cada paso.

Duver Arley Champutis Gomez

Dedicatoria

El presente proyecto está dedicado a mi familia, especialmente a mis padres, Fausto Alirio Mera Zambrano y Maria Betti Cabrera Pantoja, quienes, aunque ya no me acompañan físicamente, fueron un pilar fundamental en mi vida. Su amor, apoyo y enseñanzas dejaron una huella imborrable que me motivó a seguir adelante y a luchar por cada una de mis metas. Este logro también es reflejo de los valores que me inculcaron.

A mis abuelos, Maria Pastora Zambrano Tobar y José Camilo Mera Vallejos, por su apoyo incondicional y por haberme brindado la fortaleza necesaria para dar los primeros pasos en mi camino, siendo guía y respaldo en momentos importantes de mi vida.

A mi familia en general, por su presencia constante a lo largo de este proceso, por creer en mí y por acompañarme con su apoyo y confianza en cada etapa.

A mis amigos, quienes se han convertido en una segunda familia, por su compañía, apoyo y por estar presentes en los momentos importantes, brindándome ánimo y motivación para seguir adelante.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por haber sido parte fundamental en este logro.

Johan Sebastian Mera Cabrera

Agradecimientos

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al desarrollo y culminación de este proyecto de grado.

En primer lugar, agradecemos a nuestro asesor Francisco Javier Eraso Checa, por su orientación, compromiso y valiosos aportes durante el desarrollo de este trabajo, los cuales fueron fundamentales para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

A los docentes de la carrera, quienes a lo largo de nuestra formación académica compartieron sus conocimientos y contribuyeron significativamente a nuestro desarrollo profesional.

Asimismo, agradecemos a la Universidad Cesmag y al programa académico de ingeniería Electrónica por brindarnos los espacios, recursos y formación necesarios para llevar a cabo este proceso investigativo.

A nuestros compañeros de la carrera, con quienes compartimos conocimientos, experiencias y momentos significativos a lo largo de este proceso, contribuyendo al aprendizaje conjunto y al fortalecimiento académico.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todas las personas que, desde el ámbito académico, aportaron de manera directa o indirecta al desarrollo de este proyecto.

Contenido

Introducción	16
1. El Problema de investigación.....	17
1.1 Objeto o tema de investigación	17
1.2 Línea de investigación.....	17
1.3 Sub Línea de Investigación	17
1.4 Planteamiento del Problema.....	17
1.5 Objetivos	18
1.5.1 Objetivo general	18
1.5.2 Objetivos específicos.....	18
1.6 Justificación.....	18
1.7 Delimitación	19
2. Tópicos del marco teórico.....	20
2.1 Antecedentes	20
2.1.1 Utilizing the controlled hydropower system to harness the collected water in drainage system for power generation	20
2.1.2 Banco de pruebas micro turbina Turgo	22
2.1.3 Duoturbo: Implementation of a counter-rotating hydroturbine for energy recovery in drinking water networks	24
2.1.4 Analysis of oil film flow characteristics and lubrication performance of thrust bearing of 1000MW Hydraulic Turbine Unit	25
2.1.5 Diseño, montaje y pruebas de un prototipo de microcentral hidroeléctrica con turbina Pelton	26
2.1.6 CFD Based design optimization, fabrication and testing of a micro hydro pelton turbine	28

2.1.7	Manufacturing and experimental performance analysis of a micro hydro pelton turbine	30
2.1.8	Elaboración de un prototipo de turbina tipo Pelton para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio mediante métodos estandarizados de diseño de estructuras hidráulicas	31
2.1.9	Influencia de los parámetros de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica	33
2.2	Enunciados de los supuestos teóricos	34
2.2.1	Sistemas hidroeléctricos de filo de agua	34
2.2.2	Potencia hidráulica	35
2.2.3	Caudal	36
2.2.4	Potencial eléctrico	37
2.2.5	Turbina Pelton	37
2.2.6	Turbina Michell Banki	38
2.2.7	Variables de estudio	40
3.	Metodología	42
3.1	Secuencia metodológica	42
3.1.1	Implementar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.	42
3.1.2	Caracterizar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.	43
3.1.3	Integrar el sistema a una plataforma educativa que permita el monitoreo en tiempo real de las variables que influyen en el desempeño del microgenerador	44
3.1.4	Analizar el comportamiento del sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia ante variaciones de los parámetros operacionales del sistema	45
3.2	Técnicas de recolección de información	46
3.2.1	Validez de las técnicas de recolección de la información	47
3.2.2	Confiabilidad de las técnicas de recolección	48

3.3	Instrumentos de recolección de información	49
4.	Resultados	51
4.1	Implementación del sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.	51
4.1.1	Diseño del esquema hidráulico.....	51
4.1.2	Construcción del sistema hídrico.....	53
4.1.3	Construcción del sistema electrónico	57
4.2	Caracterización del sistema de generación hidroeléctrico	64
4.2.1	Datos técnicos de los componentes	64
4.2.2	Definición del sistema	66
4.2.3	Comportamiento hidráulico.....	67
4.2.4	Comportamiento eléctrico	68
4.2.5	Funcionamiento ideal del sistema	73
4.2.6	Validación mediante instrumentos externos	76
4.2.7	Pruebas ante variación de caudal.....	76
4.2.8	Análisis bajo diferentes condiciones de carga.....	81
4.3	Integración del sistema a la plataforma RELAB para el monitoreo de variables	85
4.3.1	Funcionamiento general	85
4.3.2	Adquisición y procesamiento de datos	86
4.3.3	Visualización y análisis en la plataforma	87
5.	Análisis del Resultados	90
5.1	Análisis pruebas de variación de caudal	90
5.2	Análisis de las pruebas bajo diferentes condiciones de carga	91
5.3	Comparativa de potencias teórica y experimental.....	92
5.4	Análisis de los parámetros finales en el punto de máxima potencia.....	93
	Conclusiones	96

Recomendaciones.....	97
Referencias.....	98

Listado de tablas

Tabla 1. Variables de estudio.....	40
Tabla 2. Datos técnicos de los componentes.....	65
Tabla 3. Datos experimentales ante la variación de caudal.....	77
Tabla 4. Comparativa de generación en diferentes voltajes.....	84
Tabla 5. Comparativa de potencias.....	92

Lista de Figuras

Figura 1.Drainage System for Power Generation	20
Figura 2. Comparativa potencia vs tiempo	21
Figura 3.Turbina Pelton.....	38
Figura 4.Turbina Michell Banki.....	39
Figura 5. Diseño primer montaje	52
Figura 6. Diseño final del montaje.....	53
Figura 7.Montaje bomba-contenedor(70L).....	54
Figura 8. Primera versión del sistema hidroeléctrico.....	55
Figura 9. Implementación de Versión final del sistema hidroeléctrico	56
Figura 10. Versión final del sistema hidroeléctrico.....	57
Figura 11. Esquema de conexiones	58
Figura 12.ESP32	59
Figura 13.Transductor de presión instalado	60
Figura 14.Sensor de caudal FS300A instalado.....	60
Figura 15.Rectificador trifásico instalado.....	61
Figura 16.INA219 instalado.....	62
Figura 17.Diseño de tarjeta de monitoreo con conexiones	63
Figura 18.PCB de prueba	64
Figura 19.Contenedor plástico (12L)	66
Figura 20.Bomba Periférica	67
Figura 21.Generador Hidroeléctrico	68
Figura 22.Sensor FS300A	69
Figura 23.Grafica de frecuencia respecto a caudal(L/min-F)	70
Figura 24.Sensor de presión analógico	70
Figura 25.Grafica de voltaje respecto a presión (PSI vs V).....	71
Figura 26.Modulo sensor INA219	72
Figura 27.Comportamiento comunicación I2C del módulo INA219.....	73
Figura 28. Medida sensor.....	76
Figura 29. Presión vs Caudal	78
Figura 30. Voltaje vs Caudal	79

Figura 31. Corriente vs Caudal	80
Figura 32. Potencia vs Caudal.....	81
Figura 33. Voltaje vs Cargas.....	82
Figura 34. Voltaje vs Carga con 32v de referencia	83
Figura 35. Voltaje vs Carga con 24v de referencia.....	83
Figura 36. Voltaje vs Carga con 12v de referencia	84
Figura 37. Potencia vs Carga con 32v, 24v y 12v de referencia	85
Figura 38. Visualización de datos en plataforma educativa.....	88

Introducción

En el sistema hidroeléctrico se aprovechó la energía potencial y cinética del agua, la cual fue transformada en energía mecánica mediante el uso de turbinas y posteriormente convertida en energía eléctrica a través de generadores. Entre las principales turbinas estudiadas se destacó la turbina Pelton, debido a su capacidad de operar en condiciones de caudales altos y moderados. Su funcionamiento se basó en el impacto del chorro de agua sobre las cucharas de la turbina, lo que permitió la transferencia de energía del flujo hacia el eje del sistema.

El desarrollo de sistemas experimentales para la generación hidroeléctrica a pequeña escala implicó diversos retos asociados al diseño del circuito hidráulico, la selección adecuada de materiales y componentes, así como la medición precisa de las variables que intervienen en el proceso de generación de energía. La correcta implementación del sistema permitió evaluar parámetros como la presión, el caudal y la potencia generada, los cuales resultaron fundamentales para analizar el comportamiento del sistema y determinar su desempeño bajo diferentes condiciones de operación.

El presente trabajo de grado se enfocó en el diseño, implementación y caracterización de un sistema hidroeléctrico experimental basado en un generador que incorporó una turbina tipo Pelton para la generación de energía eléctrica de baja potencia. El sistema desarrollado permitió la simulación de un sistema hidroeléctrico de caída de agua mediante un circuito hidráulico de recirculación, el cual contó con una bomba, un sistema de tuberías y un mecanismo de inyección de caudal manual.

Para el análisis del sistema, se implementó un sistema de monitoreo que permitió medir variables hidráulicas y eléctricas, tales como la presión, el caudal, el voltaje y la corriente generada, mediante sensores electrónicos integrados a un sistema de control basado en un microcontrolador. Este sistema permitió registrar y analizar la información obtenida durante las pruebas experimentales. El desarrollo del banco de pruebas facilitó el estudio de la relación entre las condiciones hidráulicas del flujo y la potencia eléctrica generada, así como la evaluación del desempeño del generador bajo diferentes condiciones de carga.

1. El Problema de investigación

1.1 Objeto o tema de investigación

Generador hidroeléctrico de baja potencia para el laboratorio de energías renovables de la Universidad CESMAG

1.2 Línea de investigación

Potencia y Energía. La línea de Potencia y Energía del programa de Ingeniería Electrónica de la Institución Universitaria CESMAG enfoca su trabajo en el estudio de la generación, transformación, intercambio, transporte, distribución, almacenamiento y consumo de energía eléctrica de manera absoluta o por unidad de tiempo, incluyendo el diseño, análisis, control y optimización de sistemas de electrónica de potencia. Las líneas de investigación incluyen Calidad de la Energía y Energías Alternativas (Electrónica, 2015).

1.3 Sub Línea de Investigación

Energías Alternativas las energías alternativas son aquellas que se obtienen mediante procesos alternativos a los tradicionales (en el caso de Colombia la hidroeléctrica a gran escala), estas se dividen en renovables o limpias, las cuales se obtienen de fuentes naturales capaces de regenerarse de manera más rápida de lo que se consumen o ser virtualmente infinitas; y en no renovables cuya fuente se consume más rápido de lo que se regenera pero que a diferencia las fuentes tradicionales el impacto ambiental es menor (Electrónica, 2015).

1.4 Planteamiento del Problema

Según Fajardo (Moreno et al., 2022) Colombia estableció como meta la generación de 1.500 MW a partir de fuentes no convencionales de energías renovables hasta el año 2022. Basado en los reportes estatales de 2021 (BP Statistical, 2021),(Congreso de la República de Colombia, 2019), la capacidad de generación de energía con fuentes renovables (eólica, solar, otras) es de 22.4MW con el objetivo de aumentarla a 1500MW lo que representaría un incremento del 98,5% en la fuente de producción energética. Colombia y Nariño tienen potencialidad significativamente favorable para el aprovechamiento de recursos hídricos,

tomando en cuenta estos datos se plantea la idea de la capacitación sobre generación hídrica de baja potencia mediante pruebas de laboratorio.

El principal reto del proyecto aborda la capacidad de generación eléctrica de un sistema que se mide mediante ecuaciones de dimensionamiento, sin embargo, la variabilidad de la estructura y la susceptibilidad al cambio de los parámetros operativos, que muchas veces no se tienen en cuenta en el diseño y que no se pueden verificar, controlar o manipular, hacen que los sistemas operen alejados de los criterios planteados y se desconoce en qué medida una variable que aparentemente no se encuentra contemplada en los parámetros puede afectar en el rendimiento del sistema, especialmente en relación a las variables eléctricas de voltaje, corriente y potencia. De no realizar el estudio, es difícil construir guías de laboratorio que permita anticipar la relación entre los parámetros del sistema hidroeléctrico y las variables eléctricas como se muestra en (Zamora Juárez, 2019), es posible implementar un sistema de bombeo donde simule condiciones de precipitación donde se llega a tener diferentes valores de carga hidráulica mientras se monitorea con un circuito externo las variables eléctricas en el laboratorio.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Evaluar la respuesta en las variables eléctricas (Voltaje, Corriente, Potencia) de un generador hidroeléctrico de baja potencia ante modificaciones de los parámetros operacionales del sistema.

1.5.2 Objetivos específicos

- Implementar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.
- Caracterizar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.
- Integrar el sistema a una plataforma educativa que permita el monitoreo en tiempo real de las variables que influyen en el desempeño del microgenerador.
- Analizar el comportamiento del sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia ante variaciones de los parámetros operacionales.

1.6 Justificación

El proyecto de estancia en línea cobra relevancia en el contexto actual de la transición energética donde se busca fortalecer la formación teórica y práctica en el campo de energías

renovables las cuales desempeñan un papel importante en la reducción de la dependencia de combustibles fósiles, al incorporar un sistema a pequeña escala de generación hidroeléctrica en un entorno de laboratorio, busca ofrecer una herramienta práctica para comprender los principios de la energía renovable como lo es la energía hídrica que es una de las fuentes más fiables y sostenibles dentro del panorama energético.

Además, permite entender el comportamiento de este tipo de sistemas de generación eléctrica, bajo distintas condiciones de parámetros operacionales, aplicando conceptos de ingeniería electrónica. El impacto académico del proyecto es importante ya que no solo contribuye a mejorar el conocimiento de las energías renovables, sino que ofrece un laboratorio experimental para el desarrollo de investigaciones aplicadas en un sistema de microgeneración hidroeléctrica funcional y con monitoreo continuo de las variables eléctricas (V, I, P), que crea un entorno adecuado para la aplicación de estos sistemas.

Con el proyecto se mejora la comprensión de cómo las modificaciones de las principales condiciones operativas influyen en el rendimiento de estos sistemas. El proyecto permite la construcción de guías de laboratorio que no solo facilitarán el proceso de aprendizaje para el manejo del sistema, estos recursos también ayudan a anticipar el comportamiento y la relación entre los parámetros del sistema hidroeléctrico y las variables eléctricas en el laboratorio de energías renovables de la Universidad CESMAG.

1.7 Delimitación

El proyecto de energía dentro de la universidad CESMAG ubicada en Pasto (Nariño), se limita a la implementación de un micro generador hídrico con la capacidad de generación limitada, como parte del proyecto denominado “Estudio de la generación de una turbina hidroeléctrica de baja potencia ante modificaciones de los parámetros operacionales del sistema” que lo desarrollan los profesores del Programa de Ingeniería Electrónica.

2. Tópicos del marco teórico

2.1 Antecedentes

2.1.1 *Utilizing the controlled hydropower system to harness the collected water in drainage system for power generation*

En el trabajo desarrollado por Hussein (Hussein et al., 2023), se propone un sistema energético que busca ser confiable y eficiente, respondiendo a la creciente necesidad de alternativas sostenibles ante el incremento en los precios del petróleo y los efectos del cambio climático. La energía hidráulica, al ser una de las fuentes más confiables y limpias, es explorada en este proyecto mediante la instalación de sistemas hidroeléctricos en desagües de carreteras. Estos sistemas permiten generar electricidad y mejorar la seguridad vial en casos de fuertes lluvias o inundaciones. El sistema utiliza una turbina Francis, fabricada con una impresora 3D en material PLA, debido a su reconocida durabilidad y eficiencia. Esta turbina está conectada a un generador de corriente continua (DC) que convierte el flujo de agua en energía. El diseño (figura 1) contempla que la acumulación de agua en las tuberías, un sensor de nivel de agua active una válvula solenoide, permitiendo que el agua fluya hacia la turbina para producir electricidad.



Figura 1. Drainage System for Power Generation

La energía generada tiene diversas aplicaciones, como el suministro de señales de advertencia para conductores en situaciones de inundación, mejorando la seguridad en las

carreteras. Además, se observaron los resultados de potencia generada en un rango de tiempo de 10 segundos, donde se halló una potencia generada de 20W, esto si se presenta una inundación leve, si en estas zonas llegara a existir una inundación significativa se estima que se genere 4KW por hora.

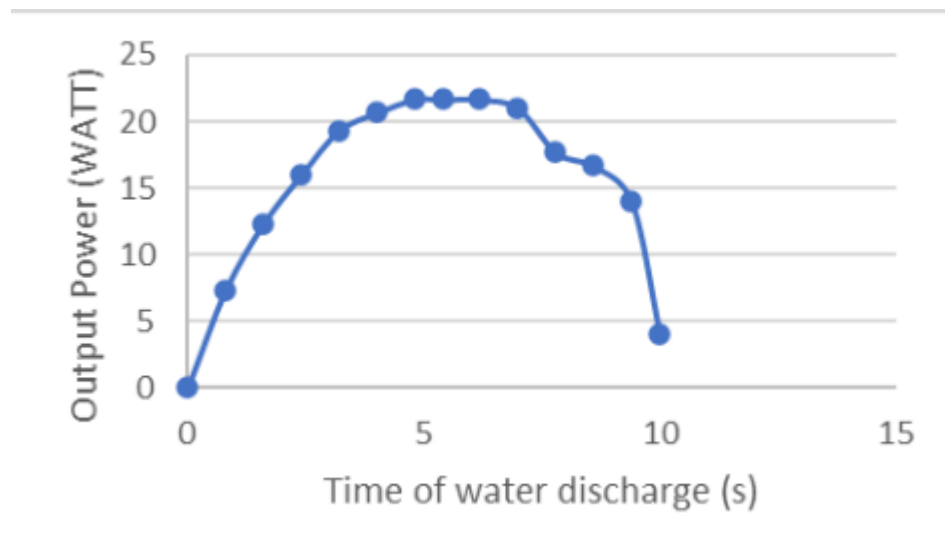


Figura 2. Comparativa potencia vs tiempo

La Figura 2 presenta la variación de la potencia eléctrica generada en función del tiempo de descarga del agua. Inicialmente, la potencia es cercana a cero debido a que el sistema se encuentra en la fase de arranque. Conforme el caudal aumenta y el flujo se estabiliza, la potencia se incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor máximo cercano a 20 W, lo que indica el punto de mayor aprovechamiento energético. Posteriormente, la potencia disminuye debido a la reducción del caudal y al final del proceso de descarga. En conjunto, la gráfica evidencia que el sistema es capaz de generar potencia útil durante eventos transitorios de flujo de agua, como inundaciones leves, validando su aplicación en sistemas de baja potencia

Este proyecto plantea un enfoque innovador al enfocarse en un entorno educativo, donde se controla el caudal de agua mediante una motobomba hidráulica que dirige el flujo hacia diferentes tipos de turbinas (Francis, Pelton o Michell Banki). Todo el sistema es monitoreado con sensores, permitiendo evaluar su eficiencia energética, lo cual proporciona una valiosa herramienta para la enseñanza y simulación de generación de energía hidroeléctrica en condiciones controladas.

2.1.2 Banco de pruebas micro turbina Turgo

El trabajo desarrollado por Irazusta (Irazusta & Reyna, 2020) abarca estudios acerca del diseño y construcción de una micro turbina Turgo la cual es aplicada en pequeñas centrales hidroeléctricas. Estos estudios se centraron en diseñar un banco de pruebas para la micro turbina Turgo fabricada, con la finalidad de medir la eficiencia y en el caso de ser necesario realizar optimizaciones, en términos de altura de caída, la cual determina la energía potencial del agua, porque cuanto mayor sea la altura, mayor será la energía disponible para convertir en electricidad. La turbina Turgo fue diseñada para soportar una carga de 26 metros, un caudal de 10 l/s. Se diseñó una bomba para generar el caudal suficiente pero no excesivamente grande para que se pueda contener en un tanque móvil de aproximadamente 10 litros, con la potencia útil esperada de 1.5 kW con una eficiencia del 60% y el 40% como pérdidas del sistema. En el banco de pruebas también se usó una bomba centrífuga marca Motorarg BC 50, una caja de contención para la turbina con manómetros y el freno de Prony instalado para así medir la potencia, el sistema eléctrico instalado lateralmente con protecciones que permite la manipulación de la bomba cercano a la circulación del agua, este diseño es transportable pensado para aplicarse en aulas de clase lo cual limita algunos parámetros de funcionamiento. Para conocer la eficiencia de la máquina se comparó la potencia teórica con la real generada. para la potencia teórica se tomó valores como caudal, altura y una eficiencia del 100% con la ecuación 1:

$$P_t = \gamma * Q * H \quad (1)$$

Pt: la potencia mecánica en W.

Y: densidad en N/m³.

Q: caudal en m³/s .

H: Altura en m

Para la potencia real se consideró la eficiencia en la transformación energética, con el sistema de frenado para medir la variación de la velocidad respecto al giro del eje de la turbina en función de la carga, el freno puede variar la fuerza de torque y es capaz de ajustar el peso aplicado para el freno, si se combina la medida del torque con la velocidad de rotación de eje se puede calcular la potencia de salida del rotor:

$$P_u = T * w = (F * R) * w \quad (2)$$

Pu: potencia de frenado en W.

T: torque en N.m.

F: fuerza de fricción en N.

R: radio del eje del Torque.

w: fuerza de fricción generada en m.

Para el cálculo de la eficiencia se toma en cuenta las ecuaciones anteriores de p_t y p_u para luego calcularlo mediante la siguiente formula:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} \quad (3)$$

Con base en los estudios realizados, se definieron cuatro ángulos de inclinación del inyector para las pruebas experimentales: 13°, 15°, 16° y 17°, estas configuraciones se emplearon para obtener la curva de potencia del sistema, con el objetivo de identificar el punto de máxima potencia, parámetro fundamental para el diseño.

Las pruebas se llevaron a cabo aplicando cargas comprendidas entre 500 g y 2 000 g, con incrementos de 100 g, para esto se realizaron pruebas realizando mediciones de carga y descarga y así evitar errores de lectura y registro de mediciones como también un efecto de inercia en el giro de la turbina. Durante el proceso se registraron las velocidades de giro de la máquina según la inclinación del inyector, la presión medida por el manómetro y el proceso de carga y descarga, se obtuvo curvas de potencia para cada carga y ángulo del inyector, con mejores resultados para una carga de 10 metros, luego de las pruebas se deduce que el ángulo de 15° generó la mayor potencia y eficiencia pero el ángulo de 13° es más eficiente con respecto al promedio produjo potencias más estables, con menos variación entre las velocidades medidas.

Las conclusiones fueron que el banco de pruebas que fue instalado consta de una bomba centrífuga, un tanque de un sistema eléctrico, una caja contenedora de la turbina, incluyendo instrumentos como manómetro y freno de Prony para medir presión y la potencia, se especifica que en estudios próximos se debe agregar instrumentos de medición como el caudalímetro, balanza dinamométrica para tener medidas más precisas y así conocer mejor el funcionamiento de la turbina, respecto a rendimiento se concluye que existe un ángulo de inyector óptimo para cada carga, para la carga de 8 a 10 el ángulo es de 15', para la carga de 14 m es de 17', dadas las condiciones de carga y caudal que son restringidos por el tamaño de la bomba y el tanque, un

proyecto móvil capaz de ser llevado a aulas de clase, en cuanto a diseño del software se utilizó las mediciones reales y se promedió con las ideales, se encontró que los resultados de la simulación son más eficientes porque no consideran las condiciones externas, aun así estas proporcionan un buen un buen panorama del comportamiento de la turbina y así ayuda a mejorar el diseño.

En el caso del proyecto se tiene en cuenta dos tipos de turbinas como lo son la Pelton y la Michell Banki, para la inyección se tiene en cuenta aspectos tales como lo es la estructura la cual se adapta a la necesidad de flujo y presión necesaria, en cuanto al laboratorio de pruebas se tiene planteado que tendrá un tanque, bomba, turbina y el generador estos materiales se ajustarán de forma adecuada para realizan un ejecución correcta, en el caso de los sensores se usara sensores de precisión los cuales van a estar controlados por un microcontrolador y también serán monitoreados mediante un software, en cuanto a rendimiento se tendrá en cuenta los ángulos de inyección y se adaptaran de acuerdo a la turbina a utilizar esto para comprobar el rendimiento del sistema y como puede funcionar óptimamente.

2.1.3 Duoturbo: Implementation of a counter-rotating hydroturbine for energy recovery in drinking water networks

El trabajo desarrollado por Biner (Biner et al., 2021) aborda el desarrollo de un sistema de micro-hidroelectricidad enfocado en aprovechar el potencial energético presente en las infraestructuras de distribución de agua potable. En países con condiciones geográficas favorables para el aprovechamiento hidroenergético, como Suiza, este tipo de sistemas presenta una participación significativa dentro de la matriz energética nacional, alcanzando valores superiores al 57 % de la demanda eléctrica. Dentro de este sector, las pequeñas plantas hidroeléctricas con capacidades inferiores a los 10 MW, juegan un papel destacado, representando aproximadamente el 10% de la capacidad hidroeléctrica instalada en Suiza, el proyecto existente se centra en la implementación de una micro turbina de contra rotación, denominada DuoTurbo, diseñada para su integración en redes de distribución de agua. Este sistema busca aprovechar el flujo continuo de agua en estas redes para generar energía, con una capacidad de entre 5 kW y 25 kW. Aunque muchas instalaciones de agua potable tienen potencial para la generación eléctrica, su explotación ha sido limitada debido a la falta de soluciones tecnológicas rentables y eficaces. La *DuoTurbo* consiste en un sistema de microturbina de contra

rotación conformado por dos rotores axiales contrarrotantes dispuestos de manera coaxial, diseñados para su instalación directa en redes de distribución de agua potable presurizadas. El sistema se ubica en tramos de tubería donde existe un flujo continuo de agua y una diferencia de presión disponible, como sectores asociados a válvulas reductoras de presión o zonas con excedente hidráulico. Su operación no requiere un salto de agua significativo, ya que aprovecha principalmente la energía hidráulica asociada al caudal y a la presión del flujo confinado, permitiendo la recuperación de energía que normalmente se disipa en estos sistemas. Esta configuración posibilita un funcionamiento eficiente incluso bajo condiciones de bajo flujo, característica que favorece su integración en infraestructuras hidráulicas existentes.

En el caso del trabajo propuesto a diferencia del trabajo existente se enfoca en un micro generador hidroeléctrico con la modificación de su estructura, donde se usan turbinas Pelton o Michell Banki, aunque en los dos trabajos se busca un valor de potencia ideal, en el trabajo existente se implementa con un fin comercial, mientras que en el trabajo presente se lo implementa con un fin educativo donde se puedan comprender mejor la influencia estructural de los parámetros con la potencia que suministra el montaje.

2.1.4 Analysis of oil film flow characteristics and lubrication performance of thrust bearing of 1000MW Hydraulic Turbine Unit

El estudio realizado por Shi (Shi et al., 2024) aborda temas como el flujo de aceite y la lubricación de los cojinetes de una turbina hidráulica tipo Francis para la generación de 1000MW. El estudio se centró en tres aspectos significativos los cuales son el ángulo de inclinación, como es afectado por la carga y presión soportada. El ángulo de inclinación se refiere a la orientación de los elementos móviles o palas dentro de un sistema que opera con circulación de aceite, y se encuentra directamente relacionado con la carga aplicada y la presión generada en el fluido. A medida que la carga entendida como el peso o esfuerzo mecánico soportado por el sistema se incrementa, el ángulo de inclinación tiende a ajustarse de manera autónoma con el fin de compensar y soportar dichas cargas adicionales. Este ajuste provoca un aumento en la presión del lubricante, lo cual influye directamente en el comportamiento dinámico y mecánico del sistema. Desde un enfoque técnico, puede afirmarse que el incremento del ángulo de inclinación conduce a un aumento tanto de la presión interna como de la carga

soportada, dado que la presión depende de la variación angular y la carga resulta del efecto combinado de dicha presión actuando sobre un área efectiva determinada.

Como conclusiones del estudio realizado se tiene que a medida que aumenta el ángulo de inclinación la carga y presión sobre el cojinete aumenta y que este experimente variaciones en temperatura y posibles fallas debido a su lubricación, otro problema es la distribución del lubricante lo cual tiende a ser caótico e incluso experimento temperaturas hasta de 100.2°C, se propone una mejora con un sistema spray para reducir la agitación aunque sigue siendo asimétrico, estos factores se pueden involucrar directamente con su rendimiento y en ayudar en la mejora y optimización en estudios futuros.

A diferencia con el proyecto a desarrollar radica en que el estudio anterior es basado en la lubricación de los cojinetes de las turbinas hidroeléctricas Francis y el reto a desarrollar es una implementación la cual tiene más aspectos a evaluar ya que se tomara en cuenta la estructura y componentes del laboratorio hidroeléctrico, ya que este cuenta como componentes los cuales pueden cambiar las condiciones entres estos se encuentran el tanque, generador, bomba, turbina a utilizar y factores como el flujo presión y los resultados en potencia del sistema, del artículo anterior se toma en cuenta que el flujo y la lubricación del sistema es necesario en el momento de analizar el rendimiento que el sistema brinde, y el cambio de turbina ya que se usara la tipo Pelton o Michell banki, que abracara otros estudios y pruebas adicionales, en cuanto al análisis se debe realizar en diferentes ángulos de inyección, y cómo influye en la presión y temperaturas adquiridas por la turbina y así lograr un rendimiento óptimo y buscando aprovechar la información del articulo para no cometer errores básicos de manejo e instalación.

2.1.5 Diseño, montaje y pruebas de un prototipo de microcentral hidroeléctrica con turbina Pelton

El estudio realizado por Lagos (Lagos, 2007) propone que las microcentrales hidroeléctricas fueron fundamentales en los principios de la electricidad, pero con el avance tecnológico, las grandes centrales hidráulicas y la introducción de generadores diésel desplazaron estos sistemas pequeños. Mientras las grandes plantas requieren inversiones menores por kW, las microcentrales comerciales pueden costar hasta cinco veces más, y los grupos diésel ofrecen precios competitivos y una instalación rápida, lo que limita su adopción. Aunque en las últimas décadas han surgido tecnologías más simples y económicas aún es limitada. Para que estos

sistemas renovables sean viables, no solo se necesitan menores costos, sino también capacidades técnicas locales para fabricar, operar y mantener los equipos, además de una gestión adecuada que incluya tarifas apropiadas y participación activa de usuarios.

En el contenido del texto se desarrolla el diseño completo, la instalación experimental y la validación funcional de una micro central hídrica que cuenta con una turbina Pelton comercial. La turbina fue instrumentada en un laboratorio universitario para su análisis respectivo. El estudio inicia con una caracterización del sistema, la cual hace una revisión técnica de las turbomáquinas hidráulicas y justifica la selección de una turbina Pelton. La turbina Pelton también conocidas como ruedas tangenciales son turbinas de chorro libre que se utilizan para saltos de agua con mucho desnivel, entre 40 y 1.700 m^3 , la ventaja de estas turbinas es que pueden trabajar con caudales pequeños, consiguiendo rendimientos máximos del orden de un 90%.

El diseño se realizó para operar en condiciones de altura neta de 20 m y caudal cercano a 30 L/s, esta selección se define a partir de un análisis geométrico de las cucharas y rodete disponibles en el mercado. A partir de estos datos, se calculan los parámetros fundamentales para su funcionamiento, como la velocidad de eyección y el diámetro del inyector. Para conocer y mejorar el índice hidráulico se evalúa el funcionamiento con dos sistemas de regulación de caudal, uno con válvula de aguja y otro usando una válvula de 3 vías de flujo divergente. Se determinó que el inyector con válvula de 3 vías incorpora pérdidas de casi un 66 % de la potencia hidráulica inyectada, con lo cual se demostró que no es posible su utilización como sistema de regulación del caudal de operación de la turbina optando por la válvula de aguja que demostró que tiene una eficiencia global aproximada al 79% para mantenerse en los índices óptimos de generación

El prototipo se realizó con una bomba centrífuga industrial de 30 HP capaz de simular el recurso hidráulico bajo condiciones controladas, junto con una instalación completa que incluye tuberías, sensores, medidores y un generador síncrono para evaluar la potencia eléctrica generada, para así obtener las curvas de operación de la microcentral, comparando caudal, altura neta, eficiencia global y potencia eléctrica para distintas condiciones de prueba. Los resultados muestran que la turbina Pelton es capaz de mantener niveles de eficiencia superiores al 80% cuando opera cerca del caudal de diseño. En cuanto a mantener los parámetros eléctricos dentro de los niveles aceptables para su uso, consiste en mantener una carga constante durante toda la

operación o en bloques estables según el periodo de trabajo activo, lo que permite que el generador no experimente variaciones en tensión ni en frecuencia; este enfoque se conoce como regulación por carga. El segundo método se emplea cuando la demanda conectada al generador cambia, la turbina ajusta la potencia que entrega modificando el caudal de agua, dado que la altura de carga permanece fija. Este mecanismo se denomina regulación por caudal.

2.1.6 CFD Based design optimization, fabrication and testing of a micro hydro pelton turbine

El estudio realizado por Gemechu (Gemechu, 2018) parte de la necesidad de proporcionar soluciones energéticas sostenibles a comunidades rurales donde el acceso a la red eléctrica es limitado o nulo. La micro hidroelectricidad se presenta como una alternativa para reducir la deficiencia energética mediante el aprovechamiento de recursos hídricos locales considerando el potencial hidráulico disponible. La investigación se enfoca al diseño, optimización, fabricación local y pruebas experimentales de una turbina Pelton de micro escala destinada a satisfacer la demanda energética de una comunidad.

La investigación inicia con la definición de un diseño preliminar basado en guías geométricas que establecen parámetros esenciales como el diámetro de la circunferencia, el número de cucharas y las proporciones estructurales del rodete. Se desarrollaron modelos numéricos mediante el software CFD (ANSYS-CFX) con el objetivo de analizar el comportamiento hidráulico del flujo en las cucharas y determinar las zonas de pérdidas energéticas por separación del flujo, escape del chorro o impacto ineficiente sobre la superficie de la cuchara. Esto permitió estudiar de manera detallada la relación entre el flujo y la geometría del rodete.

Las simulaciones a través de CFD indicaron la necesidad de ajustar elementos de diseño como la reducción del número de cucharas de 18 a 15 y la disminución del PCD de 500 mm a 400 mm para reducir pérdidas y obtener un sistema óptimo. El proceso de optimización implicó modificaciones en la profundidad, longitud y curvatura del labio de la cuchara con el propósito de mejorar la captación y redirección del chorro, estos cambios registraron una reducción del peso total del rodete cercana al 7.6%, lo que disminuyó pérdidas asociadas al momento de inercia y mejoró la respuesta dinámica del sistema. Las simulaciones predijeron una mejora del 3.9% en la eficiencia hidráulica respecto al diseño base.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el laboratorio de Addis Ababa Institute of Technology (AAIT), siguiendo las mismas condiciones de altura y caudal empleadas en las simulaciones. Durante las pruebas sin carga, se registraron velocidades de rotación comprendidas entre 957 rpm y 1076 rpm, mientras que las pruebas con carga mostraron que la eficiencia máxima se alcanzaba con niveles intermedios de caudal, ya que aperturas excesivas provocaban dispersión del chorro y pérdidas por turbulencia, con las mejoras se evidenció una correspondencia sólida entre los modelos computacionales y el comportamiento real del prototipo. Para el análisis energético del sistema se emplearon ecuaciones fundamentales de turbinas hidráulicas. La potencia hidráulica (P_{in}) disponible se expresa mediante la ecuación 4:

$$P_{in} = \rho * g * Q * H \quad (4)$$

donde:

ρ : densidad del agua (kg/m^3),

g : aceleración gravitatoria (9.81 m/s^2),

Q : caudal volumétrico del flujo (m^3/s),

H : altura neta disponible (m).

La potencia mecánica obtenida en el eje del rotor se determina con la ecuación 5:

$$P_{out} = \frac{2\pi NT}{60} \quad (5)$$

donde:

N : velocidad angular del eje (rpm),

T : torque ($\text{N}\cdot\text{m}$),

$2\pi/60$: factor de conversión a rad/s.

La eficiencia global de la turbina se calcula mediante la ecuación 6:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \quad (6)$$

Dentro de la investigación y pruebas se introducen criterios de sostenibilidad en el diseño, incorporando la posibilidad de aplicar esquemas de reciclaje al finalizar la vida útil de la turbina, con el objetivo de minimizar el impacto ambiental y aprovechar de manera responsable los materiales disponibles localmente. El estudio también detalla diversos desafíos entre ellos vibraciones en el eje, pequeñas divergencias entre el diseño digital y la pieza fundida, así como

turbulencias en el interior de la carcasa que afectaron el rendimiento, el trabajo demuestra que el diseño es técnicamente viable y adecuado para aplicaciones reales de electrificación rural, destacando su aporte a soluciones energéticas sostenibles y accesibles para comunidades remotas.

2.1.7 Manufacturing and experimental performance analysis of a micro hydro pelton turbine

El estudio realizado por Legese (Legese, 2018) la turbina Pelton se presenta como una opción adecuada para sistemas de pequeña escala, por su simplicidad constructiva, facilidad de manufactura y capacidad para operar eficientemente en condiciones de flujo reducido y altas alturas de caída. El objetivo central del trabajo es la fabricación y el análisis experimental de una turbina Pelton de aproximadamente 2 kW diseñada para operar con un caudal de 20.8 L/s, una altura de 13.3 m y un diámetro de círculo primitivo de 212 mm. Estos parámetros son establecidos con el propósito de desarrollar un prototipo funcional que permita elaborar un manual de fabricación destinado a promover la producción local de turbinas hidráulicas. El proceso se llevó a cabo utilizando herramientas como SOLIDWORKS para el diseño, Matlab para cálculos y ajustes, impresión 3D para la elaboración del patrón del cucharón, fundición en arena para la obtención del rodete, y diversas máquinas herramienta como torno, taladro y equipo de soldadura para el acabado y ensamblaje final.

El proceso de fabricación enfrentó retos relacionados con la calidad del moldeo y el acabado superficial del cucharón, lo que generó diferencias entre las dimensiones teóricas y las obtenidas en la pieza fundida. Estas deformaciones afectaron la interacción del chorro con el rodete y permiten plantear hipótesis sobre las diferencias entre el rendimiento teórico y el experimental. La turbina fabricada alcanzó una eficiencia global del 54.09 % durante las pruebas de laboratorio, valor que se encuentra 20.91 % por debajo de la eficiencia teórica estimada para una apertura de válvula del 75 %. Esto confirma la viabilidad técnica de la fabricación local y demuestra que los métodos empleados permiten obtener un rodete funcional con un desempeño acorde a los modelos establecidos.

Las pruebas realizadas en el banco del Addis Ababa Institute of Technology (AAiT) permitieron obtener curvas de desempeño que mostraron una correspondencia adecuada entre las simulaciones y los resultados reales, especialmente en el régimen de operación nominal. El

análisis incluyó el cálculo de potencia hidráulica mediante la expresión anteriormente mencionada en la ecuación 7, la potencia mecánica del eje se determinó mediante:

$$P_{out} = \omega NT \quad (7)$$

Donde

T: torque aplicado (N·m),

ω : velocidad angular del rotor (rad/s),

N: velocidad angular del eje (rpm)

La eficiencia total de los sistemas hídricos se calcula mediante la ecuación 6, los resultados mostraron que las diferencias entre las curvas simuladas y las experimentales se dan por la calidad del proceso de fundición, en especial en la fabricación de los cucharones, así como por limitaciones del banco de ensayos del AAiT, que no contaba con condiciones ideales para la evaluación del prototipo. Sin embargo, el estudio evidencia que la turbina fue fabricada de manera efectiva utilizando recursos locales, y que el procedimiento seguido puede servir como guía para el desarrollo de futuros proyectos en el sector hidro energético.

2.1.8 Elaboración de un prototipo de turbina tipo Pelton para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio mediante métodos estandarizados de diseño de estructuras hidráulicas

En el estudio realizado por Parrado (Parrado et al., 2019) se demuestra que el desarrollo de prototipos de turbinas hidráulicas ha sido un proceso progresivo orientado a mejorar la conversión de energía del agua y optimizar configuraciones mecánicas y geométricas. Las investigaciones se centran en comprender el comportamiento del flujo y su capacidad para generar trabajo mecánico, lo que permitió el diseño de las primeras turbo máquinas de impulso. Los estudios tienden hacia el análisis detallado del desempeño de turbinas tipo Pelton y de impulso, destacando la influencia de la geometría y construcción del rotor y la boquilla sobre la eficiencia energética. Se destaca la importancia de la selección del material y la precisión dimensional, ya que prototipos anteriores presentaban pérdidas por fricción, inestabilidad del chorro y desalineación del eje. Para corregir estas deficiencias, se introdujeron configuraciones más estables, incluyendo rotores de 5½ pulgadas de diámetro, 2½ pulgadas de ancho, construidos

en aleación de aluminio 6061, con 12 cucharas, y montados sobre un eje de 3/8 de pulgada sostenido por rodamientos tipo 6202, disminuyendo vibraciones y mejorando la transferencia.

De igual forma, se destaca la relevancia del diseño hidráulico, se identifica que el uso de una boquilla de 5 mm y tubería de 1 pulgada permite obtener un chorro definido y adecuado para ensayos controlados. Las presiones utilizadas en prototipos previos se encontraron en rangos de 30 a 50 psi, generando caudales experimentales que se dan mediante la fórmula básica de hidráulica ecuación 8 que se usa para calcular el caudal de un fluido.

$$Q = V/t \quad (8)$$

Q: Caudal (m³/s o L/s),

V: Volumen de agua que fluye (m³ o L),

t: Tiempo en que pasa ese volumen (segundos)

Dichos valores, se integraron en fórmulas fundamentales como la velocidad del chorro expresada en la ecuación 9

$$V = \sqrt{2gH} \quad (9)$$

V: velocidad del chorro (m/s),

g: gravedad (9.81 m/s²),

H: altura o cabeza de presión (m)

La potencia hidráulica disponible como se menciona en la ecuación 4, otro aporte importante es el registro de los porcentajes de eficiencia obtenidos en los prototipos, según la información recopilada las turbinas a escala mostraban rendimientos globales entre 35 % y 55 %, dependiendo del estado del chorro, la calidad de la alineación del eje, la geometría de la cuchara y las pérdidas por fricción interna. Además, se evidenció que variaciones en la carga o desajustes en la boquilla podían generar disminuciones de eficiencia entre 10 % y 20 %, lo cual demostró la alta sensibilidad del sistema hidráulico ante perturbaciones mecánicas o geométricas. Estos resultados justificaron la necesidad de prototipos construidos con mayor precisión y con materiales de mayor resistencia, tal como los que componen el diseño presentado en el estudio.

2.1.9 Influencia de los parámetros de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica

En el trabajo desarrollado por Bastidas (Andrade & Juaspuezan, 2025), realizado en la Universidad CESMAG, se presenta el diseño, análisis y evaluación de una turbina tipo Pelton aplicada a un sistema de generación hidroeléctrica de baja potencia a nivel de simulación. La investigación estudia los principales parámetros hidráulicos, geométricos que actúan en la conversión de energía, tales como el caudal de operación, el diámetro del rodete, la altura de carga, la geometría de las cucharas, velocidad del chorro y el ángulo de incidencia del flujo, los cuales influyen de directamente en el rendimiento del sistema de generación.

Inicialmente parte del análisis teórico de la transformación de la energía hidráulica en energía mecánica, considerando la expresión de la potencia hidráulica disponible definida como en la ecuación 4, donde el caudal y la altura de carga constituyen las variables principales del sistema hídrico. A partir de esta relación, se determina la velocidad del chorro mediante la ecuación 9, la cual permite caracterizar la energía cinética del flujo incidente sobre las cucharas de la turbina Pelton. Con base en la velocidad del chorro se relaciona la velocidad periférica del rodete y el flujo hidráulico, considerando que dicha velocidad corresponde a una fracción de la velocidad del chorro, expresada como $u = k$. Este criterio es utilizado para definir el diámetro del rodete y su régimen de rotación lo cual es fundamental en el diseño mecánico de la turbina. A partir de estos parámetros, se analiza la potencia mecánica transmitida al eje del sistema, la cual se expresa mediante la relación

$$P_m = T * \omega \quad (10)$$

Vinculando el torque desarrollado por el rodete con la velocidad angular de operación. El trabajo aborda el diseño geométrico de la turbina Pelton mediante herramientas de modelado tridimensional, permitiendo establecer la forma de las cucharas en función de las condiciones hidráulicas disponibles y las dimensiones del rodete. Este proceso de diseño se fundamenta en los resultados teóricos, garantizando una compatibilidad entre las variables hidráulicas calculadas y las características físicas del prototipo.

El comportamiento del sistema es evaluado ante variaciones del caudal y de la velocidad del chorro, analizando su incidencia sobre la potencia entregada y el desempeño global de la turbina. La potencia eléctrica generada se determina a partir de la relación básica.

$$P = V * I \quad (11)$$

P: potencia eléctrica(W)

V: voltaje(V)

I: corriente(A)

lo que permite establecer una comparación directa entre la potencia hidráulica disponible y la potencia eléctrica obtenida. A partir de esta relación, se define la eficiencia del sistema como

$$n = \frac{P_e}{P_h} \quad (12)$$

Pe: Potencia eléctrica

Ph: Potencia hídrica

Identificando las pérdidas asociadas al proceso de conversión energética. Los resultados permiten identificar configuraciones de diseño que favorecen un mejor aprovechamiento del recurso hídrico bajo condiciones de operación controladas, propias de sistemas de micro generación hidroeléctrica.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 *Sistemas hidroeléctricos de filo de agua*

Es en el siglo XIX es cuando se produce un verdadero auge en el desarrollo de centrales hidroeléctricas de gran tamaño. Para hacer factible la utilización eficiente del potencial del agua, fue necesario también el desarrollo de máquinas que pudieran tener este aprovechamiento, estas máquinas son las llamadas turbo máquinas o simplemente turbinas para hidroeléctrica. Las turbinas son máquinas que aprovechan la energía cinética y potencial del agua para transformarla a energía mecánica de rotación y posteriormente por medio de un generador transformarla en energía eléctrica. El rendimiento de estas máquinas puede estar en el orden del 80% al 90 % (Flores, 2010).

El grupo turbina-generador tiene gran importancia en la transformación de la energía cinética y potencial del agua en energía eléctrica. En primer lugar, se realiza un estudio detallado presentando cuadros comparativos de los distintos tipos de turbinas hidráulicas que existen. Este tipo de estudios son relevantes cuando se decide evaluar técnico económicamente la viabilidad de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH). Este estudio permite conocer los distintos tipos de turbinas existentes, sus rangos de operación, y las ventajas y desventajas de cada tipo. Esto permite tomar la decisión más apropiada acorde con las condiciones de cada

proyecto. Considerando los posibles proyectos, las posibilidades de construcción y la continuidad de los datos, se podría concluir que las turbinas de acción son la opción más adecuada a ser implementada en PCH. Su buen rendimiento operando a cargas parciales, cargas a las cuales normalmente operan las PCH, ya que estas típicamente se construyen “a filo de agua” es decir que su caudal no es regulado y está sujeto a grandes variaciones debido a los periodos climáticos propios de la región tropical, está sujeto a grandes variaciones climáticas durante el año (Morales et al., 2014).

Cuando se toma en cuenta el impacto ambiental las PCH están incluidas entre las fuentes limpias de energía, estas pasaron a constituir un negocio atractivo, además de que la legislación vigente otorga las licencias ambientales y establece un control blando e incentivos fiscales y financieros bastante flexibles, lo que finalmente altera las dinámicas biológicas, o se establecen sin mayores precauciones. Las PCH surgen como una solución ambientalmente limpia de generación local de energía en zonas aisladas y que no representan un gran aporte al sistema nacional de interconexión eléctrica. Sin embargo, ellas requieren de la realización de estudios de impacto ambiental que cuantifiquen y cualifiquen los elementos ambientales presentes en la zona del proyecto antes, durante y después de su construcción, que finalmente ayudarán a diseñar las diferentes estrategias para compensar, corregir, mitigar o prevenir los impactos físicos, ambientales y socioeconómicos ocasionados por la presencia del proyecto (Moscoso & Montealegre, 2014).

2.2.2 Potencia hidráulica

En el caso de la potencia hidráulica se toma en consideración el flujo o caudal de la bomba y el proceso de conversión de la energía. Incluye la transformación de energía eléctrica en energía mecánica rotacional en el motor; transformación de energía rotacional de la bomba a energía hidráulica; o potencia hidráulica y por último el actuador convierte la potencia hidráulica en potencia mecánica al realizar un trabajo sobre la carga (Flores, 2010). El potencial hidráulico se refiere a la cantidad de energía a causa del agua que se debe del movimiento y posición de esta, que es convertida en energía útil como lo es la electricidad, en este tipo de sistemas hidroeléctricos se relacionan directamente, en términos técnicos el potencial se calcula mediante la energía disponible por la masa de agua debido a la altura que aprovechan la energía potencial gravitatoria y la energía cinética proporcionada por el caudal de acuerdo con (Casallas Martínez,

W. A., Ruiz Amado, J. A., & Díaz Pérez, 2022), la ecuación 13 presenta el cálculo de potencial hidráulico:

$$P = \rho * g * Q * H * \eta \quad (13)$$

P: potencia hidráulica

ρ : densidad del agua (1000kg/m³)

g: aceleración de gravedad

Q: caudal (m³/s)

H: altura de caída (m)

η : rendimiento

El potencial hidráulico representa la capacidad de un sistema para generar energía en base al caudal y la altura de caída que se proporcione, este cálculo es clave para conocer la energía potencial que se podrá convertir en electricidad mediante el generador.

2.2.3 Caudal

El caudal es clave al momento de implementar estos sistemas por lo que es importante conocer un cálculo teórico de caudal según (Garzón et al., 2020; López, 2021) en el cálculo se toma en cuenta variables como velocidad de flujo y el área transversal de la tubería de donde es posible decir que el caudal es el volumen que un fluido ocupa a través de un conducto cerrado, se describe mediante la ecuación 14:

$$Q = A * v \quad (14)$$

Q: caudal (metro cubico/segundo)

A: área de sección transversal de flujo (m²)

V: velocidad de flujo(m/s)

La ecuación de caudal resulta esencial para dimensionar correctamente la instalación del generador. Esta fórmula permite calcular el volumen de agua que pasará por la turbina en un tiempo determinado, lo que afecta directamente la cantidad de energía hidráulica disponible. El uso conjunto de estas ecuaciones es vital para optimizar el diseño y garantizar la eficiencia del micro generador eléctrico.

2.2.4 *Potencial eléctrico*

El potencial eléctrico es la cantidad de energía que puede generar a partir del potencial hidráulico que al mover las turbinas al estar conectado a un generador esta se convierte en electricidad, la energía que se genera depende de la altura de caída y caudal de agua que luego se convierte en potencial eléctrico. Dado esto, una forma de analizar la eficiencia del sistema es haciendo el cálculo teórico de la potencia eléctrica que se está transmitiendo lo cual se puede hacer con la fórmula de la ley de ohm que según (Calderon, 2016), se calcula con la fórmula 11. La potencia eléctrica es crucial para determinar cuánta de esa energía hidráulica puede ser transformada en electricidad útil. Esta ecuación toma en cuenta las pérdidas que se producen en el sistema, tanto mecánicas como eléctricas, lo que permite evaluar la eficiencia general del generador.

2.2.5 *Turbina Pelton*

La turbina Pelton (figura 3) es un dispositivo hidráulico diseñado específicamente para su operación en condiciones de alto desnivel con caudales de agua bajos, y son particularmente adecuadas para áreas montañosas. La turbina Pelton es un tipo de turbina de impulso que utiliza la energía potencial del agua almacenada en una altura predeterminada, esta energía se transporta a través de una tubería con una boquilla en el extremo, que convierte la energía potencial en un chorro de agua de alta velocidad, este chorro se utiliza para hacer girar el rotor de la turbina y así producir potencia hidráulica con ayuda de otras variables (Setyawan et al., 2024).

Una turbina Pelton tiene un dispositivo de corte rápido denominado deflector, que es una de las diferencias con la turbina Francis. El deflector está diseñado para proteger la unidad del exceso de velocidad. El deflector se abre completamente cuando el inyector se abre a un cierto valor en condiciones normales. El deflector puede abrirse a su posición máxima (es decir, el valor de uno) sin una relación combinada con la apertura del inyector, por lo tanto, el cierre de este no ocurrirá bajo pequeños cambios de carga. Cuando la velocidad de la unidad excede un cierto valor de ω_2 , el deflector se cierra rápidamente para reducir la descarga efectiva en la turbina Pelton y, como resultado, la potencia mecánica de la turbina se reduce rápidamente. Cuando la velocidad de la unidad se reduce a ω_1 , el deflector comienza a abrirse al valor de uno nuevamente, como también se toma en cuenta que el cambio de caudal de agua en la turbina produce un fenómeno conocido como golpe de ariete y provoca un cambio en la caída del agua.

Teniendo en cuenta la elasticidad entre el caudal de agua y la pared de la tubería, e ignorando la fricción entre ellos (Riascos & Cepeda, 2021). La turbina Pelton es una de las turbinas más conocidas de los ingenieros, son utilizadas para aquellas condiciones en la que se tiene una altura elevada (salto alto) y un caudal reducido, lo que la hace ideal para aplicaciones de pequeñas hidroeléctricas (Flores, 2010). La turbina Pelton es especialmente eficiente en escenarios donde se dispone de grandes caídas de agua, generalmente superiores a los 300 metros. Sus aplicaciones abarcan diversas áreas

- Plantas hidroeléctricas en zonas montañosas
- Sistemas de aprovechamiento de cascadas
- Proyectos de microhidroeléctricas
- Plantas hidroeléctricas de acumulación por bombeo
- Sistemas industriales

Entre las ventajas de la turbina Pelton se destacan su alta eficiencia en condiciones específicas, su simplicidad mecánica, que facilita el mantenimiento, y su flexibilidad operativa, que permite ajustar el caudal de agua sin comprometer su rendimiento.

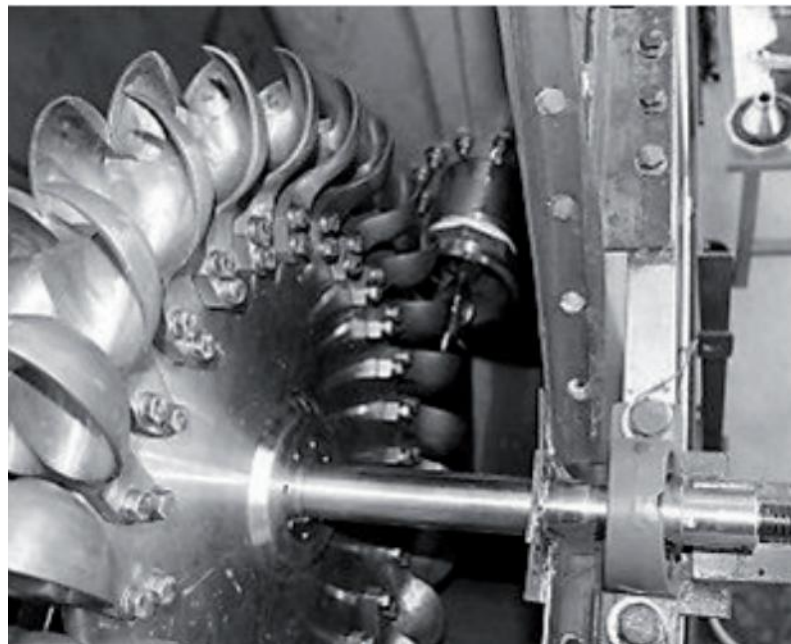


Figura 3. Turbina Pelton

2.2.6 Turbina Michell Banki

La implementación de turbinas hidráulicas, especialmente las de flujo cruzado tipo Michell-Banki, permiten suministrar energía eléctrica a las zonas no interconectadas a un bajo

costo de instalación y mantenimiento, mejorando la calidad de vida de comunidades. Esta turbina es utilizada en microcentrales, ya que presenta un desempeño eficiente ante variaciones de caudal y facilidad de fabricación. Una turbina Michell Banki (figura 4), también conocida como turbina de flujo cruzado es una máquina que aprovecha la energía cinética del fluido y la transforma en movimiento rotatorio que a su vez es transferido al eje de un generador eléctrico, donde se obtiene el fluido eléctrico necesario para el desarrollo de las actividades cotidianas de la comunidad (Ceballos et al., 2017).

La producción de energía inicia en la tobera, la cual transforma la presión energía en la entrada a energía cinética (chorro de agua). El chorro de agua entra al rodete y transfiere la energía en dos etapas. Primera, el chorro de agua fluye desde la parte exterior del rodete hacia el interior del mismo, esta es considerada como la primera etapa. Segunda, el chorro de agua que viaja desde el centro hacia el exterior es identificado como la segunda etapa, donde finalmente se descarga el agua. La primera etapa opera con un grado de reacción, debido a la presión ejercida por el agua sobre las palas del rodete. El chorro de agua de la primera etapa viaja a la segunda etapa a presión atmosférica, debido a la presencia de espacio abierto entre etapas, por lo tanto, la segunda etapa opera por principio de impulso puro. Teniendo en cuenta todo lo anterior la primera etapa aporta un total del 70% de la energía y en la segunda etapa se transfiere el 30% restante. La energía transferida depende de la carga de presión y la tensión de fricción en la superficie (Ceballos et al., 2017).

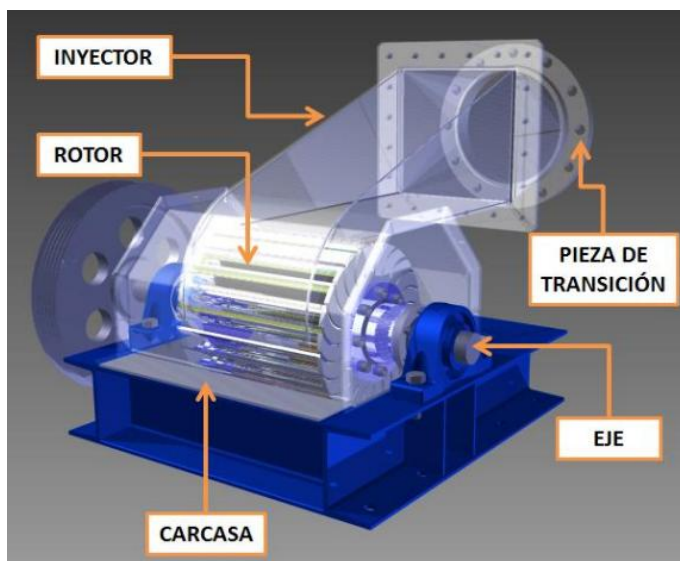


Figura 4. Turbina Michell Banki

La turbina Michell-Banki se encuentra compuesta principalmente por 4 elementos: rodete (o rotor), inyector o tobera, tubería de conducción y álabe director o directriz. El rodete es la parte de la turbina encargada de la transformación de energía cinética del fluido en energía mecánica rotacional. El rodete se encuentra compuesto principalmente por 2 discos paralelos los cuales se encuentran unidos entre sí por una serie de álabes curvados con forma de sector circular, generalmente con bordes afilados para lograr una reducción en la resistencia al flujo. En el caso de las turbinas de flujo cruzado, la velocidad específica puede cambiar variando únicamente el ancho de la turbina. Hothersall sugirió el uso de rodetes seccionados pues argumentó que pueden manejar las fluctuaciones de flujo de manera efectiva, y afirmó que el costo normalizado por kW en las turbinas de flujo cruzado con una potencia constante de 100 kW es mínimo cuando la cabeza está entre 30 y 40 m (Romero et al., 2020).

2.2.7 Variables de estudio

Para el análisis de los sistemas hídricos se definen variables que permiten describir su funcionamiento. Estas variables abarcan el estudio de los parámetros hidráulicos y eléctricos que intervienen en la transformación de la energía bajo distintas condiciones de operación. Se organizan tres tipos que son variables de entrada, de salida y variables calculadas.

Tabla 1. Variables de estudio

Variables de entrada		
Caudal (Q)	Cantidad de agua que circula por el sistema en un tiempo determinado. Se calcula mediante la ecuación 14	m ³ /s
Altura de caída (H)	Diferencia de nivel del agua que permite aprovechar su energía	Metros (m)
Variables de salida		
Voltaje	Diferencia de potencial eléctrico generada por el sistema	Voltio (V)

Corriente	Flujo de carga eléctrica suministrado por el generador	Amperio(A)
Potencia eléctrica	Energía eléctrica generada por unidad de tiempo, asociada al aprovechamiento del recurso hidráulico	Watts (W)
Variables calculadas		
Potencia hidráulica	Energía disponible en el flujo de agua, determinada mediante la ecuación 4	Watts (W)
Rendimiento	Relación entre la potencia eléctrica generada y la potencia hidráulica disponible, utilizada como indicador de eficiencia del sistema	Porcentaje (%)

3. Metodología

3.1 Secuencia metodológica

3.1.1 *Implementar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.*

La implementación del sistema de generación hidroeléctrica, se realizó mediante un proceso de cotización de componentes disponibles en el mercado, este proceso es clave para la selección de las bombas hidroeléctricas, turbinas, generador con y sin turbinas, el tanque de agua, sensores, y el microcontrolador, entre otros elementos, asegurando que cada uno cumpla con los requerimientos técnicos del proyecto y garantice la correcta integración del sistema. Esta etapa preliminar permite optimizar tanto el tiempo de implementación como la compatibilidad de los componentes que se utilizaron, asegurando una implementación eficiente y con menor riesgo de contratiempos.

Para la implementación del sistema de generación hidroeléctrica planteado, se estableció diversas etapas metodológicas para el ensamblaje. La primera sección corresponde a la inyección del caudal mediante una bomba hídrica, la cual impulsa el agua a través de una red de tuberías diseñadas para emular el comportamiento de un sistema hídrico natural, El flujo se suministra desde un tanque de almacenamiento ubicado a un nivel igual o superior a la bomba para garantizar un rendimiento óptimo del sistema, el cual debe tener un volumen acorde al caudal y tamaño del sistema para evitar la insuficiencia de líquido.

El siguiente paso es el acople de la bomba hidroeléctrica al generador trifásico seleccionado, de manera que el flujo de agua se eyecte directamente hacia la turbina y conformando un circuito cerrado el cual permitirá un flujo y retroalimentación del sistema. Cuenta con sensores calibrados distribuidos estratégicamente para el monitoreo de las principales variables hidráulicas y eléctricas, las variables eléctricas se registran mediante un módulo de medición conectado a la salida del generador, mientras que las variables hidráulicas se monitorean mediante sensores de caudal y presión instalados en puntos clave del sistema. Toda la información capturada es procesada por un microcontrolador, que centraliza los datos y los envía al sistema de monitoreo para su análisis.

Durante la instalación del sistema se tuvo en cuenta la verificación de las conexiones eléctricas e hidráulicas para evitar fugas, la veracidad y correcta calibración de los sensores, aislar correctamente ya que se maneja líquidos y metales para evitar cortos y daños en el sistema

eléctrico, la puesta a tierra y la estabilidad y limitación del flujo y presión realizando pruebas a cortos plazos cuando se encuentre a máxima eficiencia. Se verifica que la generación logre un nivel de voltaje estable al igual que el caudal de agua validando así el sistema para su correcta integración con la plataforma educativa de monitoreo en tiempo real.

3.1.2 Caracterizar el sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.

La caracterización del sistema de generación hidroeléctrico se inició como un proceso teórico-experimental con el propósito de definir, analizar y validar las condiciones de operación del sistema bajo un entorno de laboratorio. El proceso consta de establecer los rangos de funcionamiento permitidos del sistema en cuanto al generador, la bomba hídrica y los sensores adquiridos, considerando sus especificaciones técnicas y sus cálculos estimados, como también las limitaciones propias de la implementación experimental y así obtener un desempeño estable del sistema, evitando condiciones de operación que puedan comprometer la integridad de los componentes o la confiabilidad de las variables a modificar.

En primera estancia de tipo teórica se realiza una delimitación de los parámetros hidráulicos y eléctricos que influyen en el funcionamiento del sistema, se definen variables de entrada el caudal y como cambia la presión equivalente que la bomba hidráulica suministra de forma continua sin superar sus límites nominales, y cómo influye en las variables de salida que son las magnitudes eléctricas generadas por el microgenerador, principalmente el voltaje y la corriente, considerando los rangos seguros establecidos por el fabricante y de la ficha técnica de los sensores. Esta etapa permite establecer condiciones operativas de referencia, bajo las cuales el sistema puede ser evaluado de manera segura. El sistema contempla la identificación de intervalos de operación estables en los que las variables del sistema pueden mantenerse prácticamente constantes durante periodos de tiempo definidos. Estos intervalos constituyen la base para el diseño de las pruebas experimentales, ya que permiten anticipar el comportamiento esperado del sistema y definir criterios de operación para las mediciones experimentales.

Una vez definido las condiciones teóricas de funcionamiento, se procede a la caracterización experimental, la cual se realizó mediante la ejecución de pruebas controladas en el sistema implementado. Estas pruebas consisten en la variabilidad gradual y sistemática de las variables de entrada, tomando como variable principal el caudal suministrado por la bomba hídrica, manteniéndose dentro de los márgenes seguros previamente establecidos. La variación

de este parámetro permite entender el comportamiento del sistema ante diferentes condiciones de operación y prever su influencia sobre la presión hidráulica, así como sobre las magnitudes eléctricas generadas.

Durante las pruebas experimentales se verifica el comportamiento del sistema bajo variaciones controladas de las condiciones de operación, con el fin de establecer rangos de funcionamiento estables del conjunto hidráulico–eléctrico. Este procedimiento permite conocer los límites operativos máximos y mínimos prácticos del sistema, considerando únicamente condiciones que garanticen un desempeño continuo y repetible, también se somete el sistema de generación eléctrico a distintas condiciones de carga, con el objetivo de registrar la respuesta del generador frente a las variaciones en los parámetros hidráulicos de entrada respecto a las cargas inducidas. Con los datos obtenidos, se desarrollan procedimientos de cálculo y tratamiento estadístico orientados a organizar y estudiar los datos registrados con los parámetros teóricos definidos previamente, permitiendo así verificar la coherencia entre el comportamiento esperado y el comportamiento observado dentro de los límites de operación establecidos para cada componente del sistema.

El objetivo se estructura mediante un proceso repetitivo de verificación y ajuste de las condiciones operativas, en el cual los resultados se usan para definir rangos de operación confiables que estén dentro de las posibilidades de los componentes sistema, esto permite establecer condiciones de referencia para etapas posteriores del estudio ya que la información registrada se organiza de manera sistemática, asegurando la trazabilidad y consistencia de los resultados.

3.1.3 Integrar el sistema a una plataforma educativa que permita el monitoreo en tiempo real de las variables que influyen en el desempeño del microgenerador

El sistema se integra una plataforma educativa trabajada en un proyecto paralelo al planteado, la cual dispone de una base de datos la cual permite la adquisición, procesamiento y visualización de las variables hidráulicas y eléctricas que influyen en el desempeño del micro generador, manteniendo los datos actualizados exactos y en tiempo real del sistema, dando como resultado, un análisis exhaustivo que ayuda a demostrar su comportamiento dentro de las condiciones experimentales, promover el aprendizaje práctico en entornos académicos y evaluar el rendimiento del prototipo bajo diferentes condiciones de operación y realizando una validación de datos mediante instrumentos manuales y los enviados a la plataforma.

La conexión de los sistemas se da mediante la configuración del microcontrolador el cual es el encargado de recibir y procesar las señales provenientes de los sensores, realiza lecturas continuas de los valores medidos y aplica los procesos de instrumentación y conversión para obtener datos precisos y estables, los datos se transmiten mediante comunicación serial con la página mediante una conexión wifi u otras opciones de respaldo en el diseño electrónico. La plataforma educativa está configurada para presentar los valores instantáneos y generar sus respectivas graficas de comportamiento de los parámetros medidos, también ofrece la posibilidad de realizar sistemas que pueden mejorar la eficiencia con la creación de diseños online de diversos sistemas hídricos.

3.1.4 Analizar el comportamiento del sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia ante variaciones de los parámetros operacionales del sistema

En primera instancia, con el sistema experimental entra a una etapa de análisis de comportamiento del sistema, esto consiste en la evaluación del desempeño y trazabilidad del generador ante las variaciones de operación en los parámetros hidráulicos, eléctricos y cómo influyen en la eficiencia final. Se define cuáles serán los parámetros de entrada y salida del circuito, observando cómo influye en su comportamiento y mantener una estabilidad de potencia con instrumentos que compensen las pérdidas durante la conexión de cargas.

A partir de estas teorías el análisis se fundamenta en la observación de la respuesta del sistema ante variaciones controladas de las variables de entrada, particularmente aquellas asociadas al suministro de caudal. La información obtenida permite interpretar cómo las variaciones influyen en las variables internas del sistema, tales como la presión equivalente y las magnitudes eléctricas generadas, facilitando la identificación de condiciones de operación en las que el desempeño del sistema se mantiene estable y eficiente, el comportamiento del sistema eléctrico se interpreta a partir de la relación entre la energía hidráulica disponible y la potencia eléctrica obtenida, considerando el efecto de diferentes condiciones de carga sobre el generador y el sistema eléctrico. Esto permite establecer una referencia funcional del desempeño del generador, vinculando el aprovechamiento del potencial hidráulico con la respuesta eléctrica del sistema.

Los datos registrados se comparan con las expresiones teóricas que describen el funcionamiento ideal del sistema, mediante cálculos y graficas estadísticas. Esta comparación

permite la identificación de desviaciones entre el comportamiento teórico y el observado, aportando criterios para el reconocimiento de posibles pérdidas, limitaciones estructurales o efectos no ideales propios de la implementación, la información permite evaluar la pertinencia de realizar ajustes en la configuración del sistema con el fin de aproximar su desempeño real a las condiciones de referencia establecidas, dado que el sistema cuenta con un carácter adaptable de montaje, este método permite manejar un proceso iterativo de interpretación y ajuste, orientado a optimizar la eficiencia global y a definir rangos operativos confiables que sirvan de base para las mejoras del estudio.

3.2 Técnicas de recolección de información

La recolección de información del sistema de generación hidroeléctrico se fundamenta en la medición directa de las variables hidráulicas y eléctricas que determinan su rendimiento operativo. Para ello, se utilizan sensores distribuidos estratégicamente en el montaje experimental, los cuales transforman las magnitudes físicas en señales eléctricas procesables por el microcontrolador ESP32, encargado de centralizar el proceso de adquisición.

Cada sensor transmite su información en un tipo de señal específico, digital o analógica que permite registrar y correlacionar de forma continua el comportamiento hidráulico y eléctrico del sistema. El sensor de caudal FS300A genera una señal digital basada en pulsos proporcionales al flujo de agua impulsado por la bomba, lo que permite medir el caudal instantáneo. En contraste, variables como la presión hidráulica y la energía eléctrica se obtienen a partir de señales analógicas provenientes del transductor de presión y de los sensores encargados de monitorear el voltaje y la corriente.

En el caso del módulo INA219, la medición se realiza a partir de una señal ya digitalizada. Este dispositivo incorpora un convertidor analógico–digital interno y se comunica con el ESP32 mediante el protocolo I2C, permitiendo la transferencia directa de valores de voltaje, corriente y potencia. A través de este canal de comunicación, el microcontrolador accede a los registros internos del sensor y obtiene mediciones precisas sin necesidad de etapas externas de acondicionamiento.

Una vez capturadas, todas las señales son procesadas por el ESP32, que se encarga de organizar la información y transmitirla a la plataforma educativa RELAB. La comunicación se realiza utilizando el formato JSON, lo que facilita el almacenamiento estructurado, la

visualización en tiempo real y el análisis continuo del comportamiento del sistema. Este procedimiento garantiza la trazabilidad de las pruebas y permite monitorear de manera confiable las variaciones del sistema bajo diferentes condiciones operativas.

3.2.1 Validez de las técnicas de recolección de la información

La validez de las técnicas de recolección implementadas en el sistema se fundamenta en la adecuada selección de los sensores utilizados y en la verificación experimental de su desempeño bajo condiciones controladas. Los dispositivos empleados han sido ampliamente documentados en proyectos académicos y aplicaciones de ingeniería, lo que respalda su confiabilidad para la medición de variables críticas en sistemas de generación hidroeléctrica a pequeña escala.

Para el monitoreo de las variables eléctricas en corriente continua —correspondientes a la salida del generador después del proceso de rectificación— se utiliza el módulo INA219, un dispositivo que integra un amplificador de derivación y un convertidor analógico–digital de alta resolución. Este módulo permite medir con precisión el voltaje del bus DC y la corriente que atraviesa la carga, entregando valores digitalizados mediante el protocolo I²C. Su desempeño ha sido ampliamente validado en estudios orientados al análisis energético, sistemas embebidos y prototipos de monitoreo eléctrico, donde ha mostrado alta estabilidad, precisión adecuada y repetibilidad en condiciones de laboratorio (Lambert et al., 2021),(Prasetyawati et al., 2023).

En cuanto a la variable hidráulica, la medición del caudal se realiza mediante el sensor FS300A, el cual genera una señal digital en forma de pulsos proporcional al flujo de agua. Este tipo de sensor ha sido ampliamente utilizado en prototipos experimentales, demostrando un comportamiento estable en rangos de caudal bajos y medios, lo que lo convierte en una opción adecuada para sistemas microhidráulicos (Luque, 2024),(Moreira, 2024),(Santos & Carvalho, 2021).

Para la medición de presión en la tubería de conducción se emplea un transductor de presión analógico, cuya salida lineal permite obtener valores continuos y estables de la variable hidráulica. Este tipo de transductores es comúnmente utilizado en procesos industriales y laboratorios de ingeniería debido a su confiabilidad y facilidad de integración con microcontroladores mediante entradas analógicas (Phommachanh et al., 2006).

Las pruebas experimentales realizadas con valores de referencia conocidos confirmaron que los sensores presentan una desviación mínima respecto a los valores teóricos y una buena repetibilidad entre mediciones. Esto garantiza que las técnicas de recolección aplicadas son válidas y adecuadas para el análisis del comportamiento del sistema hidroeléctrico, proporcionando datos coherentes, estables y representativos de las condiciones reales de operación.

3.2.2 *Confiabilidad de las técnicas de recolección*

La confiabilidad de las técnicas de recolección implementadas en el sistema se sustenta en el proceso de verificación experimental y calibración previa de los sensores utilizados. Cada dispositivo fue sometido a pruebas individuales en condiciones controladas, comparando sus mediciones con valores de referencia obtenidos mediante instrumentos patrón del laboratorio. Este procedimiento permitió identificar posibles desviaciones, ajustar las curvas de calibración y garantizar que la respuesta de cada sensor se mantuviera dentro de márgenes aceptables de precisión.

Los estudios y metodologías de calibración documentados en trabajos previos —como los expuestos en (Lambert et al., 2021), (Luque, 2024), (Moreira, 2024), (Santos & Carvalho, 2021) y (Phommachanh et al., 2006) fueron tomados como base para establecer los protocolos utilizados. Dichas referencias sustentan la pertinencia de los procedimientos aplicados, reforzando la validez de las mediciones en sistemas de flujo, presión y variables eléctricas.

Una vez instalados en el montaje experimental, los sensores fueron sometidos a pruebas de operación continua para evaluar su estabilidad temporal, su susceptibilidad al ruido eléctrico y su comportamiento ante variaciones rápidas de las condiciones hidráulicas y eléctricas. Los resultados demostraron que los dispositivos presentan un nivel de deriva mínimo, con lecturas consistentes durante periodos prolongados y una adecuada inmunidad frente a interferencias externas, especialmente después de incorporar filtros y diseño de trazos específicos en la PCB.

El sistema, ya integrado, proporciona información en tiempo real que es procesada por el microcontrolador ESP32, lo que permite verificar la coherencia entre las señales adquiridas y el comportamiento esperado del microgenerador bajo diferentes escenarios de prueba. Esta capacidad de monitoreo inmediato favorece la detección temprana de anomalías, la repetibilidad

de los ensayos y la confiabilidad de los datos utilizados en el análisis técnico del sistema (Calderón & Sarmiento, 2025).

En conjunto, el proceso de calibración previa, la validación experimental y el comportamiento estable durante las pruebas garantizan que las técnicas de recolección empleadas ofrecen un nivel adecuado de confiabilidad para el estudio y caracterización del sistema hidroeléctrico.

3.3 Instrumentos de recolección de información

El sistema hidroeléctrico implementado requiere un conjunto de instrumentos capaces de convertir las variables hidráulicas y eléctricas en señales útiles para su análisis. Cada sensor cumple una función específica dentro del proceso de adquisición de datos, permitiendo caracterizar el comportamiento dinámico del microgenerador bajo diferentes condiciones operativas.

El sensor de caudal FS300A es el encargado de medir el flujo de agua que ingresa a la turbina. Este dispositivo emplea un rotor interno equipado con un imán permanente que gira en función del paso del agua. Dicho movimiento activa un detector de efecto Hall que genera una secuencia de pulsos eléctricos. La frecuencia de estos pulsos es proporcional al caudal, lo que permite que el ESP32 calcule el flujo instantáneo en litros por minuto mediante el conteo de pulsos y la aplicación de un factor de calibración previamente determinado. Este método proporciona una medición estable y confiable, incluso en condiciones de flujo variable.

El transductor de presión instalado en la tubería de conducción convierte la presión hidráulica en una señal eléctrica analógica. Su principio de funcionamiento se basa en la deformación de un diafragma metálico, cuya deformación se traduce en una variación de voltaje proporcional a la presión aplicada. Esta medición es fundamental para analizar el comportamiento hidráulico previo a la entrada de la turbina y evaluar la energía disponible, así como para identificar pérdidas de carga o alteraciones en la conducción.

Para la medición de las variables eléctricas, el sistema emplea el módulo INA219, un sensor capaz de registrar tanto voltaje como corriente en corriente continua (DC) después del proceso de rectificación del generador trifásico. El INA219 opera mediante la lectura de la caída de voltaje en una resistencia shunt interna, lo que le permite determinar la corriente que atraviesa el sistema. De manera simultánea, mide el voltaje del bus DC mediante un convertidor

analógico–digital integrado, entregando ambos valores ya digitalizados al microcontrolador ESP32 a través del protocolo de comunicación I²C. Este mecanismo evita la necesidad de etapas externas de acondicionamiento y ofrece una alta precisión en la medición de parámetros eléctricos críticos como voltaje, corriente y potencia.

En conjunto, estos instrumentos permiten registrar de forma simultánea las variables más relevantes del sistema —caudal, presión, voltaje DC y corriente DC—, proporcionando una perspectiva integral del comportamiento del microgenerador durante las pruebas experimentales. El procesamiento posterior de estas señales por el ESP32, junto con su transmisión continua a la plataforma RELAB, posibilita el seguimiento en tiempo real del rendimiento del sistema y la evaluación comparativa bajo diferentes escenarios de operación.

4. Resultados

4.1 Implementación del sistema de generación hidroeléctrico de baja potencia.

4.1.1 Diseño del esquema hidráulico

La selección de los componentes hidráulicos se realizó considerando su disponibilidad comercial, facilidad de integración y compatibilidad con las necesidades experimentales del proyecto. La bomba periférica, el contenedor principal y la red de tuberías construida en PVC fueron escogidos por su adecuado desempeño hidráulico, costo reducido y facilidad de montaje, factores relevantes en el desarrollo de prototipos académicos.

El sistema se diseñó bajo un esquema de circuito cerrado, donde el agua impulsada hacia la turbina regresa posteriormente al contenedor principal. Este enfoque garantiza un uso eficiente del recurso hídrico, mantiene condiciones estables de operación durante los ensayos y permite repetir las pruebas bajo parámetros comparables. La bomba periférica actúa como el elemento encargado de simular el flujo natural, mientras que el tanque de almacenamiento funciona como reservorio del sistema.

En la fase inicial se implementó un primer diseño utilizando un contenedor de 70 litros con conexiones hidráulicas de PVC de 1" de forma estándar en toda la configuración. Esta estructura permitió verificar la viabilidad del sistema, observar el comportamiento hidráulico general y establecer los primeros criterios de regulación del caudal. No obstante, se identificó que dicho volumen sobrepasaba las necesidades reales del proyecto y que una estructura más compacta facilitaría la manipulación, el control del flujo y la integración posterior con la instrumentación electrónica.

La Figura 5 muestra el diseño del sistema hidráulico en circuito cerrado destinado a pruebas experimentales, en el cual el caudal es generado por una bomba eléctrica en corriente alterna (AC) que simula las condiciones de flujo del sistema. El montaje incorpora dos válvulas de regulación que permiten controlar el caudal y ajustar las condiciones operativas durante los ensayos.

El sistema se divide en dos etapas principales: la etapa de potencia, ubicada en el lado izquierdo, asociada al proceso de generación eléctrica mediante la turbina, y la etapa de monitoreo, identificada en la tubería, donde se encuentran los sensores para la medición de variables físicas como presión y caudal.

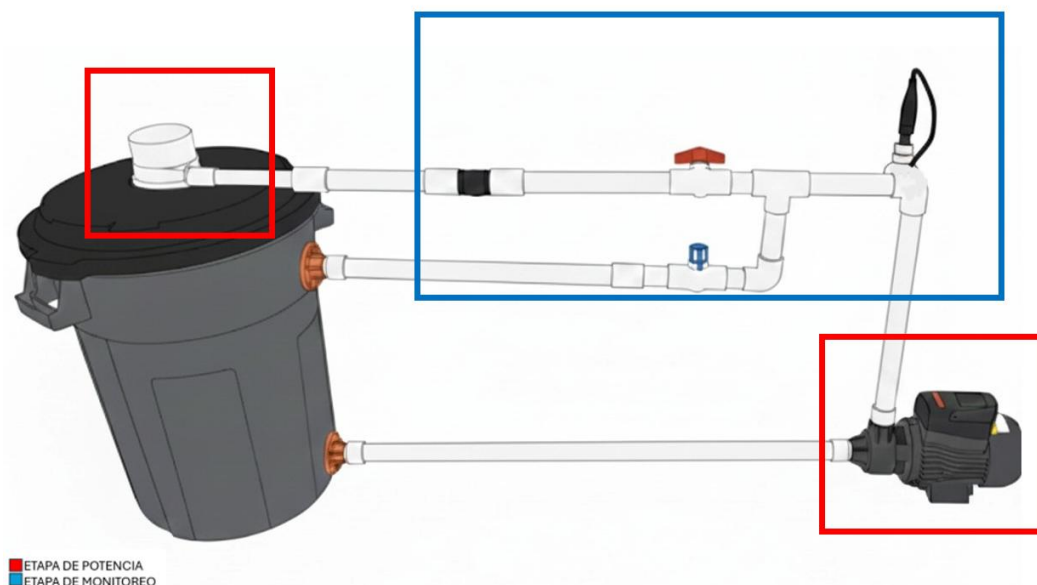


Figura 5. Diseño primer montaje

Con base en estos resultados se desarrolló un segundo diseño, de carácter compacto, que se adoptó como versión final del sistema. Este implementó un contenedor de menor capacidad, ubicado a una altura ligeramente superior a la bomba periférica para garantizar su inundación permanente y evitar la formación de cavitación (figura 6). Este cambio mejoró el desempeño hidráulico y redujo el espacio necesario para el montaje, permitiendo un control más preciso de las condiciones de prueba.

Una característica relevante de este segundo diseño fue la incorporación de una doble salida inmediatamente después de la bomba. A través de una derivación en forma de “T” se establecieron dos líneas independientes: una dirigida hacia el generador donde inicialmente se incorpora una “T” adicional usada como punto de presión, continuando con una reducción de tubería a $\frac{1}{2}$ ” para una mejor presión de golpeo en las cucharas y otra hacia el retorno directo al contenedor usando una tubería de $\frac{1}{2}$ ” sin dejar de lado la línea de llenado de la bomba que se usa tubería de 1” conforme a la conexión de la bomba. Las líneas de entrada al generador y contenedor fueron equipadas con una válvula de paso, permitiendo regular de manera individual el caudal enviado al sistema de generación y el caudal que retorna al tanque. Esta configuración brindó la posibilidad de ajustar el flujo disponible en la turbina sin necesidad de alterar físicamente la red de tuberías.

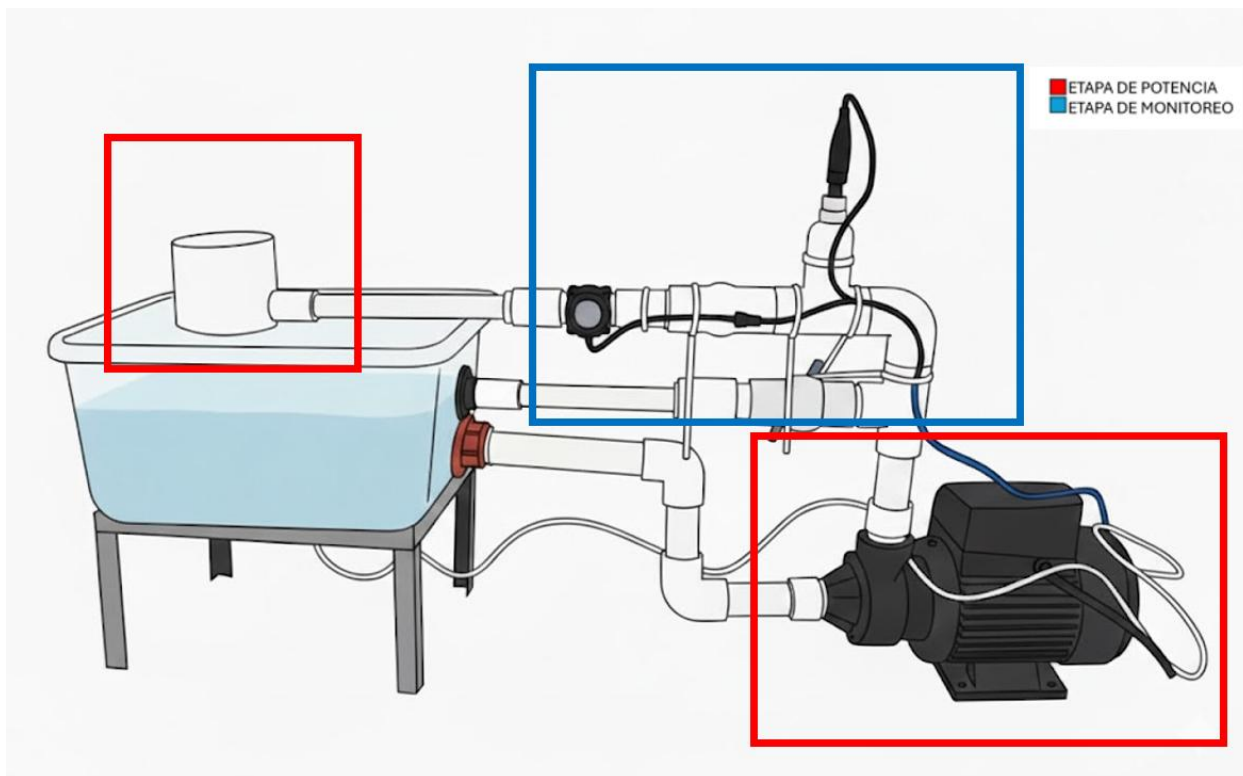


Figura 6. Diseño final del montaje

El diseño final del sistema permitió optimizar la circulación interna del agua, minimizar pérdidas por fricción mediante un trazado de tuberías con recorridos directos y reducir turbulencias al evitar cambios bruscos en la dirección del flujo. Asimismo, la distribución de los componentes facilitó la integración con la etapa electrónica y aseguró un funcionamiento estable durante los ensayos experimentales.

4.1.2 Construcción del sistema hídrico

La construcción del sistema hidráulico se desarrolló en dos configuraciones sucesivas que permitieron, primero, validar el comportamiento general del circuito y, posteriormente, optimizar su desempeño para las pruebas experimentales finales. En ambas configuraciones se empleó una bomba periférica marca TRUPER como elemento de impulsión principal, seleccionada por su capacidad para mantener un caudal estable, adecuado para accionar el generador hidroeléctrico de doble boquilla equipado con una turbina Pelton de 22 cucharas. De igual manera, en ambos diseños se incluyó una bifurcación en forma de “T” y dos válvulas de paso independientes, utilizadas para regular la distribución del caudal entre la línea que alimenta al generador y una

línea de descarga adicional, permitiendo ajustar manualmente las condiciones hidráulicas del sistema.



Figura 7. Montaje bomba-contenedor(70L)

El primer diseño se implementó utilizando un tanque cilíndrico de aproximadamente 70 litros (figura7), dispuesto como reservorio principal en un circuito cerrado. Desde la salida inferior del tanque se instaló una tubería horizontal de PVC de 1" con aproximadamente 85 cm de longitud, acoplada directamente a la entrada de la bomba, a la salida de la bomba se dispuso un tramo horizontal de 50 cm igualmente de 1", seguido de un codo de 90° que conducía a un segmento vertical de cerca de 25 cm donde incorpora el punto de presión. De este tramo se conecta a la "T" donde salen dos líneas que comprenden un segmento horizontal de 60 cm donde se ubicó el sensor de caudal con acoples de rosca. Después de este tramo se añadió otro segmento recto de 25 cm donde se reducía a ½" para la entrada del generador, por otro lado de la "T" se conectó a un codo de 90° que orientaba el flujo hacia una última tubería horizontal de 60 cm encargada de retornar el agua al tanque. Este diseño permitió el funcionamiento inicial del sistema y la validación de la interacción entre bomba, tuberías y generador; sin embargo, la longitud total del tendido incrementaba las pérdidas por fricción y dificultaba la obtención de un flujo estable en algunas condiciones de prueba (figura 8)



Figura 8. Primera versión del sistema hidroeléctrico

Con el fin de lograr un control más preciso del caudal, se desarrolló un segundo diseño, más compacto y adaptado a las necesidades experimentales. En esta configuración se empleó un contenedor rectangular de aproximadamente 12 litros, ubicado a una altura de 12cm superior a la bomba para garantizar la inundación inicial y evitar cavitación como se puede ver en la Figura 9. Para esto se incorporó tubería de 1" de 22 cm aproximadamente a la entrada de la bomba seguida de un codo de 90° con un tramo vertical de 10 cm aproximadamente junto a otro codo de 90° con un tramo final conectado al tramo final de 15 cm conectado al contenedor, esta estructura finalmente tiene una inclinación para que no se comprometa la entrada del generador.



Figura 9. Implementación de Versión final del sistema hidroeléctrico

En la Figura 10 la salida de la bomba se conectó a un tramo vertical de 20 cm de 1", seguido de un codo de 90° que enlazaba con el punto de presión para el acople del transductor de presión junto a un segmento recto de aproximadamente 20 cm. Este tramo se conectó mediante un reductor a una tubería horizontal de 20 cm de ½" para la entrada al generador, anteriormente en el tramo vertical de la salida de la bomba se instaló la bifurcación en "T" utilizada para dividir el caudal en dos líneas independientes.

Desde la "T" se configuraron dos ramales. El primero antes mencionado, destinado a alimentar el generador, el segundo ramal correspondía a la línea de descarga hacia el tanque y consistía en la válvula de regulación conectada a un tramo de 30 cm de ½" mediante un reductor, permitiendo desviar parte del caudal y controlar con precisión el flujo que ingresaba al generador.

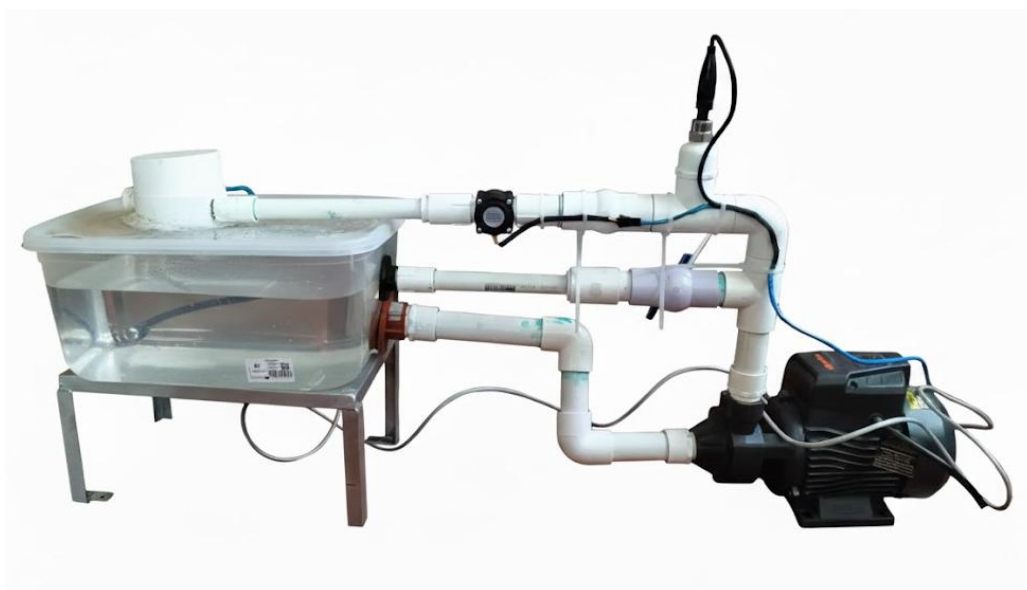


Figura 10. Versión final del sistema hidroeléctrico

Tanto el primer como el segundo diseño compartieron los mismos principios estructurales: la bomba periférica como impulsor principal, el generador de doble boquilla con turbina Pelton como elemento de conversión, la bifurcación en “T” para distribuir el caudal, y dos válvulas de paso para el control hidráulico. Sin embargo, el segundo diseño, debido a su menor longitud de tuberías, menor número de codos y disposición más compacta, permitió reducir pérdidas de carga y fricción al estabilizar el flujo y facilitar el control experimental, convirtiéndose así en la configuración empleada para las pruebas finales del sistema hidroeléctrico de baja potencia.

4.1.3 Construcción del sistema electrónico

La construcción del sistema electrónico se orientó al desarrollo de una unidad de adquisición y monitoreo confiable, capaz de registrar, procesar y almacenar en tiempo real las variables hidráulicas y eléctricas del sistema hidroeléctrico. Para este fin, se seleccionaron sensores y módulos electrónicos cuyos márgenes de operación superan los valores máximos generados por la bomba periférica y el generador trifásico, garantizando estabilidad, precisión y continuidad en las mediciones bajo las condiciones de trabajo del prototipo.

En una etapa inicial, el diseño del sistema eléctrico estuvo enfocado en la adquisición directa de variables en corriente alterna (AC), considerando la naturaleza de salida del generador

hidroeléctrico. Para ello, se emplearon sensores normalizados compatibles con este tipo de señal, específicamente el sensor ZMPT100B para la medición del voltaje y el sensor SCT-013-000 para la medición de la corriente. Esta instrumentación se complementó con la integración de un sensor de caudal y un transductor de presión, con el objetivo de caracterizar simultáneamente el comportamiento hidráulico y eléctrico del sistema.

No obstante, durante la evaluación de este esquema se identificaron limitaciones asociadas a la topología trifásica del generador. La utilización parcial de las fases disponibles, al emplear únicamente dos líneas para la medición y la conexión de cargas, restringía el aprovechamiento energético del sistema y limitaba la representatividad de la caracterización de su potencia nominal. Adicionalmente, la instrumentación en AC requería la implementación de múltiples etapas de acondicionamiento de señal, incluyendo circuitos de filtrado analógico y digital, lo que incrementaba la complejidad del diseño electrónico y la probabilidad de introducir errores o inestabilidades en las mediciones.

Con el fin de superar estas restricciones operativas y mejorar la confiabilidad del sistema de adquisición, se adoptó una modificación estructural en la arquitectura eléctrica incorporando un rectificador trifásico a la salida del generador, permitiendo la conversión de la energía eléctrica de corriente alterna a corriente directa (DC). La rectificación posibilitó la sustitución de los sensores de AC por dispositivos de medición en DC, lo que simplificó de manera significativa el acondicionamiento de señal y el procesamiento posterior de los datos.

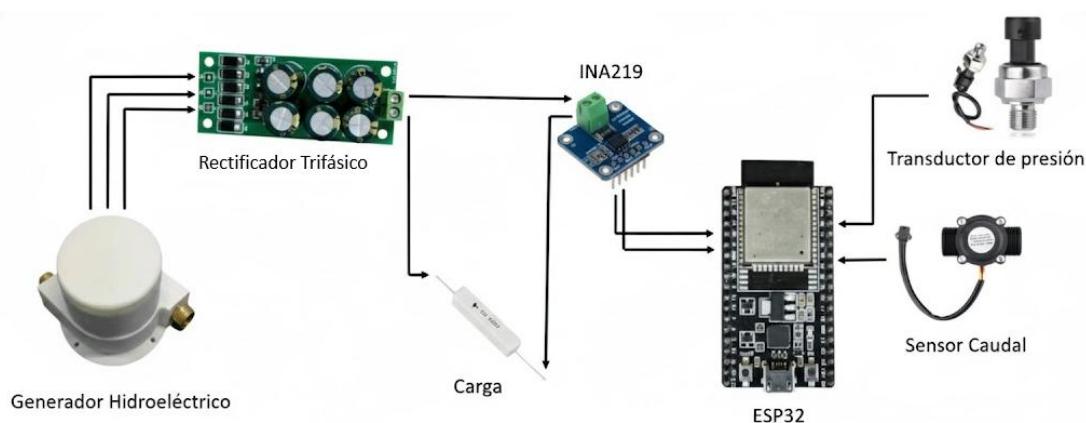


Figura 11. Esquema de conexiones

La Figura 11 corresponde al esquema de instrumentación y adquisición de datos implementado en el prototipo hidroeléctrico desarrollado en el trabajo. En ella se integran las

etapas de generación, acondicionamiento de señal, medición y procesamiento de variables eléctricas e hidráulicas.

En la Figura 12 se puede ver el microcontrolador ESP32 el cual se empleó como dispositivo central del sistema de medición debido a su capacidad de procesamiento, su convertidor analógico–digital (ADC) de 12 bits y su conectividad Wifi integrada. Este dispositivo se encargó de digitalizar las señales provenientes de los sensores, ejecutar los cálculos necesarios como la conversión de pulsos a caudal, la fórmula de linealidad del transductor de presión y las conversiones de unidades para estandarizarlos y finalmente transmitir los datos hacia la plataforma de monitoreo remoto.

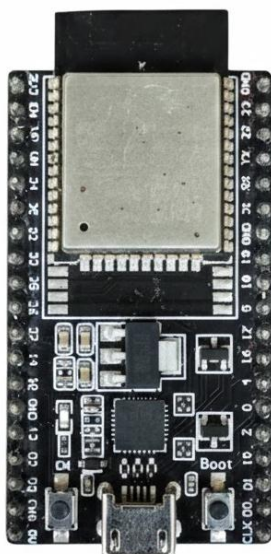


Figura 12.ESP32

Para el registro del caudal se utilizó el sensor FS300A, el cual genera pulsos digitales proporcionales al flujo mediante un rotor interno con efecto Hall. La medición de la presión del sistema se efectuó mediante un transductor de presión industrial, cuya salida analógica permite conocer la presión disponible en la línea de impulsión antes del ingreso del fluido a la turbina. Ambos sensores aportan información fundamental para caracterizar el comportamiento hidráulico del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

La Figura 13 y Figura 14 presentan los sensores hidráulicos instalados en el prototipo, integrados en la línea de conducción para la medición de variables fundamentales del sistema. La

instalación de ambos dispositivos en el prototipo permite la medición simultánea de presión y caudal, variables necesarias para la caracterización hidráulica del sistema y para la correlación con el desempeño eléctrico del generador



Figura 13. Transductor de presión instalado



Figura 14. Sensor de caudal FS300A instalado

La medición de las variables eléctricas en corriente continua se realizó mediante el módulo INA219, que determina voltaje y corriente a partir de un método de derivación interna y

entrega los datos digitalizados a través del protocolo I²C. Para asegurar la compatibilidad entre la salida del generador trifásico y el INA219 (Lambert et al., 2021), se incorporó un rectificador trifásico, encargado de convertir el voltaje alterno generado en una señal de corriente continua adecuada para la medición y para el uso de cargas resistivas disponibles en el laboratorio.



Figura 15. Rectificador trifásico instalado

En la Figura 15 se observa el rectificador trifásico instalado, encargado de convertir la señal de salida en corriente alterna trifásica proveniente del generador en corriente continua. El módulo incorpora un banco de capacitores para el filtrado y estabilización del voltaje rectificado, reduciendo el rizado y permitiendo una señal DC más estable para la alimentación de la carga y del sistema de medición



Figura 16. INA219 instalado

En la Figura 16 se muestra el sensor INA219, utilizado para la medición de corriente y tensión en el lado de corriente continua. Este dispositivo se encuentra conectado en serie con la línea de carga, permitiendo obtener datos precisos de voltaje, corriente y potencia eléctrica generada

Con el fin de garantizar la trazabilidad de los datos, se integró un módulo de reloj en tiempo real (RTC), que permite registrar fecha y hora exacta de cada medición. Adicionalmente, se incorporó un módulo de memoria microSD, utilizado para almacenar localmente las variables cuando no se dispone de conexión a internet, evitando pérdidas de información durante las sesiones experimentales.

La supervisión local del sistema se llevó a cabo mediante una pantalla LCD 16x2 con interfaz I²C, que permitió visualizar en tiempo real los valores de caudal, presión, voltaje y corriente, facilitando la verificación del funcionamiento general durante las pruebas de campo y laboratorio.

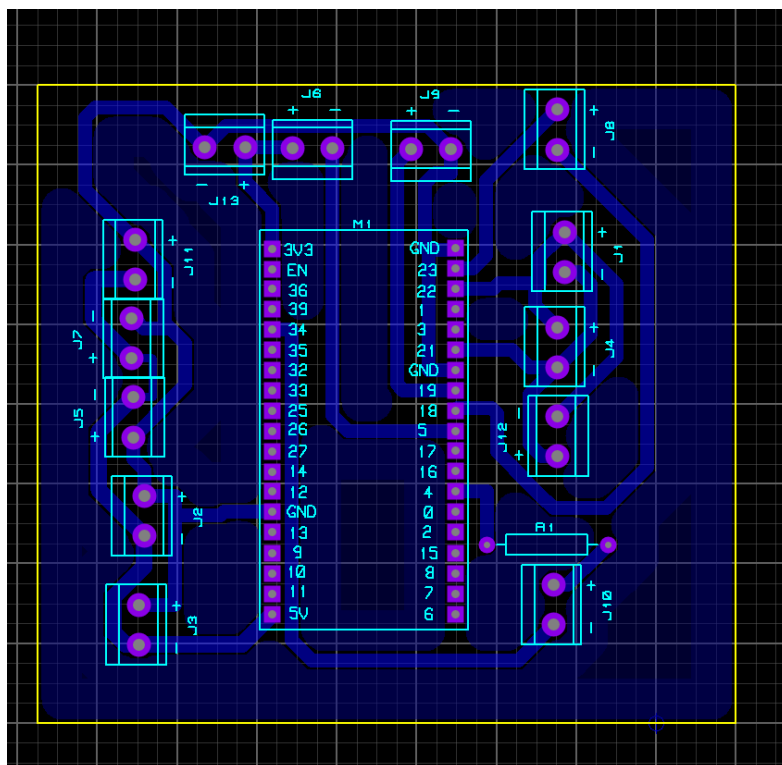


Figura 17. Diseño de tarjeta de monitoreo con conexiones

Todos los elementos electrónicos fueron integrados en una placa de circuito impreso (figura 17) diseñada para organizar eficientemente las conexiones y reducir interferencias. La PCB incorporó una resistencia de atenuación en la línea de adquisición de caudal para mitigar el ruido eléctrico asociado a la operación de la bomba y a las fluctuaciones del flujo, contribuyendo a la estabilidad de las mediciones.

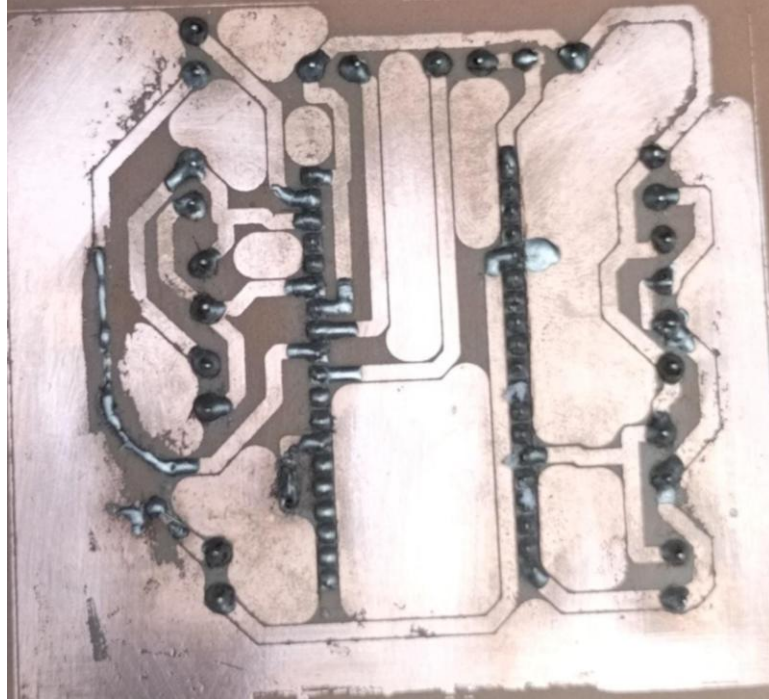


Figura 18. PCB de prueba

El sistema electrónico final constituye una plataforma de monitoreo integral (figura18) que permite operar de manera continua, registrar datos con precisión y ofrecer información clave para el análisis del desempeño del sistema hidroeléctrico implementado.

4.2 Caracterización del sistema de generación hidroeléctrico

4.2.1 Datos técnicos de los componentes

Primero se extraen las características que fueron necesarias para la implementación de cada uno de los componentes y se las agrupo en la Tabla 2

Tabla 2. Datos técnicos de los componentes

Componente	Modelo / Tipo	Especificaciones principales
Bomba hidráulica	Periférica	Caudal: 0 – 60 L/min Altura máxima: 40 m Potencia: 0,5HP Alimentación: 110/220 V
Generador hidroeléctrico	Generador hidroeléctrico de doble boquilla Trifásico de imanes permanentes	Potencia máxima: 100 W Voltaje máx.: 60 V Turbina tipo Pelton
Sensor de caudal	FS300A	Rango: 1 – 60 L/min Tensión de operación: 5 V DC Señal de salida: pulso digital
Sensor de voltaje	INA219	Rango: 1 – 25 V DC Tensión de operación: 5 V DC Comunicación I2C
Sensor de corriente	INA219	Rango: 0 – 3.2 A DC Tensión de operación: 5 V DC Comunicación I2C
Microcontrolador	ESP32	Procesador dual 240 MHz Conectividad WiFi/Bluetooth Entradas ADC 12 bits Alimentación: 3,3-5 V DC

4.2.2 Definición del sistema

El sistema de generación hidroeléctrica de baja potencia corresponde a un montaje experimental de laboratorio diseñado para caracterizar el comportamiento hidráulico y eléctrico de un microgenerador bajo condiciones controladas. El sistema opera en un circuito hidráulico cerrado, en el cual la energía mecánica suministrada por una bomba periférica es transformada en energía hidráulica y posteriormente convertida en energía eléctrica mediante una turbina Pelton acoplada a un generador trifásico de imanes permanentes.

Para garantizar un régimen de operación estable, el sistema incorpora un contenedor de almacenamiento como en la Figura 19 con una capacidad de 12 litros, ubicado a un nivel superior respecto a la bomba, lo que permite asegurar la inundación previa del circuito y un cebado adecuado antes del inicio de la operación. Una vez estabilizado el flujo, el sistema trabaja en condiciones cercanas a su régimen nominal, permitiendo evaluar la relación entre las variables hidráulicas de entrada y las magnitudes eléctricas generadas.



Figura 19. Contenedor plástico (12L)

El diseño considera una única boquilla de inyección de agua hacia la turbina, decisión que responde a la necesidad de reducir fenómenos de turbulencia, pérdidas por impacto desigual y variaciones abruptas de presión, asegurando así un comportamiento hidráulico más uniforme y repetible durante la caracterización.

4.2.3 Comportamiento hidráulico

El subsistema hidráulico está compuesto por una bomba periférica (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) encargada de suministrar el caudal y la presión necesarios para accionar la turbina. Durante la caracterización, la bomba operó en un rango de caudal cercano a 30 L/min, valor coherente con su comportamiento nominal y adecuado para aplicaciones de laboratorio. La configuración hidráulica incluye una línea de impulsión diseñada para dirigir el flujo hacia la turbina Pelton y una línea de retorno independiente que permite la recirculación continua del fluido hacia el contenedor de almacenamiento.



Figura 20. Bomba Periférica

La turbina Pelton constituye el elemento principal de conversión de energía hidráulica a energía mecánica. La cual está integrada con el generador hidroeléctrico como se muestra en la Figura 21 Su funcionamiento se basa en el impacto directo del chorro de agua sobre las cucharas del rotor, lo que permite transformar la energía cinética del fluido en movimiento rotacional. Bajo las condiciones de operación establecidas, la presión en la línea de impulsión se mantuvo dentro de un rango aproximado de 0 a 0.3 MPa, valor consistente con la longitud de las tuberías, la regulación del caudal y la capacidad de la bomba periférica.



Figura 21. Generador Hidroeléctrico

El comportamiento hidráulico del sistema se caracteriza por una respuesta progresiva ante variaciones de caudal y presión, lo que facilita la evaluación controlada del impacto de estas variables sobre la generación eléctrica.

4.2.4 Comportamiento eléctrico

El subsistema eléctrico está conformado por un generador trifásico de imanes permanentes con una potencia nominal de 100 W, acoplado mecánicamente al eje de la turbina Pelton. La energía eléctrica generada se obtiene inicialmente en forma de corriente alterna trifásica de baja magnitud, la cual es posteriormente rectificada para su monitoreo y análisis en corriente continua.

La adquisición y procesamiento de las variables eléctricas e hidráulicas es gestionada por un microcontrolador ESP32, encargado del muestreo, digitalización y tratamiento de las señales provenientes de los sensores instalados. El caudal es medido mediante un sensor FS300A (Figura 22), que entrega pulsos digitales proporcionales al flujo; la presión se registra a través de un transductor de 200 PSI con salida analógica; y las variables eléctricas de voltaje y corriente se obtienen mediante el módulo INA219, el cual comunica los datos en formato digital utilizando el protocolo I²C.

El caudal del fluido es medido mediante un sensor de flujo modelo FS300A (Figura 22), el cual opera mediante un principio de medición basado en efecto Hall. Internamente, el sensor incorpora un rotor que gira proporcionalmente a la velocidad del flujo del agua; este movimiento genera una serie de pulsos digitales cuya frecuencia es proporcional al caudal volumétrico que circula por la tubería. Dichos pulsos son leídos por el microcontrolador y posteriormente convertidos a unidades de flujo volumétrico (L/min), lo que permite cuantificar el caudal que alimenta el generador hidráulico durante las pruebas experimentales.



Figura 22. Sensor FS300A

El sensor de caudal FS300A, el principio de medición se basa en la generación de pulsos digitales producidos por un rotor interno dotado de un imán permanente y un sensor Hall. Cada giro del rotor produce un pulso, el cual es registrado por el ESP32 mediante interrupciones externas para garantizar que no se pierdan eventos incluso a altas velocidades de flujo. El caudal instantáneo se obtiene a partir de la relación entre el número de pulsos registrados y la constante de calibración del sensor, expresándose mediante la ecuación 19:

$$Q = \frac{K}{N} \quad (19)$$

Donde Q es el caudal en litros por minuto, N representa el número de pulsos contabilizados por segundo y K es el factor de calibración del sensor (aproximadamente 1.9). Para mejorar la estabilidad de la medición, el microcontrolador emplea filtros digitales que atenúan el efecto de vibraciones mecánicas o fluctuaciones instantáneas en el flujo.

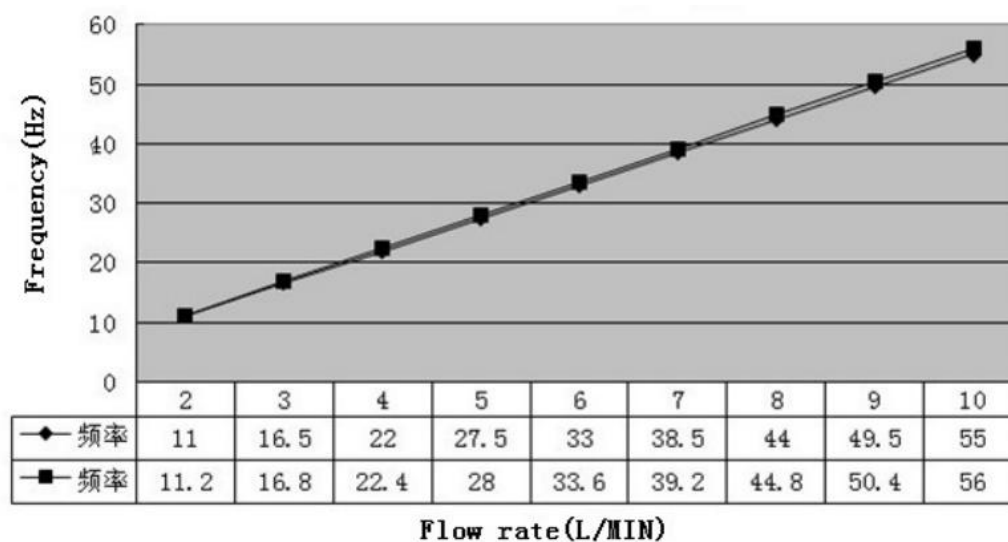


Figura 23. Grafica de frecuencia respecto a caudal (L/min-F)

Por otra parte, la presión del sistema es registrada mediante un transductor de presión analógico de 200 PSI (Figura 24), instalado directamente en la línea hidráulica. Este sensor convierte la presión ejercida por el fluido en una señal eléctrica analógica proporcional, generalmente dentro de un rango de voltaje compatible con la etapa de adquisición del sistema. La medición de presión resulta fundamental para estimar la altura hidráulica equivalente y la energía disponible en el flujo.



Figura 24. Sensor de presión analógico

El transductor de presión de 200 PSI proporciona una señal analógica en el intervalo de 0.5 a 4.5 V, proporcional a la presión aplicada sobre su diafragma interno. Esta señal se digitaliza mediante el convertidor analógico–digital del ESP32 de 12 bits, con lo cual se obtiene un valor numérico que posteriormente se transforma en presión mediante un proceso secuencial. El valor digital se convierte en voltaje real a través de la ecuación 20:

$$V_{out} = \frac{ADC}{4095} * V_{CC} \quad (20)$$

El procesamiento de la señal continua con una normalización respecto al rango útil del transductor con ayuda de la ecuación 21:

$$n = \frac{V_{out} - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (21)$$

Finalmente, calcula la presión real expresada en MPa mediante la ecuación 22:

$$P = n * P_{max} \quad (22)$$

donde $V_{CC} = 5 \text{ V}$, $V_{min} = 0.5 \text{ V}$, $V_{max} = 4.5 \text{ V}$ y $P_{max} = 1.6 \text{ MPa}$. Son los valores referencia dados por el fabricante correspondientes a voltaje de alimentación, voltaje de salida mínimo y máximo del sensor además la presión máxima que mide el sensor. Para tener lecturas estables, se aplican filtros digitales que disminuyen variaciones producidas por turbulencia hidráulica o pulsaciones mecánicas propias de la bomba hidráulica.

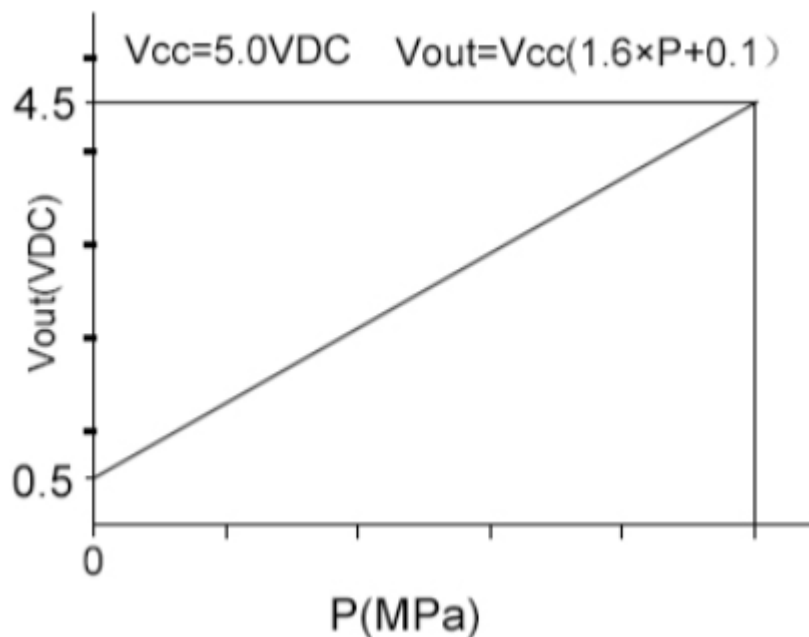


Figura 25. Gráfica de voltaje respecto a presión (PSI vs V)

Adicionalmente, las variables eléctricas de voltaje y corriente generadas por el sistema se obtienen mediante el módulo de medición INA219(Figura 26), el cual permite monitorear el comportamiento eléctrico en la etapa de carga. Este dispositivo integra un amplificador de detección de corriente y un convertidor analógico-digital, permitiendo medir simultáneamente el voltaje en la línea y la corriente que circula por la carga.

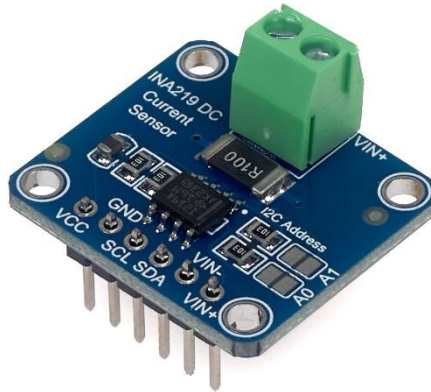


Figura 26. Modulo sensor INA219

El INA219 integra conversión analógica–digital interna y comunicación mediante protocolo I²C como se muestra en la Figura 27, proporcionando valores completamente digitalizados sin la degradación propia de señales analógicas externas. La corriente eléctrica se determinó a partir de la caída de tensión en una resistencia shunt interna mediante la ecuación 23:

$$I = \frac{V_{shunt}}{R_{shunt}} \quad (23)$$

El voltaje del bus DC es leído directamente desde los registros internos del INA219, mientras que la potencia eléctrica se obtiene mediante la ecuación 24:

$$P = V_{bus} * I \quad (24)$$

Este procedimiento permite monitorear el comportamiento del generador rectificado con alta precisión y estabilidad.

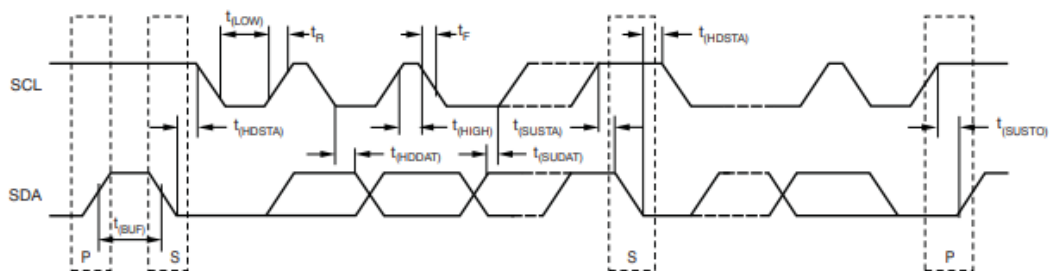


Figura 27. Comportamiento comunicación I2C del módulo INA219

Una vez adquiridas las señales de todos los sensores, el ESP32 ejecutó un conjunto de operaciones destinadas a procesar matemáticamente las variables medidas, transformar las magnitudes a unidades de ingeniería, compensar desviaciones, aplicar filtros y formatear los datos para su transmisión. Se utilizaron técnicas como la media móvil que permitió suavizar las variaciones rápidas y estabilizar la visualización en tiempo real definida por la ecuación 25:

$$\bar{x}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x(k-i) \quad (25)$$

Las mediciones procesadas se visualizan en tiempo real mediante una pantalla LCD de 16×2 y se transmiten a la plataforma educativa RELAB a través de una conexión Wifi, empleando estructuras de datos en formato JSON. Adicionalmente, el sistema cuenta con un respaldo local mediante almacenamiento en memoria microSD y un módulo de reloj en tiempo real (RTC), lo que permite registrar fecha y hora asociadas a cada muestra, garantizando la trazabilidad y continuidad de los datos ante eventuales interrupciones de conectividad.

Durante la caracterización, el voltaje rectificado se mantuvo dentro de un rango aproximado de 1 a 32 V DC, mientras que la corriente registrada fluctuó entre 0 y 0.14 A, en función de la carga conectada al generador. A partir de estas magnitudes, la potencia eléctrica obtenida se ubicó aproximadamente entre 1.5 y 3.6 W, valores coherentes con las pérdidas mecánicas, hidráulicas y eléctricas propias de un sistema de laboratorio de pequeña escala.

4.2.5 Funcionamiento ideal del sistema

El funcionamiento ideal del sistema de generación hidroeléctrica de baja potencia se define a partir de las características nominales de los componentes hidráulicos y eléctricos empleados, considerando un régimen de operación estable, sin pérdidas mecánicas, hidráulicas ni

eléctricas significativas. Bajo estas condiciones, el sistema se analiza a partir de la conversión progresiva de energía hidráulica en energía eléctrica.

La bomba periférica suministra un caudal constante de 30 L/min, el cual constituye la variable de entrada principal del sistema hidráulico. Para el análisis teórico, este caudal se convierte a unidades del Sistema Internacional de acuerdo con la ecuación 8:

$$Q = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 / \text{s}$$

La potencia hidráulica disponible en el sistema se determina mediante la ecuación fundamental de la energía hidráulica (4) anteriormente mencionada, despejando la altura hidráulica en la ecuación 26:

$$H = \frac{P_h}{\rho * g * Q} \quad (26)$$

Considerando que el generador hidroeléctrico posee una potencia máxima nominal de 100 W, y suponiendo condiciones ideales donde toda la potencia hidráulica se transforma en potencia mecánica útil, se obtiene la altura hidráulica teórica requerida para alcanzar dicha potencia:

$$H = \frac{100}{1000 * 9.81 * 5 \times 10^{-4}}$$

$$H = 20.4 \text{ m}$$

Este valor representa una altura hidráulica ideal equivalente, que en el prototipo no se obtiene por desnivel geométrico, sino mediante el incremento de presión generado por la bomba periférica y la restricción controlada del flujo, este valor despejado de altura incorpora el caudal ideal que se muestra en la relación entre presión hidráulica y altura que se expresan mediante las ecuaciones 27 y 28:

$$H = \frac{P}{\rho * g} \quad (27)$$

$$P = \rho * g * H \quad (28)$$

Sustituyendo el valor de altura calculado:

$$P = 1000 * 9.81 * 20.4$$

$$P = 0.20 \text{ MPa}$$

Este valor de presión se encuentra dentro del rango operativo del transductor de presión de 200 PSI (≈ 1.38 MPa), lo que confirma la compatibilidad del sistema de medición con el régimen ideal de operación.

Desde el punto de vista eléctrico, el generador trifásico de imanes permanentes transforma la energía mecánica en energía eléctrica. La potencia eléctrica ideal se define mediante la ecuación 6, bajo condiciones ideales y considerando una conversión eficiente, la potencia eléctrica generada tiende a aproximarse a la potencia hidráulica disponible. Por ejemplo, si el sistema entrega un voltaje rectificado de 25 V DC, la corriente asociada en condiciones ideales serían las de la ecuación 29:

$$I = \frac{Pe}{V} \quad (29)$$

$$I = \frac{100}{25}$$

$$I = 4A$$

Este resultado indica que, si el sistema entrega 100 W de potencia eléctrica con un voltaje de 25 V, la corriente necesaria para transportar esa potencia sería de 4 A, ya que la corriente representa la cantidad de carga eléctrica que circula por el circuito para mantener dicho nivel de potencia. Sin embargo, en el prototipo real, las corrientes medidas son considerablemente menores debido a pérdidas por fricción, pérdidas hidráulicas, eficiencia de la turbina Pelton, eficiencia del generador, rectificación trifásica y tipo de carga conectada. Por esta razón, el comportamiento real se mantiene dentro de rangos reducidos de potencia, coherentes con sistemas de laboratorio.

En condiciones ideales, el sistema operaría con una relación directa entre el caudal suministrado y la presión generada, lo que permitiría maximizar la energía cinética del chorro que impacta las cucharas de la turbina Pelton. A su vez, el aumento de la velocidad angular del rotor incrementaría el voltaje inducido en el generador, manteniendo una correspondencia directa entre las variables hidráulicas y eléctricas.

Este análisis ideal establece una referencia teórica clara del desempeño esperado del sistema, permitiendo comparar posteriormente los resultados experimentales reales y cuantificar las pérdidas inherentes al montaje físico del prototipo.

4.2.6 Validación mediante instrumentos externos

Para corroborar la fidelidad de los datos enviados a la plataforma, se llevó a cabo una comparación con lecturas obtenidas de los parámetros eléctricos mediante instrumentos manuales de referencia. Se verificó que las diferencias entre los valores locales y los reportados en RELAB se mantuvieron dentro de rangos aceptables para un sistema de prototipo.

La validación también permitió confirmar, así como la coherencia del sensor INA219 en la lectura del voltaje y corriente rectificadas inicialmente de AC.

Como se puede ver en la Figura 28 El sensor INA219 nos da un valor de voltaje idéntico a la medida real tomada con un multímetro digital UT33D+ teniendo un porcentaje de error cercano al 0% confirmando la coherencia de medida del modulo sensor.



Figura 28. Medida sensor

4.2.7 Pruebas ante variación de caudal

Las pruebas de variación de caudal se realizaron con el objetivo de analizar la respuesta hidráulica y eléctrica del sistema hidroeléctrico de baja potencia ante cambios controlados en el flujo suministrado por la bomba periférica. Estas pruebas permiten establecer relaciones directas entre el caudal, la presión desarrollada en la línea de impulsión y las magnitudes eléctricas

generadas por el conjunto turbina–generador, proporcionando una caracterización funcional del prototipo dentro de su rango operativo.

La variación del caudal se efectuó mediante la regulación progresiva de las válvulas de paso ubicadas en la línea de impulsión del sistema. Se definió como referencia un caudal máximo de 30 L/min, correspondiente al 100 % de operación del sistema bajo condiciones estables. A partir de este valor, se establecieron muestras del 10 %, ajustando manualmente las válvulas y permitiendo la estabilización del régimen hidráulico antes de registrar cada conjunto de datos. Para cada punto de operación se midieron simultáneamente el caudal, la presión, el voltaje y la corriente generados, garantizando coherencia entre las variables.

Los valores obtenidos se organizaron en la Tabla 3 que relaciona el porcentaje de apertura equivalente, el caudal en litros por minuto, la presión en mega pascales, la corriente en amperios y el voltaje en voltios. Esta tabla constituye la base para el análisis comparativo del comportamiento del sistema frente a la variación del parámetro hidráulico de entrada.

Tabla 3. Datos experimentales ante la variación de caudal

Porcentaje (%)	Caudal (L/min)	Presión (MPa)	Corriente (A)	Voltaje (V)
0	0	0	0.001	2.9
10	3.2	0	0.003	3.4
20	6.02	0.01	0.01	4.6
30	9.1	0.02	0.018	5.8
40	12.3	0.035	0.026	6.9
50	15	0.05	0.033	7.9
60	18.05	0.08	0.03	8.3
70	21.4	0.11	0.027	8.7
80	24.1	0.16	0.04	12.5
90	27	0.21	0.095	18.5
100	30.8	0.26	0.157	25.3

En la Tabla 3 se observa que, a bajo caudal de operación, el sistema presenta valores reducidos de presión y generación eléctrica. A medida que el caudal se incrementa, se evidencia un aumento progresivo de la presión en la línea de impulsión y un incremento en el voltaje y la corriente generados. Este comportamiento es consistente con la naturaleza del sistema, donde la energía hidráulica disponible depende directamente del caudal suministrado por la bomba.

La Figura 29. Presión vs Caudal muestra una relación no lineal creciente entre ambas variables. Para caudales bajos, la presión se mantiene cercana a cero debido a la baja restricción hidráulica y a la limitada energía impartida al fluido. Conforme el caudal aumenta, la presión se incrementa de manera más pronunciada, especialmente en el rango superior de operación, lo cual está asociado al aumento de pérdidas por fricción y a la mayor oposición hidráulica del sistema. Este comportamiento confirma que la presión desarrollada es función directa del régimen de operación de la bomba y del ajuste de las válvulas de control.

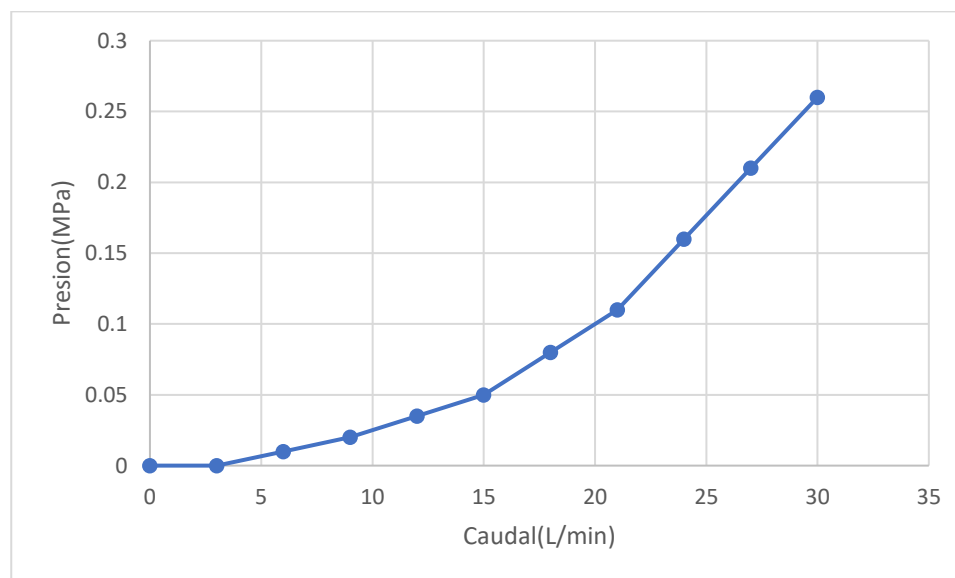


Figura 29. Presión vs Caudal

La Figura 30 evidencia un incremento progresivo del voltaje generado a medida que aumenta el caudal. En los rangos bajos de caudal, el voltaje presenta valores reducidos debido a la baja velocidad de giro de la turbina Pelton. A partir de caudales intermedios, se observa una pendiente más pronunciada, indicando que el impacto del chorro de agua sobre las cucharas de la turbina alcanza un comportamiento más eficiente, incrementando la tensión inducida. Este comportamiento es coherente con el principio de funcionamiento del generador de imanes permanentes, donde el voltaje es proporcional a la velocidad de rotación.

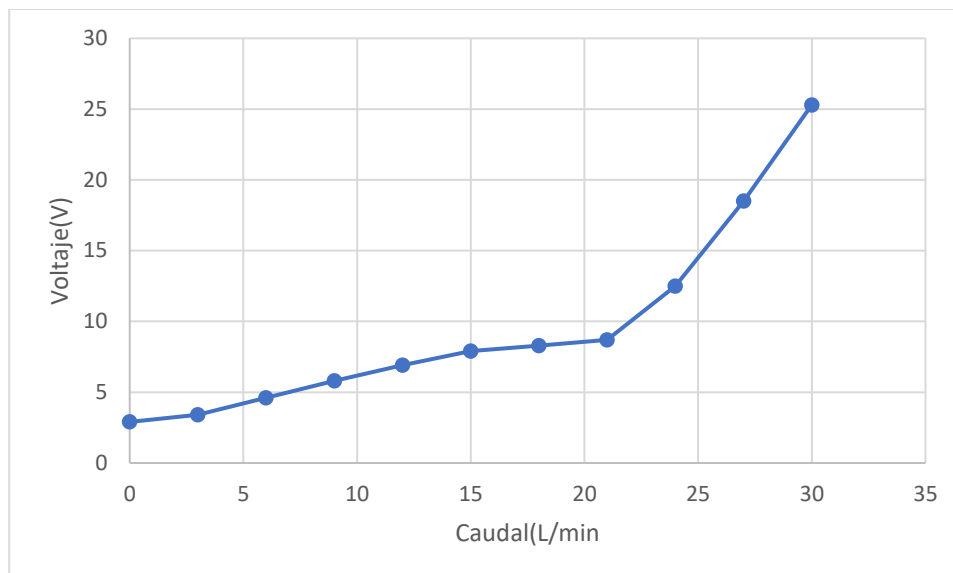


Figura 30. Voltaje vs Caudal

La Figura 31. Corriente vs Caudal muestra un comportamiento diferente al observado en el voltaje. En el rango de caudales bajos, la corriente aumenta desde 0 hasta aproximadamente 0.04 A, valores que corresponden a niveles de corriente bajos, presentando además ligeras variaciones en este intervalo. Este comportamiento se evidencia principalmente en condiciones de bajo caudal, por el contrario, al incrementar el caudal, especialmente por encima de 20 L/min, se observa un aumento más notable de la corriente. Esta tendencia se explica por la dependencia de la corriente con la carga conectada y con la potencia eléctrica disponible. En caudales bajos e intermedios, aunque el voltaje aumenta, la potencia hidráulica aún es limitada, lo que restringe la capacidad del sistema para suministrar corriente. En el rango cercano al caudal máximo, el aumento simultáneo de presión y velocidad de la turbina permite una mayor transferencia de energía eléctrica, reflejándose en un incremento notable de la corriente.

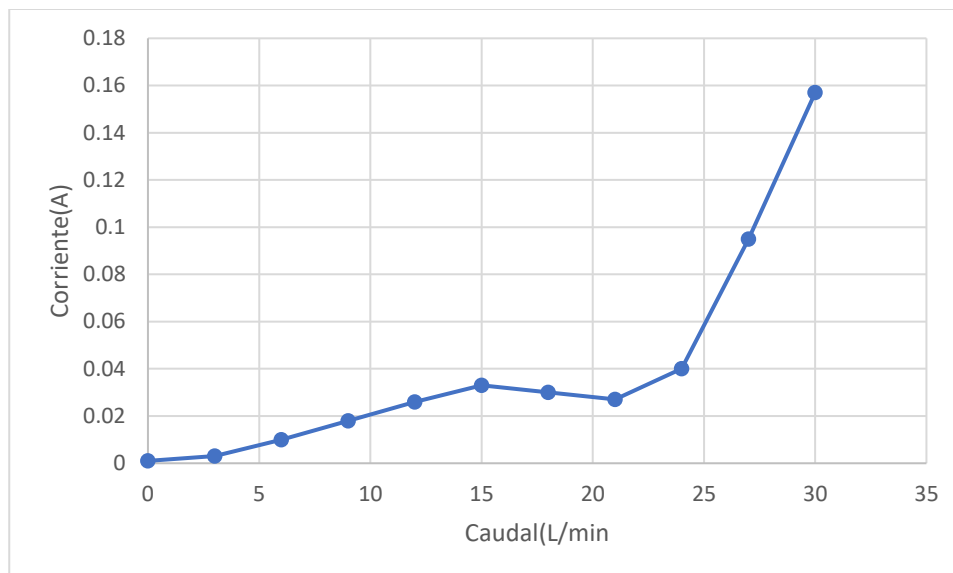


Figura 31. Corriente vs Caudal

La Figura 32 presenta la relación entre el caudal y la potencia eléctrica generada en el sistema hidroeléctrico. A partir del análisis previo de las variables voltaje, corriente y presión en función del caudal, se observa que para valores bajos de caudal la potencia generada es prácticamente nula, lo cual se debe a que la energía hidráulica disponible no es suficiente para generar un movimiento significativo en la turbina ni inducir un voltaje considerable en el generador. Conforme el caudal aumenta, se incrementan tanto la presión del sistema como la velocidad de rotación de la turbina, lo que produce un aumento progresivo del voltaje y la corriente generados. En consecuencia, la potencia eléctrica presenta un crecimiento gradual en un rango intermedio de operación. Sin embargo, a partir de aproximadamente 24 L/min se evidencia un incremento más pronunciado de la potencia, alcanzando un valor cercano a 3 W alrededor de 30 L/min, lo que indica una mayor eficiencia en la conversión de energía hidráulica a energía eléctrica.

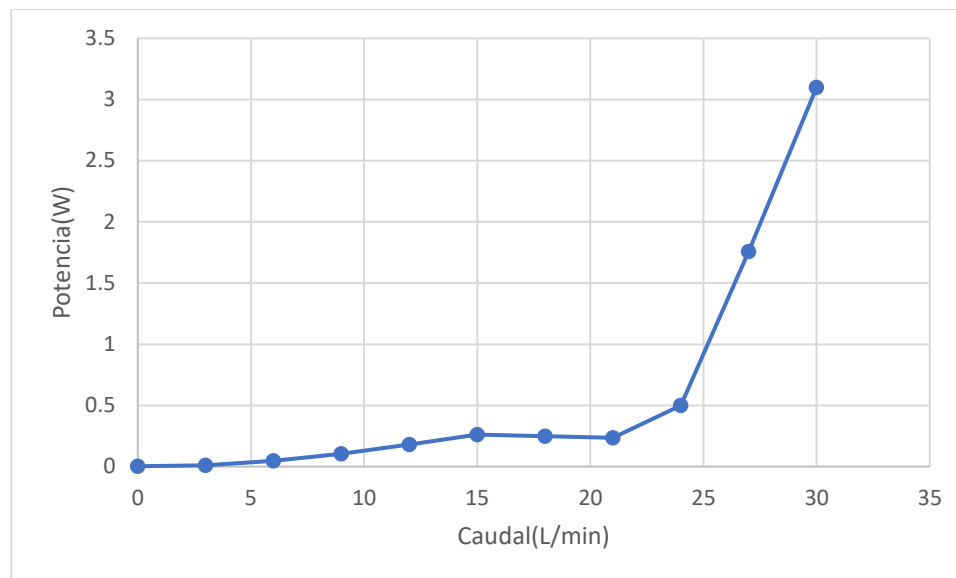


Figura 32. Potencia vs Caudal

4.2.8 Análisis bajo diferentes condiciones de carga

El análisis del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de carga resistiva se realizó con el propósito de evaluar la respuesta eléctrica del generador trifásico rectificado frente a variaciones controladas del régimen hidráulico. Para ello, se consideraron tres escenarios experimentales, tomando como referencia 12 V y 24 V, valores comúnmente utilizados en diversos dispositivos eléctricos, así como el voltaje máximo del sistema, aproximadamente 32 V. Estos voltajes corresponden a los valores entregados por el rectificador a la salida del generador en condición de circuito abierto, es decir, sin conectar ninguna carga al sistema, y representan condiciones hidráulicas de baja, media y alta magnitud.

A partir de estas condiciones, se conectaron diferentes cargas resistivas con el fin de evaluar la variación del voltaje de salida para cada uno de los niveles de referencia. La Figura 33 muestra la relación entre el voltaje obtenido y los valores de carga aplicados al sistema en los tres escenarios experimentales.

Los resultados indican que, a medida que aumenta la resistencia de carga, el voltaje tiende a incrementarse debido a la disminución de la corriente demandada y a la reducción de las caídas de tensión internas. Asimismo, el escenario de 32 V presenta los valores de voltaje más altos en todo el rango de cargas evaluado, seguido por los casos de 24 V y 12 V, lo cual es consistente con las diferentes condiciones de operación del sistema. Este análisis permite caracterizar el comportamiento eléctrico del generador rectificado frente a variaciones de carga.

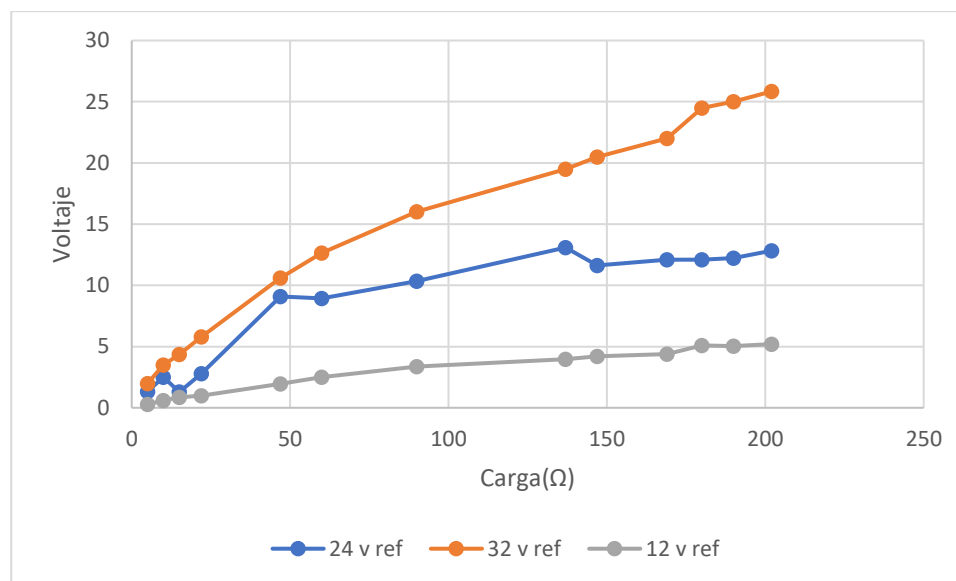


Figura 33. Voltaje vs Cargas

En la Figura 34 correspondiente a condiciones hidráulicas elevadas y un voltaje rectificado cercano a 32 V, se obtuvo el mejor desempeño eléctrico del sistema. El incremento progresivo del valor resistivo produjo aumentos proporcionales en el voltaje medido, alcanzando valores superiores a 25 V para resistencias próximas a 200 Ω. La corriente se mantuvo alrededor de 0,1 A y permitió obtener potencias ligeramente superiores a 3 W. Estas condiciones reflejan un régimen hidráulico estable, con caudales cercanos al límite operativo del sistema y una presión suficiente para mantener una velocidad angular elevada en la turbina Pelton, aunque el generador permite 100W de potencia no es posible llegar a estos por las limitaciones en el caudal, presión suministrada por la bomba y la estabilidad de la tubería en estas condiciones.

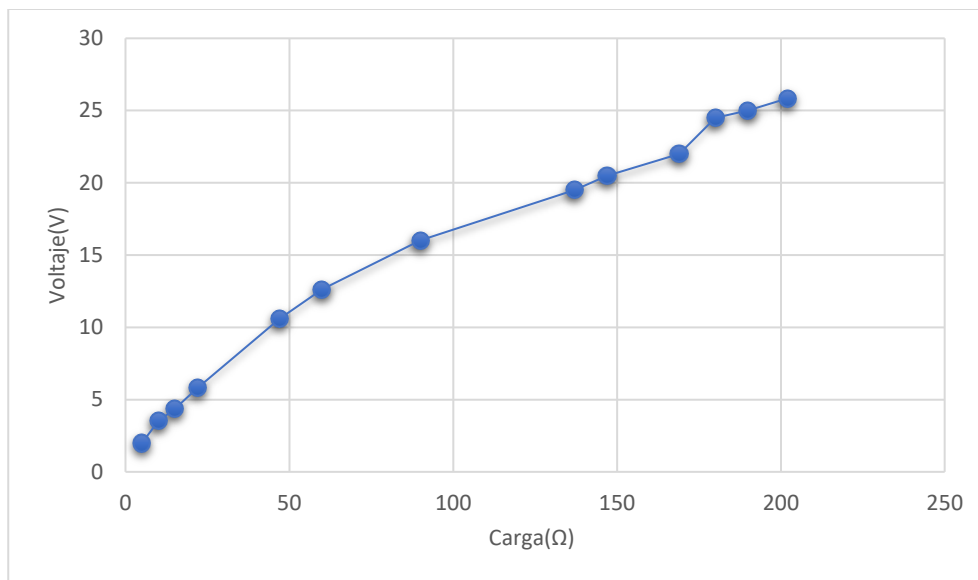


Figura 34. Voltaje vs Carga con 32v de referencia

En la Figura 35 el voltaje rectificado se ubicó alrededor de 24 V, el comportamiento eléctrico fue menos significativo. El voltaje se incrementó desde 1,3 V hasta valores cercanos a 14 V para las diferentes cargas aplicadas, con corrientes del orden de 0,1 A y potencias promedio cercanas a 1 W. Este comportamiento se correlaciona con condiciones hidráulicas moderadas, en las cuales la energía mecánica disponible para accionar la turbina es inferior a la del primer escenario, pero suficiente para mantener un proceso de conversión estable.

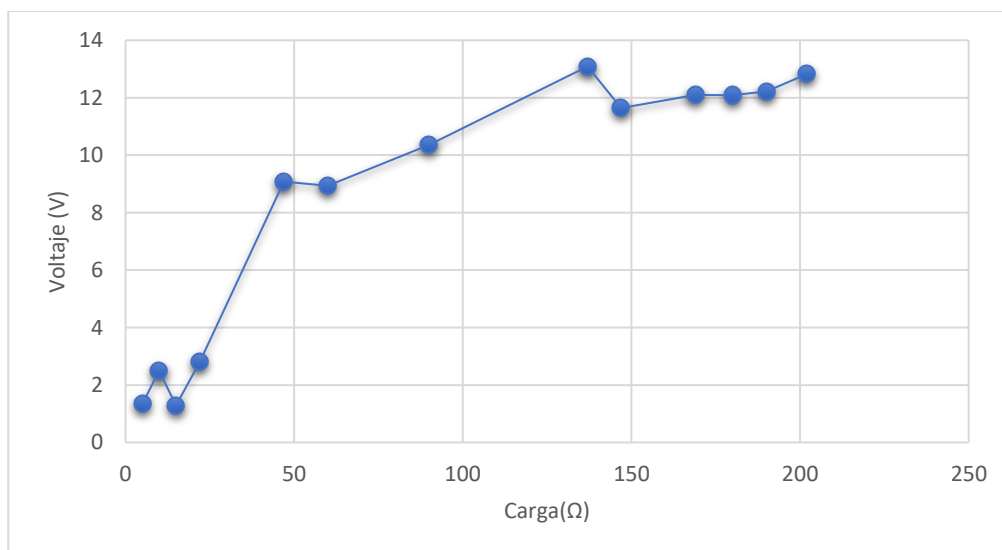


Figura 35. Voltaje vs Carga con 24v de referencia

La Figura 36, corresponde a condiciones hidráulicas reducidas y un voltaje rectificado aproximado de 12 V, presentó los valores más bajos de generación eléctrica. El voltaje aumentó únicamente hasta alrededor de 5 V y la corriente no superó los 0,05 A, por lo que la potencia se mantuvo por debajo de los 0,2 W. Estas condiciones están asociadas a caudales moderados y presiones mínimas, lo que limita significativamente la energía disponible para el accionamiento del generador.

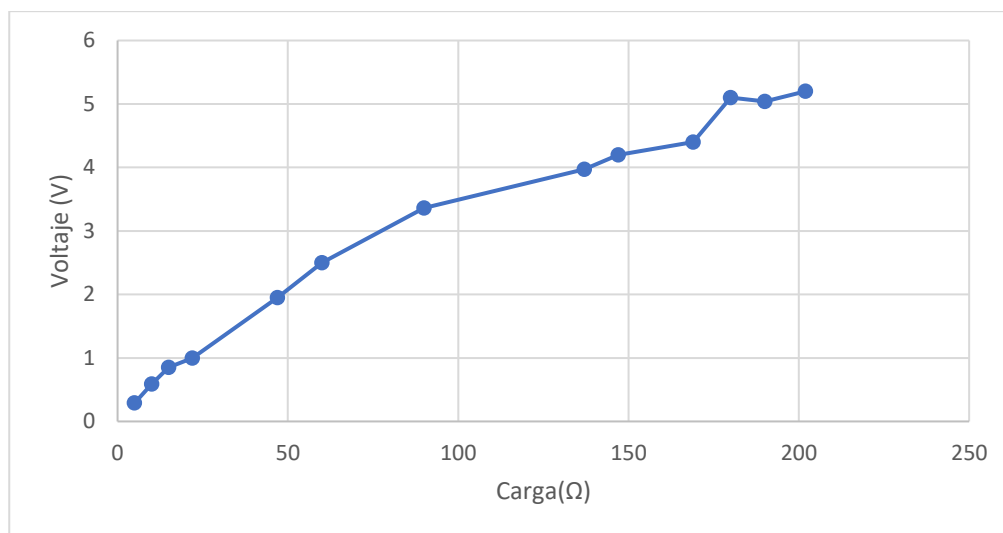


Figura 36. Voltaje vs Carga con 12v de referencia

A partir de los datos obtenidos se elaboró un cuadro comparativo reflejado en la Tabla 4 que permite identificar los niveles de desempeño alcanzados en cada escenario y determinar el punto en el cual el sistema presentó su mayor eficiencia eléctrica.

Tabla 4. Comparativa de generación en diferentes voltajes

Escenario	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
32 V	25–32	0.10	2.5–3.2
24 V	10–14	0.10	0.9–1.4
12 V	1–5	0.03–0.05	0.05–0.2

El análisis del cuadro comparativo y la Figura 37 indican que el sistema alcanzó su máxima potencia en el escenario de mayor aporte hidráulico, donde se usó 32 v de referencia, obteniéndose valores superiores a 3 W para cargas cercanas a 190–200 Ω. Este comportamiento

se debe a que, bajo un régimen hidráulico elevado, la turbina opera con mayor energía cinética disponible, lo que incrementa la velocidad angular del rotor y, en consecuencia, la tensión inducida en el generador.

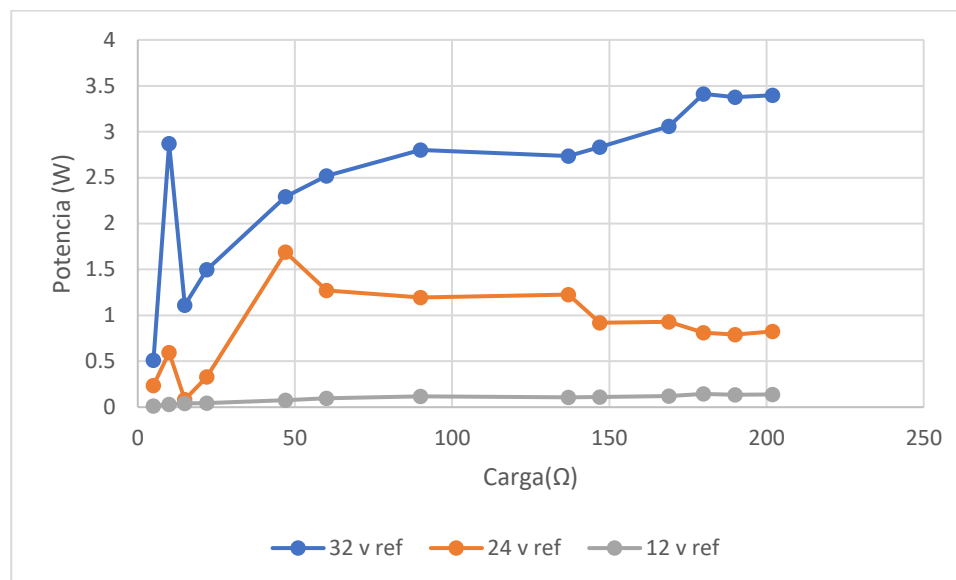


Figura 37. Potencia vs Carga con 32v, 24v y 12v de referencia

En conjunto, los resultados evidencian que el sistema presenta un comportamiento consistente con la naturaleza de los generadores de baja potencia accionados por turbinas hidráulicas. El desempeño energético depende directamente del aporte hidráulico disponible, siendo el escenario de mayor caudal y presión el que proporciona la mejor eficiencia eléctrica. Asimismo, la respuesta del generador frente a diferentes cargas resistivas confirma que el sistema es apto para caracterizar el comportamiento de conversión energética en montajes educativos y experimental.

4.3 Integración del sistema a la plataforma RELAB para el monitoreo de variables

4.3.1 Funcionamiento general

Durante esta fase el sistema de generación hidroeléctrica fue vinculado operativamente con la plataforma educativa RELAB, obteniéndose una transmisión continua y estructurada de datos correspondientes a las principales variables hidráulicas y eléctricas del prototipo. Esta integración permitió observar el comportamiento dinámico del sistema bajo diferentes condiciones de caudal y presión, garantizando un registro confiable y accesible para análisis posteriores.

La plataforma mostró los datos con una actualización periódica de cinco minutos, a partir del flujo continuo, enviado por el microcontrolador en tiempo real. Este mecanismo de presentación permitió disponer de mediciones recientes sin saturar el entorno digital, logrando un equilibrio entre precisión temporal y estabilidad del servidor.

La integración efectuada confirmó la capacidad del sistema para operar como un prototipo educativo con funcionalidades de telemetría, trazabilidad de pruebas e interpretación remota del comportamiento del microgenerador.

4.3.2 Adquisición y procesamiento de datos

La adquisición y procesamiento de datos del sistema se realizó a partir de las señales generadas por los sensores hidráulicos y eléctricos instalados en el prototipo, empleando el microcontrolador ESP32 como unidad central de medición. Este dispositivo se encargó de recibir las señales provenientes de los sensores, efectuar su digitalización, aplicar procesos de filtrado y normalización, y organizar la información para su posterior transmisión y análisis. Debido a que cada sensor opera bajo principios físicos diferentes y entrega su información en formatos de señal específicos, el tratamiento aplicado a los datos se adaptó a la naturaleza de cada variable medida.

Con el propósito de mejorar la estabilidad de las mediciones y reducir el efecto de fluctuaciones rápidas o ruido presente en las señales, se implementaron técnicas de filtrado digital basadas en promedios móviles, lo que permitió suavizar las variaciones instantáneas y obtener valores más representativos del comportamiento del sistema. Posteriormente, las variables procesadas fueron estructuradas en formato JSON, incorporando identificadores del sistema y marcas de tiempo generadas por el microcontrolador, lo que garantiza la coherencia temporal de los registros.

La transmisión de datos hacia la plataforma educativa RELAB se realizó mediante comunicación inalámbrica utilizando el módulo WiFi integrado en el ESP32, permitiendo el envío continuo y estructurado de las variables medidas para su almacenamiento en una base de datos remota y su posterior visualización en la interfaz de monitoreo.

Adicionalmente, el sistema incorpora un mecanismo de respaldo local mediante almacenamiento en memoria microSD, complementado con un módulo de reloj en tiempo real (RTC) que registra la marca temporal asociada a cada medición. Este mecanismo permite

preservar la información en caso de interrupciones en la conectividad, garantizando la continuidad de los registros y la trazabilidad de los datos experimentales.

La integración de estos procesos de adquisición, procesamiento y transmisión de datos permitió obtener registros consistentes del comportamiento del sistema, facilitando la generación de gráficas y análisis comparativos entre las variables de caudal, presión, voltaje, corriente y potencia, bajo diferentes condiciones de operación del prototipo.

4.3.3 Visualización y análisis en la plataforma

Una vez que las mediciones provenientes del sistema hidroeléctrico son recibidas por la plataforma educativa, los datos son almacenados en la base de datos y organizados temporalmente para su consulta. A partir de esta información, la plataforma genera visualizaciones que permiten interpretar el comportamiento hidráulico y eléctrico del sistema durante cada ensayo.

Los valores registrados de caudal, presión, voltaje y corriente se presentan de manera numérica y mediante gráficas actualizadas de forma periódica. Esta representación gráfica facilita la identificación de variaciones en las condiciones de operación, la relación entre variables y la evolución del sistema en el tiempo. Para cada parámetro se genera su curva correspondiente, lo que permite observar tendencias y realizar comparaciones entre diferentes intervalos de medición.

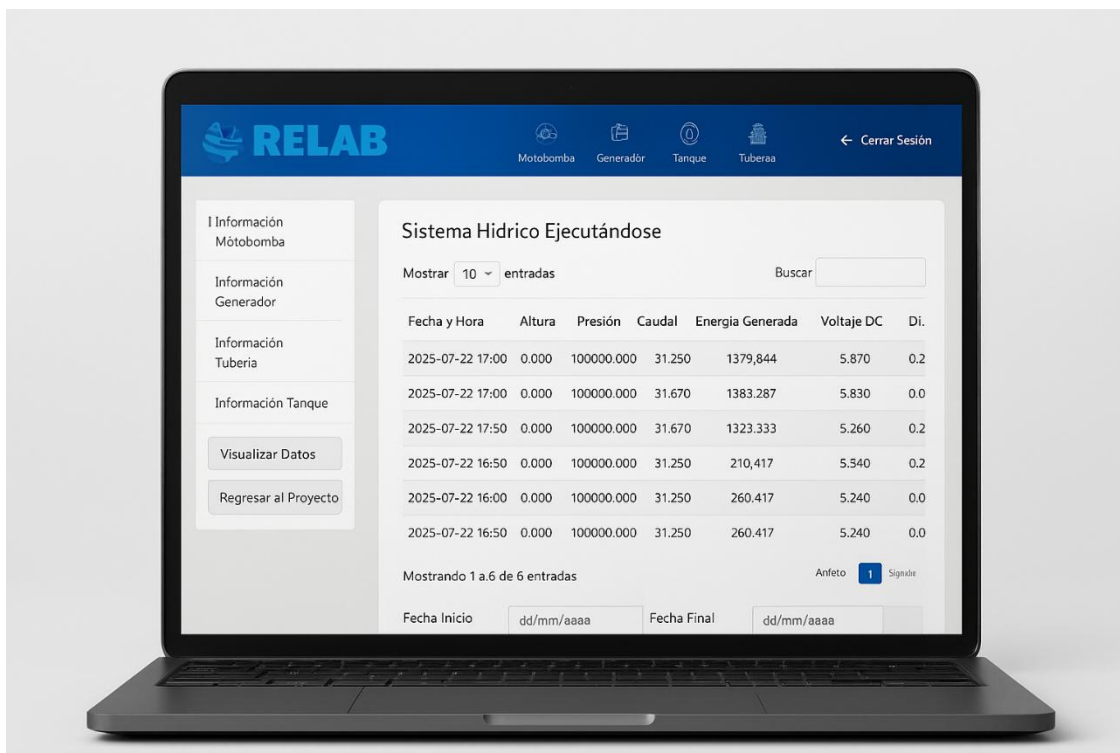


Figura 38. Visualización de datos en plataforma educativa

Además de la visualización directa de los datos, la plataforma calcula la potencia eléctrica instantánea generada por el microgenerador empleando la ecuación 4. Este cálculo se realiza automáticamente para cada conjunto de mediciones adquiridas, permitiendo analizar el desempeño del generador en función de las condiciones hidráulicas aplicadas. La potencia estimada se integra en la interfaz junto con las demás variables, facilitando el seguimiento del proceso de conversión energética durante la operación del sistema.

La interfaz presenta diferentes campos de monitoreo, correspondientes a las variables medidas por los sensores instalados en el prototipo. Entre estos se incluyen voltaje (V) y corriente (A), obtenidos mediante el sensor INA219, así como caudal (L/min) y presión (MPa) registrados por el sensor de flujo y el transductor de presión instalados en la línea hidráulica. A partir de estos valores, la plataforma calcula automáticamente la potencia eléctrica (W) generada por el sistema.

La adquisición de datos se realiza mediante el microcontrolador ESP32, el cual recibe la información de los sensores a través de interfaces analógicas y digitales, y posteriormente la transmite a la plataforma de monitoreo mediante conexión WiFi. El envío de datos desde el sistema se realiza de forma continua; sin embargo, la visualización y actualización en la

plataforma se efectúa cada cinco minutos, con el objetivo de mejorar la trazabilidad de las mediciones, optimizar la organización del registro de datos y reducir posibles fallos asociados a la transmisión o saturación de la red.

Adicionalmente, la plataforma conserva un historial de datos asociado a cada sesión de medición, lo que facilita la comparación entre diferentes pruebas, el análisis de la estabilidad del sistema y la evaluación de variaciones derivadas de cambios controlados en la operación, como ajustes en el caudal o modificaciones en la carga eléctrica. Este registro histórico constituye una herramienta importante para el análisis posterior y la validación experimental del comportamiento del prototipo.

Con el fin de verificar la consistencia del sistema de monitoreo, los valores registrados por la plataforma fueron comparados con las mediciones obtenidas directamente durante las pruebas experimentales, permitiendo evaluar la correspondencia entre los datos adquiridos por los sensores y las condiciones reales del sistema. Esta comparación permitió identificar pequeñas variaciones atribuibles a la resolución de los sensores, a las condiciones hidráulicas transitorias y a las tolerancias propias de los dispositivos de medición, manteniéndose en general dentro de rangos aceptables para la caracterización del prototipo.

Asimismo, se realizó una evaluación del sistema de adquisición en términos de posibles errores de transmisión, desconexiones y pérdida temporal de datos. Durante las pruebas se observaron eventos ocasionales asociados a interrupciones momentáneas en la comunicación Wifi; sin embargo, el sistema fue diseñado para mantener la continuidad de la información mediante el almacenamiento temporal de los registros y su posterior envío cuando la conexión se restablece.

En los casos en los que la transmisión de datos no puede realizarse en tiempo real, los registros almacenados localmente pueden ser incorporados posteriormente, garantizando la continuidad del conjunto de información disponible para el análisis. Con ello, la plataforma mantiene una trazabilidad completa del comportamiento del sistema, favoreciendo el estudio de su desempeño en diferentes condiciones de operación y permitiendo validar experimentalmente el funcionamiento del prototipo.

5. Análisis del Resultados

5.1 Análisis pruebas de variación de caudal

Las pruebas de variación de caudal se realizaron mediante la regulación progresiva de las válvulas instaladas en la línea de impulsión del sistema hidráulico, permitiendo modificar el porcentaje de caudal suministrado por la bomba periférica desde condiciones cercanas a caudal nulo hasta el valor máximo aproximado de 30 L/min. A partir de esta metodología se registraron las variables hidráulicas y eléctricas correspondientes, las cuales fueron consolidadas en la tabla de resultados y representadas mediante las gráficas Caudal vs Presión, Caudal vs Voltaje, Caudal vs Corriente y Caudal vs Potencia

El comportamiento observado en la Figura 29. Presión vs Caudal evidencia una relación creciente y no lineal entre ambas variables. Para caudales bajos, inferiores a aproximadamente 6 L/min, la presión registrada se mantiene cercana a cero, lo que indica que la energía hidráulica disponible no es suficiente para generar una columna de presión significativa en la línea de impulsión. A medida que el caudal aumenta, la presión se incrementa de forma progresiva, alcanzando valores cercanos a 0.26 MPa cuando el sistema opera alrededor de 30 L/min. Este comportamiento es coherente con el principio hidráulico de que la presión desarrollada por la bomba está directamente relacionada con la restricción del flujo y las pérdidas por fricción presentes en el sistema.

En la Figura 30. Voltaje vs Caudal se observa un incremento gradual del voltaje generado conforme aumenta el caudal suministrado a la turbina Pelton. Para caudales reducidos, el voltaje se mantiene por debajo de 5 V, reflejando una velocidad de giro insuficiente del rotor del generador. A partir de caudales intermedios, entre 15 y 21 L/min, el voltaje aumenta de manera más estable, situándose entre 7 y 9 V. Finalmente, al operar cerca del caudal máximo del sistema, se presenta un incremento significativo del voltaje, alcanzando valores superiores a 25 V. Este comportamiento indica que el impacto hidráulico sobre las cucharas de la turbina aumenta de forma considerable en este rango, incrementando la velocidad angular del generador.

La Figura 31. Corriente vs Caudal muestra un comportamiento distinto al del voltaje. Para caudales bajos y medios, la corriente se mantiene en valores reducidos, inferiores a 0.04 A, lo que evidencia que, aun cuando existe generación de voltaje, la capacidad de entrega de corriente está limitada por la potencia hidráulica disponible. Sin embargo, al acercarse al caudal

máximo, la corriente presenta un incremento abrupto, alcanzando valores cercanos a 0.16 A. Este fenómeno se asocia al aumento simultáneo del voltaje y a una mayor capacidad del sistema para alimentar cargas conectadas, lo que confirma que el régimen hidráulico cercano al caudal máximo es el más favorable para la generación eléctrica.

En conjunto, las gráficas de variación de caudal permiten identificar que el sistema presenta un comportamiento estable y predecible, con una respuesta hidráulica y eléctrica coherente con el diseño del prototipo y las características de la bomba y la turbina empleadas.

5.2 Análisis de las pruebas bajo diferentes condiciones de carga

Las pruebas de carga se realizaron conectando resistencias de distintos valores a la salida rectificadora del generador, manteniendo condiciones hidráulicas similares y evaluando el comportamiento eléctrico del sistema para tres escenarios de referencia de voltaje: aproximadamente 12 V, 24 V y 32 V. A partir de estos ensayos se obtuvieron las gráficas Voltaje vs Carga, Corriente vs Carga y Potencia vs Carga, las cuales permiten analizar el desempeño energético del sistema.

En la Figura 33. Voltaje vs Cargas se observa una tendencia general al incremento del voltaje conforme aumenta el valor de la resistencia conectada. Para cargas bajas, el voltaje se reduce significativamente debido a la mayor demanda de corriente impuesta por la carga, lo que provoca una caída de tensión asociada a las limitaciones de potencia del generador y a las pérdidas internas del sistema. A medida que la carga aumenta, la corriente demandada disminuye y el voltaje tiende a estabilizarse, acercándose al valor de referencia correspondiente a cada escenario.

El comportamiento de la corriente en función de la carga muestra una relación inversa clara. Para resistencias bajas, la corriente alcanza valores más elevados, mientras que al incrementar la carga resistiva la corriente disminuye de forma progresiva. Este comportamiento es consistente con la ley de Ohm y confirma que el sistema responde de manera adecuada a las variaciones de carga impuestas.

La Figura 36 resulta fundamental para la identificación del punto de operación óptimo del sistema. En el escenario de mayor voltaje de referencia, cercano a 32 V, se observa que la potencia generada alcanza su valor máximo para cargas intermedias, aproximadamente entre 90 Ω y 150 Ω , donde se registran potencias aproximadamente de 3.3 a 3.5 W. Para cargas menores,

la potencia se ve limitada por la caída de voltaje, mientras que para cargas mayores la reducción de corriente provoca una disminución progresiva de la potencia entregada.

En los escenarios de 24 V y 12 V de referencia, la potencia máxima alcanzada es considerablemente menor, situándose alrededor de 1.2 W y 0.15 W respectivamente. Esto evidencia que, bajo las condiciones hidráulicas del sistema, el generador alcanza su mejor desempeño energético cuando opera a mayores niveles de tensión, siempre que la carga conectada permita un equilibrio adecuado entre voltaje y corriente.

5.3 Comparativa de potencias teórica y experimental

A partir de los datos experimentales obtenidos, se observa que la potencia hidráulica teórica se mantiene en un rango aproximado entre 115 W y 126 W, lo cual es consistente con la baja variación de los valores de caudal y presión registrados durante las pruebas. En contraste, la potencia eléctrica generada presenta una variación significativa en función de la carga conectada, alcanzando un valor máximo cercano a 3.5 W bajo condiciones específicas de operación.

Tabla 5. Comparativa de potencias

Caudal (L/min)	Presión (MPa)	Potencia teórica (W)	Potencia experimental (W)
31.05	0.238	123.1	0.512
30.95	0.237	122.3	2.87
31.58	0.218	114.7	1.11
31.58	0.229	120.5	1.498
31.05	0.23	118.9	2.294
31.58	0.23	121	2.52
31.58	0.23	121	2.802
31.05	0.233	120.5	2.736
31.58	0.239	125.8	2.832
31.58	0.234	123	3.058
31.58	0.228	119.7	3.412
31.05	0.23	118.9	3.376
31.05	0.238	123.1	3.49

La diferencia entre la potencia teórica y la experimental evidencia un bajo nivel de aprovechamiento energético del sistema. Esta discrepancia puede atribuirse a pérdidas asociadas

al transporte del fluido y, principalmente, a la interacción entre el chorro y la turbina, lo que limita la transferencia efectiva de energía hacia el sistema de generación.

Adicionalmente, el comportamiento de la potencia experimental muestra una tendencia creciente hasta alcanzar un valor máximo, lo que sugiere la existencia de un punto de operación óptimo condicionado por la carga eléctrica. En conjunto, estos resultados permiten establecer una diferencia clara entre el comportamiento ideal estimado y el desempeño real del sistema bajo las condiciones evaluadas.

5.4 Análisis de los parámetros finales en el punto de máxima potencia

El análisis conjunto de las pruebas de variación de caudal y de carga permitió identificar un punto de operación representativo del sistema, el cual se alcanzó bajo un caudal cercano a 30 L/min y una presión aproximada de 0.26 MPa en la línea de impulsión. En estas condiciones, y al conectar una carga eléctrica intermedia, el generador alcanzó valores de voltaje comprendidos entre 25 y 26 V y corrientes del orden de 0.13 a 0.16 A, lo que se tradujo en una potencia eléctrica máxima experimental cercana a 3.5 W. La potencia eléctrica generada se obtuvo a partir de la ecuación 12

$$Pe = 25.3v * 0.138A = 3.49W$$

Este valor es coherente con los resultados experimentales obtenidos durante los ensayos, considerando las limitaciones del sistema hidráulico, particularmente en términos de caudal suministrado por la bomba y restricciones geométricas de la tubería, por otra parte, la potencia hidráulica disponible en el sistema puede estimarse mediante la relación clásica de conversión de energía hidráulica como está demostrado en la ecuación 4 donde a partir de la presión medida en el sistema, la altura hidráulica puede despejarse como:

$$H = \frac{P}{\rho * g} \quad (30)$$

Utilizando la presión máxima registrada, $P = 0.26$ MPa, que equivale a 260000 Pa, donde al remplazar los valores se obtiene:

$$H = \frac{260000}{1000 * 9.81} = 26.5mts$$

El caudal experimental máximo fue de aproximadamente 30 L/min, equivalente a:

$$Q = \frac{30}{1000 * 60} = 5 \times 10^{-4} m^3/s$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación 4 de potencia hidráulica:

$$Ph = 1000 * 9.81 * 5 \times 10^{-4} * 26.5$$

$$Ph = 130W$$

Este valor representa la potencia hidráulica teórica disponible en el sistema bajo las condiciones experimentales máximas, a partir de la relación entre la potencia eléctrica obtenida y la potencia hidráulica estimada, se puede calcular la eficiencia global experimental del sistema con la ecuación 6 anteriormente mencionada y nos da como resultado:

$$\eta = \frac{3.49}{130} = 0.0268$$

$$\eta = 2.7\%$$

El valor de eficiencia global obtenido, cercano al 2.7%, resulta considerablemente inferior al reportado en sistemas hidroeléctricos convencionales. Este resultado, en el contexto experimental del presente trabajo, evidencia la necesidad de analizar el sistema desde la perspectiva de la cadena de conversión energética, en la cual la eficiencia total puede interpretarse como el producto de las eficiencias hidráulica, mecánica y eléctrica. Bajo este enfoque, cada etapa del proceso contribuye de manera directa al desempeño global observado, permitiendo identificar con mayor claridad las fuentes de pérdida de energía.

A partir de los resultados experimentales, se infiere que la eficiencia hidráulica está limitada por la capacidad del sistema para transformar la energía del fluido en un chorro con características adecuadas de velocidad y dirección al incidir sobre la turbina. En este sentido, las pérdidas asociadas a la red hidráulica, incluyendo tuberías, accesorios y posibles irregularidades en el flujo, influyen directamente en la reducción de la energía efectivamente aprovechada. Asimismo, se observa que la calidad del chorro incidente puede no ser óptima, lo cual afecta el proceso de transferencia de energía hacia la turbina.

En relación con la etapa mecánica, los resultados sugieren la presencia de pérdidas asociadas a fricción en los elementos de soporte, así como posibles desalineaciones en el acoplamiento entre la turbina y el generador. Estas condiciones inciden en la disminución de la potencia mecánica disponible en el eje, especialmente considerando que el sistema opera en un régimen de baja potencia, donde este tipo de pérdidas adquiere mayor relevancia relativa.

Por otra parte, el comportamiento eléctrico observado indica que el generador no opera necesariamente en su punto óptimo de eficiencia, lo cual, sumado a las pérdidas en el sistema de rectificación y a la falta de una adaptación precisa de la carga, limita la potencia eléctrica efectiva obtenida. En conjunto, estos factores explican la diferencia significativa entre la potencia hidráulica teórica estimada y la potencia eléctrica medida experimentalmente.

En el sistema a escala de laboratorio desarrollado en este trabajo, es esperable encontrar eficiencias globales reducidas debido a que los distintos subsistemas no operan en condiciones ideales. No obstante, los resultados obtenidos permiten identificar que las principales limitaciones del sistema se concentran en la etapa hidráulica y en la interacción entre el chorro y la turbina, lo cual se refleja directamente en el bajo aprovechamiento energético.

Conclusiones

Los ensayos experimentales demostraron que el desempeño del sistema depende directamente de las condiciones de operación hidráulica, específicamente del caudal suministrado por la bomba y de la altura disponible. El prototipo alcanzó su mayor rendimiento cuando la bomba operó cerca de su régimen máximo, generando un caudal aproximado de 30 L/min. Este flujo incrementó la velocidad del chorro sobre la turbina, lo que elevó significativamente los niveles de voltaje y la potencia eléctrica generada.

El análisis con diversas cargas resistivas permitió identificar el comportamiento del generador rectificado frente a las variaciones de consumo. Los resultados indicaron que las cargas menores a 70Ω provocan una alta demanda de corriente y una caída de voltaje considerable. Por el contrario, las resistencias superiores a 190Ω aproximan el sistema a condiciones de circuito abierto, lo que reduce la transferencia de potencia. En consecuencia, el generador opera con mayor estabilidad ante cargas intermedias, donde el equilibrio entre voltaje y corriente maximiza los valores de potencia para el análisis.

La integración del microcontrolador ESP32 y sensores especializados facilitó el registro en tiempo real de variables como presión, caudal, voltaje y corriente. Esta configuración permitió calcular la potencia eléctrica de forma automática, mientras que la plataforma de visualización desarrollada agilizó el seguimiento de los datos. Dicha herramienta fortalece el proceso de análisis durante las prácticas de laboratorio al permitir comparaciones precisas entre diversas condiciones operativas de manera inmediata.

Finalmente, el prototipo constituye una herramienta eficaz para el estudio de la microgeneración a pequeña escala. Su diseño permite evaluar de forma práctica la relación entre el recurso hidráulico y la carga eléctrica, mejorando la comprensión de los principios fundamentales del aprovechamiento energético. Este sistema representa un avance en la investigación aplicada, consolidando una base sólida para el estudio de sistemas hidráulicos aplicados a la generación eléctrica.

Recomendaciones

A partir del análisis de los resultados obtenidos durante la caracterización y experimentación del sistema, se identifican diversas opciones de mejora para optimizar el desempeño hidráulico y eléctrico del prototipo. En primer lugar, se recomienda modificar la infraestructura de conducción, ya que el diseño actual utiliza tubería de PVC de 1/2 y 1 pulgada unida mediante soldadura química. Se observó que este material carece de la resistencia mecánica necesaria para operar bajo presiones elevadas; por lo tanto, es imperativo emplear tuberías con mayor capacidad nominal y métodos de unión más seguros. Esta mejora permitirá operar el sistema bajo regímenes de presión superiores sin comprometer la integridad estructural ni sufrir pérdidas por deformaciones en la red.

Asimismo, se sugiere optimizar el diseño de la línea de conducción mediante la modificación de diferentes diámetros de tubería y reducción de codos, derivaciones y accesorios que generan pérdidas de carga. La implementación de trayectorias más rectas o accesorios de radio largo disminuirá la fricción hidráulica, lo cual aumentará la presión efectiva en la entrada de la turbina Pelton e incrementará directamente la potencia mecánica disponible en el eje del generador. Por otra parte, resulta fundamental sustituir la bomba hidráulica por una de mayor capacidad de caudal y presión. Dado que este componente simula el recurso hídrico en el banco de pruebas, una unidad de mayor potencia elevará la velocidad del chorro, lo que se traduce en un incremento del torque y de la potencia mecánica entregada.

De igual manera, se recomienda realizar estudios adicionales sobre el diámetro de las boquillas de inyección. La integración de boquillas intercambiables permitirá analizar con precisión cómo influyen la velocidad del chorro y el caudal en la generación eléctrica, facilitando la identificación del punto de operación óptimo para diferentes escenarios de simulación. Finalmente, para futuros desarrollos se plantea la evaluación e implementación de generadores con mayor eficiencia o potencia nominal. Un componente de mejores prestaciones eléctricas permitirá aprovechar de manera más efectiva la energía hidráulica disponible, maximizando así el rendimiento global del sistema de microgeneración.

Referencias

- Andrade, J. S., & Juaspuezan, L. D. (2025). *Influencia de los Parámetros de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica* [Universidad CESMAG]. <http://repositorio.unicesmag.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/1365>
- Biner, D., Hasmatuchi, V., Rapillard, L., Chevailler, S., Avellan, F., & Münch-Alligné, C. (2021). Duoturbo: Implementation of a counter-rotating hydroturbine for energy recovery in drinking water networks. *Sustainability (Switzerland)*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/su131910717>
- BP Statistical. (2021). Statistical Review of World Energy globally consistent data on world energy markets and authoritative publications in the field of energy. In *BP Energy Outlook* (Vol. 70). https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/webcast-and-on-demand.html#tab_sr-2021
- Calderón, B. S. M., & Sarmiento, L. V. G. (2025). *Aplicación de IoT en el monitoreo de un modelo hidráulico experimental basado en el método de hardy cross HARDY CROSS* [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/items/793c8345-ba9b-43a7-ae75-c6ece3144cb3>
- Calderon, C. E. (2016). *Enseñanza de la Ley de Ohm y su aplicación de los circuitos eléctricos en el grado 11 de la Institución Educativa “Ismael Perdomo Borrero”* (Issue June) [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/55970>
- Casallas Martínez, W. A., Ruiz Amado, J. A., & Díaz Pérez, O. (2022). *Implementación y evaluación de sistema hidro-generador eléctrico, para el acueducto Veredal Vancouver - La Rambla del municipio de San Antonio del Tequendama*. [Universidad Antonio Nariño]. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/7240>
- Ceballos, Y. C., Valencia, M. C., Zuluaga, D. H., Del Rio, J. S., & García, S. V. (2017). Influence of the number of blades in the power generated by a Michell Banki Turbine. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(4), 1989–1997. <https://doi.org/10.20508/ijrer.v7i4.6372.g7246>
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Ley 1955 Plan Nacional. “Pacto por Colombia.”* <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=93970>
- Electrónica, P. de I. (2015). Proyecto Educativo del Programa de Ingeniería Electrónica. *Línea y Sublínea de Investigación U. CESMAG*.

- Flores, C. E. (2010). *Oleodinámica: potencia hidráulica, motor de la industria*. 06.
https://fgsalazar.net/LANDIVAR/ING-PRIMERO/boletin06/URL_06_MEC01.pdf
- Garzón, M., Gómez, H., Garzon, A., & Angel, M. (2020). Diseño y desarrollo de un sistema hidro generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton. [Universidad Antonio Nariño]. In *instname:Universidad Antonio Nariño*.
<http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2221>
- Gemechu, T. N. (2018). *CFD Based design optimization , fabrication and testing of a micro hydro pelton turbine* [Addis Ababa University].
<http://etd.aau.edu.et/handle/12345678/23756>
- Hussein, O., Mustafa, F. F., Daham, S. R., Al-Jumaili, W. K. S., & Morad, A. H. (2023). Utilizing the controlled hydropower system to harness the collected water in drainage system for power generation. *2023 14th International Renewable Energy Congress, IREC 2023*.
<https://doi.org/10.1109/IREC59750.2023.10389338>
- Irazusta, B., & Reyna, T. (2020). *Banco de pruebas micro turbina turgo*. 1(November).
<https://www.researchgate.net/publication/347766573%0ABANCO>
- Lagos, J. I. A. L. (2007). *Diseño, montaje y pruebas de un prototipo de microcentral hidroelectrica con turbina pelton* [Universidad de Chile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104526>
- Lambert, J., Monahan, R., & Casey, K. (2021). *Power consumption profiling of a lightweight development board: sensing with the INA219 and teensy 4.0 microcontroller*.
<https://doi.org/10.3390/electronics10070775>
- Legese, K. D. (2018). *Manufacturing and experimental performance analysis of a micro hydro pelton turbine* [Addis Ababa University]. <http://etd.aau.edu.et/handle/12345678/15936>
- López, A. V. R. (2021). Estudio y diseño de un sistema de alcantarillado sanitario con su respectiva planta de tratamiento de aguas residuales en el sector de Hualcanga Chico zona I del cantón Quero [Universidad Tecnica de Ambato]. In *Pharmacognosy Magazine* (Vol. 75, Issue 17). <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/31998>
- Luque, L. C. S. (2024). *Diseño de un sistema inalambrico para el control de bombeo de agua para la ciudad de Juliaca* [Universidad Andina].
<https://repositorio.uancv.edu.pe/items/7f193a68-2665-4d18-8f6a-97ff3521f904>
- Morales, S., Corredor, L., Paba, J., & Pacheco, L. (2014). Stages in the development of a small

- hydropower project: Context and implementation basic criteria. *DYNA (Colombia)*, 81(184).
<https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.39757>
- Moreira, S. W. O. (2024). *Implementación de un sistema de control de la bomba de calor del CEPUR* [Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26111>
- Moreno, F., Stive, W., Urrego, R., & Leonarlo. (2022). Caracterización De Los Proyectos Para La Generación De Energías Renovables No Convencionales En Colombia. *Proceedings from the International Congress on Project Management and Engineering, 2022-July*(July), 1320–1330.
- Moscoso, L. B., & Montealegre, J. L. (2014). Impactos en la flora terrestre por la implementación de pequeñas centrales hidroeléctricas en Alejandría, Antioquia. *Producción Más Limpia*, 8(2), 85–93.
<https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/526/275>
- Parrado, J. A. F., Aguilar, J. J. M., & Céspedes, S. N. (2019). *Elaboración de un prototipo de turbina tipo Pelton para el laboratorio de hidráulica de la Universidad Cooperativa de Colombia sede Villavicencio mediante métodos estandarizados de diseño de estructuras hidráulicas*. [Universidad Cooperativa de Colombia].
<https://hdl.handle.net/20.500.12494/11596>
- Phommachanh, D., Kurokawa, J., Choi, Y.-D., & Nakajima, N. (2006). Development of a positive displacement micro-hydro turbine. *JSME International Journal Series B*, 49(2), 482–489. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jsmeb/49/2/49_2_482/_article
- Prasetyawati, F. Y., Harjunowibowo, D., Fauzi, A., Utomo, B., & Harmanto, D. (2023). Calibration and validation of INA219 as sensor power monitoring system using linear regression. *AIUB JOURNAL OF SCIENCE AND ENGINEERING*, 22(3), 240–249.
<https://doi.org/10.53799/ajse.v22i3.595>
- Riascos, F., & Cepeda, J. (2021). Modelación matemática de los sistemas de control de velocidad de unidades de la central hidroeléctrica coca codo sinclair. *Revista Técnica “Energía,”* 18(1). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v18.n1.2021.469>
- Romero, F., Velásquez, L., & Chica, E. (2020). Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki. *Revista UIS Ingenierías*, 20(1), 23–46.
<https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021003>
- Santos, J. P. de S., & Carvalho, W. da S. (2021). Monitoramento do fluxo de água em uma

tubulação protótipo arduino de monitoramento de tubulação hidráulica. *Engenharia, Meio Ambiente & Inovação*, 7(2). <https://unignet.com.br/portal-de-revistas-e-publicacoes/revista-de-engenharia-meio-ambiente-e-inovacao/>

Setyawan, E. Y., Krismanto, A. U., Mujiono, Djiwo, S., Saleh, C., & Hidayat, T. (2024).

Optimizing Pelton turbine performance: unveiling the power of three nozzles for maximum efficiency and sustainable hydropower generation [National Institute of Technology Malang]. In *Journal of Measurements in Engineering*.

<https://doi.org/10.21595/jme.2024.23966>

Shi, Y., Wu, S., Huang, X., & Liu, X. (2024). Analysis of oil film flow characteristics and lubrication performance of thrust bearing of 1000MW Hydraulic Turbine Unit. *Journal of Physics: Conference Series*, 2752(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2752/1/012048>

Zamora Juárez, M. Á. (2019). *Eficiencia de micro central hidroeléctrica relativa al dimensionamiento geométrico de la turbina* [Universidad Autónoma del Estado de México]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/104406>

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

San Juan de Pasto, 28 de abril del 2026

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado Estudio de la generación eléctrica de una turbina hidroeléctrica de baja potencia ante modificaciones de los parámetros operativos del sistema, presentado por el (los) autor(es) Duver Arley Champutis Gómez y Johan Sebastián Mera Cabrera del Programa Académico Ingeniería electrónica al correo electrónico biblioteca.trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



(Firma del Asesor)


Francisco Javier Eraso Checa

C.C 98397376

Programa de Ingeniería Electrónica

Teléfono: 313 6584666


Correo electrónico: feraso@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

INFORMACIÓN DE LOS AUTORES	
Nombres y apellidos del autor: Duver Arley Champutis Gomez	Documento de identidad: 1004631881
Correo electrónico: dachamputis.1881@uniesmag.edu.co	Número de contacto: 316 8049384
Nombres y apellidos del autor: Johan Sebastian Mera Cabrera	Documento de identidad: 1080040875
Correo electrónico: sebasmera101@gmail.com	Número de contacto: 3234088371
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Francisco Javier Eraso Checa	Documento de identidad: 98397376
Correo electrónico: feraso@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 313 6584666
Título del trabajo de grado: Estudio de la generación eléctrica de una turbina hidroeléctrica de baja potencia ante modificaciones de los parámetros operativos del sistema	
Facultad y Programa Académico: Facultad de Ingeniería, programa de ingeniería electrónica	

En mi (nuestra) calidad de autor(es) y/o titular (es) del derecho de autor del Trabajo de Grado o de Aplicación señalado en el encabezado, confiero (conferimos) a la Universidad CESMAG una licencia no exclusiva, limitada y gratuita, para la inclusión del trabajo de grado en el repositorio institucional. Por consiguiente, el alcance de la licencia que se otorga a través del presente documento, abarca las siguientes características:

- a) La autorización se otorga desde la fecha de suscripción del presente documento y durante todo el término en el que el (los) firmante(s) del presente documento conserve (mos) la titularidad de los derechos patrimoniales de autor. En el evento en el que deje (mos) de tener la titularidad de los derechos patrimoniales sobre el Trabajo de Grado o de Aplicación, me (nos) comprometo (comprometemos) a informar de manera inmediata sobre dicha situación a la Universidad CESMAG. Por consiguiente, hasta que no exista comunicación escrita de mi(nuestra) parte informando sobre dicha situación, la Universidad CESMAG se encontrará debidamente habilitada para continuar con la publicación del Trabajo de Grado o de Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento,

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 09/JUN/2022

siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

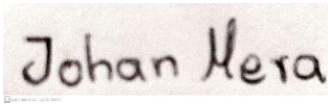

- b) Se autoriza a la Universidad CESMAG para publicar el Trabajo de Grado o de Aplicación en formato digital y teniendo en cuenta que uno de los medios de publicación del repositorio institucional es el internet, acepto(amos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación circulará con un alcance mundial.
- c) Acepto (aceptamos) que la autorización que se otorga a través del presente documento se realiza a título gratuito, por lo tanto, renuncio(amos) a recibir emolumento alguno por la publicación, distribución, comunicación pública y/o cualquier otro uso que se haga en los términos de la presente autorización y de la licencia o programa a través del cual sea publicado el Trabajo de grado o de Aplicación.
- d) Manifiesto (manifestamos) que el Trabajo de Grado o de Aplicación es original realizado sin violar o usurpar derechos de autor de terceros y que ostento(amos) los derechos patrimoniales de autor sobre la misma. Por consiguiente, asumo(asumimos) toda la responsabilidad sobre su contenido ante la Universidad CESMAG y frente a terceros, manteniéndose indemne de cualquier reclamación que surja en virtud de la misma. En todo caso, la Universidad CESMAG se compromete a indicar siempre la autoría del escrito incluyendo nombre de(los) autor(es) y la fecha de publicación.
- e) Autorizo(autorizamos) a la Universidad CESMAG para incluir el Trabajo de Grado o de Aplicación en los índices y buscadores que se estimen necesarios para promover su difusión. Así mismo autorizo (autorizamos) a la Universidad CESMAG para que pueda convertir el documento a cualquier medio o formato para propósitos de preservación digital.

NOTA: En los eventos en los que el trabajo de grado o de aplicación haya sido trabajado con el apoyo o patrocinio de una agencia, organización o cualquier otra entidad diferente a la Universidad CESMAG. Como autor(es) garantizo(amos) que he(hemos) cumplido con los derechos y obligaciones asumidos con dicha entidad y como consecuencia de ello dejo(dejamos) constancia que la autorización que se concede a través del presente escrito no interfiere ni transgrede derechos de terceros.

Como consecuencia de lo anterior, autorizo(autorizamos) la publicación, difusión, consulta y uso del Trabajo de Grado o de Aplicación por parte de la Universidad CESMAG y sus usuarios así:

- Permiso(permitimos) que mi(nuestro) Trabajo de Grado o de Aplicación haga parte del catálogo de colección del repositorio digital de la Universidad CESMAG por lo tanto, su contenido será de acceso abierto donde podrá ser consultado, descargado y compartido con otras personas, siempre que se reconozca su autoría o reconocimiento con fines no comerciales.

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 28 días del mes de abril del año 2026

Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
	
Nombre del autor: Johan Sebastian Mera Cabrera	Nombre del autor: Duver Arley Champutis Gomez



UNIVERSIDAD
CESMAG
NIT: 800.109.387-7
VIGILADA MINEDUCACIÓN

AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL

CÓDIGO: AAC-BL-FR-031

VERSIÓN: 1

FECHA: 09/JUN/2022

Firma del asesor

Nombre del asesor: Francisco Javier Eraso Checa