

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

Juan Sebastián Andrade Bastidas

Luis Daniel Juaspuezan Malte

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2025

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

Juan Sebastián Andrade Bastidas

Luis Daniel Juaspuezan Malte

Informe final presentado para al comité curricular del programa de ingeniería electrónica

Asesor

Mg. Francisco Eraso Checa

Universidad CESMAG

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Electrónica

San Juan de Pasto

2025

Nota de Aceptación

Aprobado por el comité de Investigación y
Proyección social en Cumplimiento de los
Requisitos exigidos por la Universidad CESMAG
para optar al título de Ingeniero Electrónico.

Francisco Eraso Checa

Asesor

Jurado

Jurado

Nota de Exclusión de Responsabilidad Intelectual

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

CESMAG"

Dedicatoria

El presente proyecto de grado va dedicado a toda mi familia, en especial a mis padres Juan Juaspuezan y Carmen Malte quienes, con su amor, paciencia, dedicación y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir una de las tantas metas y sueños que me he dispuesto a cumplir a lo largo de mi vida, gracias por siempre estar a mi lado e inculcar una educación ética y moral para ser una mejor persona. A mis hermanos Oscar Juaspuezan y Maribel Tatamuez quienes, siempre han estado presentes en momentos de alegría y tristeza, brindando su amor y palabras de aliento para no desfallecer en el intento y seguir siempre adelante. A mis abuelos quienes, con sus amor, educación y consejos fueron un pilar fundamental en mi niñez, A nuestro asesor Francisco Eraso Checa, por su conocimiento, dedicación y compromiso en el proceso de cumplir con el objetivo de nuestro trabajo de investigación. Y también a todos mis compañeros de la universidad, con quienes hemos luchado para culminar nuestra meta y en el transcurso de la carrera fue incondicional su apoyo para obtener el título de ingeniero electrónico. Gracias a todos y todas por aportar de alguna u otra forma en este proyecto, de corazón mil gracias.

Luis Daniel Juaspuezan Malte

Dedicatoria

El presente trabajo de grado se lo dedico a mi familia, principalmente a mis padres Nelson Andrade y Lucy Bastidas a mi hermana Sofia Andrade también a mi abuelo Herman Andrade quienes permanentemente me apoyaron con espíritu alentador han sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo.

Gracias por todo su apoyo, por su paciencia, por su generosidad y por su aliento cuando veían que no podía seguir adelante.

Juan Sebastián Andrade Bastidas

Contenido

Introducción	18
1. Problema de investigación	20
1.1 Objeto o Tema de Investigación	20
1.2 Línea de Investigación	20
1.3 Sub Línea de Investigación.....	20
1.4 Planteamiento o Descripción del Problema	21
1.5 Formulación del Problema	22
1.6 Objetivos.....	23
1.6.1 Objetivo General	23
1.6.2 Objetivos Específicos.....	23
1.7 Justificación	23
1.8 Delimitación.....	24
2. Tópicos de Marco Teórico.....	25
2.1 Antecedentes.....	25
2.1.1 Pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua.....	26
2.1.2 Diseño y construcción de un equipo para la determinación de pérdidas de carga por fricción en tuberías y en accesorios, para el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la PUCE.	28
2.1.3 Prototipo de generador hidroeléctrico con molino de agua para una granja y su sistema de riego en zona veredal del Departamento de Santander.....	30
2.1.4 Diseño de una Turbina de Vórtice de Eje Vertical.....	32
2.1.5 Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton mediante un estudio paramétrico.....	34

2.2	Enunciados de los supuestos teóricos	34
2.2.1	Energía Hidráulica.....	34
2.2.2	Ecuación de fluidos de Bernoulli	35
2.2.3	El efecto Venturi	36
2.2.4	Turbinas hidráulicas	37
2.2.5	Turbina Pelton.....	38
2.2.6	Altura Neta o salto neto.....	39
2.2.1	Potencial hidráulico de Turbina	39
2.2.2	Caudal.....	40
2.2.3	Velocidad angular.....	41
2.2.4	Velocidad tangencial (V_{jet}).....	42
2.2.5	El rodete de turbina	44
2.2.6	Diámetro del chorro.....	44
2.2.7	Cucharas o Alabes.....	45
2.2.8	Número de cucharas	45
2.2.9	Ancho de cuchara o alabe.....	46
2.2.10	Largo de cuchara o alabe.....	46
2.2.11	Profundidad cuchara o alabe	47
2.2.12	Potencia eléctrica en generador.....	47
2.2.13	Torque del Generador.....	48
2.2.14	Potencial mecánico.....	48
2.2.15	Porcentaje de pérdidas de diseño hidráulico	49
2.2.16	Eficiencia de turbina.....	50

		9
	2.2.17 Máquinas de Almacenaje y Bombeo.....	51
	2.2.18 Curva Característica en máquinas de bombeo	52
	2.2.19 Generadores asíncronos.....	52
	2.2.20 SolidWorks.....	53
	2.2.21 ANSYS CFX	53
	2.2.22 Matlab.....	54
3.	Metodología.....	55
	3.1 Enfoque.....	55
	3.2 Paradigma.....	55
	3.3 Método.....	55
	3.4 Tipo de investigación.....	55
	3.5 Secuencia metodológica.....	56
	3.6 Técnicas de recolección de información.....	59
	3.7 Instrumentos de recolección de información	59
4.	Resultados.....	60
	4.1 Parámetros que actúan en un sistema hidráulico	60
	4.1.1 Parámetros de operación	60
	4.1.2 Parámetros físicos.....	60
	4.1.3 Parámetros geométricos de turbina tipo Pelton.....	60
	4.1.4 Parámetros de transformación de energías (mecánica y eléctrica).....	61
	4.1.5 Descripción de parámetros que actúan en un sistema hidráulico.....	61
	4.1.6 Componentes del Sistema Hidroeléctrico Generatriz.....	63
	4.1.7 Función de Motobomba.....	63

	10
4.1.8	Función de Turbina Tipo Pelton..... 63
4.1.9	Función del Generador 64
4.1.10	Relación de Parámetros en la Generación de Energía Hidroeléctrica..... 64
4.1.11	Parámetros presentes en Motobomba..... 64
4.1.12	Parámetros presentes en la Turbina Pelton..... 65
4.1.13	Parámetros presentes en el Generador..... 65
4.2	Dimensionamiento de diseño hidráulico..... 67
4.2.1	Dimensiones de motobomba de impulsión 67
4.2.2	Dimensiones del generador 69
4.2.3	Dimensiones de diseño hidráulico generatriz..... 70
4.2.4	Cantidad de energía eléctrica generada..... 71
4.2.5	Esquema de diseño hidráulico guía..... 71
4.2.6	Diseño de la turbina tipo Pelton 73
4.2.7	Cálculo de parámetros de operación 74
4.2.8	Cálculo de potencial hidráulica 74
4.2.9	Cálculo de la altura..... 74
4.2.10	Cálculo de parámetros físicos..... 75
4.2.11	Cálculo de velocidad de impacto..... 75
4.2.12	Cálculo de la velocidad en rodete..... 76
4.2.13	Cálculo de parámetros geométricos 76
4.2.14	Cálculo del diámetro del chorro 77
4.2.15	Cálculo del diámetro del rodete..... 77
4.2.16	Cálculo del dimensionamiento de la cuchara 77

	11
4.2.17 Cálculo de parámetros de transformación de energías	78
4.2.18 Cálculo del torque	78
4.2.19 Cálculo de potencia de salida	78
4.2.20 Porcentaje de Perdidas de diseño	78
4.2.21 Diseño de micro generador hidráulico	79
4.2.22 Proceso de diseño Álabes o cucharas	80
4.2.23 Proceso de diseño del rodete	80
4.2.24 Proceso de ensamblaje de diseño de turbina 3D	81
4.2.25 Proceso de diseño de protección	82
4.2.1 Diseño Hidráulico en 3D.....	83
4.2.2 Proceso de diseño hidráulico generatriz.....	83
4.2.3 Modificación de parámetros	83
4.2.4 Variaciones del caudal.....	85
4.2.5 Variaciones de la velocidad de impacto (V_{jet}).....	85
4.2.6 Variaciones del diámetro del rodete.....	85
4.2.7 Variación del torque	85
4.2.8 Variación de la velocidad del rodete	86
4.2.9 Variación en la Potencia hidráulica.....	86
4.2.10 Modificación de parámetros de operación	86
4.2.11 Caudal Efectivo debido a Pérdidas de Fricción.....	86
4.2.12 Relación entre la altura y la potencia hidráulica	88
4.2.13 Relación entre el caudal y la potencia hidráulica.....	89
4.2.14 Relación entre el caudal y la velocidad de salida.....	90

	12
4.2.15	Modificación de parámetros físicos 90
4.2.16	Relación entre velocidad de impacto vs diámetro de tubería 91
4.2.1	Relación entre velocidad de impacto vs la velocidad en el rodete 92
4.2.2	Relación entre la Potencia hidráulica vs potencia mecánica 93
4.2.3	Torque vs potencia mecánica 95
4.2.4	Modificación de parámetros geométricos 96
4.2.5	Relación entre el diámetro del chorro vs diámetro del rodete 96
4.2.1	Relación entre el diámetro del chorro vs dimensionamiento de cucharas. 97
4.2.2	Modificación de parámetros de transformación de energías 100
4.2.3	Relación entre la potencia eléctrica vs potencia mecánica 100
4.2.4	Relación entre el torque y la potencia eléctrica 102
4.2.5	Potencia eléctrica vs Voltaje 103
4.2.6	Relación entre la Potencia eléctrica vs corriente 103
4.2.7	Análisis obtenidos de los resultados de las variaciones 104
4.3	Diseño de sistema hidráulico a simular 106
4.3.1	Simulación del diseño hidráulico con turbina Pelton en MATLAB SIMULINK 107
4.3.2	Simulación del efecto Venturi en ANSYS Fluente 116
4.3.3	Simulación de velocidad angular en el rodete 117
4.3.4	Comparación de resultados calculados y simulados 118
5.	Análisis de Resultados 120
	Conclusiones 122
	Recomendaciones para futuros trabajos 123

Referencias..... 125

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Método gráfico para el diseño de cuchara Pelton</i>	25
Figura 2 <i>Modelo de central hidroeléctrica</i>	27
Figura 3 <i>Sistema para determinación de pérdidas</i>	29
Figura 4 <i>Determinación del área transversal del río</i>	30
Figura 5 <i>Diseño SolidWorks</i>	31
Figura 6 <i>Diseño de turbina</i>	33
Figura 7 <i>Tubo Venturi</i>	36
Figura 8 <i>Porcentaje de pérdidas</i>	49
Figura 9 <i>Eficiencia en generador</i>	51
Figura 10 <i>Curva característica moto Bomba</i>	52
Figura 11 <i>sistema hidráulico generatriz</i>	66
Figura 12 <i>Datos motobomba fabricante</i>	67
Figura 13 <i>Dimensiones motobomba</i>	68
Figura 14 <i>Generador eléctrico</i>	69
Figura 15 <i>Dimensiones de generador</i>	69
Figura 16 <i>Mesa de pruebas</i>	70
Figura 17 <i>Esquema de guía en el proceso de diseño</i>	72
Figura 18 <i>Diámetro de salida de jet (inyector)</i>	75
Figura 19 <i>Cuchara visualización en 3D</i>	80
Figura 20 <i>Rodete visualización en 3d</i>	81
Figura 21 <i>Turbina Pelton visualización en 3D</i>	81
Figura 22 <i>Protección de turbina Pelton 3D</i>	82

	15
Figura 23 <i>Diseño hidráulico generatriz</i>	83
Figura 24 <i>Reducción del Caudal Efectivo debido a Pérdidas de Fricción</i>	87
Figura 25 <i>Potencia hidráulica vs altura neta</i>	88
Figura 26 <i>Potencia hidráulica (P) vs Caudal (H)</i>	89
Figura 27 <i>Relación entre el caudal vs velocidad de impacto</i>	90
Figura 28 <i>Velocidad de impacto vs Diámetro de tubería</i>	91
Figura 29 <i>Velocidad en rodete (W) vs Velocidad de impacto (Vjet)</i>	92
Figura 30 <i>Potencia hidráulica vs potencia mecánica</i>	94
Figura 31 <i>Torque vs potencia mecánica</i>	95
Figura 32 <i>Diámetro chorro vs Diámetro rodete</i>	97
Figura 33 <i>Diámetro chorro vs Ancho de cuchara</i>	98
Figura 34 <i>Diámetro chorro vs Largo cuchara</i>	99
Figura 35 <i>Diámetro del chorro vs Profundidad cuchara</i>	99
Figura 36 <i>Relación entre la potencia eléctrica vs potencia mecánica</i>	101
Figura 37 <i>Torque vs Potencia eléctrica</i>	102
Figura 38 <i>Relación entre el voltaje y la potencia eléctrica</i>	103
Figura 39 <i>Relación entre la potencia vs la corriente en generador</i>	104
Figura 40 <i>Primer bloque</i>	108
Figura 41 <i>Rango de variación de caudal</i>	108
Figura 42 <i>Primer bloque internamente</i>	109
Figura 43 <i>Segundo bloque</i>	109
Figura 44 <i>Diagrama de segundo bloque internamente</i>	110
Figura 45 <i>Exploración mecánica del diseño en Matlab</i>	111

	16
Figura 46 <i>Tercer bloque</i>	112
Figura 47 <i>Diagrama de bloque generador</i>	112
Figura 48 <i>Corriente generador</i>	113
Figura 49 <i>Voltaje en el generador</i>	114
Figura 50 <i>Potencia eléctrica vs mecánica</i>	114
Figura 51 <i>Diagrama de bloques del diseño hidráulico con turbina Pelton</i>	115
Figura 52 <i>Resultados de simulación efecto Venturi</i>	116
Figura 53 <i>Resultados de simulación efecto Venturi</i>	117

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Descripción de parámetros que actúan en sistema hidráulico</i>	61
Tabla 2 <i>parámetros presentes en la motobomba</i>	64
Tabla 3 <i>Parámetros presentes en la turbina</i>	65
Tabla 4 <i>Parámetros presentes en el generador</i>	65
Tabla 5 <i>Datos fabricante motobomba</i>	73
Tabla 6 <i>Datos obtenidos de parámetros de operación</i>	74
Tabla 7 <i>Datos obtenidos de parámetros físicos</i>	76
Tabla 8 <i>Datos obtenidos de parámetros geométricos</i>	77
Tabla 9 <i>Datos obtenidos de los parámetros de transformación de energías</i>	79
Tabla 10 <i>Variación de parámetro de entrada</i>	84
Tabla 11 <i>Observaciones de las variaciones obtenidas</i>	105
Tabla 12 <i>Comparación de datos calculados vs Simulados en el software ANSYS</i>	118
Tabla 13 <i>Comparación de datos calculados vs Simulados en el software Matlab</i>	119

Introducción

El aprovechamiento de la energía hidráulica ha sido un pilar fundamental en la generación de energía renovable y sostenible. Entre las diversas tecnologías desarrolladas, las turbinas tipo Pelton se destacan por su eficiencia en aplicaciones de alta cabeza y bajo caudal.

En este documento se presenta el informe final de trabajo de grado en modalidad estancia en línea es decir que contribuye al primer objetivo del proyecto profesoral denominado “Diseño de micro generadores para un laboratorio de energías renovables para la enseñanza y la investigación en la Universidad CESMAG”.

El objetivo del proyecto profesoral consiste en la modificación de parámetros en un sistema micro hidroeléctrico y evaluar en relación con criterios de eficiencia del potencial hidráulico.

Para contribuir al objetivo del proyecto profesoral, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con el diseño de turbinas tipo Pelton. Además, se exploraron los principios de su funcionamiento y los parámetros clave que influyen en su rendimiento. El análisis teórico permite identificar cómo los cambios en estos parámetros afectan el diseño, y cómo interactúan entre sí. Estos hallazgos se presentan mediante gráficos, tablas y simulaciones avanzadas obtenidas mediante la utilizando software de modelado 3D y de análisis de datos.

Este informe final de trabajo de grado está organizado en varias secciones clave. La primera se centra en la recolección de información relevante, seguida de un análisis teórico de los principios fundamentales del diseño de turbinas tipo Pelton. Posteriormente, se presenta la implementación de modelos en software CAD, detallando los aspectos geométricos y técnicos. En la sección siguiente, se realizan pruebas de simulación

utilizando herramientas especializadas para evaluar el desempeño de la turbina.

Finalmente, se describe el diseño de micro generadores hidráulicos a nivel de simulación, validando su rendimiento con resultados detallados.

Para evidenciar los cambios realizados en el diseño del micro generador hidroeléctrico generatrices a nivel de simulación, se modificaron los niveles de caudal, el diámetro de la tubería, el diámetro de turbina y rodete, demostrando como estos cambios afecta directamente en su potencial hidroeléctrico.

Este informe final de trabajo de grado busca proporcionar al encargado del proyecto profesoral las herramientas necesarias para desarrollar un modelo de turbina Pelton que maximice la eficiencia energética y minimice las pérdidas. Al comprender los mecanismos del diseño hidroeléctrico, se espera que adquiriera el conocimiento para proponer mejoras en los diseños actuales, llevarlas a la práctica y generar nuevos proyectos relacionados con microrredes, tanto a nivel de pregrado, posgrado como en trabajos profesoriales.

1. Problema de investigación

1.1 Objeto o Tema de Investigación

Micro generadores hidroeléctricas generatrices a nivel de diseño

1.2 Línea de Investigación

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

1.3 Sub Línea de Investigación

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

1.4 Planteamiento o Descripción del Problema

Con el fin de realizar la transición a nuevas y más eficientes fuentes de energía, el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 de Colombia estableció como meta la generación de 1.500 MW a partir de fuentes no convencionales de energías renovables. De acuerdo a los reportes estatales de 2021, la capacidad de generación energética con energías limpias (eólica, solar, hídrica) es de 22,4 MW y se pretende llevar a 1500 MW incrementando la producción de energía en un 98,5 % (Fajardo, 2022).

La solución planteada a este reto, se aborda desde dos frentes: el mejoramiento de la eficiencia energética y el de generación por fuentes renovables, el primero disminuye el consumo y el segundo extiende y diversifica la matriz energética de manera sostenible. Dentro de las principales fuentes de generación renovables se encuentran las pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua dependiente de variables que afectan la capacidad de generación.

Colombia y Nariño tienen potencialidades significativamente favorables para el aprovechamiento de este tipo de recursos, por lo que se vienen ejecutando proyectos de generación cada vez mayores y con financiamiento estatal con fondos del FAER, FAZNI, Sistema General de Regalías, FENOGE, FINDETER entre otros. Por lo que es necesario desarrollar y fortalecer programas de formación de educación superior, a nivel de pregrado y posgrado, que expliquen claramente el funcionamiento de los generadores hídricos basados en fuentes renovables, de manera que trascienda la cátedra conceptual y permita la interacción con los sistemas de transformación de energía, permitiendo tanto a profesores como estudiantes identificar y anticiparse a la respuesta eléctrica en estos sistemas ante variaciones en los parámetros de generación.

Este trabajo se centra en el apoyo al proyecto denominado “Influencia de los Parámetros

de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica”, en el diseño de la capacidad de generación de cada fuente que depende de sus propios parámetros, en este caso del generador hídrico se relacionan con caudal y altura, sin embargo, estos elementos también se ven afectados por cambios en los diámetros de tubería y pendiente de terreno, también es influenciado por cantidad de cucharas, diámetro de rueda, velocidad de chorro.

La capacidad de generación de un sistema se obtiene mediante ecuaciones que se utilizan en los procesos de diseño de dimensionamiento. Sin embargo, la variabilidad de los valores climáticos y la susceptibilidad al cambio de los parámetros que muchas veces no se tienen en cuenta en el dimensionamiento y que no se pueden verificar, controlar o manipular, hacen que los sistemas operen alejados de los criterios de diseño y se desconoce en qué medida una variable que aparentemente no se encuentra contemplada en los parámetros de diseño puede afectar en el rendimiento del sistema.

De esta manera, se empleará la simulación como herramienta para comprender el proceso de dimensionamiento y el funcionamiento de las turbinas Pelton en términos de generación de energía. Mediante este enfoque, se busca determinar en qué medida las variables pueden influir en el rendimiento del sistema, proporcionando una visión más precisa y ajustada a las condiciones reales de operación.

1.5 Formulación del Problema

¿Cuál es la Influencia de los Parámetros de diseño hidroeléctrico en el dimensionamiento de Turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica a nivel de simulación?

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Analizar la influencia de los parámetros de diseño en las turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica a nivel de simulación.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Definir las variables relacionadas para el funcionamiento del diseño hidráulico.
- Diseñar el micro generador de acuerdo a las variables susceptibles a modificar.
- Simular el micro generador teniendo en cuenta las variables en sus parámetros y medir la eficiencia de generación.

1.7 Justificación

En un contexto global de transición hacia fuentes de energía más sostenibles, es crucial formar a la próxima generación de profesionales y líderes con un profundo entendimiento de las energías renovables. El diseño de micro generadores hidroeléctricos brindará la oportunidad de interpretar los principios que afectan al potencial hidroeléctrico, lo que enriquece en aprendizaje y preparará para abordar desafíos energéticos futuros.

La enseñanza basada en principios fundamentales es esencial para garantizar la comprensión profunda de conceptos complejos. Los micro generadores hidroeléctricos proporcionarán una plataforma tangible para que los estudiantes y profesores comprendan los procesos de generación hidroeléctrica, mejorando así la calidad de su educación y fomentando su interés en el campo.

La investigación en energías renovables es fundamental para desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles. Los micro generadores hidroeléctricas generatrices diseñados a nivel de

simulación permitirán a los investigadores explorar nuevas estrategias, evaluar eficiencias y proponer mejoras en la generación hidroeléctrica. Esto contribuirá al avance del conocimiento y a la generación de soluciones innovadoras.

El diseño de micro generadores hidroeléctricos no solo beneficiará a los investigadores directamente involucrados, sino que también tendrá un efecto multiplicador en toda la comunidad académica. Se podrán compartir los conocimientos adquiridos y las mejores prácticas, lo que fortalecerá la cultura de la investigación y la educación en energías renovables en la universidad.

La generación hidroeléctrica es una fuente de energía renovable valiosa y ampliamente disponible. Al capacitar a los estudiantes para que comprendan y utilicen, el proyecto que contribuye a formar profesionales que puedan abordar los desafíos de la energía de manera sostenible y ayudar a reducir la dependencia de fuentes de energía no renovables.

1.8 Delimitación

El proyecto de los micro generadores de energía dentro de la universidad CESMAG ubicada en Pasto (Nariño), se limita al diseño de micro generadores hídricas generatrices en un rango de capacidad de generación desde los 0.5 hasta 10 kW de potencia hidráulica, como parte del proyecto denominado “Desarrollo de un laboratorio de generadores de energías renovables para la enseñanza y la investigación” que lo desarrollan los profesores del Programa de Ingeniería Electrónica.

2. Tópicos de Marco Teórico

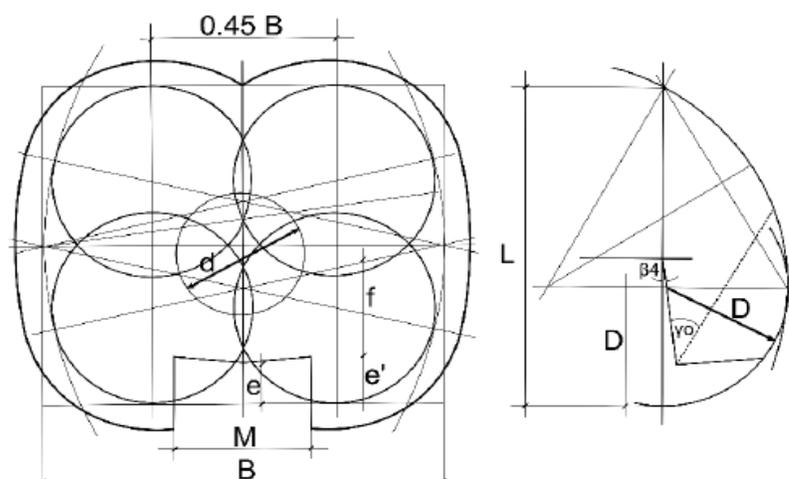
2.1 Antecedentes

“Optimización de la geometría de un rodete tipo Pelton para flujo particulado utilizando simulación numérica”

En el trabajo realizado por Barragán (2020) presenta una metodología que permite obtener modelos CAD de cucharas de turbinas tipo Pelton y optimizar su rendimiento utilizando técnicas como el escaneo 3D, parametrización de las cucharas mediante Python e Inventor, y finalmente la simulación numérica en el software comercial ANSYS. La geometría inicial a partir de la cual trabajó utilizó resina y yeso para obtener el molde del negativo de la cuchara, posteriormente utilizó el escaneo 3D para obtener una nube de puntos la cual procesó obteniendo una superficie. Finalmente, la superficie la refinó usando AUTODESK Inventor y la parametrizó para poder realizar cambios automáticamente al modelo. La optimización del modelo la trabajó variando los ángulos de entrada y salida del chorro y la relación de la cuchara con base en resultados de estudios previos, obtuvo dos modelos, denominados como Mod1 en el cual le modificaron los ángulos, y Mod2 donde le modificaron los ángulos y la relación a la cuchara. La simulación numérica la trabajó en la herramienta CFX de ANSYS, empleó el modelo lo que permitió realizar un análisis. estudió el comportamiento del torque en las cucharas y posteriormente calculó la eficiencia de cada modelo, obtuvo un aumento de la eficiencia de 7.12% y 0.23% para Mod1 y Mod2 respectivamente. En la figura 1 se muestra el método gráfico que utilizaron para dimensionar la medida de las cucharas

Figura 1

Método gráfico para el diseño de cuchara Pelton.



Fuente:(Barragán & Parra, 2020)

2.1.1 Pequeñas centrales hidroeléctricas a filo de agua

En el trabajo de grado realizado por Guzmán (2019) presenta un diseño de una central hidráulica constituida en su orden de operación con los siguientes componentes: una presa de contrafuerte, una bocatoma tipo lateral, un túnel de conducción, válvula de mariposa (ubicada al final del túnel e inicio de la tubería de presión), tubería de presión y casa de máquinas donde se encuentran los siguientes elementos electromecánicos para cada unidad: válvula principal de entrada tipo esférica, turbina de eje horizontal, eje principal de acople turbina – generador, generador síncrono, sistema de excitación.

En el proceso de diseño de la turbina, analiza los sistemas propuestos por tres ingenieros: El británico James B. Francis (1815 – 1892), el estadounidense Lester Allan Pelton (1829 – 1908) y el austriaco Víctor Kaplan (1876 – 1934), cada diseño cuenta con los datos precisos de altura o cabeza total y su respectivo el caudal.

Todos estos diseños incorporan una turbina que se gira impulsada por del agua. Además, cada diseño también cuenta con un conjunto de sistemas de desfogue para facilitar el manejo del agua al

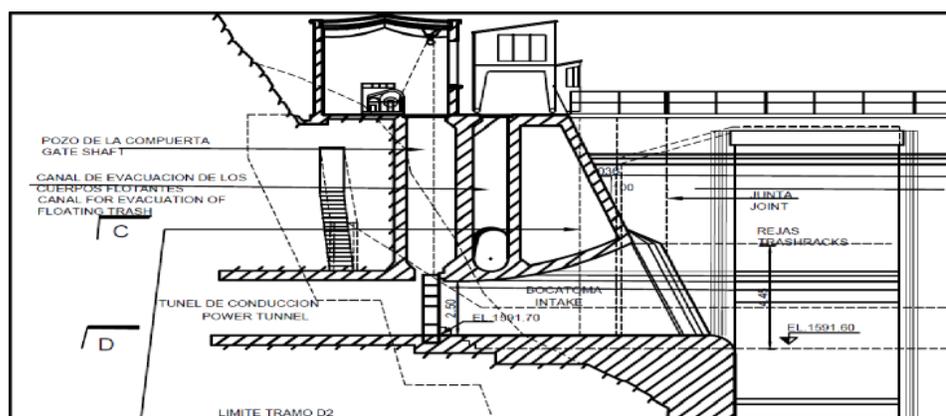
interior de la turbina, para el caso del ejemplo, la turbina diseñada su caudal es de $4m^3/s$, donde tendrá su máxima eficiencia con caudales cercanos a este valor y disminuyendo cuando se tiene la mitad de este caudal o entre más alejado de este punto se encuentre, dicho diseño tiene una generación promedio anual de los últimos diez años de 118.760, 3 MWh (2008-2018).

La presa tiene una altura máxima de 16 m, capacidad total de almacenamiento del embalse es $350.000 m^3$ y un volumen útil de $150.000 m^3$, lo que significa que la operación depende del caudal de aporte para el funcionamiento continuo, ya que partiendo de la demanda máxima de $12,5 m^3/s$, el volumen útil alcanza a cubrir solo un periodo de 3 horas.

La obra civil se compone de cuatro muros de contrafuerte, dispuestos transversalmente a la dirección de flujo del río para su captación total como se observa en la figura 2.

Figura 2

Modelo de central hidroeléctrica



Fuente: (Guzmán, 2019)

La energía obtenida con las tres unidades a nivel de tensión de 6.6 kV, es llevada a un barraje común que se conecta con un banco de transformadores que elevan la tensión a 115 kV.

El camino que toma el fluido a través de la planta hidroeléctrica comienza desde el momento en que ingresa al embalse, en cual, mediante diferentes filtros, evita el ingreso de elementos potencialmente dañinos como piedras y restos de vegetación. estos filtros no son lo muy finos como para perder una cantidad de energía de presión.

La tubería de presión tiene una longitud total de 399,49 m, está dividida en tres partes de aproximadamente 70 m, 114 m y 215 m; con diámetro interior de 2 m, 1,9 m y 1,8 m respectivamente, tiene espesor de 12 mm a 15 mm, incluido 1 mm adicional para protección por corrosión permisible.

2.1.2 Diseño y construcción de un equipo para la determinación de pérdidas de carga por fricción en tuberías y en accesorios, para el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la PUCE.

El trabajo de grado realizado por Hidalgo & Morales (2019) se limitan al diseño y construcción de un sistema de tuberías, para demostración de perdidas hidráulica por fricción. esto lo obtienen mediante la medición de presión tanto al inicio y al final de tuberías el proceso que realizaron consiste en abrir o cerrar el paso de fluido por los diferentes tramos, en otros regular el caudal circulante. Al poner a prueba el diseño tuberías identificaron las pérdidas por fricción en tuberías de distintos materiales y las pérdidas menores en válvulas, codos, uniones en “T”. Las pérdidas de carga de la instalación las midieron con un manómetro entre dos puntos o secciones situadas con un mismo diámetro.

La instalación que realizaron contiene muchos de los elementos típicos que se suelen encontrar en una represa hidráulica como son:

Tuberías de diferentes materiales: acero, cobre, policarbonato con diferentes diámetros y longitudes estos tramos de tuberías se componen de combinaciones de serie y paralelo, válvulas

de varios tipos, compuertas, esferas, mariposas estas se encuentran distribuidas a lo largo del tramo de tubería.

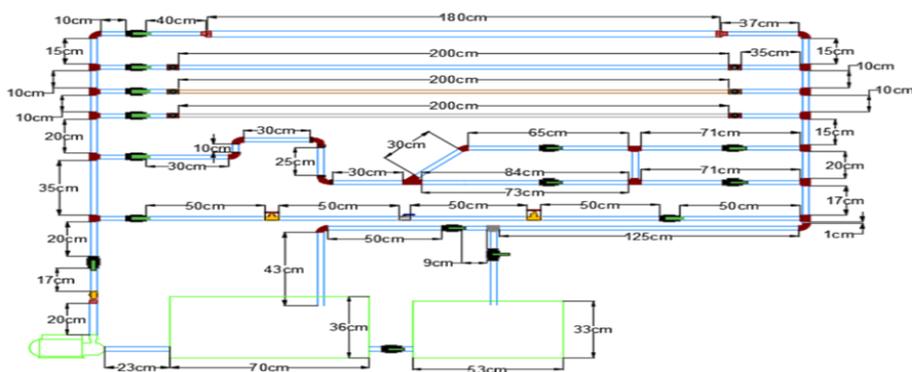
Una bomba centrífuga la cual proporciona energía necesaria haciendo circular agua por la instalación. Esta energía se disipa en los diferentes elementos del sistema en el caso del depósito la instalación opera en un circuito cerrado, donde la bomba aspira agua de un depósito, esta es conducida a través de un recorrido determinado y luego regresa al mismo depósito.

Construcción del modelo hidráulico el diseño está compuesto por tuberías, una bomba centrífuga con un tanque de almacenamiento para la succión, que proveerá de agua al sistema de tuberías de siete trayectorias independientes, cada trayectoria está destinada para cada tipo de tubería con sus respectivos accesorios estas cuentan con acoples de fácil conexión, para poder trasladar los manómetros a cada punto de medición.

En la figura 3 se visualizan las dimensiones de tuberías, cortes, tramos y conexiones, es decir la totalidad del modelo utilizado para determinar las pérdidas hidráulicas por fricción.

Figura 3

Sistema para determinación de pérdidas



Fuente (Hidalgo & Morales, 2019)

En el sistema determinaron que “La pérdida en la reducción de diámetros en tuberías es mayor que en la ampliación debido a que cuando reduce el diámetro el fluido choca con las paredes produce mayor pérdida”.

En cuanto a los cálculos realizados determinaron que “La variación de los datos experimentales con los teóricos puede ser por la sensibilidad y la calibración de los manómetros y la exactitud de los piezómetros de agua.

En cuanto a las dimensiones en comparación con las pérdidas determinaron que “en la tubería de PVC de 1/2” es mayor que en la tubería de cobre y de hierro galvanizado”, por otro lado, en la tubería que presenta menos pérdidas es” La tubería de cobre tiene menor pérdida que las otras tuberías”.

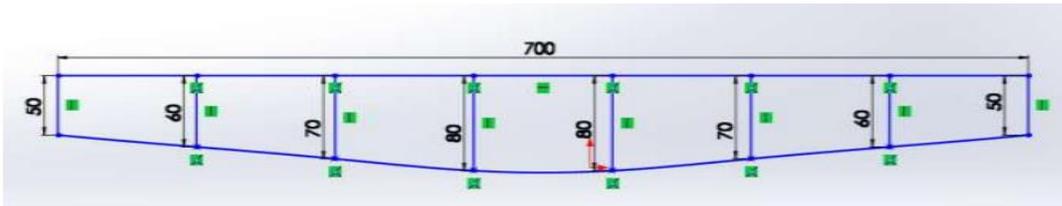
2.1.3 Prototipo de generador hidroeléctrico con molino de agua para una granja y su sistema de riego en zona veredal del Departamento de Santander

El trabajo de grado realizado por Suarez y Mera (2019) presenta un diseño hidráulico con un prototipo hidroeléctrico capaz de generar 2,5 kW de potencial eléctrico utilizando un caudal 8,44935 m^3/s . En el documento detallan el método utilizado para la determinación del caudal es normalmente conocido como el método del flotador este se dividen en dos pasos, permitiendo realizar una medición aproximada de la velocidad en la superficie del río y su área transversal.

Como primer paso calculan del área transversal del río, realizando mediciones para ancho, largo y la altura y profundidad del río para calcular el área transversal del mismo en la figura 4 se observan los datos registrados después de realizar las respectivas mediciones.

Figura 4

Determinación del área transversal del río



Fuente: (López Suárez & Mera Vega, 2019)

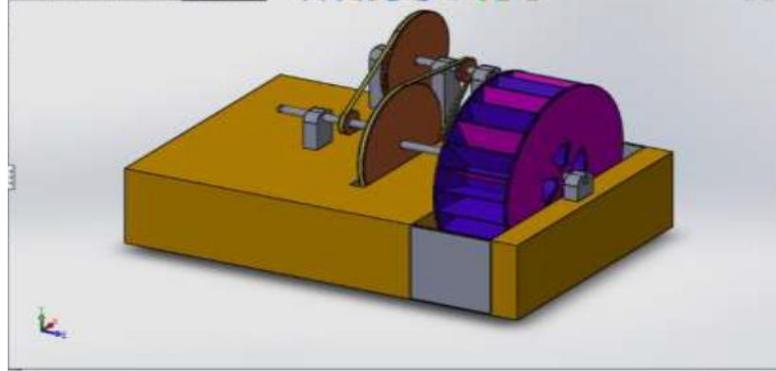
Para el segundo paso determinaron de la velocidad del río utilizando un objeto que flote sobre agua, en este caso una pelota, la cual ubicaron en un punto inicial registrando la medición del tiempo que tarda hasta llegar al punto final. Después de realizar varias mediciones de tiempo en relación a la distancia, determinaron la velocidad promedio.

Con el área transversal determinada, así como la velocidad de la corriente de agua, procedieron a calcular el caudal, determinando variaciones de acuerdo a las condiciones climáticas o temporada del año, así como también depende de la medición diurna y nocturna.

Determinando los datos de diseño hidráulico utilizaron la ayuda del software Solid Works para elaboración de diseño mecánico, a su vez simularon el funcionamiento en relación con las condiciones y las variables que intervienen como el caudal, la presión y la velocidad del agua en diferentes puntos del vertedero, el diseño mecánico elaborado se indica en la figura 5.

Figura 5

Diseño SolidWorks



Fuente: (López Suárez & Mera Vega, 2019)

2.1.4 Diseño de una Turbina de Vórtice de Eje Vertical.

En el trabajo realizado por Guamushig & Iza (2022) presenta un diseño hidráulico a nivel de simulación, con el fin de presentar un modelo a escala que permita verificar su comportamiento y como los parámetros de diseño afectan al potencial hidráulico este modelo tiene como objetivo compararse con un diseño real, adelantado posibles respuestas a parámetros cambiantes, debido a que el diseño está orientado hacia la sostenibilidad y adaptación de las necesidades de una vivienda en general en cuanto al consumo energético que utilizan en su día a día, por otra parte se enfocan que el diseño debe contribuir a reducir costos y maximizar beneficios.

Uno de los requisitos que utilizaron para el diseño fue conocer el consumo eléctrico promedio según el tipo de vivienda, para ello recopilaron información a través de diferentes técnicas y herramientas. Una de las técnicas más usadas fue encuestas a la población en general, con la finalidad de saber el consumo energético mensual y los aparatos eléctricos más usados.

Por otra parte, la adquisición de datos necesarios para el diseño hidráulico como el caudal disponible la altura o salto neto entre otras variables como tipos de materiales, resistencia de los materiales, espesor y dimensiones de la misma turbina, con el fin de modelar la turbina de

vórtice en el software con todas las variables del sistema hidráulico para realizar las pruebas correspondientes y poder plasmarlo en una construcción mediante.

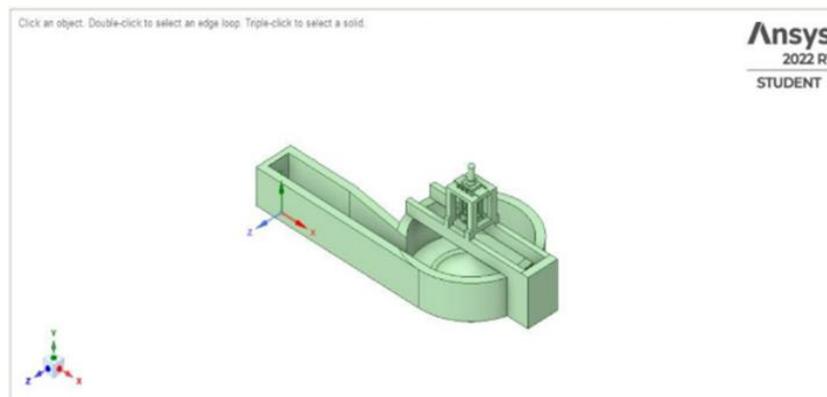
Las simulaciones las realizaron en escala real con ayuda del software ANSYS, el cual contribuye al objetivo de encontrar sus características de máxima eficiencia, al momento de realizar la simulación en CAD, consideraron los parámetros determinados tanto por las encuestas como los datos adquiridos por calculo, de esta manera simularon la pieza y le asignaron las funciones específicas, como la posibilidad de visualizarla por secciones.

El dibujo virtual o CAD es creado previamente para combinar los procesos que adoptará el objeto y de esta manera tener una idea para los cálculos que se pueden realizar en la vida real.

El diseño realizado se indica en la figura 6.

Figura 6

Diseño de turbina



Fuente : (Guamushig & Iza, 2022)

Mediante el diseño de varias turbinas al verificar el comportamiento del flujo de un vórtice gravitacional mediante el software ANSYS obtuvieron resultados cercanos a la realidad.

la comparación de cada una encontró que la turbina de 4 álabes de 15° y 60° de ángulo no perciben correctamente la energía cinética producida por el vórtice generado en simulación de

manera que la turbina de 8 álabes con Ángulo de 30° es la más factible por su versatilidad en la obtención de datos de simulación ya que aprovecha mejor la energía cinética generada por la simulación del vórtice.

2.1.5 Metodología de diseño para turbinas tipo Pelton mediante un estudio paramétrico

En el trabajo de maestría realizado por Sarmiento (2020) describe cómo afectan los parámetros al momento de implementar un diseño para los cucharones y el rodete de las turbinas tipo Pelton. A partir de los parámetros de operación, cinéticos y geométricos, además realiza un analiza de sensibilidad relacionados al diseño geométrico bajo las condiciones de mayor eficiencia hidráulica.

Para realizar la investigación consideración un análisis de rangos y ecuaciones recomendadas por el autor (Nasir, Abdullah, 2013) en el diseño de turbina tipo Pelton para el cálculo de los distintos parámetros, en el documento también se encuentra los datos con valores medidas y ángulos obtenidos para lograr una máxima eficiencia hidráulica y la ubicación óptima de los cucharones en el rodete de la turbina tipo Pelton.

2.2 Enunciados de los supuestos teóricos

2.2.1 Energía Hidráulica

Se refiere a la energía producida por el agua de tal manera que “una gota de agua puede generar energía potencial si se encuentra en un lugar más elevado respecto a otro punto, para crear una continuidad se necesita muchas gotas de agua, por ejemplo, para mover una turbina, se requiere un medio o conducto para ser transportada y se genere un flujo de agua” (Guzmán,

2019).

Depende de la altura de su punto inicial más alto con respecto a un su punto final más bajo “cuando una gota de agua se encuentra por encima de su punto de referencia, tiene la capacidad de producir energía potencial gravitacional aprovechando la velocidad que adquiere el agua generando energía cinética a medida que pierde altura (Endesa Educa, 2014).

Para genera energía hidráulica se necesita una represa con agua suficiente, un camino o tubería para generar un flujo de agua aprovechar el flujo para mover una turbina generando energía mecánica luego con ayuda de un trasformador convertirla en energía eléctrica por inducción magnética (Garzón & Gómez, 2020).

2.2.2 Ecuación de fluidos de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli demuestra que la energía no puede ser creada ni destruida, solo se transforma de un tipo en otro, la ecuación relaciona la velocidad del agua al fluir por una tubería transversal y como afectan a la presión y altura.

La ecuación de Bernoulli permite analizar la energía de Flujo (llamada también Energía de presión o trabajo de flujo): Representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión (Chamorro, 1981).

Para representar el comportamiento que describe Bernoulli se tiene la ecuación 1

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (1)$$

Donde:

h: Es la diferencia de altura con respecto a una referencia

P: Es la presión que soporta a lo largo del conducto

ρ : Es la densidad del agua.

V: Es la velocidad del agua en el (ducto o canal) que la conduzca.

g: Es la gravedad,

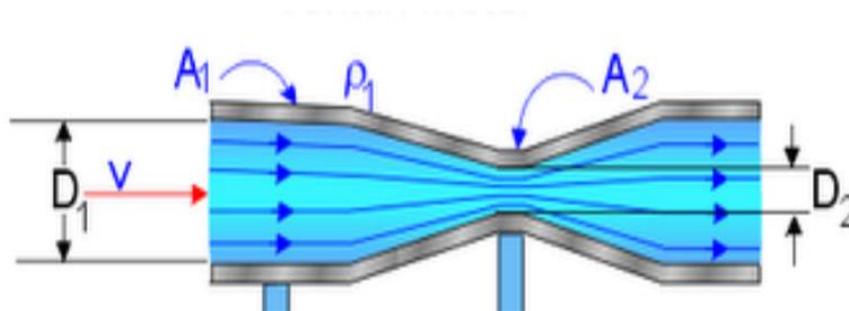
2.2.3 El efecto Venturi

Consiste en el caudal de un fluido (agua, aceite, etc.) cuando es transportado por medio de un conducto cerrado con un área cambiante en tamaño se mantenga constante al pasar por un área menor o mayor, la variable que se ve afectada es la velocidad del fluido tal que, aumenta al pasar por un área de sección menor y disminuyendo al pasar por un área mayor. Este efecto recibe su nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822).

Para representar el efecto que tiene el efecto Venturi se tiene la figura 7 y la ecuación 2.

Figura 7

Tubo Venturi



Fuente: (Mezzodomenica, 2006)

Si los perfiles de velocidad son uniformes entre las secciones (1) y (2), la ecuación de continuidad puede escribirse como:

$$Q_1 = Q_2 \quad (2)$$

Donde:

Q1: Caudal en área mayor

Q2: caudal en área menor

2.2.4 Turbinas hidráulicas

Según Alarcón (2008) una máquina hidráulica es un dispositivo capaz de convertir energía hidráulica en energía mecánica; pueden ser motrices (turbinas), o generatrices (bombas), modificando la energía total que la atraviesa.

Las centrales se clasifican según el salto de agua la configuración de las turbinas es distinta dependiendo “en base a la altura del salto” (Endesa Educa, 2014).

- Centrales de alta presión
- Centrales de media presión
- Centrales de baja presión

Según Endesa Educa (Endesa Educa, 2014), se consideran incluidos en el primer grupo los saltos por encima de los 300 m aproximadamente, en los que los caudales suelen ser relativamente pequeños (del orden de $20\text{m}^3/\text{s}$ máximo por turbina). Suelen estar ubicados en zonas de alta montaña.

En segundo grupo comprende los saltos entre 300 m y 15 m, en los que los caudales son de hasta $200\text{ m}^3/\text{s}$. Según qué altura, la central está al pie de presa o lejos de ella si con ello se consigue mayor salto.

El tercer grupo corresponde a los saltos de menos de 15 m, con caudales por turbina de unos $300\text{ m}^3/\text{s}$; aunque los hay con más del doble.

2.2.5 Turbina Pelton

La turbina Pelton es el tipo de turbina más representativo de aquellas denominadas máquina hidráulica, debido a que el agua intercambia energía mediante un eje de simetría que sostiene a este tipo de turbina; este mecanismo lleva una o varias ruedas, (rodetes o rotores), provistas de álabes, de forma que entre ellos existen unos espacios libres o canales, por los que circula el agua (Díez, 1996).

La turbina Pelton es un tipo de turbina de acción diseñada para aplicaciones de alta cabeza y bajo caudal. Su principio de funcionamiento se basa en la conversión de la energía potencial del agua en energía cinética y, posteriormente, en energía mecánica. (Barragán & Parra, 2020) .

El proceso de operación de la turbina Pelton:

El agua se traslada desde un embalse (energía almacenada como energía potencial) o una presa a través de una tubería de presión desde un punto más alto hacia otro bajo denominando a este cambio como a la altura de caída o cabeza, a medida que desciende por la tubería se genera energía cinética debido al proceso descrito anteriormente en la sección de energía hidráulica.

En la salida de la tubería, el agua es conducida por una o más boquillas convirtiendo la energía cinética producida por la altura de caída en un chorro de alta velocidad conocida matemáticamente como velocidad tangencial.

El chorro de agua de alta velocidad impacta en las cucharas (o álabes) que están diseñadas para capturar la energía cinética del agua de manera eficiente, de modo que el chorro se desacelere al máximo y transfiera la mayor parte de su energía al rodetes de la turbina Pelton. Las cucharas están divididas en dos mitades por un borde afilado en el centro, lo que permite que el

chorro se divide y se desvía en direcciones opuestas.

A medida que el chorro de agua impacta y fluye a través de las cucharas, su energía cinética se transfiere a la rueda de la turbina, haciendo que esta gire produciendo velocidad en el rodete conocida científicamente como velocidad angular. La rotación de la rueda es lo que convierte la energía del agua en energía mecánica. Al final la rueda está conectada a un eje que transmite la energía mecánica a un generador eléctrico.

2.2.6 Altura Neta o salto neto

Se refiere a la diferencia de altura entre el nivel del agua en el embalse y el nivel del agua en la salida de la turbina. La altura de salto neto es un factor crítico en el diseño de la turbina Pelton, ya que afecta la cantidad de energía que se puede extraer del agua. La altura neta (H_n) se calcula como la diferencia entre la altura total de la cabeza hidráulica (H_g) y las pérdidas de energía debidas a la fricción (H_d). (Garzón & Gómez, 2020).

Matemáticamente se puede determinar por la resta de la altura total menos las pérdidas generadas por fricción entonces se tiene la ecuación 3.

$$H_n = H_g - H_d \quad (3)$$

Donde:

H_n : Altura neta (m)

H_g : Altura en bruto (m)

H_d : Perdida total (%)

2.2.1 Potencial hidráulico de Turbina

El potencial hidráulico en turbinas se refiere a la energía hidráulica, es decir la energía

cinética que produce el agua transformándola en movimiento (energía mecánica), haciendo girar turbina este movimiento se trasfiere a un generador para generar electricidad. Esta energía depende de varios factores, principalmente la altura desde la que cae el agua (también llamada "cabeza" o "altura de caída"), el caudal del agua, la densidad del agua y la gravedad.(Barragán & Parra, 2020).

La fórmula para calcular la potencia hidráulica disponible en una turbina se muestra en la ecuación 4.

$$P = \rho * g * H_n * Q \quad (4)$$

Donde:

Q: Caudal (m/s)

P: Potencia (watts)

ρ : Densidad agua (kg/m)

g : Gravedad (m/s²)

H_n: Altura neta (m)

2.2.2 Caudal

Es el volumen que ocupa un de fluido a través de una sección cerrada de conducto como, por ejemplo, en una tubería que circulan agua a través de un plano transversal a la tubería (Garzón & Gómez, 2020).

El caudal puede ser calculado midiendo la velocidad del río y su área transversal. Entonces se tiene la ecuación 5.

$$Q = V_b * A_b \quad (5)$$

Donde:

Q: Caudal (m/s)

Vb: Velocidad tangencial

Ab: Área de la Sección Transversal (m^2)

El caudal también se puede determinar mediante el despeje de la ecuación 4 obteniendo la ecuación 6.

$$Q = \frac{P}{\rho p g H_n} \quad (6)$$

Donde:

Q: Caudal (m/s)

P: Potencia (watts)

p: Densidad agua (kg/m)

g: Gravedad (m/s^2)

n: Eficiencia del sistema (considerando las pérdidas mecánicas y eléctricas).

2.2.3 Velocidad angular

Se refiere a la velocidad de rotación del rotor de la turbina. La velocidad angular afecta la cantidad de energía que se puede extraer del agua y la cantidad de energía que se puede generar. Una velocidad angular más alta puede generar más energía, pero también puede aumentar la fricción y el desgaste en la turbina (Bustamante & Arias, 2008).

En un movimiento circular, existe una relación entre la velocidad angular (ω) y la velocidad lineal (v) del objeto que se encuentra a una distancia (r) del eje de rotación, sus unidades son es el radian por segundo (rad/s), aunque también puede expresarse en otras unidades como revoluciones por minuto (rpm) (Ferrada Sepúlveda, 2012).

Entonces la relación para determinar matemáticamente la velocidad angular se obtiene

mediante la ecuación 7.

$$W = \frac{V_{jet}}{r} \quad (7)$$

Donde:

V_{jet} : Es la velocidad tangencial (m/s).

r : Es el radio de la trayectoria circular (m).

W : Es la velocidad angular (rad/s).

La velocidad angular también puede ser determinada en revoluciones por minuto, entonces para determinar la velocidad angular en (rpm) se tiene la ecuación 8.

$$N = \frac{60 * V_{jet}}{\pi * D} \quad (8)$$

Donde:

N : Velocidad angular en (RPM).

V_{jet} : Velocidad tangencial (m/s).

D : Diámetro del rodete (m).

2.2.4 Velocidad tangencial (V_{jet})

Se refiere a la velocidad del agua que golpea las cucharas de la turbina, la velocidad tangencial afecta la cantidad de energía que se puede extraer del agua y la eficiencia de la turbina. Una velocidad tangencial más alta puede generar más energía, pero también puede aumentar la turbulencia y la pérdida de energía en la turbina (Bustamante & Arias, 2008).

Esta velocidad depende de la velocidad angular (ω) y del radio (r) del círculo en el que se mueve el objeto, entonces la relación para determinar matemáticamente la velocidad tangencial se obtiene mediante la ecuación 9.

$$V_{jet} = w * r \quad (9)$$

Donde:

V_{jet} : Velocidad tangencial (m/s).

r : Es el radio de la trayectoria circular (m).

w : Velocidad angular (rad/s).

La velocidad tangencial también se puede determinar mediante el despeje de la ecuación 5 obteniendo así la ecuación 10.

$$V_b = \frac{Q_b}{A_b} \quad (10)$$

Donde:

A_b : Área en la tubería de la moto bomba.

V_b : la velocidad en la tubería de la moto bomba

Q_b : El Caudal producido por la bomba

Combinando dos ecuaciones, la del Caudal y Venturi se obtiene el caudal teórico ($Q_1 = Q_2$): Ahora pues bien se remplazan los valores de la ecuación 2 a partir de la ecuación de caudal se puede despejar V_2 , la relación anterior expresada matemáticamente se presenta en la ecuación 11.

$$V_{Jet} = \frac{A_b * V_b}{A_{jet}} \quad (11)$$

Donde:

A_b : Área de la circunferencia mayor (m^2)

V_b : La velocidad tangencial de circunferencia mayor (m/s)

A_{jet} : Área de la circunferencia menor (m^2)

V_{jet} : La velocidad tangencial de circunferencia menor (m/s)

2.2.5 El rodete de turbina

Es una rueda que viene determinada por la altura o cota de captación disponible en un sistema hidráulico y la velocidad angular expresada en RPM. Su diámetro se obtiene mediante la ecuación 10 (Sarmiento, 2020).

Entonces la relación para determinar matemáticamente el diámetro del rodete se obtiene mediante la ecuación 12.

$$Dr = 38,6 * \frac{\sqrt{H_n}}{N} \quad (12)$$

Donde

Dr: Diámetro rueda (mm).

Hn: Altura neta (m).

N: Es la velocidad de rotación (RPM).

2.2.6 Diámetro del chorro

Se refiere al diámetro en el que golpea (impacta) a la cuchara e impulsa a la turbina haciéndola girar a cierta velocidad específica depende de la velocidad de salida (en boca de salida), el caudal y número de boquillas (Sarmiento, 2020).

Entonces la relación para determinar matemáticamente el diámetro del chorro se obtiene mediante la ecuación 13.

$$D_j = \sqrt{4 * Q_t / \pi * n_j * V_{jet}} \quad (13)$$

Donde

Dj: Diámetro chorro (mm).

Q: Caudal turbina (m/s).

n_j : Numero de boquillas.

V_{jet} : Velocidad tangencial (m/s).

2.2.7 Cucharas o Alabes

Tienen una forma característica, su forma es similar a una doble cuchara y su número dependen del diámetro del chorro que incide sobre ellas, también dependen del diámetro del rodete cuando menor sea, más pequeñas serán las cucharas y mayor número de ellas (Bustamante & Arias, 2008).

La distancia de instalación tiene que ser más grande de lo calculado debido a espacios en la fabricación de los cucharones y la necesidad de tener una mínima distancia de seguridad entre la boquilla y la rueda Pelton (Sarmiento, 2020).

2.2.8 Número de cucharas

Para determinar el número de cucharas se realiza mediante la relación que tiene el diámetro del chorro con respecto a el diámetro del rodete para colocar los cucharones de una manera correcta en la rueda para generar rotación y por tanto energía mecánica.

Entonces la relación para determinar matemáticamente el número de cucharones se obtiene mediante la ecuación 14.

$$n_b = 15 + \frac{D_r}{2 * D_j} \quad (14)$$

Donde

D_j : Diámetro chorro (mm).

D_r : Diámetro de rodete (mm).

nb: Numero de cucharas (mm).

2.2.9 Ancho de cuchara o alabe

Para determinar el tamaño adecuado del ancho del cucharón se realiza en función del diámetro del chorro. Esta relación asegura que el chorro de agua impacte eficazmente el cucharón para maximizar la transferencia de energía.

Entonces la relación para determinar matemáticamente el ancho del cucharon se obtiene mediante la ecuación 15.

$$B = 3,4 * D_j \quad (15)$$

Donde

Dj: Diámetro chorro (mm).

B: Ancho del cucharon(mm).

2.2.10 Largo de cuchara o alabe

Para determinar el tamaño adecuado del largo del cucharón se realiza en función del diámetro del chorro. Esta relación asegura que el chorro de agua impacte eficazmente el cucharón para maximizar la transferencia de energía.

Entonces la relación para determinar matemáticamente el largo del cucharon se obtiene mediante la ecuación 16.

$$Bl=3*dj \quad (16)$$

Donde

Dj: Diámetro chorro (mm).

Bl: Largo del cucharon (mm).

2.2.11 Profundidad cuchara o alabe

Para determinar el tamaño adecuado del largo del cucharón se realiza en función del diámetro del chorro. Esta relación asegura que el chorro de agua impacte eficazmente el cucharón para maximizar la transferencia de energía.

Entonces la relación para determinar matemáticamente la profundidad del cucharón se obtiene mediante la ecuación 17.

$$Bd = 1,2 * D_j \quad (17)$$

Donde

Dj: Diámetro chorro (mm).

Bd: Profundidad del cucharón (mm).

2.2.12 Potencia eléctrica en generador

El rendimiento del generador para máquinas de corriente directa. La potencia eléctrica se expresa en vatios (W) o kilovatios (kW) La potencia del generador está directamente relacionada con la cantidad de energía que puede convertir de energía eléctrica a energía mecánica.

(Barragán & Parra, 2020).

Se puede calcular utilizando la ecuación 18.

$$P_s = \frac{P_m}{n} \quad (18)$$

Donde:

Pm: Es potencia Mecánica (Watt).

Ps: Es Potencia Eléctrica (Watt).

η : Es la eficiencia (%).

2.2.13 Torque del Generador

El torque (o momento de torsión) es una medida de la fuerza que causa que un objeto gire. En el contexto de un generador, es la fuerza que el eje de la turbina ejerce para hacer girar el rotor del generador.

El torque está relacionado con la potencia mecánica y la velocidad angular del eje de la turbina se determina utilizando la ecuación 19:

$$\tau = P_m / \omega \quad (19)$$

Donde:

P_m : Es la potencia en vatios (W).

τ : Es el torque (N/m).

ω : Velocidad angular en radianes por segundo (rad/s).

2.2.14 Potencial mecánico

La potencia mecánica se refiere a la cantidad de potencia transmitida o la cantidad de energía eléctrica que se convierte en movimiento por medio del generador en unidad de tiempo mediante el sistema mecánico. Esta energía mecánica proviene de la turbina que está impulsada por el flujo de agua. (Dávalos & Puruncajas, 2015).

La potencia entregada del generador o potencia de salida o sistema se puede, Se puede calcular utilizando la ecuación 20.

$$n = \frac{Ps}{Pm} \quad (20)$$

Donde:

Pm: Es potencia Mecánica (Watt).

Ps: Es Potencia Eléctrica (Watt).

n: Es la eficiencia (%).

De otra manera la potencia se representa en HP o caballos de fuerza para calcularla se tiene la ecuación 21

$$Potencia (HP) = \frac{T \times RPM}{5252} \quad (21)$$

Donde

HP: es la potencia en caballos de fuerza.

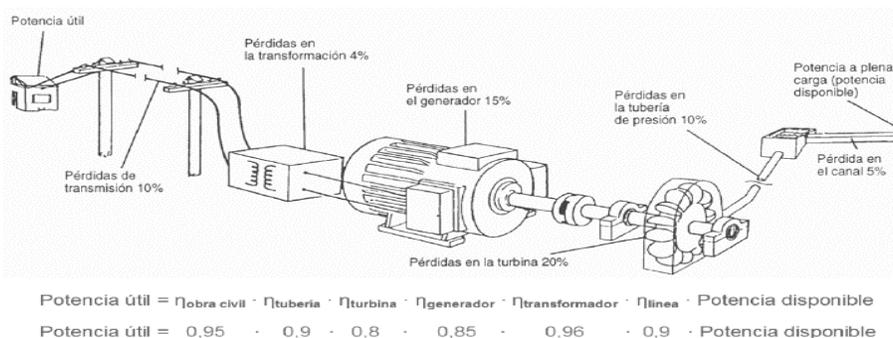
T: es el torque en libras-pie(lb-ft).

2.2.15 Porcentaje de pérdidas de diseño hidráulico

El análisis de las pérdidas en un sistema hidráulico es fundamental para determinar la potencia de salida real del sistema. En este contexto, es importante considerar las pérdidas generadas en los principales componentes del sistema: la turbina, el generador y la tubería. El diseño hidráulico planteado abarca desde la tubería, como punto inicial, hasta el generador, como punto final lo anterior se representa en la figura 8.

Figura 8

Porcentaje de pérdidas



Fuente: (Bustamante & Arias, 2008)

Por lo tanto, para calcular la potencia de entrada real, se debe utilizar la ecuación 22, la cual permite cuantificar las pérdidas totales del sistema. De esta manera, se puede obtener una estimación más precisa de la potencia que se puede generar, lo cual es crucial para optimizar el rendimiento y la eficiencia global del sistema hidráulico.

$$P_m = \eta_{tubería} * \eta_{turbina} * P \quad (22)$$

Donde

P: Es potencia hidráulica de entrada (w).

P_m: Es potencia hidráulica con pérdidas de diseño (w).

$\eta_{tubería}$: Pérdidas en tubería (%).

$\eta_{turbina}$: Pérdidas en tubería (%).

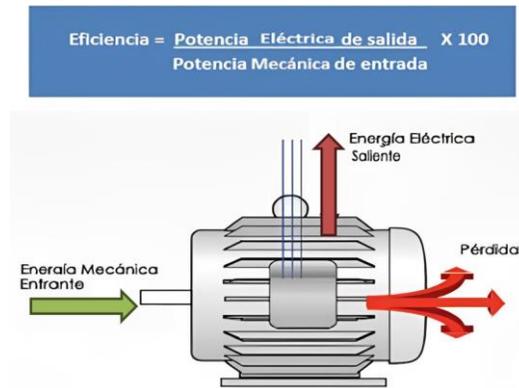
2.2.16 Eficiencia de turbina

La eficiencia de la turbina Pelton, encuentra la relación óptima entre la potencia de entrada y la potencia de salida obteniendo la eficiencia global del micro generador lo anterior se indica en la figura 9, mediante las condiciones paramétricas utilizadas al momento de plantear un diseño hidroeléctrico, la eficiencia del sistema hidráulico nos indica que tan eficiente es la

generación de energía eléctrica (Barragán & Parra, 2020)

Figura 9

Eficiencia en generador



Fuente: (Paiva, 2023)

Se puede calcular utilizando la ecuación 23 para encontrar la eficiencia.

$$n = \frac{P_s}{P_m} * 100 \quad (23)$$

Donde

P_s : Es la potencia de salida (w)

P_m : Es la potencia de entrada(w)

n : Es la eficiencia (%)

2.2.17 Máquinas de Almacenaje y Bombeo

Estas están diseñadas para reutilizan el agua por medio de almacenaje y bombeo, usando el flujo de agua que cae a través de su entrada el agua usada es bombeada durante las horas fuera del tanque o almacenamiento y conducida a lago de una tubería hasta su punto final este flujo de agua puede reutilizarse de manera continua. (Dávalos & Puruncajas, 2015).

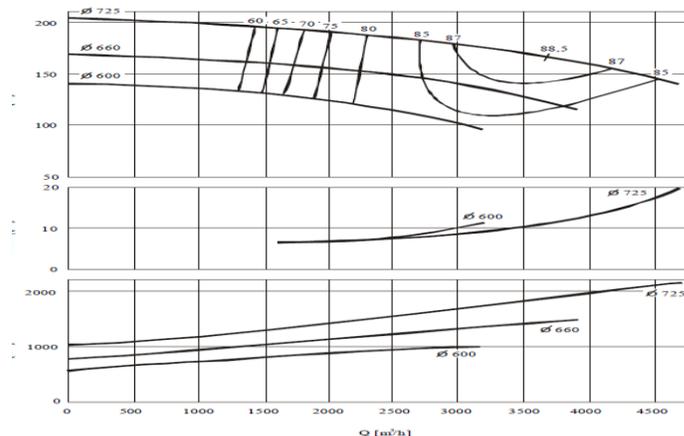
2.2.18 Curva Característica en máquinas de bombeo

La curva de comportamiento en la máquina de bombeo permite conocer su funcionamiento, Indicando su velocidad de operación, la variación en el caudal. También se muestra la relación entre caudal y rendimiento.

La curva de comportamiento se indica en la figura 10 en una máquina de bombeo es suministrada por el fabricante que obtienen después de pruebas y ensayos realizados, el conocimiento de las curvas es importante para la elección de una máquina de bombeo ya que también permite determinar posibles anomalías en su funcionamiento (Dávalos & Puruncajas, 2015).

Figura 10

Curva característica moto Bomba



Fuente: (Dávalos & Puruncajas, 2015)

2.2.19 Generadores asíncronos

Son motores eléctricos que giran a una velocidad relacionada con la frecuencia de la red a la que se encuentran suministrados normalmente a 60Hz o 50 Hz. Dependiendo de la red en la

que también encuentren su corriente de excitación obteniendo la energía necesaria para su funcionamiento.

Los alternadores síncronos son más costosos que los asíncronos y se utilizan, para alimentar redes pequeñas es decir que suministran porcentaje pequeños de la carga del sistema.(Dávalos & Puruncajas, 2015).

2.2.20 SolidWorks

Es un software de diseño mecánico que permite crear croquizar o bocetos, experimentar normalmente se utiliza para producir modelos y dibujos detallados (Gonzáles et al., n.d.).

SolidWorks utiliza un procedimiento de diseño en 3D, desde el croquis inicial hasta el resultado final, a partir de dibujos o componentes en 2D (Gonzáles et al., n.d.). Un modelo en 3D consta de piezas, ensamblaje y dibujos, los cuales muestran el mismo modelo en documentos distintos como.

Planos: geometría para utilizar planos 3D y tener la sección de un modelo.

Cara: limites que contribuyen en la definición de la forma o superficie de un modelo.

2.2.21 ANSYS CFX

ANSYS CFX es un software de resolución de ecuaciones orientado al CFD, y modelado CAD el cual implementa herramientas de distintas herramientas como:

Simulación Estructural: analizar la respuesta estructural de materiales y sistemas, utilizando el método de elementos finitos (FEM). permitiendo evaluar tensiones, deformaciones y factores de seguridad en componentes y ensamblajes (Ferrada Sepúlveda, 2012).

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD): son herramientas utilizadas para la simulación de flujo de fluidos. Se aplican en la industria aeroespacial, automotriz, de energía y muchas otras para optimizar el diseño de sistemas de fluidos (Ferrada Sepúlveda, 2012)

2.2.22 Matlab

MATLAB es un lenguaje de alto nivel para realizar cálculos científico-técnicos. Debido a que este integra interfaz de escritura facilitando la lectura de fórmulas empleadas para cálculos por otro lado, cuenta con herramientas de visualización, así como un lenguaje de programación de fácil uso. (González et al., n.d.). Es por esto que Matlab es una de las principales herramientas que se tendrán en cuenta para realizar el modelamiento del presente proyecto en aplicaciones típicas como:

- Cálculo matemático
- Modelo hidráulico
- Gráficos

3. Metodología

3.1 Enfoque

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que las variables asociadas al objeto de investigación se valoran numéricamente tomando distintos valores de la capacidad de generación de potencia de los generadores de energía renovable que suelen ir cambiando en el transcurso del proyecto, por ende, los resultados obtenidos permitirán determinar el diseño de los generadores eléctricos.

3.2 Paradigma

El paradigma es orientado a la investigación cuantitativa, partiendo desde el neopositivismo que rechaza proposiciones que no se pueden comprobar, busca la unidad del conocimiento y comparte criterio de significados, conjunto de operaciones necesaria para medir variación S. Angulo (2010).

La investigación es neopositivista buscando medir las variaciones que forman los fenómenos de la naturaleza (operacional ismo). basado en técnicas, resultados obtenidos en los antecedentes consultados.

3.3 Método

Al ser esta investigación cuantitativa, el método que se utilizó es científico, dado que es el único procedimiento que no pretende obtener resultados definitivos y que se extiende a todos los campos del saber (Artiaga & Pujante, 2002), ya que se busca estudiar los diseños de generadores de energía renovable con todos los procedimientos y parámetros que lo constituyen.

3.4 Tipo de investigación

La investigación es de tipo descriptiva, pues la finalidad es determinar el desempeño del generador de energía renovable con respecto a los cambios, estableciendo de distintos

parámetros de cada una de las variaciones que se realizaron teniendo en cuenta el caudal el nivel del agua y el tipo de generador hidroeléctrico, ya que éstas afectan directamente a la tensión e intensidad de corriente que influyen en la toma medidas con respecto a los cambios efectuados en cada sistema en pequeñas escalas observando cómo estas realizan variaciones en lo que se constituye en conjunto.

3.5 Secuencia metodológica

Se inició recolectando información sobre los principios de funcionamiento de turbinas hidroeléctricas mediante la lectura de 11 trabajos de grado relacionados con el diseño y comportamiento de turbinas Pelton, 11 literaturas técnicas y recursos relacionados con el diseño y clasificación de turbinas hidráulicas, un artículo que detalla los parámetros que actúan en la turbina tipo Pelton y un libro que menciona la energía hidroeléctrica y sus comportamientos.

Después de leer y entender el funcionamiento del sistema hidráulico, sus componentes, los tipos de turbina y cómo los parámetros afectan el potencial hidráulico, se procedió a establecer un diseño considerando los parámetros más relevantes que actúan en el sistema hidráulico. Estos se dividen en parámetros de operación, físicos, geométricos y de transformación de energía.

Para los parámetros de operación, las variables principales son:

El caudal: Para determinar esta variable, se utiliza una motobomba de impulsión que, mediante los datos del fabricante, proporciona un caudal máximo. Esta motobomba al mismo tiempo servirá para la retroalimentación del sistema hidráulico mediante un tanque de almacenamiento colocado debajo de la turbina tipo Pelton.

Altura o salto neto: Esta es determinada mediante el despeje de ecuaciones presentadas anteriormente.

Potencia hidroeléctrica: Es determinada mediante el rango de diseño propuesto que varía entre 0.5 y 10 kW de potencial hidráulico.

Una vez obtenidos los cálculos matemáticos de los parámetros de operación, se procede a encontrar los parámetros físicos. Las variables a determinar son:

Velocidad en tubería: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta el diámetro de salida de la motobomba proporcionado por los datos del fabricante. Con ecuaciones matemáticas se puede determinar tanto el área como su velocidad.

Velocidad de impacto: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta el efecto Venturi que detalla cómo al reducir el diámetro en una tubería, el caudal se mantiene constante. La velocidad de salida cambia con respecto al diámetro de la boca de salida, es decir, que entre más grande sea el diámetro de esta, menor será su velocidad. Por el contrario, entre más pequeña sea la boca de salida, aumentará su velocidad. Mediante el despeje de la ecuación de se encuentra su valor.

Velocidad del rodete: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta la velocidad de impacto y un dato importante determinado en los parámetros geométricos, como el diámetro del rodete. Con estos datos, mediante ecuaciones matemáticas, se encuentra su valor.

Una vez obtenidos los cálculos matemáticos de los parámetros físicos, se procede a encontrar, mediante las ecuaciones de los parámetros geométricos, las variables a determinar:

Diámetro del rodete: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta el diámetro del chorro, ya que su valor corresponde directamente a este, determinando qué tan grande o pequeño será su valor.

Diámetro del chorro: Para determinar este valor, se tiene en cuenta la velocidad de impacto y el caudal disponible, ya que estas cambian su valor. Es decir, qué tan grande o

pequeño es el diámetro de impacto sobre las cucharas. Con estos datos, mediante ecuaciones, se determina su valor.

Cucharas: Esta variable, al igual que el rodete, está determinada por el diámetro del chorro, ya que este indica dimensiones como el número de estas, el largo, ancho y profundo.

Una vez obtenidos los cálculos matemáticos de los parámetros geométricos, se procede a encontrar, mediante las ecuaciones de los parámetros de transformación de energía, las variables a determinar:

Potencia de salida: Para determinar esta variable, se considera el potencial eléctrico de entrada y las pérdidas producidas tanto en la tubería, la turbina y el generador. Mediante ecuaciones matemáticas se determina su valor.

Torque: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta tanto la velocidad en el rodete como la potencia de salida. Mediante ecuaciones se determina su valor.

Eficiencia: Para determinar esta variable, se tiene en cuenta tanto la potencia hidráulica de entrada como la potencia de salida. Mediante ecuaciones matemáticas se determina su valor.

En los parámetros de transformación de energía se identificó cómo se comporta el diseño con las modificaciones de los parámetros antes mencionados y cómo es la eficiencia del diseño considerando las pérdidas tanto en la tubería, el generador y la turbina.

Después de obtener todos los parámetros, se realizan variaciones representadas en gráficas realizadas en el software Matlab. Los principales cambios son la modificación del caudal y cómo estas afectan a las demás variables, la modificación del potencial eléctrico y cómo afecta a las demás variables, la modificación de los diámetros de tubería y cómo afecta en los demás parámetros, la modificación de la velocidad de impacto y cómo esto afecta a los demás parámetros, la modificación del diámetro del rodete y cómo estos afectan en los demás

parámetros.

Con los parámetros obtenidos gracias a ecuaciones matemáticas, se procede a representarlos utilizando dos softwares de modelado CAD: SolidWorks e Inventor, para crear un modelo virtual de la turbina Pelton con las medidas obtenidas mediante los cálculos. Para ello se utilizaron varios comandos y aproximadamente cuatro videos relacionados con la creación de una turbina tipo Pelton en los programas.

Con la turbina hidráulica implementada en modelado CAD, se procede a evaluar las pruebas en un entorno controlado con ayuda del software ANSYS, que facilita observar el rendimiento de la turbina bajo diferentes condiciones de operación, verificando la eficiencia del prototipo.

Al final, se analizan los resultados de las pruebas y se realizan ajustes en el diseño, verificando que la turbina cumpla con los objetivos y requisitos establecidos inicialmente.

3.6 Técnicas de recolección de información

Observación directa: la información de los cálculos matemáticos se obtiene a partir del software MATLAB que mediante su interfaz facilita tanto la escritura como la lectura de estos. El diseño de sistema hidráulico y turbina se extrae de los programas SOLIDWORKS e INVENTOR mediante su modelado 3D. Los distintos análisis se obtienen mediante el software ANSYS donde se simula las distintas velocidades tanto en la turbina como en la tubería.

3.7 Instrumentos de recolección de información

La información fue almacenada en las memorias de cálculo en archivos. MLX y SLX extensiones de MATLAB, los planos 3D se quedan en Inventor o SolidWorks y los análisis en ANSYS.

4. Resultados

4.1 Parámetros que actúan en un sistema hidráulico

4.1.1 Parámetros de operación

las turbinas Pelton funcionan prácticamente con una altura de salto constante, las características de caudal, potencia según (Díez, 1996)

- Altura de salto neta
- Caudal
- Potencia

4.1.2 Parámetros físicos

La turbina hidráulica permite convertir la energía producida por el agua que lleva cierta velocidad (velocidad tangencial) en energía mecánica de rotación (velocidad angular) según (Endesa Educa, 2014).

- Velocidad angular (Velocidad en rodete)
- Velocidad en tangencial (Velocidad de salida de bomba)
- Efecto Venturi (Velocidad de impacto en cuchara)

4.1.3 Parámetros geométricos de turbina tipo Pelton

El tipo, geometría (Diseño) y dimensiones (Tamaño) de una turbina están determinadas, en su mayoría por los siguientes criterios según (Sarmiento, 2020).

El elemento esencial de la turbina tipo Pelton es el rodete mismo. Aunque el rodete por sí solo requiere de ciertos parámetros para su correcto funcionamiento y diseño. (Bustamante & Arias, 2008).

- Rodete
- Alabes o cucharas

- Diámetro del chorro

4.1.4 Parámetros de transformación de energías (mecánica y eléctrica)

La turbina Pelton convierte la energía cinética del chorro de agua en energía mecánica, que luego se convierte en energía eléctrica mediante un generador. En este proceso, se pueden medir varios parámetros importantes, como la potencia mecánica y eléctrica, los RPM (revoluciones por minuto) y el torque. Cada uno de estos parámetros afecta la eficiencia y la capacidad de la turbina para generar energía eléctrica (Alejandro et al., 2006).

- Potencia de salida (Potencia en el generador)
- Potencia mecánica
- Torque
- Eficiencia

4.1.5 Descripción de parámetros que actúan en un sistema hidráulico

Cada parámetro se ha seleccionado cuidadosamente debido a su impacto significativo en el rendimiento del sistema hidroeléctrico. La tabla 1 resume los parámetros clave que se considerarán, junto con una breve descripción y la justificación de su elección.

Tabla 1

Descripción de parámetros que actúan en sistema hidráulico

Parámetro	Variable	Descripción	Justificación
Parámetros de operación			
Altura de salto neta	H (m)	Diferencia de altura entre el punto de entrada y salida del agua.	La altura afecta directamente la energía potencial disponible para convertir en energía hidráulica.
Caudal	Q (m ³ /s)	Flujo de agua a través de la turbina.	El caudal es crucial para determinar la potencia

			hidráulica y el rendimiento general del sistema.
Potencia hidroeléctrica	P(kW)	Potencia generada por la energía del agua.	La potencia hidráulica es clave para determinar la cantidad de energía producida por el agua.
Parámetros físicos			
Velocidad angular	ω (rad/s)	Velocidad de rotación del rodete.	Determina el ritmo al que el rodete convierte la energía hidráulica en energía mecánica.
Velocidad tangencial	Vb (m/s)	Velocidad de salida del flujo de agua en la bomba antes de impactar en el rodete.	Es clave para calcular la energía transferida al rodete.
Efecto Venturi	Vjet (m/s)	Velocidad de impacto en las cucharas del rodete debido a la reducción del diámetro de la tubería.	Mide la eficiencia del chorro de agua para transmitir energía.
Parámetros geométricos			
Rodete	Dr (mm)	Diámetro del rodete.	Afecta la velocidad de rotación y la eficiencia del sistema.
Alabes o cucharas	-	Elementos que reciben el impacto del chorro de agua.	Determinan la eficiencia de conversión de energía hidráulica a mecánica.
Diámetro del chorro	Dc (mm)	Diámetro del chorro de agua que impacta en el rodete.	Afecta la velocidad de impacto y la transferencia de energía hidráulica.
Parámetros transformación de energías			
Potencia mecánica	Pm (kW)	Potencia mecánica transmitida por el rodete.	La potencia mecánica es clave para evaluar la eficiencia del sistema antes de la conversión eléctrica.
Potencia de salida	Ps(kW)	Potencia generada por el sistema en el generador.	Refleja la eficiencia de todo el sistema en la conversión

Torque	T (Nm)	Momento de fuerza generado por el rodete debido al impacto del agua.	de energía hidráulica en eléctrica. Es clave para entender la rotación y potencia generada por el rodete.
Eficiencia	η (%)	Relación entre la potencia de salida y la potencia hidráulica de entrada.	Indica la eficiencia general del sistema en la conversión de energía.

4.1.6 Componentes del Sistema Hidroeléctrico Generatriz

Para el diseño y funcionamiento del sistema hidroeléctrico Generatriz, se utilizarán tres componentes principales: una motobomba, un generador y una turbina tipo Pelton. Cada uno de estos componentes desempeña un papel crucial en la conversión de energía hidráulica en energía eléctrica. A continuación, se describe la función de cada componente:

4.1.7 Función de Motobomba

Es responsable de elevar el agua desde una fuente (como un río o un tanque) hasta la turbina. Este componente transforma la energía eléctrica en energía hidráulica.

La motobomba succiona el agua y la impulsa hacia la turbina a través de una tubería. Su capacidad de caudal (Q) es crítico ya que afectan la cantidad de energía que se puede generar.

4.1.8 Función de Turbina Tipo Pelton

Está diseñada para aprovechar la energía cinética del agua que impacta en sus cucharas. Este tipo de turbina es especialmente eficiente en aplicaciones donde el agua cae desde grandes alturas, maximizando la conversión de energía potencial en energía mecánica.

Cuando el agua a alta presión y velocidad (proveniente de la motobomba) impacta en las cucharas de la turbina, genera un torque que hace girar el rodete de la turbina. La energía cinética del chorro de agua se convierte en energía mecánica, que posteriormente se utiliza para accionar

el generador.

4.1.9 Función del Generador

Convierte la energía mecánica producida por la turbina en energía eléctrica. Es un componente esencial para el suministro de energía a la red eléctrica o a los consumidores finales.

Cuando la turbina gira, impulsa al generador, que mediante un sistema de inducción (o generador), produce electricidad. Las salidas del generador incluyen la potencia eléctrica (Ps), voltaje (V) y corriente (I), que son medidas críticas para evaluar el rendimiento del sistema.

4.1.10 Relación de Parámetros en la Generación de Energía Hidroeléctrica

A continuación, se presenta un análisis de cómo las variables de entrada influyen en las salidas de cada componente del sistema hidroeléctrico. Este análisis es esencial para comprender el funcionamiento integral del sistema en la generación de energía eléctrica.

4.1.11 Parámetros presentes en Motobomba

Los parámetros de entrada y salida de la motobomba se indican en la tabla 2.

Tabla 2

parámetros presentes en la motobomba

Entradas	Salidas
Caudal (Q): El flujo de agua que ingresa a la motobomba. Un aumento en el caudal incrementa la energía potencial disponible para la turbina.	Potencial Hidráulico (P): Se genera al elevar el agua a una cierta altura. Un mayor caudal y altura de salto neto contribuyen a un potencial hidráulico más alto. Velocidad de salida (Vjet): Aumenta con un mayor caudal, lo que afecta la energía cinética del chorro de agua que impactará la turbina.

La relación entre las entradas y salidas en la motobomba es fundamental, ya que un mayor caudal y una adecuada configuración del sistema aseguran que se genere suficiente energía hidráulica para la turbina.

4.1.12 Parámetros presentes en la Turbina Pelton

Los parámetros de entrada y salida de la turbina se indican en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros presentes en la turbina

Entradas	Salidas
Velocidad de salida (V_{jet}): Determina la energía cinética del agua al impactar en las cucharas de la turbina, influyendo en el torque generado.	Velocidad Angular (ω): Aumenta cuando el agua impacta eficientemente las cucharas, lo que maximiza la conversión de energía hidráulica en energía mecánica. Torque (T): La fuerza que la turbina genera al girar. Se incrementa con un aumento en la velocidad de impacto del agua.

La eficiencia en la conversión de energía en la turbina depende de cómo se gestionan estas entradas, lo que se traduce en una mayor producción de energía eléctrica.

4.1.13 Parámetros presentes en el Generador

Los parámetros de entrada y salida del generador se indican en la tabla 4

Tabla 4

Parámetros presentes en el generador

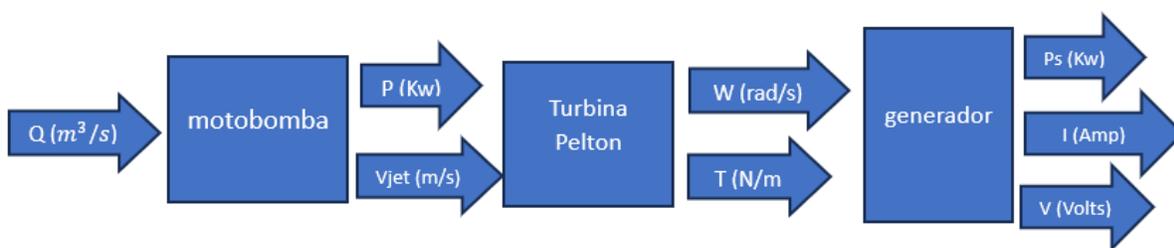
Entradas	Salidas
Torque (T): A medida que aumenta el torque, se incrementa la capacidad del generador para producir energía eléctrica.	Potencia Eléctrica (Ps): Es la energía eléctrica generada. Su eficiencia depende del torque y la velocidad angular. Voltaje (V) y Corriente (I): Son fundamentales para la distribución de la energía generada y dependen de la potencia eléctrica.

El generador convierte la energía mecánica en energía eléctrica, y su rendimiento se ve afectado por las condiciones de operación establecidas en las etapas anteriores.

El sistema hidroeléctrico Generatriz combina estos tres componentes anteriormente descritos para transformar la energía hidráulica disponible en energía eléctrica utilizable. La motobomba eleva el agua, la turbina convierte la energía hidráulica en mecánica, y el generador transforma esta energía mecánica en electricidad. La selección de cada componente y su adecuada interconexión son fundamentales para maximizar la eficiencia y la efectividad del sistema en la generación de energía en la figura 11 se representa lo anteriormente descrito.

Figura 11

sistema hidráulico generatriz



Fuente: *(Elaboración propia)*

4.2 Dimensionamiento de diseño hidráulico

Antes de proceder con el diseño en modelado CAD, se realizó un análisis exhaustivo de las condiciones espaciales, estableciendo las dimensiones en milímetros que limitarán el tamaño real del diseño. Para ello, se midió el área disponible en la Universidad CESMAG, identificando el espacio total destinado para una futura instalación del sistema."

Para determinar las medidas que limitan el diseño hidráulico generatriz se utilizó una cinta métrica, los valores se registraron en una hoja de papel, asegurándose de que las dimensiones se ajustaran al espacio disponible para la instalación. El área cuenta con una altura de 1400 (mm), un largo de 1800 (mm) y un ancho de 800 (mm). Estas medidas son esenciales para elaborar el diseño en modelado CAD, para una futura instalación del micro generador hidroeléctrica generatriz y elaborar con sus respectivas dimensiones y tamaños de cada elemento a implementar en una posible mesa de pruebas, este concepto se describe en capítulos siguientes de este documento.

4.2.1 Dimensiones de motobomba de impulsión

La motobomba ocupa un espacio del diseño hidráulico. Su modelo y datos como el caudal y el diámetro de descarga, se especifica proporcionados por el fabricante mediante la figura 12.

Figura 12

Datos motobomba fabricante



Pedrollo
Bomba Centrífuga 1.5 HP 110/220 V
★★★★★ 0.0 (0)

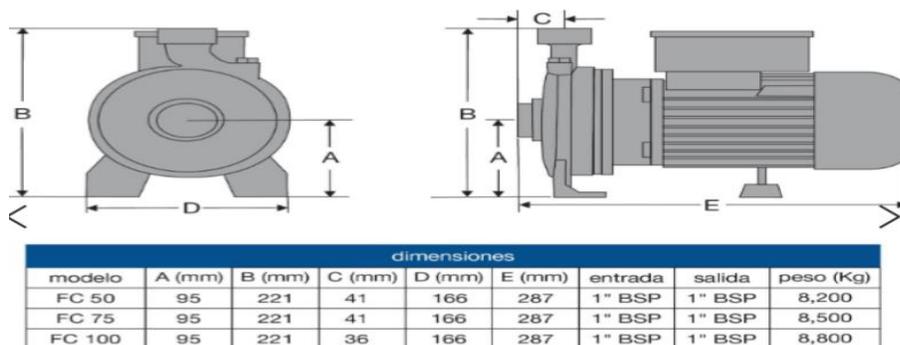
Potencia	1.5 HP
Voltaje	110 V;220 V
Presión Máxima	57 Psi
Diámetro de Descarga	1 pulgadas
Material	Hierro Fundido con Tratamiento de Cataforesis.
Caudal máximo	110 l/min
País de Origen	Italia
Alimentación	Eléctrica
Altura máxima de elevación	40 m
Capacidad de succión	7 m
Flujo de salida	110 l/min
Tipo de bomba	Centrífuga
Diámetro de succión	1 pulgadas

Fuente: (Homecenter, 2022)

Las dimensiones de tamaños de la motobomba también son datos muy relevantes a la hora del diseño ya que determina el espacio real que ocuparía en la mesa de pruebas las dimensiones se indican en la figura 13.

Figura 13

Dimensiones motobomba



Fuente: (Homecenter, 2018)

Las dimensiones a destacar de la figura 13 son las del modelo FC 50 con los valores de (D

166 mm), que determina el ancho de la motobomba (E 287 mm) que determina el largo de la motobomba y (B 221mm) que determina la profundidad de la motobomba.

4.2.2 Dimensiones del generador

También se tiene en cuenta las medidas de los elementos a utilizar es un generador eléctrico, que ocupa un espacio real en la mesa de pruebas del diseño hidráulico. Su modelo y datos relevantes como sus caballos de fuerza, su alimentación eléctrica, revoluciones por minuto (RPM), corriente nominal y su eficiencia energética, se especifica gracias a los datos proporcionados por el fabricante mediante la figura 14.

Figura 14

Generador eléctrico



Descripción

MOTOR DE INDUCCION ELECTRICO MONOFASICO
110 Y 220 VOLTIOS MARCA POWER

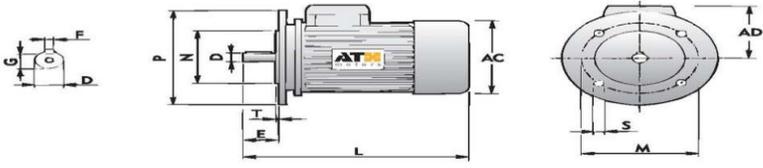
USO INTENSIVO Y CONTINUO TRABAJO INDUSTRIAL
NUEVO SELLADO EN CAJA GARANTIA DE UN AÑO
2.2KW 3HP A 3600 RPM 60HTZ
CORRIENTE NOMINAL: 34/17 AMP
GRADO DE PROTECCION IP54
PESO 28K
INS CL: B
EFICIENCIA ENERGETICA 75%
FACTOR DE POTENCIA 0.90 COS

Fuente: (Reyes, n.d.)

Las dimensiones del generador son importantes debido a que limita el espacio disponible en una futura instalación en la mesa de pruebas, sus respectivas dimensiones se indican en la figura 15.

Figura 15

Dimensiones de generador



ALEACIÓN LIGERA													
TIPO	POLOS	AC	AD	D	E	F	G	M	N	P	S	T	L
56	2, 4, 6, 8	120	110	9	20	3	7,2	98	80	120	7	3	195
63	2, 4, 6, 8	130	115	11	23	4	8,5	115	95	140	10	3	230
71	2, 4, 6, 8	145	125	14	30	5	11	130	110	160	10	3,5	255
80	2, 4, 6, 8	165	135	19	40	6	15,5	165	130	200	12	3,5	295
90S	2, 4, 6, 8	185	145	24	50	8	20	165	130	200	12	3,5	335
90L	2, 4, 6, 8	185	145	24	50	8	20	165	130	200	12	3,5	360
100	2, 4, 6, 8	215	170	28	60	8	24	215	180	250	15	4	380
112	2, 4, 6, 8	240	180	28	60	8	24	215	180	250	15	4	400

Fuente: (Centralde, n.d.)

Del modelo B5 Tipo 80 del generador las dimensiones a destacar de la figura 15 son los valores de (L 295 mm), (M 165 mm) y (P 200 mm), por otra parte, se tiene en cuenta el valor de (D 19 mm) ya que este debe de ser menor o igual al diámetro de vacío o encaje con la turbina que se une directamente con el eje del generador.

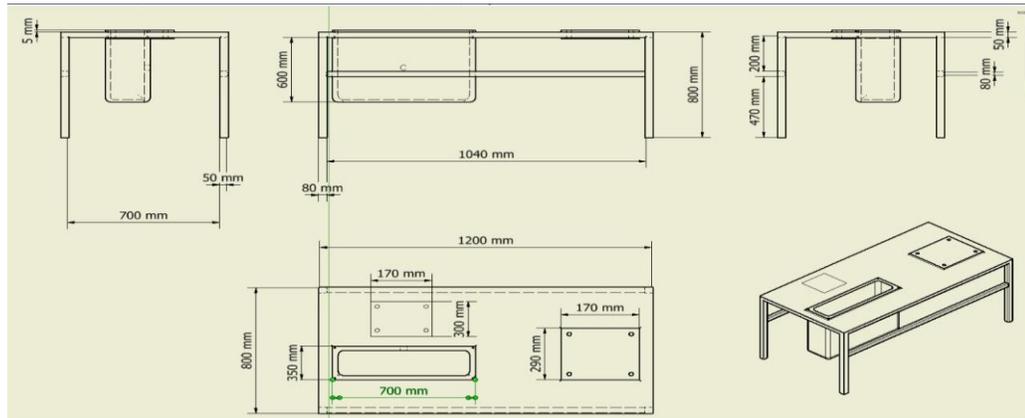
4.2.3 Dimensiones de diseño hidráulico generatriz

Una vez definidas las medidas de los modelos seleccionados y presentados en los capítulos anteriores, resulta esencial integrar la motobomba, la turbina y el generador en un entorno que permitirá verificar el funcionamiento de cada componente, tanto de forma individual como en conjunto. Por lo tanto, es necesario contar con un espacio adecuado para organizar los modelos propuestos antes de su implementación en un entorno real.

Asegurándose que los diseños se ajusten facilitando la interconexión de estos tres componentes, por lo que se presenta una mesa de pruebas, que cumple con las dimensiones requeridas. En la figura 16 se muestran las dimensiones de la mesa de pruebas necesaria para la interconexión del diseño hidráulico.

Figura 16

Mesa de pruebas



Fuente: (Elaboración propia)

Entendiendo que las dimensiones pueden cambiar de acuerdo a un modelo en específico en la mesa de pruebas se presentan con un pequeño excedente en donde se pueda adecuar de acuerdo al modelo de motobomba y generador a implementar.

4.2.4 Cantidad de energía eléctrica generada

Comprendiendo que el proyecto tiene la necesidad de diseñar un micro generador hidroeléctrico y evaluar su comportamiento a nivel de simulación, se propone un prototipo de micro turbina que se encuentre en el rango de operación propuesto entre los 0.5kw hasta 10kw.

Este rango es propuesto a partir de antecedentes determinando, las variables esenciales en la capacidad de generación, y de acuerdo a los parámetros determinados por los modelos de motobomba y generador presentados anteriormente y debido al reducido tamaño que se cuenta para futura instalación.

4.2.5 Esquema de diseño hidráulico guía

La estructura del diseño, está determinada por las condiciones de diseño, el tamaño

hidráulico y la cantidad de energía producida. Este capítulo propone un procedimiento a seguir para el diseño en modelado 3D de turbinas Pelton, presentado en el esquema característico de la figura 17.

Primero, se determinan los parámetros de funcionamiento. Dependiendo del modelo de motobomba seleccionado, el caudal es de 110 (l/min). Para la potencia hidráulica se elige el dato de la característica de generador con una potencia 2.2 kW, este valor se encuentra en el rango de los 0,5 kW a 10 kW rango propuesto en la cantidad de energía eléctrica generada.

Las características hidráulicas de diseño, como el diámetro de la tubería, el cual se define según el modelo de motobomba. Aplicando fórmulas adecuadas se determinan sus áreas, radios, velocidades parámetros necesarios para el diseño lo anterior se clarifica en capítulos siguientes.

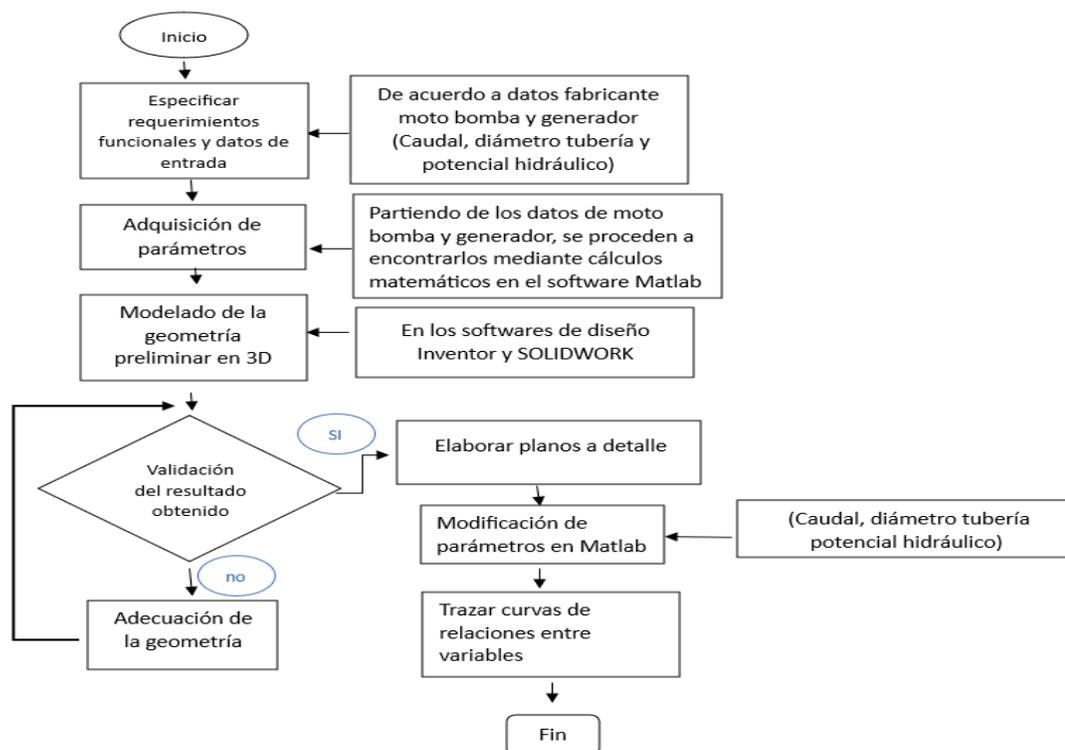
Una vez definidos todos los parámetros, se realiza un diseño 3D preliminar de la turbina. Luego de presentar un diseño estándar con una potencia de 2.2 kW, se evalúan las variaciones de parámetros para diseñar una turbina.

Para hacer esto, se usó el software Matlab para cambiar parámetros como el caudal, la potencia de salida y el diámetro de la tubería. Esto se ajusta automáticamente mediante otros parámetros donde afecta los aspectos geométricos del modelo, aumentando o disminuyendo el tamaño de la turbina.

Para representar visualmente se muestra un esquema de diseño característico. Esta muestra claramente el proceso de diseño en la Figura 17.

Figura 17

Esquema de guía en el proceso de diseño



Fuente: (Elaboración propia)

4.2.6 Diseño de la turbina tipo Pelton

Para realizar el diseño de la turbina tipo Pelton, se utilizan los datos calculados de acuerdo con la metodología y las ecuaciones expuestas en los apartados anteriores.

Para determinar los valores de caudal y el diámetro de la tubería, se considera un modelo de motobomba existente. Las características de esta motobomba, proporcionadas por el fabricante, se encuentran detalladas en la tabla 5.

Tabla 5

Datos fabricante motobomba

Datos motobomba	Valor	Unidad
Caudal máximo	6.600	l/h
	0.0018	m ³ /s
Diámetro salida manguera	25	mm

Partiendo de estos datos los ingresamos a Matlab el cual facilita el cálculo y conversión de estos para poder operar con facilidad.

4.2.7 Cálculo de parámetros de operación

Con datos proporcionados por el diseñador de la motobomba, se tienen los datos del caudal máximo que circula a su salida, también el diámetro de la salida de la tubería.

4.2.8 Cálculo de potencial hidráulica

Para determinar la potencia de generación, se tiene en cuenta el rango de generación planteado que esta desde los 0.5 kW hasta los 10kw, eligiendo los 2.2kw valor determinado por el generador,

4.2.9 Cálculo de la altura

de la ecuación 4, se despeja la altura H, dado que los demás datos son conocidos, obteniendo así la siguiente ecuación 24.

$$Hn = P/\rho * g * Q \quad (24)$$

Para determinar el valor de los parámetros restantes, se aplica las ecuaciones 4, 5 y 25.

Los valores de los parámetros de operación muestran en la tabla 6.

Tabla 6

Datos obtenidos de parámetros de operación

Parámetros de operación	Valor	Unidad
Altura neta (Hn)	139	m
Caudal (Q)	1.8	l/s
Potencia (P)	2.5	kW
Densidad de agua (ρ)	1000	kg/m ³
Gravedad (g)	9.8	m/s ²

4.2.10 Cálculo de parámetros físicos

Para calcular los parámetros físicos, se utilizan los valores determinados anteriormente en los parámetros de operación, ya que estos permiten determinar las diferentes velocidades.

Mediante la aplicación de la ecuación 10, se encuentra la velocidad de salida de bomba. Sin embargo, se necesitan otros valores, como el área de la tubería.

Para determinar el área de la tubería de salida de la bomba, se tiene el dato proporcionado por el fabricante, el diámetro de salida es de una 1pulg o 25 (mm). Para calcular el radio, se divide este valor entre dos, ya que el radio es la mitad del diámetro. Finalmente, para determinar el área, se utiliza la ecuación 25.

$$Ab = \pi * rb^2 \quad (25)$$

Donde

Ab: es el área de la sección transversal de la tubería de salida de la bomba.

rb: Es el radio de la tubería.

4.2.11 Cálculo de velocidad de impacto

Al determinar la velocidad de impacto (V_{jet}), se debe tener en cuenta el efecto Venturi. Para este caso, se elige un valor de diámetro de tubería de 15 (mm). A partir de esto, se puede encontrar V_{jet} mediante la aplicación de la ecuación 11 y 25, La figura 18, proporciona las dimensiones del diámetro de tubería en milímetros de diferentes tamaños.

Figura 18

Diámetro de salida de jet (inyector)

DIAMETRO REFERENCIAL (plg)	DIAMETRO NOMINAL (mm)	DIAMETRO EXTERIOR (mm)	ESPESOR (mm)
1/2	15	21.0	2.2
3/4	20	26.5	2.3
1	25	33.0	2.4
1 1/4	35	42.0	2.5
1 1/2	40	48.0	2.5
2	50	60.0	2.8
2 1/2	65	73.0	3.5
3	80	88.5	3.8
4	100	114.0	4.0

Fuente:(Cyvplasticos, 2004)

4.2.12 Cálculo de la velocidad en rodete

Para determinar el valor de la velocidad en el rodete (W), se aplica la ecuación 26, lo cual se detalla en el cálculo de parámetros geométricos. En este proceso, se determina el valor del diámetro del rodete y, por lo tanto, su radio, reemplazando en la ecuación 7. Los valores de los parámetros físicos relevantes se presentan en la tabla 7.

Tabla 7

Datos obtenidos de parámetros físicos

Parámetros físicos	Valor	Unidad
Velocidad de impacto en cuchara (V_{jet})	10.37	m/s
Velocidad en rodete (W)	92.7	(rad/s).
Velocidad de salida de bomba (V_b)	3.74	m/s

4.2.13 Cálculo de parámetros geométricos

Para determinar los parámetros geométricos de una turbina Pelton, es necesario tener en cuenta los criterios de eficiencia hidráulica establecidos por la literatura.

4.2.14 Cálculo del diámetro del chorro

Según Sarmiento (2020), la máxima eficiencia se alcanza cuando la relación entre el diámetro del rodete y el diámetro del chorro de agua no supera el valor de 15. Esta condición debe cumplirse para asegurar un diseño óptimo y eficiente en la turbina lo anterior se clarifica en el capítulo siguiente.

4.2.15 Cálculo del diámetro del rodete

Una vez verificada la validez de esta relación de diámetros, se procede a calcular el diámetro del rodete (D_r) utilizando la ecuación 26.

$$D_r > 14.9 * D_j \quad (26)$$

Según la ecuación, el diámetro del rodete (D_r) debe ser mayor que 14.9 veces el diámetro del chorro de agua (D_j). Esta relación se utiliza para asegurar que el rodete de la turbina tenga un tamaño adecuado en relación con el chorro de agua,

4.2.16 Cálculo del dimensionamiento de la cuchara

Una vez se determine el diámetro del chorro, y su respectivo diámetro, como se muestra en las ecuaciones anteriores, se determina, el largo, el ancho y la profundidad Los valores de los parámetros geométricos se muestran en la tabla 8.

Tabla 8

Datos obtenidos de parámetros geométricos

Parámetros de diseño	Valor	Unidad
Diámetro del rodete (D_r)	0.223	m
Diámetro del chorro (D_j)	0.015	m
Número de cucharas (n_b)	22	
Ancho de cuchara (B)	0.05	m
Largo de la cuchara (B_l)	0.04	m
Profundidad cuchara (B_d)	0.018	m

4.2.17 Cálculo de parámetros de transformación de energías

Para calcular los parámetros de transformación de energía, es necesario determinar algunos parámetros especificados en los siguientes capítulos.

4.2.18 Cálculo del torque

Este valor se puede obtener mediante la aplicación de la ecuación 19. Al aplicar dicha ecuación, se obtiene un valor de 19 N/m.

4.2.19 Cálculo de potencia de salida

Una vez conocido el torque, se determina la potencia de salida gracias al modelo del generador elegido y expuesto en capítulos anteriores. Es importante tener en cuenta que, en el diseño de este tipo de sistemas hidráulicos,

4.2.20 Porcentaje de Pérdidas de diseño

En el diseño de sistemas hidráulicos, es inevitable considerar el porcentaje de pérdidas de energía que ocurren debido a diversos factores, como la fricción en las tuberías, las restricciones geométricas y las ineficiencias en la transmisión de energía. Estas pérdidas impactan directamente en la potencia hidráulica útil y, por ende, en la eficiencia general del sistema.

Para este estudio, se ha determinado un porcentaje de pérdidas típicas consultando datos referenciales y mediante la aplicación de la ecuación correspondiente, la cual ajusta la potencia hidráulica disponible al considerar las pérdidas de diseño inherentes. De acuerdo con los valores obtenidos, la potencia hidráulica resultante (P_m) refleja las pérdidas presentes en el sistema, lo cual permite ajustar la expectativa de rendimiento del generador hidráulico y dimensionar correctamente el sistema para alcanzar una potencia eléctrica útil acorde con el objetivo del proyecto.

Estas pérdidas fueron seleccionadas y justificadas en función del siguiente aspecto:

El porcentaje de las pérdidas que permiten un ajuste en la configuración del sistema para maximizar la eficiencia de la turbina Pelton.

Para determinar los parámetros de transformación de energías se considera. El porcentaje de pérdidas típicas presentadas en la figura 8 y mediante la aplicación de la ecuación 22 se determina las diferentes variables como (Pm)y (Ps) potencia hidráulica con pérdidas de diseño.

Los parámetros de transformación de energía obtenidos se indican en la tabla 9

Tabla 9

Datos obtenidos de los parámetros de transformación de energías

Parámetros de transformación de energías	Valor	Unidad
Potencia eléctrica (Ps)	1.5	kW
Potencia mecánica (Pm)	1.8	kW
Torque (T)	19	N/m
Eficiencia (n)	0.72	%

4.2.21 Diseño de micro generador hidráulico

El diseño hidráulico es un proceso que se lleva a cabo con la ayuda de software especializado, como SolidWorks y MATLAB. SolidWorks se utiliza para diseñar el modelo CAD (Diseño Asistido por Computadora), mientras que MATLAB se emplea para obtener las medidas requeridas a través de fórmulas matemáticas.

Con las dimensiones propuestas y establecidas, se procede a crear un boceto en 2D. Posteriormente, este boceto se transforma en una figura tridimensional (3D) mediante el uso de una herramienta de renderizado, asegurando que las dimensiones sean las correctas y se ajusten a los requerimientos del diseño.

Este enfoque integrado de utilizar software de diseño y herramientas matemáticas que permiten diseñar el modelo hidráulico desarrollar dimensiones precisas, del diseño y asegurando

que los requisitos técnicos se cumplan de manera satisfactoria.

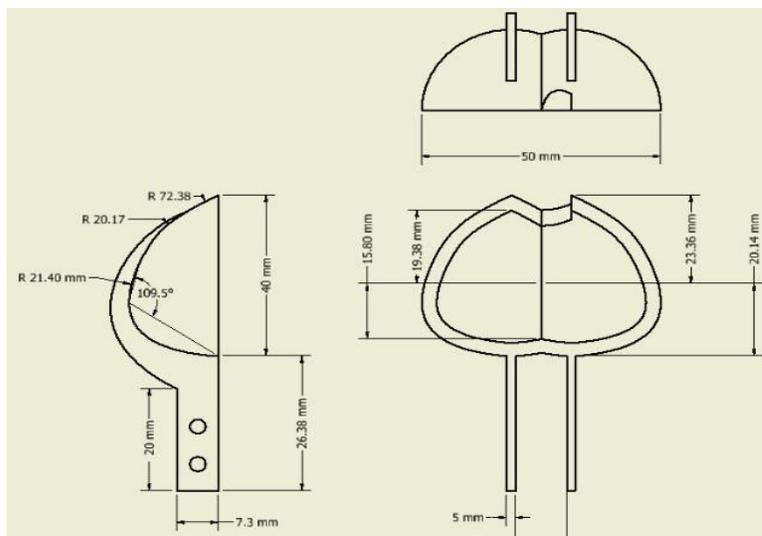
4.2.22 Proceso de diseño Álabes o cuchara

El diseño de la cuchara de la turbina se obtiene a partir de las medidas establecidas en la Tabla 8. Utilizando herramientas de dibujo en 2D, se crea la forma básica de la cuchara, incluyendo líneas, arcos y otras geometrías necesarias para representar la forma deseada.

Una vez definida la forma 2D, se procede a extruir el dibujo para obtener un modelo 3D. Este proceso implica seleccionar la forma y especificar la distancia y dirección de la extrusión. Posteriormente, se agregan detalles adicionales a la cuchara, como agujeros y características específicas del diseño. Finalmente, se presenta la visualización del modelo 3D de la cuchara, como se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Cuchara visualización en 3D



Fuente: (Elaboración propia)

4.2.23 Proceso diseño del rodete

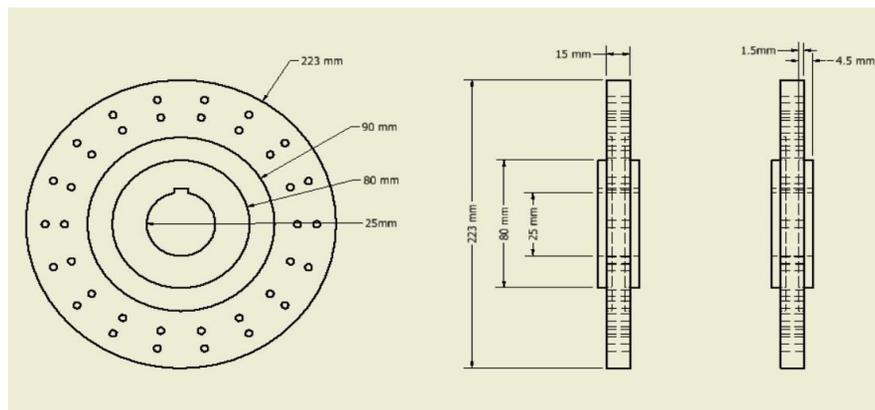
En el diseño del rodete, se tienen en cuenta las dimensiones de la Tabla 8. A partir de

estas medidas, se utilizan herramientas de dibujo como líneas y círculos para crear un boceto en 2D. Es crucial que el diámetro central del rodete coincida con las dimensiones del eje del generador.

Mediante la función de extrusión, el perfil 2D del eje se puede convertir en un sólido 3D, especificando la dirección de la extrusión y verificando que las dimensiones del rodete sean correctas. Este proceso se ilustra detalladamente en la Figura 20.

Figura 20

Rodete visualización en 3d



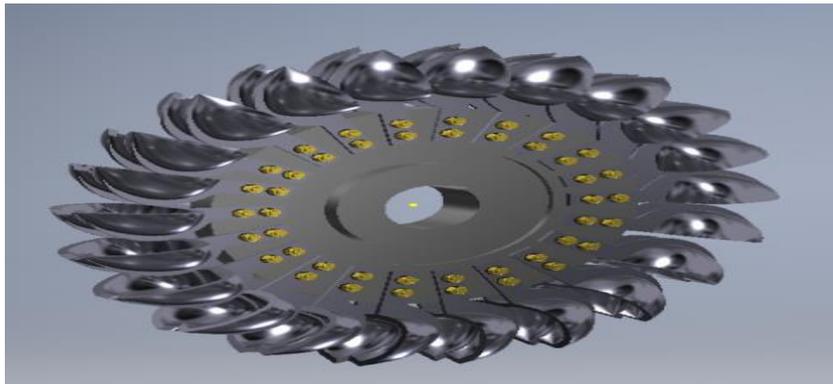
Fuente: (*Elaboración propia*)

4.2.24 Proceso de ensamblaje de diseño de turbina 3D

Una vez creado el rodete, el siguiente paso es posicionar las cucharas en él. Esto implica colocar las cucharas en un ángulo específico y asegurarse de que estén espaciadas uniformemente alrededor del eje. Utilizando las herramientas de ensamblaje en Inventor, se puede unir las cucharas al eje del rodete, asegurándose de que estén correctamente alineadas y ajustadas. Este proceso se ilustra en la figura 21.

Figura 21

Turbina Pelton visualización en 3D



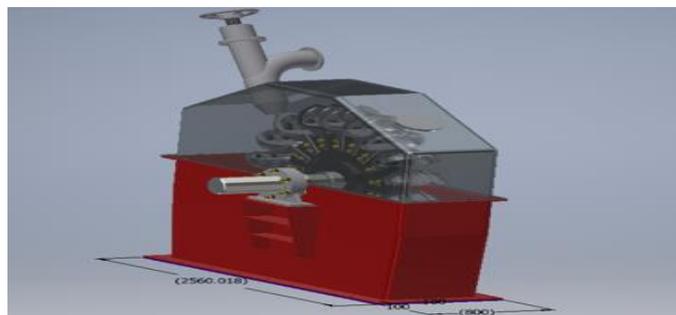
Fuente: *(Elaboración propia)*

4.2.25 Proceso Diseño de protección

Para diseñar el perfil básico de la protección, es necesario dibujar las formas y dimensiones generales, incluyendo las aberturas para la entrada y salida del agua, así como los puntos de montaje. Además, se añaden detalles y características adicionales, como refuerzos estructurales, superficies de guía del agua, soportes para los rodamientos, y cualquier otro elemento necesario. La visualización completa de la protección se muestra en la figura 22.

Figura 22

Protección de turbina Pelton 3D



Fuente: (*Elaboración propia*)

4.2.1 Diseño Hidráulico en 3D

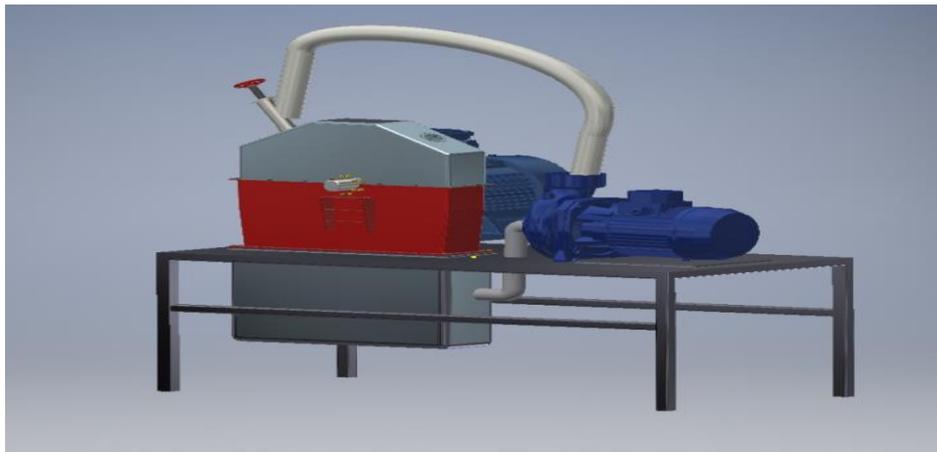
El diseño hidráulico en 3D requiere una consideración de los parámetros geométricos establecidos en la tabla 8. En este caso particular, el diseño se basa en una entrada de potencial hidráulico de 2.5 kW y una potencia de salida eléctrica de 1.5 kW, tal como se especifica en el dimensionamiento del diseño hidráulico de la mesa de pruebas representado en la figura 12.

4.2.2 Proceso de diseño hidráulico generatriz

Una vez que se han creado los diseños de cada componente individual con sus respectivas medidas, se procede a ensamblarlos en una sola pieza, obteniendo así el diseño hidráulico generatriz en 3D se puede evidenciar en la figura 23.

Figura 23

Diseño hidráulico generatriz



Fuente: (*Elaboración propia*)

4.2.3 Modificación de parámetros

La modificación de parámetros del sistema hidráulico se realiza para analizar cómo se

comporta el sistema bajo diferentes condiciones. Es decir que, al variar los parámetros de entrada dentro de un rango establecido, y evaluarlos con respecto a sus salidas genera una curva que indica el comportamiento del sistema. Para facilitar este proceso, se utiliza el software MATLAB, en donde se varían los parámetros de entrada dentro de un rango establecido tanto en la motobomba, la turbina y el generador. Estas permiten generar curvas de comportamiento y visualizarlos gráficamente. Los parámetros que se varían se encuentran registrados en la tabla 10

Tabla 10

Variación de parámetro de entrada

Parámetro	Variable	Valor Inicial	Valor Mínimo	Valor Máximo
Caudal	Q (m ³ /s)	1.83 L ³ /s	0.9 L ³ /s	1.83 L ³ /s
Potencia hidroeléctrica	P (kw)	2.5 kw	0.5 kw	10 kw
Velocidad de impacto	Vjet (m/s)	10 m/s	3.7 m/s	10.37 m/s
Diámetro de chorro	Dc (mm)	15 mm	15 mm	25 mm
Potencia eléctrica	P(kw)	1.5 kw	0.3 kw	6.1 kw
Diámetro de rodete	Dr (mm)	223 mm	223 mm	372 mm
Velocidad angular	W (Rad/s)	92.7 rad/s	20 rad/s	92.7 rad/s
Torque	T (N/m)	18 N/m	9.41 N/m	77.6 N/m

Los puntos de referencia se establecieron a partir de valores de los modelos de motobomba y generador anteriormente presentados y los valores del diseño previamente calculados.

Para las variaciones no se consideran explícitamente fenómenos anormales, vibraciones del rotor, o efectos no lineales en el flujo del agua, como turbulencias en el jet. Estos factores podrían introducir no linealidades en el sistema, pero no están representados en el modelo de

descrito en el documento.

4.2.4 Variaciones del caudal

La variación del caudal influye directamente en la velocidad del chorro (V_{jet}) y en la potencia hidráulica (P) generada. En este estudio, el caudal se estableció de acuerdo al modelo de motobomba elegido siendo este de 1.8 L/s, correspondiente al 100% de su capacidad máxima. Posteriormente, se redujo al 50%, es decir, a 0.9 L/s, con el objetivo de evaluar y comparar el impacto que esta disminución tiene sobre la potencia hidráulica producida.

4.2.5 Variaciones de la velocidad de impacto (V_{jet})

Está directamente relacionada con la eficiencia en la transferencia de energía al rodete. el valor de referencia está determinado por el diámetro del efecto Venturi, Se analizó la velocidad de salida del agua que impacta las cucharas de la turbina, con un rango de 3.7 m/s a 10.37 m/s, partiendo de un valor inicial de 10 m/s, de forma que cualquier variación en la velocidad se compara con la potencia hidráulica generada.

4.2.6 Variaciones del diámetro del rodete

Aunque este valor tiende a mantenerse constante, el diámetro del rodete está relacionado con la máxima eficiencia de conversión de energía del jet en rotación mecánica. La variación de este parámetro, se considera el diámetro con un rango de los 15 hasta un máximo de 25 mm para ver su influencia en la potencia generada.

4.2.7 Variación del torque

Un mayor torque produce una mayor fuerza de rotación en el rodete, mejorando la capacidad de generación. Se considera el torque con un rango de 18 N/m a 77.6 N/m, siendo 9.41 N/m el valor inicial. la variación en la velocidad angular hace que aumente o disminuya el

torque.

4.2.8 Variación de la velocidad del rodete

La velocidad angular se establecer en función de la máxima conversión de energía del jet en rotación incrementando las revoluciones por minuto en el transformador. Se considera la velocidad angular dentro de un rango que se encuentra entre los 92.7 hasta los 20 rad/s para observar el comportamiento que presenta la generación del transformador.

4.2.9 Variación en la Potencia hidráulica

El valor de referencia es la potencia nominal calculada a partir del caudal y la altura. Las variaciones de la potencia hidráulica se encuentran dentro de un rango entre los 0.5 y 10 kW, permitiendo analizar cómo la variación de incremento en caudal y altura aumenta significativamente la potencia hidráulica y, por tanto, la energía generada.

4.2.10 Modificación de parámetros de operación

La modificación de los parámetros operativos se realizó ajustando los valores de las variables de entrada a la motobomba (Q) este parámetro opera dentro de un rango de 0.9 hasta los 1.83 Lt/s estas modificaciones permiten evaluar su impacto en las salidas velocidad de impacto (V_{jet}) y potencia hidráulica (P). Como resultado, se generó una curva que muestra cómo las variaciones en los valores de entrada afectan a los resultados de salida. Cabe destacar que las gráficas obtenidas no muestran cambios bruscos en el comportamiento; por el contrario, se observa una respuesta lineal y estable dentro del rango de operación establecido.

4.2.11 Caudal Efectivo debido a Pérdidas de Fricción

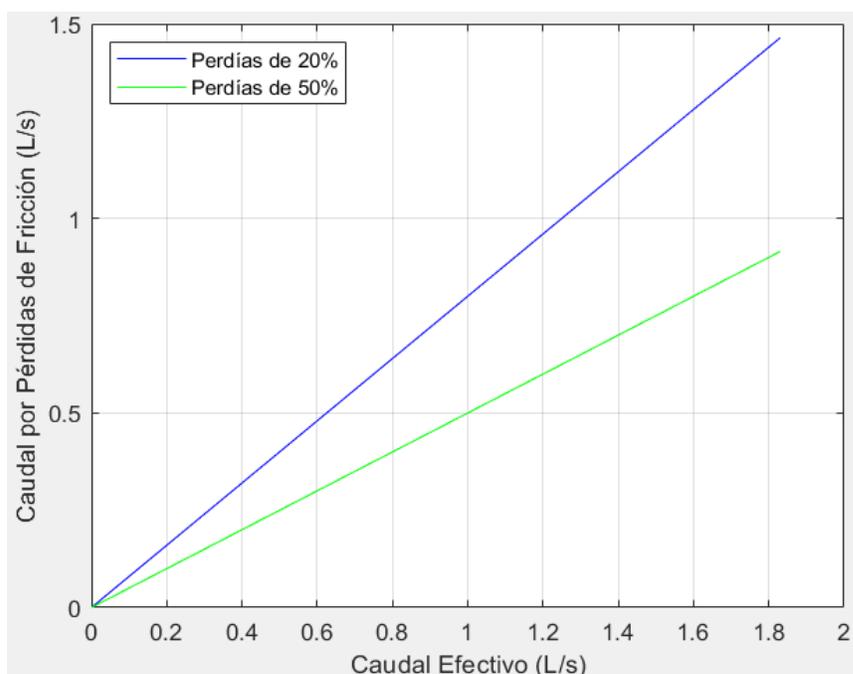
Para generar una potencia que se encuentre en el rango de los 0.5 y 10 kW, el caudal disponible, determinado previamente a través del modelo de motobomba seleccionado, es de (1.8 l/s) en condiciones ideales es decir en su 100% de su capacidad. Sin embargo, debido a las

pérdidas de fricción en las tuberías entre el agua y las paredes internas de la tubería, el caudal efectivo que ingresa a la turbina puede reducirse en un 20%. En este estudio se considera una reducción de hasta un 50% es decir un caudal mínimo de (0.9 l/s) para reflejar las pérdidas significativas que podrían ocurrir en un sistema real, donde la fricción puede ser incluso mayor.

De acuerdo a lo anteriormente se presenta la figura 24 que indica las pérdidas por fricción que representan las pérdidas de 20% y el 50% del caudal disponible.

Figura 24

Reducción del Caudal Efectivo debido a Pérdidas de Fricción



Fuente: *(Elaboración propia)*

A medida que la fricción consume parte de la energía hidráulica, el caudal disminuye, lo que implica una reducción en la cantidad de energía disponible para ser convertida en energía mecánica.

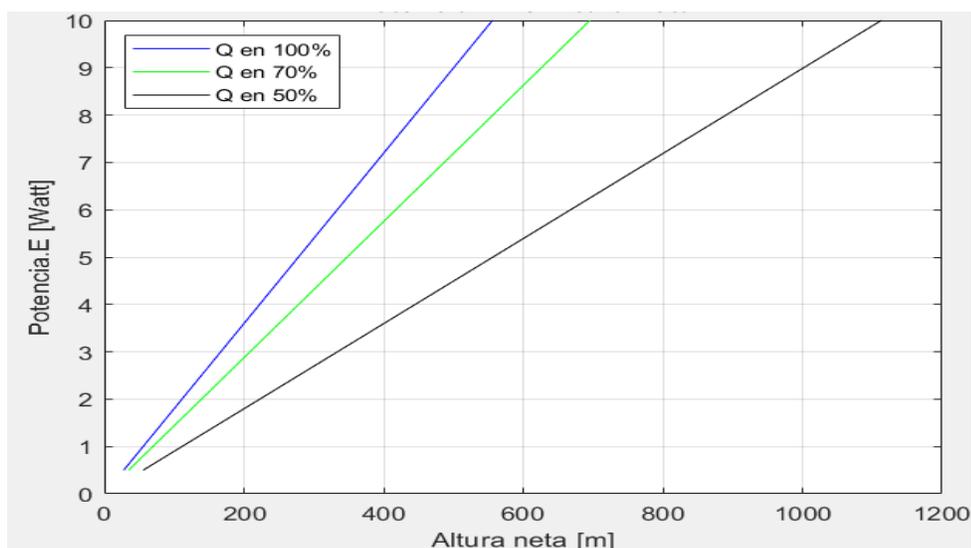
4.2.12 Relación entre la altura y la potencia hidráulica

Cuando el caudal se reduce al 50%, la potencia generada disminuye para una misma altura de caída, lo que implica que para alcanzar la potencia deseada de 10 kW será necesario incrementar el caudal o aumentar la altura de caída.

Este efecto puede observarse en la figura 25, donde se evidencia cómo las variaciones en el caudal afectan directamente la potencia hidráulica alcanzada.

Figura 25

Potencia hidráulica vs altura neta



Fuente: *(Elaboración propia)*

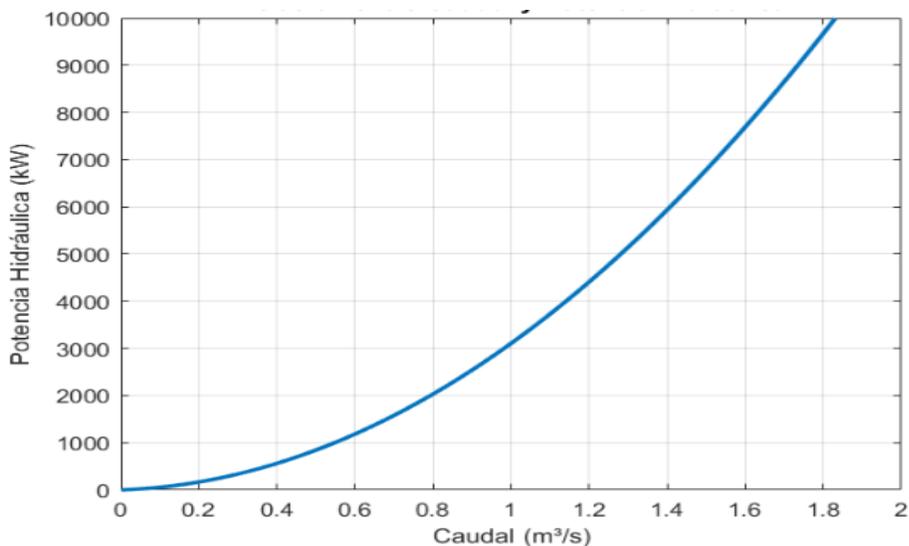
Se observa que, para un caudal al 100% de su capacidad (1.8 L/s), se requiere una altura neta de algo más de 500 metros para generar aproximadamente 10 kW de potencia. Asimismo, para alcanzar una potencia de 0.5 kW en estas condiciones, la altura necesaria no supera los 100 metros. Sin embargo, cuando el caudal se reduce al 50% (0.9 L/s), la altura requerida para lograr 10 kW aumenta considerablemente, superando los 1000 metros. Sin embargo, para generar 0.5 kW con este caudal reducido, la altura aun no superar los 100 metros.

4.2.13 Relación entre el caudal y la potencia hidráulica

El caudal impacta directamente la potencia hidráulica generada. Un caudal más bajo implica que la potencia también disminuye considerablemente. Es decir que, está relacionada directamente. Para determinar la curva de comportamiento mediante el caudal disponible de motobomba que en su 100% es de 1.8 l/s y el rango de generación de potencia hidráulica se encuentra entre los 5 y 10 kW, se presenta la relación entre el caudal y la potencia hidráulica generada en la Figura 26.

Figura 26

Potencia hidráulica (P) vs Caudal (H)



Fuente: *(Elaboración propia)*

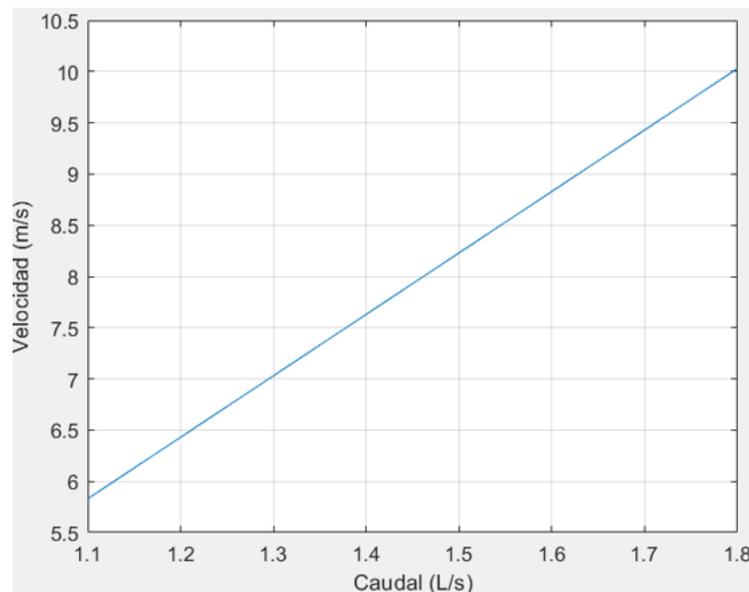
Cabe resaltar que los valores determinados están acordes con el diseño y los datos planteados. Además, se puede apreciar que a medida que el caudal disminuye, este genera menos potencia hidráulica tal como se mencionó anteriormente.

4.2.14 Relación entre el caudal y la velocidad de salida

A medida que el caudal aumenta, también lo hace la velocidad de salida del agua. Esta relación es coherente con la dinámica de flujo en un sistema de motobomba, donde un mayor caudal impulsa el agua a través de la tubería con mayor velocidad, siempre que se mantengan constantes otros factores como el diámetro de la tubería esta relación se evidencia en la figura 27. el rango de caudal se encuentra entre los 0.9 y 1.8 Lt/s

Figura 27

Relación entre el caudal vs velocidad de impacto



Se puede observar que Para un caudal cercano a 0.9 L/s, la velocidad aproximadamente se encuentra en 5.5 m/s. A medida que el caudal se incrementa hasta 1.8 L/s, la velocidad aumenta de manera lineal hasta aproximadamente 10 m/s.

4.2.15 Modificación de parámetros físicos

La modificación de los parámetros físicos se realizó ajustando los valores de las variables de entrada de la turbina, como la velocidad del chorro (V_{jet}) y la potencia (P). Estos parámetros

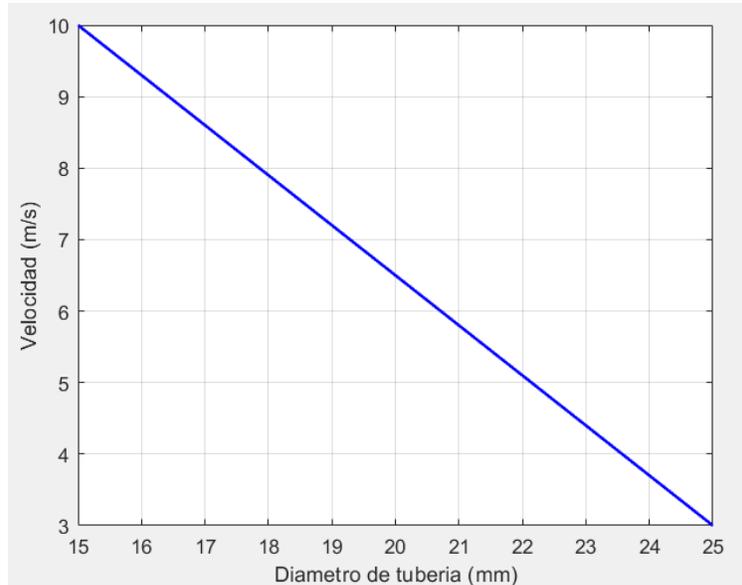
operan en rangos de 3 a 10.7 m/s para (V_{jet}) y de 0.5 a 10 kW para (P). Estas modificaciones permiten analizar su impacto en las variables de salida, como la velocidad angular (W) y el torque (T). Como resultado, se generó una curva que muestra cómo las variaciones en los valores de entrada afectan a los resultados de salida. Cabe destacar que las gráficas obtenidas no muestran cambios bruscos en el comportamiento; por el contrario, se observa una respuesta lineal y estable ante las variaciones, sin perturbaciones significativas en los resultados.

4.2.16 Relación entre velocidad de impacto vs diámetro de tubería

La velocidad del fluido (V_{jet}) depende tanto del caudal, como el diámetro de la tubería. Para determinar la curva de comportamiento. Mediante el estudio se determinó que a medida que el diámetro de tubería es mayor la velocidad de impacto disminuye, mientras que, a menor diámetro aumenta su velocidad. Este comportamiento es importante ya que la velocidad de impacto determina la velocidad en el rodete influyendo en la potencia mecánica lo anteriormente descrito se puede visualizar a través de las figuras 28.

Figura 28

Velocidad de impacto vs Diámetro de tubería



Fuente: *(Elaboración propia)*

Se puede observar que, Para un diámetro cercano a 15 mm, la velocidad aproximadamente se encuentra en 10 m/s. A medida que el diámetro se incrementa hasta 25mm, la velocidad disminuye de manera lineal hasta aproximadamente 3 m/s.

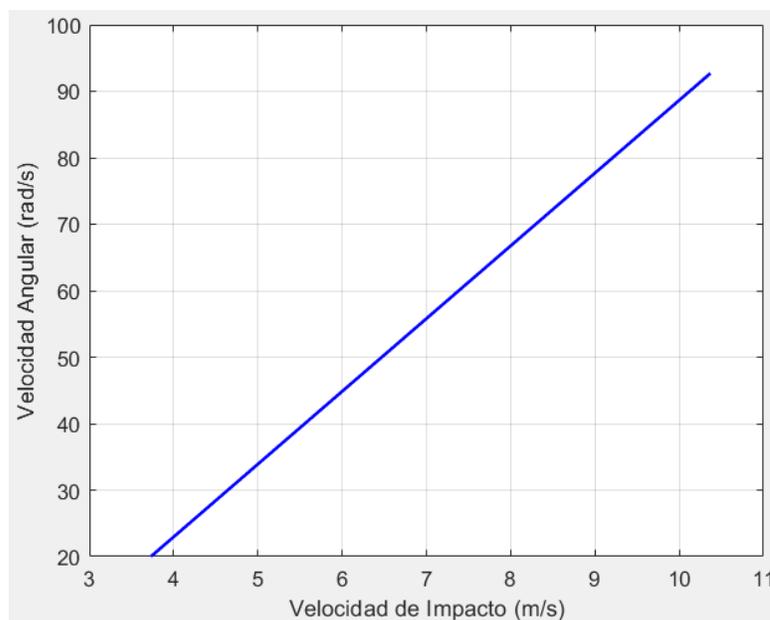
4.2.1 Relación entre velocidad de impacto vs la velocidad en el rodete

La velocidad en el rodete (w), depende de la velocidad de salida de impacto (V_{jet}). Es decir que, a menor velocidad de impacto, menor será la velocidad del rodete y viceversa.

Otro factor que se debe considerar es el radio del rodete, el cual se encuentra dentro de un rango de 223 a los 282 mm determinados mediante fórmulas matemáticas presentadas anteriormente. La relación entre la velocidad de impacto y la velocidad rodete en el rodete se evidencia en la figura 29.

Figura 29

Velocidad en rodete (W) vs Velocidad de impacto (V_{jet})

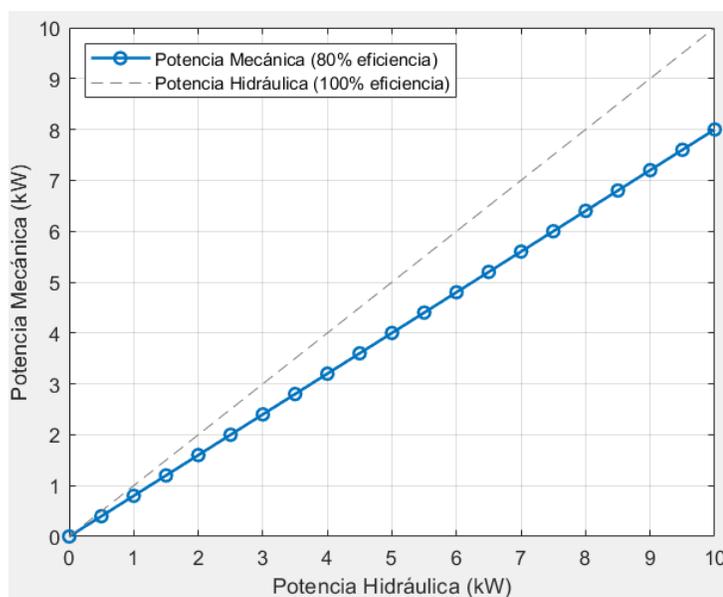


Fuente: *(Elaboración propia)*

Se observa que para alcanzar una velocidad angular de aproximadamente 20 rad/s, se requiere una velocidad de impacto cercana a 3.7 m/s. A medida que la velocidad angular aumenta, superando los 90 rad/s, la velocidad de impacto también incrementa de manera lineal, llegando hasta aproximadamente 10 m/s. Este comportamiento es crucial en el sistema hidroeléctrico, ya que la velocidad de impacto determina la cantidad de energía cinética que el flujo de agua transfiere a la turbina. A mayor velocidad de impacto, mayor es la capacidad de la turbina para generar potencia mecánica.

4.2.2 Relación entre la Potencia hidráulica vs potencia mecánica

La potencia mecánica (P_m) generada por la turbina depende directamente de la potencia hidráulica (P) disponible en el flujo de agua. Esta relación implica que, a medida que disminuye la potencia hidráulica suministrada, la potencia mecánica que la turbina puede entregar al generador también disminuye. Por el contrario, un aumento en la potencia hidráulica permite que la turbina genere una mayor potencia mecánica esta relación se evidencia en la figura 30.

Figura 30*Potencia hidráulica vs potencia mecánica*Fuente: *(Elaboración propia)*

La potencia hidráulica (P) se encuentra entre los 0.5 a 10 kW, lo que permite analizar el rendimiento del sistema bajo estas condiciones de entrada. La eficiencia de la turbina es de 80%, lo que significa que solo una parte de la potencia hidráulica se convierte en potencia mecánica (P_m), debido a las pérdidas en la turbina, no toda la energía del agua se convierte en energía mecánica. Parte de esta energía se pierde debido a la fricción entre el agua y las palas de la turbina.

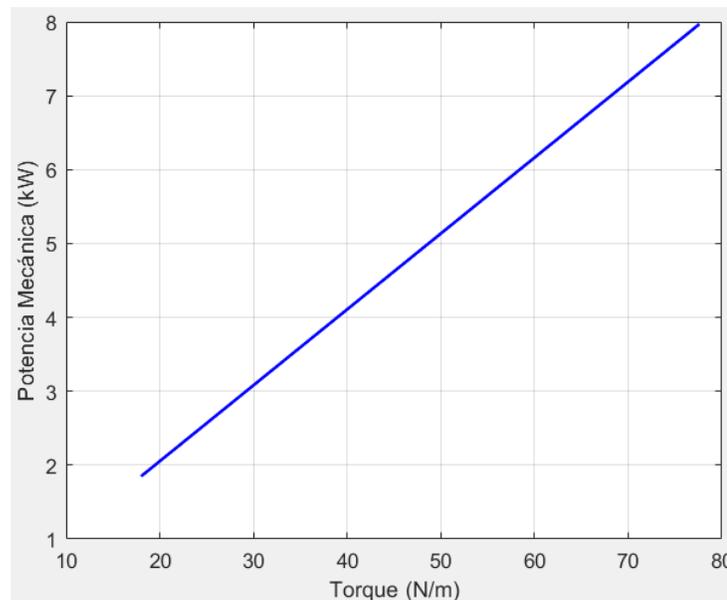
Además, se incluye una línea discontinua que representa un caso ideal con una eficiencia del 100%, en el cual la potencia mecánica sería igual a la potencia hidráulica. Esta comparación permite visualizar el impacto de la eficiencia en el sistema y cómo esta limita la generación de potencia mecánica en condiciones reales.

4.2.3 Torque vs potencia mecánica

El torque (T) tiene una relación directa con el aumento de la potencia mecánica disponible. A través del estudio, se observa que a medida que el torque incrementa, la potencia mecánica también crece de manera lineal. Este comportamiento es consistente en el rango operativo del torque, comprendido entre 9.41 y 77.6 N·m. De acuerdo con las ecuaciones previamente presentadas, la potencia mecánica es proporcional al torque, lo que se refleja claramente en la figura 31.

Figura 31

Torque vs potencia mecánica



Fuente: *(Elaboración propia)*

Se observa que cuando el torque es bajo (9 N·m), la potencia mecánica también es reducida. Sin embargo, a medida que el torque incrementa hasta el valor máximo considerado en el análisis (77.6 N·m), la potencia mecánica aumenta de forma proporcional, alcanzando un máximo de 8 kW.

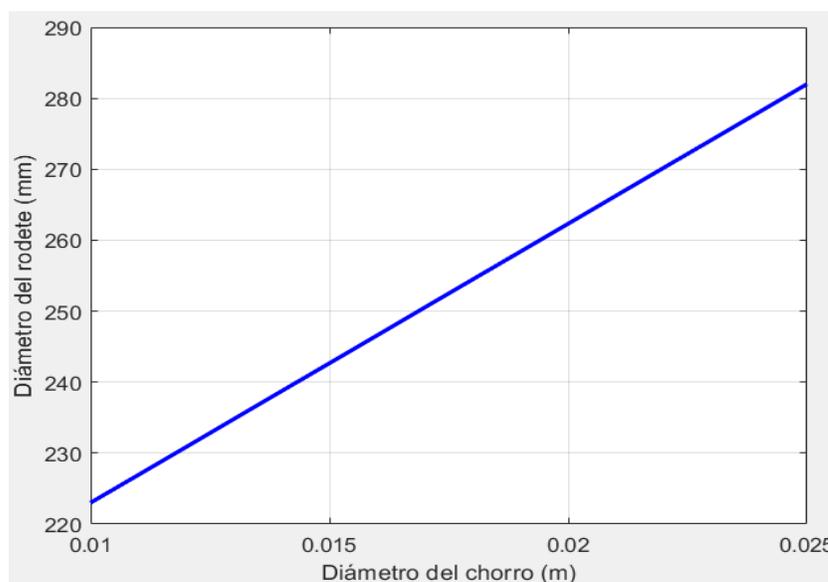
4.2.4 Modificación de parámetros geométricos

La modificación de los parámetros geométricos se llevó a cabo ajustando los valores de las variables de entrada de la turbina, como la velocidad del chorro (V_{jet}) y la potencia (P). Estos parámetros operan dentro de los rangos de 3 a 10.7 m/s para (V_{jet}) y de 0.5 a 10 kW para (P). Estas modificaciones determinan las dimensiones de la cuchara como el largo, ancho y profundidad (BL , B , Bd). Como resultado, se generó una curva que muestra cómo las variaciones en los valores de entrada afectan a las variables de salida. Cabe destacar que las gráficas obtenidas no muestran cambios bruscos en el comportamiento; por el contrario, se observa una respuesta lineal dentro del rango de operación establecido.

Para la modificación de los parámetros geométricos se tiene en cuenta. Las pérdidas en la turbina, causadas por las colisiones entre el chorro y las características geométricas del rodete y cucharas, Estas colisiones limitan la cantidad de energía mecánica transferida al generador. Disminuyendo la velocidad de impacto del chorro de agua, como también la energía que se transmite hacia el rodete y cucharas.

4.2.5 Relación entre el diámetro del chorro vs diámetro del rodete

La relación entre el diámetro del chorro (D_c) y el diámetro del rodete (D_r) es fundamental para la transferencia eficiente de energía del flujo de agua hacia el rodete. En una turbina Pelton, el chorro de agua impacta directamente en las cucharas del rodete, y el tamaño relativo del chorro respecto al rodete determina la cantidad de energía que puede convertirse en energía mecánica. Si el chorro es demasiado pequeño en comparación con el rodete, no aprovechará completamente la superficie de las cucharas, reduciendo la eficiencia. Por otro lado, un chorro excesivamente grande puede generar dispersión y pérdidas significativas de energía. Esta relación se ilustra en la figura 32, donde se analiza su impacto en el rendimiento del sistema.

Figura 32*Diámetro chorro vs Diámetro rodete*Fuente: *(Elaboración propia)*

A partir de la curva de comportamiento, se observa que cuando el diámetro del chorro es aproximadamente de 0.01 m, el diámetro del rodete se encuentra cercano a los 220 mm. A medida que el diámetro del chorro aumenta, el diámetro del rodete también incrementa proporcionalmente. Esto indica una relación directamente proporcional entre ambos diámetros, lo que resalta la importancia de dimensionarlos de manera equilibrada para la transferencia de energía en el sistema.

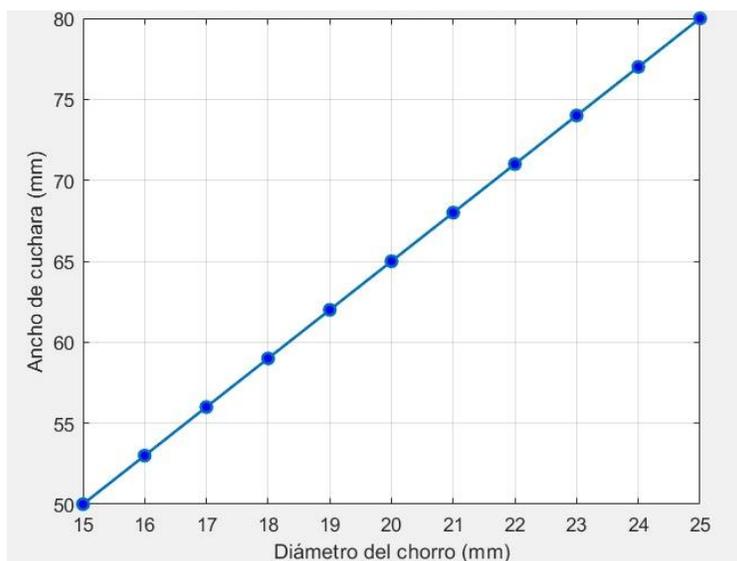
4.2.1 Relación entre el diámetro del chorro vs dimensionamiento de cucharas

La relación entre el diámetro del chorro y el dimensionamiento de las cucharas influye directamente en la transferencia de energía. Un chorro demasiado pequeño, en comparación con el ancho y la profundidad de las cucharas, no aprovecharía toda la superficie de impacto, lo que disminuiría la eficiencia. Por el contrario, un chorro excesivamente grande podría causar

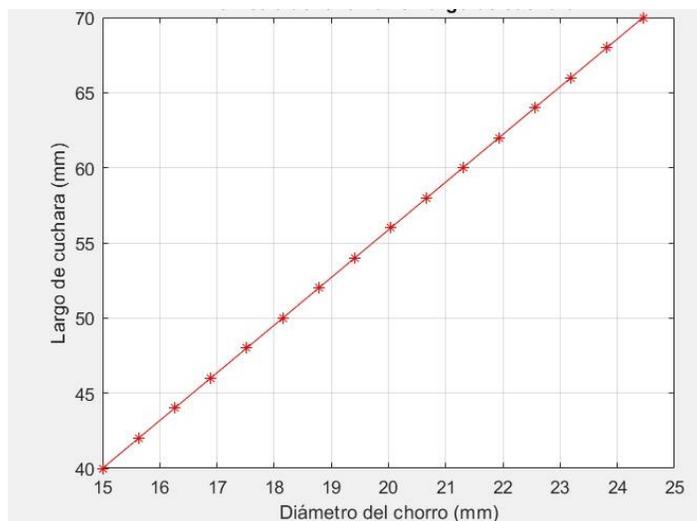
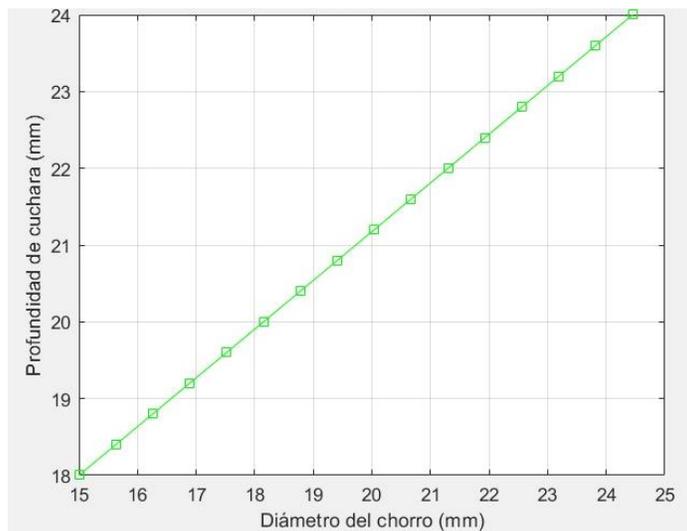
salpicaduras y pérdidas significativas de energía. Lograr un equilibrio adecuado es fundamental, como se ilustra en las figuras 33, 34 y 35, donde se analiza cómo el diámetro del chorro afecta las dimensiones de las cucharas. En este análisis, el diámetro del chorro se considera constante dentro del rango de 15 a 20 mm.

Figura 33

Diámetro chorro vs Ancho de cuchara



Fuente: *(Elaboración propia)*

Figura 34*Diámetro chorro vs Largo cuchara*Fuente: *(Elaboración propia)***Figura 35***Diámetro del chorro vs Profundidad cuchara*Fuente: *(Elaboración propia)*

Se puede observar que, a medida que aumenta el diámetro del chorro, también

incrementan las dimensiones de la cuchara. El comportamiento del diámetro del chorro en relación con el largo, ancho y profundidad de la cuchara es consistente en todos los casos. Por ejemplo, para alcanzar aproximadamente un largo de 58 mm, un ancho de 67 mm y una profundidad de 24 mm, se requiere un diámetro de chorro cercano a 20 mm. Este comportamiento es fundamental, ya que define el dimensionamiento óptimo de la cuchara para maximizar la eficiencia en la transferencia de energía.

4.2.2 Modificación de parámetros de transformación de energías

La modificación de los parámetros relacionados con la transformación de energía se realizó ajustando los valores de las variables de entrada de la turbina, como la velocidad angular (ω) y el torque (T). Estos parámetros operan en rangos de 20 a 92.7 rad/s para (ω) y de 18 a 77 N·m para (T). Estas modificaciones permiten determinar la cantidad de energía eléctrica producida por el generador, evaluándose en función de las variables de salida: potencia eléctrica (P_s), corriente (I) y voltaje (V). Como resultado, se generó una curva que ilustra cómo las variaciones en las condiciones de entrada afectan los resultados en las salidas. Cabe destacar que las gráficas obtenidas no muestran cambios bruscos en el comportamiento; por el contrario, se observa una respuesta lineal y estable dentro del rango de operación definido.

Para la modificación de los parámetros de transformación de energías se tiene en cuenta. Las pérdidas del generador, evidenciadas en los anteriores capítulos de este documento causadas, por, el calor o por la resistencia del cobre en los devanados del rotor. Estas pérdidas limitan la cantidad de potencia mecánica transmitida al generador produciendo menor potencia eléctrica en el generador.

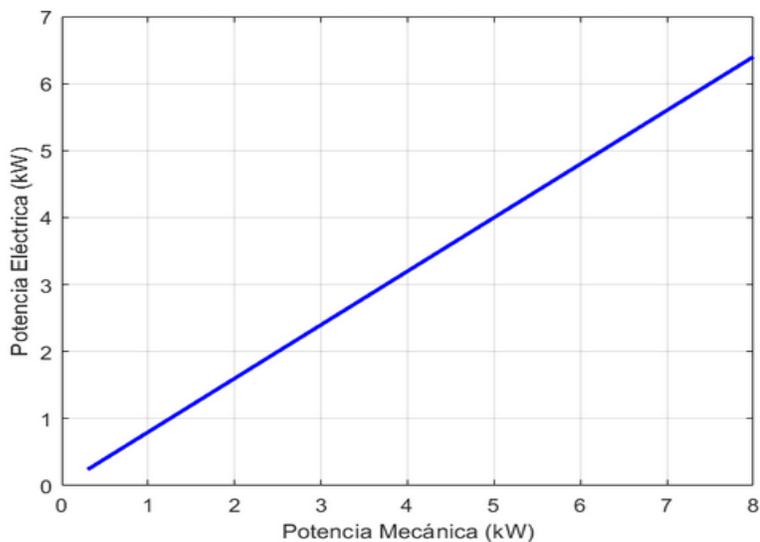
4.2.3 Relación entre la potencia eléctrica vs potencia mecánica

La relación entre las potencias, basada en los antecedentes y las ecuaciones matemáticas

previamente presentadas, muestra que, a medida que aumenta la potencia mecánica, también lo hace la potencia eléctrica debido a la dependencia directa entre ambas. Este comportamiento es similar en caso de una disminución: si una de las potencias se reduce, la otra también lo hace. Sin embargo, este proceso no es completamente eficiente, ya que el generador presenta pérdidas aproximadas del 20%. Esto implica que solo el 80% de la potencia mecánica se convierte en potencia eléctrica utilizable. En la Figura 36 se ilustra esta relación, donde el generador opera con una potencia mecánica constante dentro del rango de 0.3 a 8 kW, evidenciando claramente la dependencia y las pérdidas del sistema.

Figura 36

Relación entre la potencia eléctrica vs potencia mecánica



Fuente: *(Elaboración propia)*

La potencia eléctrica (P_s) oscila aproximadamente entre 0.2 y 6 kW, lo que permite evaluar la eficiencia del generador. Este convierte alrededor del 80% de la potencia mecánica (P_m) en potencia eléctrica, mientras que el 20% restante se pierde debido a las características intrínsecas del generador, como pérdidas por fricción, calor y resistencia eléctrica, lo que impide

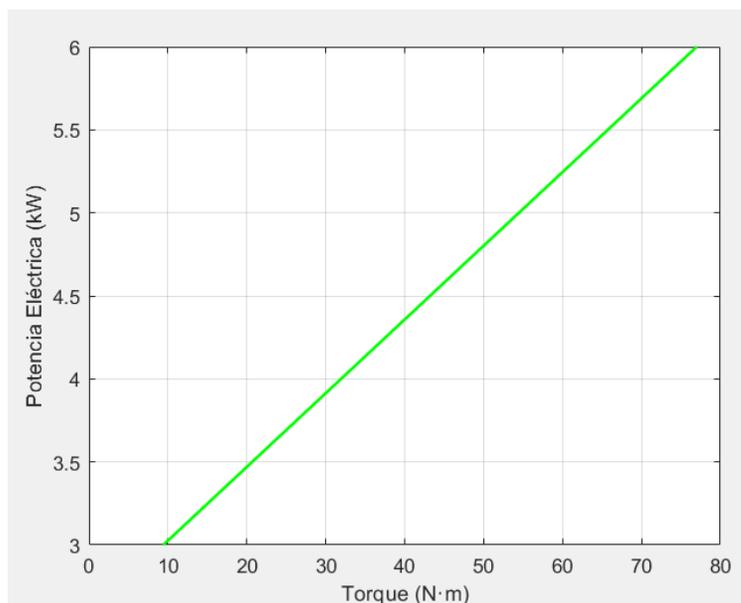
aprovechar completamente la energía disponible.

4.2.4 Relación entre el torque y la potencia eléctrica

La relación que tiene el torque con la potencia es proporcionalmente directa, lo que resultará en una mayor potencia mecánica transmitida al generador, por consecuencia la potencia eléctrica también incrementará. La relación de lo anterior se representa en la figura 37.

Figura 37

Torque vs Potencia eléctrica



Fuente: (*Elaboración propia*)

Se observa que para alcanzar una potencia eléctrica de aproximadamente 0.3 kW, se requiere un torque cercano a los 9.41 N/m. A medida que la potencia aumenta, superando los 6 kW, el torque también incrementa de manera lineal, llegando hasta aproximadamente 77.6 N/m. Este comportamiento es crucial en el sistema hidroeléctrico, ya que el torque determina la cantidad de energía que se transfiere a el generador.

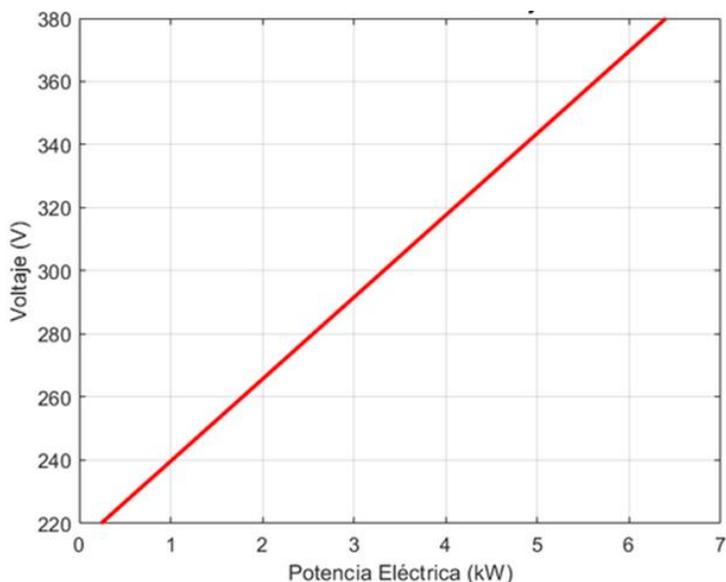
4.2.5 Potencia eléctrica vs Voltaje

La potencia eléctrica (kW) generada por la turbina depende directamente de la energía hidráulica convertida en energía mecánica a través del rodete y luego en energía eléctrica por el generador. El voltaje, por su parte, es un parámetro eléctrico que refleja la fuerza electromotriz generada en función de la carga y el diseño del generador.

La relación es lineal, lo que indica que a medida que aumenta la potencia eléctrica, también lo hace el voltaje. Donde el generador opera con una potencia eléctrica constante dentro del rango, entre los 0.3 hasta los 6.1 kW. La relación de lo anterior se evidencia en la figura 38.

Figura 38

Relación entre el voltaje y la potencia eléctrica



Fuente: *(Elaboración propia)*

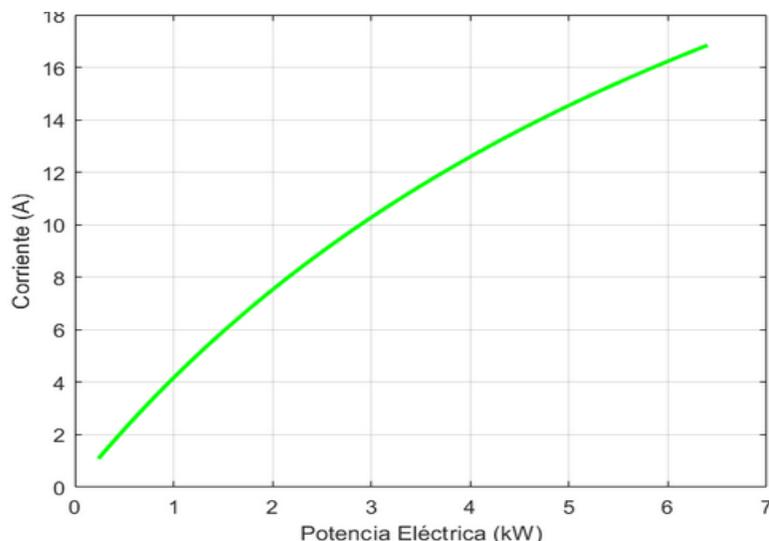
4.2.6 Relación entre la Potencia eléctrica vs corriente

Se evidencia que conforme aumenta la potencia eléctrica generada (kW), la corriente también incrementa a medida que la turbina trabaja para generar más potencia eléctrica. Esto provoca un mayor flujo de corriente para satisfacer la demanda de potencia.

La relación es lineal, lo que indica que a medida que aumenta la potencia eléctrica, también lo hace la corriente. Donde el generador opera con una potencia eléctrica constante dentro del rango, entre los 0.3 hasta los 6.1 kW. Este efecto es visible en la figura 39.

Figura 39

Relación entre la potencia vs la corriente en generador



4.2.7 Análisis obtenidos de los resultados de las variaciones

En este apartado se analizan los resultados obtenidos tras evaluar las curvas de comportamiento, destacando el impacto de la velocidad del chorro (V_{jet}) y la potencia hidráulica en el desempeño del sistema. Además, se examina la relación directa entre el torque y la velocidad angular con la generación de potencia eléctrica. Los resultados indican que la optimización de estos parámetros conduce a un aumento significativo en la capacidad de generación del sistema. A continuación, se presenta la tabla 11, que resume los resultados obtenidos a partir de las variaciones analizadas.

Tabla 11*Observaciones de las variaciones obtenidas*

Parámetro	Resultado	Observación
Caudal (Q)	Variación del caudal afecta directamente la velocidad del jet y la potencia hidráulica generada.	Un mayor caudal incrementa la potencia y la velocidad del jet, mejorando la conversión de energía
Velocidad del jet (V _{jet})	La velocidad del jet varía en función del caudal y el diámetro del inyector.	Un aumento en la velocidad del jet mejora la eficiencia del impacto en el rodete, incrementando la potencia.
Torque (T)	El torque se incrementa de forma lineal a medida que aumentan el caudal y la velocidad angular.	Un mayor torque produce una mayor fuerza de rotación en el rodete, mejorando la capacidad de generación.
Velocidad angular (ω)	La velocidad angular se incrementa conforme el caudal y el torque aumentan.	Aumentar la velocidad angular favorece la rotación del rodete, incrementando las revoluciones por minuto (RPM).
Potencia hidráulica	La potencia hidráulica generada varía directamente con el caudal y la altura.	Un incremento en caudal y altura aumenta significativamente la potencia hidráulica y, por tanto, la energía generada.
Potencia eléctrica	La potencia eléctrica generada es aproximadamente 2.2 kW, incrementa con el torque y la velocidad del generador.	Un incremento en el torque y la velocidad del generador incrementa la potencia eléctrica producida.

4.3 Diseño de sistema hidráulico a simular

En este apartado se describen los parámetros de diseño hidráulico que se emplean para la simulación en MATLAB Simulink. Este diseño se fundamenta en datos clave definidos en el apartado 4.2.5 Esquema de diseño hidráulico guía, derivados de los modelos de motobomba y generador seleccionados.

El proceso de selección de parámetros se encuentra documentado en los apartados 4.2.1 hasta el 4.2.20, donde se analizan las relaciones entre los diferentes parámetros y su influencia en el rendimiento del sistema. Esto asegura una coherencia integral entre los componentes del modelo, permitiendo una simulación precisa y representativa de las condiciones reales del sistema hidráulico. Los parámetros, utilizados para la simulación, se presentan de forma organizada en la tabla 12 (donde se muestra modelo de diseño hidráulico).

Tabla 12

Parámetros utilizados para la simulación

Parámetros de operación		
Caudal	0.9	1.83 L ³ /s
Altura	27	278m
Potencia hidroeléctrica	0.5	5 kW
Parámetros físicos		
Velocidad salida bomba	3	10 m/s
Velocidad de impacto	10	3 m/s
Velocidad en rodete	20	92.7 rad/s
Parámetros geométricos		
Diámetro de chorro	15	25 mm
Diámetro de rodete	223	223 mm

Ancho de cuchara	50	50
Profundidad de cuchara	8	8
Largo de cuchara	40	40
Parámetros de transformación de energías		
Potencia hidráulica	1.2	2.5 KW
Potencia mecánica	1	1.8 kW
Potencia eléctrica	0.8	1.6 kW
Torque	9.41	19 N/m
Valor	Mínimo	Máximo

En la tabla se aprecia que algunos parámetros geométricos permanecen constantes, ya que el análisis se realiza utilizando un único modelo de turbina Pelton con las características especificadas en la tabla 12. El modelo de simulación se ha diseñado para evaluar el comportamiento bajo condiciones ideales. Esto implica que las ecuaciones utilizadas están idealizadas, lo que conduce a resultados lineales en las gráficas.

4.3.1 Simulación del diseño hidráulico con turbina Pelton en MATLAB

SIMULINK

Para simular el diseño hidráulico con una turbina Pelton en MATLAB Simulink, se crean 3 bloques que componen el proceso de distintas fases, la función de cada uno de estos bloques se explica a continuación:

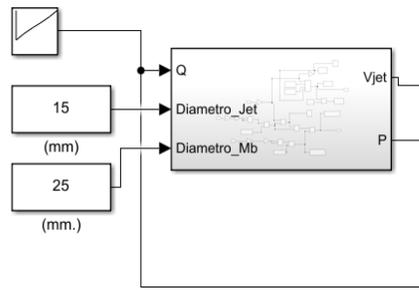
Primero Bloque Este bloque aplica ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos para determinar la potencia y velocidad del jet (V_{jet}), mediante las relaciones entre la energía cinética del agua y su conversión en energía potencial.

Para determinar (P) y (V_{jet}), se introducen los valores para el funcionamiento del sistema hidráulico. Estos incluyen el valor del caudal 1.8 lt/s (Q), el diámetro del jet 15 mm (D_{jet}) y el

diámetro de la motobomba 25 mm (Mb). Tal como se indica en la figura 40.

Figura 40

Primer bloque

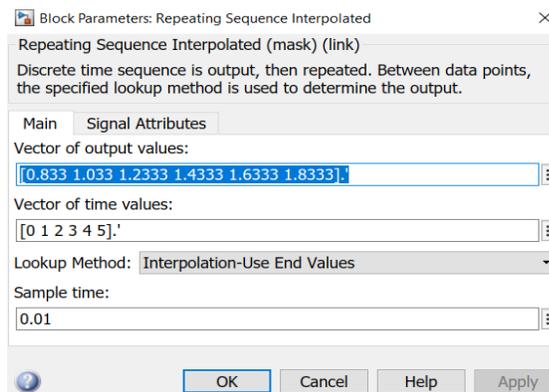


Fuente: *(Elaboración propia)*

Para el nivel del caudal se incrementa los valores en cada instante de tiempo observando el comportamiento que presenta el diseño hidráulico el valor de caudal se encuentra en el rango de los 0.833 y 0.1833 m³/s tal como se evidencia en la figura 41.

Figura 41

Rango de variación de caudal

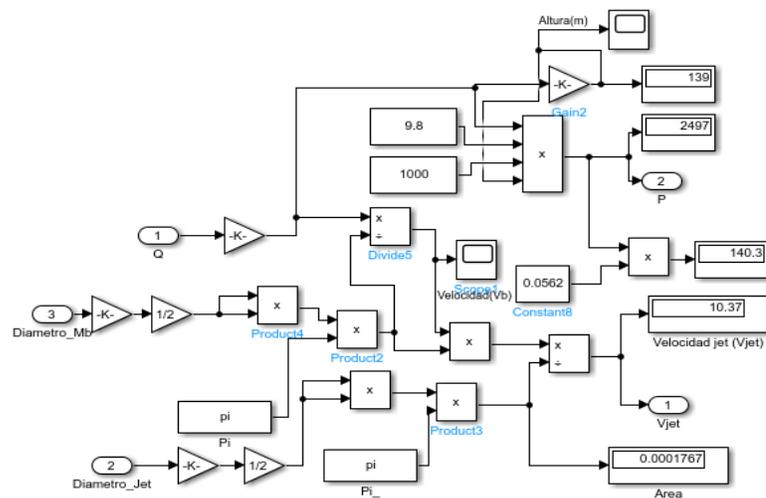


Fuente: *(Elaboración propia)*

Internamente El bloque realiza cálculos con estos parámetros para determinar la potencia mecánica producida y la velocidad del jet (V_{jet}) lo anterior se indica en la figura 42.

Figura 42

Primer bloque internamente

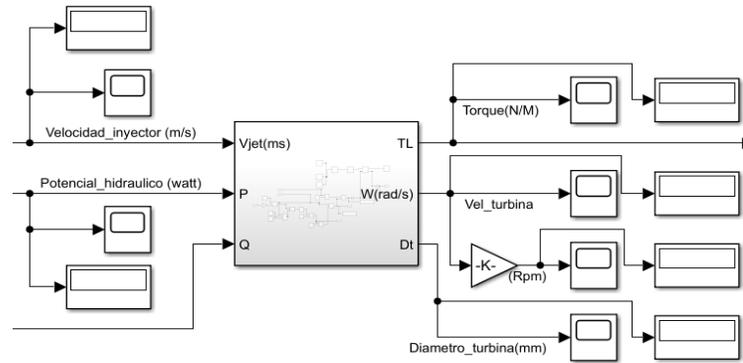


Fuente: (Elaboración propia)

Segundo Bloque permite determinar el cálculo del Torque, Velocidad Angular y diámetro de la turbina, toma como entradas el caudal (Q), la potencia mecánica (P) y la velocidad del jet (V_{jet}) obtenidas en el bloque anterior. Con esta información, se calculan parámetros críticos como el torque (T), la velocidad angular (ω) del rodete, y el radio (R_t) adecuado del rodete lo anterior se evidencia en la figura 43.

Figura 43

Segundo bloque



Fuente: *(Elaboración propia)*

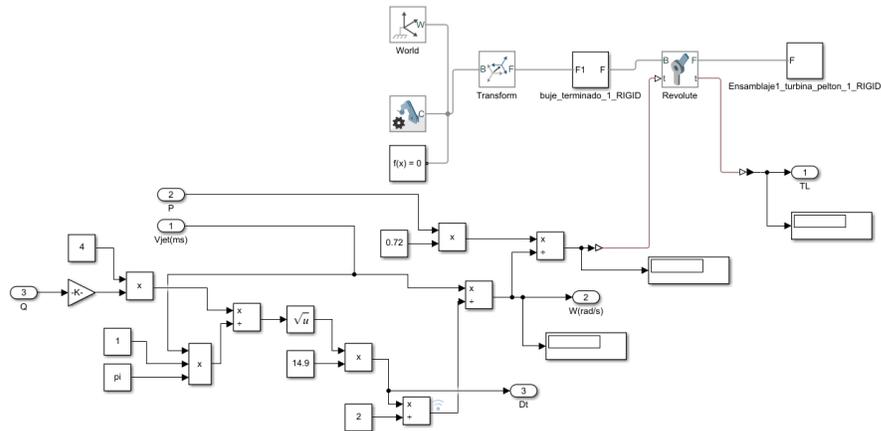
Este bloque utiliza modelos matemáticos que consideran la dinámica rotacional y la transferencia de energía desde el jet hacia las cucharas de la turbina, permitiendo obtener los valores de torque y velocidad angular que se requerirán para las siguientes etapas de la simulación.

Para simular la turbina tipo Pelton y poder observar el comportamiento, se exportan los archivos CAD realizados en SolidWorks con las dimensiones presentadas en capítulos 4.2.22 y 4.2.23 donde se explican de donde se obtiene el diámetro de rodete y las dimensiones de cucharas, los archivos se exportan hacia MATLAB. Para ello se utiliza el complemento Simscape Multibody Link el cual permite exportar modelos 3D de SolidWorks directamente a MATLAB.

Para importar el modelo, se utiliza el comando “smimport ('nombre_archivo.xml)”. Este comando lee el archivo y generará archivo en formato XML con el modelo en el entorno de Simscape Multibody, en el cual se puede visualizar en la figura 44 y 45 respectivamente.

Figura 44

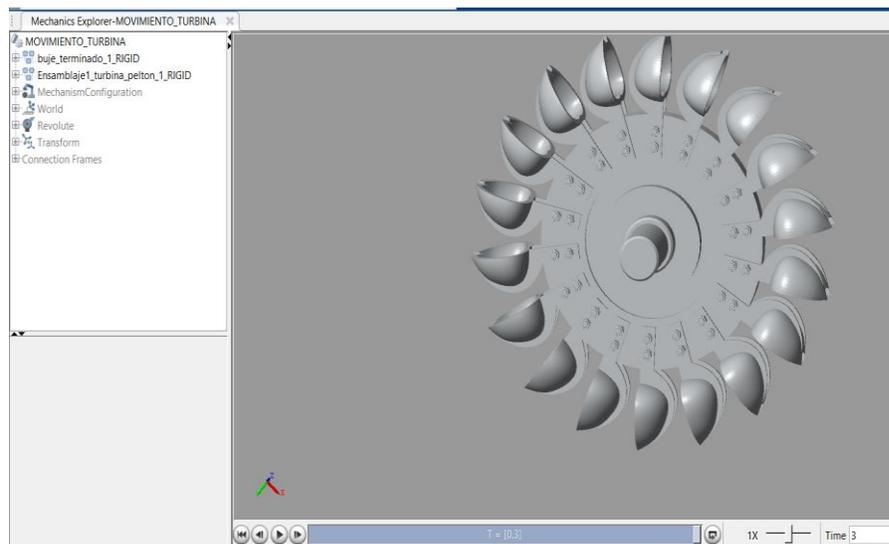
Diagrama de segundo bloque internamente



Fuente: (Elaboración propia)

Figura 45

Exploración mecánica del diseño en Matlab



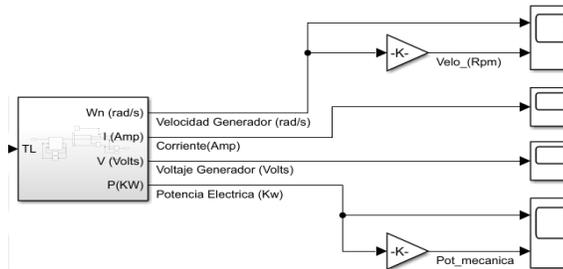
Fuente: (Elaboración propia)

Tercero Bloque de Diseño del Generador: está diseñado para simular el comportamiento del generador eléctrico acoplado a la turbina. Aquí, el torque (T) calculado anteriormente se usa como entrada. El bloque genera como salidas la velocidad del generador (W_n), corriente (I),

voltaje (V), y potencia (P) producida por el generador tal como se observa e la figura 46.

Figura 46

Tercer bloque



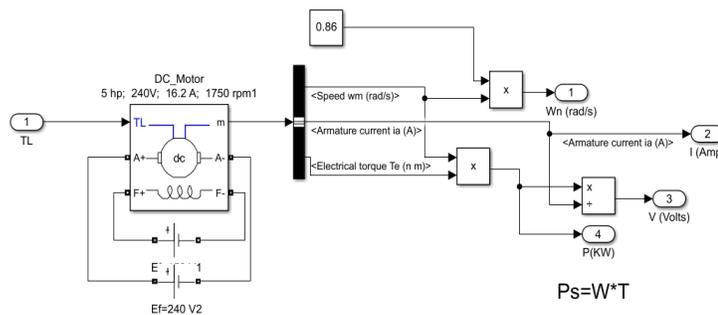
Fuente: *(Elaboración propia)*

Este bloque cierra el ciclo de simulación, proporcionando una visión completa del desempeño de la turbina y su interacción con el sistema generador, lo que permite evaluar la eficiencia global del diseño bajo diferentes condiciones operativas.

En la figura 47 se indica la incorporación del generador donde nos representa tanto la velocidad como la potencia producida esto es lo que compone al bloque interno del segundo bloque

Figura 47

Diagrama de bloque generador



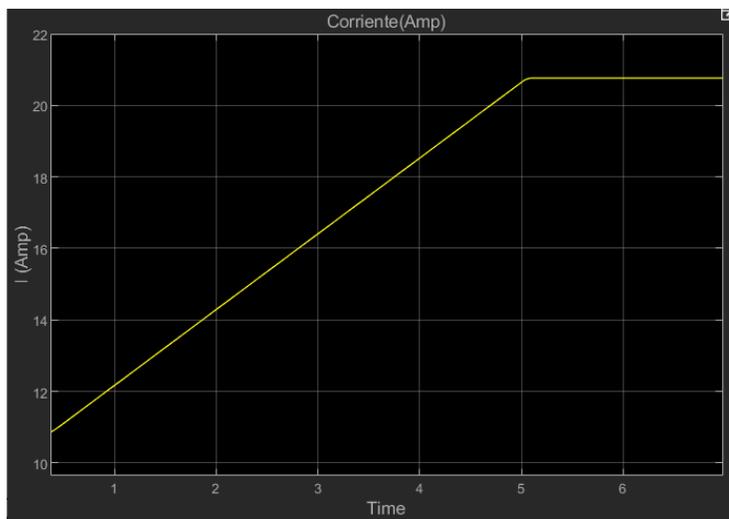
Fuente: *(Elaboración propia)*

En el tercer bloque, el torque (T) generado por la turbina impulsa el generador, lo que produce una corriente eléctrica (I). La gráfica de corriente muestra cómo varía la corriente eléctrica producida por el generador a lo largo del tiempo.

La figura 48 muestra cómo la corriente generada varía en un rango de 11 a 22 amperios a lo largo del tiempo. Sin embargo, si el tiempo sigue continuo su valor máximo y mínimo de amperaje siempre se mantiene dentro de este intervalo, por las condiciones de entrada (Torque) y salida (Corriente), también debido a las características del generador.

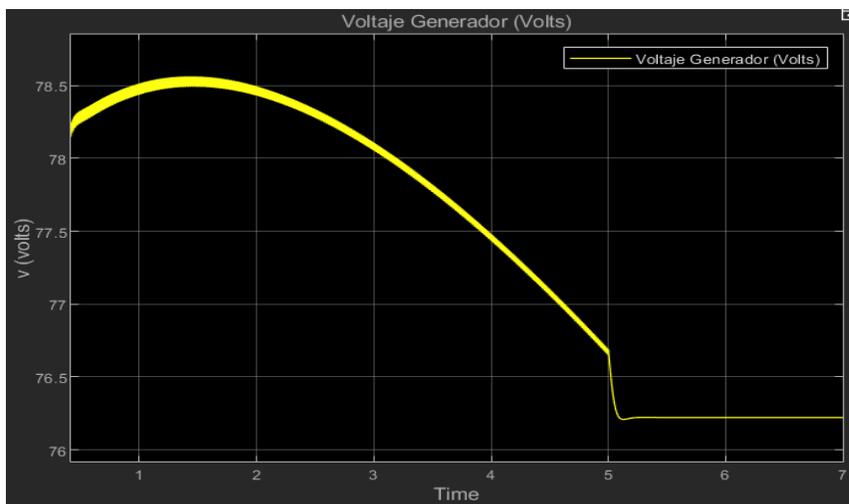
Figura 48

Corriente generador



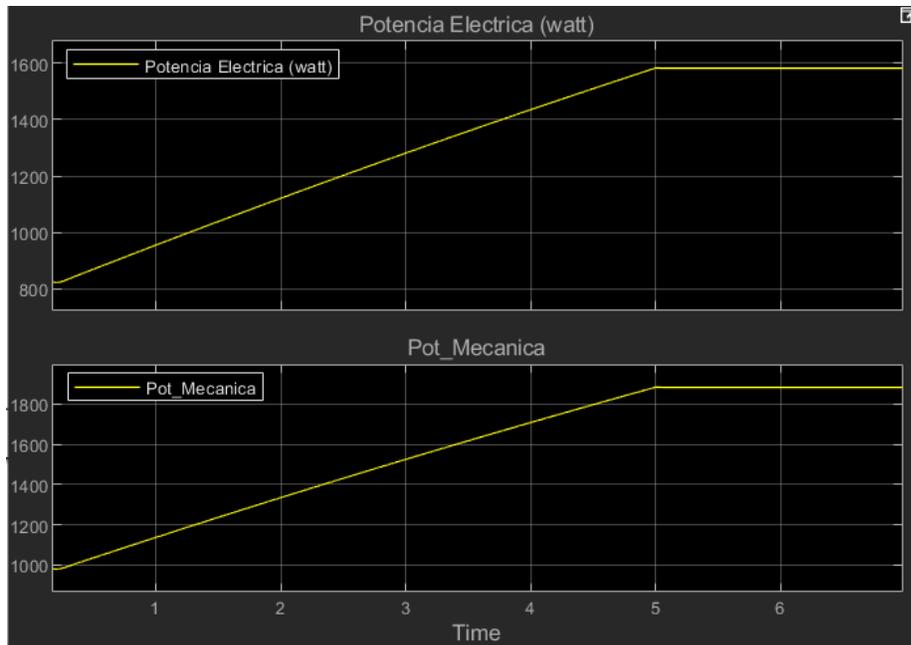
Fuente: *(Elaboración propia)*

La figura 49 muestra cómo el voltaje generado varía en un rango de 79 a 65.4 Voltios aproximadamente a lo largo del tiempo. Sin embargo, si el tiempo sigue continuo su valor máximo y mínimo de voltaje siempre se mantiene dentro de este intervalo, por las condiciones de entrada (Torque) y salida (voltaje), también debido a las características del generador.

Figura 49*Voltaje en el generador*Fuente: *(Elaboración propia)*

La figura 50 de potencia eléctrica muestra cómo varía la energía eléctrica dentro del rango de 0.8 a 1.6 kW aproximadamente a lo largo del tiempo. Sin embargo, si el tiempo sigue continuo su valor máximo y mínimo de potencia siempre se mantiene dentro de este intervalo, por las condiciones de entrada (Torque) y salida (Ps), también debido a las características del generador.

Figura 50*Potencia eléctrica vs mecánica*

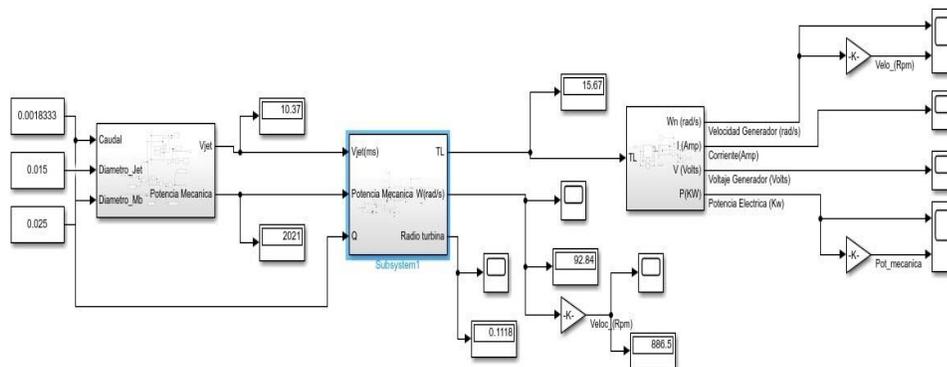


Fuente: (Elaboración propia)

En la figura 51 se indica el resultado final del diseño hidráulico con la unión de los tres bloques descritos anteriormente.

Figura 51

Diagrama de bloques del diseño hidráulico con turbina Pelton.



Fuente: (Elaboración propia)

Este modelo de simulación en MATLAB Simulink permite evaluar el comportamiento de una turbina Pelton desde la entrada de los parámetros hidráulicos de operación hasta la obtención de la energía eléctrica.

4.3.2 Simulación del efecto Venturi en ANSYS Fluente

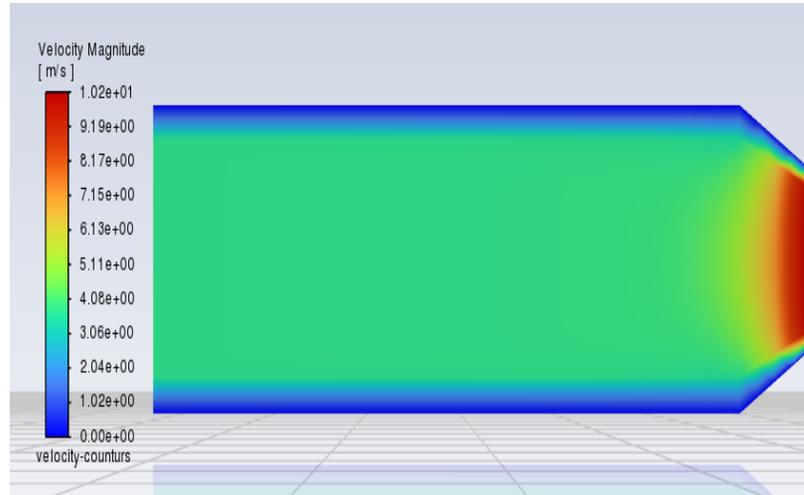
La simulación en el software ANSYS del efecto del tubo Venturi, se realiza con el fin de determinar las velocidades que se obtienen en los diámetros tubería, tanto en la velocidad de salida de motobomba (V_b) como en velocidad de impacto en cuchara (V_{jet}), en el software de diseño 3D SOLIDWORKS se crea el modelo de tubería en este ejemplo con secciones de entrada de 25cm y salida de 15cm, datos obtenidos de los diámetros del modelo de motobomba obtenidos expuesta en capítulos anteriores de este documento.

Con el diseño elaborado se exporta al software de análisis de ANSYS, para la simulación de flujo y el análisis de comportamiento del fluido, en el software se seleccionan las caras del modelo que representan las condiciones de entrada la sección con área mayor (A_b) y salida del fluido la sección con área menor (A_{jet}). Luego, se utiliza el módulo de mallado en ANSYS para crear una malla del modelo que sea precisa, con el fin de que no contenga elementos distorsionados, lo que afectaría a la precisión de simulación.

Una vez que se halla creado la malla, se realiza la simulación del flujo. Los resultados de la simulación se pueden visualizar en forma de gradientes, lo que permite analizar el diseño del tubo Venturi, tal como se muestran en la figura 52.

Figura 52

Resultados de simulación efecto Venturi



Fuente: *(Elaboración propia)*

4.3.3 Simulación de velocidad angular en el rodete

La simulación en el software ANSYS de la velocidad angular, se realiza para determinar la velocidad generada por el rodete:

en el software de diseño 3D SOLIDWORKS se crear el modelo de turbina en este ejemplo con secciones de diámetro de rodete de 223 (mm), datos obtenidos del diámetro de la turbina obtenidos en cálculo de parámetros geométricos en capítulos siguientes de este documento

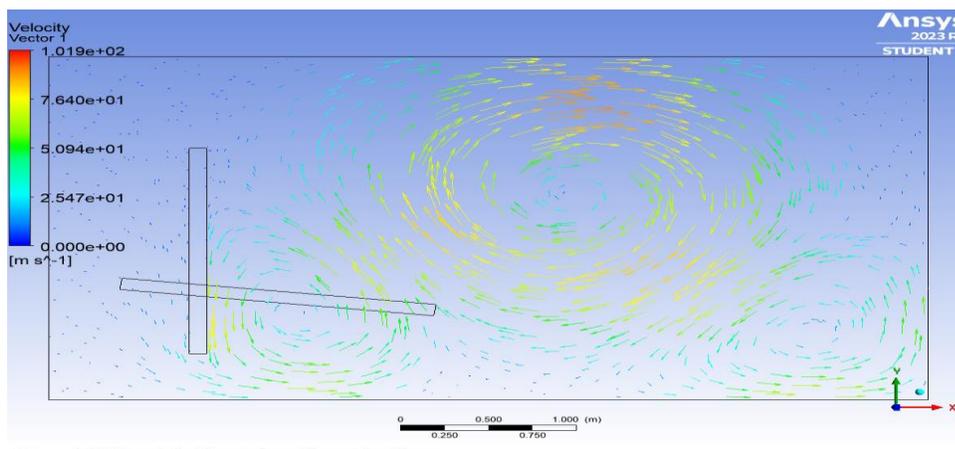
Con el diseño elaborado se exporta al software de análisis de ANSYS, en el software se define un dominio de flujo (agua) que rodea la turbina, estableciendo las entradas y salidas. Se asignan condiciones de entrada, como el caudal 1.8 (lt/s) y se establecen las condiciones iniciales para la velocidad de impacto en cuchara (V_{jet}) 10.37 (m/s).

Una vez definidas las condiciones de frontera, se genera una malla adecuada para el dominio de flujo y el rodete.

Se ejecuta la simulación donde se pueden visualizar en forma de gradientes, En la figura 53 se pueden apreciar los gráficos de velocidad angular.

Figura 53

Resultados de simulación efecto Venturi



Fuente: (Elaboración propia)

Además, se realiza un análisis del incremento en la velocidad del rodete. Se compara la velocidad del rodete máxima con la velocidad máxima propuesta. Este análisis permite evaluar cómo varía la velocidad del rodete a medida que cambia su velocidad.

4.3.4 Comparación de resultados calculados y simulados

En la tabla 13 se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada en el software de análisis de fluido ANSYS, los cuales se comparan con los valores obtenidos mediante cálculos. Se observa que los valores están en concordancia, es decir, no presentan grandes desviaciones. Esto permite realizar una comparación de datos entre los parámetros de velocidad de impacto, la velocidad de la bomba y velocidad en el rodete utilizando los valores propuestos en el diseño para generar 2.2kW, como se mencionó anteriormente.

Tabla 13

Comparación de datos calculados vs Simulados en el software ANSYS

Parámetro	Valor calculado	Valor simulación	Unidades
-----------	-----------------	------------------	----------

Velocidad de impacto en cuchara (V_{jet})	10.37	10.2	m/s
Velocidad en rodete máxima (W)	93	101.9	(rad/s).
Velocidad de salida de bomba (V_b)	3.74	4.08	m/s

En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos en la simulación realizada en el software Matlab Simulink, los cuales se comparan con los valores obtenidos mediante cálculos. Se observa que los valores están en concordancia, es decir, no presentan grandes desviaciones. Esto permite realizar una comparación de datos entre los parámetros de potencial hidráulico, torque potencia eléctrica los valores propuestos en el diseño para generar 2.2kW, como se mencionó anteriormente.

Tabla 14

Comparación de datos calculados vs Simulados en el software Matlab

Parámetro	Valor calculado	Valor simulación	Unidades
Potencial hidráulico (P)	2.5	2.497	kw
Potencia eléctrica (Ps)	1.5	1.584	kw
Potencia mecánica (Pm)	1.8	1.885	kw
Torque (T)	19	17.75	N/m
Eficiencia (n)	0.72	0.75	%

5. Análisis de Resultados

El presente estudio se centró en el diseño hidráulico simulado de una turbina Pelton, analizando el comportamiento de la motobomba con un caudal de (1.8 l/s) y disminuyéndolo hasta un valor de (0.9 l/s) y el generador cuya capacidad de generación es de 2.5 kW determinando que la altura neta requerida debe ser de aproximadamente 139 m para llegar a alcanzar dicha potencia bajo condiciones ideales. Es decir, no se consideraron explícitamente los efectos de turbulencias o vibraciones. Sin embargo, se evaluaron las pérdidas porcentuales 10% debidas al rozamiento de agua en la tubería, del 20% en las colisiones entre el chorro de agua y del 25% en la turbina producidas por calor e inducción magnética en el generador.

Los resultados obtenidos permitieron observar el desempeño del diseño hidráulico dentro de un rango operativo, verificando que, en un entorno real, los valores pueden variar dentro de los presentados en las figuras 24 a 50, generadas mediante el software MATLAB. Asimismo, Estas condiciones permitieron simular el sistema hidráulico, evaluando el diseño en distintos valores de parámetros.

En cuanto a las simulaciones, realizadas en los softwares como ANSYS, MATLAB, SolidWorks, proporcionaron una visualización detallada y un análisis del comportamiento del diseño hidráulico en condiciones controladas. En particular, las simulaciones realizadas en MATLAB permitieron evaluar la potencia hidráulica generada de 2.2 kW, comparada con la potencia eléctrica de 1.5 kW. Implica que el 72% de la potencia hidráulica se convierte en potencia eléctrica, lo que refleja un buen indicativo en eficiencia del sistema, también revelo una relación directa entre la potencia eléctrica y el corriente, sin embargo, a niveles de potencia más altos el voltaje disminuye. confirmando que el diseño concuerda con los valores obtenidos mediante los cálculos. ANSYS, por su parte, simuló la velocidad del impacto, la velocidad en las

tuberías y la velocidad angular en la turbina, validando que los cálculos obtenidos y presentados en la tabla 13, no presentan un gran desfase con los simulados. Finalmente, el diseño en SolidWorks permitió visualizar las dimensiones a escala real de la turbina y el acoplamiento del sistema hidroeléctrico, que incluye la motobomba, el generador y la turbina, asegurando la correcta integración del diseño.

Conclusiones

En resumen, este proyecto se llevó a cabo con el propósito de analizar la influencia de los parámetros de diseño en la eficiencia de las turbinas Pelton. Para el modelo de sistema hidráulico diseñado, se utilizaron datos específicos proporcionados por los fabricantes de la motobomba y el generador. Con base en esta información, se realizaron simulaciones y cálculos matemáticos para evaluar las interdependencias y tendencias entre los parámetros clave. Los resultados confirmaron que la variación en el nivel de caudal tiene un impacto directo en la potencia hidráulica, de la cual solo el 80% se transforma en potencia mecánica. A su vez, únicamente el 85% de esta potencia mecánica se convierte en potencia eléctrica, debido a las pérdidas asociadas con las tuberías, el generador y la turbina. Además, se resaltó la importancia de optimizar parámetros fundamentales, como el diámetro del chorro y la velocidad de impacto, para maximizar la eficiencia en la transferencia de potencia y mejorar el rendimiento del diseño hidráulico.

Se desarrolló un modelo 3D del micro generador utilizando el software SolidWorks, basado en la geometría determinada a partir de fórmulas matemáticas y cálculos realizados en MATLAB. Este proceso permitió obtener las dimensiones precisas de las cucharas y del rodete tipo Pelton, facilitando el diseño del sistema. El uso de esta herramienta redujo significativamente el tiempo de modelado de los cangilones y el rodete, y permitió la visualización detallada del dimensionamiento de la turbina y del diseño hidráulico antes de su construcción física. Además, el modelo 3D no solo validó el diseño, sino que también permite identificar el modelo antes de la construcción física.

Las simulaciones realizadas en MATLAB permitieron analizar el comportamiento del micro generador bajo las condiciones establecidas, confirmando que la turbina tipo Pelton diseñada alcanza una eficiencia del 72%, lo que refleja el margen de transmisión entre el potencial hidráulico y la potencia eléctrica generada. Los parámetros clave, como la velocidad de impacto (V_{jet}) y la velocidad del rodete (ω), se validaron mediante simulaciones adicionales en ANSYS. Estos resultados demostraron coherencia con los cálculos teóricos, asegurando que el diseño cumple con los requisitos energéticos esperados. Además, las simulaciones proporcionaron una herramienta valiosa para evaluar la eficiencia de generación, validando el desempeño del micro generador antes de su implementación física.

Recomendaciones para futuros trabajos

Ajusta el caudal y el potencial hidráulico según las necesidades del sistema para maximizar la eficiencia energética. Asegurando de que el sistema hidráulico esté diseñado para operar dentro de los parámetros ideales.

Extender el estudio a otros tipos de turbinas hidroeléctricas para comparar eficiencias y determinar la mejor opción para diferentes contextos hidráulicos. Esto puede incluir el análisis de turbinas Francis y Kaplan en escenarios específicos.

Reevaluar el Tamaño del Rodete y del Chorro, Aunque el diámetro del rodete es significativamente mayor que el del chorro, verificar si el diseño del rodete podría mejorarse para aumentar la eficiencia. Considerando ajustar el tamaño y la geometría del rodete para asegurar una mejor captura y conversión de la energía del fluido.

Evaluar la posibilidad de integrar la turbina tipo Pelton con otros sistemas de energía renovable, como paneles solares o aerogeneradores, para crear una planta híbrida que maximice el uso de recursos naturales y aumente la resiliencia energética.

Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real dentro del software de control, que permita visualizar y analizar cómo los cambios en parámetros como el caudal y las velocidades afectan el rendimiento del sistema. Esta herramienta facilitará la evaluación continua del sistema durante la instalación y operación futura, proporcionando datos valiosos para ajustes inmediatos.

Referencias

- Alarcon, J. & S. J. (2008). *Ensayo Y Estudio De Una Turbina Pelton*. 19–161.
- Angulo, S. (2010). *EL neopositivismo y la filosofía analítica, son dos movimientos que tienden a confundirse, y es que sus límites se tocan en muchos puntos*. 1–10.
- Artiaga, V., & Pujante, A. (2002). El método científico y la nueva filosofía de la ciencia. *Documentacion*, 1(4), 9–19.
- Barragán, G., & Parra, C. (2020). *Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Mecánica Pelton Para Flujo Particulado Utilizando Simulación Numérica" Trabajo De Titulación Previo a La Obtención Del Título De Ingeniero Mecánico*.
- Bustamante, E., & Arias, C. (2008). Diseño y construcción de una Turbina Pelton para Generación Eléctrica, Capacidad 2 Kw. In *Universidad Politécnica Salesiana Ecuador*.
- Centralde. (n.d.). *Tabla DIMENSIONES y CARACTERÍSTICAS de MOTOR eléctrico - Central de Repuestos*. <https://www.centralde.com/oficina-técnica/tablas-motores-etc/dimensiones-motores/>
- Chamorro, J. (1981). Mecanica de Fluidos I. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9).
- Cyvplasticos. (2004). *Cyvplasticos*. <https://www.cyvplasticos.com/medidas-pvc/>– C&V
- Dávalos, A., & Puruncajas, C. (2015). “Diseño e implementación de un banco de pruebas de una central pico hidroeléctrica para la visualización de las variables eléctricas para la carrera de ingeniería electromecánica de la unidad académica Ciya período 2014.” In *Sistema Biodigestor*.
- Díez, P. (1996). Turbinas hidráulicas. *Departamento de Ingeniería Electrica y Energética*. ..., 1–19. <http://www.uls.edu.ni/publicaciones/-II-Anio/Plan-Sabatino-II-Trimestre/Metodologia->

de-la-Investigacion/turbinas-hidraulicas-Investigación_documental.pdf

- Endesa Educa. (2014). Centrales hidroeléctricas. *Recursos*, 1. <http://goo.gl/HMSVho>
- Fajardo, W. R. L. (2022). *Caracterización De Los Proyectos Para La Generación De Energías Renovables No Convencionales En Colombia*. 1(July), 1320–1330.
- Ferrada Sepúlveda, L. A. (2012). *Diseño de Rodete de Turbina Hidráulica tipo Pelton para Microgeneración*. 66. http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/112366/cf-ferrada_ls.pdf
- Garzón, M., & Gómez, H. (2020). Diseño y desarrollo de un sistema hidro generador eléctrico de baja potencia por medio de una turbina Pelton. *Instname: Universidad Antonio Nariño*. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/2221>
- Gonzáles, O., Gonzáles, C., & López, A. (n.d.). *Vista de Introducción al método del elemento finito_ Solidworks y Matlab.pdf*.
- Guamushig, C., & Iza, D. (2022). *Diseño De Una Turbina De Vórtice De Eje Vertical*. <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/9662/1/PI-002223.pdf>
- Guzmán, J. (2019). *Pequeñas Centrales Hidráulicas a Filo de Agua* [Univercidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76856>
- Hidalgo, A., & Morales, D. (2019). Diseño y construcción de un equipo para la determinación de pérdidas de carga por fricción en tuberías y en accesorios, para el laboratorio de hidráulica de la facultad de ingeniería de la PUCE. *Pontificia Universidad Católica Del Ecuador*, 186. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/17649>
- Homecenter. (2018). *Bomba Centrífuga FC 100 IHP - Fluvial - ePumps*.
- Homecenter. (2022). *Electrobomba Centrífuga 1.5 HP 110/220 V - Homecenter.com.co*.
- López Suárez, E., & Mera Vega, J. (2019). Prototipo de generador hidroeléctrico con molino de

agua para una granja y su sistema de riego en zona veredal del Departamento de Santander [Univercidad Tecnològicas de santander]. In *Repositorio Institucional RI-UTS*.

<http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/3497>

Mezzodomenica. (2006). *Mezzodomenica*.

<https://mylifeandotheranimals.blogspot.com/2006/11/la-vida-como-un-tubo-de-venturi.html>

Nasir, Abdullah, B. (2013). Design of High Efficiency Cross-Flow Turbine for Micro-Hydropower Plant. *Journal Impact Factor (2012): 3.2031 (Calculated by GISI)*

Www.Jifactor.Com, 4(1), 171–183.

Paiva, F. (2023). *Cuál Es El Rendimiento de Un Motor Eléctrico*.

<https://es.scribd.com/document/667751356/Cual-Es-El-Rendimiento-de-Un-Motor-Electrico>

Reyes, R. (n.d.). *Motor De Induccion Electrico Monofasico 3hp 3600rpm Nuevo | Envío gratis*.

RICARDOREYESHEREDIA2. Retrieved August 20, 2024, from

[https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-505799304-motor-de-induccion-electrico-monofasico-3hp-3600rpm-nuevo-_JM#polycard_client=search-](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-505799304-motor-de-induccion-electrico-monofasico-3hp-3600rpm-nuevo-_JM#polycard_client=search-nordic&position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=21f31ab0-2156-4aad-a560-2d6b189ae6bd)

[nordic&position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=21f31ab0-2156-4aad-](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-505799304-motor-de-induccion-electrico-monofasico-3hp-3600rpm-nuevo-_JM#polycard_client=search-nordic&position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=21f31ab0-2156-4aad-a560-2d6b189ae6bd)

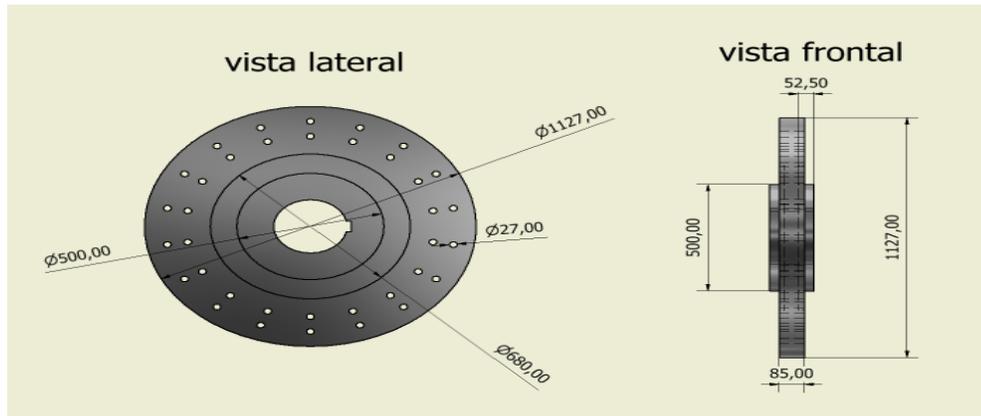
[a560-2d6b189ae6bd](https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-505799304-motor-de-induccion-electrico-monofasico-3hp-3600rpm-nuevo-_JM#polycard_client=search-nordic&position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=21f31ab0-2156-4aad-a560-2d6b189ae6bd)

Sarmiento, J. A. (2020). *Metodología de diseño para turbinas tipo pelton, mediante un estudio paramétrico*. 107.

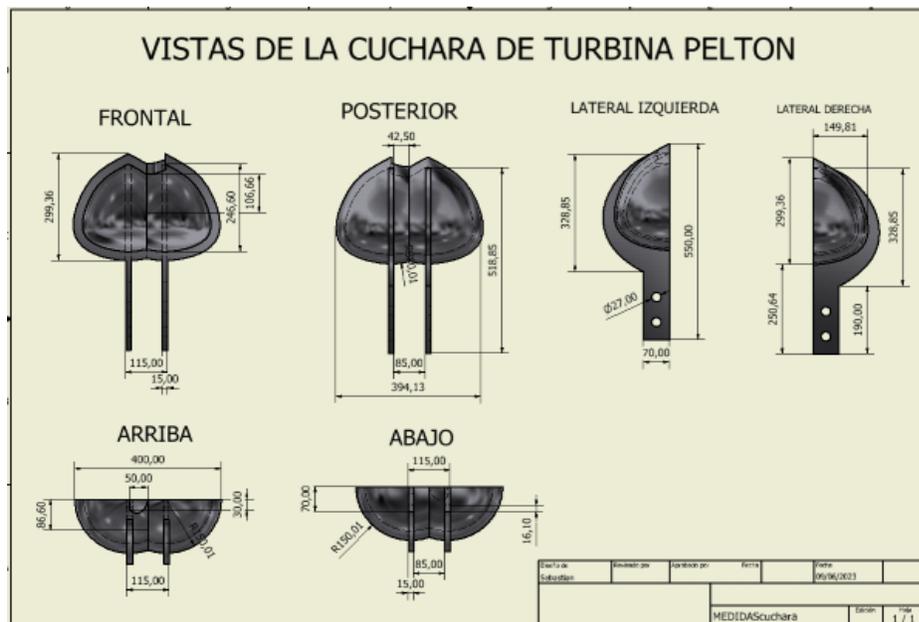
Universidad Cesmag Programa de Ingeniería Electronica. (2015). *Líneas y Sublíneas de Investigación Ingeniería Electrónica*.

Anexos

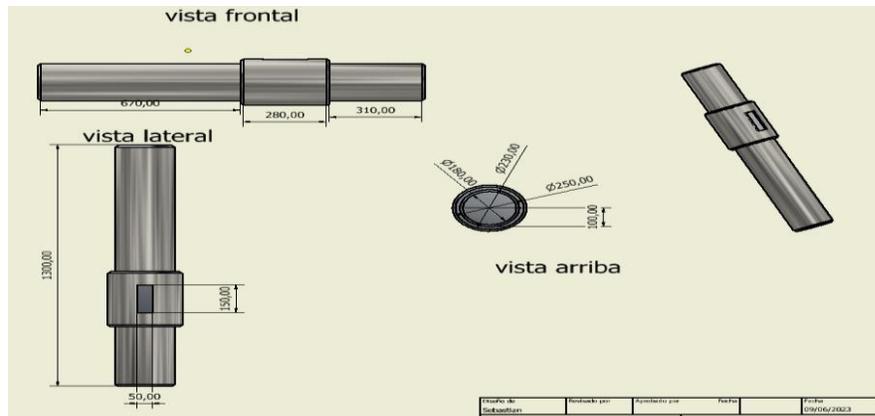
Anexos 1 Diseño de rodete



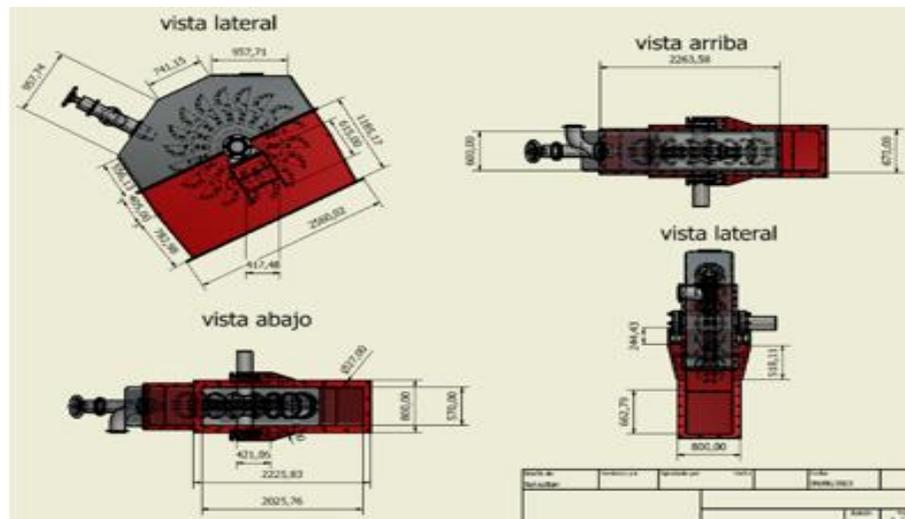
Anexos 2 Diseño de cuchara



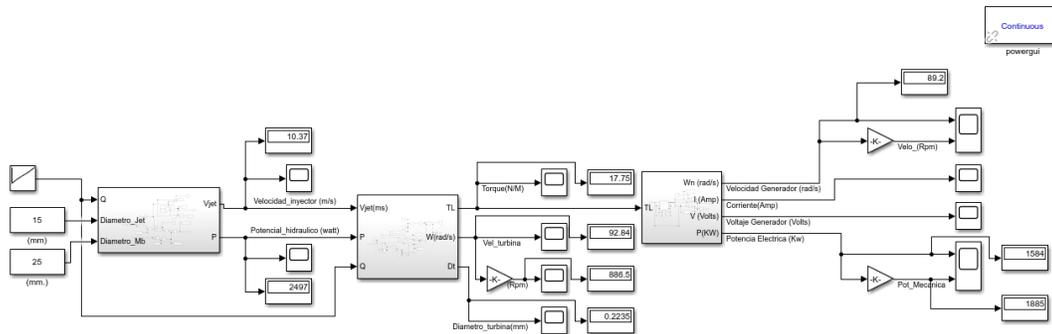
Anexos 3 Diseño de eje



Anexos 4 Diseño de cuchara



Anexos 5 Diseño de sistema hidráulico



Anexos 6 modelo de motobomba



Pedrollo
Bomba Centrífuga 1.5 HP 110/220 V
★★★★★ 0.0 (0)

Potencia	1.5 HP
Voltaje	110 V;220 V
Presión Máxima	57 Psi
Diámetro de Descarga	1 pulgadas
Material	Hierro Fundido con Tratamiento de Cataforesis.
Caudal máximo	110 l/min
País de Origen	Italia
Alimentación	Eléctrica
Altura máxima de elevación	40 m
Capacidad de succión	7 m
Flujo de salida	110 l/min
Tipo de bomba	Centrífuga
Diámetro de succión	1 pulgadas

Anexos 7 modelo de generador



Descripción

MOTOR DE INDUCCION ELECTRICO MONOFASICO
110 Y 220 VOLTIOS MARCA POWER

USO INTENSIVO Y CONTINUO TRABAJO INDUSTRIAL
NUEVO SELLADO EN CAJA GARANTIA DE UN AÑO
2.2KW 3HP A 3600 RPM 60HTZ
CORRIENTE NOMINAL: 34/17 AMP
GRADO DE PROTECCION IP54
PESO 28K
INS CL: B
EFICIENCIA ENERGETICA 75%
FACTOR DE POTENCIA 0.90 COS

Anexos 7 programación en Matlab cálculo de parámetros de operación

Paso_1 Calculo parametros de operacion.mlx * Paso_2 Calculo paramet

Caudal máximo: 6.600 l/h

Para convertir el caudal a litros por segundo, multiplica por 1000 (ya que 1 metro cúbico es igual a 1000 litros) Y dividimos por 3600 (ya que 1h es 3600s)

```
format longG
Qbh=6600           %(Qbh) Caudal de salida bomba(l/h)
Qbl=Qbh/3600      % (Qbl)Caudal de salida bomba (l/s)
Qbm=(Qbl/1000)    %(Qbm) Caudal de salida bomba (m³/s)
%Qmb=(Qbl/1000)*3600 % m³/h
```

calculo de la altura neta (Hn)

De la formula $P=p*g*Q*H_n$ depejamos (Hn)

```
P=2500           %(Pe) Potencia propuesta en 0.5 hasta 10(kw)
p=1000;          %(p) Densidad del agua 1000 (Kg/m)
g=9.8;           %(g) Gravedad de (9.8 m²/s)
Hn=P/(p*g*Qbm)  %(Hn)Altura neta(m)
%P=ya*Qd*Hn
```

Variacion de Parametros de operacion

Altura neta vs Altura en burto

```
Hg = 27.8:28.38:557; %metros
Hn1= Hg-0.1 * Hg;
plot(Hg, Hn1)
grid on
title('Rango de operación turbina Pelton')
xlabel('Altura en bruto [m]')
ylabel('Altura neta Hn Hg [m]')
legend({'Perdida de 10%'}, 'Location', 'northwest')
```

Anexos 8 programación en Matlab cálculo de parámetros físicos

Velocidad de salida moto bomba (Vb)

La velocidad con la que el agua sale de una tubería depende de, caudal (la cantidad de agua que fluye por la tubería por unidad de tiempo). La fórmula para calcular es:

Velocidad (V) = Caudal (Q) / Área de la Sección Transversal (A)

Para calcular el área de la sección transversal (A), se necesita conocer el radio de salida. La fórmula es:

$$A = \pi * (\text{radio})^2$$

Para determinar el radio la fórmula es:

$$\text{radio} = D_b / 2$$

```
Dbmm= 25           %(Dbmm)Diametro de bomba(mm)
Dbm=Dbmm/1000     %(Dbm)Diametro de bomba(m)
rb=Dbm/2          %(rb) radio de bomba(m)
Ab=pi*rb^2        %(Ab)se refiere al área de tubería (m²)
Vb=(Qbm/Ab)      %(Vb) Velocidad de salida bomba (m/s)
%Vbh=Vb*3600     %unidades de velocidad como (m/h)
```

Velocidad de salida del inyector (Vjet)

$$Q_b = Q_{jet}$$

$$A_b * V_b = A_{jet} * V_{jet}$$

$$V_{jet} = (A_b * V_b) / A_{jet}$$

```
Djmm=15           %(Djmm)Diametro de salida de inyector(mm)
Djm=Djmm/1000    %(Djm) de salida de inyector(m)
rjetm=Djm/2      %(rjetm)Radio de salida de inyector(m)
Ajet=pi*rjetm^2  %(Ajet)Area de salida de inyector(m²)

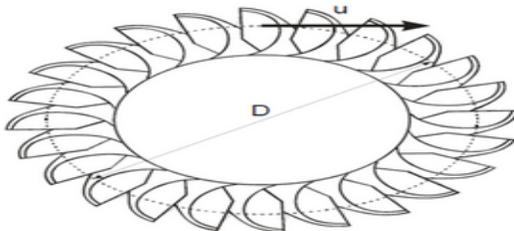
Vjet=(Vb*Ab)/Ajet  %(Vjet)Velocidad de salida inyector(m/s)

%Qjetm=Ajet*Vjet   %(Qjetm)Caudal de salida inyector (m³/s)
%(Ajet)Area de salida de inyector(m²).
```

Anexos 9 programación en Matlab cálculo de parámetros de geométricos

para encontrar se tiene encuentra la velocidad de salida del inyector y el caudal disponible

```
%Vjett=3.53568;
Vjett=10.37;
nj = 1;           %(nj) Numero de inyectores
Dj=(4*Qbm/(pi*nj*Vjett)).^0.5  %(Dj) Diametro del chorro
%(Qbm) Caudal de salida bomba (m³/s)
%(Vjett)Velocidad de salida inyector(m/s)
```



Diametro del rodetes

Para máxima eficiencia hidráulica se tiene $(D_r/D_j) > 15$

```
Dr3=Dj*14.9      %(Dr)Diametro del rodetes
Rr=Dr3/2         %(Rr)Diametro del rodetes
Wt=Vjett/Rr     %(Dr)Diametro del rodetes
N=(Wt*60)/6.282 %de rad/s a rpm
nb=15+(Dr3/(2*Dj))
B=3.4*Dj
Bl=3*Dj
Bd=1.2*Dj
```

Anexos 9 programación en Matlab cálculo de parámetros de potencia

```
format longG
ntuberia = 0.9;      %ntuberia Perdidas en tuberia
nturbina = 0.8;     %nturbina Perdidas en turbina
ngenerador = 0.85; %ngenerador Perdidas en generador
```

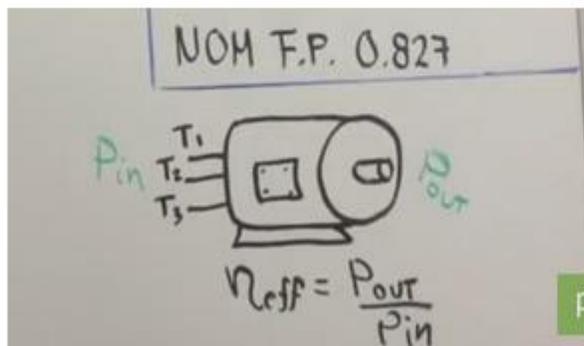
Potencia de salida

```
Pe=2200;
Pe11=Pe*(ntuberia*nturbina)
```

Torque

```
W=92.7      %W(rad/s)
T=Pe11/W    %T(Nm)
            %Ps(Watt)
```

Eficiencia Hidraulica



```
Ps=Pe11*0.85
n=(Ps/Pe11)*100
```

 <p>UNIVERSIDAD CESMAG NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</p>	CARTA DE ENTREGA TRABAJO DE GRADO O TRABAJO DE APLICACIÓN – ASESOR(A)	CÓDIGO: AAC-BL-FR-032
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 10/MAR/2025

ENTREGA DE TRABAJO

San Juan de Pasto, 10/03/2025

Biblioteca
REMIGIO FIORE FORTEZZA OFM. CAP.
Universidad CESMAG
Pasto

Saludo de paz y bien.

Por medio de la presente se hace entrega del Trabajo de Grado / Trabajo de Aplicación denominado **Influencia de los Parámetros de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica** presentado por los autores **Juan Sebastián Andrade y Luis Daniel Juaspuezan**, del Programa de ingeniería electrónica al correo electrónico trabajosdegrado@unicesmag.edu.co. Manifiesto como asesor(a), que su contenido, resumen, anexos y formato PDF cumple con las especificaciones de calidad, guía de presentación de Trabajos de Grado o de Aplicación, establecidos por la Universidad CESMAG, por lo tanto, se solicita el paz y salvo respectivo.

Atentamente,



Francisco Erazo Checa
CC: 98397376
Ingeniería electrónica
Cel:313 6584666
feraso@unicesmag.edu.co

 UNIVERSIDAD CESMAG <small>NIT: 800.109.387-7 VIGILADA MINEDUCACIÓN</small>	AUTORIZACIÓN PARA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS DE GRADO O TRABAJOS DE APLICACIÓN EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL	CÓDIGO: AAC-BL-FR-031
		VERSIÓN: 1
		FECHA: 10/Mar/2025

INFORMACIÓN DEL (LOS) AUTOR(ES)	
Nombres y apellidos del autor: Luis Daniel Juaspuezan Malte	Documento de identidad: 1088596424
Correo electrónico: luisjuaspuezand@gmail.com	Número de contacto: 3154660128
Nombres y apellidos del autor: Juan Sebastián Andrade Bastidas	Documento de identidad: 1085347985
Correo electrónico: sjabsebas777@gmail.com	Número de contacto: 3004468272
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del autor:	Documento de identidad:
Correo electrónico:	Número de contacto:
Nombres y apellidos del asesor: Francisco Erazo Checa	Documento de identidad: 98397376
Correo electrónico: feraso@unicesmag.edu.co	Número de contacto: 313 6584666
Título del trabajo de grado: Influencia de los Parámetros de diseño en la eficiencia de turbinas Pelton para la generación de energía eléctrica	
Facultad y Programa Académico: Ingeniería electrónica.	

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

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

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

Aplicación dentro del repositorio institucional. Conozco(conocemos) que esta autorización podrá revocarse en cualquier momento, siempre y cuando se eleve la solicitud por escrito para dicho fin ante la Universidad CESMAG. En estos eventos, la Universidad CESMAG cuenta con el plazo de un mes después de recibida la petición, para desmarcar la visualización del Trabajo de Grado o de Aplicación del repositorio institucional.

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

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

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

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

En señal de conformidad, se suscribe este documento en San Juan de Pasto a los 10 días del mes de marzo del año 2025

	
Nombre del autor: Luis Daniel Juaspuezan	Nombre del autor: Juan Sebastián Andrade
Firma del autor	Firma del autor
Nombre del autor:	Nombre del autor:
 _____ Nombre del asesor:	