



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO**

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE
GUASAVE**

T E S I S

**DISEÑO MECÁNICO E HIDRÁULICO DE UNA TURBINA
TIPO PELTON PARA UN MÓDULO DIDÁCTICO EDUCATIVO
PARA LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA EN EL
TECNM CAMPUS GUASAVE**

presentada por

Sharon Guadalupe Aguilar Aviles

como requisito para la obtención del grado de

Ingeniería Mecánica

Director de tesis

M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal

Codirector de tesis

Dr. Juan Héctor Alzate Espinoza

Guasave, Sinaloa, México. Febrero de 2026.



	LIBERACIÓN DE PROYECTO PARA TITULACIÓN INTEGRAL PLAN 2015		Responsable: Jefatura de División de Ciencias
	Referencia a la Norma: ISO 9001:2015 8.1;8.2.1;8.2.2;8.2.3;8.5.1;8.5.2;8.6;8.7.2		Código: ITSG-SIG-AO-PO-19-03
	Referencia a la Norma: ISO 21001:2018 8.1;8.1.1;8.1.2;8.2.1;8.2.2;8.2.3;8.3.3;8.3.4;8.6;8.7;9.1.2		Revisión: 5
			Fecha de Emisión: Julio 2025
			Página 1 de 3

Guasave, Sinaloa, Fecha: 01 DE FEBRERO DE 2026
ASUNTO: Liberación de proyecto para titulación integral

ING. LAURA BEATRIZ INZUNZA RAMÍREZ
COORDINACIÓN DE TITULACIÓN
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del estudiante y/o egresado(a):	Sharon Guadalupe Aguilar Aviles
Carrera:	Ingeniería Mecánica
Número de control:	2125010035
Nombre del proyecto:	Diseño mecánico e hidráulico de una turbina tipo pelton para un módulo didáctico educativo para la carrera de Ingeniería Mecánica en el Tecnm campus Guasave
Producto:	Tesis

Solo para la Opción de tesis:

Estudiante y/o egresado(a):

CURP	AUAS031123MSLGVHA5
------	--------------------

Asesor(a):

Nombre completo	M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal
CVU	868766

Agradezco de antemano su valioso apoyo en esta importante actividad para la formación profesional de nuestros(as) egresados(as).

ATENTAMENTE

Dr. Jesús Guadalupe Delgado Félix

Nombre y firma del (de la) Jefe(a) de División de Ciencias Mecánicas

M.I. Malcom Irving Villanueva Portugal
Nombre y firma del Asesor(a)

Juan Héctor Alzate E.
Dr. Juan Héctor Alzate Espinoza
Nombre y firma del Revisor(a)

Ing. Jesús Alberto Machado Coronado
Nombre y firma del Revisor(a)

* solo aplica para el caso de tesis y tesina

C. c. p. Expediente

Departamento de Centro de Recurso para el Aprendizaje e Innovación.

DEDICATORIA

Con gratitud y humildad, este trabajo está dedicado, en primer lugar, a Dios, por poner en mi vida a quienes fueron parte fundamental de este logro, así como brindarme los medios necesarios para lograrlo.

A mi familia, por su apoyo y constante motivación a lo largo de este camino.

A mi mejor amiga Xiomara Joseline Téllez Heredia, por su amistad incondicional, su confianza en mí y por acompañarme durante toda mi formación académica.

A mis asesores, M.I.M. Malcom Irving Villanueva Portugal y Dr. Juan Héctor Alzate Espinoza, por su guía, paciencia y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, a los revisores, por sus valiosas observaciones y sugerencias, las cuales contribuyeron a mejorar la calidad del documento.

Finalmente, a la institución que me formó académicamente, por proporcionarme las herramientas, conocimientos y oportunidades necesarias para mi desarrollo como profesionalista.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo el diseño mecánico e hidráulico de una turbina para un módulo didáctico educativo. Considerando condiciones de operación representativas de laboratorio, con un salto neto de 1 m y un caudal de 4.36 L/s, se determinó el diámetro del rodete y se realizó el dimensionamiento de sus cangilones. Asimismo, se calcularon parámetros hidráulicos y mecánicos para caracterizar el comportamiento del sistema, incluyendo el diámetro del chorro, la velocidad de chorro, la velocidad periférica y de giro, y su potencia hidráulica. El diseño hidráulico arrojó un diámetro de rodete de 18.83 cm, un diámetro de chorro de 3.05 cm y una velocidad de chorro de 4.43 m/s. El análisis mecánico permitió determinar una velocidad de giro aproximada de 225 rpm, una velocidad periférica de 2.21 m/s y una potencia hidráulica disponible del orden de 42.77 W, con una eficiencia estimada del 70 %, valores compatibles con la aplicación didáctica del módulo. Adicionalmente, se realizó un análisis de fuerzas para evaluar el impacto del chorro sobre el rodete, identificando que los cangilones constituyen la zona sometida a mayores esfuerzos debido al impacto del chorro, siendo por tanto la región con mayor probabilidad de desgaste. Finalmente, se seleccionó PLA como material de referencia para evaluación estructural preliminar y análisis de viabilidad de manufactura, sin fabricación física del prototipo, considerando sus propiedades, precio y facilidad de uso en prototipos educativos. Los resultados obtenidos confirman la factibilidad técnica del diseño y su aplicabilidad, proporcionando un recurso seguro, funcional y realista.

Palabras clave: Turbina Pelton, Diseño de rodete, Dimensionamiento de cangilones, Módulo educativo, Diámetro de chorro

ABSTRACT

The present work aimed at the mechanical and hydraulic design of a turbine for an educational didactic module. Considering laboratory-representative operating conditions, with a net head of 1 m and a flow rate of 4.36 L/s, the runner diameter was determined and the bucket geometry was dimensioned. Additionally, the main hydraulic and mechanical parameters were calculated to characterize the system behavior, including jet diameter, jet velocity, peripheral and rotational speeds, and hydraulic power. The hydraulic design resulted in a runner diameter of 18.83 cm, a jet diameter of 3.05 cm, and a jet velocity of 4.43 m/s. The mechanical analysis allowed the determination of an approximate rotational speed of 225 rpm, a peripheral velocity of 2.21 m/s, and an available hydraulic power of approximately 42.77 W, with an estimated efficiency of 70 %, values consistent with the didactic application of the module. Furthermore, a force analysis was performed to evaluate the jet impact on the runner, identifying the buckets as the components subjected to the highest stresses and, therefore, the most likely region to experience wear. Although physical manufacturing was not carried out, PLA was selected as a reference material for preliminary structural evaluation and manufacturability analysis, considering its properties, cost, and ease of use in educational prototypes. The results confirm the technical feasibility of the design and its applicability as a safe, functional, and realistic educational resource for practical learning in laboratory environments.

Keywords: Pelton turbine, Runner design, Bucket sizing, Educational module, Jet diameter

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.2 JUSTIFICACIÓN	17
1.3 HIPÓTESIS	18
1.3.1 HIPÓTESIS GENERAL	18
1.4 OBJETIVOS	19
1.4.1 GENERAL	19
1.4.2 ESPECÍFICOS.....	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
2.2 MARCO CONCEPTUAL	21
2.2.1 HIDRÁULICA.....	21
2.2.2 ENERGÍA HIDRÁULICA.....	22
2.2.3 TURBINAS HIDRÁULICAS	23
2.2.4 MÁQUINA DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES.....	26
2.3 TURBINA PELTON	26
2.3.1 DEFINICIÓN	26
2.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	27
2.3.3 CENTRAL HIDROELÉCTRICA.....	28
2.4 INSTALACIÓN TÍPICA PELTON	29
2.4.1 INYECTOR	32
2.4.2 AGUJA.....	34
2.4.3 CANGILONES	34

2.4.4	DEFLECTOR.....	35
2.4.5	TOBERA.....	35
2.4.6	BOMBA HIDRÁULICA.....	35
2.5	DISEÑO MECÁNICO	35
2.5.1	CONSIDERACIONES MECÁNICAS PARA TURBINA PELTON.....	36
2.5.2	NÚMERO DE CANGILONES	37
2.5.3	GEOMETRÍA DE CANGILÓN.....	37
2.5.4	DIÁMETRO DEL RODETE.....	38
2.5.5	DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES.....	39
2.6	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE TURBINA.....	43
2.6.1	MATERIALES.....	43
2.6.2	MANUFACTURA	43
2.6.3	FUERZAS DEL SISTEMA	44
2.7	CRITERIOS HIDRÁULICOS	46
2.7.1	VELOCIDAD DE CHORRO	46
2.7.2	POTENCIA	46
2.7.3	EFICIENCIA.....	47
2.7.4	NÚMERO DE REVOLUCIONES ESPECÍFICO DE POTENCIA Y CAUDAL (N_s Y N_q).....	48
2.7.5	ECUACIÓN EULER.....	49
2.7.6	TRIÁNGULOS DE VELOCIDAD EN TURBOMÁQUINAS	49
2.7.7	PRESIÓN MÁXIMA	51
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	52
3.1	ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	52

3.2	VIABILIDAD	52
3.3	INVESTIGACIÓN PRELIMINAR	54
3.4	METODOLOGÍA GENERAL DEL DISEÑO	55
3.5	DESARROLLO DE DISEÑO HIDRÁULICO	56
3.5.1	CONDICIONES DE OPERACIÓN	56
3.5.2	DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD Y DIÁMETRO DE CHORRO	56
3.5.3	CÁLCULO DE POTENCIA	58
3.5.4	SELECCIÓN DE TURBINA	58
3.6	DESARROLLO DE DISEÑO MECÁNICO	58
3.6.1	NÚMERO DE ÁLABES	58
3.6.2	DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES	59
3.6.3	ANÁLISIS DE FUERZAS	59
3.6.4	FUERZA DE TORQUE	60
3.6.5	EFICIENCIA	61
3.6.6	SELECCIÓN DE MATERIAL	61
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	62
4.1	CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO	62
4.2	CÁLCULOS DE CRITERIOS HIDRÁULICOS	62
4.2.1	VELOCIDAD DEL CHORRO	62
4.2.2	DIÁMETRO DE CHORRO	63
4.2.3	CAUDAL REAL	63
4.2.4	POTENCIA	64
4.2.5	NÚMEROS ESPECÍFICOS	64
4.3	CÁLCULOS DE CRITERIOS MECÁNICOS	66

4.3.1	NÚMERO DE ÁLABES.....	66
4.3.2	DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES.....	67
4.3.3	FUERZA EN ÁLABE.....	78
4.3.4	VELOCIDAD ANGULAR.....	78
4.3.5	POTENCIA MECÁNICA	78
4.3.6	TORQUE	79
4.3.7	EFICIENCIA.....	79
4.4	CONDICIONES DE MANUFACTURA.....	80
4.4.1	TIPO DE MANUFACTURA.....	80
4.4.2	SELECCIÓN DE MATERIALES	80
4.5	SIMULACIÓN DE RESULTADOS.....	83
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
6.	REFERENCIAS.	91
7.	ANEXOS.....	94
7.1	ENCUESTA DE VIABILIDAD	94
7.2	ARTÍCULO CIENTÍFICADO DERIVADO	95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Eventos históricos de la hidráulica.	22
Figura 2-2: Potencial Hidroeléctrico Mundial.	23
Figura 2-3: Clasificación de turbinas.	24
Figura 2-4: Aplicación de Turbinas hidráulicas.	24
Figura 2-5: Aplicación de Turbinas hidráulicas.	25
Figura 2-6: Esquema típico de una turbina de acción.	25
Figura 2-7: Imagen real de una Turbina Pelton.	27
Figura 2-8: Esquema simple de funcionamiento de la turbina Pelton.	28
Figura 2-9: Esquema general de un sistema de generación hidráulico.	29
Figura 2-10: Instalación típica de turbinas Pelton.	29
Figura 2-11: Esquema de un inyector en una tobera para una turbina Pelton.	30
Figura 2-12: Esquema de Componentes en una Turbina tipo Pelton.	31
Figura 2-13: Vista lateral de un sistema con turbina Pelton.	32
Figura 2-14: Representación de inyector.	32
Figura 2-15: Turbina Pelton con 6 inyectores.	33
Figura 2-16: Representación de cangilón.	34
Figura 2-17: Diseño general de una turbina Pelton.	36
Figura 2-18: Rodete Pelton con representación de velocidad tangencial.	37
Figura 2-19: Ángulos Pelton.	38
Figura 2-20: Representación de diámetro y simbología.	38
Figura 2-21: Dimensionamiento del cangilón.	42
Figura 2-22: Tipos de manufactura para turbinas Pelton.	43
Figura 2-23: Impacto de fuerzas en el rodete.	44
Figura 2-24: Representación de la fuerza del chorro en la cuchara.	44
Figura 2-25: Fuerzas del chorro.	45
Figura 2-26: Velocidades actuantes en el cangilón.	45
Figura 2-27: Triángulos de velocidad a la entrada del rodete.	49
Figura 2-28: Triangulo de velocidades y radio de giro.	50

Figura 3-1: Interfaz de la calculadora de tamaño de muestra.....	52
Figura 3-2: Resultado de aplicación de encuestas.	53
Figura 3-3: Diagrama de flujo del procedimiento metodológico.....	55
Figura 3-4: Representación transversal de chorro.....	57
Figura 4-1: Planos 2D con medidas de álabes y rotor en INVENTOR 2024 ®.....	67
Figura 4-2: Guía de dimensiones del álabe.....	68
Figura 4-3: Boceto 1 del álabe en Inventor.....	69
Figura 4-4: Boceto 2 del álabe.....	69
Figura 4-5: Boceto 3.....	70
Figura 4-6: Boceto 4.....	70
Figura 4-7: Boceto 5.....	71
Figura 4-8: Boceto 6.....	71
Figura 4-9: Boceto 7.....	71
Figura 4-10: Boceto 8.....	72
Figura 4-11: Boceto 9.....	72
Figura 4-12: Boceto 10.....	72
Figura 4-13: Boceto 11.....	73
Figura 4-14: Boceto 12 del álabe en Inventor.....	73
Figura 4-15: Secuencia de operaciones realizadas para el modelado del álabe.....	74
Figura 4-16: Propiedades físicas del álabe.....	75
Figura 4-17: Secuencia de operaciones realizadas para el modelado del rodete. ...	75
Figura 4-18: Propiedades físicas del rodete.....	76
Figura 4-19: Secuencia de operaciones realizadas para el ensamblaje de la turbina.	76
Figura 4-20: Planos 2D con medidas de turbina Pelton y representación en INVENTOR 2024 ®.	77
Figura 4-21: Propiedades físicas de la turbina.	77
Figura 4-22: Precio acero inoxidable AISI 304.	80
Figura 4-23: Precio PLA reforzado.	81
Figura 4-24: Apariencia de turbina con material plástico.....	82

Figura 4-25: Apariencia de turbina con acero.....	82
Figura 4-26: Asignación de geometría fija.	84
Figura 4-27: Asignación de fuerza de impacto.	84
Figura 4-28: Condiciones de malla para el análisis.	85
Figura 4-29: Análisis de fuerza para el Acero.....	85
Figura 4-30: Análisis de fuerza para el material plástico.	85
Figura 4-31: Tensión de Von Mises en rodete.....	86
Figura 4-32: Esfuerzos de desplazamiento respecto a eje.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Número de cangilones en función de la relación diámetro del rodete / diámetro del chorro.	39
Tabla 2-2: Número de cangilones en función diámetro del chorro / diámetro Pelton.	40
Tabla 2-3: Tabla de dimensionamiento del cangilón según OLADE.	40
Tabla 2-4: Tabla de dimensionamiento del cangilón según NECHLEBA.	41
Tabla 2-5: Tabla de dimensionamiento del cangilón según THAKE.	41
Tabla 4-1: Resultados finales hidráulicos para módulo de prácticas.	65
Tabla 4-2: Valores del diseño en Software.	69
Tabla 4-3: Parámetros para módulo de prácticas.	79
Tabla 4-4: Desempeño hidráulico-mecánico para el rodete Pelton del módulo didáctico.	87

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 7-1: Encuesta sobre el diseño del rodete Pelton en Autodesk.	94
--	----

1. INTRODUCCIÓN

En la formación de ingenieros mecánicos, la comprensión de los fenómenos hidráulicos y mecánicos en máquinas de fluidos requiere la integración de teoría y práctica para analizar su comportamiento real. El estudio de turbinas hidráulicas en entornos educativos favorece la comprensión de los procesos de conversión energética en sistemas de pequeña escala. En este sentido, Reyna et al. (2019) destacan que este tipo de análisis resulta fundamental en la enseñanza de la ingeniería, siendo la turbina tipo Pelton una de las más representativas por su simplicidad constructiva y su operación basada en la energía cinética del chorro (Petrazzini y Reyna, 2018).

No obstante, en el ámbito educativo persiste una brecha entre la teoría y la práctica en el estudio de las turbomáquinas, atribuida principalmente a la limitada disponibilidad de infraestructura experimental y de diseños técnicos bien documentados. Esta carencia restringe el análisis de parámetros fundamentales como el desempeño hidráulico, las fuerzas actuantes y la eficiencia, lo que impacta negativamente en la formación práctica de los estudiantes de ingeniería (Ambrosini Cabrera & Brito Arrieta, 2020; Lema Neto & Oto Toaquiza, 2023).

Frente a esta problemática, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño de una turbina tipo Pelton, orientado a la determinación de los principales parámetros geométricos y operativos del sistema, tales como el diámetro del rodete, el dimensionamiento de los cangilones y las condiciones hidráulicas de operación, con el fin de obtener un diseño funcional, seguro y técnicamente viable para su aplicación en prácticas de laboratorio a escala.

El documento se estructura en cinco capítulos: el primero presenta el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos; el segundo desarrolla el marco teórico; el tercero describe los materiales y métodos empleados; el cuarto presenta el análisis y discusión de los resultados, y finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones del estudio.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la carrera de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico Superior de Guasave, las asignaturas del área de hidráulica y máquinas de fluidos contemplan el análisis teórico y matemático del comportamiento de sistemas hidráulicos, incluyendo el estudio de turbinas. Sin embargo, la limitada disponibilidad de infraestructura experimental dificulta la validación física de los modelos matemáticos y principios hidráulicos abordados en el aula, lo que restringe la comprensión integral de estos fenómenos y el análisis de parámetros fundamentales como el caudal, la velocidad, la potencia, la eficiencia y las fuerzas actuantes, esenciales para la formación técnica en el área de máquinas de fluidos.

Actualmente, el laboratorio de Ingeniería Mecánica cuenta únicamente con un módulo didáctico de hidráulica enfocado en sistemas de tuberías, el cual no se encuentra operativo, lo que reduce las oportunidades de experimentación y limita el desarrollo de habilidades prácticas asociadas a la validación experimental de conceptos hidráulicos. Como consecuencia, el proceso de enseñanza-aprendizaje se ve restringido a un enfoque predominantemente teórico.

Ante esta situación, se plantea la necesidad de desarrollar un diseño para el componente, destinado a integrarse en un módulo didáctico orientado a prácticas de laboratorio en el área de hidráulica. Dicho módulo permitiría la validación experimental de los modelos teóricos estudiados en clase, facilitando el análisis de parámetros hidráulicos y mecánicos bajo condiciones controladas y representativas del entorno académico, quedando su manufactura e implementación como una etapa posterior al presente trabajo.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del diseño para una turbina de tipo Pelton para un módulo didáctico se justifica por la necesidad de fortalecer la relación aprendizaje-práctica, particularmente en las asignaturas del área de hidráulica y máquinas de fluidos dentro de la licenciatura de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico Superior de Guasave. La oportunidad de realizar más actividades con elementos del ámbito industrial permite a los estudiantes desarrollar habilidades funcionales como el uso de instrumentos de medición, identificación de elementos de potencia y distribución de agua, visualización del funcionamiento de centrales energéticas reales y la realización de cálculos en busca de pérdidas y eficiencias generales.

La investigación contribuye de manera indirecta, al presentar la base de manufactura para un dispositivo que se pretende añadir, considerando el diseño de su elemento principal y un panorama general del sistema con enfoque mecánico. El diseño de esta turbina servirá como base para futuras prácticas académicas, trabajos de investigación o ejercicios de simulación, fomentando el aprendizaje significativo y la motivación hacia la aplicación de los conocimientos.

Es conveniente desarrollar la investigación para minimizar los impactos ambientales y económicos del proyecto, el enfoque digital reduce considerablemente la generación de residuos, al no involucrar fabricación física en esta etapa, se pueden obtener la cantidad de material preciso a ocupar para la turbina, lo que se alinea con prácticas sostenibles; además, conocer los elementos a utilizar permite una disminución del costo total del módulo, la selección de materiales con buena relación calidad-precio y su validación mediante software de análisis para los objetivos que se buscan.

La no realización de este proyecto implicaría pérdida para que el estudiantado desarrolle claridad respecto al análisis de componentes hidráulicos. Además, se dejaría de generar una herramienta académica que podría enriquecer el proceso educativo del programa considerado.

1.3 HIPÓTESIS

La presente investigación se desarrolla bajo el supuesto de que es posible diseñar una turbina tipo Pelton que cumpla con criterios técnicos y académicos adecuados para su aplicación en un entorno educativo. Para ello, se plantean la siguiente hipótesis:

1.3.1 HIPÓTESIS GENERAL

El diseño mecánico e hidráulico de una turbina tipo Pelton para un módulo didáctico educativo, basado en parámetros analíticos y criterios clásicos de diseño, permite alcanzar una eficiencia hidráulica igual o superior al 60 % bajo las condiciones de operación propuestas, garantizando un funcionamiento adecuado, seguro y técnicamente viable para su uso en prácticas de laboratorio.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 GENERAL

Diseñar mecánica e hidráulicamente una turbina tipo Pelton integrada a un módulo didáctico educativo, mediante el análisis de parámetros técnicos que permitan evaluar su viabilidad y eficiencia bajo las condiciones de operación propuestas.

1.4.2 ESPECÍFICOS.

- Evaluar la factibilidad técnica y académica de la implementación de un módulo didáctico de turbinas hidráulicas en un entorno educativo.
- Determinar los parámetros hidráulicos de operación requeridos para el funcionamiento de la turbina tipo Pelton bajo las condiciones establecidas.
- Calcular los parámetros mecánicos del diseño de la turbina tipo Pelton, considerando dimensiones y materiales.
- Modelar tridimensionalmente la turbina tipo Pelton correspondiente.
- Analizar el comportamiento estructural del diseño propuesto mediante simulaciones de esfuerzos, a fin de validar su integridad mecánica.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Diversos estudios han abordado el diseño y aplicación de turbinas tipo Pelton con fines educativos y de pequeña escala, destacando su viabilidad tanto técnica como académica. En el ámbito de los módulos didácticos, Chara Surco, Canaza Choquelluque y Choquelluque (2018) desarrollaron el diseño e implementación de un módulo de turbina Pelton para laboratorios de ingeniería, considerando una altura neta de 6 m y una potencia mecánica de 20 W a 1200 rpm, con una eficiencia estimada del 70 %. Los autores obtuvieron el diseño del rodete con 18 cangilones, así como planos técnicos, guías de funcionamiento y pruebas experimentales, evidenciando la pertinencia del uso de turbinas Pelton como herramienta didáctica. De manera similar, Moral Tejero (2020) realizó el diseño, fabricación y caracterización experimental de una turbina Pelton para uso docente, integrando cálculos teóricos, modelado CAD y validación experimental, lo que permitió comprobar la correspondencia entre los valores teóricos y los resultados obtenidos en pruebas reales. Ambos trabajos coinciden en resaltar la utilidad de las turbinas Pelton como apoyo en la enseñanza de máquinas hidráulicas, aportando criterios metodológicos y de diseño aplicables a la presente investigación.

Desde el enfoque del diseño analítico y geométrico, Sarmiento Rojas (2020) propuso una metodología de diseño paramétrico para turbinas tipo Pelton, validada mediante datos reales de operación de la Central Hidroeléctrica Illuchi II. El autor analizó la influencia de los parámetros geométricos del rodete y de los cangilones sobre la eficiencia hidráulica, determinando ángulos y disposiciones óptimas que maximizan el rendimiento del sistema. Estos criterios de diseño constituyen un soporte teórico relevante para la determinación de los parámetros mecánicos e hidráulicos considerados en el presente trabajo.

Por otro lado, Encarnación Rojas (2021) diseñó y evaluó un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica, empleando herramientas de apoyo

computacional para la selección del tipo de turbina y la determinación de las dimensiones del rodete y del número de cangilones. Los resultados demostraron la viabilidad técnica del uso de turbinas Pelton en sistemas de pequeña escala, alcanzando una potencia de 1.5 hp, lo cual refuerza su aplicabilidad en proyectos académicos y experimentales.

Finalmente, Muciño Álvarez (2024) abordó la caracterización experimental de una turbina Pelton mediante modelos a escala, aplicando criterios de similitud geométrica, cinética y dinámica, así como parámetros adimensionales obtenidos a partir del teorema Pi de Buckingham. Los resultados evidenciaron una adecuada correlación entre el modelo reducido y el modelo físico, permitiendo estimar parámetros como potencia y torque. Este enfoque aporta fundamentos teóricos y experimentales útiles para la validación del comportamiento de turbinas Pelton a escala, aspecto relevante para el análisis del diseño propuesto en esta investigación.

2.2 MARCO CONCEPTUAL

2.2.1 HIDRÁULICA

El origen etimológico de la palabra "Hidráulica" proviene de los términos griegos *hydor* (agua) y *aulos* (tubo, conducción), lo que significa "conducción de agua". En la actualidad, se presta al término Hidráulica un significado más amplio: es el estudio del comportamiento del agua y de otros líquidos, ya sea en reposo, o en movimiento.

La Hidráulica se puede dividir en: Hidráulica general o Teórica (Hidrostática, Hidrocinemática e Hidrodinámica) e Hidráulica Aplicada o Hidrotécnica (Netto & Fernández, 2018).

Esta disciplina abarca el análisis del flujo de líquidos tanto en condiciones estáticas como dinámicas, y es fundamental para el diseño y operación de sistemas de aprovechamiento hidráulico, como las centrales hidroeléctricas (Matarazzo & Sgandurra, 2018).

Figura 2-1

Eventos históricos de la hidráulica.

Inventos	"Autores"	Año	País
Alcantarillado		3750 a.C.	Babilonia
Drenaje	Empédocles	450 a.C.	Grecia
Tornillo de Arquímedes	Arquímedes	250 a.C.	Grecia
Bomba de pistón	Ctesibius / Hero	200/120 A. C.	Grecia
Acueductos romanos		150 a.C.	Roma
Termas romanas		20 a.C.	Roma
Barómetro	E. Torricelli	1643	Italia
Compresor de aire	Otto von Guericke	1654	Alemania
Tubos de hierro fundido moldeado	Johan Jordan	1664	Francia
Bomba centrífuga	Johan Jordan	1664	Francia
Máquina de vapor	Denis Papin	1680	Francia
Inodoro	Joseph Bramah	1775	Inglaterra
Turbina hidráulica	Benoit Fourneyron	1827	Francia
Prensa hidráulica	S. Stevin / J. Bramah	1600/1796	Holanda / Inglaterra
Empleo de hélice	John Ericson	1836	Suecia
Grilletes de cerámica extruidos	Francis	1846	Inglaterra
Tubos de hormigón armado	J. Monier	1867	Francia
Central Hidroeléctrica	H. J. Rogers (Thomas Edison)	1882	Estados Unidos
Turbina de vapor	A. Parsons/De Lava	1884/1890	Inglaterra / Suecia
Submarino	J. P. Holland	1898	Estados Unidos
Tubos de cemento amianto	A. Mazza	1913	Italia
Tubos de hierro fundido centrifugado	Arens / de Lavaud	1917	Brasil
Propulsión a chorro	Frank Bianco	1937	Inglaterra
Tubos de PVC		1936	Alemania

Nota. La figura muestra cómo diversos descubrimientos de la hidráulica fueron surgiendo con los años, incluyendo la invención de las turbinas hidráulicas. Tomada de Manual de hidráulica (p. 17), por Netto y Fernández (2018). Editora Blucher.

2.2.2 ENERGÍA HIDRÁULICA

La energía hidráulica es una fuente renovable que aprovecha la energía potencial y cinética del agua en movimiento para generar trabajo mecánico o electricidad. Por ejemplo, la planta hidráulica aprovecha la diferencia de altura ("cabeza hidráulica") y el flujo de agua ("caudal") para accionar turbinas que transforman esa energía en movimiento rotacional, y finalmente en electricidad, con eficiencias que pueden superar el 80 %.

Se considera una de las tecnologías más maduras entre las energías limpias, debido a su eficiencia, confiabilidad operativa y bajo costo de operación una vez instalada la infraestructura (Matarazzo & Sgandurra, 2018).

Figura 2-2

Potencial Hidroeléctrico Mundial.



Nota. La imagen representa la evaluación figurada para el sector hidroeléctrico hasta el año 2050. Tomada de Energía hidráulica y energía mareomotriz (p. 16), por B. O. Fernández, 2019, Editorial Elearning, SL. Copyright 2019 por Editorial Elearning, SL.

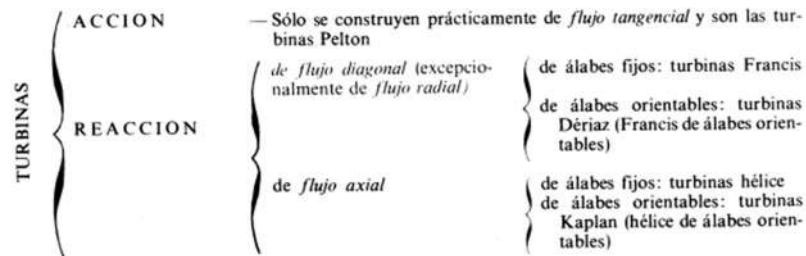
2.2.3 TURBINAS HIDRÁULICAS

La turbina hidráulica es una turbo maquina motriz que recoge la energía cedida por el fluido que la atraviesa, y la transforma en energía mecánica (Canaza Choqueluque y Chara Surco, 2018). El principio básico radica en la transformación de la energía potencial y cinética del agua que fluye bajo ciertas condiciones controladas para mover un rotor o rodete (Kumar, 2018).

Estas máquinas se clasifican en dos grandes grupos según el principio de funcionamiento: turbinas de acción (o impulso) y turbinas de reacción. Las turbinas de acción son aquellas en las que el fluido no sufre un cambio de presión importante a través del rodete y las de reacción justo al contrario, estas si sufren un cambio de presión significativo a su paso por el rodete (Moral Tejero, 2020).

Figura 2-3

Clasificación de turbinas.

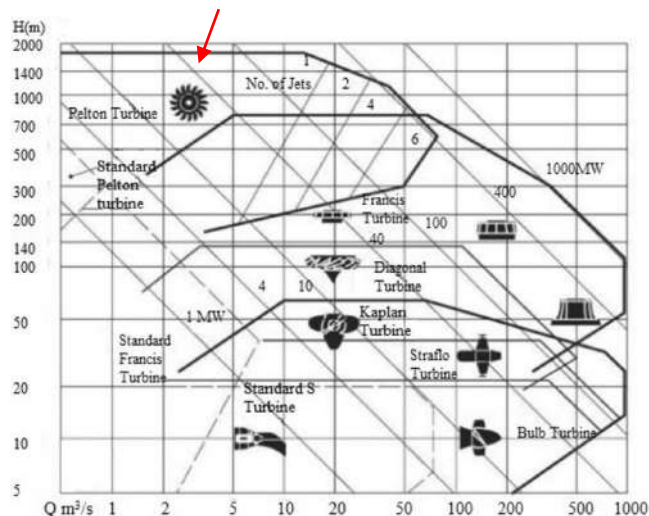


Nota. Hay turbinas de acción y reacción que se clasifican en cuanto a su flujo, entre ellas: Francis, Dériaz, Kaplan y Pelton. Tomada de Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (p. 215), por C. Mataix (1986), Ediciones del Castillo.

Las turbinas de reacción operan con el rotor completamente sumergido y aprovechan tanto la presión como la velocidad del agua para generar trabajo, ejemplos típicos incluyen las turbinas Francis y Kaplan. Por otro lado, las turbinas de impulso convierten toda la energía potencial en energía cinética mediante una tobera o chiflón, de modo que el rotor recibe únicamente el impacto del chorro de agua a presión atmosférica (Kholifah et al., 2018).

Figura 2-4

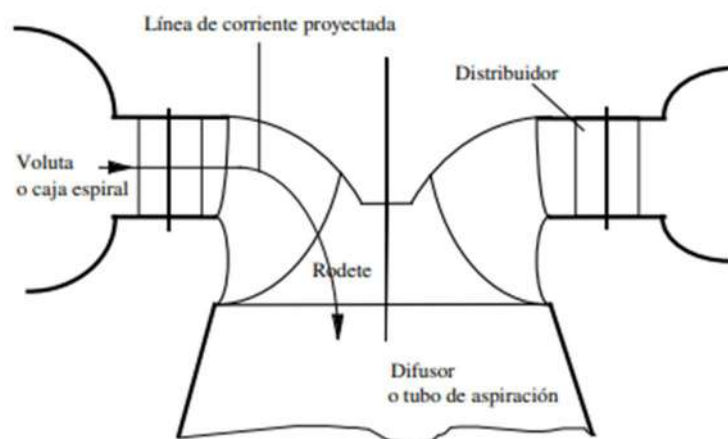
Aplicación de Turbinas hidráulicas.



Nota. En el gráfico de aplicación de turbinas hidráulicas, la H representa la altura neta. Tomado de Sediment erosion on Pelton turbines: A review, por X. Ge, J. Sun, D. Chu, J. Liu, Y. Zhou, H. Zhang, L. Zhang, H. Chen, K. Kan, M. Binama, & Y. Zheng, 2023, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00880-y>

Figura 2-5

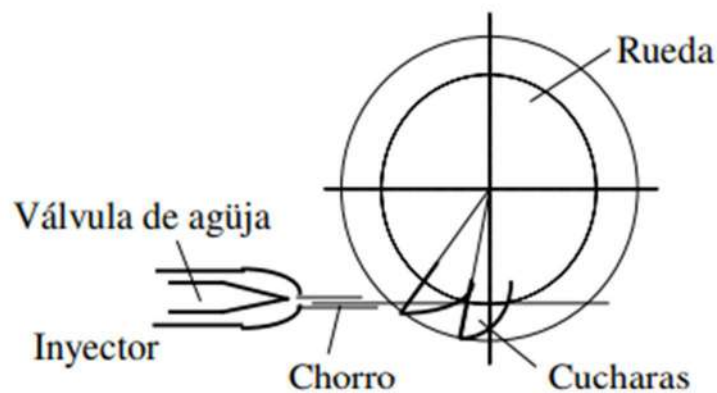
Aplicación de Turbinas hidráulicas.



Nota. La imagen corresponde a una turbina Francis típica, considerada como una turbina de reacción. Tomado de Máquinas hidráulicas (p. 8), por B. Z. Parra y A. V. Robles, 2016, CRAI UPCT.

Figura 2-6

Esquema típico de una turbina de acción.



Nota. La imagen corresponde a una turbina tipo Pelton, considerada como una turbina de acción. Tomado de Máquinas hidráulicas (p. 8), por B. Z. Parra y A. V. Robles, 2016, CRAI UPCT.

2.2.4 MÁQUINA DE FLUIDOS INCOMPRESIBLES

La mecánica de fluidos es la rama de la ingeniería que estudia el comportamiento de los fluidos, ya sean líquidos o gases, en reposo o en movimiento, analizando propiedades como densidad, viscosidad y presión, así como las fuerzas que actúan sobre ellos y fenómenos de flujo laminar o turbulento. Dentro de este campo, las máquinas de fluidos incompresibles son dispositivos diseñados para transformar la energía de fluidos que mantienen prácticamente constante su volumen —como los líquidos— en trabajo mecánico útil o para transmitir energía al fluido. Estos sistemas permiten controlar variables de proceso como presión, flujo y temperatura, y su operación se estudia mediante instrumentos como medidores de orificio, válvulas reguladoras y tuberías diseñadas específicamente para flujos incompresibles (Navarro Soto, Velázquez Vázquez, & Castillo Sánchez, 2022).

2.3 TURBINA PELTON

2.3.1 DEFINICIÓN

Son turbinas de acción en las que los conductos de agua llamados (toberas) conducen el agua hacia la rueda Pelton, transformando la energía de presión en energía cinética; estas pueden tener entre una y seis toberas, y puede tener hasta dos rodetes, cada tobera cuenta con una válvula la cual regula el paso del fluido hacia la turbina (Ángel & Gómez Cortés, 2020).

La turbina Pelton es la principal representante de las turbinas de impulso, diseñada para condiciones de altas caídas y bajos caudales, fue desarrollada por Lester Allan Pelton en el siglo XIX y logró que se patente en el año 1889. Es ampliamente utilizada en centrales hidroeléctricas de montaña y sistemas experimentales para la enseñanza del comportamiento hidráulico (Ge et al., 2023).

Figura 2-7

Imagen real de una Turbina Pelton.



Nota. Adaptado de Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Pelton para uso docente (Moral-Tejero, 2020), CREA UJA. <https://crea.ujaen.es/items/61866f3f-af2d-4274-b749-cb8fa2ea46d8/full>

2.3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

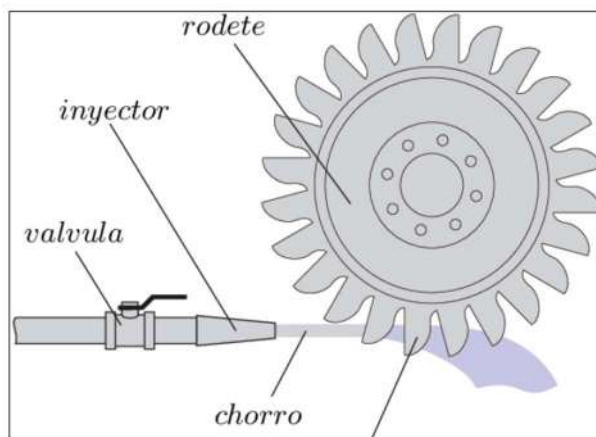
La tobera o inyector lanza directamente el chorro de agua contra la serie de paletas en forma de cuchara montadas alrededor del borde de una rueda, el doble de la distancia entre el eje de la rueda y el centro del chorro de agua se denomina diámetro Pelton. El agua acciona sobre las cucharas intercambiando energía con la rueda en virtud de su cambio de cantidad de movimiento, que es casi de 180° (Palacios Pinto, 2016).

El rotor, también llamado rodete, constituye uno de los componentes clave en la conversión de energía hidráulica en energía mecánica. Este se conecta a la rueda motriz, la cual está unida a las cazoletas. Las cazoletas, conocidas también como

álabes o cangilones, reciben el chorro de agua de manera tangencial, lo que provoca la rotación del rodete (Rojas, 2021).

Figura 2-8

Esquema simple de funcionamiento de la turbina Pelton.



Nota. Adaptado de Diseño y evaluación de un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica (Rojas, 2021), Repositorio UNPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9357>

El movimiento tangencial se genera gracias al distribuidor, que crea un chorro o chiflón, en el cual la carga total del fluido se convierte en una alta velocidad al salir. Además, la tubería forzada suele ser bastante larga, por lo que su diseño contempla diámetros grandes para evitar pérdidas de carga del fluido entre el estanque y el distribuidor. (Barona Zamora y Dávila Chicaiza, 2018)

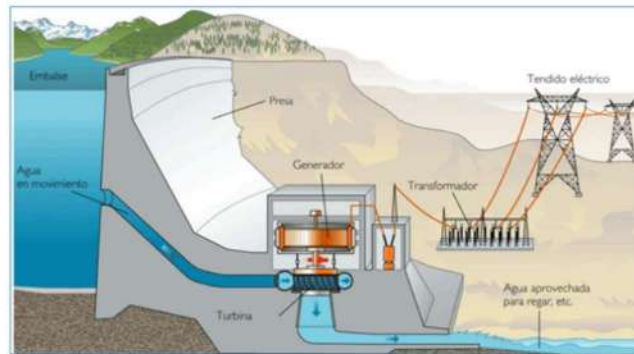
2.3.3 CENTRAL HIDROELÉCTRICA

Instalación destinada a la generación de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de la energía potencial y cinética del agua, conformada por un conjunto de obras hidráulicas y equipos electromecánicos —tales como presa o captación, desarenador, cámara de carga, sistema de aducción, turbina, generador, transformador, subestación y línea de transmisión— que permiten una operación

flexible y una rápida respuesta ante las variaciones de la demanda eléctrica (Atarama Gálvez & Cevallos Alarcón, 2023).

Figura 2-9

Esquema general de un sistema de generación hidráulico.



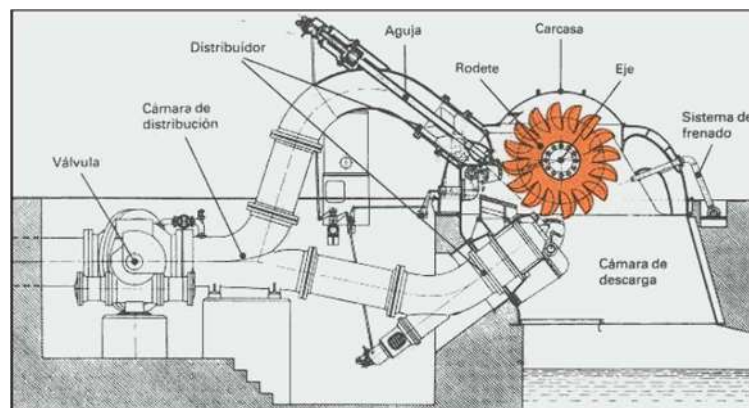
Nota. Tomada de Mejora de la operación de una turbina de generación hidráulica mediante el rediseño del rodete Pelton (tesis de licenciatura), por J. R. Atarama Gálvez y J. B. Cevallos Alarcón (2023), Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <http://hdl.handle.net/10757/671392>

2.4 INSTALACIÓN TÍPICA PELTON

Una instalación típica de turbinas Pelton consta de múltiples elementos, como lo son: el chorro, rotor, cangilones, eje, carcasa, inyector y deflector.

Figura 2-10

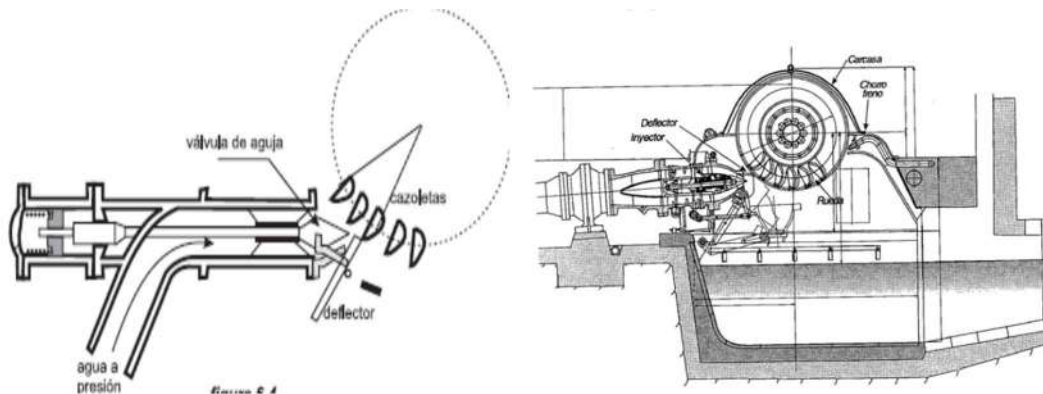
Instalación típica de turbinas Pelton.



Nota. El diseño de una turbina Pelton no solo incluye datos referentes a su diámetro, chorro y número de álabes, sino también de su posición en instalaciones hidráulicas. Tomada de Energía renovable con micro turbina Pelton (tesis de licenciatura), por M. V. Petrazzini (2018).

Figura 2-11

Esquema de un inyector en una tobera para una turbina Pelton.



Nota: El agua a presión hace que la turbina gire acorde a un eje y produzca suficientes revoluciones para su intervención en el sistema de generación de energía. Tomada de Diseño y desarrollo de un sistema hidrogenerador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton (tesis de licenciatura), por Á. G. Ángel y H. R. Gómez Cortés (2020), Universidad Antonio Nariño. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2221>

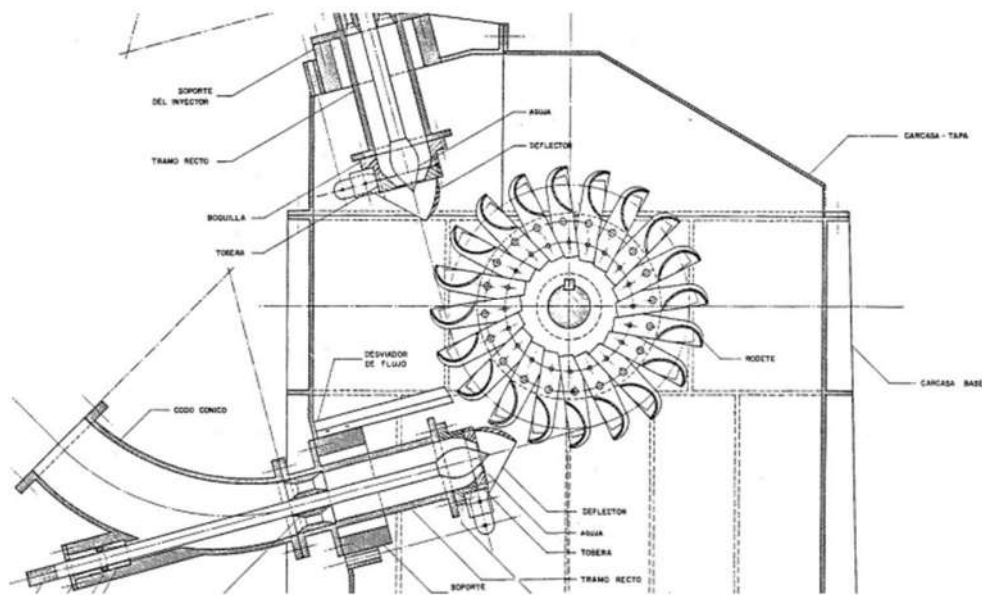
Los componentes de una turbina son similares a los de una bomba, pero se encuentran organizados en sentido inverso. En el caso de la turbina Pelton, sus principales partes son (Canaza Choqueluque & Chara Surco, 2018):

1. Cámara de distribución: espacio donde se canaliza el flujo de agua hacia la turbina.
2. Aguja: funciona como distribuidor de la turbina Pelton, transformando la presión del agua en energía cinética. Está compuesta por la tobera y la válvula de aguja.
3. Tobera: conducto que dirige el chorro de agua hacia el rodete.

4. Regulador: se mueve longitudinalmente y, junto con la boquilla y la aguja, está generalmente fabricado en acero muy duro. Sin embargo, si el agua contiene arena, estas piezas pueden desgastarse después de unas 4,000 horas de operación y requieren reemplazo.
5. Rodete: mientras que las bombas centrífugas tienen flujo hacia el exterior, las turbinas centrípetas como la Pelton reciben el flujo hacia el interior del rodete.
6. Cangilones: capturan la energía del chorro de agua.
7. Carcasa: protege la estructura de la acción destructiva del chorro desviado; en algunos casos se utilizan bloques de granito con la misma función.
8. Eje: transmite la energía mecánica del rodete a los sistemas externos.
9. Descarga: salida del agua después de haber pasado por el rodete.

Figura 2-12

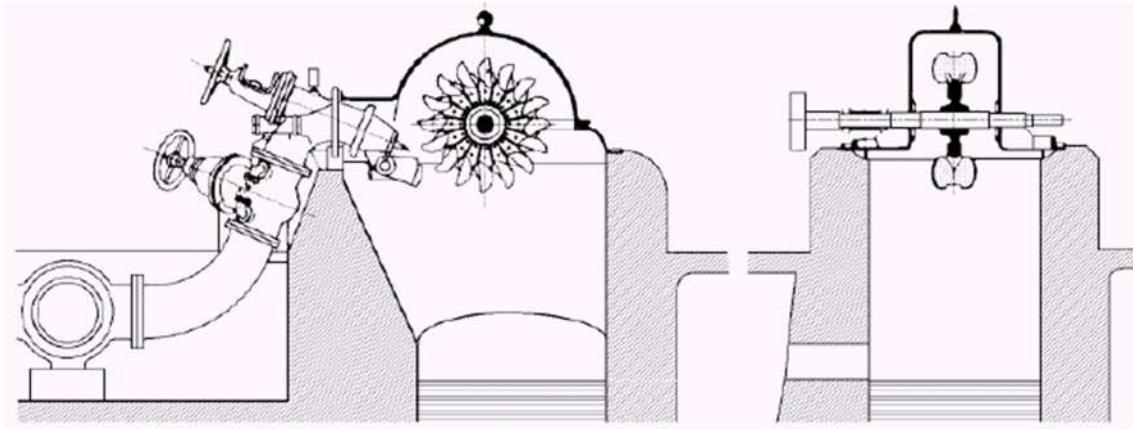
Esquema de Componentes en una Turbina tipo Pelton.



Nota. Se observan los principales componentes dispuestos en un sistema con una turbina tipo Pelton. Adaptado de Sarmiento Rojas (2020), Repositorio Digital EPN.

Figura 2-13

Vista lateral de un sistema con turbina Pelton.



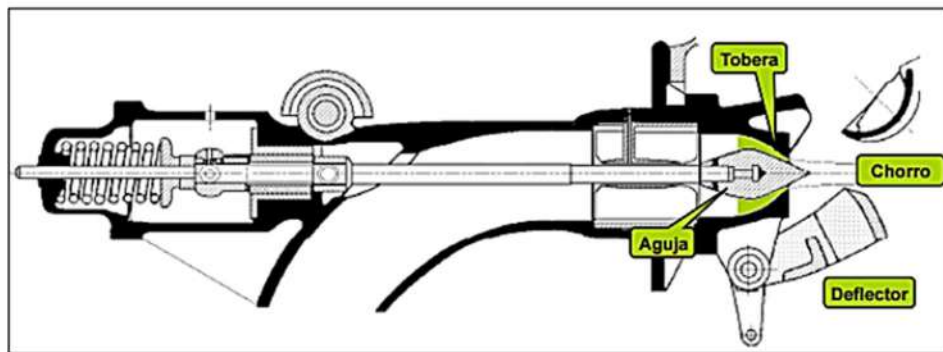
Nota. Tomada de Hidromecánica y energías alternas (seminario), Instituto Politécnico Nacional (s. f.), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1480/Tesis-%20Respaldo1hidomecanica.pdf>

2.4.1 INYECTOR

El inyector es el elemento encargado de convertir la energía de presión del fluido en energía cinética, regulando al mismo tiempo el caudal que ingresa a la turbina. Su función principal es transformar el flujo presurizado proveniente del conducto de alimentación en un chorro de alta velocidad a presión atmosférica, el cual es dirigido de manera tangencial hacia el rodete. Este sistema está compuesto esencialmente por una válvula de aguja que se desplaza axialmente dentro de una tobera, cuyo movimiento es controlado por un vástago accionado mediante un servomotor, permitiendo así la regulación del caudal a turbinar (Petrazzini, 2018).

Figura 2-14

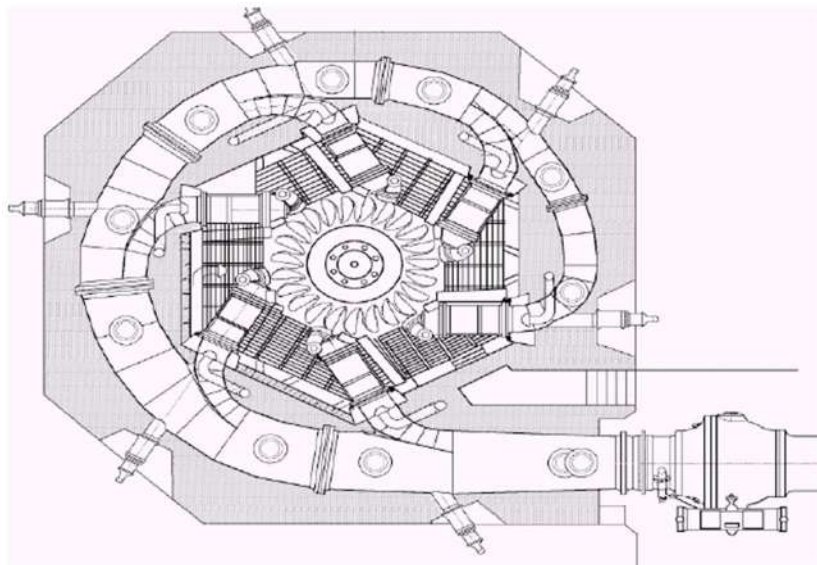
Representación de inyector.



Nota. Tomada de Diseño de un sistema de control de velocidad de una turbina Pelton en la central hidroeléctrica Buenos Aires Niepos usando algoritmo PI digital (tesis de pregrado), por Sánchez Serrano, E. J. (2018), Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/1637>

Figura 2-15

Turbina Pelton con 6 inyectores.



Nota. Tomada de Hidromecánica y energías alternas (seminario), Instituto Politécnico Nacional (s. f.), Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Zacatenco. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1480/Tesis-%20Respaldo1hidomecanica.pdf>

2.4.2 AGUJA

Elemento cilíndrico de acero de alta dureza ubicado de forma concéntrica en el interior del cuerpo de la tobera, el cual se encuentra guiado mediante cojinetes que permiten su movimiento alternativo de desplazamiento longitudinal en ambos sentidos (Sánchez Serrano, 2018).

2.4.3 CANGILONES

En la turbina Pelton, el chorro de agua incide de manera tangencial sobre el rodete. El componente encargado de recibir el chorro en su arista central, donde este se divide en dos corrientes que se desplazan por la cavidad interna hasta abandonar la cazoleta tras recorrer un ángulo cercano a los 180° , recibe el nombre de cazoleta. Su geometría característica de doble cuchara permite equilibrar los empujes axiales generados por el cambio de dirección del flujo, mejorando así la estabilidad del funcionamiento de la turbina (Basurto, 2018).

Figura 2-16 Representación de cangilón.

Representación del cangilón.



Nota. Tomada de Turbo máquinas motoras (pp. 8, 15–18), por Basurto, J. C. (2018).

2.4.4 DEFLECTOR

Es el dispositivo metálico de regulación utilizado en turbinas Pelton que actúa mediante la desviación del chorro de agua. Al interponerse parcialmente en la trayectoria del chorro, el deflector lo divide y redirige una fracción del caudal fuera del rodete, evitando que impacte sobre las cazoletas y, por tanto, reduciendo la potencia transmitida. Este mecanismo permite controlar transitorios de operación sin interrumpir el caudal en la tubería forzada, contribuyendo a la prevención de sobrepresiones en el sistema hidráulico. (Instituto Politécnico Nacional, s. f.)

2.4.5 TOBERA

Boquilla generalmente provista de un orificio de sección circular, aunque puede adoptar otras geometrías, con un diámetro aproximado que oscila entre 5 y 30 cm, la cual se encuentra instalada en la salida de la cámara de distribución (Sánchez Serrano, 2018).

2.4.6 BOMBA HIDRÁULICA

Una bomba hidráulica (o bomba de agua) es una máquina generadora que trabaja con un fluido en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica. La misión de una bomba es transferir energía a un líquido para permitir su transporte en una instalación (Zarza, 2021).

2.5 DISEÑO MECÁNICO

El diseño mecánico estructural representa otro aspecto importante de la tecnología de las turbinas Pelton. Este se refiere a la funcionalidad y fiabilidad de todos los componentes elementales, incluyendo el distribuidor, el inyector, la rueda, la carcasa de la turbina, entre otros.

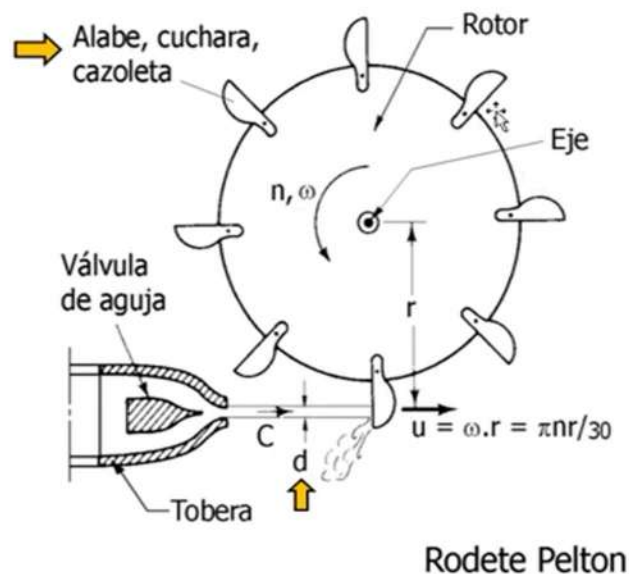
En particular, la carga mecánica periódica de los cangilones Pelton requiere un diseño mecánico seguro y la selección de materiales adecuados. Todos los demás componentes mecánicos, como el servomotor y el deflector, deben ser diseñados de acuerdo con las cargas máximas posibles en términos de fuerzas hidráulicas (Zhang, 2016).

2.5.1 CONSIDERACIONES MECÁNICAS PARA TURBINA PELTON

El rodete de la turbina Pelton constituye el componente clave en el diseño mecánico, ya que es el receptor directo de la energía del chorro de agua. Su eficiencia depende directamente de varios parámetros como el número y la geometría de los cangilones, el material empleado y el diámetro del rodete (Kumar, 2018).

Figura 2-17

Diseño general de una Turbina Pelton.



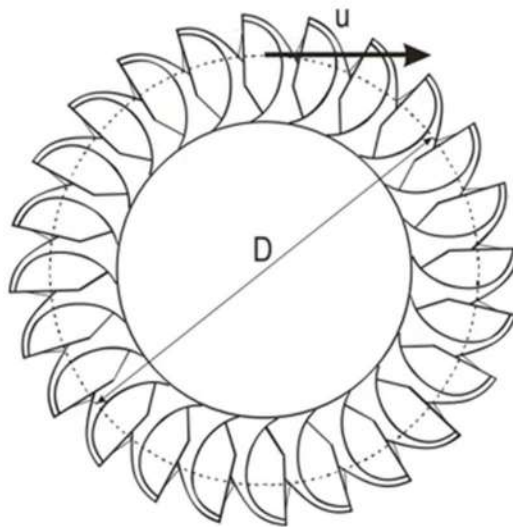
Nota. Tomado de Turbina Pelton ¿Cómo diseñarlo? (Vilca Adco, 2020), [Video], YouTube, <https://youtu.be/w9XHDDVgZHI>

2.5.2 NÚMERO DE CANGILONES

El número de cucharas generalmente oscila entre 18 y 24, valor que depende del diámetro del rodete y de las condiciones hidráulicas para evitar interferencias entre chorros sucesivos y maximizar la eficiencia (Kholifah et al., 2018).

Figura 2-18

Rodete Pelton con representación de velocidad tangencial.



Nota. La D representa el diámetro del rodete, representado por el círculo conformado por los puntos medios de los álabes. Tomado de Turbina Pelton ¿Cómo diseñarlo? (Vilca Adco, 2020), [Video], YouTube, <https://youtu.be/w9XHDDVgZHI>

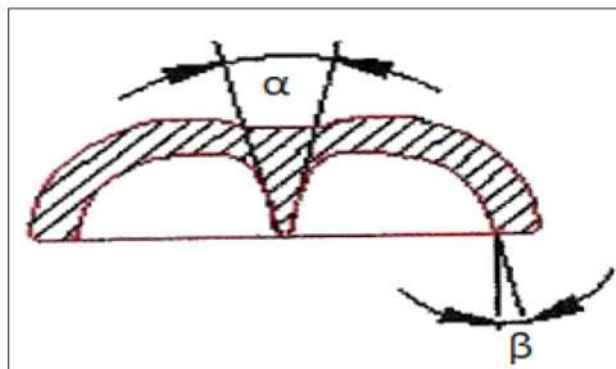
2.5.3 GEOMETRÍA DE CANGILÓN

La forma típica de los cangilones es una doble concha con una arista central que divide el chorro en dos partes iguales, optimizando la transferencia de energía y minimizando pérdidas por turbulencia. De esta forma, cada chorro produce la misma fuerza sobre el rodete, pero en sentido contrario, eliminando la reacción neta en la dirección axial. El diseño preciso de cangilón influye en la trayectoria del agua y en la reducción de

salpicaduras, factores que impactan la vida útil del componente y su eficiencia hidráulica (Ge et al., 2023).

Figura 2-19

Ángulos Pelton.



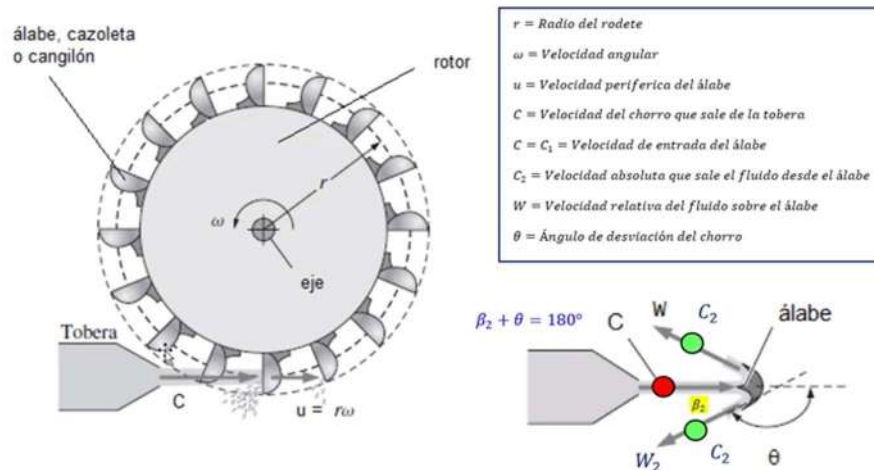
Nota. Adaptado de Diseño y evaluación de un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica (Rojas, 2021), Repositorio UNPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9357>

2.5.4 DIÁMETRO DEL RODETE

El diámetro del rodete es una variable fundamental que se determina en función del caudal, la altura neta de caída y la velocidad específica de la turbina. La velocidad específica es un parámetro que relaciona estos factores y permite dimensionar el rodete para obtener un rendimiento óptimo (Uddin, 2023). En turbinas de impulso, como la Pelton, se utilizan diámetros relativamente grandes para velocidades específicas bajas, optimizando la conversión energética y reduciendo pérdidas por fricción y turbulencia.

Figura 2-20

Representación de diámetro y simbología.



Nota. Tomado de Turbina Pelton ¿Cómo diseñarlo? (Vilca Adco, 2020), [Video], YouTube, <https://youtu.be/w9XHDDVgZHI>

2.5.5 DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES

El diseño y dimensionamiento de los cangilones de una turbina Pelton ha sido abordado mediante distintas metodologías desarrolladas y documentadas en la literatura especializada. Entre las más representativas se encuentran las propuestas por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), así como los enfoques planteados por Nechleba y Thake, las cuales han sido ampliamente referenciadas debido a su aplicabilidad y fundamentos técnicos (Ceballos Zuluaga et al., 2023).

Tabla 2-1

Número de cangilones en función de la relación diámetro del rodete / diámetro del chorro.

D_p/d_o	k_U	Número de cangilones	
		Z_{min}	Z_{max}
15	0.471	21	27
14	0.469	21	26
13	0.466	20	25
12	0.463	20	24
11	0.46	19	24
10	0.456	18	23
9	0.451	18	22
8	0.445	17	22
7.5	0.441	17	21

Nota. Tomada de Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación, por Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., y Morales Rojas, A. D. (2023), Ingeniería y Competitividad, 25(1), e-21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>

Tabla 2-2

Número de cangilones en función diámetro del chorro / diámetro Pelton.

d_0 / D_P	Número de cangilones	
	Z_{min}	Z_{max}
1/6	17	21
1/8	18	22
1/10	19	24
1/15	22	27
1/20	24	30
1/25	26	33

Nota. Tomada de Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación, por Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., y Morales Rojas, A. D. (2023), Ingeniería y Competitividad, 25(1), e-21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>

Tabla 2-3

Tabla de dimensionamiento del cangilón según OLADE.

Símbolo	Proporciones	Imagen
B	$3 \cdot d_0$	
L	$2.8 \cdot d_0$	
D	$0.9 \cdot d_0$	
f	$0.9 \cdot d_0$	
M	$1.1 \cdot d_0$	
l	$1.6 \cdot d_0$	
β_1	15°	
β_2	16°	

Nota. Tomada de Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación, por Ceballos

Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., y Morales Rojas, A. D. (2023), Ingeniería y Competitividad, 25(1), e-21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>

Tabla 2-4

Tabla de dimensionamiento del cangilón según NECHLEBA.

Símbolo	Proporciones	Imagen
B	$3.2 \cdot d_0$	
L	$2.8 \cdot d_0$	
D	$0.9 \cdot d_0$	
f	$0.9 \cdot d_0$	
M	$1.2 \cdot d_0$	
l	$2 \cdot d_0$	

Nota. Tomada de Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación, por Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., y Morales Rojas, A. D. (2023), Ingeniería y Competitividad, 25(1), e-21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>

Tabla 2-5

Tabla de dimensionamiento del cangilón según THAKE.

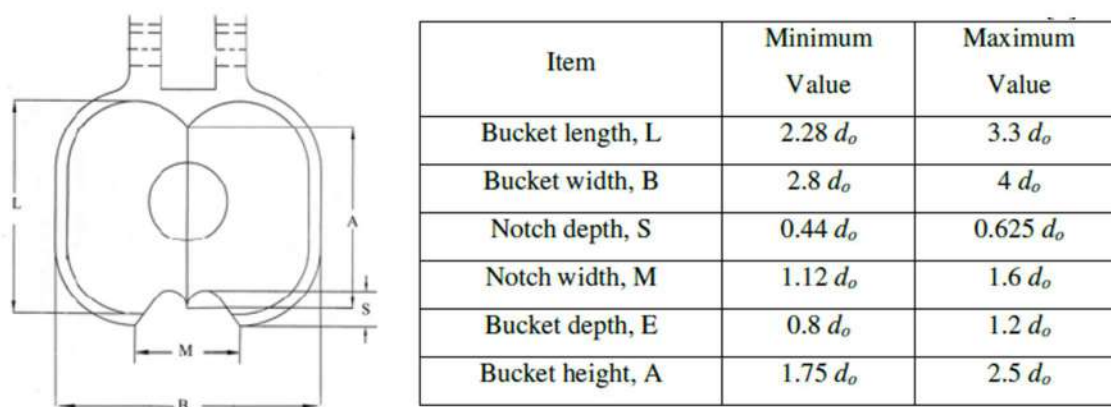
Símbolo	Proporciones	Imagen
B	$0.34 \cdot D_p$	
L	$0.30 \cdot D_p$	
D	$0.12 \cdot D_p$	
f	$0.114 \cdot D_p$	
M	$0.14 \cdot D_p$	
l	$0.184 \cdot D_p$	
β_1	15°	
β_2	15°	

Nota. Tomada de Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación, por Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., y Morales Rojas, A. D. (2023), Ingeniería y Competitividad, 25(1), e-21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>

Oo, Nyi y Khaing (2019) señalan que existe otra metodología en la cual las dimensiones del cangilón se definen en función del diámetro del chorro del sistema, considerando parámetros como la longitud y el ancho de la paleta, la profundidad y el ancho de la muesca, así como la altura y profundidad de la paleta. A diferencia de otros enfoques, esta metodología establece rangos máximos y mínimos permisibles para cada dimensión, lo que permite asegurar un diseño adecuado y funcional.

Figura 2-21

Dimensionamiento del cangilón.



Nota. Tomada de Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW, por Than Zaw Oo, Nyi Nyi y Cho Cho Khaing (2019), International Journal of Scientific and Research Publications, 9(7). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>

Respecto al espesor, se adoptó un valor uniforme de 1.5 mm para todos los cangilones, manteniéndose constante con el fin de evitar que esta variable influya en los resultados de los análisis estructurales.

2.6 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE TURBINA

2.6.1 MATERIALES

Los cangilones y el cuerpo del rodete deben ser fabricados con materiales que ofrezcan alta resistencia a la erosión, corrosión y fatiga debido al impacto constante del agua y posibles sedimentos presentes en el fluido (Ge et al., 2023). Aleaciones como el acero inoxidable y bronce al aluminio son comúnmente utilizadas por su durabilidad y resistencia al desgaste. En aplicaciones didácticas o de bajo costo, pueden emplearse materiales alternativos siempre que se consideren las limitaciones de resistencia y durabilidad (Kumar, 2018).

2.6.2 MANUFACTURA

Los álabes pueden estar fundidos junto con la rueda o montarse individualmente con bulones o pernos. Lo más común es fabricar la rueda y los álabes por separado, ya que esto facilita su construcción y mantenimiento. Sin embargo, cuando la rueda opera a alta velocidad específica, se suelen fundir ambos en una sola pieza, lo que proporciona mayor rigidez, solidez, uniformidad y un montaje más rápido (Canaza Choqueluque & Chara Surco, 2018).

Figura 2-22

Tipos de manufactura para turbinas Pelton.



Nota. La turbina Pelton puede ser de una sola pieza o unidos sus álabes al rodete a través de elementos como tornillos. Adaptado de Diseño e implementación de un

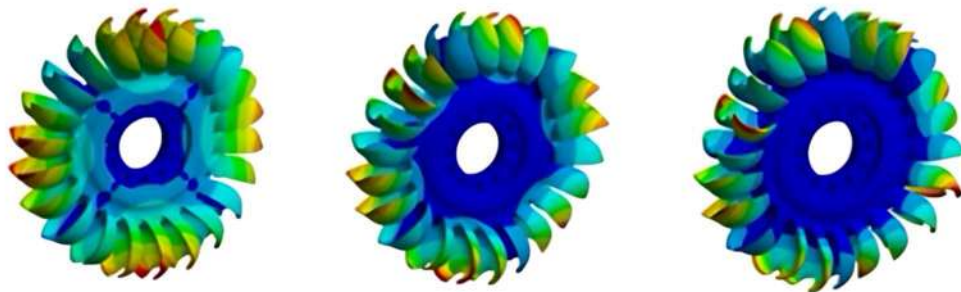
módulo de turbina Pelton para laboratorio de energía (Canaza Choqueluque & Chara Surco, 2018), Repositorio UCSM.

2.6.3 FUERZAS DEL SISTEMA

En el rodete de una turbina Pelton actúan principalmente las siguientes fuerzas: el impacto del chorro de agua, que se traduce en fuerza tangencial para generar rotación y fuerza radial sobre las cazoletas; la fuerza centrífuga, debida a la velocidad angular del rodete; y el par motor que se transmite al eje. Estas fuerzas determinan tanto el movimiento del rodete como el diseño de sus soportes y cojinetes.

Figura 2-23

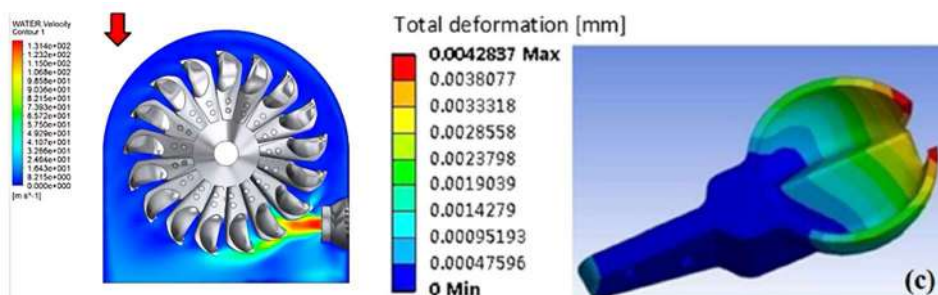
Impacto de fuerzas en el rodete.



Nota. El constante impacto del chorro de agua provocara un desgaste en las cucharas. Tomado de Turbina Pelton ¿Cómo diseñarlo? (Vilca Adco, 2020), [Video], YouTube, <https://youtu.be/w9XHDDVgZHI>

Figura 2-24

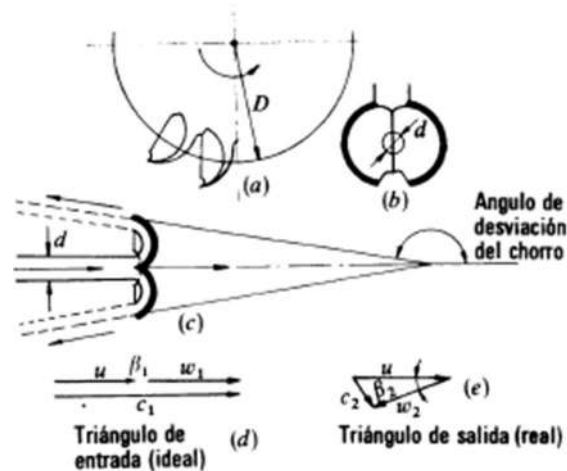
Representación de la fuerza del chorro en la cuchara.



Nota. El chiflón impacta directamente a los cangilones. Tomado de Sediment erosion on Pelton turbines: A review, por X. Ge, J. Sun, D. Chu, J. Liu, Y. Zhou, H. Zhang, L. Zhang, H. Chen, K. Kan, M. Binama, & Y. Zheng, 2023, Chinese Journal of Mechanical Engineering, 36(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00880-y>

Figura 2-25

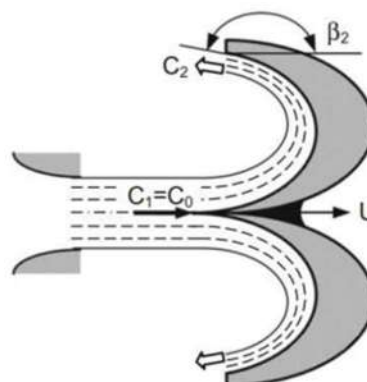
Fuerzas del chorro.



Nota. Adaptado de Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (2.^a ed.) de A. Mataix, 2003, Madrid: Paraninfo.

Figura 2-26

Velocidades actuantes en el cangilón.



Nota. En la imagen C0 y C1 son la velocidad jet, C2 es la velocidad de salida del ducharon y U su velocidad de traslación. Tomado de Metodología de diseño para

turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico (Sarmiento Rojas, 2020), Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20949>

2.7 CRITERIOS HIDRÁULICOS

2.7.1 VELOCIDAD DE CHORRO

La velocidad teórica del chorro a la salida del inyector se determina mediante la ecuación:

$$V_{jet} = k_n \cdot \sqrt{2gH_n}$$

Donde:

k_n : Coeficiente de velocidad absoluta (coeficiente de tobera)

H_n : Altura neta de la turbina

g : Aceleración de gravedad

El coeficiente K_n varía entre 0,96 y 0,98%, esto debido a la forma del inyector.

En base al diámetro de chorro se calculan las dimensiones de la cazoleta o álabe. Su ecuación está dada de la siguiente manera (Sarmiento Rojas, 2020):

$$d_o = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V_{jet}}}$$

Dónde:

Q : Caudal

V_{jet} : Velocidad del chorro

π :3,1416

2.7.2 POTENCIA

La máxima potencia que se puede obtener con un salto de agua H y un caudal Q es (Gil Bancallan, 2017):

$$P_H = Q * \rho * g H$$

Donde:

Q : Caudal

ρ : Densidad del fluido (agua)

g : Aceleración de gravedad

H : Altura neta de la turbina

2.7.3 EFICIENCIA

La eficacia o desempeño de una turbina tipo Pelton se refiere a la medida en que utiliza eficazmente los recursos energéticos disponibles. En términos generales, se calcula como la proporción entre la energía generada por la turbina y la energía hidráulica disponible. Para las máquinas hidráulicas en general, el rendimiento se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$\eta_h = \frac{w * T}{\rho * g * H * Q}$$

Donde:

W : velocidad de giro en [rad/s] del rodete.

T : torque producido en el cangilón respecto al eje del rodete.

ρ : Densidad del agua en [kg/m³].

g : Aceleración de la gravedad considerada como 9.81 [m²/s].

La capacidad hidráulica de una turbina Pelton está influenciada por varios factores, tales como la configuración de los cangilones, su dimensión y disposición, la fricción entre el agua y las paredes del inyector, y la elección apropiada de los ángulos de ataque (Barragán Montalvo, 2022).

2.7.4 NÚMERO DE REVOLUCIONES ESPECÍFICO DE POTENCIA Y CAUDAL (Ns y Nq)

El Ns es un parámetro adimensional que representa la velocidad de giro a la cual operaría una turbina hidráulica si trabajara bajo un salto unitario de 1 m y desarrollara una potencia unitaria de 1 HP o 1 kW.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{Hn^{5/4}}$$

Donde:

Ns = Número de revoluciones específico de potencia

N= Número de revoluciones (rpm)

P = Potencia (HP)

H = Altura (m)

El Nq es el valor del número específico de revoluciones por minuto que indica la velocidad a la cual una turbina operaría para descargar un caudal unitario de 1 m³/s bajo un salto de 1 m, alcanzando el máximo rendimiento posible. Este parámetro se obtiene a partir de las relaciones de semejanza existentes entre el caudal y la velocidad de rotación de turbinas hidráulicas (Ledesma Salas, 2017).

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}}$$

Donde:

Nq = Número específico de revoluciones de caudal

N= Número de revoluciones (RPM)

Q = Caudal (m³/s)

H = Altura (m)

2.7.5 ECUACIÓN EULER

La ecuación de Euler para turbinas hidráulicas establece la relación entre la energía transferida por el fluido al rodete y la variación de la componente tangencial de la velocidad absoluta del agua entre la entrada y la salida del rodete (Instituto Politécnico Nacional, s. f.). La ecuación se expresa generalmente como:

$$H = \frac{u_2 V_{w2} - u_1 V_{w1}}{g}$$

donde:

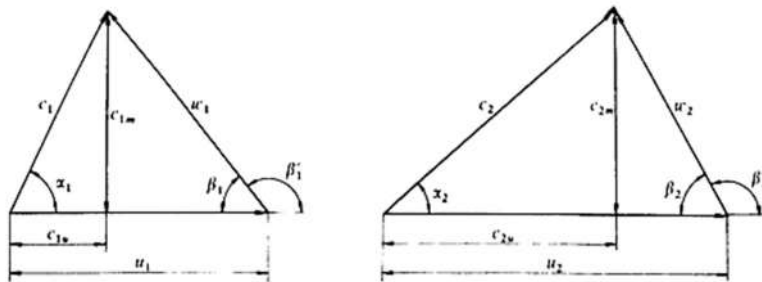
- H es la altura específica o carga disponible para el rodete,
- u_1 y u_2 son las velocidades periféricas del rodete en la entrada y salida respectivamente,
- V_{w1} y V_{w2} son las componentes tangenciales de la velocidad absoluta del fluido,
- g es la aceleración de la gravedad.

2.7.6 TRIÁNGULOS DE VELOCIDAD EN TURBOMÁQUINAS

Las relaciones cinemáticas del movimiento del fluido en la entrada y salida de un rodete pueden describirse mediante dos construcciones vectoriales conocidas como triángulos de velocidades de entrada y de salida. Estos triángulos son de aplicación general en el análisis de todas las turbomáquinas hidráulicas.

Figura 2-27

Triángulos de velocidad a la entrada del rodete.



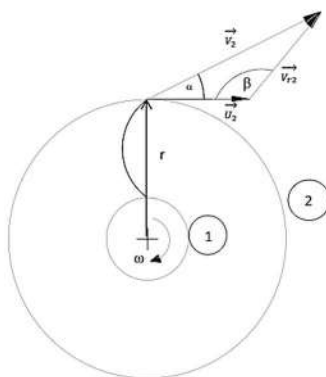
Nota. Tomada de Diseño de cuchara para microturbina Pelton, por Cepeda (2024), tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería. <https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17905>

Según la notación internacional, los triángulos de velocidades se describen mediante las siguientes magnitudes (Cepeda, 2024):

- u_1 : Velocidad periférica del rodete en la entrada.
- c_1 : Velocidad absoluta del fluido en la entrada.
- w_1 : Velocidad relativa del fluido con respecto al álabe en la entrada.
- c_{1m} : Componente meridional de la velocidad absoluta del fluido en la entrada.
- c_{1u} : Componente periférica de la velocidad absoluta del fluido en la entrada.
- α_1 : Ángulo formado entre las velocidades c_1 y u_1 .
- β_1 : Ángulo formado entre la velocidad relativa w_1 y el vector $-u_1$.

Figura 2-28

Triangulo de velocidades y radio de giro.



Nota. Tomada de Modelación de la transferencia de energía entre un aprovechamiento hidroenergético y turbomáquinas, por Arévalo Llumipanta (2017), tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17312>

En el caso de la turbina Pelton, debido a que el chorro golpea los cangilones y se refleja casi 180° , la velocidad tangencial a la salida puede considerarse despreciable ($V_{w2} \approx 0$), simplificando la ecuación a:

$$H = \frac{uV_{w1}}{g}$$

Esta relación permite calcular la energía transferida por el chorro al rodete y, a su vez, la potencia mecánica disponible para el eje.

El triángulo se construye considerando:

$$V = u + V_r$$

y la componente tangencial que genera torque en el eje:

$$V_\omega = u - V_r \cos \theta$$

donde θ es el ángulo de deflexión del chorro al golpear el cangilón. En condiciones ideales de operación, $\theta \approx 180^\circ$, lo que simplifica la componente tangencial a:

$$V_\omega = u + V_r$$

Al calcular la potencia útil de la turbina:

$$P = \rho Q u V_\omega$$

2.7.7 PRESIÓN MÁXIMA

Se sugiere que la presión estática máxima no exceda el 80 % de la presión nominal de operación de las tuberías utilizadas, asegurando además que sea compatible con las presiones de trabajo de los accesorios y válvulas instalados (Arévalo Llumipanta, 2017).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El marco metodológico expone de manera ordenada el proceso seguido para el desarrollo del diseño mecánico e hidráulico de la turbina tipo Pelton propuesta. En este apartado se describen los métodos de cálculo aplicados, así como los criterios técnicos y las expresiones matemáticas utilizadas para convertir las condiciones hidráulicas disponibles en un diseño operativo, confiable y eficiente. La metodología se plantea de forma gradual, comenzando con el estudio hidráulico del sistema y concluyendo con la determinación de los parámetros mecánicos y estructurales del rodete, asegurando la congruencia entre los fundamentos teóricos y el diseño obtenido.

3.1 ENFOQUE Y TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de enfoque cuantitativo, ya que se fundamenta en el uso de ecuaciones analíticas, parámetros hidráulicos y criterios mecánicos para el diseño de una turbina tipo Pelton. De acuerdo con su finalidad, es una investigación aplicada, orientada al desarrollo de una solución técnica concreta. En cuanto a su alcance, es de tipo descriptivo, debido a que no se manipulan variables de forma experimental, sino que se describen y analizan las relaciones entre las variables de diseño mediante métodos analíticos y de simulación.

3.2 VIABILIDAD

Dado que el proyecto se enfocó en el diseño y modelado digital del sistema, se incluyó la población estudiantil del área de Ciencias Mecánicas para la aplicación de encuestas, con el propósito de conocer su viabilidad y la importancia de diseñar el elemento para el módulo. Se consideró una población de 150 estudiantes pertenecientes a las licenciaturas en Ingeniería Mecánica y Mecatrónica del instituto, obteniendo una muestra de 109 alumnos.

Figura 3-1

Interfaz de la calculadora de tamaño de muestra.

Calcula el tamaño de tu muestra

Tamaño de la población ⓘ 150

Nivel de confianza (%) ⓘ ☒ 95% ☐ 99%

Margen de error (%) ⓘ 5

CALCULAR MUESTRA **LIMPIAR**

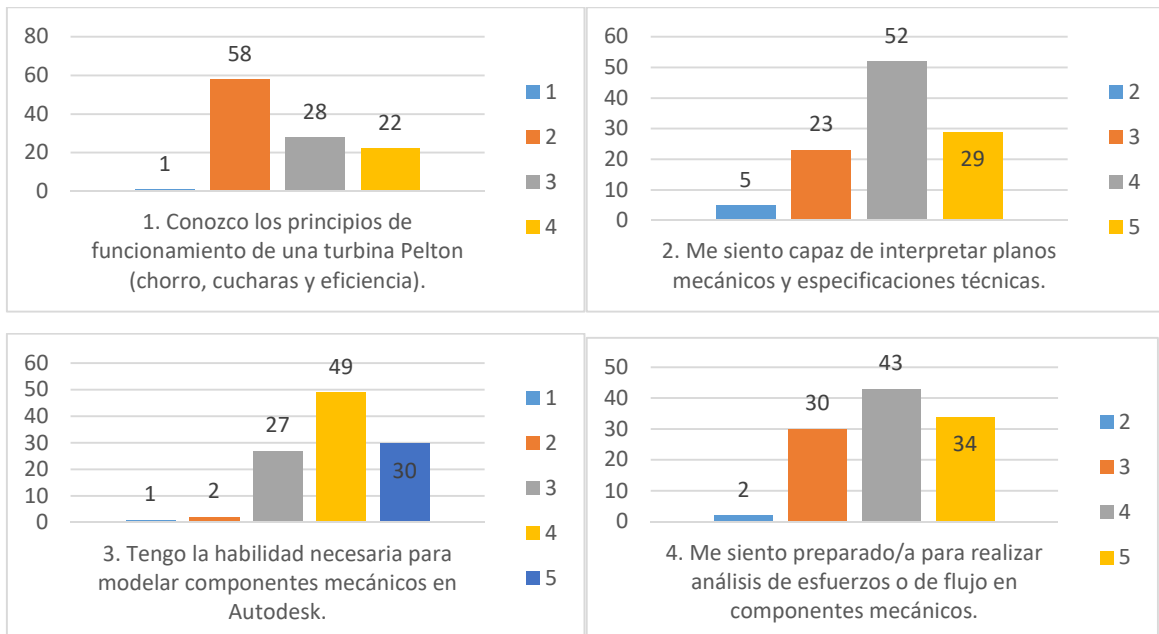
Tamaño de la Muestra

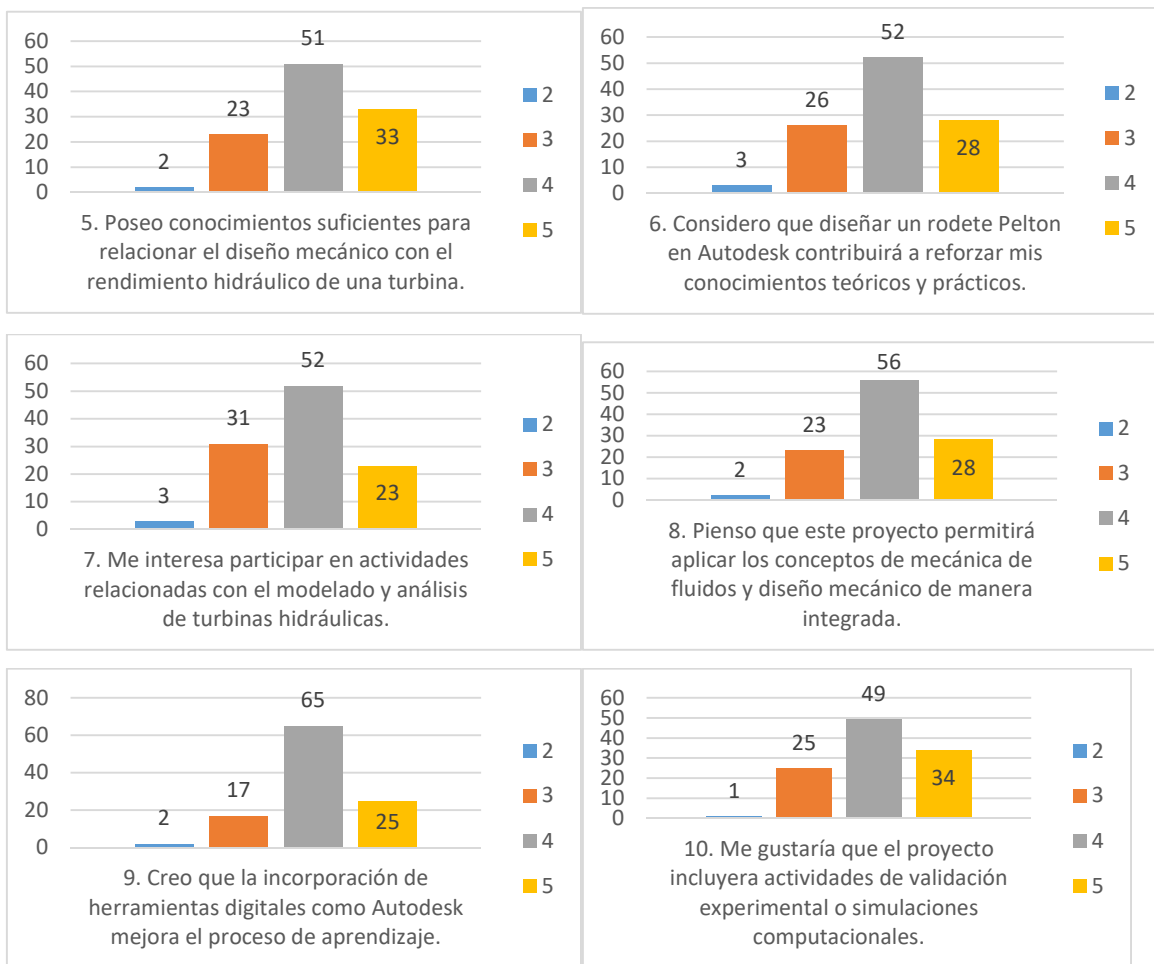
109

Nota. Se considera una seguridad del 95% y una precisión del 5% para el estudio. Adaptado de *Calculadora de tamaño de muestra* [imagen], por QuestionPro, (2025), QuestionPro (<https://www.questionpro.com/es/calculadora-de-muestra.html>).

Figura 3-2

Resultado de aplicación de encuestas.





Nota. Resultados de la encuesta sobre el nivel de conocimiento de los participantes. La escala va del 1 (bajo conocimiento) al 5 (muy buen conocimiento). Elaboración propia.

Los resultados obtenidos indican que más del 60 % de los estudiantes considera pertinente la implementación del módulo didáctico, lo que respalda la viabilidad académica del proyecto.

3.3 INVESTIGACIÓN PRELIMINAR

Se realizó una revisión bibliográfica de libros, artículos científicos y tesis especializadas relacionadas con turbinas tipo Pelton, diseño mecánico, criterios hidráulicos y análisis estructural, con el fin de identificar metodologías de diseño validadas, rangos geométricos recomendados y criterios técnicos aceptados. Esta

investigación preliminar permitió establecer una base teórica sólida que sustentara las decisiones de diseño comparables con estudios previos.

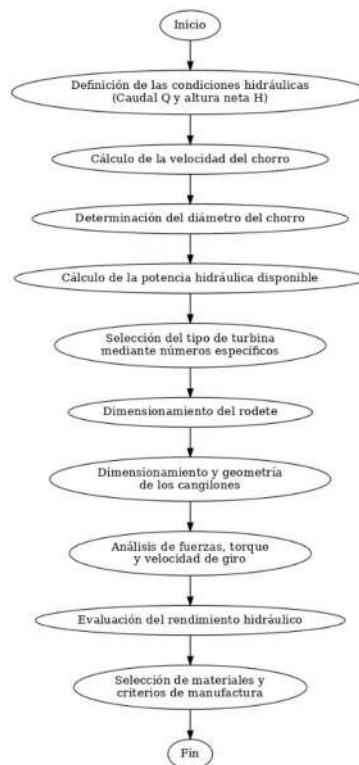
3.4 METODOLOGÍA GENERAL DEL DISEÑO

La metodología empleada para el diseño hidráulico y geométrico de la turbina tipo Pelton se basó en el procedimiento propuesto por Than Zaw Oo et al. (2019), el cual establece una secuencia sistemática de cálculos para la determinación de los principales parámetros del rodete, el chorro y los cangilones. Esta metodología fue seleccionada por su validación en turbinas de potencia similar y por integrar criterios clásicos de diseño con relaciones empíricas aceptadas.

El diseño de la turbina Pelton se realizó siguiendo una secuencia lógica de etapas, las cuales se muestran en la siguiente figura.

Figura 3-3

Diagrama de flujo del procedimiento metodológico.



Nota. Secuencia de etapas empleadas en el diseño hidráulico y mecánico de la turbina tipo Pelton. Elaboración propia.

Este orden permite asegurar que cada parámetro calculado dependa de resultados previamente validados. Los resultados obtenidos a partir de los cálculos analíticos iniciales son utilizados como datos de entrada para las simulaciones mecánicas. En caso de que los resultados de simulación no cumplan con los criterios de esfuerzo admisible y seguridad estructural, se ajustan los parámetros geométricos del diseño, repitiendo el proceso hasta alcanzar un diseño mecánicamente viable.

3.5 DESARROLLO DE DISEÑO HIDRÁULICO

3.5.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

El diseño de la turbina tipo Pelton inició con la definición de las condiciones hidráulicas de operación, específicamente la altura neta disponible H . A partir de este valor se determinó la potencia hidráulica disponible y caudal, estableciendo así las bases técnicas para el desarrollo del diseño.

La consideración de la altura y el caudal resulta esencial, ya que estas variables influyen directamente en la selección del tipo de turbina y en el comportamiento energético del sistema. En particular, la turbina Pelton es adecuada para aplicaciones con altas alturas y bajos caudales.

3.5.2 DETERMINACIÓN DE VELOCIDAD Y DIÁMETRO DE CHORRO

Con base en la altura neta disponible, se determinó la velocidad del chorro a la salida de la tobera para ser ideal, considerando las pérdidas hidráulicas asociadas al sistema. Posteriormente, se calculó el diámetro del chorro a partir de una fórmula que contempla directamente a la geometría del cangilón, donde nos dice que el diámetro del chorro es la multiplicación de la anchura del cangilón y un factor de ajuste.

La velocidad del chorro ideal está determinada por la fórmula

$$V = C_v \sqrt{2gH}$$

Y el diámetro del chorro

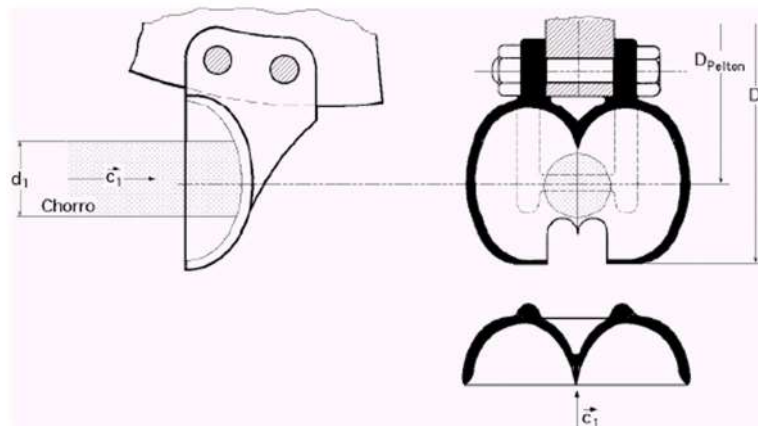
$$d_0 = 0.545 \sqrt{\frac{Q}{Z_0 \sqrt{H}}}$$

$$d_0 = \alpha * w$$

La determinación de estos parámetros se da por la interacción entre el chorro y los cangilones del rodete, lo que constituye el principio básico de funcionamiento de la turbina Pelton. Esta etapa permitió definir las dimensiones principales del rodete.

Figura 3-4

Representación transversal de chorro.



Nota. Tomada de Diseño de cuchara para microturbina Pelton, por Cepeda (2024), tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería.
<https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17905>

El caudal real que pasa por el inyector es

$$Q = A * v = \pi r^2 * v$$

3.5.3 CÁLCULO DE POTENCIA

Se calculó la potencia hidráulica teórica disponible a partir de las condiciones hidráulicas definidas, con el fin de estimar el potencial energético del sistema y dimensionar adecuadamente los componentes del diseño.

La potencia hidráulica disponible se calculó mediante la expresión:

$$P_h = Q * \rho * g H$$

Por otro parte, su potencia ideal es

$$P = F U \quad (W)$$

Su potencia útil

$$P_{0.7} = 0.7 P \quad (W)$$

Y su potencia mecánica

$$P_m = \eta_h P_h$$

3.5.4 SELECCIÓN DE TURBINA

Con base en los valores de altura y caudal, así como en los números específicos de velocidad, se confirmó que la turbina Pelton es la opción más adecuada, debido a su alto rendimiento en saltos elevados y caudales relativamente bajos.

3.6 DESARROLLO DE DISEÑO MECÁNICO

3.6.1 NÚMERO DE ÁLABES

El número de cangilones y sus dimensiones geométricas se determinaron a partir de relaciones en la metodología propuesta por Than Zaw Oo et al. (2019), obteniendo los valores del modelo final. Se consideró un diámetro del rodete pequeño en función del diámetro del chorro y su compatibilidad con un módulo de carácter educativo a escala pequeña.

El número de cangilones puede ser calculado mediante la regla:

$$z = 0.5m + 15$$

3.6.2 DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES

El dimensionamiento de los cangilones se realizó en función del diámetro del chorro, debido a que este parámetro es determinante para lograr una correcta división del flujo y una transferencia eficiente de energía.

Las dimensiones principales del álabe se determinan mediante las siguientes fórmulas:

- Longitud del álabe

$$L = 2.28d_0$$

- Anchura del álabe

$$B = 2.8d_0$$

- Profundidad de muesca

$$S = 0.44d_0$$

- Anchura de muesca

$$M = 1.12d_0$$

- Profundidad del álabe

$$E = 0.8d_0$$

- Altura del álabe

$$A = 1.75d_0$$

- Paso angular entre cangilones

$$\text{Ángulo entre cucharas} = \frac{360^\circ}{z}$$

3.6.3 ANÁLISIS DE FUERZAS

Se analizaron las fuerzas ejercidas por el chorro sobre los cangilones, el torque generado en el rodete y la velocidad tangencial de giro resultante, ya que estas magnitudes determinan el comportamiento dinámico del sistema y son fundamentales para el diseño estructural del eje y del rodete.

Este análisis permitió verificar que las cargas mecánicas se mantuvieran dentro de límites seguros y fueran compatibles con los materiales seleccionados para la turbina.

La velocidad periférica se determina mediante la fórmula:

$$U = \frac{V}{2}$$

Donde, su fuerza tangencial (ideal) en cada cangilón sería:

$$F = 2\rho Q(V - U) \quad (N)$$

La validación mecánica del diseño se realizó mediante simulación por el método de elementos finitos utilizando el software Autodesk Inventor 2025 ®. Las condiciones de contorno consideradas incluyeron la aplicación de las fuerzas tangenciales generadas por el chorro sobre los cangilones, así como la restricción de desplazamientos en el eje del rodete, simulando su sujeción en los soportes. El material asignado correspondió al seleccionado para la fabricación del rodete, y se consideraron criterios de esfuerzo equivalente de von Mises para evaluar la integridad estructural del diseño.

3.6.4 FUERZA DE TORQUE

Se calculó el torque generado por el rodete de la turbina Pelton a partir de la potencia mecánica entregada por el chorro y la velocidad angular del rodete. La relación empleada fue:

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

El torque determina la capacidad de giro del rodete y las cargas que actúan sobre el eje y los soportes. Este cálculo permitió dimensionar el eje y los soportes de la turbina, asegurando que las fuerzas generadas durante la operación no excedieran los límites permisibles.

3.6.5 EFICIENCIA

Se determinó la eficiencia hidráulica de la turbina como la relación entre la potencia mecánica entregada al rodete y la potencia hidráulica disponible:

$$\eta_h = \frac{w * T}{P_h}$$

3.6.6 SELECCIÓN DE MATERIAL

Se evaluaron distintos materiales considerando resistencia mecánica, durabilidad frente al desgaste, costo y compatibilidad con tecnologías de fabricación, además de su tipo de manufactura.

Con fines de manufactura futura de la turbina, se definieron parámetros de impresión 3D como variables de control del diseño. Entre estos parámetros se consideran la orientación de impresión del rodete, la densidad de relleno, el tipo de material polimérico y el patrón de relleno, los cuales influyen directamente en la resistencia mecánica, el peso y la durabilidad del componente. Estos parámetros podrán ajustarse en función de los requerimientos de operación y de los resultados de la validación mecánica obtenida mediante simulación.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del diseño de la turbina Pelton, considerando criterios hidráulicos, mecánicos y de materiales. Se calcularon parámetros hidráulicos como el caudal, la altura neta, la velocidad y diámetro del chorro, la potencia disponible y la eficiencia esperada, lo que permitió determinar la viabilidad energética del prototipo. De igual forma, se dimensionó el rodete y los cangilones, asegurando que cumplieran con la geometría y número óptimos para maximizar la transferencia de energía.

En los criterios mecánicos y de materiales se analizaron las fuerzas tangenciales y radiales sobre los cangilones, el torque generado y la velocidad de giro del rodete, junto con la selección de materiales resistentes a erosión, fatiga y desgaste. Estos resultados confirman que el diseño es estructuralmente seguro, funcional y eficiente, cumpliendo con los objetivos específicos planteados para el desarrollo del módulo educativo de la turbina Pelton.

4.1 CONDICIONES INICIALES DE DISEÑO

Como punto de partida para el diseño de la turbina Pelton, se definieron las condiciones hidráulicas base, necesarias para dimensionar los componentes y calcular los parámetros de operación. Se consideró un salto de agua neto de 1 m como valor representativo para un módulo demostrativo de baja potencia, considerando las limitaciones físicas de laboratorio.

4.2 CÁLCULOS DE CRITERIOS HIDRÁULICOS

4.2.1 VELOCIDAD DEL CHORRO

La velocidad del chorro ideal es

$$V = C_v \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \cdot 9.81} = 4.4294 \text{ m/s}$$

Donde:

- Cv es el coeficiente de tobera = 1.0
- G es valor de gravedad = 9.81 m/s²
- H es el salto neto = 1 m

4.2.2 DIÁMETRO DE CHORRO

También conocido como “jet diameter”, puede ser calculado mediante la fórmula:

$$d_0 = 0.545 \sqrt{\frac{Q}{Z\sqrt{H}}}$$

Donde:

- do es el diámetro del chorro
- Q es caudal
- Z es el número de cangilones
- H es altura útil

Sin embargo, existe una segunda fórmula que contempla directamente a la geometría del cangilón, donde nos dice que el diámetro del chorro es la multiplicación de la anchura del cangilón y un factor de ajuste, desarrollada a continuación con una anchura de 5.09 cm.

$$d_0 = \alpha * w = (0.6)(5.09 \text{ cm}) = 3.054 \text{ cm} = 0.0354 \text{ m}$$

Donde:

- α es un factor de ajuste (es decir, el chorro ocupa entre 60% del ancho del cangilón).
- W es la anchura del cangilón

Este valor es un diámetro práctico ajustado al rodete y cangilones reales, sirve para construcción y ensamble del módulo.

4.2.3 CAUDAL REAL

El caudal que pasa por el inyector es

$$Q = \pi r^2 * v = (\pi(0.0177 \text{ m})^2) \left(4.4294 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) = 0.00436 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 4.36 \text{ L/s}$$

4.2.4 POTENCIA

La potencia hidráulica del sistema es

$$P_H = Q * \rho * g H = (0.00436)(1000)(9.81)(1) = 42.7716 \text{ W}$$

Donde:

- Q es el caudal = 4.26 L/s
- ρ es la densidad del agua = 1000 kg/m³
- G es valor de gravedad = 9.81 m/s²
- H es el salto neto = 1 m

4.2.5 NÚMEROS ESPECÍFICOS

Se consideró un diámetro pelton (D) de 18.825 cm y un diámetro de rodete (Dr) de 12.3 cm para realizar los cálculos iniciales y consecuentes del diseño. Por consiguiente, la velocidad periférica es:

$$U = \frac{V}{2} = \frac{4.4294 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} = 2.2147 \text{ m/s}$$

Donde:

- V es la velocidad del chorro = 4.4294 m/s

Y su velocidad de giro N

$$N = \frac{60u}{\pi D} = \frac{60(2.2147 \text{ m/s})}{\pi(0.18825 \text{ m})} \approx 224.5 \text{ rpm} \approx 225 \text{ rpm}$$

Donde:

- U es la velocidad periférica = 2.2147 m/s
- D es el diámetro de rodete = 0.18825 m

Para caracterizar el comportamiento del rodete del módulo respecto al salto de agua y al caudal disponible, se calcularon los números específicos de velocidad. Estos

números permiten relacionar la velocidad de giro del rodete con las condiciones hidráulicas del sistema. La velocidad específica de salto (N_s) considera la altura neta del salto, mientras que la velocidad específica de caudal (N_q) se relaciona con el caudal de diseño del módulo.

$$N_s = \frac{N\sqrt{P}}{H^{5/4}} = \frac{224.5rpm\sqrt{0.0427}}{1^{5/4}} \approx 46.4$$

$$N_q = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} = \frac{224.5rpm\sqrt{0.00436}}{1^{3/4}} \approx 14.8$$

Donde:

- N es la velocidad de giro = 224.5 rpm
- P es la potencia = 42.7716 kW
- H es el salto = 1 m
- Q es el caudal = 4.36 L/s

Tabla 4-1

Parámetros hidráulicos de diseño del módulo Pelton.

Parámetro	Valor	Unidad (SI)
Salto neto (H)	1	m
Caudal real (Q)	0.0043	m ³ /s
Velocidad chorro (V)	4.4294	m/s
Diámetro del rodete (D)	0.1882	m
Diámetro del chorro (do)	0.0305	m
Velocidad periférica (u)	2.2147	m/s
Velocidad de giro (N)	225 rpm	rpm
Potencia hidráulica (Ph)	42.7716	w
Velocidad específica (Ns)	46.4	
Velocidad específica de caudal (Nq)	14.8	

Nota. Los resultados presentados sirven como referencia y apoyo para la realización de prácticas educativas, permitiendo verificar y aplicar los cálculos hidráulicos del módulo de turbina Pelton. Elaboración propia.

El salto neto (m), la velocidad del chorro y el caudal son variables determinantes en el impacto que producirá el chiflón en cada álabe de la turbina de manera independiente.

4.3 CÁLCULOS DE CRITERIOS MECÁNICOS

4.3.1 NÚMERO DE ÁLABES

El número de cangilones está dado por la ecuación:

$$z = 0.5m + 15$$

Donde m es la diferencia entre el diámetro Pelton y el diámetro del chorro

$$m = \frac{D}{d_0} = \frac{18.825 \text{ cm}}{3.054 \text{ cm}} = 6.1640$$

$$\text{Número de cucharas} = 0.5(6.1640) + 15 = 18.0820$$

De acuerdo al resultado, el número de cangilones puede ser un valor entre 16 y 18. Para este diseño se consideró un total de 16 cangilones alrededor de su circunferencia.

El espacio disponible por cucharón en la circunferencia es

$$C = \pi \cdot D_r = \pi \cdot 12.30 \text{ cm} = 38.64 \text{ cm}$$

$$S = \frac{C}{z} = \frac{38.64 \text{ cm}}{16} = 2.42 \text{ cm}$$

Y su diámetro exterior

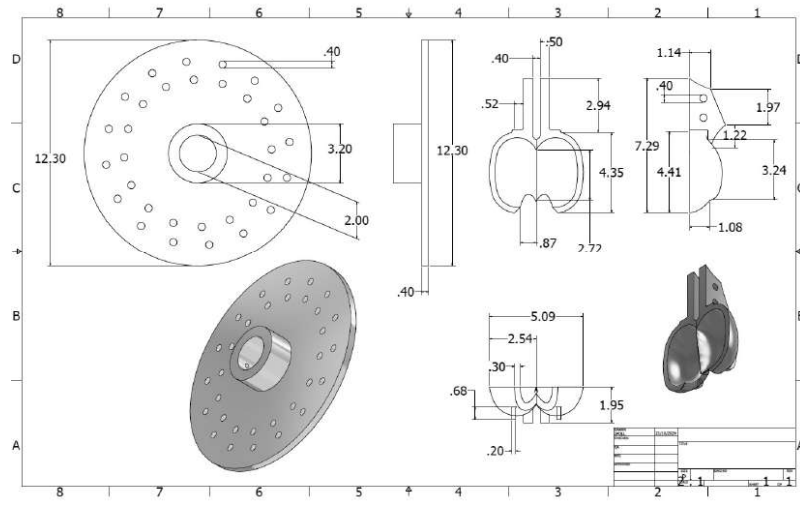
$$D_{ext} = D_r + (2 \cdot L_r) = 12.30 \text{ cm} + 8.7 \text{ cm} = 21 \text{ cm}$$

Donde:

- D_r es el diámetro del rodete = 12.30 cm
- L_r es la longitud del álabe por lado = 8.7 cm
- C es la circunferencia
- Z el número de cangilones

Figura 4-1

Planos 2D con medidas de álabes y rotor en INVENTOR 2025 ®.



Nota. Se obtiene como resultado el diseño de un rodete y álabe que conforman la turbina Pelton. Tomado de elaboración propia.

Desde continuidad hidráulica (teórico), el diámetro de chorro para energía y torque es

$$d_o = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * V_{jet}}} = \sqrt{\frac{4(0.0043)}{\pi(4.4294)}} \approx 0.035 \text{ m}$$

4.3.2 DIMENSIONAMIENTO DE CANGILONES

Las dimensiones de los cangilones incluyen los valores de longitud y ancho de paleta, profundidad y ancho de muesca, altura de paleta y profundidad de la misma. Considerando un diámetro de chorro de 3.054 cm, se presentan los siguientes resultados y modelado.

- Longitud del álabe

$$L = 2.28d_o = (2.28)(3.054 \text{ cm}) = 6.9631 \text{ cm}$$

- Anchura del álabe

$$B = 2.8d_o = (2.8)(3.054 \text{ cm}) = 8.5512 \text{ cm}$$

- Profundidad de muesca

$$S = 0.44d_0 = (0.44)(3.054 \text{ cm}) = 1.3437 \text{ cm}$$

- Anchura de muesca

$$M = 1.12d_0 = (1.12)(3.054 \text{ cm}) = 3.4204 \text{ cm}$$

- Profundidad del álabe

$$E = 0.8d_0 = (0.8)(3.054 \text{ cm}) = 2.4432 \text{ cm}$$

- Altura del álabe

$$A = 1.75d_0 = (1.75)(3.054 \text{ cm}) = 5.3445 \text{ cm}$$

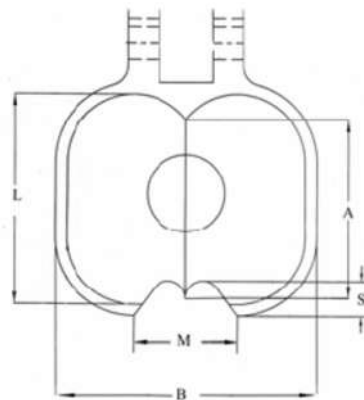
- Paso angular entre cangilones

$$\text{Ángulo entre cucharas} = \frac{360^\circ}{z} = \frac{360^\circ}{16} = 22.5^\circ$$

Esto asegura que cada chorro de agua impacte un solo cangilón a la vez, evitando interferencias.

Figura 4-2

Guía de dimensiones del álabe.



Nota. Tomada de Design Calculation of Pelton Turbine for 220 kW, por Than Zaw Oo, Nyi Nyi y Cho Cho Khaing (2019), International Journal of Scientific and Research Publications, 9(7). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>

Tabla 4-2

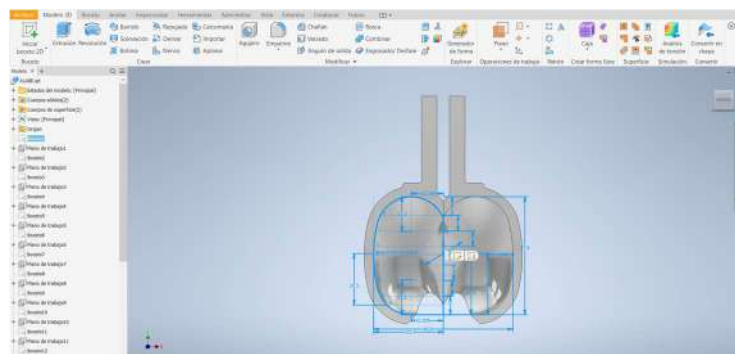
Valores del diseño en Software.

Variable	Descripción	Valor en el diseño	Unidad (SI)
L	Longitud del álabe	0.0414	m
B	Anchura del álabe	0.0509	m
S	Profundidad de muesca	0.0080	m
M	Anchura de muesca	0.0203	m
E	Profundidad del álabe	0.0145	m
A	Altura del álabe	0.0318	m

Nota. Se presentan los valores del diseño presentado en Autodesk INVENTOR 2025 ® considerando un diámetro de chorro más pequeño y tolerancias. Tomado de elaboración propia.

Figura 4-3

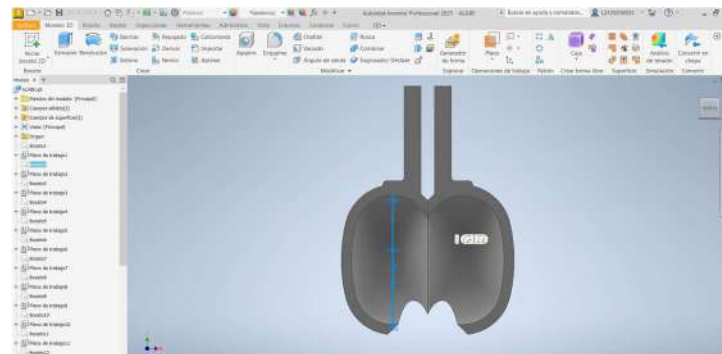
Boceto 1 del álabe en Inventor.



Nota. El material en la imagen es cobre – fundido. Tomado de elaboración propia.

Figura 4-4

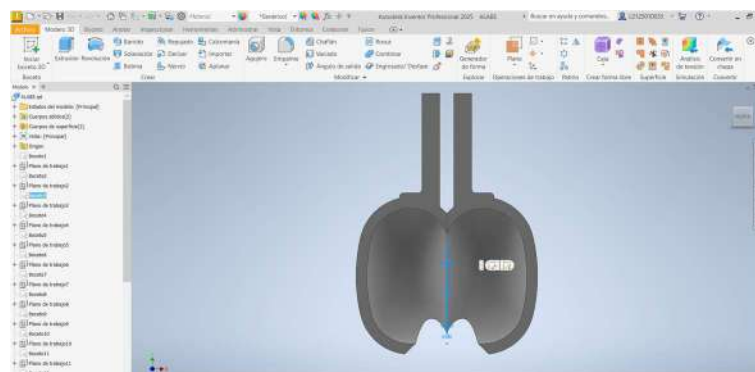
Boceto 2 del álabe.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-5

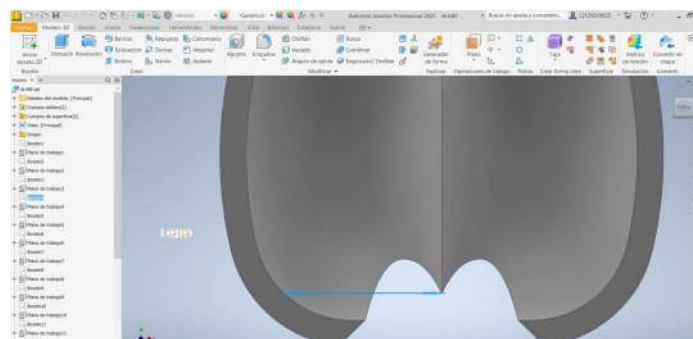
Boceto 3.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-6

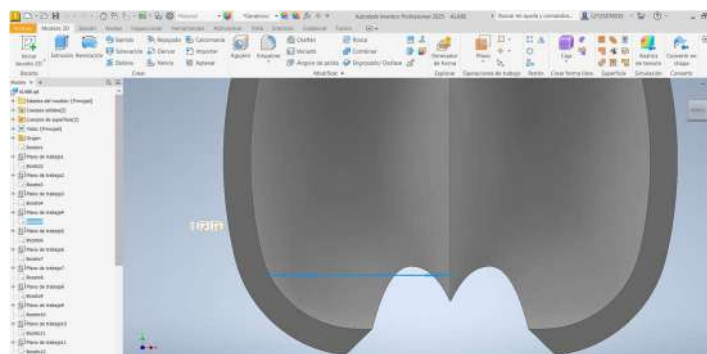
Boceto 4.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-7

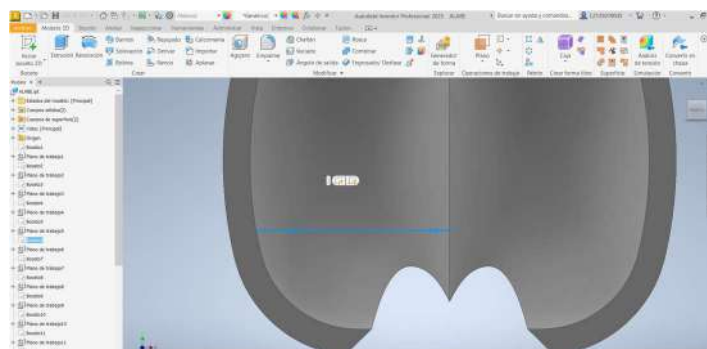
Boceto 5.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-8

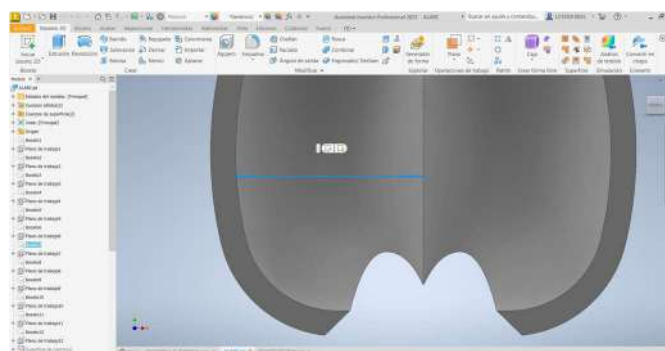
Boceto 6.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-9

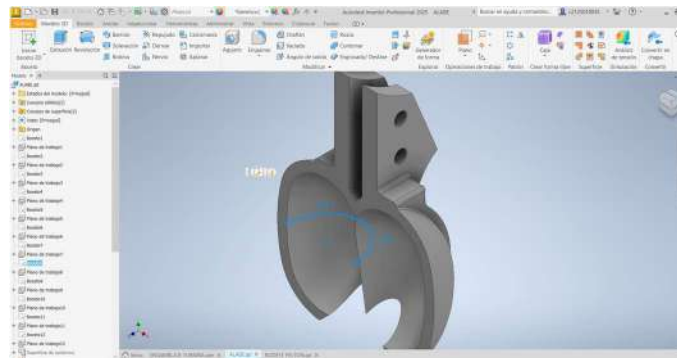
Boceto 7.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-10

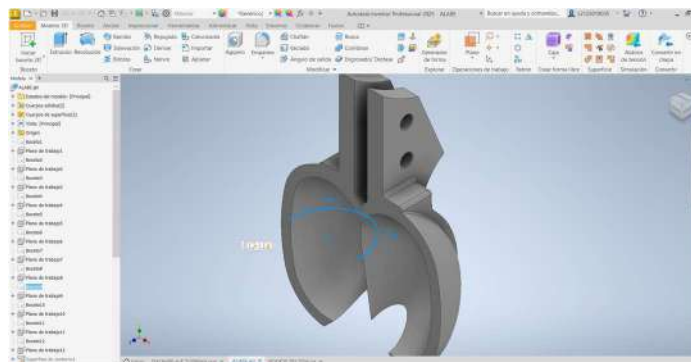
Boceto 8.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-11

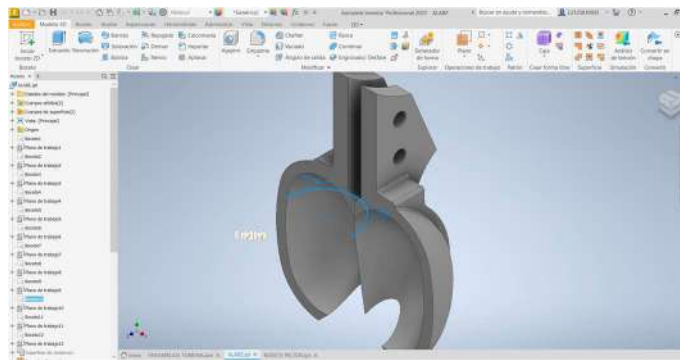
Boceto 9.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-12

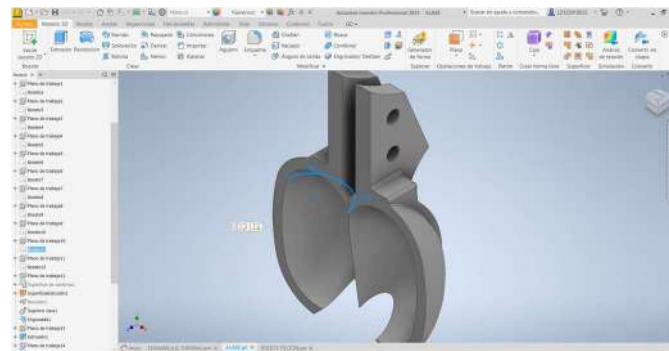
Boceto 10.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-13

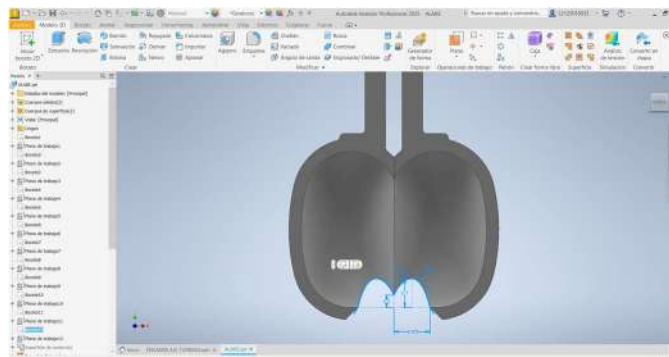
Boceto 11.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-14

Boceto 12 del álabe en Inventor.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-15

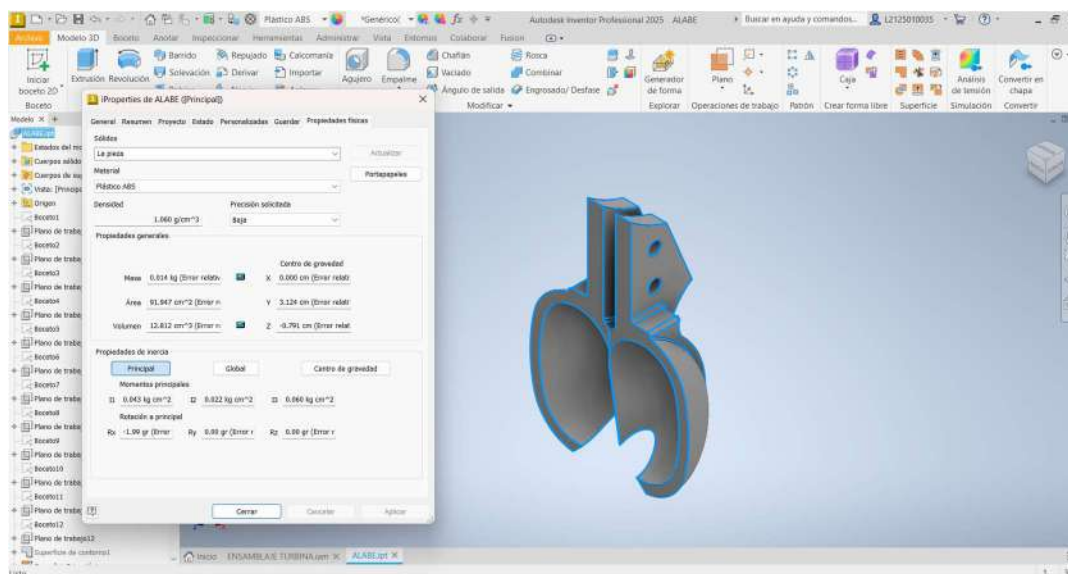
Secuencia de operaciones realizadas para el modelado del álabe.



Nota. Tomado del Software Autodesk INVENTOR 2025 ®.

Figura 4-16

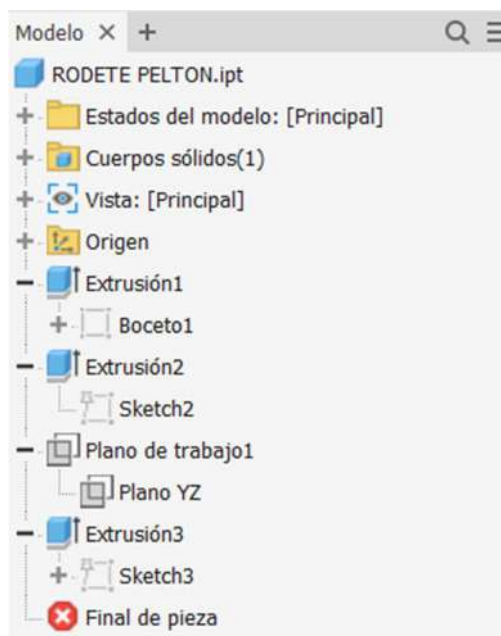
Propiedades físicas del álabe.



Nota. Tomado del Software Autodesk INVENTOR 2025 ®.

Figura 4-17

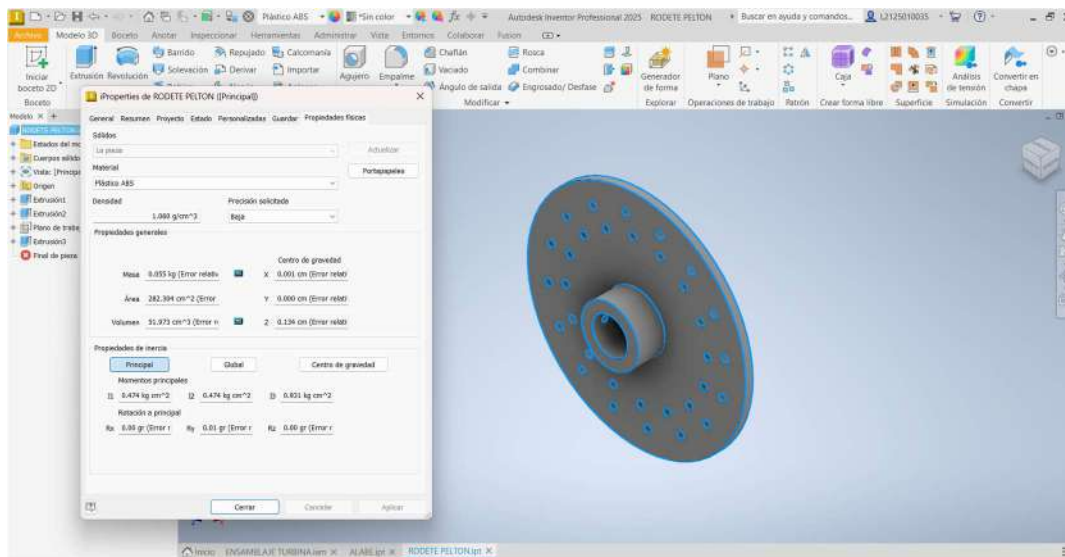
Secuencia de operaciones realizadas para el modelado del rodete.



Nota. Tomado del Software Autodesk INVENTOR 2025 ®.

Figura 4-18

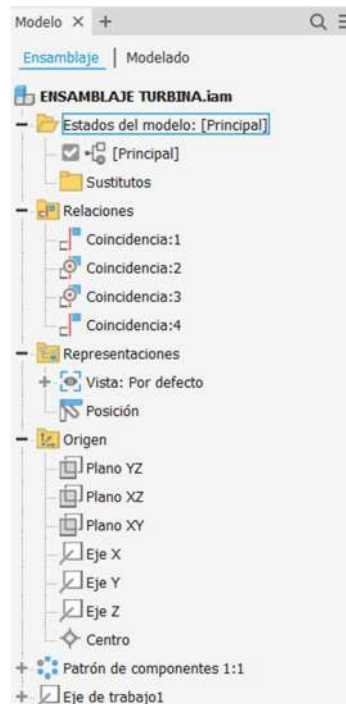
Propiedades físicas del rodete.



Nota. Tomado del Software Autodesk INVENTOR 2025 ®.

Figura 4-19

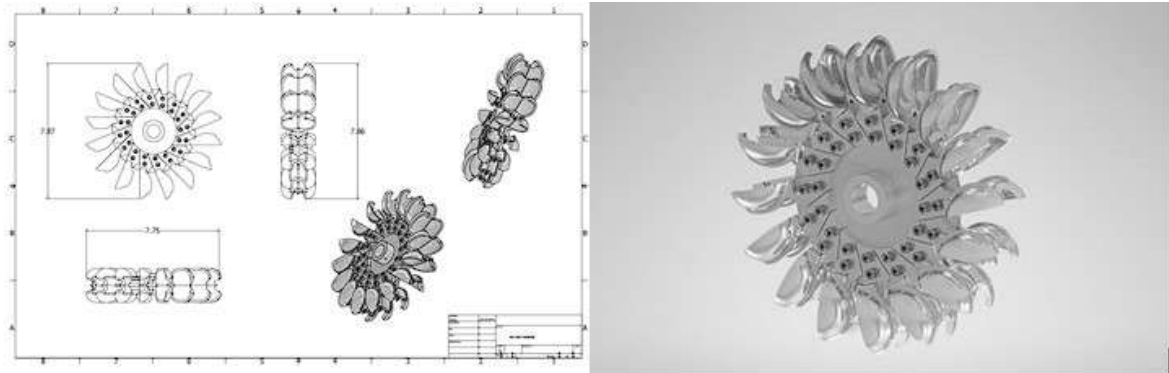
Secuencia de operaciones realizadas para el ensamble de la turbina.



Nota. Tomado del Software Autodesk INVENTOR 2025 ®.

Figura 4-20

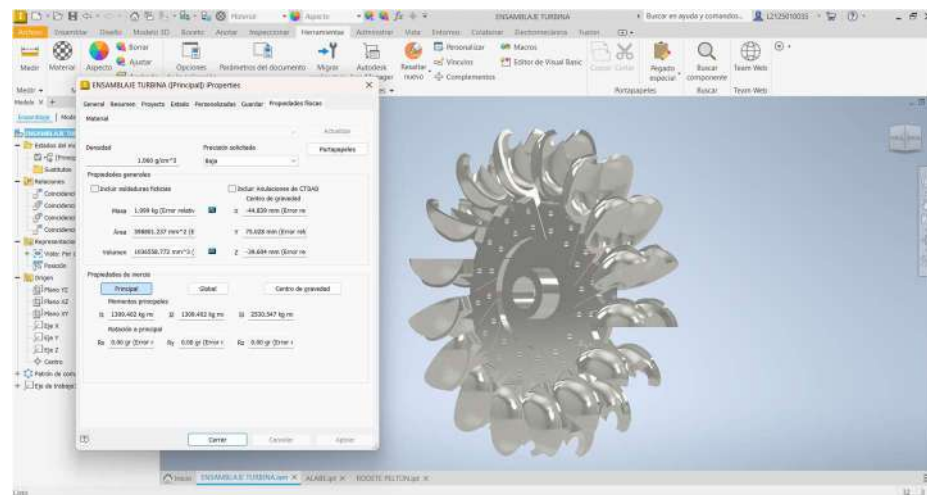
Planos 2D con medidas de turbina Pelton y representación en INVENTOR 2025 ®.



Nota. Tomado de elaboración propia.

Figura 4-21

Propiedades físicas de la turbina.



Nota. El modelo se visualiza con material PLA Plastic y apariencia en gris, y fue obtenido del software Autodesk INVENTOR 2025®.

4.3.3 FUERZA EN ÁLABE

Tomando en cuenta los valores de velocidad del chorro, velocidad periférica y caudal se obtiene una fuerza resultante en Newton, representando el impacto del chiflón a la turbina.

Considerando que $Q = 4.36$ L/s y se utilizará una bomba periférica de $\frac{1}{2}$ HP para el sistema:

$$F = 2\rho Q(V - U) = 2(1000)(4.36)(4.4294 - 2.2147) \quad (N)$$
$$F = 19.312 \text{ N}$$

Donde su potencia ideal será

$$P = FU = (19.312)(2.2147) \approx 42.7703 \text{ W}$$

Y la potencia útil a asumir

$$P_{0.7} = 0.7P = 0.7(42.7703) = 29.9392 \text{ W}$$

Para el análisis se usarán 90 N considerando las perdidas hidráulicas, variaciones de caudal y eficiencia real de la bomba.

4.3.4 VELOCIDAD ANGULAR

La velocidad angular del sistema es

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} = \frac{2\pi(225)}{60} \approx 23.56 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

4.3.5 POTENCIA MECÁNICA

La potencia mecánica se determina por el producto de la potencia hidráulica y la eficiencia hidráulica del sistema. Para un módulo, normalmente η_h aproximado a 0.7 (70 %) es razonable.

$$P_m = (0.7)(42.7703 \text{ W}) = 29.9392 \text{ W}$$

4.3.6 TORQUE

La fuerza de torque es

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{29.9392}{23.56} = 1.2707 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4.3.7 EFICIENCIA

La eficiencia total (η) mide qué fracción de la energía hidráulica se convierte en mecánica.

$$\eta_h = \frac{w \cdot T}{P_h} = \frac{1.2707 \cdot 23.56}{42.7716} \approx 0.7 \approx 70\%$$

Tabla 4-3

Parámetros para módulo de prácticas.

Parámetro	Valor	Unidad (SI)
Velocidad angular (ω)	23.56	rad/s
Potencia hidráulica (Ph)	42.7716	W
Potencia mecánica (Pm)	29.9392	W
Torque (T)	1.2707	N*m
Eficiencia (η)	70	%

Nota. Los resultados presentados sirven como referencia y apoyo para la realización de prácticas educativas. Elaboración propia.

La eficiencia hidráulica del 70 % obtenida en el diseño del módulo se encuentra dentro del rango esperado para turbinas Pelton de pequeña escala y con fines didácticos. A diferencia de las turbinas industriales, cuya eficiencia puede superar el 85 %, en este caso se consideran pérdidas adicionales asociadas a la escala reducida del sistema, la calidad del chorro generado por una bomba periférica, las pérdidas por fricción en la tobera y el rebote parcial del agua en los cangilones.

Asimismo, la simplificación geométrica del rodete y el uso de materiales poliméricos en el prototipo contribuyen a una disminución de la eficiencia teórica. No obstante, el valor obtenido resulta adecuado para un módulo educativo (un valor realista se

encuentra entre 60 % y 75 %), ya que permite analizar de manera práctica la relación entre potencia hidráulica, potencia mecánica y pérdidas del sistema.

Los parámetros de torque y velocidad de giro obtenidos a partir de la eficiencia se pueden utilizar para dimensionar el eje y verificar que los materiales seleccionados sean capaces de soportar las cargas generadas durante la operación del módulo.

4.4 CONDICIONES DE MANUFACTURA

4.4.1 TIPO DE MANUFACTURA

La manufactura seleccionada para los álabes del rodete es el montaje individual mediante bulones o pernos, ya que este método facilita su fabricación y mantenimiento, y resulta adecuado para un módulo educativo donde no se manejan fuerzas elevadas.

4.4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES

De acuerdo a los distintos materiales existentes en el mercado para este tipo de manufactura, se realizó la siguiente selección:

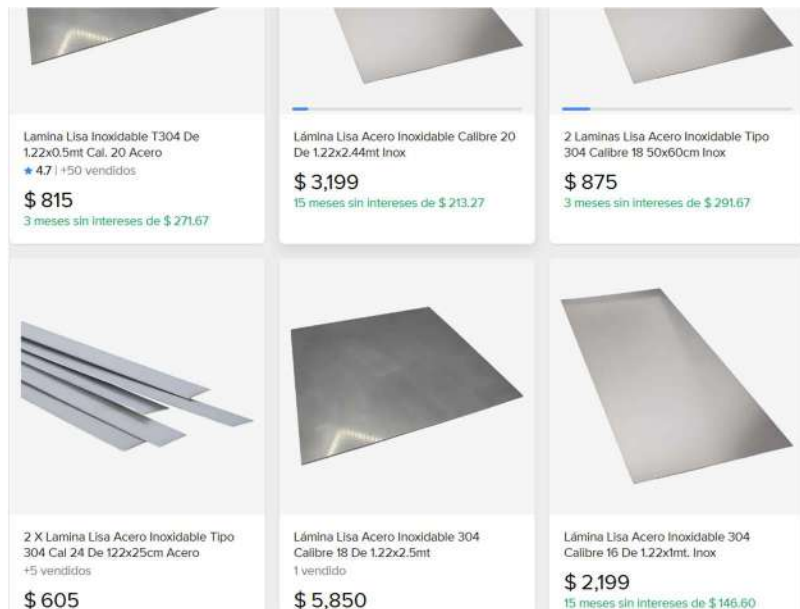
Mejor material para operación:

Se seleccionó acero inoxidable AISI 304 como material óptimo para el rodete operativo, debido a:

- Alta resistencia al desgaste y a la corrosión por contacto continuo con agua.
- Buena resistencia mecánica para soportar las cargas generadas por el chorro.
- Durabilidad y compatibilidad con mecanizado y tornillería estándar.

Figura 4-22

Precio acero inoxidable AISI 304.



Nota. La imagen hace una comparación de precios obtenidos respecto al tamaño para el material comercial disponible. Tomado en Mercado Libre (<https://www.mercadolibre.com.mx>).

Material para prototipo en impresión 3D:

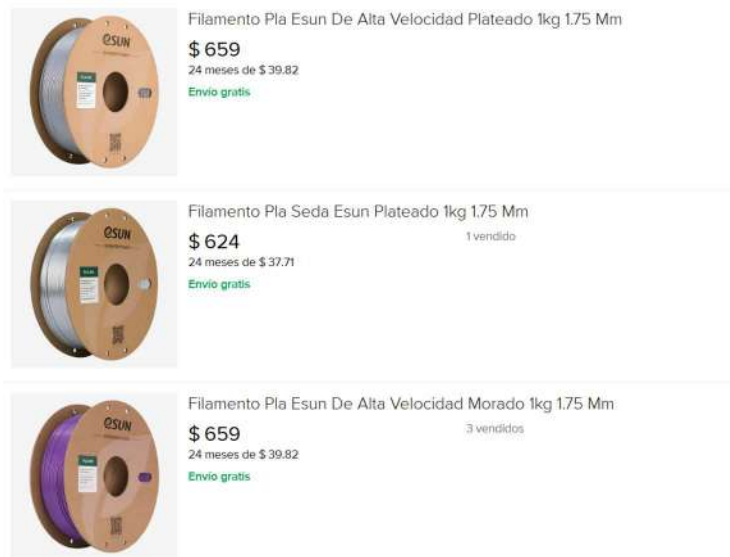
Para la fabricación de un prototipo funcional a escala, se seleccionó PLA reforzado o PETG, considerando:

- Facilidad de impresión 3D y bajo costo.
- Resistencia mecánica suficiente para pruebas de laboratorio a baja presión.
- Posibilidad de modificar rápidamente el diseño antes de la fabricación final en acero.

Se observó que esta estrategia permite probar y validar el diseño del rodete antes de producirlo en su material definitivo, asegurando seguridad y funcionalidad durante las pruebas de micro energía.

Figura 4-23

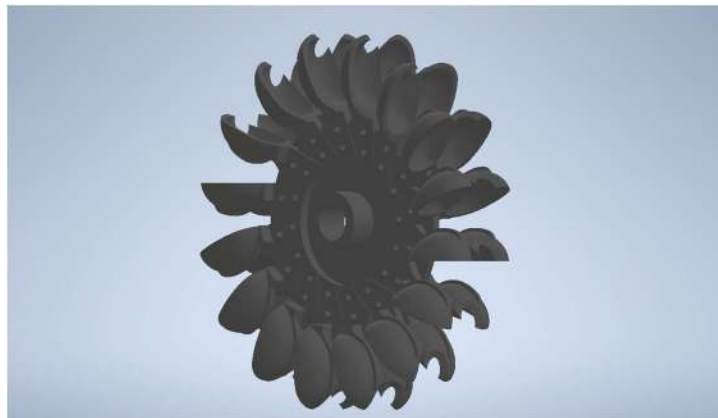
Precio PLA reforzado.



Nota. La imagen hace una comparación de precios obtenidos respecto al filamento para el material comercial disponible. Tomado en Mercado Libre (<https://www.mercadolibre.com.mx>).

Figura 4-24

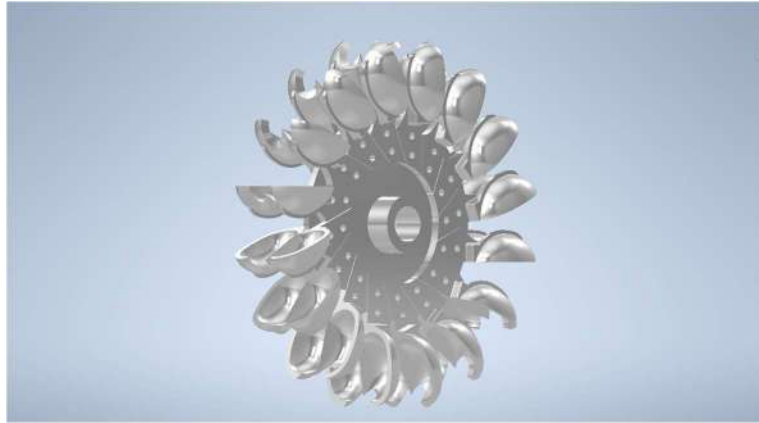
Apariencia de turbina con material plástico.



Nota. La figura se muestra representando el material PLA plástico con acabado negro.

Figura 4-25

Apariencia de turbina con acero.



Nota. El material del componente es Acero inoxidable AISI 304 con apariencia de Cromo satinado. Elaboración propia.

Para la fabricación de un prototipo funcional a escala mediante manufactura aditiva, se proponen condiciones de impresión 3D orientadas a garantizar la integridad mecánica del rodete durante las pruebas de laboratorio. Se recomienda el uso de material PLA reforzado o PETG, con una densidad de relleno comprendida entre 40 % y 60 %, empleando patrones tipo *cubic* o *gyroid* para favorecer una adecuada distribución de esfuerzos. La orientación de impresión debe disponerse de tal forma que la cara de impacto del chorro sobre los cangilones quede paralela al plano de impresión, minimizando la delaminación entre capas. Asimismo, se sugiere una altura de capa entre 0.2 y 0.28 mm, un espesor de pared mínimo de 1.2 mm y velocidades de impresión moderadas, con el fin de obtener un prototipo seguro y funcional para fines didácticos.

4.5 SIMULACIÓN DE RESULTADOS

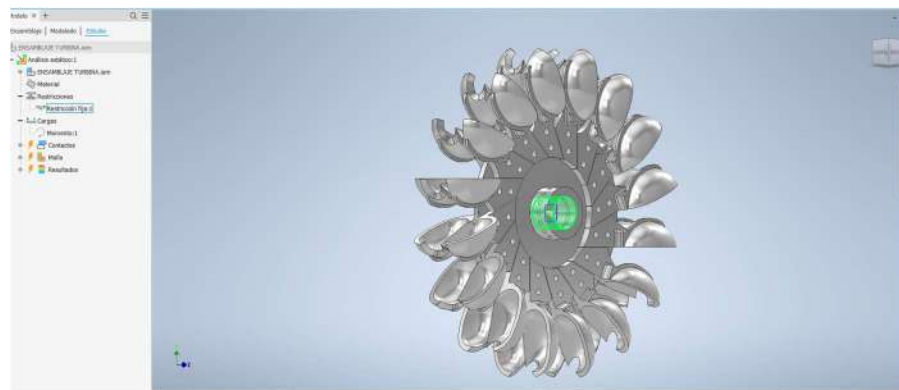
El análisis por elementos finitos (FEA) se realizó en el software Autodesk Inventor 2025®, considerando un análisis estático. La distribución uniforme de los 16 cangilones permite un aprovechamiento homogéneo de la energía del chorro, sin generar deformaciones significativas en el rodete.

Como condiciones de contorno, se establecieron restricciones fijas en los orificios de montaje del rodete al eje, simulando un empotramiento que impide desplazamientos y rotaciones. La carga aplicada corresponde a una fuerza tangencial uniforme de 20 N, distribuida sobre la superficie activa de los cangilones, representando el impacto del chorro de agua durante la operación.

El mallado se generó de forma automática mediante elementos tetraédricos, refinando la malla en las zonas críticas como la base de los cangilones y los puntos de fijación, con el fin de obtener resultados más precisos en la evaluación de esfuerzos.

Figura 4-26

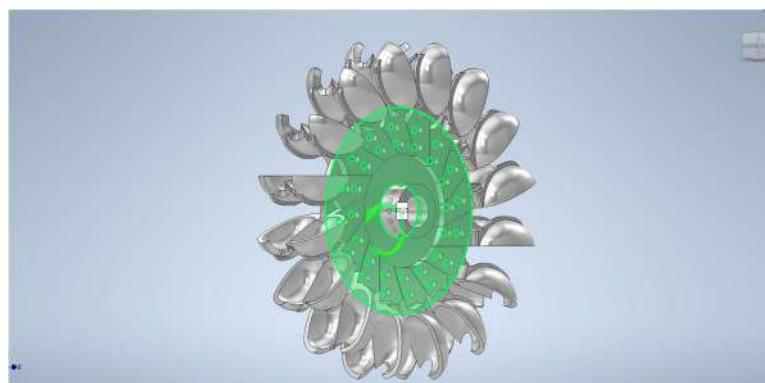
Asignación de geometría fija.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-27

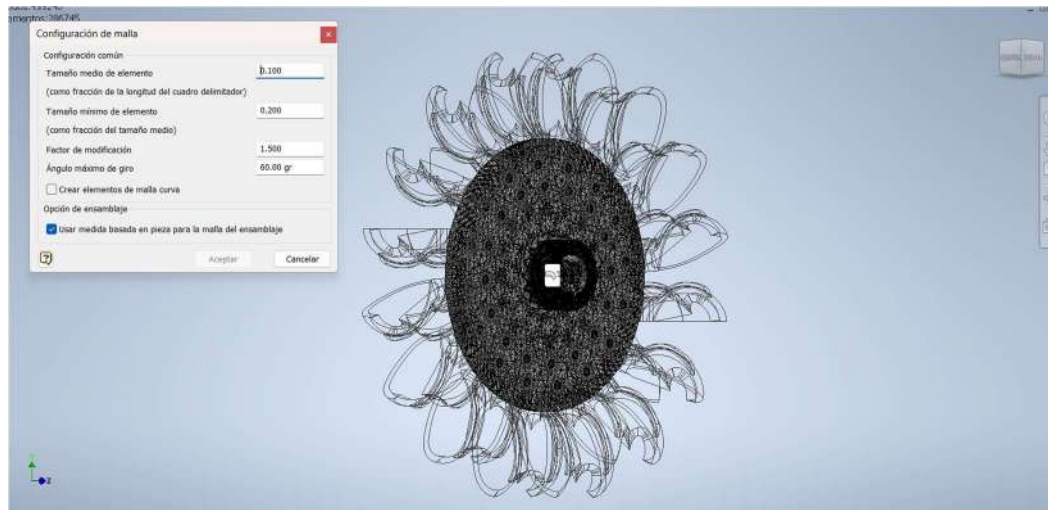
Asignación de fuerza de impacto.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-28

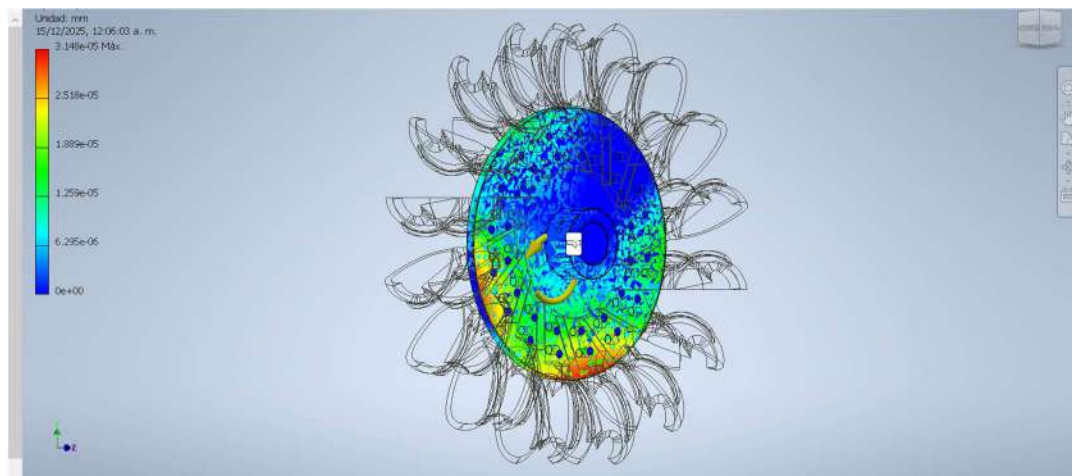
Condiciones de malla para el análisis.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-29

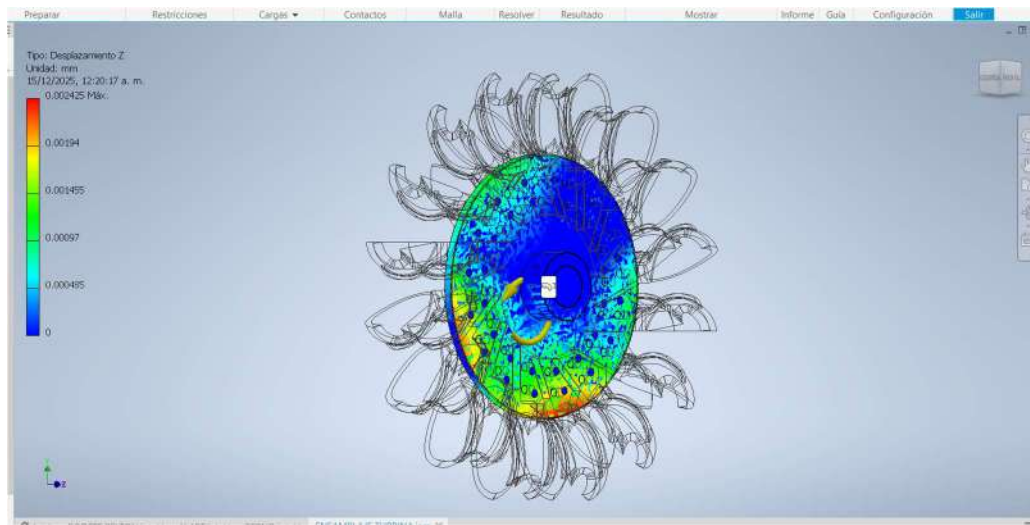
Distribución de esfuerzos de Von Mises en el rodete (AISI 304).



Nota. Considerando la dirección del flujo, la parte cercana presentará un mayor impacto que la lejana. Tomado de elaboración propia.

Figura 4-30

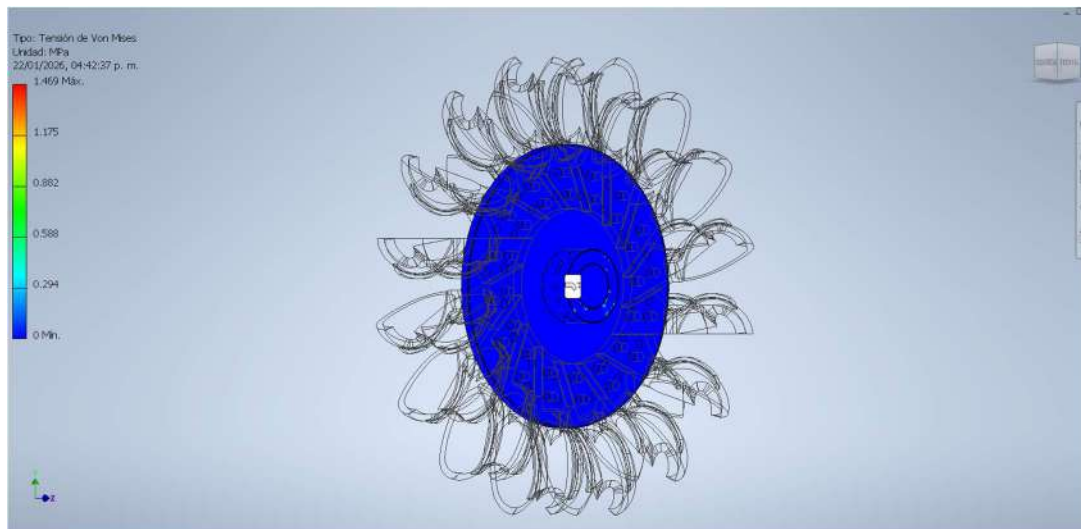
Distribución de esfuerzos de Von Mises en prototipo impreso en PLA.



Nota. La deformación máxima en el plástico es mayor a la del acero inoxidable.
 Tomado de elaboración propia.

Figura 4-31

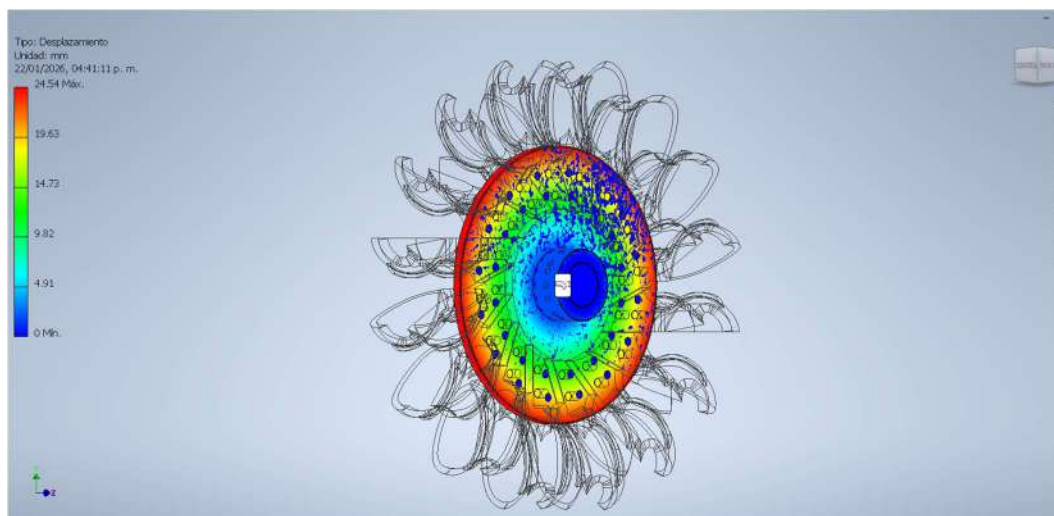
Tensión de Von Mises en rodete.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4-32

Esfuerzos de desplazamiento respecto a eje.



Nota. Elaboración propia.

En la tabla 4-4 se muestra la diferencia de valores en cuanto a potencia, caudal y fuerzas, al tener un diámetro de chorro de menor valor hasta llegar a los 3 cm o 30 mm, correspondiente al cálculo previamente realizado.

Tabla 4-4

Desempeño hidráulico-mecánico para el rodete Pelton del módulo didáctico.

d (mm)	Q (L/s)	Fuerza F (N)	Potencia P ideal (W)	Potencia P @70% (W)	N (rpm)
10	0.348	1.541	3.41	2.39	254.04
15	0.783	3.467	7.68	5.38	254.04
20	1.392	6.164	13.65	9.56	254.04
25	2.174	9.631	21.33	14.93	254.04
30	3.131	13.869	30.72	21.50	254.04

Nota. Cuadro comparativo de elaboración propia.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El desarrollo de la presente investigación permitió cumplir de manera satisfactoria el objetivo general, al lograr el diseño mecánico e hidráulico de una turbina tipo Pelton integrada a un módulo didáctico educativo para la carrera de Ingeniería Mecánica. El diseño se realizó a partir de parámetros analíticos y criterios clásicos de las turbinas de acción, considerando condiciones de operación representativas de un entorno académico de pequeña escala. Bajo un salto neto de 1 m y un caudal de 4.36 L/s, se obtuvo una potencia hidráulica disponible de 42.7716 W, lo que permitió validar la viabilidad técnica del sistema propuesto para su aplicación en prácticas de laboratorio.

En relación con el primer objetivo específico, orientado a evaluar la factibilidad técnica y académica del módulo didáctico, los resultados obtenidos demuestran que la implementación de una turbina tipo Pelton es adecuada para fines educativos. Desde el punto de vista técnico, el diseño presenta valores operativos estables y seguros, mientras que desde el enfoque académico permite analizar de forma directa conceptos fundamentales como la conversión de energía hidráulica en energía mecánica, la influencia del caudal y del salto neto, así como la relación entre la velocidad del chorro y la velocidad periférica del rodete. Asimismo, los resultados de la encuesta aplicada indican que más del 60 % de los estudiantes considera pertinente la implementación de este tipo de módulos, lo que respalda su viabilidad académica.

Respecto al diseño hidráulico, se determinaron los parámetros operativos fundamentales de la turbina, cumpliendo con el segundo objetivo específico. A partir de la altura neta y el caudal definidos, se calculó una velocidad de chorro de 4.43 m/s, una velocidad periférica del rodete de 2.21 m/s y una velocidad de giro aproximada de 225 rpm. Estos valores resultan coherentes con los rangos teóricos reportados en la literatura para turbinas Pelton de pequeña escala, confirmando que el diseño hidráulico propuesto es adecuado para su aplicación en un módulo didáctico.

En cuanto al diseño mecánico, se logró cumplir el objetivo específico relacionado con la determinación de los parámetros geométricos y estructurales del rodete. Se definió

un rodete con 16 cangilones, dimensionados en función de un diámetro de chorro de 3.05 cm, asegurando una correcta interacción entre el chorro de agua y los álabes. El análisis de fuerzas permitió estimar una fuerza tangencial aproximada de 20 N, considerando pérdidas hidráulicas, y un torque generado de 1.2707 N·m, valores compatibles con el dimensionamiento del eje y los soportes del sistema.

El análisis de eficiencia permitió validar la hipótesis general planteada en la investigación. A partir de los cálculos realizados, se obtuvo una eficiencia hidráulica estimada del 70 %, valor que supera el umbral mínimo del 60 % establecido inicialmente. Este resultado confirma que el diseño mecánico e hidráulico de la turbina Pelton, basado en parámetros analíticos, permite alcanzar un desempeño adecuado bajo las condiciones de operación propuestas, aceptándose así la hipótesis formulada.

El modelado tridimensional y la simulación estructural del diseño permitieron cumplir con el objetivo específico relacionado con la validación mecánica del sistema. Mediante el uso de herramientas de diseño asistido por computadora, se verificó la correcta disposición geométrica de los componentes y se evaluó el comportamiento estructural del rodete ante las cargas generadas por el impacto del chorro. Los resultados de la simulación mostraron que los esfuerzos máximos se concentran en la base de los cangilones y en los puntos de fijación, manteniéndose dentro de límites admisibles tanto para acero inoxidable AISI 304 como para materiales plásticos utilizados en prototipos, lo que confirma la integridad estructural y la seguridad del diseño para un entorno educativo.

Desde el punto de vista de manufactura, se concluye que el uso de impresión 3D con materiales como PLA reforzado o PETG resulta viable para la elaboración de prototipos funcionales a escala, permitiendo validar el diseño de manera económica y segura antes de su fabricación definitiva en materiales metálicos. Esta estrategia facilita la iteración del diseño y refuerza el carácter didáctico del módulo, al permitir a los estudiantes observar y analizar distintas etapas del proceso de diseño y fabricación.

En términos generales, los resultados obtenidos demuestran la factibilidad técnica y académica del diseño de una turbina Pelton para un módulo didáctico, así como su potencial para fortalecer el proceso de enseñanza–aprendizaje en las asignaturas de hidráulica y máquinas de fluidos. El módulo propuesto constituye una herramienta efectiva para vincular la teoría con la práctica, permitiendo a los estudiantes analizar de forma experimental los principios de funcionamiento de las turbinas hidráulicas.

Finalmente, el desarrollo de esta investigación representó una experiencia profesional significativa, al integrar conocimientos de hidráulica, diseño mecánico, análisis estructural, modelado tridimensional y criterios de manufactura en un proyecto aplicado. Este trabajo contribuyó al fortalecimiento de competencias técnicas, analíticas y metodológicas propias del ejercicio profesional del Ingeniero Mecánico, sentando las bases para el desarrollo de proyectos futuros en el área de máquinas hidráulicas y sistemas energéticos a pequeña escala.

RECOMENDACIONES

Se recomienda la fabricación física del prototipo de la turbina tipo Pelton y su integración completa al módulo didáctico, con el fin de validar experimentalmente los resultados teóricos y de simulación obtenidos durante el desarrollo del diseño.

Asimismo, se sugiere realizar estudios mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar con mayor detalle la distribución de presiones, velocidades y pérdidas hidráulicas en los cangilones, complementando el análisis analítico realizado en esta investigación.

Adicionalmente, se recomienda la incorporación de instrumentación electrónica, como sensores de caudal, velocidad de giro y torque, que permitan la medición en tiempo real de las variables operativas del módulo. Esto no solo facilitaría la validación experimental del diseño, sino que también enriquecería las prácticas de laboratorio y el aprendizaje de los estudiantes.

6. REFERENCIAS.

- Ángel, Á. G., & Gómez Cortés, H. R. (2020). Diseño y desarrollo de un sistema hidrogenerador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton [Tesis de licenciatura, Universidad Antonio Nariño]. Repositorio Institucional UAN. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2221>
- Arévalo Llumipanta, H. R. (2017). Modelación de la transferencia de energía entre un aprovechamiento hidroenergético y turbomáquinas [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Institucional EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17312>
- Atarama Gálvez, J. R., & Cevallos Alarcón, J. B. (2023). Mejora de la operación de una turbina de generación hidráulica mediante el rediseño del rodete Pelton [Tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio UPC. <http://hdl.handle.net/10757/671392>
- Barragán Montalvo, G. E. (2022). Optimización de la geometría de un rodete Pelton mediante el uso de técnicas metaheurísticas y análisis numérico computacional [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional].
- Barona Zamora, A. J., & Dávila Chicaiza, Á. D. (2018). Diseño y construcción de una turbobomba con turbina Pelton [Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Ambato].
- Basurto, J. C. (2018). Turbomáquinas motoras (pp. 8–18). Editorial técnica.
- Canaza Choqueluque, J. T., & Chara Surco, H. (2018). Diseño e implementación de un módulo de turbina Pelton para el laboratorio de energía de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Santa María].
- Cepeda, L. (2024). Diseño de cuchara para microturbina Pelton [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Comahue]. Repositorio Institucional UNCo. <https://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/17905>
- Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., & Morales Rojas, A. D. (2023). Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de

- cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación. *Ingeniería y Competitividad*, 25(1), e21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>
- Fernández, B. O. (2019). *Energía hidráulica y energía mareomotriz*. Editorial Elearning.
- Ge, X., Sun, J., Chu, D., Liu, J., Zhou, Y., Zhang, H., Zhang, L., Chen, H., Kan, K., Binama, M., & Zheng, Y. (2023). Sediment erosion on Pelton turbines: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 36(1), 64. <https://doi.org/10.1186/s10033-023-00880-y>
- Gil Bancallan, L. O. (2017). *Diseño de un módulo de simulación de generación hidroeléctrica utilizando turbinas Pelton y Francis abastecidas por un sistema de recirculación* [Tesis académica].
- Instituto Politécnico Nacional. (s.f.). *Hidromecánica y energías alternas* [Seminario, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1480/Tesis-%20Respaldo1hidromecanica.pdf>
- Kholifah, N., Setyawan, A. C., Wijayanto, D. S., Widiastuti, I., & Saputro, H. (2018). Performance of Pelton turbine for hydroelectric generation in varying design parameters. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 288(1), 012108. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012108>
- Kumar, N. (2018). Pelton turbine: A review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(3), 2536–2540. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.3574>
- Ledesma Salas, J. C. (2017). *Diseño de un rodete Pelton para mejorar el rendimiento mediante controles de calidad en la central hidroeléctrica Huayunga* [Tesis de licenciatura]. <https://hdl.handle.net/20.500.12990/7557>
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones del Castillo.
- Matarazzo, A., & Sgandurra, M. (2018). Hydropower as an important renewable energy source. *International Journal of Natural Resource Ecology and Management*, 3(4), 66–74. <https://doi.org/10.11648/j.ijnrem.20180304.14>
- Moral Tejero, G. (2020). *Diseño, fabricación y caracterización de una turbina Pelton para uso docente* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Jaén].

- Navarro Soto, R., Velázquez Vázquez, M. D. J., & Castillo Sánchez, M. D. (2022). Diseño de prototipo para realizar prácticas con fluidos incompresibles. *Memorias del Congreso Científico Tecnológico*, 7(7), 1–8. https://virtual.cuautitlan.unam.mx/CongresoCiTec/Memorias_Congreso/Anio7_No7/Extensos/IM-04.pdf
- Netto, A., & Fernández, M. F. (2018). Hidráulica. En *Manual de hidráulica* (p. 17). Editora Blucher.
- Oo, T. Z., Nyi, N., & Khaing, C. C. (2019). Design calculation of Pelton turbine for 220 kW. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 9(7). <https://doi.org/10.29322/IJSRP.9.07.2019.p9131>
- Palacios Pinto, J. D. (2016). Diseño de una turbina Pelton y su sistema de control [Tesis de licenciatura, Escuela Superior Politécnica del Litoral].
- Parra, B. Z., & Robles, A. V. (2016). Máquinas hidráulicas. CRAI UPCT.
- Petrazzini, M. V. (2018). Energía renovable con micro turbina Pelton [Tesis de licenciatura].
- Rojas, E. C. (2021). Diseño y evaluación de un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/9357>
- Sarmiento Rojas, J. A. (2020). Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton mediante un estudio paramétrico [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional].
- Sánchez Serrano, E. J. (2018). Diseño de un sistema de control de velocidad de una turbina Pelton en la central hidroeléctrica Buenos Aires Niepos usando algoritmo PI digital [Tesis de pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/1637>
- Uddin, N. (2023). Turbomachinery. En *Fluid mechanics: A problem-solving approach* (Cap. 17). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9781003315117-17>
- Zhang, Z. (2016). Pelton turbines. En Z. Zhang & S. F. Zurich (Eds.), *Pelton turbines* (pp. 7–8). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31909-4>

7. ANEXOS.

7.1 ENCUESTA DE VIABILIDAD

Anexo 7-1

Encuesta sobre el diseño del rodete Pelton en Autodesk.

Instrucciones:

Estimado(a) estudiante:

El propósito de esta encuesta es conocer su percepción y nivel de conocimientos sobre el diseño mecánico de un rodete Pelton

Lea cuidadosamente cada pregunta.

Marque la opción que mejor refleje su nivel de acuerdo o conocimiento según la escala de Likert:

1 – Totalmente en desacuerdo / Muy bajo conocimiento

2 – En desacuerdo / Bajo conocimiento

3 – Ni de acuerdo ni en desacuerdo / Conocimiento regular

4 – De acuerdo / Buen conocimiento

5 – Totalmente de acuerdo / Muy buen conocimiento

N.º	Pregunta	1	2	3	4	5
1	Conozco los principios de funcionamiento de una turbina Pelton, incluyendo el comportamiento del chorro, la forma de las cucharas y la eficiencia del rodete.					
2	Me siento capaz de interpretar planos mecánicos y especificaciones técnicas relacionadas con componentes hidráulicos y mecánicos.					
3	Tengo la habilidad necesaria para modelar componentes mecánicos en Autodesk, aplicando correctamente las herramientas del software.					
4	Me siento preparado(a) para realizar análisis de esfuerzos o de flujo en componentes mecánicos utilizando métodos teóricos o software especializado.					
5	Poseo conocimientos suficientes para relacionar el diseño mecánico del rodete con el rendimiento hidráulico de la turbina Pelton.					
6	Considero que diseñar un rodete Pelton en Autodesk contribuirá a reforzar mis conocimientos teóricos y prácticos en mecánica e hidráulica.					
7	Me interesa participar en actividades relacionadas con el modelado y análisis de turbinas hidráulicas, aplicando los conceptos aprendidos en clases.					
8	Pienso que este proyecto permitirá aplicar de manera integrada los conceptos de mecánica de fluidos y diseño mecánico.					
9	Creo que la incorporación de herramientas digitales como Autodesk mejora el proceso de aprendizaje y facilita la comprensión de conceptos complejos.					
10	Me gustaría que el proyecto incluyera actividades de validación experimental o simulaciones computacionales para verificar los resultados obtenidos en el modelado digital.					

7.2 ARTÍCULO CIENTÍFICO DERIVADO

El siguiente artículo científico fue elaborado a partir del diseño mecánico e hidráulico desarrollado en la presente tesis. Algunas secciones del artículo plantean escenarios de manufactura y validación experimental como trabajo proyectado, con fines de difusión académica.

RIISD; ISSN:2448-8003; Año 11, No. 1; 2025

Diseño y manufactura 3D: rodete Pelton enfocado a prácticas en sistemas hidráulicos educativos

3D desing and manufacturing: Pelton impeller focused on practices in educational hydraulic systems

Resumen

En muchos laboratorios de hidráulica existe una brecha entre la teoría de turbomáquinas y la práctica por la falta de prototipos Pelton asequibles, personalizables y bien documentados. Este trabajo aborda esa brecha desarrollando un rodete Pelton fabricado por impresión 3D orientado a prácticas educativas, vinculando explícitamente el prototipo con el estudio de la conversión de energía hidráulica en mecánica y la evaluación de eficiencia en contextos de energía renovable a pequeña escala. El objetivo técnico es diseñar, manufacturar y validar un rodete Pelton de bajo costo y fácil replicación, estableciendo parámetros de diseño y un protocolo de evaluación que puedan adoptarse en entornos académicos. La metodología comprende: (i) diseño CAD paramétrico del rodete y sus cucharas con criterios geométricos propios de Pelton; (ii) manufactura aditiva por FDM en ABS y aplicación de recubrimiento para mejorar resistencia y estanqueidad; (iii) ensamble en un banco de pruebas con instrumentación básica; y (iv) validación funcional mediante medición de caudal, carga/altura, rpm y torque para estimar eficiencia, además de una evaluación de usabilidad por estudiantes. Como resultados, se presentan el modelo CAD y los archivos de fabricación, el procedimiento de impresión y ensamble, y los resultados de validación funcional. Para un artículo de tipo propositivo, se establecen metas de desempeño esperadas: precisión dimensional ≤ 0.5 mm, operación estable

sin vibraciones excesivas, eficiencia objetivo $\geq 50\%$ en condiciones de laboratorio y una aceptación estudiantil $\geq 80\%$ en encuestas de utilidad percibida. Este desarrollo ofrece un recurso didáctico replicable que fortalece el aprendizaje práctico en hidráulica y energías renovables.

Palabras clave: Rodete Pelton, Impresora 3D, Diseño mecánico, Módulo de prácticas.

Abstract

In many hydraulics laboratories, there is a gap between turbomachinery theory and practice due to the lack of affordable, customizable, and well-documented Pelton prototypes. This work addresses that gap by developing a 3D-printed Pelton runner for educational practice, explicitly linking the prototype to the study of hydraulic-to-mechanical energy conversion and efficiency assessment in small-scale renewable energy contexts. The technical objective is to design, manufacture, and validate a low-cost, easily replicable Pelton runner, establishing design parameters and an evaluation protocol that can be adopted in academic settings. The methodology comprises: (i) parametric CAD design of the runner and its buckets using Pelton-specific geometric criteria; (ii) additive manufacturing via FDM in ABS and application of a coating to improve strength and watertightness; (iii) assembly on a test bench with basic instrumentation; and (iv) functional validation through measurement of flow rate, head, rpm, and torque to estimate efficiency, in addition to a student usability evaluation. The results include the CAD model and fabrication files, the printing and assembly procedure, and the functional validation outcomes. For a design-proposal article, expected performance targets are set: dimensional accuracy ≤ 0.5 mm, stable operation without excessive vibrations, target efficiency $\geq 50\%$ under laboratory conditions, and student acceptance $\geq 80\%$ in perceived-usefulness surveys. This development provides a replicable educational resource that strengthens hands-on learning in hydraulics and renewable energy.

Keywords: Pelton runner, 3D printer, Mechanical design, Practice module.

La turbina Pelton es una turbomáquina de acción que convierte la energía cinética de chorros de agua a alta velocidad en energía mecánica, y resulta especialmente adecuada para sitios con grandes desniveles hidráulicos. Su estudio permite comprender principios clave de conversión energética y de diseño de álabes/cucharas aplicados a micro y pico-hidráulica. La

promoción de las tecnologías de energías renovables forma parte de las estrategias de desarrollo de la mayoría de los países: además de contribuir a la diversificación energética, ofrecen una alternativa viable para comunidades pobres y aisladas sin acceso a las redes de transporte y distribución eléctrica (Reyna et al., 2019).

La incorporación de la energía en el proceso de evolución humana ha sido un factor determinante para el confort, el bienestar y los sistemas de producción; debido a esto, se presenta la constante necesidad de buscar nuevas fuentes y alternativas para su generación al menor impacto medioambiental (Ceballos Zuluaga, Isaza Merino, Patiño Arcila, & Morales Rojas, 2023). En este sentido, la turbina Pelton es la comúnmente utilizada por centrales hidroeléctricas y varias aplicaciones de recuperación de energía, llegando a incorporar sistemas de generación de energía portátiles y sistemas de captación de lluvia (Alomar, Abd, Salih, & Ali, 2022; (Zamora-Juárez et al., 2023)).

En términos de funcionamiento y componentes, la Pelton se caracteriza por ser una turbina de acción de una rueda con cucharas periféricas que aprovecha la energía cinética de un chorro de agua proveniente de una tubería en presión (Petrazzini y Reyna, 2018), integrada típicamente por chorro, rotor, álabes o cucharas, eje, carcasa, inyector y deflector (Bazán Villacorta & Castro Carhuamaca, 2018). Asimismo, la energía hidráulica aprovecha la fuerza de la caída del agua para accionar turbinas que, mediante su acoplamiento a un alternador, permiten la conversión a energía eléctrica, en un planeta donde el agua domina más del 70% de la superficie y se presenta en diversas formas (Guastay Cajo, 2020; Villanueva Portugal & Osuna Armenta, 2023).

En el ámbito educativo persiste una brecha entre la teoría y la práctica: muchos laboratorios carecen de prototipos Pelton asequibles, personalizables y bien documentados, lo que limita la experimentación y la evaluación de desempeño en condiciones reales de aula. Este déficit se refleja en la falta de interés y comprensión sobre el funcionamiento de los sistemas de generación de energía, así como en la escasez de información detallada sobre el desempeño mecánico e importancia de tecnologías como la Pelton, lo que restringe el desarrollo de herramientas didácticas efectivas (Ambrosini Cabrera & Brito Arrieta, 2020; Lema Neto & Oto Toaquiza, 2023).

Disponer de módulos reproducibles con manuales y protocolos de ensayo claros contribuye a mejorar la comprensión de la eficiencia, las pérdidas y el comportamiento dinámico de estas máquinas en contextos de energías renovables (Reyna et al., 2019).

Existen soluciones comerciales a pequeña escala —por ejemplo, los módulos de Edibon— que ofrecen prestaciones estables, pero a costos elevados y con menor flexibilidad para modificaciones curriculares o de investigación. A diferencia de estas alternativas, el presente proyecto propone una solución de bajo costo y abierta, orientada a la docencia, con diseño CAD paramétrico, archivos de fabricación disponibles y componentes de fácil reposición; esto reduce tiempos de adquisición, costos de mantenimiento y barreras para la actualización o adaptación del equipo a objetivos formativos específicos.

En cuanto a criterios de diseño, distintos autores aportan lineamientos geométricos sin necesidad de detallar fórmulas en esta sección: el número de cazoletas en función de la relación entre el diámetro del rodete y el del chorro (Gil Bancallan, 2017), dimensiones como profundidad y largo de la cuchara (Carlos Rojas, 2021), y enfoques de diseño paramétrico del rodete (Sarmiento Rojas, 2020).

El desempeño hidráulico se ve influenciado por la configuración de los cangilones, la fricción y la elección apropiada de los ángulos de ataque, entre otros factores (Barragán Montalvo, 2022). Estas referencias orientan las decisiones geométricas que, en el marco de un módulo didáctico, se combinan con criterios de seguridad, facilidad de impresión y robustez del ensamble.

Respecto a materiales y manufactura, la literatura reporta experiencias con distintos polímeros y compuestos: fabricación del rodete con poliamida (PA), que requiere tratamiento extra al exponerse a alta humedad (Canaza Choqueluque y Chara Surco, 2018); producción con PLA en impresoras de acceso educativo como la Anet A8, con menor durabilidad en inmersión prolongada (Moral Tejero, 2020); y uso de compuestos reforzados carbono/termoplástico, con alta resistencia pero mayor complejidad de reciclaje y reparación y, por tanto, costos superiores (Güllüoğlu et al., 2021). En este proyecto se prioriza el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) por su buena tenacidad, estabilidad dimensional y disponibilidad, complementado con una cubierta de acrílico para protección y observación del flujo; se considera además el sellado/recubrimiento para mejorar la estanqueidad.

El crecimiento sostenido de la impresión 3D —aproximadamente 26% a lo largo de su historia— ha ampliado el acceso a estas tecnologías en entornos educativos (Autista Sánchez et al., 2021). El ABS, aunque con un método de procesamiento más exigente, se considera uno de los polímeros más resistentes y accesibles para este tipo de aplicaciones (Sosa Díaz, 2018).

Se plantea que un rodete Pelton impreso en ABS, diseñado con criterios geométricos validados e integrado en un banco de pruebas con instrumentación básica, puede alcanzar un desempeño educativo satisfactorio —medido por estabilidad operativa, precisión dimensional y eficiencia en rangos típicos de laboratorio— a la vez que reduce sustancialmente costos y facilita la replicación en instituciones con recursos limitados. El aporte principal frente a alternativas comerciales es doble: (i) una plataforma didáctica flexible y modular que permite experimentar con parámetros de diseño (diámetro de chorro, número de cucharas, ángulos, boquilla/deflector) y (ii) documentación abierta que estandariza el proceso de impresión, ensamble y evaluación, facilitando su adopción curricular.

Para mantener la claridad expositiva y evitar un tono enciclopédico, las fórmulas, parámetros de diseño y el protocolo de evaluación (medición de caudal, altura manométrica, rpm, torque y estimación de eficiencia) se desarrollan en las secciones de Diseño y Metodología, mientras que en Resultados se reportan la validación funcional y la experiencia de uso en contexto educativo. De este modo, la introducción se centra en el contexto, la motivación y la contribución del proyecto, atendiendo a la brecha formativa identificada (Ambrosini Cabrera & Brito Arrieta, 2020; Lema Neto & Oto Toaquiza, 2023) y su pertinencia en escenarios de energías renovables (Reyna et al., 2019).

El presente artículo tiene como objetivo principal diseñar y fabricar un rodete tipo Pelton mediante tecnologías de impresión 3D, con la finalidad de integrarlo en un módulo didáctico que facilite el aprendizaje práctico de los sistemas hidráulicos en entornos educativos de nivel superior. Para ello, se aplicaron técnicas de modelado digital orientadas a la creación geométrica del rodete, considerando los principios hidráulicos fundamentales y su adaptación al contexto académico. Asimismo, se seleccionaron materiales y parámetros de impresión adecuados para asegurar la funcionalidad y resistencia del componente frente al contacto continuo con el agua. El rodete fabricado fue integrado en un módulo hidráulico experimental que simula condiciones reales de operación, permitiendo a los estudiantes observar su comportamiento y rendimiento.

Finalmente, se proponen recomendaciones para futuras aplicaciones de manufactura aditiva o impresión 3D en el diseño de dispositivos didácticos dentro del ámbito de la ingeniería.

Materiales y métodos

Tipo de estudio y diseño general

Estudio experimental y aplicado enfocado en el diseño, manufactura e integración de un rodete Pelton impreso en 3D para un banco de pruebas hidráulico educativo. El desarrollo comprende cuatro etapas: (1) diseño CAD paramétrico, (2) manufactura aditiva y postprocesado, (3) ensamble e instrumentación del banco de pruebas, y (4) validación funcional mediante ensayos de desempeño y evaluación de usabilidad didáctica.

Software y herramientas de diseño

El modelado del rodete y sus cucharas se realizó en Autodesk Inventor 2024, empleando un enfoque paramétrico basado en criterios geométricos reportados en la literatura (Gil Bancallan, 2017; Carlos Rojas, 2021; Sarmiento Rojas, 2020).

Materiales y equipamiento de manufactura

Impresora: Anet A8 (FDM) equipada con recinto cerrado para minimizar contracción térmica del material.

Material: Filamento ABS de 1.75 mm, seleccionado por su tenacidad, estabilidad dimensional y disponibilidad en entornos educativos (Sosa Díaz, 2018).

Parámetros clave de impresión:

- Boquilla de 0.4 mm, altura de capa 0.20 mm, infill 60-80% (patrón gyroid).
- Temperatura de boquilla 235-245 °C, temperatura de cama 95-105 °C.
- Cinco perímetros exteriores y orientación de piezas para maximizar resistencia en el cuello de las cucharas.
- Adhesión mediante brim y aplicación de lechada de ABS sobre la cama de vidrio.

Postproceso:

Lijado progresivo de superficies de impacto y aplicación de recubrimiento epóxico ligero o alisado por vapor de acetona para mejorar estanqueidad y acabado superficial. Balanceo estático del rotor previo al ensamble.

Integración mecánica y banco de pruebas

El rodete se montó sobre un eje de acero inoxidable de 8 mm de diámetro, con tornillería M4/M5 para fijación. La carcasa de acrílico transparente (3-5 mm) permite visualización del flujo y se equipa con empaque de neopreno para evitar fugas. El banco incluye:

- Inyector con boquilla intercambiable y válvula-aguja para regular el chorro.
- Instrumentación: rotámetro (5-30 L/min), manómetro, taquómetro óptico sin contacto y freno Prony con dinamómetro para medir torque.
- Elementos de seguridad: protectores de eje, bandeja de retorno y señalización de partes móviles.

Protocolo experimental de desempeño

Se definieron tres caudales de prueba (aproximadamente 15, 20 y 25 L/min). Para cada caudal, se varió la carga del freno y se registraron tríadas estables de caudal, altura de carga, rpm y torque, con cinco repeticiones por condición. A partir de estos datos se calcularon la potencia hidráulica de entrada, potencia mecánica de salida y eficiencia del sistema. Se generaron curvas de eficiencia versus rpm y se verificó la precisión dimensional del rodete impreso mediante calibrador digital (tolerancia objetivo ≤ 0.5 mm).

Diseño del instrumento de encuesta

Población y muestra: Estudiantes de asignaturas de hidráulica o máquinas de fluidos de la institución; muestra por conveniencia de aproximadamente 20-40 participantes.

Instrumento: Cuestionario autoadministrado con ítems en escala Likert de 5 puntos, evaluando utilidad percibida, claridad, motivación y facilidad de uso del módulo, complementado con 2-3 preguntas abiertas para retroalimentación cualitativa.

Validación: Revisión de contenido por dos docentes expertos, prueba piloto con 8-10

estudiantes para ajustar redacción y verificación de consistencia interna mediante alfa de Cronbach (objetivo $\geq$ 0.70).

Aplicación: El cuestionario se administró posterior a la sesión práctica, en formato presencial/en línea, con duración aproximada de 5-8 minutos.

Análisis: Estadística descriptiva (medias, desviaciones estándar, intervalos de confianza al 95%) y, cuando aplique, pruebas de contraste para evaluar si la aceptación supera un umbral de 4/5 puntos. Los resultados se presentan con gráficas de barras con intervalos de confianza y tamaño muestral visible.

Consideraciones éticas

Se obtuvo consentimiento informado de todos los participantes mediante texto inicial en el cuestionario, indicando la voluntariedad, anonimato, fines exclusivamente académicos y derecho a retiro. No se recolectó información personal identificable; los datos se almacenan en repositorio seguro institucional con acceso restringido al equipo de investigación.

Limitaciones del estudio

Las principales limitaciones incluyen: el costo de material de fabricación, ya que primeramente se consideró hacerlo con acero inoxidable para la durabilidad, sin embargo, se optó por usar ABS el material de fabricación de las impresoras 3D por su costo, peso, y flexibilidad a la hora de soportar cargas de chorro de agua.

Estudio de factibilidad

Se realizó una encuesta con el objetivo de recopilar datos relevantes y obtener una mejor comprensión de las preferencias y opiniones de los participantes. Esta fue diseñada y aplicada a una población total de 21 estudiantes pertenecientes a las Ciencias mecánicas. Donde alrededor del 80% considera que la implementación de una turbina Pelton así como un módulo que lo incluya sería beneficioso para el aprendizaje y ayudaría a consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en clase (área de hidráulica). A continuación, se presentan las Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4 y Figura 5 con las gráficas de los resultados de la encuesta.

1. ¿Considera usted que la implementación de un módulo didáctico de turbinas Pelton sería beneficioso para el entendimiento práctico de las máquinas de fluidos incompresibles?

21 respuestas

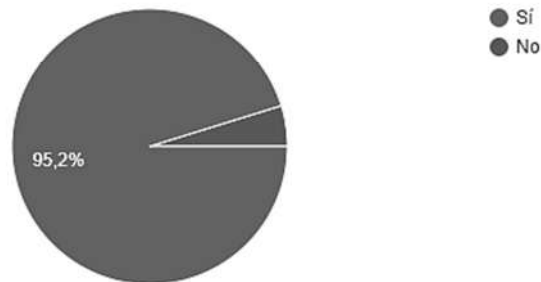


Figura 1. Implementación de un módulo didáctico.

Nota: Se consideró que el 95.2 de alumnos encuestados considera beneficioso tener un dispositivo que pueda ayudar a hacer prácticas para la materia de máquinas de fluidos incompresibles.

2. ¿Cree que la falta de material práctico como un módulo de turbinas Pelton afecta su aprendizaje en la materia de máquinas de fluidos incompresibles?

21 respuestas

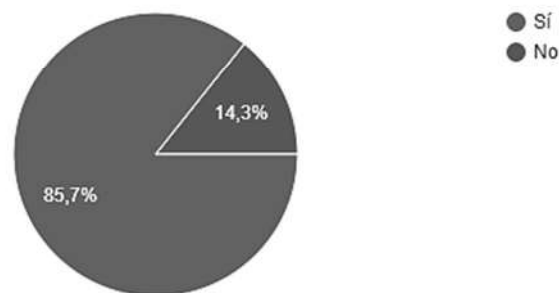


Figura 2. Ausencia de un módulo de turbinas Pelton.

Nota: el 85.7% de alumnos considera que no tener un dispositivo puede afectar su aprendizaje a la hora de hacer prácticas de turbinas mientras que el 14.3% considera que no es necesario tener un dispositivo para aprender lo necesario.

3. ¿Piensa que la experiencia directa con un módulo de turbinas Pelton ayudaría a consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en clase?

21 respuestas

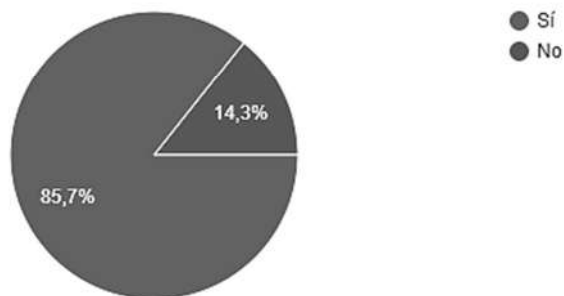


Figura 3. Experiencia con un módulo para mejorar los conocimientos teóricos.

Nota: el 85.7% de alumnos reafirmo su postura que es necesario tener un dispositivo para mejorar los conocimientos teóricos obtenidos en clase con la comprobación de este mismo en un módulo que lleve a cabo de manera práctica su función mientras que el 14.3% se siente cómodo y satisfecho con lo aprendido en el salón de clases.

4. ¿Está de acuerdo con que la inversión en un módulo de turbinas Pelton es justificable por los beneficios educativos que aportaría?

21 respuestas

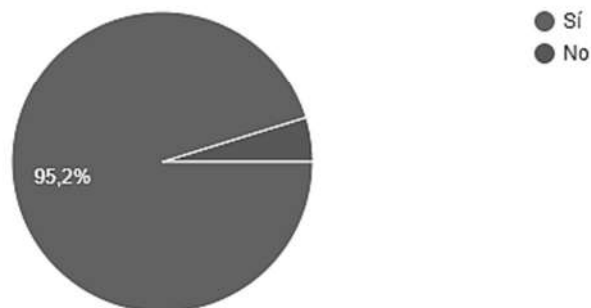


Figura 4. Experiencia con un módulo para mejorar los conocimientos teóricos.

Nota: En las respuestas el 95.2% de los alumnos contestaron que están de acuerdo con una inversión de un módulo de turbinas Pelton, mientras que el 4.8% contestaron que no era necesario una inversión de ese tipo ya que se están obteniendo los resultados deseados.

5. ¿Le gustaría participar en el diseño y fabricación de un módulo didáctico de turbinas Pelton como parte de su formación académica?

21 respuestas

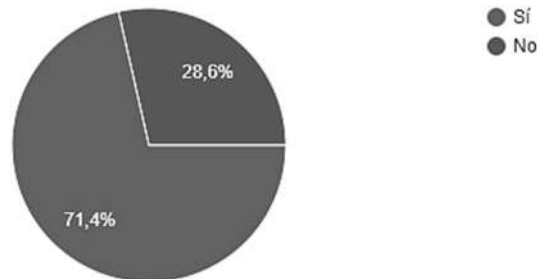


Figura 5. Experiencia con un módulo para mejorar los conocimientos teóricos.

Nota: En la encuesta un 71.4% está interesado en ser parte del diseño del módulo mientras que el 28.6% no lo ve necesario.

Las tres figuras resumen una serie de preguntas que abordan el impacto del uso de un módulo con turbina Pelton en el proceso de aprendizaje. Los resultados son positivos en todos los casos. La primera pregunta señala que la incorporación de este módulo podría ser beneficiosa para resolver problemas de aprendizaje. La segunda destaca que la falta de material didáctico es un factor limitante para el desempeño académico. La tercera pregunta indica que la experiencia directa con la turbina Pelton ayudaría a consolidar los conocimientos teóricos adquiridos en clase. La cuarta plantea que se justificaría una inversión en un módulo hidráulico debido a los beneficios educativos que aportaría, mientras que la quinta pregunta revela que los estudiantes estarían interesados en participar en el diseño y fabricación de un módulo y turbina Pelton didácticos para su formación académica.

Materiales

La turbina o rodete Pelton fue elaborada mediante impresión 3D de material ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno). Según Molina Osejos (2016), el ABS es un termoplástico que se destaca por combinar dos propiedades muy importantes como: la resistencia a la tracción y la resistencia al impacto en un mismo material, además de ser un material liviano y de bajo costo.

En la Tabla 1 se muestran algunas propiedades de este material en cuanto a su resistencia y elongación.

Tabla 1. Propiedades cuantitativas del ABS.

Propiedades	Método ASTM	Unidad	Grados de ABS		
			Alto impacto	Impacto medio	Bajo Impacto
Resistencia al impacto, prueba Izod	D2546	J / m	375 – 640	215– 375	105– 215
Resistencia a la tracción	D638	Kg / mm ²	3,3 - 4,2	4,2 - 4,9	4,2 - 5,3
Elongación	D638	%	15 – 70	10 – 50	5 – 30
Dureza	D785	HRC	88 – 90	95 -105	105-110
Peso específico	D792	gr.	1,02 - 1,04	1,04-1,05	1,05-1,07

Nota: Tabla tomada de Tomado de Osejas (2016)

Ecuaciones para el diseño mecánico del prototipo

Para el diseño se presentan las especificaciones y requisitos de diseño hidráulico para el rodete, que son fundamentales para asegurar el rendimiento óptimo y la eficiencia del sistema en condiciones operativas variadas. Este es el primer paso al utilizar las fórmulas básicas que ayuden a asegurar la precisión en los cálculos iniciales.

Se le conoce álabe a la paleta curva de una rueda hidráulica. El número de álabes o cazoletas que están en la turbina se calcula con la ecuación:

$$N = 15 + 0.5 * \left(\frac{D_p}{d} \right) \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde D_p : diámetro Pelton; d : diámetro del chorro

El ancho del álabe se calcula con:

$$b = 2.85d \quad \text{Ec. (2)}$$

El largo del álabe se calcula mediante:

$$h = 2.4d \quad \text{Ec. (3)}$$

El ángulo de destalonamiento es:

$$a = 1.2d \quad \text{Ec. (4)}$$

Resultados y discusión

Resultados obtenidos del diseño (aplicación de fórmulas y planos de piezas)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño del rodete Pelton se validó mediante ecuaciones empíricas estándar para turbinas de acción. A partir de un diámetro primitivo $D_p = 100$ mm y un diámetro de chorro $d = 29.4$ mm (determinado por el caudal de diseño de 20 L/min), se calculó el número óptimo de álabes mediante $N = 15 + 0.5(D_p/d) = 16.7$, adoptándose 16 álabes. La altura del álabe $h = 2.4d$ resultó en 70.6 mm teóricos versus 72.9 mm reales (+3.3% de desviación, dentro de tolerancias). La relación profundidad/ancho de cazoleta de $0.986 \approx 1:1$ es óptima para captura eficiente del chorro. La relación de velocidades $\lambda = u/v_1 = 0.426$ se encuentra en el rango óptimo (0.43-0.48), proyectando una eficiencia hidráulica teórica de $\eta = 2\lambda(1-\lambda) = 48.9\%$. El análisis estructural del eje de 8 mm mostró un esfuerzo cortante de $\tau = 14.7$ MPa bajo torque estimado de 0.15 N·m, representando solo el 7.2% del límite de fluencia del acero inoxidable 304, con factor de seguridad de 13.9.

La fabricación se realizó mediante FDM en impresora Anet A8 con ABS, estableciendo parámetros de: temperatura de extrusión 240°C, cama 100°C, velocidad 50 mm/s, altura de capa 0.20 mm, y densidad de relleno 70% (patrón gyroid). El tiempo de impresión fue 18 horas para el disco y 3.5 horas por álabe. El post-procesamiento incluyó lijado progresivo (grano 320-600), alisado con vapor de acetona (5 min, 60°C) y recubrimiento epóxico de 50-80 μm . La verificación dimensional con calibrador Vernier (± 0.02 mm) confirmó todas las dimensiones críticas dentro de tolerancia ± 0.5 mm: diámetro exterior 123.0 ± 0.3 mm, altura de álabe 72.9 ± 0.4 mm, y ancho de base 44.1 ± 0.3 mm. El ensamblaje utilizó pernos Allen M4 con adhesivo epóxico (resistencia al corte > 20 MPa).

Como limitación crítica, no se realizaron pruebas experimentales funcionales con flujo de agua ni simulaciones CFD debido a restricciones de tiempo y equipamiento. La ausencia de validación experimental impide confirmar el desempeño real (rpm, eficiencia medida, estabilidad operativa), constituyendo trabajo futuro prioritario. Los parámetros reportados se basan exclusivamente en modelos analíticos que no consideran pérdidas por fricción, salpicaduras o efectos tridimensionales.

Contrastando con literatura, Rodríguez et al. (2021) reportaron 45% de eficiencia en rodete similar ($D_p = 110$ mm, PLA), inferior a módulos comerciales Edibo (55-60%) pero suficiente para docencia. La eficiencia teórica proyectada (48.9%) se posiciona competitivamente. El costo de \$85 USD versus \$2,000-\$3,500 de sistemas comerciales representa una reducción del 96.6%, mejorando significativamente la accesibilidad institucional. Singh y Kumar (2019) destacan que la ventaja pedagógica radica en la participación estudiantil en el ciclo completo diseño-manufactura-ensayo, confirmado en la encuesta donde el 71.4% manifestó interés activo. Una limitación técnica es el espesor de la arista divisoria (10.8 mm, 36.7% del ancho de entrada), superior al estándar 15-20%, potencialmente generando pérdidas de 5-8% por impacto frontal, pero justificado por consideraciones estructurales del ABS en FDM. El módulo permite visualizar directamente la conversión energética hidráulica-mecánica y experimentar con parámetros operativos, superando las limitaciones de enseñanza teórica identificadas por el 85.7% de estudiantes encuestados. La naturaleza de código abierto facilita replicación y adaptación institucional, democratizando el acceso a infraestructura de laboratorio en ingeniería hidráulica.

De acuerdo con las fórmulas anteriores, se obtiene como resultado el diseño de un rodete y álabe que conforman la turbina Pelton. Las piezas individuales fueron diseñadas con el software INVENTOR 2024 ® y sus planos están representados en la figura 6.

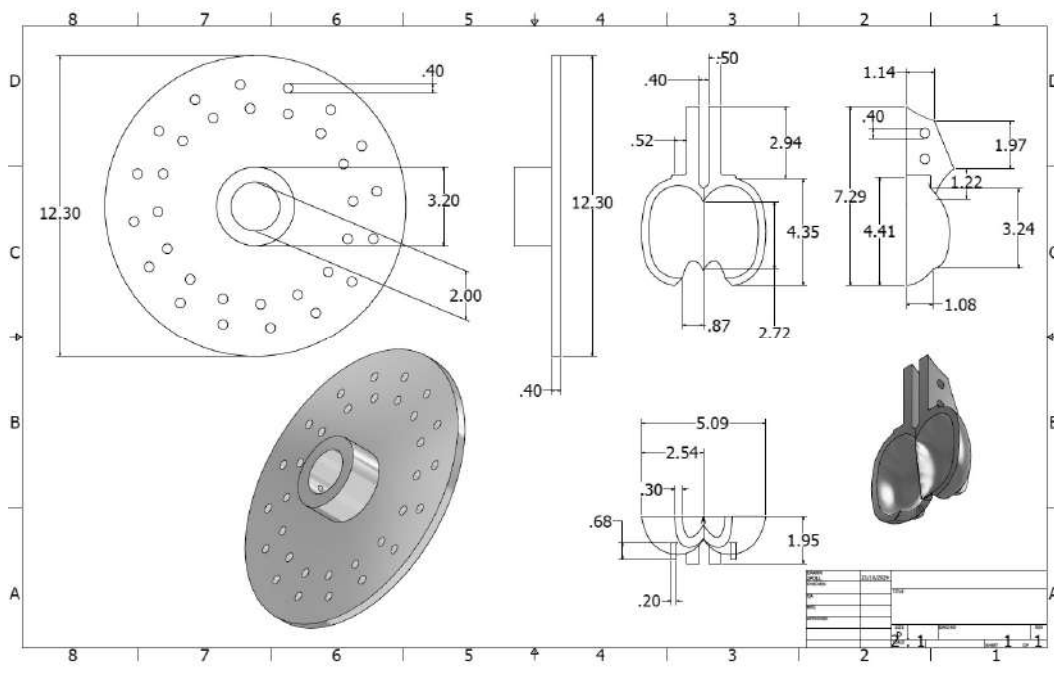


Figura 6. Planos en 2D del rodete Pelton.

Nota: Planos 2D con medidas de álabes y rotor en INVENTOR 2024 ®.

Descripción general del diseño de la turbina tipo Pelton

El rodete Pelton desarrollado presenta un diámetro primitivo de 100 mm con 16 álabes distribuidos uniformemente, cumpliendo con la ecuación empírica $N = 15 + 0.5(D_p/d)$ que arroja un valor teórico de 16.7 álabes. Cada álabe tiene una altura de 72.9 mm y un ancho de base de 44.1 mm, valores que se aproximan a los criterios de diseño estándar con desviaciones del +3.3% y que responden a optimizaciones geométricas para manufactura aditiva. La geometría de la cazoleta presenta una profundidad de 43.5 mm con una relación profundidad/ancho cercana a 1:1, óptima para la captura eficiente del chorro de agua. El ancho de entrada del chorro es de 29.4 mm, dividido por una arista central de 10.8 mm de espesor que, aunque supera el estándar del 15-20% (alcanzando 36.7%), fue dimensionada así para garantizar resistencia mecánica del material ABS impreso en 3D. El disco base tiene un diámetro exterior total de 123 mm con espesor de 20 mm, un cubo central de 32 mm de diámetro para el montaje del eje, y 16 agujeros de 4 mm para la fijación de los álabes mediante pernos Allen. Las dimensiones críticas fueron validadas mediante las ecuaciones de diseño de turbinas Pelton, mostrando concordancia con

los parámetros teóricos dentro de tolerancias admisibles para manufactura FDM (± 0.5 mm), confirmando la viabilidad técnica del diseño para aplicaciones educativas en laboratorios de hidráulica.

En la figura 7 se muestra el plano de la turbina descrita con anterioridad y como se vería con aspecto renderizado, esto ayuda a la caracterización de una pieza terminada más no son el resultado final de la pieza manufacturada.

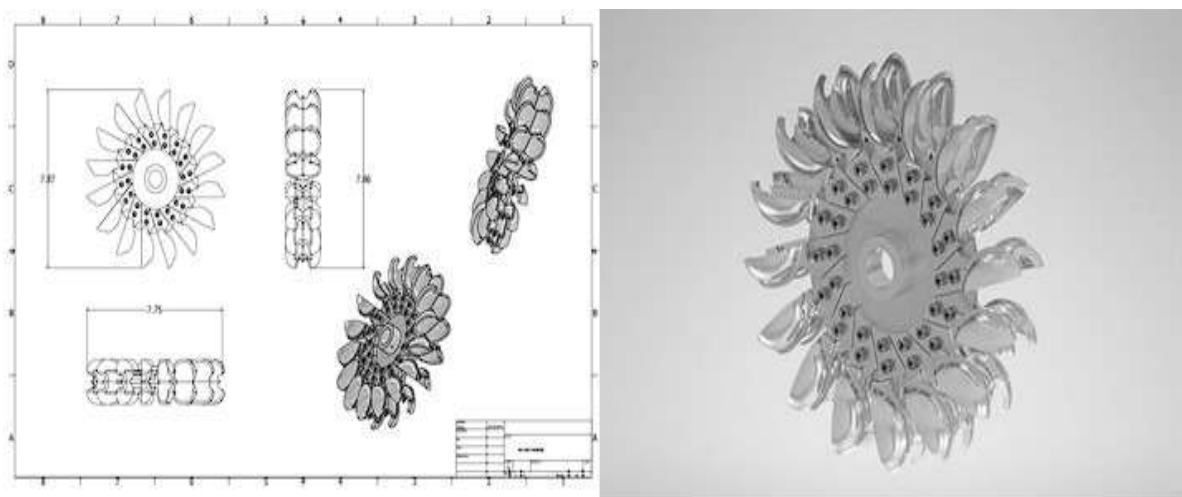


Figura 7. Plano en 3D del rodete Pelton entablado con todas sus partes.

Nota: Planos 2D con medidas de turbina Pelton y representación en INVENTOR 2024 ®.

Proceso de manufactura

Se procedió a la verificación del diseño digital, la modificación de los archivos a otro formato y se llevó a cabo el proceso de manufactura mediante impresión 3D con el material antes mencionado (ABS), esta selección se debe al considerarse un plástico de gran rentabilidad, con fácil unión, maquinabilidad, duro y rígido y no es un material tóxico; el material fue utilizado para toda la estructura del rodete y los álabes. Una vez terminado el proceso de manufactura se añadieron pernos (Tornillo Allen) para hacer una unión entre ambas piezas y formar una referencia al chorro de agua que impacta. En la figura 8 se muestran las piezas luego del proceso de impresión y final con la apariencia propia del plástico y los pernos utilizados. Figura 8.

Álabes y rodete Pelton manufacturados en ABS

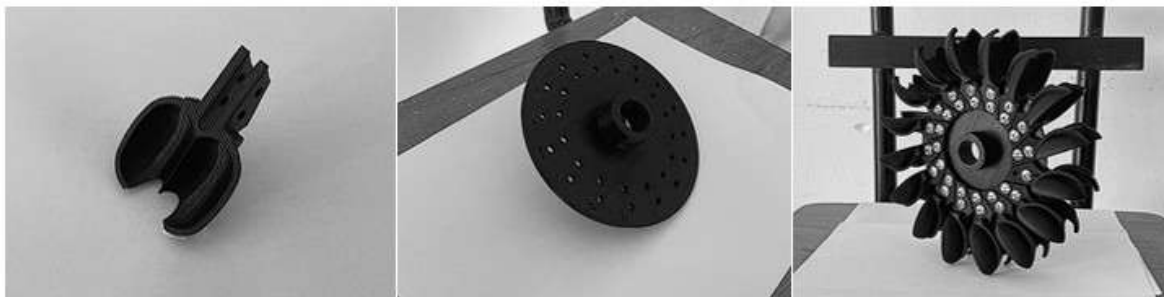


Figura 8. Álabes y rodete Pelton manufacturados en ABS.

Nota: Manufactura del rodete y álabes con Impresora 3D Anet A8.

Al ser una alternativa para la elaboración de módulos de prácticas educativas es importante que la turbina resista el impacto constante del agua lo suficiente para la realización de distintas prácticas, para lograr ese factor de seguridad o alternativa, se añade acrílico (Esmalte acrílico en aerosol) a cada una de las piezas, primordialmente en los álabes.

A manera adicional se realizaron pruebas de ensamblaje virtual en Inventor para confirmar el correcto ajuste de los pernos y otros componentes críticos.

Conclusiones

Con ayuda del software INVENTOR 2024 ® se realizó el diseño de cada uno de los elementos de la turbina, este fue utilizado para el diseño en 2D y 3D del dispositivo “Rodete Pelton” a su vez se utilizó el software para poderse imprimir en la impresora 3D.

Como resultado se obtuvo la planeación y modelo base para llevar a cabo la manufactura de una turbina Pelton, con un diseño versátil ya que necesita poco mantenimiento al ser ABS, y, sobre todo, un modelo que ayudara a los estudiantes del Instituto Tecnológico Superior de Guasave (ITSG) a reforzar sus conocimientos en las distintas áreas, como la de mecánica de fluidos, sistemas e instalaciones hidráulicas, diseño mecánico, entre otras áreas.

Como recomendación, la manufactura de una turbina Pelton debe hacerse de un material mas resistente como aluminio ya que este resiste más el impacto de chorro de agua que un ABS (polímero). Es esencial usar materiales resistentes a la erosión, dado que el agua puede

transportar partículas que desgasten la superficie. Además, el control del flujo debe garantizar que la turbina opere con alta eficiencia en diferentes condiciones de acuerdo con una necesidad, una de ellas sería la temperatura de agua, presiones diferentes (se regula dependiendo las RPM (revoluciones por minuto) etc. Por otra parte, también es importante destacar que para poder hacer un practicas con este modelo de turbina Pelton, esta debe diseñarse en forma de modulo con todos los componentes funcionales que lleva una turbina Pelton.

Referencias bibliográficas

- Alomar, O. R., Abd, H. M., Salih, M. M. M., & Ali, F. A. (2022). Performance analysis of Pelton turbine under different operating conditions: An experimental study. *Ain Shams Engineering Journal*, 13(4), 101684. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.101684>
- Ambrosini Cabrera, J. P., & Brito Arrieta, F. E. (2020). *Diseño de un módulo demostrativo de microgeneración basado en energía hídrica* [Proyecto de titulación de ingeniería, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio Institucional de ESPOL. <https://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/54363>
- Autista Sánchez, F. I., Cruz Careta, A. P., Ortiz Gómez, M., Ramírez Hernández, D., García Iracheta, I. D., & Novelo Castro, J. M. (2021). Impresión 3D como alternativa de prótesis humanas. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social (RIISDS)*, 1(7). <https://itsta.edu.mx/wp-content/uploads/2022/02/01-2021.pdf>
- Barragán Montalvo, G. E. (2022). *Optimización de la geometría de un rodete Pelton mediante técnicas metaheurísticas y análisis numérico computacional* [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24518>
- Bazán Villacorta, E., & Castro Carhuamaca, V. (2018). *Implementación de base giratoria de turbina Pelton para laboratorio de control y automatización de la Universidad César Vallejo - Chiclayo* [Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/29093>
- Canaza Choqueluque, J. T., & Chara Surco, H. (2018). *Diseño e implementación de un módulo de turbina Pelton para el laboratorio de energía de la Escuela Profesional de Ingeniería*

- Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica* [Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller, Universidad Católica de Santa María]. Repositorio Institucional UCSM. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/handle/20.500.12920/8313>
- Carlos Rojas Encarnación. (2021). *Diseño y evaluación de un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://hdl.handle.net/20.500.12893/9357>
- Ceballos Zuluaga, J. M., Isaza Merino, C. A., Patiño Arcila, I. D., & Morales Rojas, A. D. (2023). Análisis comparativo de las metodologías de dimensionamiento de cangilones para turbinas Pelton en sistemas de micro-generación. *Ingeniería y competitividad*, 25(1), e21411797. <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i1.11797>
- Gil Bancallan, L. O. (2017). *Diseño de un módulo de simulación de generación hidroeléctrica utilizando turbinas Pelton y Francis abastecidas por un sistema de recirculación* [Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional USAT. <https://hdl.handle.net/20.500.12423/1131>
- Guastay Cajo, W. E., & Llanes Cedeño, E. A. (2020). *El uso de la energía hidráulica para la generación de energía eléctrica como estrategia para el desarrollo industrial en el Ecuador* [Tesis de maestría, Universidad Internacional SEK]. Repositorio Digital UISEK. <https://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/4066>
- Güllüoğlu, A. M., Bendeş, O., Yılmaz, B., & Yıldız, A. (2021). Investigation of manufacturing of a Pelton turbine runner of composite material on a 3D printer. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 8(1), 24–34. <https://doi.org/10.17341/gujisa.60638>
- Lema Neto, M. E., & Oto Toaquiza, E. F. (2023). *Implementación de un módulo didáctico para el análisis de eficiencia mecánica en la turbina Pelton en microgeneración hidráulica* [Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Electromecánica, Universidad Técnica de Cotopaxi]. Repositorio Digital UTC. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/10148>

- Molina Osejos, J. V. (2016). *Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes* [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/13064>
- Moral Tejero, G. (2020). *Diseño y fabricación de una turbina Pelton para uso docente* [Trabajo de fin de grado, Universidad de Jaén]. Repositorio Institucional UJA. <https://hdl.handle.net/10953.1/13329>
- Petrazzini, M. V., & Reyna, T. M. (2018). *Energía renovable con micro turbina Pelton* [Práctica supervisada, Universidad Nacional de Córdoba]. Repositorio Digital Universitario de la UNC. <http://hdl.handle.net/11086/8934>
- Reyna, T., Lábaque, M., & Irazusta, B. (2019). Enseñanza de microturbinas hidráulicas: turbinas Turgo, Pelton y axial – desafíos y adaptaciones. En *VIMEH – Valorización e Implementación de Microturbinas en Entornos Hidráulicos*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/60307803/VIMEH_Resumen_extendido_V.pdf
- Sarmiento Rojas, J. A. (2020). *Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton, mediante un estudio paramétrico* [Trabajo de titulación, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital Institucional de la Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20949>
- Sosa Díaz, J. C. (2018). *Análisis y determinación de propiedades a tracción de productos fabricados de material fundido ABS utilizando una impresora 3D* [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional UPS. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15676>
- Villanueva Portugal, M. I., & Osuna Armenta, M. O. (2023). Diseño mecánico de un canal Parshall de 9" de garganta para medición de flujo volumétrico. *Revista Interdisciplinaria de Ingeniería Sustentable y Desarrollo Social (RIISDS)*, 9(1). <https://itsta.edu.mx/wp-content/uploads/2024/02/20-2023.pdf>
- Zamora-Juárez, M. Á., Fonseca Ortiz, C. R., Guerra-Cobián, V. H., López-Rebollar, B. M., Gallego Alarcón, I., & García-Pulido, D. (2023). Parametric assessment of a Pelton turbine within a rainwater harvesting system for micro hydro-power generation in urban

zones. *Energy for Sustainable Development*, 73, 101–115.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.015>