

Diseño, construcción y puesta en marcha de una turbina Pelton para aplicaciones didácticas

Design, construction and start-up of a Pelton turbine for educational applications

Erik Gayosso Guevara ^a, Ricardo Escárcega Romero ^b, José L. Rodríguez Muñoz ^c, Jorge Zuno Silva ^d, Yira Muñoz Sánchez ^e, Carlos E. Borja Soto ^f

Abstract:

The aim of this work is the design, build, and start-up of a Pelton turbine for educational applications. Students can measure and control the flow rate through the system, gaining a better understanding of its operation and the parameters that contribute to energy efficiency. This project resulted in a functional system capable of producing electricity on a small scale. Although the power generated by the system is currently limited to lighting a series of LED lights, it can operate without problems when the valve is operated at 75% and 100% load. Furthermore, the prototype provides a practical visualization of the relationship between flow rate, height, and angular velocity, facilitating the teaching of key concepts in the conversion of mechanical energy to electrical energy. The educational prototype can also serve as a support for laboratory practices in the subjects of fluid mechanics, thermodynamics, electrical circuits, and instrumentation and control, enhancing the knowledge and skills required by the metalworking industry.

Keywords:

Design, Fabrication, Turbine, Start up, Electricity

Resumen:

En este trabajo se realiza el diseño, construcción y puesta en marcha de una turbina Pelton para aplicaciones didácticas, donde los estudiantes puedan medir y controlar la cantidad de flujo que circula por el sistema y de esta manera tener un mejor panorama de su funcionamiento y los parámetros que contribuyen en el rendimiento energético. Derivado del trabajo se pudo contar con un sistema funcional capaz de producir energía eléctrica a pequeña escala. Aunque la potencia generada por el sistema se limita por el momento a encender una serie de focos led, esta puede funcionar sin problemas cuando se manipula la válvula de alimentación al 75% y 100% de carga en el sistema. Además, el prototipo permite visualizar de manera práctica la relación entre caudal, altura y velocidad angular, facilitando la enseñanza de conceptos clave de conversión de energía mecánica a eléctrica. También, el prototipo didáctico pueda servir de apoyo en prácticas de laboratorio en las materias de mecánica de fluidos, termodinámica, circuitos eléctricos e instrumentación y control, aumentando los conocimientos y habilidades que demanda la industria metal-mecánica.

Palabras Clave:

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0003-7822-4899>, Email: ga404868@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0005-0911-077X>, Email: es399409@uaeh.edu.mx

^c Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodriguez@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4876-2747>, Email: yira@uaeh.edu.mx

^f Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

Introducción

Los Desde tiempos inmemorables, la electricidad ha sido una gran necesidad para la humanidad, debido a que gran parte de las actividades humanas la toman como fuente principal de energía y debido a eso es un requerimiento muy imprescindible para los humanos. Es por ello que usar energías limpias para abastecer de electricidad a muchos países del mundo ha contribuido en disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro planeta (Hernán, 2018), y dentro de las fuentes que se consideran como energías limpias se encuentran: la energía hidráulica, solar, eólica y la geotérmica.

Hablando específicamente de la energía hidráulica, esta consiste en utilizar favorablemente la energía potencial o rotatoria del agua por medio de un mecanismo para transformarla en energía mecánica que, a su vez, esta es convertida en electricidad con la ayuda de un generador eléctrico (Arriola, 2019). Existen tres tipos principales de turbinas hidráulicas empleados para la generación de energía eléctrica, tal es el caso de la turbina Pelton, Francis y Kaplan. Las turbinas Pelton se destacan por ser más eficientes en caídas altas y caudales bajos, destacándose en entornos con grandes alturas de caída y flujos reducidos. Por otra parte, las turbinas Kaplan se adaptan mejor a caudales grandes y caídas bajas, mientras que las turbinas Francis son adecuadas para caudales medios y alturas de caída intermedias.

La turbina Pelton por su parte, tiene la ventaja de operar como un gran salto de altura, además de caudales más pequeños, lo que permite tener una mayor eficiencia, un menor costo y una menor corrosión por erosión, en comparación con las otras turbinas (Ambo, 2017). Otra ventaja de la turbina Pelton en comparación con la turbina Francis y Kaplan es que esta presenta una gran velocidad de rotación debido a que sus álabes son impactados por el chorro de agua proveniente de los inyectores, por lo que no es necesario un sistema de transmisión de potencia para poder conectarla al generador de energía. Dentro de algunos trabajos realizados sobre el análisis de turbinas Pelton se encuentra el de Marval, et al., (2024), quienes efectuaron una simulación numérica y un trabajo experimental del torque y la fuerza que ejerce una turbina Pelton al momento de frenar. Los autores determinaron que el modelo numérico permite determinar el comportamiento del torque de la turbina y lograron obtener una mejor estimación, exactitud y confiabilidad de las variables de operación del sistema. Ceballos Zuluaga, et al., (2023), se enfocaron en la implementación de turbinas Pelton de media y baja capacidad para la generación de energía eléctrica, con el objetivo de

determinar el caudal de agua necesario para activar el sistema. Los autores concluyeron que no solo el caudal debe ser examinado durante el diseño y análisis en este tipo de turbinas, sino también los cangilones (recipiente usado para el transporte de agua) a través de la ayuda de programas de análisis de datos finitos como es el software ANSYS. El uso de ANSYS en turbinas Pelton de media y baja capacidad permite optimizar su diseño, mejorar la eficiencia, reducir el desgaste y prevenir fallas estructurales. Esto facilita la adaptación a distintas condiciones operativas y disminuye costos de fabricación, determinando que el cangilón tipo Thake es adecuado en este tipo de turbinas, debido a su óptima relación resistencia-peso, aunque su mayor masa puede ser una desventaja.

Espinosa Escobar, et al., (2023) propusieron el estudio numérico de un rodete de turbina Pelton mediante el uso del método de elementos finitos, analizando su forma estructural para determinar la influencia del material sobre la geometría de los cangilones y realizaron un análisis modal para determinar la frecuencia natural de oscilación. Los autores llegaron a la conclusión que, el aumento del espesor del cangilón mejora su resistencia a los impactos y al desgaste. Además, determinaron que los espesores de 17 a 20 mm ofrecen una mayor resistencia a los impactos y al desgaste, los cuales son adecuados para las condiciones de trabajo establecidas. Lema Neto, et al., (2023), evaluaron el rendimiento mecánico de una turbina Pelton en un sistema de micro generación de electricidad. Los autores implementaron un módulo didáctico que permite analizar este rendimiento y encontraron que los parámetros que contribuyen en el rendimiento mecánico son: altura, presión, caudal, velocidad angular y torque. Chalco Mansilla, et al (2023) rediseñaron y automatizan una turbina Pelton para el monitoreo de flujo y presión empleando un sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), además, emplearon un controlador lógico programable (PLC) para manipular de mejor manera el sistema SCADA. Los autores determinaron que, al considerar caídas altas, caudales bajos, chorro de agua a alta velocidad, agua limpia y un control adecuado de la velocidad de rotación se puede obtener una máxima eficiencia de aproximadamente 58%.

León Ribero, et al., (2013) diseñaron, construyeron y pusieron en marcha una turbina Pelton para generar electricidad. Al comparar los resultados de los rendimientos energéticos del nuevo diseño con aquellos presentados por los fabricantes de turbinas Pelton, se llegó a la conclusión que la nueva propuesta presenta mayor eficiencia energética en comparación con las turbinas existentes en el mercado. Gil Balcallan, et al

(2017) realizaron el diseño de un módulo de simulación de generación hidroeléctrico utilizando turbinas Pelton y Francis abastecidas por un sistema de recirculación, en el cual simulaban el funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica, lo cual permite que pueda ser utilizada como una herramienta didáctica para demostrar su funcionamiento, eficiencia y capacitar a estudiantes sobre el uso de las energías limpias.

Elisa (2024) realizaron la evaluación del rendimiento energético de turbinas hidráulicas tipo Kaplan y Francis, debido a sus altos costos de mantenimiento requeridos. Para mitigar esta situación, se construyó una turbina Pelton a escala y con fines didácticos, la cual ayudará a realizar diferentes tipos de mediciones, considerando diversos parámetros geométricos y de operación, concluyendo que el modelo a escala y el modelo físico de experimentación presentaron un rendimiento estadísticamente aceptable.

Juan Diego (2016) diseñó una turbina Pelton e implementó un sistema de control PID (controlador proporcional, integral y derivativo), para regular la temperatura, la velocidad y otras variables de operación, las cuales permitieron determinar la diferencia entre una variable real y la variable deseada. Derivado de su estudio, se pudo concluir que el rodete Pelton fue diseñado en base al caudal y la altura neta. Simulaciones en ANSYS confirmaron que la tobera fue correctamente diseñada, evitando contraflujo en distintas posiciones de la aguja.

Javier Ignacio (2007) realizó el diseño, montaje y pruebas de un prototipo de una micro central hidroeléctrica de una turbina Pelton, con el objetivo de evaluar el funcionamiento del prototipo a través de sistemas de regulación de caudal. Los resultados demostraron el correcto funcionamiento de la válvula de aguja como sistema de regulación del caudal y se consideró como valor base en la implementación de la micro central.

Aris Balde, et al., (2014) diseñaron, construyeron y realizaron pruebas experimentales en una turbina Pelton para micro generación hidráulica. El diseño fue realizado por medio del software de elementos finitos, determinando que la turbina puede lograr un rendimiento del 89%. Posteriormente se realizó la construcción del prototipo y se realizaron las pruebas experimentales, determinando una eficiencia adecuada, aunque el diseño puede ser mejorado.

Cepeda (2024) realizaron el diseño de cuchara para microturbina Pelton, en el cual realizaron dos modelos tentativos para determinar la mejor opción mediante simulaciones fluidodinámicas con un software de elementos finitos. El autor llegó a la conclusión de que la mejor opción para este trabajo es seleccionar el diseño con dos brazos para la sujeción del alabe al disco, ya que con esto se obtiene una mejor distribución de las

tensiones. Juan Fernando, et al (2022) mejoraron un banco de pruebas de una turbina Pelton. Tras una revisión de la norma ISO 14224, se llegó a la conclusión que era necesario modificar tres etapas, 1) la parte mecánica, 2) la parte eléctrica y 3) la parte electrónica. Además, se realizó un ensayo de tintas penetrantes en los álabes de la turbina Pelton según la norma ASTM E-165-95, determinando que todos los álabes cumplían con los requisitos y fueron aprobados.

Alejandro Moreno, et al., 2022 trabajaron en el diseño de un mecanismo y en el mecanizado de los anillos de un inyector en una turbina Pelton. Además, realizaron un análisis matemático logrando obtener un adecuado diseño de los anillos del inyector. Cárdenas y Isabel, 2022 propusieron un sistema inteligente para predecir el desgaste de los cangilones de las turbinas Pelton con ayuda del método de comunicación MQTT (Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes). Durante su trabajo también se analizaron dos métodos para medir el espesor de la cuchara: uno con una plantilla fija y un calibrador pie de rey, y otro con un dispositivo electrónico de medición. Los resultados se compararon con aquellos obtenidos por el fabricante, obteniéndose un error mínimo de 0.22, por lo que se pudo establecer que este sistema es eficiente para determinar el grosor de los cangilones.

La turbina Pelton ofrece ventajas significativas sobre las turbinas Hélice y Kaplan, especialmente en aplicaciones con grandes alturas de caída y caudales reducidos. Su diseño permite un alto rendimiento en estos escenarios, mientras que las Hélice y Kaplan son más adecuadas para bajos desniveles y grandes caudales. A diferencia de estas últimas, la Pelton es menos sensible a variaciones en el flujo, tiene menor riesgo de cavitación debido a su funcionamiento con chorros de agua a presión atmosférica y requiere menos mantenimiento, ya que posee menos piezas móviles sumergidas. Además, su capacidad de operar en terrenos montañosos con pendientes pronunciadas la hace más versátil en ciertos entornos geográficos.

Es así que este trabajo tiene como objetivo diseñar, construir y poner en marcha una turbina Pelton didáctica que permita a los estudiantes de ingeniería medir y controlar el flujo de agua, comprendiendo así su funcionamiento y los parámetros que influyen en su rendimiento energético. Además, en el ámbito académico, el desarrollo de prototipos didácticos como la turbina Pelton constituye una estrategia efectiva para fortalecer la formación práctica en el campo de la ingeniería mecánica. Su implementación permitirá que los estudiantes apliquen conocimientos adquiridos en áreas como el diseño mecánico, la mecánica de fluidos, la instrumentación y control, así como su comportamiento energético. A través del montaje, calibración y operación de la turbina, los alumnos integran competencias técnicas

relacionadas con el cálculo de parámetros hidráulicos, la selección de materiales, la medición de variables de flujo y la evaluación del desempeño energético. De esta manera, el prototipo no solo contribuye a la comprensión de los principios de las energías limpias, sino que también fomenta el aprendizaje experimental y el desarrollo de habilidades profesionales alineadas con las demandas actuales de la industria metalmeccánica y energética.

Esquema de la turbina hidráulica

En la Figura 1 se muestra el diagrama esquemático de la turbina Pelton para uso didáctico de pequeña capacidad de generación de electricidad. Los principales componentes que la conforman son los siguientes: estructura, bomba hidráulica, tubería que conecta el depósito con el rotor de la turbina, tanque, medidor de flujo tipo turbina, inyector y las chumaceras. La estructura es la encargada de soportar cada uno de los componentes del sistema, la cual fue fabricada de un acero estructural A36 de bajo contenido de carbono, cuyo límite elástico es de 250 MPa, tiene una resistencia a la tracción entre 400-550n MPa y un módulo de elasticidad de 200 GPa. El tanque es el encargado de almacenar el fluido que circula a través del sistema, este es fabricado de polietileno de alta densidad, el cual ofrece resistencia y durabilidad. La bomba, es la encargada de dirigir el agua hacia el inyector por medio de una tubería de PVC, el cual permite fluir el agua y soportar las presiones de la bomba. Por su parte, el inyector, es el encargado de aumentar la velocidad del fluido para que este entre en contacto con los cangilones, impulsando su movimiento y que la turbina comience a producir trabajo que posteriormente es transformado a electricidad por medio de un generador eléctrico. Para controlar la cantidad de agua que circula por el sistema, un medidor de flujo tipo turbina es colocado des pues de la bomba. Para mantener en constante funcionamiento el sistema, el agua proveniente de la turbina se descarga hacia el tanque a través de una ranura que se encuentra ubicada en la base inferior, con esto completar el ciclo. Además, se emplearon cinco tapas de acrílico que servirán como barrera para que el fluido se mantenga dentro del sistema evitando la menor cantidad de pérdida.

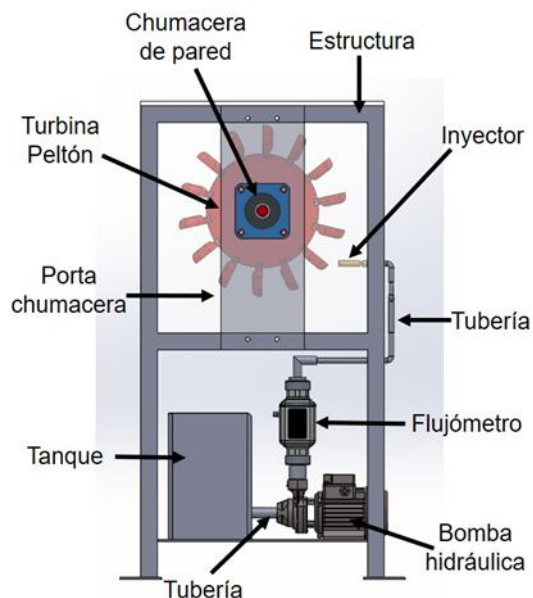


Figura 1: Esquema de la turbina Pelton para uso didáctico. Fuente: Elaboración propia.

Desarrollo

Primeramente, se realizó el diseño de cada uno de los componentes que conforman el prototipo didáctico de la turbina Pelton en el software de diseño SolidWorks. En la Figura 2 se muestra el esquema de la estructura del sistema y las dimensiones correspondientes. Como se mencionó anteriormente, ésta será fabricada de acero A36 grado herramienta, brindándole la fuerza necesaria para soportar las fuerzas que se aplicarán en la turbina Pelton. La estructura está formada por 4 ángulos verticales de 1.08 m de largo, ancho de 4 cm y un espesor de 0.5 cm.

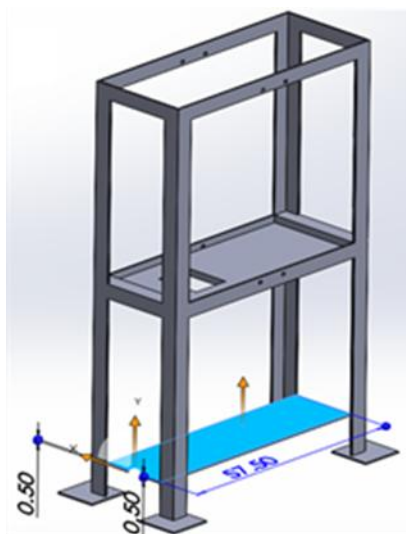


Figura 2: Estructura de la turbina Pelton. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, la estructura está constituida por cinco ventanas en sus laterales en las cuales se colocará el acrílico que permitirán observar el comportamiento del flujo de agua cuando este choque con los alabes de la turbina, dichas ventanas tendrán una medida de 54 cm x 24 cm. Además, una base fue empleada la cual se encargará de mantener las chumaceras en su posición y mantener alineado el eje de la turbina (ver Figura 3). Para este caso fue necesario realizar cuatro barrenos de 1 cm de diámetro que ayudarán en mantener fijas las chumaceras.

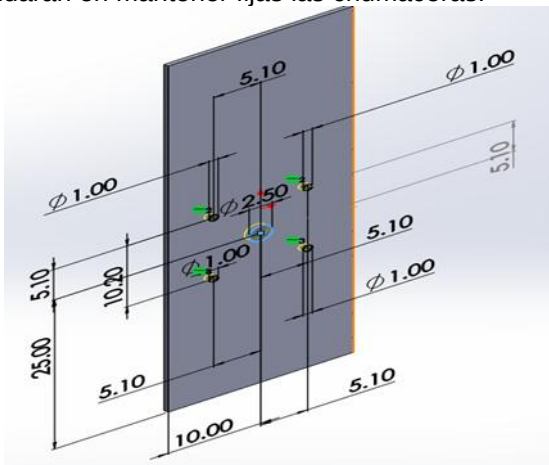


Figura 3: Soporte de las chumaceras. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 4a, el disco de la turbina tiene un diámetro mayor de 27 cm y un espesor de 0.5 cm. En la Figura 4b y 4c se observa que el eje tiene dos diámetros diferentes, el de lado derecho de 3.50 cm, con una longitud de 16 cm y el del lado izquierdo con un diámetro de 2.50 cm y una longitud de 5.50 cm, los cuales permiten alineada la turbina. Por otra parte, los cangilones de la turbina Pelton tiene forma rectangular, pero con las esquinas redondeadas, tal como se aprecia en la Figura 4d, los cuales se les dio una altura de 6 cm y un ancho de 4 cm y un espesor de 0.10 cm. Como se puede observar en la Figura 4e y 4f los soportes de los cangilones tienen una altura de 2 cm y un espesor de 1 cm, en el cual se le hizo una ranura de 0.50 cm en el centro de la base, también se perforó el disco de la turbina y las bases con un diámetro de 0.50 cm a 0.10 cm de las orillas y a 0.20 cm de la base de los soportes.

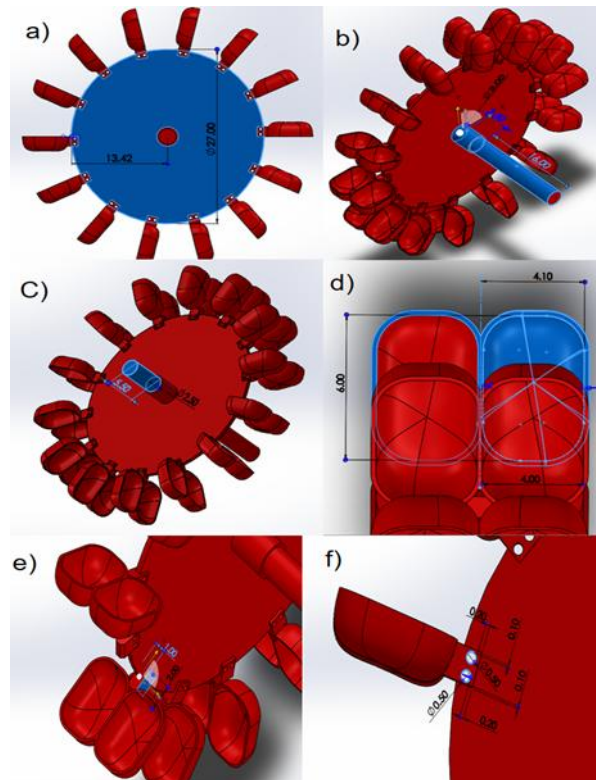


Figura 4. Cangilones y eje de la turbina Pelton. Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, también se genera el diseño de los chiflones de latón por medio del software de diseño 3D, los cuales son los elementos que ayudan a darle más velocidad al fluido. Se optó por ser de latón ya que es un material económico y presenta una buena resistencia al agua y a la corrosión lo que lo hace adecuado para su uso en este tipo de proyectos. Estos chiflones tienen una longitud de 3 pulgadas en total, el diámetro más grande por el cual va a circular el agua es de 0.5 pulgadas y el diámetro menor por fluye el agua hacia los cangilones es de 0.25 pulgadas (Figura 5a), este cambio de diámetros ayudará a incrementar la velocidad del fluido.

En la Figura 5b se observa un conector de inserción que va del chiflón a la manguera, el cual también es diseñado de latón como el de los demás componentes. En este caso, el diámetro mayor es de 0.48 pulgadas y el menor es de 0.17 pulgadas, el cual presenta formas circulares o nervios en su punta que ayudan a introducirlo fácilmente con la manguera de alimentación evitando que no se salga cuando se mantenga en funcionamiento. El ensamble de estos dos componentes se muestra en la Figura 5c, donde se aprecia la unión de estos elementos permitiendo controlar el flujo del agua hacia el eje de la turbina, así como controlar el tipo de fluido que saldrá sobre dicho componente.

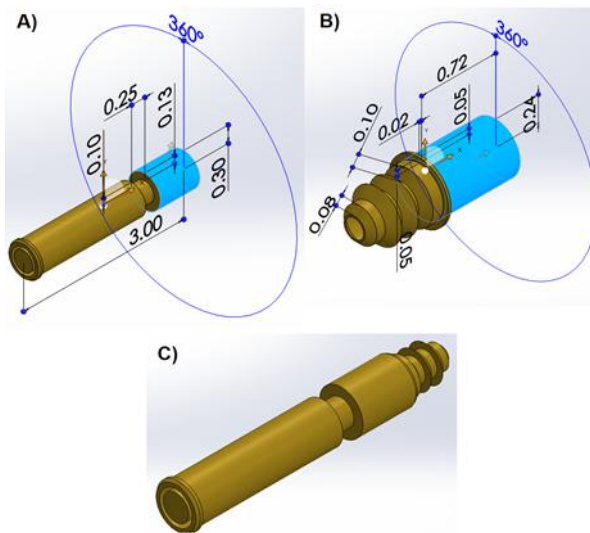


Figura 5. Dimensiones del chiflón empleado para la inyección de agua. Fuente: Elaboración propia.

Tapa frontal y posterior fueron diseñadas acorde a las siguientes medidas: 57.50 cm x 54 cm y un espesor de 6 mm (ver Figura 6). Estas tapas estarán fabricadas de acrílico de alta densidad, el cual es un polímero termoplástico transparente, conocido por su resistencia a los impactos y a la intemperie, además de ser liviano y fácil de mecanizar.

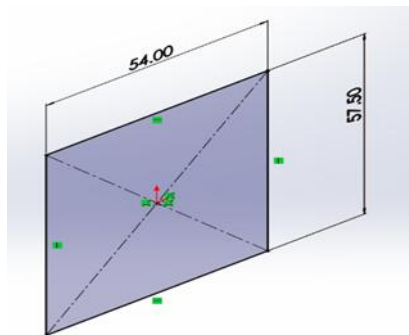


Figura 6. Tapa frontal y posterior diseñadas en SolidWorks. Fuente: Elaboración propia.

Tapas laterales derecha e izquierda, las cuales fueron diseñadas por medio del software de diseño SolidWorks cuyas dimensiones son las siguientes: 54 cm de alto y 23 cm de ancho, así como un espesor de 6 mm. El esquema de dichas tapas se muestra en la Figura 7. Como ya se mencionó anteriormente, dichas tapas servirán de soporte para mantener el fluido dentro del sistema, poder visualizar su comportamiento y el correcto funcionamiento de sus componentes, así como determinar cuáles son los componentes afectan en el correcto funcionamiento.

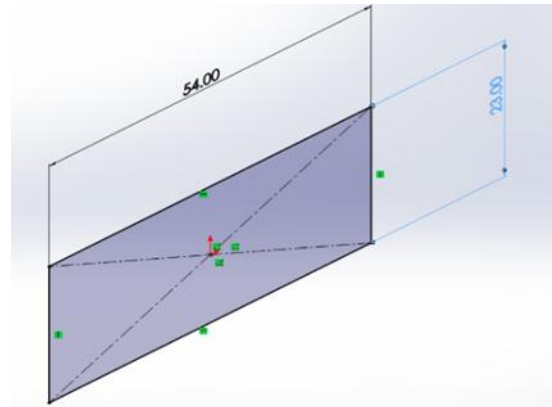


Figura 7. Tapa lateral izquierda y derecha diseñada en 3D. Fuente: Elaboración propia.

La chumacera es del tipo cuadrado de 130 mm x 130 mm con un redondeo de 16 mm, y cuatro barrenos los cuales tienen un diámetro de 16 mm y una separación de 102 mm de centro a centro, los cuales que ayudan a mantenerla fija y es donde se monta el eje de la turbina para que tenga la libertad de girar libremente cuando los inyectores golpeen los alabes de la turbina (Figura 8^a). En la Figura 8b se muestra el esquema representativo de las chumaceras.

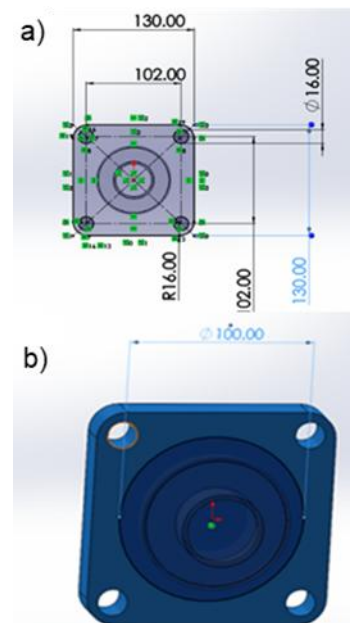


Figura 8. Chumaceras empleadas para sujetar el eje de la turbina. Fuente: Elaboración propia.

Especificaciones técnicas del Flujómetro

Para medir la cantidad de flujo que circula por el sistema, se empleará un medidor de flujo tipo turbina como el que se ilustra en la Figura 11. Este cuenta con una pantalla LCD que muestra el caudal de forma instantánea en litros por minuto (L/min), así como el volumen acumulado en

litros (L). El rango de operación va de 20 a 120 L/min, el cual lo hace adecuado para prototipos didácticos, tiene una precisión de $\pm 1\%$ y puede operar con un rango de presiones entre 3-5 bar.



Figura 11. Medidor de flujo tipo turbina. Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de las dimensiones del cangilón

Las dimensiones de los cangilones fueron calculadas al partir de la velocidad del chorro, el cual fue calculado de la siguiente manera:

$$V_j = \sqrt{2gH} \quad 1$$

Posteriormente, se calcula el diámetro del chorro de la siguiente manera:

$$dj = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_j}} \quad 2$$

Donde:

- Q = Caudal de agua (m^3/s)
- H = Altura neta (m)
- g = Gravedad ($9.81 m/s^2$)
- η = Eficiencia estimada
- D = Diámetro del rodete (m)
- V_j = Velocidad del chorro (m/s)

Una vez teniendo el cálculo del diámetro del chorro utilizamos las reglas empíricas para poder obtener las dimensiones de los cangilones partiendo que el caudal de la bomba es de 30 litros por minuto y que la altura de la tubería de la bomba hasta el chiflón es de 56.75 cm.

Sustituyendo los valores en la Ec 1 se tiene que la velocidad del fluido es la siguiente:

$$V_j = \sqrt{2 \left(9.81 \frac{m}{s} \right) (0.5675 m)}$$

$$V_j = 3.33 \frac{m}{s}$$

Una vez calculada la velocidad V_j esta se sustituye en la ecuación 2 para determinar el diámetro del chorro, tomando en consideración el caudal volumétrico de la bomba:

$$\frac{30L}{min} * \frac{0.001m^3}{L} * \frac{1min}{60s} = 5 \times 10^{-4}$$

$$dj = \sqrt{\frac{(4)(5 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s})}{(\pi)(3.33 \frac{m}{s})}}$$

$$dj = 0.01382m = 13.8mm$$

Al tener estos parámetros se pueden calcular las dimensiones de los cangilones basados en las ecuaciones descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones para determinar las dimensiones de los cangilones. Fuente: Elaboración propia.

Dimensiones	Relación típica
Ancho total del cangilón (B)	$B = 4 \cdot d_j$ a $5 \cdot d_j$
Profundidad (P)	$P = 1.2 \cdot d_j$
Longitud (L)	$L = 2.5 \cdot d_j$ a $3 \cdot d_j$
Espacio angular entre cangilones	$15^\circ - 20^\circ$ entre ellos

Basados en las ecuaciones de la Tabla 1, se pudieron determinar las dimensiones de los cangilones, las cuales se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} B &= 4 * 13.8 = 55.2 \text{ mm} \\ P &= 1.2 * 13.8 = 16.56 \text{ mm} \\ L &= 2.5 * 13.8 = 34.5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Para el presente diseño se optó por poner dos cangilones para darle más estabilidad al disco a la hora de recibir el impacto del chorro y tener una mayor área de contacto entre el chorro y la turbina.

En la Figura 12 se muestra el esquema del funcionamiento de la turbina Pelton. Primeramente, se debe identificar si esta se encuentra en condiciones óptimas para su operación, es decir, si cuenta con el caudal suficiente para impulsar los alabes de la turbina. Posteriormente, se debe calibrar la cantidad de flujo que ingresa a la turbina, es decir, regular la velocidad de agua en los inyectores. Finalmente, se debe verificar que el eje de la turbina genere movimiento y este pueda generar energía eléctrica, lo cual se comprueba mediante el encendido de los leds conectados al generador eléctrico.

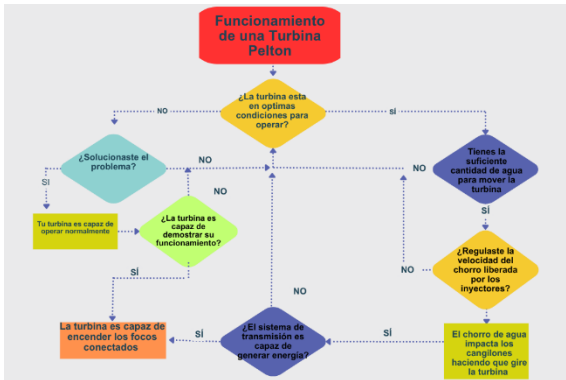


Figura 12. Diagrama de flujo del funcionamiento de la turbina Pelton. Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Para verificar el funcionamiento de la turbina didáctica se empleó un caudal volumétrico de 0.0005 m³/s y se colocó un arreglo de focos en serie interconectados a un generador eléctrico como se muestra en la Figura 13.

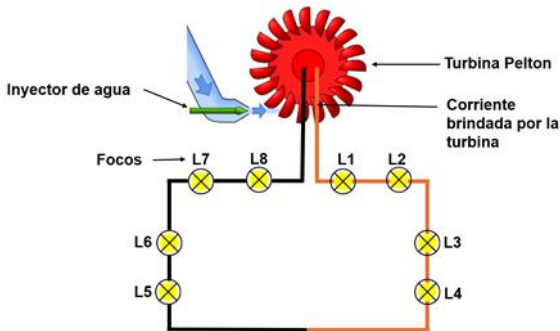


Figura 13. Conexión de los focos en prototipo didáctico de turbina Pelton. Fuente: Elaboración propia.

Derivado de la cantidad de flujo suministrado a través de la bomba hacia los inyectores, esto permitió mover el eje de la turbina Pelton y fue capaz de hacer funcionar los leds que se conectaron al sistema, los cuales fueron encendidos como se ilustra en la Figura 14. Los resultados confirman la conversión correcta de energía mecánica en energía eléctrica, lo que demuestra la funcionalidad y su viabilidad en el campo de la generación de electricidad. y funciona adecuadamente.

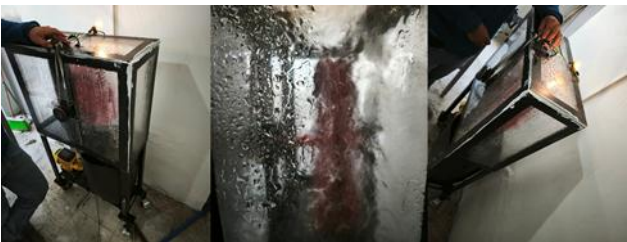


Figura 14. Turbina Pelton en funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que la cantidad de flujo de agua que circula por el sistema, se pudo medir las revoluciones por minuto (rpm) que este puede generar por medio de un tacómetro. Cuando la válvula se encuentra completamente abierta se pudo medir una velocidad de 299.2 rpm, lo que representa una velocidad suficiente para encender la serie de focos mostrada en la Figura 13. También se pudo determinar que al mantener la válvula al 75% de su capacidad (288.3 rpm), la turbina también fue capaz de mantener encendidos los focos a su máxima capacidad, estableciendo la correcta funcionalidad del sistema.

A continuación, se presentan los resultados comparativos entre el diseño teórico y el desempeño experimental del prototipo didáctico de la turbina Pelton. La Tabla 1 permite analizar el comportamiento hidráulico, mecánico y energético del sistema, contrastando las condiciones estimadas durante el diseño con los valores obtenidos durante las pruebas de funcionamiento. Se puede observar que el caudal obtenido de manera experimental es muy similar al obtenido de manera teórica. Presentando una diferencia de 4.16%, esto debido a las pérdidas de fricción y de carga en el sistema. También, se pudo encontrar que los valores teóricos de la altura neta, velocidad del chorro y presión en el inyector, cuyos errores fueron del 0%, 7.74% y 5.26%, respectivamente. La comparación indica una ligera disminución en el caudal y la velocidad del chorro respecto a lo teórico, debido principalmente a pérdidas hidráulicas en las conexiones y fricción en la línea de conducción.

Tabla 1. Comparación de parámetros hidráulicos. Fuente: Elaboración propia.

Parámetro	Valor	
	Teórico	Experimental
Caudal (m³/s)	0.00050	0.00048
Altura neta (m)	0.5675	0.5675
Velocidad del chorro (m/s)	3.34	3.10
Presión en el inyector (bar)	4.0	3.8

En la Tabla 2 se ilustra la comparativa obtenida de la velocidad angular y torque de los resultados teóricos respecto a los valores obtenidos de manera experimental. El desempeño mecánico observado valida los cálculos del diseño, alcanzando una velocidad de 299.2 rpm, en comparación de la velocidad angular de 300 rpm obtenida de manera experimental, suficiente para activar el generador eléctrico. La estabilidad estructural del eje fue adecuada durante todos los ensayos y se pudo determinar un torque de 0.39 N-m durante las pruebas experimentales y de 0.42 N-m en el modelo. Se puede observar que el modelo predice adecuadamente la

velocidad angular y el torque del sistema, mostrándose una desviación del 0.26% y 7.69%, respectivamente.

Conclusión

Se construyó un prototipo didáctico de una turbina Pelton para la generación de electricidad a pequeña escala. Esto fue logrado cuidando cada aspecto del diseño: desde los cangilones, la boquilla y la reducción de fricción hasta el sellado del sistema. Aunque la potencia generada por el sistema se limita por el momento a encender una serie de focos led, esta puede funcionar sin problemas cuando el sistema opera a 75% y 100% de carga. Además, el prototipo permite visualizar de manera práctica la relación entre caudal, altura y velocidad angular, facilitando la enseñanza de conceptos clave de conversión de energía mecánica a eléctrica.

El desarrollo del prototipo de turbina Pelton representa una herramienta didáctica integral para la formación de estudiantes en ingeniería mecánica, eléctrica y mecatrónica. Su implementación permite la aplicación práctica de conceptos teóricos sobre fluidos, conversión de energía y sistemas de generación eléctrica. Además, fomenta el aprendizaje basado en la experimentación, la observación de fenómenos físicos reales y la validación de modelos teóricos, fortaleciendo competencias en diseño, análisis y control de sistemas energéticos. Este prototipo también contribuye a la educación en energías renovables, al promover la conciencia sobre el uso sostenible de los recursos hídricos y su potencial en la micro generación eléctrica.

Como trabajo futuro se tiene considerado identificar los parámetros de diseño y operación que ayuden a optimizar el sistema y obtener las mejores prestaciones energéticas. Además, colocar sensores de caudal y presión que permitan monitorear en tiempo las condiciones de operación para tener una mejor caracterización y desempeño energético del sistema.

En conjunto, el prototipo cumple su propósito didáctico y sienta bases para investigaciones posteriores orientadas tanto a la enseñanza como a la microgeneración empleando energías renovables.

Referencias

- Cornaglia de la Cruz, P. S. (2018). En busca del calor perdido: Efecto Seebeck y materiales termoelectricos.
- Rayón Encinas, E., & López Martínez, J. (2020). Propiedades termoelectricas de los materiales. Efecto Seebeck y Peltier. Fundamentos teóricos y propuesta experimental.
- Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectricos. *Scientia et technica*, 1(34).
- Yepez-López, I., Villalvazo-Laureano, E., Flores-Benítez, R., & Pérez-González, M. A. (2019). Activación de cargas eléctricas a través de comandos de voz vía módulo HC-05 y Arduino. *Conciencia Tecnológica*, (57).0
- Herranz, J. C. H. (2015). Una mirada al mundo Arduino. *Tecnología y desarrollo*, 13, 21.
- Tirado, J. S., & Amaya, M. T. MONITOREO DE PRESION Y TEMPERATURA EN UN NEONATAL POR MEDIO DE ARDUINO.
- Cornaglia de la Cruz, P. S. (2018). En busca del calor perdido: Efecto Seebeck y materiales termoelectricos.
- Talenas Bustamante, A. J. (2018). IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DOMÓTICO CON TECNOLOGÍA ARDUINO EN APP INVENTOR PARA MEJORAR EL CONTROL DE TEMPERATURA E ILUMINACIÓN DEL HOTEL SAN LUIS EN AMARILIS.
- Lozano, R. (2020, 5 julio). Medir temperatura con termopar tipo K y MAX6675. Recuperado de <https://www.taloselectronics.com/blogs/tutoriales/medir-temperatura-con-termopar-tipo-k-y-max6675>
- Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medición de temperatura: sensores termoelectricos. *Scientia et technica*, 1(34).
- Chiavenato, I. (2013). *Teoría general de la administración*. MCGRAW-HILL INTERAMERICANA-MUA.
- Fayol, H. (1971). *Administración industrial y general: previsión, organización, mando, coordinación, control* (Vol. 11). Editorial Universitaria.
- Cáceres Hernández, A. A., Vásquez Romero, R. R., & Funes Martínez, C. M. (2003). Diseño de un horno para tratamientos térmicos enfocado a la industria cerámica.
- Castro Vizcaíno, Á. (2022). Almacenamiento térmico de frío en materiales de cambio de fase. Aplicación a una cámara frigorífica industrial.
- Cherres Fajardo, D. A., & Ñauta Chuisaca, J. J. (2015). *Estudio de Implementación del sistema de mantenimiento predictivo en la compañía Ecuatoriana del Caucho Erco* (Bachelor's thesis).