

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Eléctrica

Tesis

**Análisis de pérdidas de carga en la tubería y su
impacto en la eficiencia eléctrica de la Minicentral
Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024**

Jean Piero Lulo Rivera

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Electricista

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



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

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A	:	Decano de la Facultad de Ingeniería
DE	:	Carlos Quispe Anccasi Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO	:	Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA	:	28 de abril de 2025

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

Título:

Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.

Autores:

1. Jean Piero Lulo Rivera – EAP. Ingeniería Eléctrica

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 15% de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (en caso de elegir "SI"): 20 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

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

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

Atentamente,

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

AGRADECIMIENTOS

En agradecimiento a mi asesor, Dr. Carlos Quispe Anccasi, por su invaluable guía, paciencia y conocimientos compartidos a lo largo de este proceso.

DEDICATORIA

A mi madre Fabiana y mi padre Ciro, quienes, con su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio han sido el pilar fundamental en mi vida, gracias por enseñarme a luchar por mis sueños y confiar en mi incluso en los momentos más difíciles, les dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud.

RESUMEN

La finalidad principal de este estudio fue examinar de manera detallada el impacto de las pérdidas de carga en la tubería de presión sobre la eficiencia eléctrica de la minicentral hidroeléctrica ubicada en Ingenio. Para ello, se llevó a cabo un estudio explicativo en el que se examinaron las relaciones causales entre las pérdidas de carga y el rendimiento del sistema. Para alcanzar este propósito, la metodología empleada incluyó simulaciones hidráulicas y análisis estadísticos, lo que permitió identificar los factores que contribuyeron a dichas pérdidas y evaluar posibles mejoras en el diseño de la tubería de presión. En este sentido, a partir de los resultados obtenidos, se determinó que incrementar el diámetro en 10 cm respecto al diámetro inicial, así como reducir la rugosidad de 2.1 μm a 0.5 μm , contribuyó a que la eficiencia eléctrica del sistema alcanzará hasta un 2.0632% más con respecto a su estado inicial. Además, el análisis de pérdidas de carga permitió estimar una potencia no generada de aproximadamente 48.76 kW, lo que evidencia la necesidad de optimizar el diseño de los conductos de presión en centrales hidroeléctricas con el fin de incrementar su eficiencia energética y mejorar su funcionamiento.

Palabras claves: Diámetro de la Tubería; Rugosidad; Longitud de la tubería; Caudal.

ABSTRAC

The primary objective of this study was to thoroughly examine the impact of head losses in the pressure pipeline on the electrical efficiency of the small hydroelectric power plant located in Ingenio. To achieve this, an explanatory study was conducted to analyze the causal relationships between head losses and system performance. The methodology involved hydraulic simulations and statistical analyses, which enabled the identification of key factors contributing to these losses and the evaluation of potential improvements in the pipeline's design. Consequently, the results revealed that increasing the pipeline diameter by 10 cm from its original size and reducing the internal surface roughness from 2.1 μm to 0.5 μm led to an increase in electrical efficiency of up to 2.0632% compared to the initial configuration. Additionally, the analysis of head losses made it possible to estimate an ungenerated power of approximately 48.76 kW, underscoring the importance of optimizing the design of pressure conduits in hydroelectric plants to enhance energy efficiency and overall operational performance.

Keywords: Pipe diameter; Roughness; Pipe length; Flow rate.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	iv
DEDICATORIA	v
RESUMEN	vi
ABSTRAC	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES	xvi
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Problema general	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo general	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Justificación	3
1.4.1 Técnica	3
1.4.2 Económica	3
1.4.3 Teórica	3
1.4.4 Social	4
1.4.5 Ambiental	4
1.5 Importancia de la investigación	5
1.6 Limitaciones	6
1.7 Hipótesis	6
1.7.1 Hipótesis general	6
1.7.2 Hipótesis específicas	6
1.8 Descripción de variables y operacionalización de variables	7
CAPÍTULO II	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1. Antecedentes del problema	9

2.1.1 Artículos científicos	9
2.1.2 Tesis	14
2.2 Bases teóricas	19
2.2.1 Central hidroeléctrica	19
2.2.1.1 Minicentral hidroeléctrica	20
2.2.1.1.1 Cámara de carga	20
2.2.1.1.2 Chimenea de Minicentral Hidroeléctrica	21
2.2.1.1.3 Tubería de presión.....	22
2.2.1.1.4 Válvula de ingreso tipo mariposa	22
2.2.1.1.5 Casa de máquinas.....	23
2.2.1.1.6 Turbina hidráulica.....	24
2.2.1.1.7 Generador síncrono.....	25
2.2.1.1.8 Transformador.....	26
2.2.2 Pérdidas de carga.....	27
2.2.2.1 Factores que afectan las pérdidas de carga	27
2.2.2.1.1 Diámetro interno de la tubería de presión	27
2.2.2.1.2 Rugosidad de la tubería de presión.....	27
2.2.2.1.3 Longitud de la tubería de presión	28
2.2.2.1.4 Caudal.....	28
2.2.2.2 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Darcy-Weisbach	28
2.2.2.2.1 Factor de fricción.....	29
2.2.2.2.2 Número de Reynolds	30
2.2.2.2.3 Número de cavitaciones.....	30
2.2.2.2.4 Balance energético en flujos a presión	31
2.2.2.3 Pérdidas locales	32
2.2.2.4 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Hazen-Williams	32
2.2.2.5 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Colebrook-White ..	33
2.2.3 Eficiencia.....	33
2.2.3.1 Eficiencia de la turbina	34
2.2.3.2 Eficiencia del generador eléctrico	35
2.3 Definición de términos básicos	36
2.3.1 Máquina eléctrica	36
2.3.2 MCH.....	36

2.3.3	Análisis de pérdidas de carga	36
2.3.4	M.c.a.....	36
2.3.5	Energía.....	36
2.3.6	Potencia	36
2.3.7	Voltaje	36
2.3.8	Corriente.....	36
CAPÍTULO III		37
3.1.	Método de investigación	37
3.1.1	Enfoque	37
3.2.	Tipo de investigación	37
3.3	Nivel de la investigación	38
3.4.	Diseño de la investigación.....	38
3.5.	Población y muestra	44
3.6.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	45
3.6.1	Recolección de datos	45
3.6.1.1	Recolección de datos de la tubería	45
3.6.1.2	Recolección de datos de las pérdidas de carga	45
3.7	Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	45
3.8	Desarrollo del método y la técnica	46
CAPÍTULO IV		49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		49
4.1	Resultados e interpretación	49
4.1.1	Análisis de las pérdidas de carga bajo condiciones iniciales mediante el software Epanet 2.0	49
4.1.1.1	Análisis de la relación entre el diámetro de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0	50
4.1.1.2	Descripción de la relación entre la rugosidad de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0	52
4.1.1.3	Análisis de la relación entre la longitud de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0	53
4.1.1.4	Análisis de la relación entre el diámetro y rugosidad de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0.....	55
4.1.1.5	Análisis de la relación entre el diámetro y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0.....	56

4.1.1.6	Análisis de la relación entre el rugosidad y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0.....	57
4.1.1.7	Análisis de la relación entre el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0	58
4.1.2	Análisis del impacto entre las pérdidas de carga y la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el Software Python.....	60
4.1.2.1	Análisis de la relación entre el diámetro de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python	62
4.1.2.2	Análisis de la relación entre la rugosidad de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python	63
4.1.2.3	Análisis de la relación entre longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python	65
4.1.2.4	Análisis de la relación entre el diámetro y rugosidad de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python.....	66
4.1.2.5	Análisis de la relación entre el diámetro y longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python.....	67
4.1.2.6	Análisis de la relación entre el rugosidad y longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python.....	69
4.1.2.7	Análisis de la relación entre diámetro, rugosidad y longitud de la tubería de presión y la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python.....	70
4.2	Prueba de hipótesis.....	72
4.2.1	Análisis de varianza.....	76
4.3	Discusión de resultados	82
4.3.1	Hipótesis general	82
4.3.2	Hipótesis específicas	83
	Hipótesis específica H1.a.....	83
	Hipótesis específica H1.b.....	84
	Hipótesis especifica H1.c	85
4.4	Trabajos futuros.....	86
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES	89
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	ANEXOS	95
	ASPECTOS ADMINISTRATIVOS	95
	PRESUPUESTO	95
	CRONOGRAMA	96

MATRIZ DE CONSISTENCIA	97
ANEXO A	100
ANEXO B	101
ANEXO C	102
ANEXO D	103
ANEXO E	104
ANEXO F.....	105
ANEXO G	106
ANEXO H.....	107
ANEXO I.....	108
ANEXO J	109

ÍNDICE DE FIGURAS

figura 1. Participación de fuentes primarias en la generación de energía en el Perú en el año 2022 y 2023.....	5
figura 2. Partes de una Central Hidroeléctrica.....	19
figura 3. Fotografía inédita de la Cámara de carga perteneciente a la minicentral hidroeléctrica Ingenio.....	21
figura 4. Fotografía inédita de la chimenea perteneciente a la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.....	21
figura 5. Fotografía inédita de la tubería de presión perteneciente a la Central Hidroeléctrica de Ingenio.....	22
figura 6. Fotografía inédita de la válvula tipo mariposa de la Central Hidroeléctrica de Ingenio	23
figura 7. Fotografía inédita de la casa de máquinas perteneciente a la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.....	24
figura 8. Fotografía inédita de la Turbina Francis perteneciente a la Central Hidroeléctrica de Ingenio.....	25
figura 9. Fotografía inédita del Generador Síncrono trifásico perteneciente a la Central Hidroeléctrica de Ingenio.....	26
figura 10. Fotografía inédita del transformador de potencia perteneciente a la MCH de Ingenio.	26
figura 11. Minicentral Hidroeléctrica y sus partes	39
figura 12. Diagrama de la tubería de presión	46
figura 13. Simulación de tubería de presión operando	46
figura 14. Simulación de tubería bajo cambio de parámetros	47
figura 15. Código Python para el análisis de eficiencia.	60
figura 16. Resultados de la primera evaluación de eficiencia.	61
figura 17. Resultados de la segunda evaluación de eficiencia.....	61
figura 18. Resultados de la tercera evaluación de eficiencia.	62
figura 19. Resultados de la cuarta evaluación de eficiencia.	62
figura 20. Resultados de la quinta evaluación de eficiencia.....	63
figura 21. Resultados de la sexta evaluación de eficiencia.	63
figura 22. Resultados de la séptima evaluación de eficiencia.	63
figura 23. Resultados de la octava evaluación de eficiencia.	64
figura 24. Resultados de la novena evaluación de eficiencia.	64
figura 25. Resultados de la décima evaluación de eficiencia.	65
figura 26. Resultados de la undécima evaluación de eficiencia.	65
figura 27. Resultados de la décimo primera evaluación de eficiencia.....	66
figura 28. Resultados de la décimo tercera evaluación de eficiencia	66
figura 29. Resultados de la décimo cuarta evaluación de eficiencia	67
figura 30. Resultados de la décimo quinta a evaluación de eficiencia	67
figura 31. Resultados de la décimo sexta evaluación de eficiencia.....	67
figura 32. Resultados de la décimo séptima evaluación de eficiencia.....	68
figura 33. Resultados de la décimo octava evaluación de eficiencia.....	68
figura 34. Resultados de la décimo novena evaluación de eficiencia	69

figura 35. Resultados de la vigésima evaluación de eficiencia	69
figura 36. Resultados de la vigésima primera evaluación de eficiencia.....	69
figura 37. Resultados de la vigésimo segunda evaluación de eficiencia.	70
figura 38. Resultados de la vigésimo tercera evaluación de eficiencia.	70
figura 39. Resultados de la vigésimo cuarta evaluación de eficiencia.	71
figura 40. Diagrama de Pareto de la matriz de datos.....	79
figura 41. Gráfica de residuos en las respuestas.....	79
figura 42. Gráfico optimizador de respuestas pérdidas de carga.....	81
figura 43. Efectos principales para "PÉRDIDAS DE CARGA" que representa las pérdidas de carga en el sistema.....	82
figura 44. Cronograma de actividades.....	96
figura 45. Modelado de tubería de presión, vista de planta.....	100
figura 46. Tubería de presión vista en 3 dimensiones	101
figura 47. Diseño CAD de tubería.....	102
figura 48. Perfil longitudinal de la Central Hidroeléctrica	103
figura 49. Sistema Hidroenergético de Ingenio.....	104
figura 50. Fotografía inédita del acceso a MCH de Ingenio.....	105
figura 51. Fotografía inédita del río Rangra	106
figura 52. Fotografía inédita de tablero eléctrico.	107
figura 53. Fotografía inédita del patio de llaves de la MCH Ingenio	108
figura 54. Fotografía de la visita efectuada por el suscrito.....	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	7
Tabla 2. Resumen de artículos científicos revisados.....	9
Tabla 3. Resumen de tesis	14
Tabla 4. Valores de rugosidad según el tipo de materiales	27
Tabla 5.. Función objetivo del diseño factorial	39
Tabla 6. Factores y niveles del diseño factorial.	40
Tabla 7. Diseño factorial con respuestas de pérdidas de carga por tramo.....	40
Tabla 8. Datos de la muestra en estudio	44
Tabla 9. Desarrollo del análisis de varianza lineal	47
Tabla 10. Resultado de la primera interacción en la tubería de presión.....	49
Tabla 11. Resultado de la segunda interacción en la tubería de presión	49
Tabla 12. Resultado de la tercera interacción de tubería de presión	50
Tabla 13. Resultado de la cuarta interacción de tubería de presión	50
Tabla 14. Resultado de la quinta interacción de tubería de presión	51
Tabla 15. Resultado de la sexta interacción de tubería de presión.....	51
Tabla 16. Resultado de la séptima interacción de tubería de presión.....	52
Tabla 17. Resultado de la octava interacción de tubería de presión.....	52
Tabla 18. Resultado de la novena interacción de tubería de presión.....	53
Tabla 19. Resultado de la décima interacción de tubería de presión.....	53
Tabla 20. Resultado de la décimo primera interacción de tubería de presión	54
Tabla 21. Resultado de la décimo segunda interacción de tubería de presión	54
Tabla 22. Resultado de la décimo tercera interacción de tubería de presión.....	55
Tabla 23. Resultado de la décimo cuarta interacción de tubería de presión.....	55
Tabla 24. Resultado de la décimo quinta interacción de tubería de presión	55
Tabla 25. Resultado de la décimo sexta interacción de tubería de presión	56
Tabla 26. Resultado de la décimo séptima interacción de tubería de presión.	56
Tabla 27. Resultado de la décimo octava interacción de tubería de presión.	57
Tabla 28. Resultado de la décimo novena interacción de tubería de presión.	57
Tabla 29. Resultado de la vigésima interacción de tubería de presión.....	58
Tabla 30. Resultado de la vigésima primera interacción de tubería de presión	58
Tabla 31. Resultado de la vigésima segunda interacción de tubería de presión.....	58
Tabla 32. Resultado de la vigésima tercera interacción de tubería de presión.....	59
Tabla 33. Resultado de la vigésima cuarta interacción de tubería de presión.	59
Tabla 34. Resumen de eficiencia del sistema por cada interacción	71
Tabla 35. Matriz de datos del diseño factorial experimental con las pérdidas de carga total en (m).....	72
Tabla 36. Análisis de varianza	76
Tabla 37. Resumen de modelo	78
Tabla 38. Presupuesto del Proyecto	95
Tabla 39. Matriz de consistencia.....	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Darcy-Weisbach	28
Ecuación 5. Factor de fricción.....	29
Ecuación 4. Número de Reynolds	30
Ecuación 7. Numero de cavitaciones	31
Ecuación 8. Ecuación de Bernoulli.	31
Ecuación 6. Pérdidas locales.	32
Ecuación 2. Hazen - Williams.....	32
Ecuación 3. Colebrook White.	33
Ecuación 9. Eficiencia de la turbina.....	34
Ecuación 10. Pérdidas de carga total.....	34
Ecuación 11. Energía mecánica.....	35
Ecuación 12 Eficiencia del generador eléctrico	35
Ecuación 13. Potencia de salida del generador eléctrico.....	35

INTRODUCCIÓN

La presente tesis, titulada “Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el Año 2024”, se enfocó en el estudio de las pérdidas de carga en la tubería de presión. Estas pérdidas, causadas principalmente por la fricción, generaron una disminución de la presión y la energía a lo largo del recorrido del agua, lo que afectó el desempeño del sistema. Comprender su impacto en la eficiencia del sistema fue fundamental para identificar oportunidades de mejora en la operación de la turbina y el generador. En este contexto, a través de la recopilación de información y la realización de simulaciones, se cuantificaron dichas pérdidas y se estableció su relación directa con la eficiencia eléctrica del sistema, lo que permitió proponer estrategias para optimizar su rendimiento. A través de la recopilación de información y la realización de simulaciones, se cuantificaron dichas pérdidas y se estableció su relación directa con la eficiencia eléctrica del sistema, lo que permitió proponer estrategias para optimizar su rendimiento.

El capítulo I, se presentó el planteamiento del problema, objetivos, justificación y limitaciones para la incógnita ¿De qué manera las pérdidas de carga en la tubería de presión impactan en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio?, siendo el objetivo principal, analizar el impacto de las pérdidas de carga en la tubería de presión sobre la eficiencia eléctrica del sistema.

En el capítulo II, se presentaron los antecedentes de la investigación, tomando en cuenta referencias bibliográficas y estudios previos realizados tanto en el ámbito nacional como internacional. Asimismo, se expusieron los principios teóricos vinculados a las pérdidas de carga y la eficiencia eléctrica.

En el capítulo III, se presentó la metodología empleada, especificando el tipo y alcance de la investigación, la muestra y población del estudio, así como las técnicas e instrumentos utilizados para la recopilación y el análisis de datos.

Por último, en el capítulo IV se expusieron los resultados junto con su respectiva interpretación, fundamentada en las simulaciones efectuadas a través de los softwares Epanet 2.0, Python y Minitab

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento del problema

Una investigación realizada en las Centrales hidroeléctricas Sjaak y Vrenga, ubicadas en el sur de Noruega, evidenció que las pérdidas de carga en la tubería de presión tuvieron un impacto directamente proporcional en la disminución del rendimiento de producción de energía. Se demostró que la reducción de estas pérdidas de carga conllevó una mejora significativa en la generación de energía eléctrica, alcanzando un incremento de hasta 1.8% respecto a la eficiencia inicial del sistema (1).

La investigación llevada a cabo en Colombia concluyó que, en el ámbito de las pequeñas centrales hidroeléctricas, las pérdidas de carga ocasionadas por la fricción en las tuberías de conducción a presión representaron hasta un 4.4 % del total de la energía bruta generada a lo largo de un período de 30 años (2). Este hallazgo subrayó la importancia de considerar las pérdidas de carga como un factor crítico en la evaluación de la eficiencia operativa y la viabilidad económica.

En una investigación realizada en la Minicentral Hidroeléctrica Huaura, ubicada en el distrito de Paccho, Perú, se evidenció que las pérdidas por fricción en la tubería de presión influyeron en la cantidad de potencia aprovechable, representando aproximadamente el 2.4 % de la energía efectivamente generada (3). Teniendo en cuenta esta cifra fue importante considerar las pérdidas de carga y su impacto en la generación de energía eléctrica.

La Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio, ubicada en Junín, habría experimentado pérdidas de carga en la tubería de presión, lo que pudo haber afectado su eficiencia eléctrica. Dichas pérdidas se generan principalmente por la fricción entre el flujo de agua y el material de la tubería, además de otros factores como rejillas, desarenadores, válvulas y accesorios. Con el tiempo, la erosión, la corrosión y el desgaste de los componentes hidráulicos tienden a incrementar estas pérdidas, afectando el rendimiento del sistema.

Debido a que todas las centrales hidroeléctricas experimentan pérdidas de carga en sus tuberías de presión, resultó fundamental analizar su impacto en la eficiencia y rentabilidad de la minicentral de Ingenio. Durante la recopilación de información, se observó que la central operaba por debajo de su capacidad en épocas de estiaje y avenida, lo que representó una reducción significativa. Por ello, el

estudio se enfocó en profundizar el análisis de las pérdidas de carga y su posible repercusión en la generación de energía.

1.2 Formulación del problema

Ante lo ya expuesto surgió la necesidad de comprender la relación entre las pérdidas de carga, que son inevitables en cualquier sistema hidráulico y la capacidad del sistema para transformar la energía potencial del agua en energía eléctrica utilizable y, de esta manera, responder a la incógnita planteada. ¿De qué manera las pérdidas de carga en la tubería de presión impactan en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio?

1.2.1 Problema general

¿De qué manera las pérdidas de carga en la tubería de presión impactan en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye el diámetro de la tubería de presión en la eficiencia eléctrica del sistema?
- ¿De qué manera la rugosidad interna de la tubería de presión influye en la eficiencia eléctrica de la minicentral?
- ¿En qué medida la longitud de la tubería de presión influye en la eficiencia eléctrica del sistema?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Analizar las pérdidas de carga que se dan en la tubería de presión para maximizar la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analizar la relación entre el diámetro de la tubería de presión y las pérdidas de carga, y evaluar su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema.
- Describir cómo la rugosidad interna de la tubería de presión influye en las pérdidas de carga y determinar su relación con la eficiencia eléctrica de la minicentral de Ingenio.
- Analizar la relación entre la longitud de la tubería de presión y las pérdidas de carga, y evaluar su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema.

1.4 Justificación

1.4.1 Técnica

La justificación técnica de esta investigación se fundamentó en la necesidad de aplicar un enfoque metodológico sólido que permita el estudio exhaustivo de las pérdidas por fricción en la tubería de presión de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio. Para lograrlo, se emplearon métodos de simulación y análisis de datos utilizando herramientas avanzadas como EPANET 2.0, Python y Minitab, que son ampliamente reconocidas en el ámbito de la ingeniería para evaluar el comportamiento hidráulico de sistemas complejos.

Asimismo, el análisis de datos mediante técnicas estadísticas como el análisis de varianza (ANOVA) permitirá procesar y comparar los resultados obtenidos en las simulaciones, generando patrones y correlaciones. De tal manera que se pudo explicar la relación entre las pérdidas de carga y el rendimiento del sistema. Este enfoque no solo garantizó la validez de las conclusiones, sino que también estableció las bases para el desarrollo de estrategias prácticas que pudieron ser implementadas con el propósito de mejorar la eficiencia operativa del sistema.

1.4.2 Económica

Al analizar las pérdidas de carga en la tubería de presión, se pudieron tomar decisiones y que el rendimiento de la central hidroeléctrica mejore, lo que se traduce en una mayor producción de energía con la misma cantidad de agua. Esto aumentó los ingresos generados por la venta de energía eléctrica y reducir los costos de operación y mantenimiento (4). Determinar la eficiencia de la minicentral hidroeléctrica de Ingenio tiene como efecto poder reducir los costos y tiempos de mantenimiento lo cual supone una mejora en la rentabilidad de la minicentral hidroeléctrica, ya que épocas de avenida o estiaje se podrá generar mayor energía lo cual representa mayores ganancias para la minicentral hidroeléctrica.

1.4.3 Teórica

La presente investigación se fundamentó en la aplicación de métodos reconocidos para el cálculo de pérdidas por fricción en la tubería de presión de la minicentral hidroeléctrica de Ingenio. En particular, se utiliza los métodos de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams, que son esenciales para determinar las pérdidas de carga generadas por la fricción en las tuberías. El método de Darcy-Weisbach es más valorado por su capacidad de considerar parámetros como la rugosidad de las tuberías y el tipo de flujo, lo que permite obtener estimaciones precisas en diversas condiciones operativas. Por otro lado, el método de Hazen-Williams, más simple y empírico, es eficaz para realizar cálculos rápidos en sistemas hidráulicos que manejan agua (5). Ambos enfoques son

incorporados dentro del software EPANET 2.0, el cual emplea estos métodos para simular el comportamiento del flujo y calcular las pérdidas en sistemas de conducción de agua.

1.4.4 Social

. La justificación social de esta tesis se centró en el impacto positivo que la optimización de la eficiencia eléctrica de la minicentral hidroeléctrica de Ingenio puede tener en la comunidad local y en el entorno regional.

Al mejorar la eficiencia del sistema, se incrementa la producción de energía, lo que puede traducirse en un suministro más continuo y accesible (5). Esto es especialmente relevante en áreas rurales como la zona donde se encuentra la minicentral en estudio, donde el acceso a la energía eléctrica es limitado y puede afectar el crecimiento económico y bienestar social de la comunidad.

1.4.5 Ambiental

Según el Comité de Operación Económica del Sistema (COES) en el año 2023, la generación de energía eléctrica peruana se constituyó en un gran porcentaje por el agua alcanzando un 47.72% de participación, esta fuente de energía primaria contribuye con la generación limpia y transición energética en el país, la MCH Ingenio es amigable con el medio ambiente, el agua turbinada de la minicentral se reutiliza para el aprovechamiento de la localidad, previamente haya sido purificada mediante filtros dicha agua. Esto justifica la importancia del análisis de pérdidas de carga que se da en la minicentral y que impide que esta opere con una mejor eficiencia. El impacto de este trabajo de investigación ayuda a alcanzar el objetivo de desarrollo sustentable (ODS) N°7 que hace referencia a la energía asequible y no contaminante, las minis centrales hidroeléctricas contribuyen con atenuar la brecha de oferta y demanda de electricidad en zonas rurales (5). Aunque la construcción de una minicentral hidroeléctrica puede tener un impacto ambiental significativo, existen justificaciones ambientales para la construcción de una minicentral hidroeléctrica que pueden minimizar estos impactos.

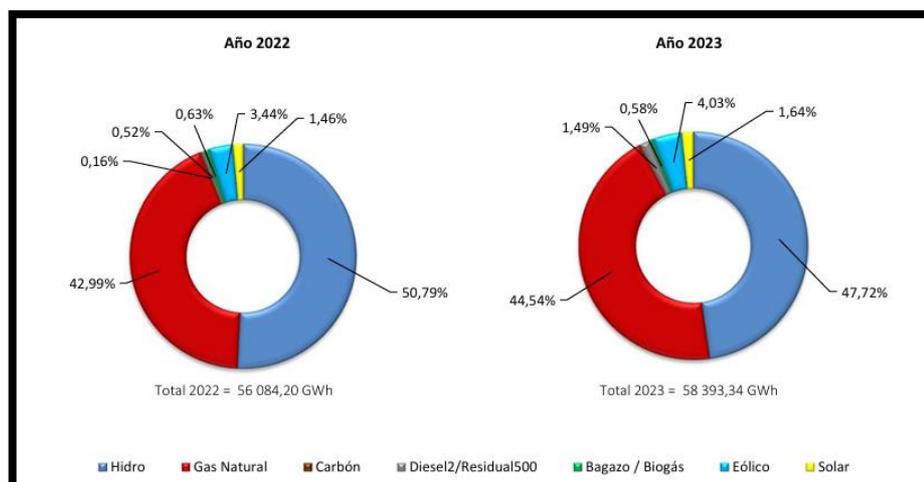


Figura 1. Participación de fuentes primarias en la generación de energía en el Perú en el año 2022 y 2023.

Fuente: Tomado de COES, 2023 (6)

1.5 Importancia de la investigación

El análisis de las pérdidas de carga en la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio resultó ser fundamental para garantizar una operación eficiente del sistema. La ausencia de un estudio detallado sobre estas pérdidas implica no solo una baja eficiencia operativa, sino también un déficit significativo en la producción de energía eléctrica, afectando directamente la capacidad de la minicentral para satisfacer la demanda energética de la comunidad local.

Esta investigación se propuso ofrecer un análisis cuantitativo riguroso que permitiera comprender cómo las pérdidas de carga impactaban el rendimiento del sistema. Al identificar y cuantificar estas pérdidas, se logró establecer una relación clara entre la fricción en las tuberías y la eficiencia en la conversión de energía del sistema.

El principal aporte de esta investigación radicó en la formulación de estrategias prácticas diseñadas específicamente para mitigar las pérdidas de carga. Estas estrategias no solo estaban orientadas a maximizar la eficiencia operativa, sino que también buscó incrementar la sostenibilidad económica de la minicentral, permitiendo alcanzar una mayor capacidad de generación bajo la misma condición operativa de caudal, lo que resultó esencial en un contexto de recursos hídricos limitados.

Mediante simulaciones precisas y modelado hidráulico, se desarrollaron recomendaciones concretas y basadas en datos obtenidos mediante el diseño propuesto y de manera efectiva. Este enfoque práctico proporcionó las herramientas necesarias para optimizar sus procesos y mejorar su rendimiento.

1.6 Limitaciones

Las limitaciones de esta investigación se centraron en varios aspectos siendo el más relevante la poca accesibilidad y disponibilidad a la información de las características del equipamiento y operación de la minicentral en estudio, otra limitación radicó en la falta de recursos para realizar un estudio más amplio y llevar a cabo mejoras significativas en el sistema que puede limitar la implementación de recomendaciones basadas en los hallazgos de esta investigación.

1.7 Hipótesis

1.7.1 Hipótesis general

H1: Las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.

1.7.2 Hipótesis específicas

H1 a: Un incremento en el diámetro, de la tubería de presión mejora significativamente la eficiencia eléctrica del sistema.

H1 b: A menor rugosidad interna de la tubería de presión se produce un aumento significativo en la eficiencia del sistema eléctrico.

H1 c: A mayor longitud de tubería de presión se produce una disminución significativa de eficiencia eléctrica en el sistema.

1.8 Descripción de variables y operacionalización de variables

Tabla 1. Operacionalización de variables

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES				
Autor	Lulo Rivera Jean Piero			
Título	“Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.”			
Problema	¿De qué manera las pérdidas de carga en la tubería impactan en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio?			
	Independiente		Dependiente	
Variables	Pérdidas de carga en la tubería de presión		Eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.	
Definición conceptual	Las pérdidas de carga en la tubería de presión representan la pérdida de presión y energía a lo largo de la conducción del agua debido a la fricción, la turbulencia y los obstáculos dentro de la tubería (7).		La eficiencia eléctrica se refiere a la capacidad del sistema hidroeléctrico para convertir la energía potencial del agua en energía eléctrica, minimizando las pérdidas de energía a lo largo del proceso(5).	
Definición operacional	Las pérdidas de carga se medirán como la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la tubería, y se expresarán en términos de pérdida de energía (en vatios) o pérdida de presión (en metros de columna de agua o pascales) (5).		La eficiencia eléctrica se medirá como el porcentaje de energía eléctrica generada respecto a la energía potencial teórica disponible en el agua que fluye a través del sistema de tuberías y turbinas (5).	
Hipótesis (Si es el caso)	H1: Las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.			
Variable independiente	Pérdidas de carga en la tubería.			
Dimensiones o sub variables	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Diámetro de la tubería	Medida transversal del conducto hidráulico presurizado. Afecta la velocidad del flujo y, por ende, las pérdidas de carga.	m	numérica continua	Hoja de datos
Rugosidad del material de la tubería	Irregularidades en la superficie interna de la tubería que generan fricción y afectan la pérdida de carga.	μm	numérica continua	Hoja de datos
Longitud de la tubería de presión	Medida longitudinal de la tubería de presión. A mayor longitud, podría producirse mayores pérdidas por fricción.	m	numérica continua	Hoja de datos
Caudal	Flujo de agua que recorre cierta sección transversal. Un caudal alto puede aumentar las pérdidas de carga.	m ³ /s	numérica continua	Hoja de datos
Variables Dependiente	Eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.			
Dimensiones o Sub Variables	Indicador	Unidad	Tipo de variable	Instrumento
Eficiencia de la turbina	Porcentaje de conversión de energía hidráulica en energía mecánica. Disminuye si las pérdidas de carga son elevadas.	%	numérica continua	Simulador Python.
Eficiencia del generador	Rendimiento del generador en la conversión de energía mecánica en eléctrica. Afectado por la reducción de potencia entregada por la turbina.	%	numérica continua	Simulador Python.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del problema

2.1.1 Artículos científicos

Tabla 2. Resumen de artículos científicos revisados

Autores /Año	Título	Modelo
Alie Wube Dametew	“Diseño y Análisis de Pequeñas Hidroeléctricas para Electrificación Rural”(7).	Modelo de investigación aplicada, centrado en evaluar recursos hídricos y proponer soluciones prácticas para mejorar el acceso a la energía en comunidades rurales.
HOUNNOU Amédédjihundé Hypolite Jordão , FIFATIN François-Xavier , DUBAS Frédéric , CHAMAGNE Didiery VIANOU Antoine	“Dimensionamiento tecno económico de tubería forzada para micro central hidroeléctrica mediante algoritmos genéticos”(8).	El modelo de investigación utilizado en este estudio es la optimización multiobjetivo mediante algoritmos genéticos NSGA II.
Isaí Álvarez-Sevilla , Oscar Brown-Manrique , Erika Paola del Cid-Colindres	“Modelos matemáticos para la estimación de variables hidroenergéticas en la cuenca del río Suchiate, Guatemala”(9).	El modelo de investigación utilizado en este estudio es una combinación de modelos de regresión polinomial y lineal múltiple, aplicados para estimar variables hidroenergéticas en la cuenca del río Suchiate en Guatemala.
Vinicio Palomeque , Ismael Valdez , Nelson Jara y Fran Reinoso	“Diseño de una minicentral hidroeléctrica” (10).	Datos estadísticos y cálculos numéricos acerca de una minicentral hidroeléctrica.
DavidJarry-Bolduc y Emmanuel Côté	“Generación de energía hidroeléctrica e instrumentación y medición: pruebas de eficiencia de plantas hidroeléctricas” (11).	Análisis acerca de la generación hidroeléctrica con pruebas de eficiencia.
Juan Garrido , Ángel Zafra , Francisco Vázquez	“Modelado y simulación de centrales hidráulicas”(12).	Datos estadísticos y diseño de centrales hidráulicas.
M. Waskaasa , v.daujotisb , ke wöldena , r. Raudonisby . Plausinaitisb	“Reducción de la caída de presión para el flujo de la tubería debido a los potenciales eléctricos aplicados a la tubería” (1).	Modelo experimental en laboratorio y a escala real.

Autores /Año	Título	Modelo
Francisco Wellington Martins da Silvae , José Roberto Camacho, Jacson Hudson e Ignácio Ferreira	“Análisis de pérdidas hidráulicas en la serie de 1990 a 2022 en la pequeña central hidroeléctrica Retiro”(13).	Modelo matemático y análisis estadístico de datos históricos de caudal.
Viktor Iliev, Predrag Popovski, Zoran Markhuevo	“Análisis de Fenómenos Transitorios en Centrales Hidroeléctricas en condiciones de funcionamiento fuera de diseño”(14).	Numérico validado con datos experimentales para analizar fenómenos transitorios.
Sepetci, G., Cetinturk, H., Ozkan, SY, Yuksel, SO, Karadeniz, C., Celebioglu, K., Tascioglu, Y., Aradag, S.	“Diseño conceptual de una central hidroeléctrica para rehabilitación proyecto” (15).	Modelo de investigación basado en simulaciones computacionales y análisis transitorios.

Fuente: Elaboración propia

La investigación de Dametew (7), se analizó la viabilidad de pequeñas hidroeléctricas para la electrificación rural en Etiopía, considerando la creciente demanda energética proyectada para 2040, la cual requerirá un incremento de generación 25 veces mayor que en 1990. A través de estudios de planificación y evaluación de sitios, se identificó que el gobierno ha priorizado centrales de mediana escala (40-60 MW) en lugar de grandes proyectos debido a su menor inversión y tiempo de construcción. Se determinaron áreas con alto potencial hidroeléctrico en las cuencas de los ríos Tekeze, Gojeb y Abbay, donde se realizan estudios de viabilidad. Además, se estimó que una familia rural podría cubrir sus necesidades con 4 kWh diarios, validando la eficiencia de este modelo energético. En conclusión, las pequeñas hidroeléctricas representan una solución sostenible y accesible para mejorar la calidad de vida, abordando la escasez de electricidad en el país.

Hounnou analizó el dimensionamiento técnico económico de tuberías forzadas en micro centrales hidroeléctricas de Benin mediante algoritmos genéticos NSGA II, con la finalidad de mejorar el rendimiento y reducir costos de inversión. Se evaluaron tres sitios: Affon, Bétérou y Vossa, identificando diámetros óptimos de 1.494 m, 3.491 m y 1.778 m, respectivamente, con ratios de rentabilidad variables. Se concluyó que una longitud mínima de 100 m en la conducción forzada contribuyó a mejorar la eficiencia sin generar costos adicionales innecesarios. Además, las curvas del frente de Pareto evidenciaron una relación logarítmica entre el costo y el rendimiento, confirmando que mayores eficiencias requieren mayores inversiones. En conclusión, la

optimización multiobjetivo permite un diseño eficiente de tuberías forzadas, equilibrando costos y rendimiento para un desarrollo hidroeléctrico sostenible (8).

En la investigación realizada por Álvarez et al. (9), se implementaron modelos de regresión matemática con el propósito de calcular parámetros hidroenergéticos en la cuenca del río Suchiate, ubicada en Guatemala. El estudio analizó caudales entre 0.3 y 27.5 m³/s, alturas de salto bruto de 8.3 a 427.8 m, y tuberías con longitudes de 832 a 11,600 m y diámetros de 0.33 a 2.94 m. Estos parámetros permitieron determinar potencias entre 0.2 y 42.8 MW, clasificando las instalaciones en mini, medianas y grandes centrales. Los modelos de regresión alcanzaron coeficientes de determinación entre 0.72 y 0.99, evidenciando correlaciones significativas y explicando hasta el 99% de la variabilidad de los resultados. Además, el error porcentual medio osciló entre 3.4% y 18.4%, validando la precisión de los modelos. Se estableció que la correlación entre la altura del salto bruto y el caudal de diseño sigue un modelo exponencial, presentando coeficientes de determinación mayores a 0.97, salvo en el caso de potencias de 1 MW, donde se obtuvo un valor de 0.76. Estos hallazgos destacan la utilidad de los modelos de regresión como herramientas clave para el diseño de centrales hidroeléctricas, integrando factores geomorfológicos, litológicos y climáticos.

El estudio realizado por Palomeque et al., titulado “Diseño de una minicentral hidroeléctrica”, propuso el modelamiento de una central para abastecer de energía eléctrica a la empresa florícola “Plantaciones Malima Cía. Ltda.”. Para ello, se inició con la determinación de la potencia requerida mediante técnicas estadísticas, obteniendo valores máximos de 118.597 kWh y mínimos de 73.037 kWh. Posteriormente, se calculó el caudal del río Paute, que alcanza los 34 m³/s, de los cuales se destinaron 8.93 m³/s para la generación hidroeléctrica. Con base en estos valores, se determinó un salto neto de 27 metros y se seleccionó una turbina Michelle-Banki, debido a su eficiencia en condiciones de caudales variables. Como resultado, se concluyó que el diseño podía abastecer el requerimiento energético de la empresa dentro del rango estimado, estableciendo una cota de cámara de arena de 0.3 metros para un funcionamiento óptimo y confirmando que el modelo de turbina adecuado para este sistema es la Michelle-Banki R389 (10).

El estudio realizado por Bolduc y Côté., titulado “Generación de energía hidroeléctrica e instrumentación y medición: pruebas de eficiencia de plantas hidroeléctricas” (2022), analizó la relevancia de la generación hidroeléctrica y los métodos de medición utilizados para evaluar la eficiencia de una turbina y un generador eléctrico. El estudio abarcó la medición de la energía de salida, las pérdidas en el generador y la potencia de entrada. Los resultados indicaron que, si bien

las unidades de generación cuentan con sensores de monitoreo destinados al mantenimiento y la seguridad de la estación, estos no son suficientes para realizar mediciones de aceptación. Se determinó que la evaluación precisa de la eficiencia requiere el uso de instrumentación especializada y técnicas avanzadas de medición (11).

El estudio realizado por Garrido y Vázquez., titulado “Modelado y simulación de centrales hidráulicas” (2017), analizó la simulación de centrales hidroeléctricas utilizando los softwares EcosimPro y Visual BASIC, tomando como referencia la central hidroeléctrica de Villafranca en Córdoba. A través de este modelo, se permitió la selección del número de grupos hidroeléctricos, así como la obtención de datos clave, como caudales, presiones en las tuberías de fuerza, rendimiento y pérdidas en los componentes. Los resultados fueron satisfactorios, destacando que para un caudal de 30 m³/s se logró una generación de 2475 kW, un rendimiento del distribuidor del 89% y una cota de 1118,45 m.s.n.m. (12).

El estudio realizado por Waskaasa et al. (1), titulado “Reducción de la caída de presión para el flujo de la tubería debido a los potenciales eléctricos aplicados a la tubería”, analizó el impacto de la aplicación de potenciales eléctricos en la disminución de la caída de presión en tuberías, mejorando la eficiencia energética en centrales hidroeléctricas. Se llevaron a cabo experimentos en laboratorio y en las centrales de Vrenga y Sjaak en Noruega. Los resultados iniciales indicaron que, tras aplicar un potencial de corriente continua (CC) de 1,1 V, la pérdida de carga disminuyó. En la central de Sjaak, se redujo de 17,49 m a 17,18 m después de nueve meses, representando una mejora del 1,77%. En Vrenga, la reducción fue de 6,1 m tras 54 meses, aumentando la eficiencia del flujo en un 13,7%. Además, la corriente eléctrica disminuyó de 1,5 mA a 0,9 mA, lo que evidenció que la polarización de la tubería recubierta de epoxi fue efectiva sin generar reacciones faradaicas. Se observó también que la polarización positiva de la tubería afectó la viscosidad de la capa de agua interfacial, favoreciendo la reducción de la caída de presión. Finalmente, se determinó que el potencial de circuito abierto de la tubería se mantuvo en -64 mV antes de la exposición, asegurando una polarización positiva a lo largo de toda la tubería, lo que sugiere un efecto directo en el régimen de flujo cercano a las paredes del conducto (1).

El estudio realizado por Wellington et al. (13), sobre la Pequeña Central Hidroeléctrica (CHPP) retiraron, y analizaron las pérdidas hidráulicas y la eficiencia energética en un período de 32 años (1990-2022). Se identificó que la potencia promedio simulada, considerando las pérdidas de carga, coincide con la potencia real entre enero y agosto, pero en meses de menor caudal, como septiembre y octubre, esta relación disminuye debido a factores externos como mantenimiento y eficiencia de la turbina. La investigación empleó una función multivariable para evaluar el

rendimiento de la turbina, relacionando el caudal y la altura neta del agua, evidenciando variaciones significativas según las condiciones operativas. Los resultados mostraron que la potencia máxima registrada fue de 14,19 MW en marzo, mientras que en septiembre se redujo a 0,81 MW. Además, se desarrollaron modelos matemáticos para cuantificar las pérdidas hidráulicas, proporcionando una base para mejorar la operación de la planta. Se concluyó que la eficiencia del sistema se ve afectada por el mantenimiento, por lo que se recomienda contar con dos unidades generadoras para garantizar la operatividad continua y optimizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

El estudio de Iliev et al. analizó los fenómenos transitorios en centrales hidroeléctricas bajo condiciones operativas fuera de diseño, desarrollando un modelo matemático unidimensional que incluye tuberías, válvulas y turbinas tipo Francis. Este modelo permitió simular eventos críticos como el golpe de ariete y el aumento de la velocidad de rotación, los cuales afectan significativamente la eficiencia energética de las plantas. La validación con datos experimentales mostró una precisión superior al 96%, confirmando la fiabilidad de los métodos computacionales en el análisis de estos fenómenos. Además, se identificaron valores de control esenciales, como límites de presión y velocidad, fundamentales para garantizar la seguridad en el diseño y operación de las centrales. Los resultados resaltan la importancia del modelado preciso para optimizar el rendimiento y reducir el riesgo de fallos en las instalaciones hidroeléctricas. Asimismo, el estudio destaca que la implementación de estos modelos en nuevas infraestructuras con configuraciones hidráulicas complejas podría mejorar la eficiencia en el uso de los recursos hídricos y aumentar la sostenibilidad en la generación de energía. Finalmente, la comparación entre los resultados numéricos y los datos experimentales reflejó discrepancias menores al 3,9%, demostrando la eficacia del enfoque propuesto (14).

El estudio de Sepetci et al., sobre la rehabilitación de una planta hidroeléctrica en Antalya evidenció mejoras significativas en la eficiencia energética y la potencia generada. Se determinó que la altura neta de la turbina alcanzaría 190,345 metros, optimizando el caudal para maximizar la producción de energía. La central cuenta con tres turbinas Francis verticales de 8,8 MW cada una, logrando una potencia total de 26,4 MW. Mediante la ecuación de Hazen-Williams, se analizaron las pérdidas de carga, permitiendo identificar áreas de mejora en la infraestructura. La eficiencia de las turbinas se estimó en un 92%, reflejando un avance respecto a los estándares previos. Además, los estudios transitorios indicaron que el golpe de ariete podría ser controlado eficazmente, reduciendo el riesgo de daños. La investigación también sugiere que la implementación

de tecnologías avanzadas de CFD podría incrementar la eficiencia del sistema en un 15-20%. Finalmente, la capacidad de la planta para adaptarse a variaciones en la carga y optimizar el rendimiento en distintas condiciones mejora la estabilidad en la producción de energía. (15).

2.1.2 Tesis

Tabla 3. Resumen de tesis

Autores	Tema	Modelo
Gino Benjamin Arechua de la Cruz	“Diseño hidráulico de la tubería de presión de la minicentral hidráulica Huaura, distrito de Pacho, provincia de Huaura, Lima”(3).	Método aplicado, explicativo de la MCH Huaura.
Silvia Lorena López Villayán	“Diseño hidráulico óptimo de la tubería forzada de la Central Hidroeléctrica Yuracyacu”(16).	Estudio metodológico acerca de la central hidroeléctrica.
Daniel Antonio Toro Martínez	“Evaluación Financiera de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctrica”(2).	Análisis de parámetros para la obtención de la eficiencia de la minicentral.
Henry Esteban Mendoza	“Diseño de la bocatoma, tubería forzada, y casa de máquinas para central hidroeléctrica en el río Yarumayo, provincia y región Huánuco”(17).	Estudio metodológico acerca de la eficiencia de la central hidroeléctrica.
Gerzon Fernando Yañez Vega	“Diseño hidráulico de la conducción forzada de la Central Hidroeléctrica Aricota 3”(18).	Análisis del diseño de una pequeña central hídrica
Diego Rodrigo Vásquez Ortega Fidel Marcelo Rayme Chalco	“Optimización del diámetro, diseño preliminar y simulación fluidodinámica de la tubería forzada de la minicentral hidroeléctrica hydrika 4”(19).	Estudio metodológico para el empleo de un sistema que mejore la eficiencia de la minicentral.

Autores	Tema	Modelo
Juan Alberto Calmet Soto	“Planificación y diseño de una pequeña central hidroeléctrica” (20).	Investigación aplicada, diseño de central hidroeléctrica pequeña.
Carbajal Cruzado, Sebastián Nerio	“Análisis de los parámetros de operación para determinar la eficiencia de la turbina Francis en la Minicentral Hidroeléctrica Huarandoza” (21).	Modelo de investigación aplicada con diseño no experimental, transversal y descriptivo.
Miguel Ángel Zamora Juárez	“Eficiencia de micro central hidroeléctrica relativa al dimensionamiento geométrico de la turbina”(22).	Modelo de investigación experimental con enfoque en optimización y simulación computacional.
Gina Maricela Tituaña Vásquez Elizabeth Stephanie torres Rivas	“Diseño de tubería de presión en centrales hidroeléctricas y análisis comparativo de tecnología de materiales acero y poliéster reforzado con fibra de vidrio” (23)	Corresponde a un modelo de investigación comparativa y aplicada, ya que se enfoca en comparar dos materiales específicos (poliéster reforzado con fibra de vidrio y acero).

Fuente: Elaboración propia

La tesis de Arechua, titulada “Diseño hidráulico de la tubería de presión de la minicentral hidráulica Huaura, distrito de Paccho, provincia de Huaura, Lima”, se desarrolló el diseño hidráulico de una tubería destinada a conectar la cámara de carga con la turbina en la casa de máquinas. Dicho diseño se fundamentó en el cálculo del diámetro óptimo, el diámetro más eficiente en términos económicos, el espesor de la tubería, así como la potencia generada y las pérdidas asociadas. Se utilizaron los criterios de Darcy-Weisbach para calcular la pérdida de carga en la tubería, obteniendo un valor de 2.843 m de columna de pérdida. Los resultados muestran una potencia generada de 234.6 kW, con una pérdida de 5.6 kW y un diámetro óptimo de 0.345 m (3).

La tesis de López, titulada “Diseño hidráulico óptimo de la tubería forzada de la Central Hidroeléctrica Yuracyacu”, plantea el aprovechamiento del río Yuracyacu y la quebrada Shilcahuanca para garantizar un sistema hidráulico eficiente. Se considera un caudal de

diseño de 2 m³/s y 0.40 m³/s respectivamente, con una caída bruta de 428.83 m, entre las cotas 2,346.73 msnm y 1,917.90 msnm, generando una potencia de 7 MW mediante dos unidades de 3.5 MW cada una. El sistema incluye una canal de agua de 4.67 km y una tubería forzada de 897.25 m. Los resultados obtenidos cumplen con los objetivos del estudio, determinando una pérdida por fricción de 10.55 m y un diámetro óptimo de 850 mm, lo que permite optimizar el rendimiento del sistema hidroeléctrico (16).

La tesis de Toro, titulada “Evaluación Financiera de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctricas”, analiza el impacto de la rugosidad interna de los materiales en las pérdidas por fricción. Utilizando como referencia una pequeña central hidroeléctrica convencional, se determinaron las pérdidas por fricción en tuberías de acero y en tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Los resultados indican que, en un período de 30 años, el valor presente de la pérdida de carga representa un 3.5% de la energía bruta aprovechable en tuberías de poliéster reforzado con fibra de vidrio y un 4.4% en tuberías de acero. Aunque estos valores porcentuales pueden parecer reducidos, pudieron influir en las decisiones de inversión en proyectos hidroeléctricos. Finalmente, se determinó que la pérdida total en la tubería forzada asciende a 11.99 m (2).

La tesis de Esteban, titulada “Diseño de la bocatoma, tubería forzada y casa de máquinas para central hidroeléctrica en el río Yarumayo, provincia y región Huánuco”, surge del interés de un grupo de estudiantes por las energías renovables. Como primer paso, se identificaron las coordenadas de la bocatoma para la construcción de la estructura y del desarenador. Posteriormente, se determinaron los caudales de diseño para evaluar la potencia generada. La compuerta existente, fabricada en acero ASTM A-36, cuenta con dimensiones de 5.65 m y 2.20 m, y será trasladada mediante una viga monorriel fabricada conforme a las normativas. Los resultados obtenidos incluyen un diámetro de tubería de 0.76 m y un espesor de plancha de 11.66 mm (≈12 mm). Finalmente, considerando la elevación hasta el eje de la turbina permite una generación de energía de 1.4742 MW (17).

La tesis de Yáñez, titulada “Diseño hidráulico de la conducción forzada de la Central Hidroeléctrica Aricota 3”, tiene como objetivo principal desarrollar el diseño hídrico de la tubería forzada de dicha central, localizada en la provincia de Jorge Basadre, Tacna. Además, busca fomentar el aprovechamiento de fuentes primarias de energía no contaminante y optimizar los recursos hídricos disponibles en la zona. La minicentral hidroeléctrica (MCH) cuenta con una configuración tipo cascada, utilizando el caudal residual de Aricota 2. Este diseño contribuye a mitigar el déficit energético en la región. Como resultado, se

determinaron pérdidas totales en la tubería forzada de 35.8 m, de las cuales 29.125 m corresponden al factor de fricción en la tubería. (18).

La tesis de Vásquez y Rayme, titulada “Optimización del diámetro, diseño preliminar y simulación fluidodinámica de la tubería forzada de la minicentral hidroeléctrica Hydrika 4”, se centra en mejorar la precisión del cálculo del diámetro interno de la conducción de presión considerando tres ratios clave que impactan en su costo: C_1 para la excavación en roca deteriorada, C_2 para la excavación en roca sólida y C_3 para la excavación destinada a apoyos y machones verticales. La distribución proporcional de estos costos en la estimación financiera de prefactibilidad del proyecto Hydrika 4 establece que el 26.4% corresponde a las excavaciones en roca deteriorada y sólida, mientras que el 47.1% se destina a la excavación de los elementos de apoyo. Como resultado de estos análisis, se determinó un diámetro óptimo de 1.05 metros para la tubería forzada (19).

En la tesis desarrollada por Calmet, titulada “Planificación y diseño de una pequeña central hidroeléctrica”, se analiza la viabilidad económica de una Pequeña Central Hidroeléctrica (PCH), destacando la eficiencia energética como un factor clave. El estudio considera un horizonte de 30 años, con una tasa de descuento del 12% y un periodo de construcción entre 2013 y 2015. A partir de 2016, los beneficios operativos incluyen la generación de energía y posibles ingresos adicionales por bonos de carbono, dado que la PCH estará conectada al sistema interconectado nacional. Los costos de operación anual abarcan gastos como personal (\$315,638), repuestos (\$31,564), pérdidas de energía (\$31,930), seguros (\$98,392) y uso de agua (\$50,502). El análisis de indicadores económicos como el Valor Actual Neto (VANE), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el periodo de recuperación del capital reflejan una estructura de costos eficiente, priorizando un retorno sostenible a largo plazo mediante una generación continua y estable, optimizando así el aprovechamiento de los recursos hídricos (20).

En la tesis de Carbajal y Nerio, titulada “Análisis de los parámetros de operación para determinar la eficiencia de la turbina Francis en la Minicentral Hidroeléctrica Huarandoza”, se evaluó la eficiencia de la Turbina Francis mediante la medición de parámetros operativos clave. Los datos recopilados incluyen un caudal de agua de 558.3 litros por segundo y una altura neta disponible de 32 metros. Los resultados técnicos muestran que la turbina opera al 57.5% de su capacidad instalada debido a una desalineación entre la altura y el caudal actuales frente a los parámetros óptimos de diseño. La potencia máxima generada alcanzó 163.05 kW con una eficiencia del 93%, lo que indica un alto desempeño en la conversión

energética, aunque el rendimiento global del sistema está limitado por condiciones hidráulicas subóptimas. Además, se identificó que la capacidad instalada de la turbina podría mejorar ajustando los parámetros del sistema hidráulico, como aumentar la altura neta o modificar el caudal, lo que incrementaría la generación de energía. El análisis también reveló que las pérdidas por fricción en el sistema de tuberías y el diseño del tubo de admisión afectan la eficiencia total del sistema. Se sugiere optimizar la infraestructura, mejorar el diseño del tubo de admisión y realizar un mantenimiento preventivo para reducir pérdidas energéticas. Asimismo, se recomienda evaluar la instalación de sistemas de control automatizados que ajusten dinámicamente el funcionamiento de la turbina a las condiciones de flujo, lo que pudo contribuir al aumento de la eficiencia operativa y a la optimización de la producción de energía renovable en la minicentral (21).

En la tesis titulada “Eficiencia de micro central hidroeléctrica relativa al Dimensionamiento geométrico de la turbina” desarrollada por Zamora, se evaluó el rendimiento de un microcentro hidroeléctrico utilizando un sistema de cosecha de lluvia y una turbina tipo Pelton, diseñada para operar en una zona urbana en Toluca, México. Los resultados numéricos obtenidos a partir de la modelación y pruebas experimentales destacaron variables clave relacionadas con la eficiencia energética. La turbina, con un diámetro de 0.4004 m, fue optimizada mediante simulaciones de mecánica de Fluidos Computacional (CFD), permitiendo ajustar parámetros geométricos como el diámetro de la turbina, el número de boquillas y las características de las válvulas y compuertas del sistema hidráulico. A través de CFD, se analizaron variaciones de velocidad y presión en la turbina, lo que permitió predecir la eficiencia esperada en función del flujo de agua. El sistema alcanzó una eficiencia máxima del 81.13%, demostrando un desempeño notable en comparación con sistemas de micro generación hidroeléctrica de pequeña escala. Además, se implementó un circuito electrónico para registrar datos operativos, como las r.p.m de la turbina, permitiendo estimar la cantidad de energía producida y analizar la variación de voltaje y corriente en función de las condiciones de operación. En términos de eficiencia energética, la optimización de la turbina mediante simulaciones CFD permitió identificar configuraciones geométricas que maximizan la conversión de energía potencial del agua en energía eléctrica. Esto es crucial para mejorar la viabilidad y eficiencia de sistemas de micro generación hidroeléctrica, especialmente en entornos urbanos. Aunque la eficiencia alcanzada no es la máxima posible, los resultados muestran que el sistema tiene un gran potencial como fuente viable de energía renovable a pequeña escala, contribuyendo a la generación de electricidad en zonas donde las fuentes tradicionales no son viables (22).

La investigación de Tituaña y Torres, titulada “Diseño de tubería de presión en centrales hidroeléctricas y análisis comparativo de tecnología de materiales acero y poliéster reforzado con fibra de vidrio”, analiza las ventajas y desventajas de ambos materiales en aplicaciones hidroeléctricas. Se concluyó que el poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP) ofrece beneficios significativos en términos de costos y facilidad de instalación, debido a su menor peso y a que los costos de instalación son entre 5 y 10 veces más bajos que los del acero en todas las centrales hidroeléctricas estudiadas. Sin embargo, a pesar de sus menores dimensiones y peso, el GRP presentó una resistencia y durabilidad en condiciones de alta presión inferiores a las del acero (23).

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica es una instalación que aprovecha en primera instancia la energía potencial que se genera al embalsar el agua en una presa, mediante una tubería de presión se canaliza el agua que se dirige a la casa de máquinas donde la turbina transforma la energía cinética del agua en energía mecánica y genera movimiento en el eje que conecta al generador eléctrico trifásico que se encarga de producir energía eléctrica trifásica (5). De acuerdo a la potencia que generen las centrales se clasifican en:

- Centrales hidroeléctricas de gran potencia: mayores de 10 MW de energía eléctrica.
- Minicentrales hidroeléctricas: que van de 1 MW a 10 MW.
- Micro centrales hidroeléctricas: menores de 1 MW de energía eléctrica.

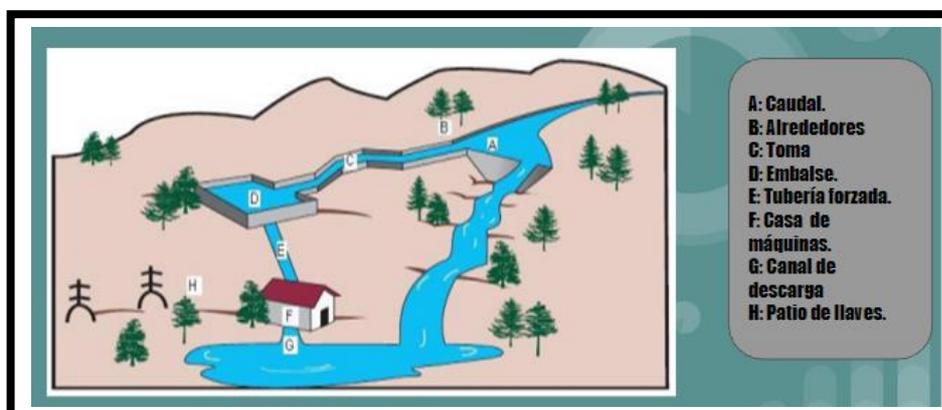


Figura 2. Partes de una central hidroeléctrica

Fuente: Tomado de Castro, 2020 (24)

2.2.1.1 Minicentral hidroeléctrica

Las mini centrales hidroeléctricas son las centrales que tienen una potencia instalada menos a 10 MW, este tipo de centrales durante los últimos años ha sido muy influyente en la producción de energía esto debido a su bajo costo de mantenimiento y operación es empleada para cubrir la demanda de energía en poblaciones alejadas o industrias que requieren cierta cantidad de potencia, este tipo de centrales contribuye con la atenuación de la brecha que existe entre la oferta y demanda de electricidad a nivel mundial, al ser una energía renovable convencional ayuda con la reducción de la emisión de GEI (24). existen 3 tipos de minicentrales hidroeléctricas:

- Central hidroeléctrica fluyente: Este tipo de central aprovecha el caudal del agua mediante conductos, una vez el agua sea turbinada y empleada para la generación eléctrica esta es devuelta a su cauce natural (24).
- Central de pie de presa: Esta central aprovechó la diferencia de altura existente entre la cámara de carga y la salida de la tubería de presión para generar energía (24).
- Central hidroeléctrica en canal de riego: Es una central que aprovecha la diferencia de altura que existe entre la cámara de carga y el desembogue de la tubería de presión (24).

2.2.1.1.1 Cámara de carga

Es el espacio de carga de una estructura hidráulica sedimentada en la cota más alta de la instalación en la cual se recauda el agua y se gana energía potencial, la cámara de carga juega un papel importante en la regulación del flujo de agua hacia la turbina. Cuando se conserva una presión estable en el sistema, la cámara de carga ayuda a garantizar que la turbina reciba un flujo de agua estable y constante, lo que es esencial para su funcionamiento eficiente (24).



Figura 3. Fotografía inédita de la Cámara de carga perteneciente a la minicentral hidroeléctrica Ingenio

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.2 Chimenea de Minicentral Hidroeléctrica

La chimenea es un componente fundamental en una minicentral hidroeléctrica, ya que su función principal es la de evacuar el aire y los gases que se acumulan en la conducción de presión y en la turbina. De esta manera, se evita la formación de bolsas de aire que podrían provocar una disminución en la eficiencia de la turbina, la chimenea es un elemento que requiere una atención especial en el mantenimiento y la inspección periódica (12). Dicho esto, en la Minicentral Hidroeléctrica de ingenio a la fecha la chimenea de evacuación no se encuentra operando debido a que requiere un mantenimiento correctivo.



Figura 4. Fotografía inédita de la chimenea perteneciente a la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.3 Tubería de presión

También llamada tubería forzada es un conducto cerrado utilizado en sistemas hidroeléctricos para transportar agua desde un embalse o río hasta la turbina hidráulica. La tubería de presión es diseñada para resistir altas presiones y velocidades del agua, y puede ser construida en diferentes materiales como acero, concreto o PVC. Las pérdidas de carga en la tubería de presión pueden afectar el rendimiento del sistema hidroeléctrico y se deben minimizar a través de un diseño adecuado y mantenimiento regular. Es el medio de transporte del agua a alta presión desde la cámara de carga hasta su llegada a la turbina, controla el flujo del fluido que se dirige hacia la turbina (24).



Figura 5. *Fotografía inédita de la tubería de presión perteneciente a la Central Hidroeléctrica de Ingenio.*

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.4 Válvula de ingreso tipo mariposa

La teoría detrás de la válvula de ingreso tipo mariposa se basa en el principio de la regulación del flujo de fluidos. Cuando la válvula se abre, el disco giratorio se mueve hacia un lado, permitiendo que el agua fluya hacia la turbina. La cantidad de agua que fluye hacia la turbina se puede controlar ajustando la posición del disco giratorio (24).

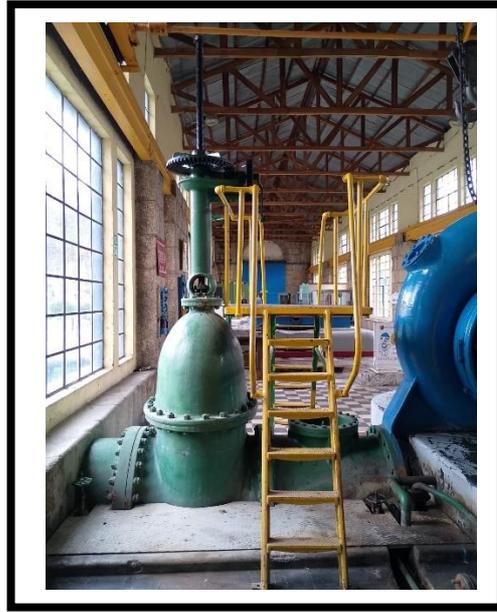


Figura 6. *Fotografía inédita de la válvula tipo mariposa de la Central Hidroeléctrica de Ingenio*

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.5 Casa de máquinas

Es una instalación que alberga los componentes que se encargan de convertir la energía mecánica a eléctrica, estos son la turbina y el generador síncrono trifásico, para su óptimo rendimiento es fundamental tener en cuenta la ubicación de esta estructura civil (24).

Una casa de máquinas es una estructura construida en una minicentral hidráulica que alberga las turbinas hidráulicas, los generadores eléctricos y otros equipos necesarios para la producción de energía hidroeléctrica. La casa de máquinas se encuentra en la base de la presa o en un lugar cercano al cauce del río, y se conecta con la tubería de presión que transporta el agua desde la presa hacia las turbinas. La casa de máquinas también puede contener equipos de control y monitoreo, sistemas de enfriamiento y sistemas de seguridad (5). Su diseño y construcción deben cumplir con estándares de seguridad y deben ser adecuados para soportar las cargas y presiones del agua en movimiento.

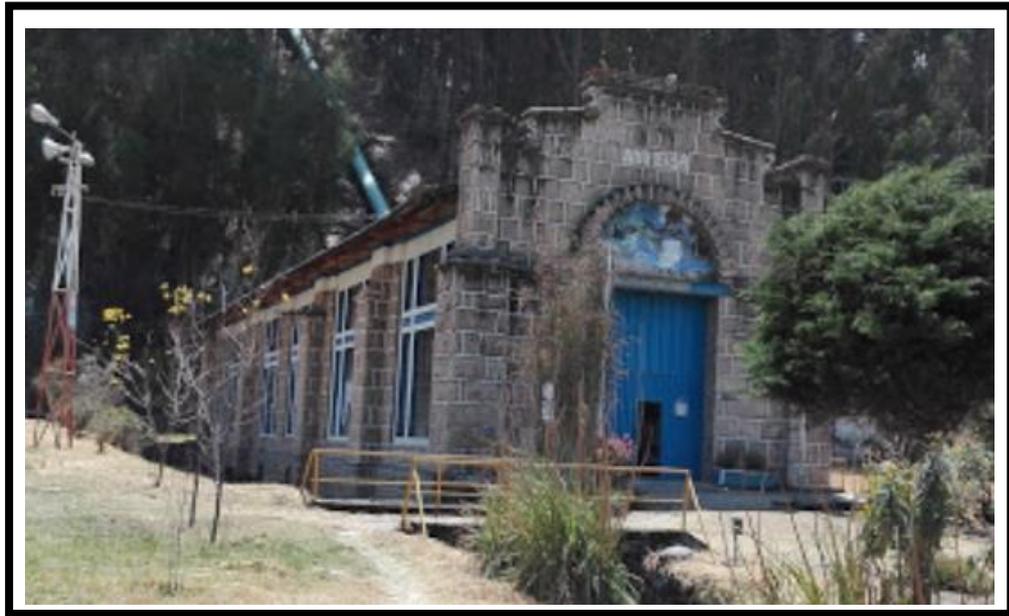


Figura 7. *Fotografía inédita de la casa de máquinas perteneciente a la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio*

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.6 Turbina hidráulica

Una turbina hidráulica es un mecanismo diseñado para transformar la energía contenida en el agua en energía mecánica, generando el movimiento rotatorio de un eje. Se compone de una carcasa, un rodete y una serie de álabes que están diseñados para aprovechar la energía cinética y potencial del agua que fluye a través de la turbina. La energía hidráulica se transfiere al rodete a través de los álabes, que aceleran el agua y cambian su dirección para generar una fuerza en el rodete. La rotación del rodete se transmite a un eje que, a su vez, puede conectarse a un generador eléctrico o a cualquier otro tipo de equipo mecánico que requiera energía. Las turbinas hidráulicas pueden clasificarse en diferentes tipos según su diseño y aplicación, como turbinas de acción, turbinas de reacción, turbinas Pelton, turbinas Francis y turbinas Kaplan. Son ampliamente utilizadas en la generación de energía eléctrica a partir de fuentes hidroeléctricas, y también pueden utilizarse para otros fines, como la irrigación y el bombeo de agua (25).

- Tipos de turbinas:
 - Turbina Francis: flujo semi axial de flujo radial y de reacción.
 - Turbina Pelton: flujo tangencial y de acción.
 - Turbina Kaplan: flujo axial y de reacción



Figura 8. *Fotografía inédita de la turbina Francis perteneciente a la central Hidroeléctrica de Ingenio*

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.7 Generador síncrono

Un generador trifásico síncrono es un tipo de generador eléctrico que genera una salida de corriente alterna trifásica sincronizada con la frecuencia de rotación del rotor del generador. El rotor es excitado con una corriente continua y está diseñado para girar a una velocidad constante. La tensión de expulsión del generador depende del campo magnético del rotor y de la velocidad de rotación. La eficiencia del generador trifásico síncrono está relacionada con varias pérdidas, incluyendo las pérdidas en el cobre de los devanados, en el hierro del estator y del rotor, en mecánicas, en las pérdidas de enfriamiento, y las eléctricas en los dispositivos de control. Las pérdidas por fricción en el conducto de presión no tienen un impacto directo en la eficiencia del generador, pero sí pueden afectar el volumen de agua que va a las turbinas hidráulicas y, por lo tanto, la cantidad de energía eléctrica que se puede generar (24).



Figura 9. *Fotografía inédita del generador síncrono trifásico perteneciente a la perteneciente a la Central Hidroeléctrica de Ingenio.*

Fuente: Elaboración propia

2.2.1.1.8 Transformador

Un transformador es una máquina eléctrica estática que se constituye por dos o más bobinas, estas bobinas o también llamados devanados (normalmente) no están conectadas en forma directa, la única conexión entre ellas es el flujo magnético, una de las bobinas del transformador está conectado a la fuente de respaldo, mientras que la segunda bobina o la tercera proporciona energía a la carga que se encargan de elevar o reducir el voltaje y corriente, esto según sea necesario, en la acción de transmisión donde se eleva la tensión a la salida de la generación para reducir la corriente de transmisión que fluye por las líneas y así tener que emplear conductores de menor sección y sea más óptima la transferencia de energía de un punto a otro, un transformador cuando realiza la acción de distribución se encarga de reducir la tensión para que esta sea de fácil empleo en las residencias (25).



Figura 10. *Fotografía inédita del transformador de potencia perteneciente a la MCH de Ingenio.*

Fuente:(26)

2.2.2 Pérdidas de carga

Las pérdidas de carga representan la reducción de energía o presión en un fluido a medida que circula por una tubería o sistema hidráulico. Estas pérdidas surgen debido a la fricción entre el fluido y las paredes del conducto, así como por turbulencias generadas en accesorios como codos, válvulas y reducciones. Se miden en metros de columna de agua (m.c.a) y son un factor clave en el diseño y eficiencia de sistemas de transporte de fluidos, ya que influyen en el consumo energético y el rendimiento de bombas y turbinas (27).

2.2.2.1 Factores que afectan las pérdidas de carga

Las pérdidas de carga en la tubería de presión pueden ser causadas por varios factores. A continuación, se presentan los factores que afectan las pérdidas de carga en la tubería de presión, utilizando las variables diámetro interno, rugosidad del material de la tubería, longitud de la tubería y caudal (27).

2.2.2.1.1 Diámetro interno de la tubería de presión

El diámetro interno de la tubería es un factor importante que afecta las pérdidas de carga. A medida que el diámetro interno de la tubería disminuye, las pérdidas de carga aumentan. Esto se debe a que la velocidad del fluido aumenta a medida que el diámetro interno de la tubería disminuye, lo que provoca una mayor resistencia al flujo y, por lo tanto, una pérdida de carga mayor (27).

2.2.2.1.2 Rugosidad de la tubería de presión

La rugosidad de una tubería de presión en centrales hidroeléctricas es un parámetro que mide la aspereza de la superficie interna de la tubería. Es la irregularidad de la superficie interna de la tubería que puede causar turbulencias en el flujo de agua y aumentar la resistencia al flujo de agua en la tubería y se mide en micrómetros (27).

Tabla 4. Valores de rugosidad según el tipo de materiales

Material tubería	Rugosidad (e) μm
PE, PVC	0.15
PRFV	0.1
Tubos estirados de acero	0.024

Material tubería	Rugosidad (e) μm
Latón o cobre	0.15
Fundición revestida de cemento	0.24
Fundición con revestimiento bituminoso	0.0024
Fundición centrifugada	0.3
Fundición asfaltada	0.6-0.18
Fundición	0.12-0.6
Hierro inoxidable acabado estándar	0.5
Hierro galvanizado	0.6-0.5
Hormigón	0.3-3

Fuente: Recuperado López, 2014 (16)

2.2.2.1.3 Longitud de la tubería de presión

La longitud de la tubería es la distancia total que recorre un fluido dentro de una conducción desde un punto de inicio hasta un punto de destino (5).

2.2.2.1.4 Caudal

El caudal es otro factor importante que afecta las pérdidas de carga en la tubería de presión. A medida que el caudal aumenta, las pérdidas de carga también aumentan. Esto se debe a que la velocidad del fluido aumenta a medida que el caudal aumenta, lo que provoca una mayor resistencia al flujo y, por lo tanto, una mayor pérdida de carga por fricción (11).

2.2.2.2 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Darcy-Weisbach

Las pérdidas por fricción en una tubería de presión son una disminución de la presión del agua que ocurre debido a la resistencia que presenta la tubería al paso del líquido. Esto se debe a fricción, cambios de dirección y otros factores. Estas pérdidas son una importante consideración en el diseño de sistemas hidráulicos, ya que pueden disminuir la eficiencia del transporte de agua y afectar el rendimiento de la turbina hidráulica (27).

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

Ecuación 1. Darcy-Weisbach

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

hf: Pérdida de carga por fricción (m)

f: Factor de fricción Darcy (cte.)

L: Longitud de la tubería (m)

D: Diámetro interno de la tubería (m)

u: Velocidad media del fluido (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

2.2.2.2.1 Factor de fricción

El factor de fricción en una tubería de presión es un parámetro importante para determinar las pérdidas de carga en la tubería y rendimiento de la central hidroeléctrica. Se define como la relación entre la fuerza de fricción y la fuerza de inercia en el flujo de fluidos en la tubería. A medida que aumenta el factor de fricción, aumentan las pérdidas de carga y disminuye la eficiencia de la central hidroeléctrica. El factor de fricción puede ser influenciado por varios factores, como el diámetro de la tubería, la velocidad del fluido, la rugosidad de la superficie interna de la tubería y las propiedades del fluido. En general, cuanto mayor sea la velocidad del fluido o la rugosidad de la superficie interna de la tubería, mayor será el factor de fricción (27).

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \cdot \frac{\varnothing}{\varepsilon}} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2}$$

Ecuación 2. Factor de fricción

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

f: Factor de fricción (cte.)

∅: Diámetro interno de la tubería (m)

ε: Rugosidad (cte.)

Re: Número de Reynolds (cte.)

2.2.2.2.2 Número de Reynolds

El número de Reynolds sirve como criterio para anticipar el cambio entre un régimen de flujo laminar y uno turbulento. Cuando este valor se encuentra por debajo de un umbral crítico, el flujo es laminar y las partículas de fluido circulan en capas paralelas. Cuando el número de Reynolds es mayor que el valor crítico, el flujo se vuelve turbulento y las partículas de fluido se mezclan y giran en todas las direcciones. En el caso de las pérdidas de carga en tuberías de fuerza de una central hidroeléctrica, el número de Reynolds es importante porque puede afectar el factor de fricción en la tubería. En general, cuanto mayor sea el número de Reynolds, mayor será la turbulencia en el flujo de agua y, por lo tanto, mayor será el factor de fricción y las pérdidas de carga en la tubería (27).

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$$

Ecuación 3. Número de Reynolds

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

Re: Número de Reynolds (cte.)

D: Diámetro de la tubería (m)

v: Velocidad del fluido (m/s)

μ : Viscosidad del fluido (m²/s)

ρ : Densidad del fluido (g/cm³)

2.2.2.2.3 Número de cavitaciones

El número de cavitación (σ) es un parámetro adimensional que indica la tendencia de un fluido a experimentar cavitación dentro de un sistema hidráulico. Se define como la relación entre la presión local del fluido y la presión de vapor, en función de la presión dinámica del flujo. Si el número de cavitación es demasiado bajo ($\sigma < 1$), existe una alta probabilidad de que la presión del fluido caiga por debajo de la presión de vapor, lo que da lugar a la formación de burbujas de cavitación y contribuye a un aumento en las pérdidas de carga independientemente de la longitud de la tubería de presión (9).

$$\sigma = \frac{P_{local} - P_v}{0,5 \rho V^2}$$

Ecuación 4. Numero de cavitaciones

Fuente: Tomado de Cotos, 2019 (27).

Donde:

σ : Número de cavitación. (cte.)

P_{local} : Presión estática del punto analizado (Pa)

P_v : Presión de vapor de fluido (Pa)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

V : Velocidad del fluido (m/s)

2.2.2.2.4 Balance energético en flujos a presión

La ecuación de Bernoulli es un principio fundamental en la mecánica de fluidos que establece que, en un flujo incompresible y sin fricción, la energía total de un fluido permanece constante a lo largo de una línea de corriente. Este balance energético considera la presión, la energía cinética y la energía potencial del fluido, permitiendo analizar cómo varían estas magnitudes entre dos puntos de un sistema hidráulico (27).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f + h_l$$

Ecuación 5. Ecuación de Bernoulli.

Fuente: Tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

P_1, P_2 : Presión en los puntos 1 y 2 (Pa).

V_1, V_2 : Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2 (m/s)

z_1, z_2 : Altura en los puntos 1 y 2 (m)

γ : Densidad del fluido (kg/m³)

g : Aceleración gravitacional (9.81 m/s²)

h_f : Pérdidas de carga por fricción (m)

h_l : Pérdidas de carga locales (m)

2.2.2.3 Pérdidas locales

Las pérdidas locales, también llamadas pérdidas menores, corresponden a la disminución de energía en un sistema de tuberías debido a alteraciones en su geometría, como la presencia de codos, reducciones, expansiones o derivaciones. Estas pérdidas surgen a raíz de la generación de turbulencias y vórtices en el flujo, ocasionados por las irregularidades en el recorrido del fluido (27).

$$hl = K \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 6. Pérdidas locales.

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

hl: Pérdidas locales (m).

K: Coeficiente de pérdidas locales, se recomienda emplear el valor de 0.3 para derivaciones y 0.2 para codos según Cotos (11)

V: Velocidad del fluido (m/s)

g: Aceleración gravitacional (9.81m/s²)

2.2.2.4 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Hazen-Williams

La ecuación de Hazen-Williams es una expresión de tipo empírico empleada para estimar las pérdidas de presión ocasionadas por la fricción en sistemas de tuberías. Esta ecuación se basa en la teoría de que la pérdida de carga por fricción es directamente proporcional a la longitud de la tubería, inversamente proporcional al diámetro de la tubería y dependiente de la rugosidad de la tubería y del caudal que fluye a través de ella (27).

La ecuación de Hazen-Williams se puede expresar de la siguiente manera:

$$h = 10,674 \cdot \frac{Q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{4,871}} \cdot L$$

Ecuación 7. Hazen - Williams

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

h: Pérdidas de carga (m/km)

Q: Caudal (m³/s)

D: Diámetro de la tubería (m)

L: Longitud de tubería (m)

2.2.2.5 Pérdidas de carga en la tubería de presión por fricción mediante Colebrook-White

La fórmula de Colebrook-White es una ecuación que se utiliza para calcular las pérdidas de carga por fricción en tuberías. La ecuación de Colebrook se basa en que la pérdida por fricción es directamente proporcional a la longitud del conducto y a su vez inversamente proporcional al diámetro de esta y dependiente de la rugosidad de la tubería y del caudal que fluye a través de ella (27).

La ecuación de Colebrook-White se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3,7D + d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Ecuación 8. Colebrook White.

Fuente: tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

f: Factor de fricción (cte.)

d: Diámetro de la tubería (m)

Re: Número de Reynolds (cte.)

ε: Rugosidad de la tubería de presión (mm)

2.2.3 Eficiencia

La eficiencia en las máquinas eléctricas está relacionada con la división de la energía de salida entre la energía de ingreso, solo teóricamente se podría considerar que ambas energías son iguales, Dado que en condiciones reales se presentan pérdidas energéticas, este comportamiento se rige por el principio de conservación de la materia, el cual

establece que esta no se genera ni desaparece, sino que únicamente cambia de forma, en las máquinas eléctricas como el generador y el transformador existen pérdidas del tipo: Pérdidas en el cobre debido a la resistencia que oponen los conductores y estas pérdidas son en forma de calor y tienen como nombre efecto Joule, también existen las pérdidas en el núcleo, pérdidas misceláneas (7).

2.2.3.1 Eficiencia de la turbina

La eficiencia de una turbina hidráulica está influenciada por varios factores, incluyendo la tubería de presión, por donde fluye el agua desde el embalse hacia la turbina, se generan pérdidas de carga a lo largo del recorrido y, posteriormente, hacia el canal de descarga. Cuando el agua fluye a través de la tubería de presión, se producen pérdidas de carga debido a la fricción del agua con las paredes internas de la tubería, los cambios de dirección y otros componentes del sistema (11). Estas pérdidas de carga reducen la energía disponible para la turbina y disminuyen su eficiencia.

$$\eta_t = \frac{(H_t - H_l)}{H_t}$$

Ecuación 9. Eficiencia de la turbina

Fuente: tomado de Millán, 2000 (11)

Donde:

η_t : Eficiencia de la turbina (cte.)

H_t : Altura total de la cabeza disponible del sistema (m)

H_l : Pérdidas de carga total de la tubería (m)

$$H_l = h_f + h_l$$

Ecuación 10. Pérdidas de carga total.

Fuente: Tomado de Cotos, 2019 (27)

Donde:

H_l : Pérdidas de carga total en la tubería (m)

h_f : Pérdidas de carga por fricción (m)

h_l : Pérdidas de carga local (m)

$$P_{\text{elec}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_t \cdot \eta_t$$

Ecuación 11. Energía mecánica

Fuente: tomado de Castro, 2000 (24)

Donde:

P_{elec} : Potencia eléctrica producida (Watts)

Q : Caudal (m³/s)

H_t : Altura neta de la caída (m)

g : Aceleración de la gravedad (m/s²)

η_t : Eficiencia de la turbina hidráulica (cte.)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

2.2.3.2 Eficiencia del generador eléctrico

La eficiencia de un generador eléctrico en una central hidroeléctrica está relacionada con la eficiencia de la turbina hidráulica. La eficiencia de la turbina hidráulica es la relación entre la energía mecánica que se aprovecha y convierte en energía hidráulica y la energía total suministrada a la turbina por lo general el valor que toma esta variable es de aproximadamente 90% (5).

$$\eta_g = \frac{P_{\text{elec}}}{P_{n.t}}$$

Ecuación 12 Eficiencia del generador eléctrico

Fuente: tomado de Castro, 2020 (24)

Donde:

η_g : Eficiencia del generador eléctrico (cte.)

P_{elec} : Potencia eléctrica producida (Watts)

$P_{n.t}$: Potencia nominal de la turbina (Watts)

$$P_{\text{out}} = 1,73 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varnothing)$$

Ecuación 13. Potencia de salida del generador eléctrico

Fuente: tomado de Fuente: tomado de Castro, 2020 (24)

Donde:

Pout: Potencia de salida del generador eléctrico (Watts)

V: Tensión de línea (Voltios)

I: Corriente de línea (Amperios)

Cos (\emptyset): Factor de potencia del generador (cte.)

2.3 Definición de términos básicos

2.3.1 Máquina eléctrica

Dispositivo encargado de transformar energía, de acorde a su utilización (35) .

2.3.2 MCH

Minicentral hidroeléctrica.

2.3.3 Análisis de pérdidas de carga

Estudio del análisis de las pérdidas de energía en sistemas de conducción permite definir su impacto en la eficiencia del sistema (3).

2.3.4 M.c.a

Metros de columna de agua (7).

2.3.5 Energía

Capacidad que ofrece una máquina eléctrica para producir trabajo, su unidad es el Joule (24).

2.3.6 Potencia

Parámetro que indica la cantidad de energía transferida de una fuente a un consumidor, su unidad es el Watt (24).

2.3.7 Voltaje

Magnitud que mide la diferencia de potencial, su unidad de medida es el Voltio (25).

2.3.8 Corriente

Desplazamiento de electrones de u punto a otro, su unidad es el Amperio (25).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método de investigación

El presente trabajo de investigación “Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.” Se utilizó el método hipotético - deductivo. Según Hernández, Mendoza (28) este método parte de la formulación de hipótesis que intentan resolver el problema, las cuales son posteriormente contrastadas con la información disponible que se tiene mediante experimentos u observaciones, aceptando o rechazando la hipótesis según los resultados.

3.1.1 Enfoque

El enfoque cuantitativo se basa en la recopilación de datos con el propósito de comprobar hipótesis mediante técnicas de evaluación cuantitativa y estudios estadísticos, con el propósito de detectar tendencias en los datos y comprobar teorías de forma imparcial. (28).

El enfoque que se aplicó para el desarrollo de la presente tesis fue el cuantitativo, esto debido a que se formularon hipótesis a partir de la recopilación de datos y se estableció la relación entre pérdidas de carga y el impacto en la eficiencia eléctrica del sistema hidroeléctrico de ingenio.

3.2. Tipo de investigación

La investigación aplicada se enfoca en resolver problemas prácticos o mejorar procesos, también en identificar soluciones o recomendaciones prácticas para resolver un problema específico, pero no necesariamente implica que se implementen las recomendaciones o soluciones identificadas, esto dependerá de la disponibilidad de recursos, la voluntad política o institucional para implementar cambios y la aceptación de las partes interesadas(28). La investigación titulada "Análisis de Pérdidas de Carga y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024" se clasificó como un estudio **aplicado**, esto debido a que la presente investigación se enfocó dar recomendaciones para mejorar el proceso de conversión de energía lo que se traduce en una mejora significativa de la eficiencia.

3.3 Nivel de la investigación

El nivel explicativo en una investigación busca identificar las causas y los mecanismos subyacentes de un fenómeno, su propósito es establecer relaciones de causalidad entre las variables involucradas, utilizando métodos de investigación como el análisis de varianza (29).

El nivel de esta investigación fue de carácter explicativo, ya que se buscó comprender y analizar las relaciones entre las variables que afectan la eficiencia de la MCH de Ingenio. A través de un estudio detallado de las pérdidas de carga en la tubería de presión, también se buscó identificar los factores que inciden en el rendimiento de la turbina y el generador eléctrico. Este enfoque permitió no solo describir los problemas existentes, sino también ofreció explicaciones sobre cómo y por qué ocurren, contribuyendo así a un entendimiento más profundo de los procesos involucrados en la operación de la minicentral.

3.4. Diseño de la investigación

El diseño experimental del tipo factorial, es un tipo de diseño de experimentos en el que se examinan los efectos de dos o más variables independientes (factores) simultáneamente, y cómo estos afectan una variable dependiente de interés. En este diseño, los niveles de los factores se combinan entre sí en todas las posibles formas, lo que permite analizar los efectos de los factores por separado y en combinación (30).

Se desarrollo un diseño factorial en la presente tesis que aplicó distintos niveles para cada factor, los nuevos niveles planteados surgieron a partir de estudios previos y datos empíricos tomados de los antecedentes recopilados y su impacto se verá reflejado en el apartado de discusión de resultados donde se da a conocer la relación que guardó la asignación de dichos niveles en cada factor.

Diseño factorial 2x2x2x3

D: Diámetro interno de la tubería de presión

R: Rugosidad del material de la tubería

L: Longitud de la tubería

C: Caudal

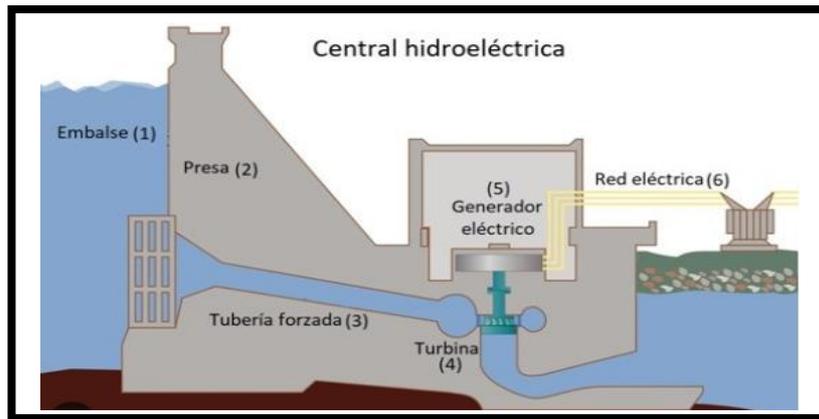


Figura 11. Minicentral Hidroeléctrica y sus partes

Fuente: Tomado de Garrido, 2020 (12)

Tabla 5.. Función objetivo del diseño factorial

Función Objetivo: Minimizar las pérdidas en la tubería de presión. Su unidad de medida se da en metro por kilómetro (m/km).				
DATOS				
Tubería de presión	1.23 m de diámetro	0.8 m de diámetro	GENERADOR	OERLIKON
	3/8 " de espesor		Potencia nominal	1820KVA
	120 m de longitud		Tensión nominal	2300 V
Cámara de carga	420m ³		Corriente nominal	475A
Salto	60.5 m		Factor de potencia	0.8
Caudal	3 m ³ /s		Excitatriz	20KVA
Velocidad	900 RPM		TRANSFORMADOR	TRIFÁSICO (ELEVADOR)
Rugosidad	2.1 μm		Potencia nominal	1250KVA
TURBINA	FRANCIS		Tensión nominal	2300/13200 V
Potencia nominal	2440HP			

Fuente: Recuperado de Romero, 2012 (26)

Tabla 6. Factores y niveles del diseño factorial.

CUATRO FACTORES		NIVEL		
Factor	Descripción			
A	Diámetro interno de la tubería	1.23 m	1.33 m	
		0.8 m	0.9 m	
B	Rugosidad de la tubería	2.1 μm	0.5 μm	
D	Longitud de la tubería	111.21 m	122.331	
		1 m	1.1	
		0.8m	0.88	
		0.9m	0.99	
		7 m	7.7	
Q	Caudal	3000 LPS	2500 LPS	2000 LPS

Fuente: elaboración propia

Tabla 7. Diseño factorial con respuestas de pérdidas de carga por tramo.

NIVEL	2	2	2	3	Pérdidas de carga Totales (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA (mm)	CAUDAL (L/s)	
1	111.21	1230	2.1	3000	1.7621
2	1	0.8	2.1	3000	
3	0.8	0.8	2.1	3000	
4	0.9	0.8	2.1	3000	
5	7	0.8	2.1	3000	
6	111.21	1230	0.5	3000	1.7569
7	1	0.8	0.5	3000	
8	0.8	0.8	0.5	3000	
9	0.9	0.8	0.5	3000	
10	7	0.8	0.5	3000	
11	111.21	1230	2.1	2500	1.2319
12	1	0.8	2.1	2500	

NIVEL	2	2	2	3	Pérdidas de carga Totales (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA (mm)	CAUDAL (L/s)	
13	0.8	0.8	2.1	2500	
14	0.9	0.8	2.1	2500	
15	7	0.8	2.1	2500	
16	111.21	1230	0.5	2500	1.2289
17	1	0.8	0.5	2500	
18	0.8	0.8	0.5	2500	
19	0.9	0.8	0.5	2500	
20	7	0.8	0.5	2500	
21	111.21	1230	2.1	2000	0.7961
22	1	0.8	2.1	2000	
23	0.8	0.8	2.1	2000	
24	0.9	0.8	2.1	2000	
25	7	0.8	2.1	2000	
26	111.21	1230	0.5	2000	0.7950
27	1	0.8	0.5	2000	
28	0.8	0.8	0.5	2000	
29	0.9	0.8	0.5	2000	
30	7	0.8	0.5	2000	
31	111.21	1330	2.1	3000	1.1046
32	1	0.9	2.1	3000	
33	0.8	0.9	2.1	3000	
34	0.9	0.9	2.1	3000	
35	7	0.9	2.1	3000	
36	111.21	1330	0.5	3000	1.1021
37	1	0.9	0.5	3000	
38	0.8	0.9	0.5	3000	
39	0.9	0.9	0.5	3000	
40	7	0.9	0.5	3000	
41	111.21	1330	2.1	2500	0.7827
42	1	0.9	2.1	2500	
43	0.8	0.9	2.1	2500	
44	0.9	0.9	2.1	2500	
45	7	0.9	2.1	2500	
46	111.21	1330	0.5	2500	0.7717
47	1	0.9	0.5	2500	
48	0.8	0.9	0.5	2500	

NIVEL	2	2	2	3	Pérdidas de carga Totales (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA (mm)	CAUDAL (L/s)	
49	0.9	0.9	0.5	2500	
50	7	0.9	0.5	2500	
51	111.21	1330	2.1	2000	
52	1	0.9	2.1	2000	0.4999
53	0.8	0.9	2.1	2000	
54	0.9	0.9	2.1	2000	
55	7	0.9	2.1	2000	
56	111.21	1330	0.5	2000	
57	1	0.9	0.5	2000	0.5731
58	0.8	0.9	0.5	2000	
59	0.9	0.9	0.5	2000	
60	7	0.9	0.5	2000	
61	122.331	1230	2.1	3000	
62	1.1	0.8	2.1	3000	1.8113
63	0.88	0.8	2.1	3000	
64	0.99	0.8	2.1	3000	
65	7.7	0.8	2.1	3000	
66	122.331	1230	0.5	3000	
67	1.1	0.8	0.5	3000	1.8056
68	0.88	0.8	0.5	3000	
69	0.99	0.8	0.5	3000	
70	7.7	0.8	0.5	3000	
71	122.331	1230	2.1	2500	
72	1.1	0.8	2.1	2500	1.2659
73	0.88	0.8	2.1	2500	
74	0.99	0.8	2.1	2500	
75	7.7	0.8	2.1	2500	
76	122.331	1230	0.5	2500	
77	1.1	0.8	0.5	2500	1.2636
78	0.88	0.8	0.5	2500	
79	0.99	0.8	0.5	2500	
80	7.7	0.8	0.5	2500	
81	122.331	1230	2.1	2000	
82	1.1	0.8	2.1	2000	0.8193
83	0.88	0.8	2.1	2000	
84	0.99	0.8	2.1	2000	
85	7.7	0.8	2.1	2000	

NIVEL	2	2	2	3	Pérdidas de carga Totales (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA (mm)	CAUDAL (L/s)	
86	122.331	1230	0.5	2000	0.8181
87	1.1	0.8	0.5	2000	
88	0.88	0.8	0.5	2000	
89	0.99	0.8	0.5	2000	
90	7.7	0.8	0.5	2000	
91	122.331	1330	2.1	3000	1.1357
92	1.1	0.9	2.1	3000	
93	0.88	0.9	2.1	3000	
94	0.99	0.9	2.1	3000	
95	7.7	0.9	2.1	3000	
96	122.331	1330	0.5	3000	1.1330
97	1.1	0.9	0.5	3000	
98	0.88	0.9	0.5	3000	
99	0.99	0.9	0.5	3000	
100	7.7	0.9	0.5	3000	
101	122.331	1330	2.1	2500	0.7947
102	1.1	0.9	2.1	2500	
103	0.88	0.9	2.1	2500	
104	0.99	0.9	2.1	2500	
105	7.7	0.9	2.1	2500	
106	122.331	1330	0.5	2500	0.7938
107	1.1	0.9	0.5	2500	
108	0.88	0.9	0.5	2500	
109	0.99	0.9	0.5	2500	
110	7.7	0.9	0.5	2500	
111	122.331	1330	2.1	2000	0.5146
112	1.1	0.9	2.1	2000	
113	0.88	0.9	2.1	2000	
114	0.99	0.9	2.1	2000	
115	7.7	0.9	2.1	2000	
116	122.331	1330	0.5	2000	0.5129
117	1.1	0.9	0.5	2000	
118	0.88	0.9	0.5	2000	
119	0.99	0.9	0.5	2000	
120	7.7	0.9	0.5	2000	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7. se dio conocer la muestra de la investigación, los 24 escenarios de las pérdidas de carga (m) en la tubería de presión de la MCH de Ingenio utilizando el software Epanet 2.0.

3.5. Población y muestra

La población en el presente trabajo de investigación será la minicentral hidroeléctrica en su composición. La muestra no probabilística, también denominada dirigida, se selecciona en función de criterios específicos en lugar de la aleatoriedad. Como resultado, los hallazgos no pueden extrapolarse a toda la población. El tamaño de este tipo de muestra depende exclusivamente del criterio del investigador, y la validez de la investigación se refuerza mediante la repetición de los resultados (28). La de esta investigación se consolida en la repetición de los resultados de las pérdidas de carga que se muestran en la tabla 7. luego de las simulaciones, se emplearon los parámetros de algunas variables por las que se compone la tubería de presión, esto debido a que se realizó simulaciones numéricas que representen las pérdidas de carga por fricción en la tubería presión y cómo estas influyen en la eficiencia de la turbina y generador eléctrico y con esto se planteara un análisis óptimo que reduzca las pérdidas por carga y a su incremento la eficiencia del sistema.

Tabla 8. Datos de la muestra en estudio

COMPOSICIÓN DE LA MCH INGENIO (muestra)				
Cámara de carga	420m ³		GENERADOR ELÉCTRICO TRIFÁSICO OERLIKON	
Tubería de presión	1.23 m de diámetro	0.8 m de diámetro		
	3/8 " de espesor			
	120 m de longitud			Potencia nominal
Tipo de válvula	Mariposa		Tensión nominal	2300 V
Salto	60.5 m		Corriente nominal	475A
Caudal de diseño	3 m ³ /s		Factor de potencia	0.8
Velocidad	900 RPM		Excitatriz	20KVA
Rugosidad	2.1 μm		TRANSFORMADOR	TRIFÁSICO
TURBINA	FRANCIS		Potencia nominal	1250KVA
Potencia nominal	2440HP		Tensión nominal	2300/13200 V

Fuente: Recuperado de Romero, 2012 (26)

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de esta investigación sobre la eficiencia de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio, se aplicó la técnica documental. La técnica documental consiste en la recopilación de evidencias para demostrar las hipótesis de investigación (28). Se utilizó la técnica de recopilación de información, que incluirá la revisión exhaustiva de literatura existente, así como la recopilación de datos técnicos y operativos de la minicentral, estos datos se muestran en la tabla 8. Además, se analizarán registros de mediciones previas, como datos técnicos y el caudal, para evaluar el rendimiento de la turbina y generador. Esta combinación de técnicas garantizará una recolección de datos robusta y confiable, facilitando un análisis exhaustivo que contribuirá a la formulación de recomendaciones prácticas para optimizar la eficiencia de la minicentral.

3.6.1 Recolección de datos

3.6.1.1 Recolección de datos de la tubería

Los datos relacionados con la tubería fueron obtenidos de un estudio de maestría desarrollado por Romero et al. (26). Este estudio estuvo enfocado en el balance del sistema hidroenergético de Ingenio. En particular, la información específica de la tubería se recopiló a partir de las tablas y figuras incluidas en dicho estudio, esta información se detalló en la presente investigación en la tabla 6.

3.6.1.2 Recolección de datos de las pérdidas de carga

Los datos extraídos del estudio de Romero et al. (26), fueron empleados para determinar las pérdidas de carga en la tubería mediante el software EPANET 2.0. Para ello, se introdujeron los parámetros esenciales, incluyendo el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería, junto con el caudal de agua, estos datos se registraron en la tabla 7 de la presente investigación.

3.7 Técnicas de procesamiento y análisis de datos

En el marco de la investigación titulada "Análisis de Pérdidas de Carga y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024", se aplicó la técnica estadística inferencial mediante el análisis de varianza (ANOVA), la cual establece que con dos vías o más, puedes explorar las interacciones entre los diferentes factores, entendiendo cómo combinaciones específicas pueden influir en la eficiencia de un sistema (30). Para evaluar si las variaciones en los factores (diámetro, rugosidad, longitud de la tubería y caudal) impactan de manera significativa en la variable dependiente, que es la eficiencia del sistema.

3.8 Desarrollo del método y la técnica

En la ejecución de la presente tesis se desarrolló en primera instancia la recolección de datos mediante la recopilación de información bibliográfica disponible, siendo la fuente principal el balance energético de la minicentral de Ingenio (26), tomando los datos detallados en la tabla 8. estableció las variables que influyen en la función objetivo.

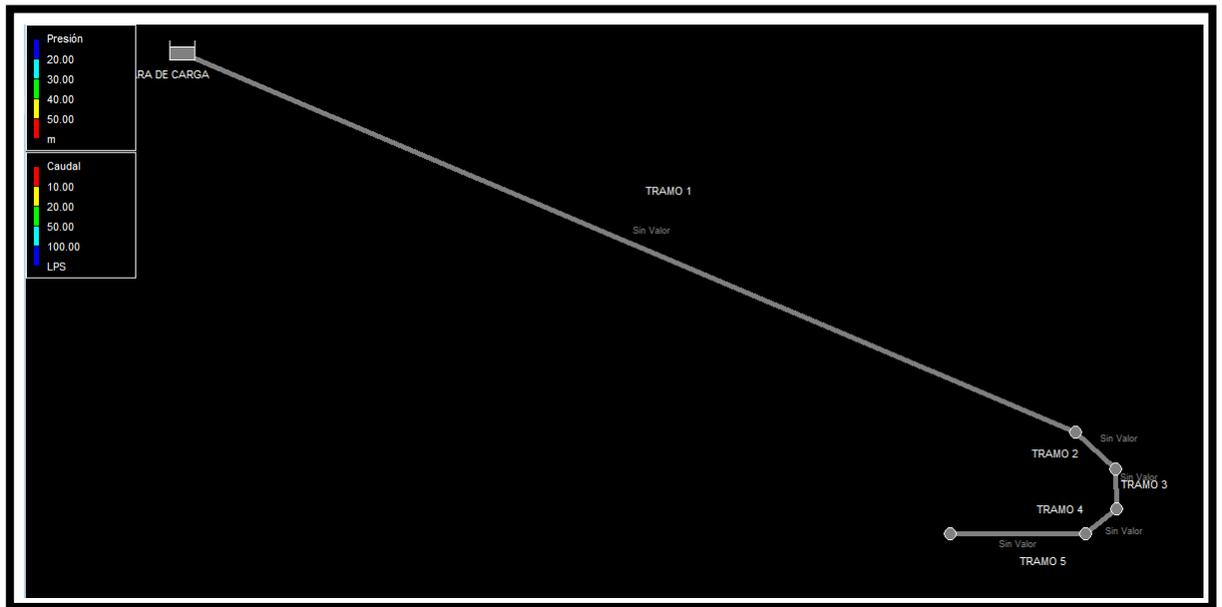


Figura 12. Diagrama de la tubería de presión

Fuente: elaboración propia

En la figura 12 se muestra el desarrollo de la simulación con los datos establecidos que contribuyeron en la función objetivo: Minimizar las pérdidas de carga por fricción, mediante el software Epanet 2.0 se lleva a cabo la simulación de todas las combinaciones posibles de las subvariables independientes que generan pérdidas de carga en la tubería de presión.

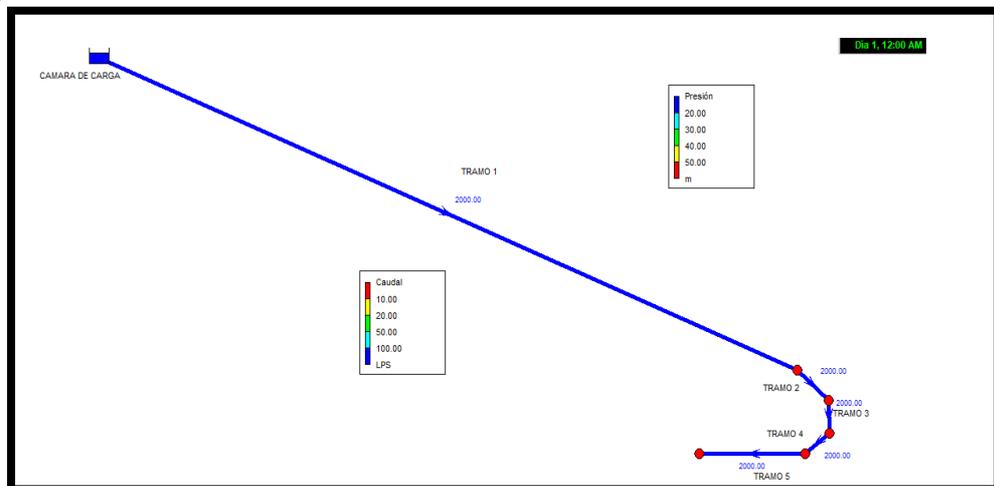


Figura 13. Simulación de tubería de presión operando

Fuente: elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la figura 13 se observa la simulación de la tubería perteneciente a la minicentral operando bajo los parámetros ya existentes y en una simulación con el caudal en época de avenida.

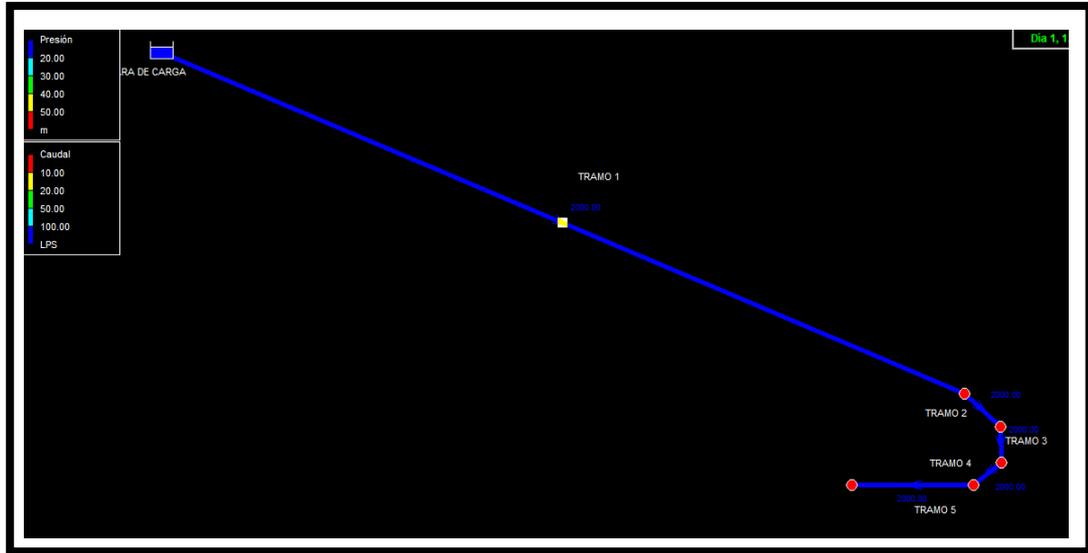


Figura 14. Simulación de tubería bajo cambio de parámetros

Fuente: elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la figura 14. se mostró a la tubería operando bajo los cambios explicados en el diseño factorial de la tabla 7. y los cuales representaron un impacto en la eficiencia eléctrica del sistema hidroeléctrico.

Una vez obtenido los resultados de las pérdidas por fricción en la tubería de presión combinando los parámetros establecidos en el diseño factorial se desarrolló el análisis de la variable dependiente con las subvariables independientes de esta manera se buscó obtener una mejora con respecto a la eficiencia inicial del sistema, con el apoyo del software Minitab se llevó a cabo el desarrollo del análisis de varianza que se detalla a continuación.

Tabla 9. Desarrollo del análisis de varianza lineal

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	24	12.6011	0.52504	1463.23	0.000
Bloques	1	0.0482	0.04824	134.42	0.000
Lineal	5	11.549	2.3098	6437.08	0.000
Diámetro	1	0.0025	0.00246	6.85	0.015
Rugosidad	1	3.824	3.82398	10656.88	0.000
Caudal	2	7.717	3.85849	10753.06	0.000
Longitud	1	0.0056	0.00558	15.54	0.001

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Interacciones de 2 términos	9	0.7792	0.08658	241.29	0.000
DIÁMETRO*RUGOSIDAD	1	0.0023	0.00235	6.54	0.018
DIÁMETRO*CAUDAL	2	0.0135	0.00677	18.87	0
DIÁMETRO*LONGITUD	1	0.0002	0.00018	0.51	0.482
RUGOSIDAD*CAUDAL	2	0.6334	0.31671	882.63	0
RUGOSIDAD*LONGITUD	1	0.0537	0.05373	149.73	0
CAUDAL*LONGITUD	2	0.076	0.03801	105.92	0
Interacciones de 3 términos	7	0.2014	0.02877	80.17	0
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*CAUDAL	2	0.0645	0.03224	89.85	0
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*LONGITUD	1	0.044	0.04404	122.74	0
DIÁMETRO*CAUDAL*LONGITUD	2	0.0674	0.03371	93.94	0
RUGOSIDAD*CAUDAL*LONGITUD	2	0.0254	0.01271	35.43	0
Interacciones de 4 términos	2	0.0232	0.01162	32.39	0
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*CAUDAL*LONGITUD	2	0.0232	0.01162	32.39	0
Error	23	0.0083	0.00036		
Total	47	12.6093			

Fuente: Elaboración propia extraída del software Minitab.

En la tabla 9. Se muestra el análisis de varianza donde con la ayuda del software Minitab se determinó el impacto de cada subvariable en la función objetivo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados e interpretación

En el desarrollo de este capítulo se dará a conocer los resultados obtenidos por el software Epanet 2.0 y el análisis de acuerdo con los parámetros en los que se efectuaron variaciones.

4.1.1 Análisis de las pérdidas de carga bajo condiciones iniciales mediante el software Epanet 2.0

Tabla 10. Resultado de la primera interacción en la tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	2.1	3000	2.52	0.010	2.59	0.2880339
TRAMO 2	1	800	2.1	3000	5.97	0.249	565.37	0.56537
TRAMO 3	0.8	800	2.1	3000	5.97	0.209	474.65	0.37972
TRAMO 4	0.9	800	2.1	3000	5.97	0.187	424.24	0.381816
TRAMO 5	7	800	2.1	3000	5.97	0.009	21.03	0.14721

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 10. se registraron los resultados de las condiciones actuales de la tubería, en un escenario de avenida, registrando un total de pérdidas de carga equivalente a 1.7621 m.

Tabla 11. Resultado de la segunda interacción en la tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	2.1	2500	2.1	0.01	1.84	0.2046264
TRAMO 2	1	800	2.1	2500	4.97	0.249	392.98	0.39298
TRAMO 3	0.8	800	2.1	2500	4.97	0.209	329.98	0.263984
TRAMO 4	0.9	800	2.1	2500	4.97	0.187	294.98	0.265482
TRAMO 5	7	800	2.1	2500	4.97	0.01	14.97	0.10479

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 11. se registraron los resultados de las pérdidas de carga bajo una condición operativa de caudal igual a 2.5 m³/s, se registró un total de pérdidas de carga equivalente a 1.2319m.

Tabla 12. Resultado de la tercera interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	2.1	2000	1.68	0.01	1.22	0.1356762
TRAMO 2	1	800	2.1	2000	3.98	0.25	251.81	0.25181
TRAMO 3	0.8	800	2.1	2000	3.98	0.21	211.49	0.169192
TRAMO 4	0.9	800	2.1	2000	3.98	0.188	189.09	0.170181
TRAMO 5	7	800	2.1	2000	3.98	0.01	9.89	0.06923

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 12. se registraron los resultados de las pérdidas de carga bajo una condición operativa de caudal igual a 2 m³/s, se registró un total de pérdidas de carga equivalente a 0.7961m.

4.1.1.1 Análisis de la relación entre el diámetro de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 13. Resultado de la cuarta interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	2.1	3000	2.16	0.010	1.77	0.1968417
TRAMO 2	1	900	2.1	3000	4.72	0.279	351.66	0.35166
TRAMO 3	0.8	900	2.1	3000	4.72	0.234	295.03	0.236024
TRAMO 4	0.9	900	2.1	3000	4.72	0.209	263.55	0.237195
TRAMO 5	7	900	2.1	3000	4.72	0.009	11.84	0.08288

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 13. se registraron resultados teniendo variantes en el diámetro de la tubería, bajo la misma condición operativa de caudal, obteniendo un total de pérdidas de carga equivalente a 1.1046m, lo que mostro una diferencia de 0.6575m de pérdidas de carga respecto al escenario inicial visto en la tabla 10, siendo este el resultado de mayor valor respecto a las otras interacciones de la subvariable diámetro y que indicaron que a mayor diámetro menores son las pérdidas de carga en la tubería.

Tabla 14. Resultado de la quinta interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	2.1	2500	1.8	0.01	1.26	0.1401246
TRAMO 2	1	900	2.1	2500	3.93	0.28	250.09	0.25009
TRAMO 3	0.8	900	2.1	2500	3.93	0.235	205.09	0.164072
TRAMO 4	0.9	900	2.1	2500	3.93	0.21	188.24	0.169416
TRAMO 5	7	900	2.1	2500	3.93	0.01	8.43	0.05901

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 14. se registraron resultados teniendo variantes en el diámetro de la tubería, bajo la misma condición operativa de caudal, se logró un total de pérdidas de carga equivalente a 0.7827m, lo que mostró una diferencia de 0.4492m de pérdidas de carga respecto al escenario inicial visto en la tabla 11, este resultado respalda la hipótesis h1.a

Tabla 15. Resultado de la sexta interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	2.1	2000	1.44	0.011	0.84	0.0934164
TRAMO 2	1	900	2.1	2000	3.14	0.28	156.6	0.1566
TRAMO 3	0.8	900	2.1	2000	3.14	0.235	131.43	0.105144
TRAMO 4	0.9	900	2.1	2000	3.14	0.21	117.45	0.105705
TRAMO 5	7	900	2.1	2000	3.14	0.01	5.57	0.03899

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 15. se registraron resultados teniendo variantes en el diámetro de la tubería, bajo la misma condición operativa de caudal, se obtuvo un total de pérdidas de carga equivalente a 0.4999m, lo que mostró una diferencia de 0.2962m de pérdidas de carga respecto al escenario inicial visto en la tabla 12, este resultado refuerza la hipótesis h1.a

4.1.1.2 Descripción de la relación entre la rugosidad de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 16. Resultado de la séptima interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	0.5	3000	2.52	0.01	2.57	0.2858097
TRAMO 2	1	800	0.5	3000	5.97	0.249	565.06	0.56506
TRAMO 3	0.8	800	0.5	3000	5.97	0.209	474.34	0.379472
TRAMO 4	0.9	800	0.5	3000	5.97	0.187	423.94	0.381546
TRAMO 5	7	800	0.5	3000	5.97	0.009	20.72	0.14504

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 16. se registraron resultados con variantes en la rugosidad, donde se observó que con una menor rugosidad y bajo las mismas condiciones operativas de caudal que en la tabla 10., se obtuvo un total de 1.7569m de pérdidas de carga, 0.0052m de pérdida menor al escenario inicial, siendo este valor el más significativo respecto a las otras combinaciones de rugosidad y muestran que en cuanto menor sea la rugosidad interna de la tubería menores serán también las pérdidas de carga por fricción.

Tabla 17. Resultado de la octava interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	0.5	2500	2.1	0.01	1.83	0.2035143
TRAMO 2	1	800	0.5	2500	4.97	0.249	392.79	0.39279
TRAMO 3	0.8	800	0.5	2500	4.97	0.209	329.79	0.263832
TRAMO 4	0.9	800	0.5	2500	4.97	0.187	294.79	0.265311
TRAMO 5	7	800	0.5	2500	4.97	0.009	14.78	0.10346

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 17. se registraron resultados teniendo variantes en la rugosidad de la tubería, bajo la misma condición operativa de caudal, se obtuvo un total de pérdidas de carga equivalente a 1.2289 m, lo que mostró una diferencia de 0.0030 m de pérdidas de carga respecto al escenario inicial visto en la tabla 11, este resultado respalda la hipótesis h1.b

Tabla 18. Resultado de la novena interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1230	0.5	2000	1.68	0.01	1.22	0.1356762
TRAMO 2	1	800	0.5	2000	3.98	0.25	251.71	0.25171
TRAMO 3	0.8	800	0.5	2000	3.98	0.21	211.39	0.169112
TRAMO 4	0.9	800	0.5	2000	3.98	0.187	188.99	0.170091
TRAMO 5	7	800	0.5	2000	3.98	0.01	9.78	0.06846

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 18. se registraron resultados teniendo variantes en la rugosidad de la tubería, bajo la misma condición operativa de caudal que la tabla 12., se obtuvo un total de pérdidas de carga equivalente a 0.4999m, lo que mostró una diferencia de 0.0010 m de pérdidas de carga respecto al escenario inicial, estos resultados refuerzan la hipótesis h1.b.

4.1.1.3 Análisis de la relación entre la longitud de la tubería de presión y las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 19. Resultado de la décima interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	2.1	3000	2.52	0.01	2.59	0.3168347
TRAMO 2	1.1	800	2.1	3000	5.97	0.227	515.88	0.567468
TRAMO 3	0.88	800	2.1	3000	5.97	0.191	433.4	0.381392
TRAMO 4	0.99	800	2.1	3000	5.97	0.171	387.59	0.3837141
TRAMO 5	7.7	800	2.1	3000	5.97	0.009	21.03	0.161931

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 19, en un escenario hipotético con un aumento de 10% en la longitud de la tubería y mismo caudal operativo que la tabla 10., se registraron un total de pérdidas de carga equivalente a 1.8113 m, 0.0492 m de pérdida más que en el escenario inicial, lo que describe que ante un hipotético aumento de longitud de la tubería se registrarán mayores pérdidas

Tabla 20. Resultado de la décimo primera interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	2.1	2500	2.1	0.01	1.84	0.2250872
TRAMO 2	1.1	800	2.1	2500	4.97	0.228	358.62	0.394482
TRAMO 3	0.88	800	2.1	2500	4.97	0.191	301.35	0.265188
TRAMO 4	0.99	800	2.1	2500	4.97	0.171	268.52	0.2658348
TRAMO 5	7.7	800	2.1	2500	4.97	0.01	14.97	0.115269

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 20. se registraron resultados teniendo un hipotético aumento en la longitud de la tubería en 10% más que la condición inicial y bajo la misma condición operativa de caudal de la tabla 11. Se registraron un total de 1.2659m de pérdida de carga, 0.0340m más que la condición inicial, lo que respalda la hipótesis h1.c.

Tabla 21. Resultado de la décimo segunda interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	2.1	2000	2.1	0.01	1.22	0.1492426
TRAMO 2	1.1	800	2.1	2000	4.97	0.228	229.82	0.252802
TRAMO 3	0.88	800	2.1	2000	4.97	0.192	193.16	0.1699808
TRAMO 4	0.99	800	2.1	2000	4.97	0.171	172.8	0.171072
TRAMO 5	7.7	800	2.1	2000	4.97	0.01	9.89	0.076153

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 21. se registraron resultados teniendo un hipotético aumento en la longitud de la tubería en 10% más que la condición inicial y bajo la misma condición operativa de caudal de la tabla 12. Se registraron un total de 0.8193 m de pérdida de carga, 0.0232m más que la condición inicial, lo que refuerza la hipótesis h1.c.

4.1.1.4 Análisis de la relación entre el diámetro y rugosidad de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 22. Resultado de la décimo tercera interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	0.5	3000	2.16	0.01	1.76	0.1957296
TRAMO 2	1	900	0.5	3000	4.72	0.279	351.52	0.35152
TRAMO 3	0.8	900	0.5	3000	4.72	0.234	294.88	0.235904
TRAMO 4	0.9	900	0.5	3000	4.72	0.209	263.42	0.237078
TRAMO 5	7	900	0.5	3000	4.72	0.009	11.69	0.08183

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 22. se registraron resultados con variantes en el diámetro y rugosidad de la tubería, bajo un caudal operativo de 3 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 1.8113 m.

Tabla 23. Resultado de la décimo cuarta interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	0.5	2500	1.8	0.01	1.26	0.1401
TRAMO 2	1	900	0.5	2500	3.93	0.28	244.33	0.2443
TRAMO 3	0.8	900	0.5	2500	3.93	0.235	205	0.164
TRAMO 4	0.9	900	0.5	2500	3.93	0.21	183.15	0.1648
TRAMO 5	7	900	0.5	2500	3.93	0.01	8.34	0.0584

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 23. se registraron resultados con variantes en el diámetro y rugosidad de la tubería, bajo un caudal operativo de 2.5 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.7717 m.

Tabla 24. Resultado de la décimo quinta interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	111.21	1330	0.5	2000	1.44	0.01	0.83	0.1335

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 2	1	900	0.5	2000	3.14	0.28	156.56	0.1601
TRAMO 3	0.8	900	0.5	2000	3.14	0.235	131.39	0.1073
TRAMO 4	0.9	900	0.5	2000	3.14	0.21	117.4	0.1088
TRAMO 5	7	900	0.5	2000	3.14	0.01	5.52	0.0634

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 24. se registraron resultados con variantes en el diámetro y rugosidad de la tubería, bajo un caudal operativo de 2 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.5731 m.

4.1.1.5 Análisis de la relación entre el diámetro y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 25. Resultado de la décimo sexta interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	2.1	3000	2.16	0.01	1.77	0.2165241
TRAMO 2	1.1	900	2.1	3000	4.72	0.255	320.77	0.352847
TRAMO 3	0.88	900	2.1	3000	4.72	0.214	269.28	0.2369664
TRAMO 4	0.99	900	2.1	3000	4.72	0.191	240.68	0.2382732
TRAMO 5	7.7	900	2.1	3000	4.72	0.009	11.83	0.091091

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 25. se registraron resultados con variantes en el diámetro y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 3 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 1.1357 m.

Tabla 26. Resultado de la décimo séptima interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	2.1	2500	1.8	0.01	1.26	0.1541358
TRAMO 2	1.1	900	2.1	2500	3.93	0.255	222.97	0.245267
TRAMO 3	0.88	900	2.1	2500	3.93	0.214	187.21	0.1647448
TRAMO 4	0.99	900	2.1	2500	3.93	0.191	167.35	0.1656765

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 5	7.7	900	2.1	2500	3.93	0.01	8.43	0.064911

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 26. se registraron resultados con variantes en el diámetro y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2.5 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.7947 m.

Tabla 27. Resultado de la décimo octava interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	2.1	2000	1.44	0.011	0.84	0.1027572
TRAMO 2	1.1	900	2.1	2000	3.14	0.255	142.88	0.157168
TRAMO 3	0.88	900	2.1	2000	3.14	0.214	119.99	0.1055912
TRAMO 4	0.99	900	2.1	2000	3.14	0.192	107.28	0.1062072
TRAMO 5	7.7	900	2.1	2000	3.14	0.01	5.57	0.042889

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 27. se registraron resultados con variantes en el diámetro y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.5146 m.

4.1.1.6 Análisis de la relación entre la rugosidad y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 28. Resultado de la décimo novena interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	0.5	3000	2.52	0.01	2.57	0.3143881
TRAMO 2	1.1	800	0.5	3000	5.97	0.227	515.58	0.567138
TRAMO 3	0.88	800	0.5	3000	5.97	0.191	433.1	0.381128
TRAMO 4	0.99	800	0.5	3000	5.97	0.171	387.28	0.3834072
TRAMO 5	7.7	800	0.5	3000	5.97	0.009	20.72	0.159544

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 28. se registraron resultados con variantes en el rugosidad y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 3 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 1.8056 m.

Tabla 29. Resultado de la vigésima interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	0.5	2500	2.1	0.015	1.83	0.2238639
TRAMO 2	1.1	800	0.5	2500	4.97	0.228	358.43	0.394273
TRAMO 3	0.88	800	0.5	2500	4.97	0.191	301.15	0.265012
TRAMO 4	0.99	800	0.5	2500	4.97	0.171	269.34	0.2666466
TRAMO 5	7.7	800	0.5	2500	4.97	0.009	14.78	0.113806

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 29. se registraron resultados con variantes en el rugosidad y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2.5 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 1.2636 m.

Tabla 30. Resultado de la vigésima primera interacción de tubería de presión

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1230	0.5	2000	1.68	0.01	1.22	0.1492426
TRAMO 2	1.1	800	0.5	2000	3.98	0.228	229.72	0.252692
TRAMO 3	0.88	800	0.5	2000	3.98	0.191	193.06	0.1698928
TRAMO 4	0.99	800	0.5	2000	3.98	0.171	172.69	0.1709631
TRAMO 5	7.7	800	0.5	2000	3.98	0.01	9.78	0.075306

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 30. se registraron resultados con variantes en el rugosidad y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.8181 m.

4.1.1.7 Análisis de la relación entre el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería de presión en las pérdidas de carga mediante el software Epanet 2.0

Tabla 31. Resultado de la vigésima segunda interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	0.5	3000	2.16	0.01	1.76	0.2153008

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 2	1.1	900	0.5	3000	4.72	0.255	320.63	0.352693
TRAMO 3	0.88	900	0.5	3000	4.72	0.214	269.14	0.2368432
TRAMO 4	0.99	900	0.5	3000	4.72	0.191	240.54	0.2381346
TRAMO 5	7.7	900	0.5	3000	4.72	0.009	11.69	0.090013

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 31. se registraron resultados con variantes en la longitud, caudal y rugosidad de la tubería, en un escenario de avenida registrando un total de pérdidas de carga equivalente a 1.1330m.

Tabla 32. Resultado de la vigésima tercera interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	0.5	2500	1.8	0.01	1.26	0.1541358
TRAMO 2	1.1	900	0.5	2500	3.93	0.255	222.88	0.245168
TRAMO 3	0.88	900	0.5	2500	3.93	0.214	187.12	0.1646656
TRAMO 4	0.99	900	0.5	2500	3.93	0.191	167.26	0.1655874
TRAMO 5	7.7	900	0.5	2500	3.93	0.01	8.34	0.064218

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 32. se registraron resultados con variantes en el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2.5 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.7938 m.

Tabla 33. Resultado de la vigésima cuarta interacción de tubería de presión.

TUBERÍA	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	CAUDAL (LPS)	VELOCIDAD (m/s)	FACTOR DE FRICCIÓN (cte.)	PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN (m/km)	PÉRDIDAS DE CARGA TOTAL (m)
TRAMO 1	122.33	1330	0.5	2000	1.44	0.01	0.83	0.1015339
TRAMO 2	1.1	900	0.5	2000	3.14	0.255	142.83	0.157113
TRAMO 3	0.88	900	0.5	2000	3.14	0.214	119.95	0.105556
TRAMO 4	0.99	900	0.5	2000	3.14	0.192	107.23	0.1061577
TRAMO 5	7.7	900	0.5	2000	3.14	0.01	5.52	0.042504

Fuente: Elaboración propia con el software Epanet 2.0

En la tabla 33. se registraron resultados con variantes en el diámetro, rugosidad y longitud de la tubería, bajo un caudal operativo de 2 m³/s un total de pérdidas de carga equivalente a 0.5129m.

4.1.2 Análisis del impacto entre las pérdidas de carga y la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el Software Python

Se llevó a cabo el análisis de eficiencia del sistema, apoyándose en los resultados del software Epanet 2.0 se desarrolló el código Python para el análisis de eficiencia del sistema hidroeléctrico y la potencia dejada de producir, así se dio a conocer como las pérdidas de carga impactan en la eficiencia del sistema.

```
CODIGO PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA ELECTRICA DE LA MCH INGENIO

# Datos fijos del sistema
Ht = 60.5 # Altura total (m)
g = 9.81 # Gravedad (m/s^2)
Pout = 1487.1 # Potencia de salida del generador (kW)
precio_kwh = 0.9571 # Precio fijo del kWh en soles
rho = 1000 # Densidad del agua (kg/m^3)
P_nom_turbina = 1819508 # Potencia nominal de la turbina (W)

# Ingreso de datos variables
Hl = float(input("Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): "))
Q = float(input("Ingrese el caudal de diseño (m3/s): "))

# Cálculo de la eficiencia de la turbina con pérdidas adicionales
nt = ((Ht - Hl) / Ht) - 0.01

# Cálculo de la eficiencia del generador con la nueva fórmula
ng = (rho * g * Q * Ht * nt) / P_nom_turbina

# Eficiencia total del sistema
n_total = nt * ng * 100 # Convertimos a porcentaje

# Relación de la potencia perdida con las pérdidas de carga
DeltaP = (rho * g * Q * Hl * ng) / 1000 # Convertimos a kW

# Pérdidas económicas mensuales
perdidas_economicas = DeltaP * 24 * 30 * precio_kwh

# Mostrar resultados
print("\nResultados:")
print(f"Eficiencia de la turbina: {nt * 100:.2f}%")
print(f"Eficiencia del generador: {ng * 100:.2f}%")
print(f"Eficiencia total del sistema: {n_total:.4f}%")
print(f"Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: {DeltaP:.2f} kW")
print(f"Pérdidas económicas por mes: S/. {perdidas_economicas:.2f}")
```

Figura 15. Código Python para el análisis de eficiencia.

Fuente: elaboración propia

En a la figura 15. Se presenta el desarrollo del código fuente se empleó las fórmulas descritas en el marco teórico, las cuales fueron relevantes para el desarrollo del código, en principio se empleó la fórmula de rendimiento de la turbina declarando variables importantes como diámetro, rugosidad y longitud, para el uso del presente código solo se requiere ingresar las pérdidas totales del sistema en m.c.a obtenidas anteriormente por el software Epanet 2.0 y el caudal ya que este podría variar dependiendo de la época de avenida o estiaje, lo que finalmente nos arroja el valor aproximado de la eficiencia del sistema hidroeléctricos y a partir de aquí se puede hacer la recolección de valores en cada escenario.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.7621
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.09%
Eficiencia del generador: 94.03%
Eficiencia total del sistema: 90.3493%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 48.76 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 33602.29
```

Figura 16. Resultados de la primera evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 16. se observó que bajo las condiciones iniciales de la tubería de presión de la MCH Ingenio con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de **90.3493%**. Además en este apartado se evidencia que la MCH Ingenio presenta una potencia dejada de producir de aproximadamente 48.76 kW debido a las pérdidas de carga.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.2319
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.96%
Eficiencia del generador: 79.07%
Eficiencia total del sistema: 76.6707%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 23.89 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 16462.45
```

Figura 17. Resultados de la segunda evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 17. se observó que bajo las condiciones iniciales de la tubería de presión de la MCH Ingenio con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de **76.6707%**.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7961
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.68%
Eficiencia del generador: 63.73%
Eficiencia total del sistema: 62.2513%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 9.95 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 6859.32
```

Figura 18. Resultados de la tercera evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 18. se observó que bajo las condiciones iniciales de la tubería de presión de la MCH Ingenio con un caudal de 2 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de **62.2513%**, este valor es inferior a lo visto en la figura 16. y 17. Esto resultados muestran que con un caudal menor la turbina y generador no trabajan en una condición optima.

4.1.2.1 Análisis de la relación entre el diámetro de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.1046
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.17%
Eficiencia del generador: 95.09%
Eficiencia total del sistema: 92.4046%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 30.91 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 21302.36
```

Figura 19. Resultados de la cuarta evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 19. se registró que modificando la variable diámetro con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de **92.4046%**. siendo este el mejor escenario respecto a la relación diámetro y su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema, donde se mejoró en un **2.0553%** la eficiencia respecto a las condiciones iniciales del sistema hidroeléctrico.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7827
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.71%
Eficiencia del generador: 79.68%
Eficiencia total del sistema: 77.8494%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 15.29 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 10539.67
```

Figura 20. Resultados de la quinta evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 20. se registró que modificando solo la variable diámetro en un nivel mayor y con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 77.8494%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.4999
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 98.17%
Eficiencia del generador: 64.05%
Eficiencia total del sistema: 62.8769%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 6.28 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 4328.80
```

Figura 21. Resultados de la sexta evaluación de eficiencia.

Fuente: Elaboración propia con el software Python

En la figura 21. se mostró que modificando solo la variable diámetro en un nivel mayor y con un caudal de 2 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.8769%.

4.1.2.2 Análisis de la relación entre la rugosidad de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.7569
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.10%
Eficiencia del generador: 94.04%
Eficiencia total del sistema: 90.3655%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 48.62 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 33506.13
```

Figura 22. Resultados de la séptima evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 22. se observó que modificando la variable rugosidad con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 90.3655%. siendo este el mejor escenario respecto a la relación rugosidad y su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema, donde se mejoró en un 0.02% la eficiencia respecto a las condiciones iniciales del sistema hidroeléctrico.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.2289
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.97%
Eficiencia del generador: 79.08%
Eficiencia total del sistema: 76.6786%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 23.83 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 16423.19
```

Figura 23. Resultados de la octava evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 23. se registró que modificando solo la variable diámetro en un nivel mayor y con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 76.6786%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7950
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.69%
Eficiencia del generador: 63.73%
Eficiencia total del sistema: 62.2536%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 9.94 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 6849.97
```

Figura 24. Resultados de la novena evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 24. se registró que modificando solo la variable rugosidad en un nivel mayor y con un caudal de 2 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.2536%.

4.1.2.3 Análisis de la relación entre longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.8113
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.01%
Eficiencia del generador: 93.95%
Eficiencia total del sistema: 90.1965%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 50.08 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 34511.28
```

Figura 25. Resultados de la décima evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 25. se registró que en un escenario hipotético modificando la variable longitud con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 90.1965%. siendo este el escenario que respalda la hipótesis h1.c, respecto a la longitud y su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema, donde se registró en un **0.153% menos** eficiencia respecto a las condiciones iniciales del sistema hidroeléctrico.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.2659
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.91%
Eficiencia del generador: 79.03%
Eficiencia total del sistema: 76.5819%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 24.53 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 16907.00
```

Figura 26. Resultados de la undécima evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 26. se registró que modificando solo la variable longitud en un nivel mayor y con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 76.5819%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.8193
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.65%
Eficiencia del generador: 63.70%
Eficiencia total del sistema: 62.2024%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 10.24 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 7056.44
```

Figura 27. Resultados de la décimo primera evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 27. se registró que modificando solo la variable rugosidad en un nivel mayor y con un caudal de 2 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.2024%.

4.1.2.4 Análisis de la relación entre el diámetro y rugosidad de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.1021
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.18%
Eficiencia del generador: 95.10%
Eficiencia total del sistema: 92.4125%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 30.84 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 21255.06
```

Figura 28. Resultados de la décimo tercera evaluación de eficiencia

Fuente: Elaboración propia con el software Python

En la figura 28. se halló que modificando la variable diámetro y rugosidad en un nivel mayor y con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 92.4125%. Esto evidencio que al tener una combinación adquiriendo nuevos valores para las subvariables mencionadas se obtiene hasta un 2.06% más que la eficiencia inicial del sistema respaldando así la hipótesis h1a y h1b.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7717
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.72%
Eficiencia del generador: 79.69%
Eficiencia total del sistema: 77.8784%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 15.08 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 10393.48
```

Figura 29. Resultados de la décimo cuarta evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 29. se observó que modificando la variable diámetro y rugosidad, con un caudal de 2.5 m3/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 77.8784%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.5731
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 98.05%
Eficiencia del generador: 63.97%
Eficiencia total del sistema: 62.7220%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 7.19 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 4956.55
```

Figura 30. Resultados de la décimo quinta a evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 30. se observó que modificando la variable diámetro y rugosidad, con un caudal de 2 m3/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.7220%.

4.1.2.5 Análisis de la relación entre el diámetro y longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.1357
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.12%
Eficiencia del generador: 95.04%
Eficiencia total del sistema: 92.3069%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 31.77 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 21890.55
```

Figura 31. Resultados de la décimo sexta evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 31. se observó que modificando la variable longitud y diámetro, con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 92.3069%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7947
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.69%
Eficiencia del generador: 79.66%
Eficiencia total del sistema: 77.8178%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 15.53 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 10699.09
```

Figura 32. Resultados de la décimo séptima evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 32. se mostró que modificando la variable longitud y diámetro, con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 77.8178%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.5146
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 98.15%
Eficiencia del generador: 64.03%
Eficiencia total del sistema: 62.8457%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 6.46 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 4454.99
```

Figura 33. Resultados de la décimo octava evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 33. se mostró que modificando la variable longitud y diámetro, con un caudal de 2 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.8457%.

4.1.2.6 Análisis de la relación entre el rugosidad y longitud de la tubería de presión y el impacto en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.8056
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.02%
Eficiencia del generador: 93.96%
Eficiencia total del sistema: 90.2142%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 49.93 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 34406.05
```

Figura 34. Resultados de la décimo novena evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 34. se mostró que modificando la variable longitud y rugosidad, con un caudal de 3 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 90.2142%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.2636
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 96.91%
Eficiencia del generador: 79.03%
Eficiencia total del sistema: 76.5879%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 24.49 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 16876.94
```

Figura 35. Resultados de la vigésima evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 35. se mostró que modificando la variable longitud y rugosidad, con un caudal de 2.5 m³/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 76.5879%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.8181
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.65%
Eficiencia del generador: 63.70%
Eficiencia total del sistema: 62.2050%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 10.23 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 7046.25
```

Figura 36. Resultados de la vigésima primera evaluación de eficiencia

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 36 se encontró que modificando la longitud y rugosidad con un caudal operativo de 2 m³/s se obtuvo 62.2050% de eficiencia eléctrica

4.1.2.7 Análisis de la relación entre diámetro, rugosidad y longitud de la tubería de presión y la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio mediante el software Python

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 1.1330
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 3

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.13%
Eficiencia del generador: 95.05%
Eficiencia total del sistema: 92.3154%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 31.69 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 21839.51
```

Figura 37. Resultados de la vigésimo segunda evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 37. se halló que modificando el diámetro, rugosidad y longitud bajo un caudal operativo de 3 m³/s una eficiencia eléctrica de 92.3154%.

```
Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.7938
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2.5

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 97.69%
Eficiencia del generador: 79.66%
Eficiencia total del sistema: 77.8202%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 15.51 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 10687.13
```

Figura 38. Resultados de la vigésimo tercera evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 38 se halló que modificando el diámetro, rugosidad y longitud bajo un caudal operativo de 2.5 m³/s una eficiencia eléctrica de 77.8202%.

```

Ingrese las pérdidas de carga total del sistema (m.c.a): 0.5129
Ingrese el caudal de diseño (m3/s): 2

Resultados:
Eficiencia de la turbina: 98.15%
Eficiencia del generador: 64.03%
Eficiencia total del sistema: 62.8493%
Potencia perdida debido a las pérdidas de carga: 6.44 kW
Pérdidas económicas por mes: S/. 4440.40

```

Figura 39. Resultados de la vigésimo cuarta evaluación de eficiencia.

Fuente: elaboración Propia con el software Python

En la figura 39. se observó que, modificando el diámetro, longitud y rugosidad en un nivel mayor, con un caudal de 2 m3/s, se obtuvo una eficiencia total del sistema de 62.8493%.

Tabla 34. Resumen de eficiencia del sistema por cada interacción

Q (m3/S)	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μ m)	P. CARGA (m)	EFICIENCIA (%)
3	L1	D1	R.1	1.7621	90.3493%
	L1	D1	R.2	1.7569	90.3655%
	L1	D2	R.1	1.1046	92.4046%
	L1	D2	R.2	1.1021	92.4125%
	L2	D1	R.1	1.8113	90.1965%
	L2	D1	R.2	1.8056	90.2142%
	L2	D2	R.1	1.1357	92.3069%
	L2	D2	R.2	1.1330	92.3154%
2.5	L1	D1	R.1	1.2256	76.6872%
	L1	D1	R.2	1.2289	76.6786%
	L1	D2	R.1	0.7827	77.8494%
	L1	D2	R.2	0.7717	77.8784%
	L2	D1	R.1	1.2659	76.5819%
	L2	D1	R.2	1.2636	76.5879%
	L2	D2	R.1	0.7947	77.8178%
	L2	D2	R.2	0.7938	77.8202%
2	L1	D1	R.1	0.7961	62.2513%
	L1	D1	R.2	0.7950	62.2536%
	L1	D2	R.1	0.4999	62.8769%
	L1	D2	R.2	0.5731	62.7220%

Q (m ³ /S)	LONGITUD (m)	DIÁMETRO (mm)	RUGOSIDAD (μm)	P. CARGA (m)	EFICIENCIA (%)
	L2	D1	R.1	0.8193	62.2024%
	L2	D1	R.2	0.8181	62.2050%
	L2	D2	R.1	0.5146	62.8457%
	L2	D2	R.2	0.5129	62.8493%

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 34. se dio a conocer el resumen de las pérdidas de carga total y su impacto en la eficiencia del sistema hidroeléctrico donde se evidencia que la eficiencia mayor que se logra es cuando en una condición operativa de caudal igual a 3m³/s se obtienen una eficiencia del sistema hidroeléctrico de 92.4125%.

4.2 Prueba de hipótesis

H1: Las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.

H1 a: Un incremento en el diámetro de la tubería de presión mejora significativamente la eficiencia eléctrica del sistema.

H1 b: A menor rugosidad interna de la tubería de presión se produce un aumento significativo en la eficiencia del sistema eléctrico.

H1 c: A mayor longitud de la tubería de presión se produce una disminución significativa de eficiencia eléctrica del sistema.

Se realizó el contraste de hipótesis de la investigación, se consideró el diseño factorial experimental de múltiples niveles. Regresión factorial general: D, R, C Y L.

Tabla 35. Matriz de datos del diseño factorial experimental con las pérdidas de carga total en (m).

NIVEL	2	2	2	3	R	PÉRDIDAS TOTALES (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (m)	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (μm)	CAUDAL (L/s)	RESPUESTA (m/km)	
1	111.21	1230	2.1	3000	0.2880339	

NIVEL	2	2	2	3	R	PÉRDIDAS TOTALES (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (m)	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (µm)	CAUDAL (L/s)	RESPUESTA (m/km)	
2	1	0.8	2.1	3000	0.56537	1.7621
3	0.8	0.8	2.1	3000	0.37972	
4	0.9	0.8	2.1	3000	0.381816	
5	7	0.8	2.1	3000	0.14721	
6	111.21	1230	0.5	3000	0.2858097	1.7569
7	1	0.8	0.5	3000	0.56506	
8	0.8	0.8	0.5	3000	0.379472	
9	0.9	0.8	0.5	3000	0.381546	
10	7	0.8	0.5	3000	0.14504	
11	111.21	1230	2.1	2500	0.2046264	1.2256
12	1	0.8	2.1	2500	0.39228	
13	0.8	0.8	2.1	2500	0.263984	
14	0.9	0.8	2.1	2500	0.264852	
15	7	0.8	2.1	2500	0.09989	
16	111.21	1230	0.5	2500	0.2035143	1.2289
17	1	0.8	0.5	2500	0.39279	
18	0.8	0.8	0.5	2500	0.263832	
19	0.9	0.8	0.5	2500	0.265311	
20	7	0.8	0.5	2500	0.10346	
21	111.21	1230	2.1	2000	0.1356762	0.7961
22	1	0.8	2.1	2000	0.25181	
23	0.8	0.8	2.1	2000	0.169192	
24	0.9	0.8	2.1	2000	0.170181	
25	7	0.8	2.1	2000	0.06923	
26	111.21	1230	0.5	2000	0.1356762	0.7950
27	1	0.8	0.5	2000	0.25171	
28	0.8	0.8	0.5	2000	0.169112	
29	0.9	0.8	0.5	2000	0.170091	
30	7	0.8	0.5	2000	0.06846	
31	111.21	1330	2.1	3000	0.1968417	1.1046
32	1	0.9	2.1	3000	0.35166	
33	0.8	0.9	2.1	3000	0.236024	
34	0.9	0.9	2.1	3000	0.237195	
35	7	0.9	2.1	3000	0.08288	
36	111.21	1330	0.5	3000	0.1957296	
37	1	0.9	0.5	3000	0.35152	

NIVEL	2	2	2	3	R	PÉRDIDAS TOTALES (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (m)	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (µm)	CAUDAL (L/s)	RESPUESTA (m/km)	
38	0.8	0.9	0.5	3000	0.235904	1.1021
39	0.9	0.9	0.5	3000	0.237078	
40	7	0.9	0.5	3000	0.08183	
41	111.21	1330	2.1	2500	0.1401246	0.7827
42	1	0.9	2.1	2500	0.25009	
43	0.8	0.9	2.1	2500	0.164072	
44	0.9	0.9	2.1	2500	0.169416	
45	7	0.9	2.1	2500	0.05901	
46	111.21	1330	0.5	2500	0.1401	0.7717
47	1	0.9	0.5	2500	0.2443	
48	0.8	0.9	0.5	2500	0.1640	
49	0.9	0.9	0.5	2500	0.1648	
50	7	0.9	0.5	2500	0.0584	
51	111.21	1330	2.1	2000	0.0934164	0.4999
52	1	0.9	2.1	2000	0.1566	
53	0.8	0.9	2.1	2000	0.105144	
54	0.9	0.9	2.1	2000	0.105705	
55	7	0.9	2.1	2000	0.03899	
56	111.21	1330	0.5	2000	0.1335	0.5731
57	1	0.9	0.5	2000	0.1601	
58	0.8	0.9	0.5	2000	0.1073	
59	0.9	0.9	0.5	2000	0.1088	
60	7	0.9	0.5	2000	0.0634	
61	122.331	1230	2.1	3000	0.3168347	1.8113
62	1.1	0.8	2.1	3000	0.567468	
63	0.88	0.8	2.1	3000	0.381392	
64	0.99	0.8	2.1	3000	0.3837141	
65	7.7	0.8	2.1	3000	0.161931	
66	122.331	1230	0.5	3000	0.3143881	1.8056
67	1.1	0.8	0.5	3000	0.567138	
68	0.88	0.8	0.5	3000	0.381128	
69	0.99	0.8	0.5	3000	0.3834072	
70	7.7	0.8	0.5	3000	0.159544	
71	122.331	1230	2.1	2500	0.2250872	1.2659
72	1.1	0.8	2.1	2500	0.394482	
73	0.88	0.8	2.1	2500	0.265188	
74	0.99	0.8	2.1	2500	0.2658348	

NIVEL	2	2	2	3	R	PÉRDIDAS TOTALES (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (m)	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (µm)	CAUDAL (L/s)	RESPUESTA (m/km)	
75	7.7	0.8	2.1	2500	0.115269	1.2636
76	122.331	1230	0.5	2500	0.2238639	
77	1.1	0.8	0.5	2500	0.394273	
78	0.88	0.8	0.5	2500	0.265012	
79	0.99	0.8	0.5	2500	0.2666466	
80	7.7	0.8	0.5	2500	0.113806	
81	122.331	1230	2.1	2000	0.1492426	0.8193
82	1.1	0.8	2.1	2000	0.252802	
83	0.88	0.8	2.1	2000	0.1699808	
84	0.99	0.8	2.1	2000	0.171072	
85	7.7	0.8	2.1	2000	0.076153	
86	122.331	1230	0.5	2000	0.1492426	0.8181
87	1.1	0.8	0.5	2000	0.252692	
88	0.88	0.8	0.5	2000	0.1698928	
89	0.99	0.8	0.5	2000	0.1709631	
90	7.7	0.8	0.5	2000	0.075306	
91	122.331	1330	2.1	3000	0.2165241	1.1357
92	1.1	0.9	2.1	3000	0.352847	
93	0.88	0.9	2.1	3000	0.2369664	
94	0.99	0.9	2.1	3000	0.2382732	
95	7.7	0.9	2.1	3000	0.091091	
96	122.331	1330	0.5	3000	0.2153008	1.1330
97	1.1	0.9	0.5	3000	0.352693	
98	0.88	0.9	0.5	3000	0.2368432	
99	0.99	0.9	0.5	3000	0.2381346	
100	7.7	0.9	0.5	3000	0.090013	
101	122.331	1330	2.1	2500	0.1541358	0.7947
102	1.1	0.9	2.1	2500	0.245267	
103	0.88	0.9	2.1	2500	0.1647448	
104	0.99	0.9	2.1	2500	0.1656765	
105	7.7	0.9	2.1	2500	0.064911	
106	122.331	1330	0.5	2500	0.1541358	0.7938
107	1.1	0.9	0.5	2500	0.245168	
108	0.88	0.9	0.5	2500	0.1646656	
109	0.99	0.9	0.5	2500	0.1655874	
110	7.7	0.9	0.5	2500	0.064218	

NIVEL	2	2	2	3	R	PÉRDIDAS TOTALES (m)
ITEM	LONGITUD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (m)	DIAMETRO DE TUBERÍA (mm)	RUGOSIDAD DE LA TUBERÍA DE PRESIÓN (μm)	CAUDAL (L/s)	RESPUESTA (m/km)	
111	122.331	1330	2.1	2000	0.1027572	0.5146
112	1.1	0.9	2.1	2000	0.157168	
113	0.88	0.9	2.1	2000	0.1055912	
114	0.99	0.9	2.1	2000	0.1062072	
115	7.7	0.9	2.1	2000	0.042889	
116	122.331	1330	0.5	2000	0.1015339	0.5129
117	1.1	0.9	0.5	2000	0.157113	
118	0.88	0.9	0.5	2000	0.105556	
119	0.99	0.9	0.5	2000	0.1061577	
120	7.7	0.9	0.5	2000	0.042504	

Fuente: elaboración propia

En la tabla 35. se detalló la matriz de datos de acuerdo con el diseño factorial experimental que se tiene $2 \times 2 \times 2 \times 3$, teniendo en total un total de 24 combinaciones, donde además se detalló las pérdidas por tramo de tubería.

4.2.1 Análisis de varianza

Tabla 36. Análisis de varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	24	7.54877	0.31453	1463.97	0.00
Bloques	1	0.03273	0.03273	152.33	0.00
Lineal	5	7.22547	1.44509	6726.11	0.00
DIÁMETRO	1	0.00576	0.00576	26.81	0.00
RUGOSIDAD	1	2.51084	2.51084	11686.58	0.00
CAUDAL	2	4.70872	2.35436	10958.24	0.00
LONGITUD	1	0.00014	0.00014	0.65	0.427
Interacciones de 2 términos	9	0.2868	0.03187	148.32	0.00
DIÁMETRO*RUGOSIDAD	1	0.00224	0.00224	10.45	0.004
DIÁMETRO*CAUDAL	2	0.00314	0.00157	7.31	0.003
DIÁMETRO*LONGITUD	1	0.0004	0.0004	1.87	0.184
RUGOSIDAD*CAUDAL	2	0.27957	0.13978	650.62	0.00
RUGOSIDAD*LONGITUD	1	0.00035	0.00035	1.62	0.215

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
CAUDAL*LONGITUD	2	0.00109	0.00055	2.54	0.101
Interacciones de 3 términos	7	0.00266	0.00038	1.77	0.142
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*CAUDAL	2	0.00045	0.00023	1.06	0.0364
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*LONGITUD	1	0.00028	0.00028	1.28	0.269
DIÁMETRO*CAUDAL*LONGITUD	2	0.00094	0.00047	2.2	0.134
RUGOSIDAD*CAUDAL*LONGITUD	2	0.00099	0.00049	2.3	0.123
Interacciones de 4 términos	2	0.00112	0.00056	2.6	0.096
DIÁMETRO*RUGOSIDAD*CAUDAL*LONGITUD	2	0.00112	0.00056	2.6	0.096
Error	23	0.00494	0.00021		
Total	47	7.55371			

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab

En la tabla 36. Se dio a conocer el análisis de varianza (ANOVA), en el cual se detalló que variables son las de mayor impacto y que combinaciones de esta afectan al sistema en su conjunto.

Modelo general: GL = 24, SC Ajustada = 7.54877, Valor p = 0.00. El modelo en su conjunto es altamente significativo (valor p < 0.05). Esto significa que las variables del modelo describen de manera significativa los cambios que se presentan en la variable dependiente.

Efectos lineales: Factor D (diámetro): valor p= 0.000, significativo al nivel de confianza del 95%. Esto indica que el factor D tiene un impacto importante en la variable dependiente, pero en menor medida que el resto de las variables.

Factor R (rugosidad): valor p= 0.00, relevante con un nivel de confianza del 95%. Esto sugiere que el factor R tiene un impacto importante en la variable dependiente.

Factor C (caudal): valor p: 0.00, Con un nivel de confianza del 95%, se considera significativo. esto implica que el factor C tiene un impacto importante en la variable dependiente.

Factor L (longitud): valor p= 0.427, Alcanzando un nivel de confianza del 95%, lo cual señala que el factor L tiene un impacto poco influyente en la variable dependiente.

Interacciones de 2 términos:

D*R: Valor p= 0.004. Significativo, la interacción de estas dos variables es importante, p<=0.005

D*C: Valor p= 0.003. Significativo, la interacción de estas dos variables es importante, p<=0.005

R*C: Valor p= 0.00. Significativo, la interacción entre R y C es importante, P<=0.05.

Error:

La variabilidad del error es muy pequeña SC Ajustada del error = 0.00494, esto sugiere que el modelo tiene un buen ajuste. MC Ajustada = 0.00021 este valor sugiere que el modelo explica casi toda la variabilidad de los datos.

Resumen del modelo:

Tabla 37. Resumen de modelo

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad.	R-cuad.
		(ajustado)	(pred)
0.0146577	99.93%	99.87%	99.72%

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab.

En la Tabla 37, correspondiente al error estándar de la estimación (S), se presentó el promedio de las diferencias (residuales) La discrepancia entre los valores observados y los previstos por el modelo se reflejó en un valor bajo de S (0.0146577), lo que sugiere una alta capacidad predictiva, ya que los errores fueron generalmente pequeños. Por otro lado, el coeficiente R-cuadrado indicó cuánta de la variabilidad de la variable dependiente podía ser explicada por el modelo. En este análisis, el 99.93% de la variabilidad de los datos fue explicado por el modelo, lo que evidenció un ajuste adecuado. El R^2 ajustado penaliza el R^2 cuando se agregan variables al modelo que no mejoran sustancialmente su poder predictivo. Al ajustar el número de predictores, proporciona una evaluación más realista del poder predictivo del modelo. En este caso, el 99.87% indica que, es un modelo es altamente predictivo, pero es importante tener en cuenta la complejidad del sistema. El R^2 predicho mide qué tan bien el modelo predice los nuevos datos que no se usaron para ajustar el modelo. En este caso, el valor 99.72% indica que el modelo tiene un poder predictivo alto.

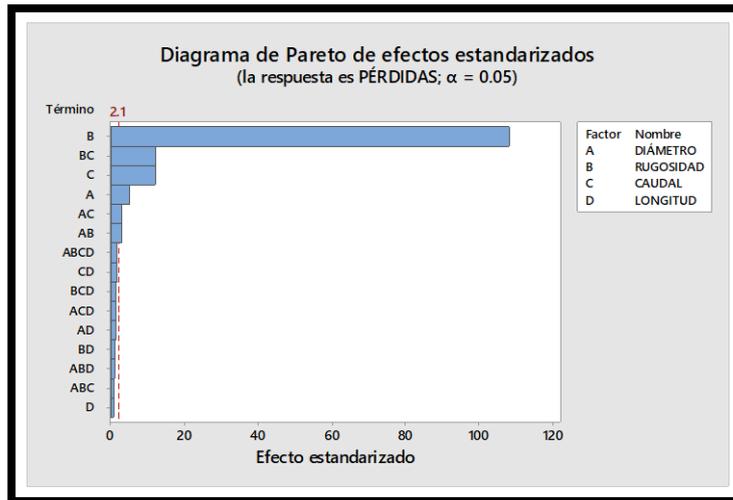


Figura 40. Diagrama de Pareto de la matriz de datos.

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab

En la figura 40. se puede observar que los factores independientes “A”, “B” y “C” diámetro, rugosidad y caudal respectivamente son los más importantes ya que tienen un mayor efecto estandarizado e influyeron directamente en la función objetivo. Por otro lado, los factores “A”, “B” y “C” en conjunto tienen también un efecto significativo sobre la variable respuesta “pérdidas de carga por fricción”, aunque los otros factores tuvieron también un impacto significativo, lo que representa el diagrama de Pareto hace énfasis en prestarle especial atención al factor diámetro, rugosidad y caudal.

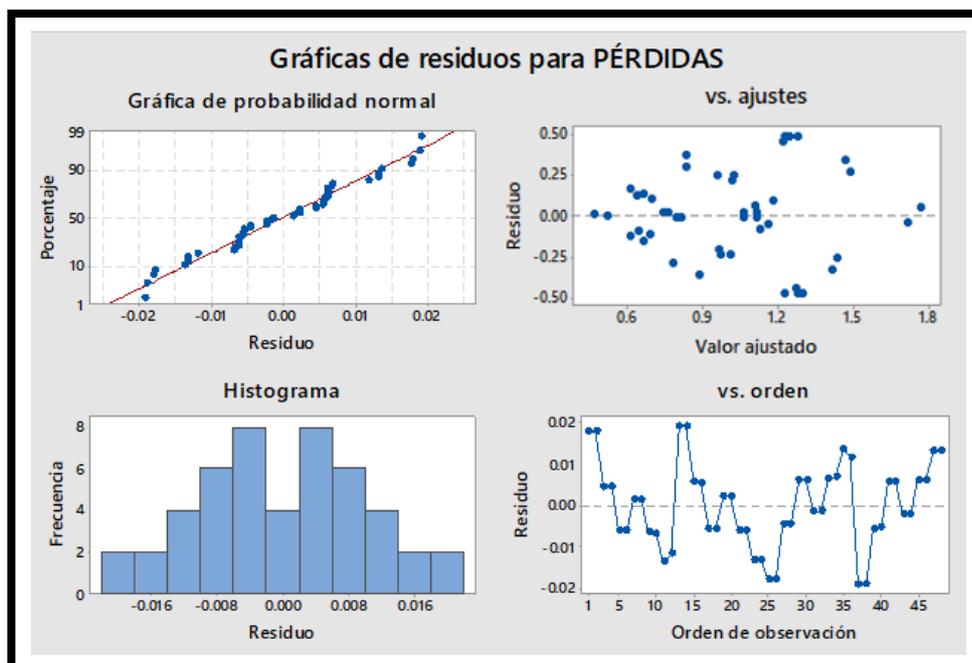


Figura 41. Gráfica de residuos en las respuestas.

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab

En la figura 41. Se pudo observar que la primera gráfica es la de probabilidad normal de Anderson – Darling que está relacionada a la prueba de normalidad, donde se compara la distribución de los datos con una distribución normal, si estos datos siguen una distribución normal, los puntos del gráfico deben estar cerca de la línea recta (30). Para el desarrollo de la presente tesis se empleó la gráfica de normalidad ya que es más intuitiva visualmente, tiene un menor grado de complejidad en comparación a la prueba de normalidad y es fácil de interpretar para muestras pequeñas como fue el caso de esta investigación.

De la gráfica de probabilidad normal: Se comparó los residuos con una distribución normal esperada. Si los residuos presentaban una distribución normal, los puntos debían alinearse a lo largo de la línea roja. En este caso, la mayoría de los puntos se alinearon correctamente, excepto algunos valores extremos cercanos al 1% y 99%, lo que podría indicar la presencia de leves desviaciones de la normalidad en los extremos. Sin embargo, en general, los residuos tuvieron una distribución normal moderadamente bien y esto generó la validez del análisis de varianza ANOVA.

Gráfica de residuos vs. valores ajustados: Indicó si había algún patrón en los residuos en relación con los valores ajustados por el modelo. Se asumió que los residuos debían distribuirse de forma aleatoria y sin un patrón identificable. Los puntos parecen estar distribuidos de manera aleatoria alrededor de cero, sin mostrar un patrón claro. Esto sugiere que no hay evidencia de heterocedasticidad (varianza no constante) y que el modelo ajusta bien a los datos sin patrones obvios en los residuos.

Histograma de residuos: Representó la distribución de los residuos. Si estos seguían una distribución normal. la distribución de los residuos es bimodal, lo que no es completamente consistente con una distribución normal.

Gráfica de residuos vs. orden de observación: Identifica si existe alguna autocorrelación en los residuos, es decir, si los residuos están correlacionados en función del orden en que se registraron. Si los residuos son independientes, no debería haber patrones discernibles en esta gráfica. La gráfica muestra un patrón cíclico que indica autocorrelación entre los residuos.

Esto sugiere que los residuos no son completamente independientes y podría haber una relación entre los residuos en función del orden de observación. Esto podría significar que algunas observaciones cercanas en el tiempo o en el orden de recolección de datos están correlacionadas.

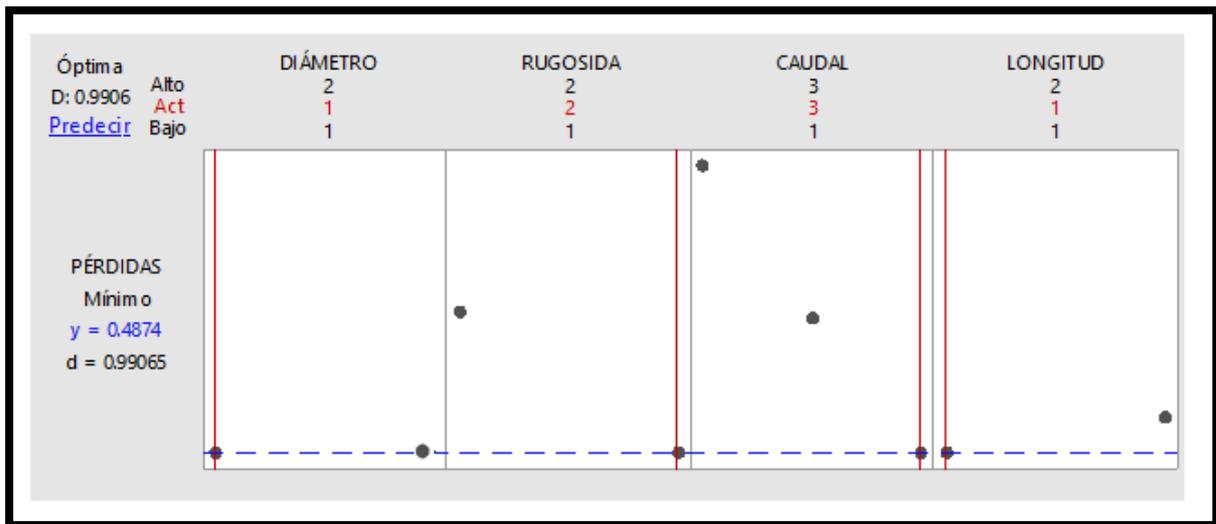


Figura 42. Gráfico optimizador de respuestas pérdidas de carga.

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab

En la figura 42. de acuerdo con el gráfico de optimización de la respuesta (figura 27), para minimizar las pérdidas de carga el mejor escenario se da cuando: el factor “D” independientemente de su nivel su impacto en las pérdidas de carga es alto, el factor “R” está en un nivel alto que equivale a una rugosidad de $0.5 \mu\text{m}$, el factor “C” que es la variable caudal en un valor de 2000 l/s, el factor longitud en un nivel bajo que se interpretó en mantener la longitud inicial del sistema es lo óptimo para minimizar las pérdidas de carga.

d: representa la función de deseabilidad, que varía entre 0 y 1. Un valor cercano a 1 indica que los niveles de los factores actuales están muy cerca del valor óptimo deseado. En este caso, $D = 0.9906$, lo que sugiere que la combinación actual de niveles de los factores se aproxima bastante al mínimo deseado para RPTA (Pérdidas de carga). Finalmente, el ajuste es satisfactorio con una deseabilidad de $D = 0.99065$.

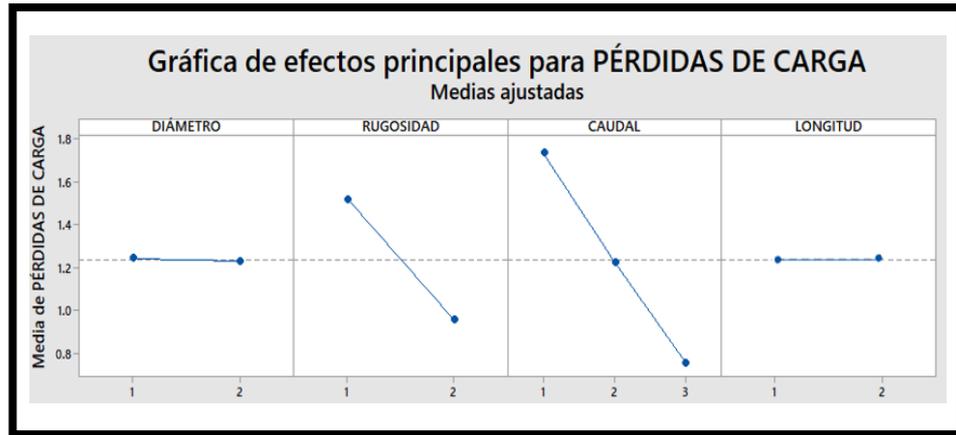


Figura 43. Efectos principales para "pérdidas de carga" que representa las pérdidas de carga en el sistema

Fuente: Elaboración propia con el software Minitab

En la figura 43. de resultados obtenidos, contrastan con la gráfica de efectos principales para las pérdidas de carga, donde las pérdidas de carga toman valores inferiores cuando el factor "D" está en su nivel alto, el factor "R" en un nivel alto, el factor "C" en su nivel alto y el factor "L" nivel alto.

4.3 Discusión de resultados

4.3.1 Hipótesis general

En la hipótesis general se acepta la hipótesis alterna (H1) y se rechaza la hipótesis nula H0, en el análisis de varianza se halló un valor $p < 0.05$, lo que indica que las variables del modelo explicaron una parte significativa de la variabilidad en la función objetivo. Estos hallazgos son consistentes con los hallados por Waskaasa et al. (1) donde se observó que una reducción del 13,7% en las pérdidas de carga, produjo un aumento en la producción de electricidad, estimado en un 1,8% con respecto a la producción inicial.

El estudio de Garrido et al (12) demostró que la disminución en las pérdidas de carga en un 12%, genera un aumento en la eficiencia eléctrica del sistema del 8%. Este resultado cuantificable sugiere que, al mantener las pérdidas de carga a niveles mínimos, la eficiencia de la minicentral se puede maximizar. De igual forma en la investigación de Iliev et al. (14) se obtuvo que con una reducción de las pérdidas de carga en un 30%, conllevó a una mejora de la eficiencia eléctrica de hasta un 12%. Isaí Álvarez-Sevilla et al. (9) también subraya que la disminución de las pérdidas de carga por fricción en la tubería forzada es clave para mejorar la eficiencia de un sistema hidráulico.

De manera similar el estudio de Antonio (2), indicó que cuando las pérdidas de carga se redujeron en un 15%, se generó un incremento de aproximadamente un 3% en la eficiencia eléctrica del sistema. De igual manera el estudio de López (16), al reducir las pérdidas de carga se tuvo un impacto directo en la capacidad de generación de energía de la central. Dados estos hallazgos que refuerzan la hipótesis general H1 del presente trabajo de investigación que postula que las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.

Basándose en los hallazgos de la investigación y los resultados estadísticos obtenidos, se puede afirmar que las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la MCH Ingenio, con una disminución de 66.01 m de pérdidas de carga en la tubería forzada se logró alcanzar un aumento de hasta 2.0632% en la eficiencia eléctrica del sistema. También se ha observado que es fundamental considerar un diseño óptimo y adecuado de las tuberías para la llegada a la turbina, ya que un análisis detallado de los cambios de orientación y las derivaciones en la tubería de presión es crucial, de lo contrario, se generarían mayores pérdidas de carga.

4.3.2 Hipótesis específicas

Hipótesis específica H1.a

Se rechaza la hipótesis nula H_0a y se acepta la hipótesis alterna (H_1a), que propuso un incremento en el diámetro mejora significativamente la eficiencia eléctrica del sistema. El estudio estadístico ofrece una base firme que sustenta esta hipótesis, demostrando que un incremento en el diámetro de la tubería de presión disminuirá las pérdidas de carga y mejorará la eficiencia eléctrica del sistema. Estos resultados están en línea con investigaciones previas.

En el estudio de Jarry Bolduc y Côté (11), se identificó que, al cambiar de un diámetro de 10 cm a 15 cm, las pérdidas de carga se redujeron en un 30%, resultando en un incremento de la eficiencia del sistema del 5% en comparación con condiciones anteriores.

Los resultados obtenidos por HOUNNOU (8), confirman que aumentar el diámetro de la tubería de presión resulta en una reducción del costo asociado a las pérdidas de carga. Específicamente, se determinó que para el sitio de Affon, un diámetro de 1.494 m logró una ratio máxima del 1.876%, de igual manera el estudio de Arechua (3), se halló que un diámetro de 0.345 m optimiza el flujo y reduce las pérdidas por fricción en comparación con diámetros más pequeños.

El estudio de Vinicio Palomeque et al. (10) evidenciaron que la hipotética relación entre el diámetro y la reducción de pérdidas de carga se sostiene, ya que un aumento en el diámetro reduce la velocidad del flujo y, a su vez, las pérdidas por fricción, lo que se traduce en una mayor

eficiencia eléctrica. Los resultados del estudio Dametew (7), confirman esta relación, señalando que tuberías de mayor diámetro generan menor resistencia al flujo, lo cual permite maximizar la potencia generada, ya que la energía hidráulica se concentra efectivamente en la turbina.

Tomando en cuenta los hallazgos de la investigación y resultados de la prueba estadística, se evidenció que en un escenario hipotético un incremento en el diámetro de 10 cm en la tubería de presión de la MCH Ingenio conlleva a una disminución de 0.6575m de pérdidas de carga, con este resultado se mejoró la eficiencia eléctrica del sistema en un 2.0053% con respecto a la eficiencia inicial.

Hipótesis específica H1.b

Se rechaza la hipótesis nula H_0 b y se acepta la hipótesis alterna (H_1 b), afirmando que una menor rugosidad mejorará significativamente la eficiencia eléctrica la MCH Ingenio. El análisis estadístico proporciona un fundamento sólido que respalda esta hipótesis, mostrando que una menor rugosidad genera mayor eficiencia eléctrica. Estos hallazgos coinciden con estudios anteriores.

Los hallazgos obtenidos por Garrido et al (12), demostraron que condiciones donde la rugosidad se incrementó, se observó un aumento en la fricción que condujo a una reducción de la eficiencia del sistema en aproximadamente un 8%. El estudio de Wellington (13), también menciona que un incremento en la rugosidad del 10% se asoció con un aumento del 5% en las pérdidas de energía, los cuales son críticos para la generación efectiva. Esto respalda la hipótesis H_1 b, la cual postula que una mayor rugosidad incrementa las pérdidas de carga, evidenciando que los materiales elegidos en la construcción de tuberías deben ser cuidadosamente seleccionados para minimizar las pérdidas de energía por fricción.

Los hallazgos en el estudio de Mendoza (17), se determinó que una tubería de presión con una rugosidad de 0.1 mm generó pérdidas de carga de 4.4 m, mientras que una con rugosidad de 0.5 mm incrementó las pérdidas a 5.1 m. El desarrollo del estudio de Rayme y Vásquez (19) ,como también el de Yañez (18), refuerzan la hipótesis de que aumento en la fricción del flujo se traduce en una disminución de la eficiencia del sistema.

Considerando los hallazgos estadísticos y los resultados de la investigación, es posible afirmar que una menor rugosidad interna en la tubería de presión de la MCH Ingenio reduce las pérdidas por fricción, lo que a su vez mejora el flujo del fluido y aumenta la eficiencia del sistema en hasta 0.02% respecto a la eficiencia inicial.

Hipótesis específica H1.c

Se rechaza la hipótesis nula H_0 c y se acepta la hipótesis alterna (H_1 c), que plantea que una mayor longitud de tubería de presión se produce una disminución significativa de eficiencia eléctrica en el sistema. El análisis estadístico proporciona un fundamento sólido que respalda esta hipótesis, mostrando que una mayor longitud en la tubería de presión de la MCH Ingenio producirá menor eficiencia eléctrica. Estos hallazgos se alinean con estudios previos.

Los resultados obtenidos en el estudio de Iliev et al. (14), se encontraron que, por cada metro adicional de longitud de tubería, las pérdidas de carga aumentaron aproximadamente un 2% lo que provocó una reducción en la eficiencia del sistema. Además, a través de estudios numéricos, se determinó que al aumentar la longitud de la tubería de presión en un 50% la eficiencia del sistema caía en torno al 10%. De manera similar Sepetci (15), estimó que un incremento en la longitud de 100 metros se traduce aproximadamente en un aumento de 5% en las pérdidas de carga, lo que resulta en una eficiencia disminuida del sistema en situaciones de trabajo. Teniendo en cuenta los resultados de los autores citados se puede aceptar la hipótesis específica h_1 c que menciona la relación inversa entre longitud de la tubería de presión y eficiencia eléctrica.

En el estudio de Carbajal (21) indicaron que, al aumentar la longitud de la tubería de presión de 50 a 100 metros, las pérdidas de carga se incrementaron en un 30%, de similar manera el estudio de Tituaña y Torres (23), se encontró que, por cada incremento de 100 metros en la longitud de la tubería, las pérdidas de carga aumentaron en un 5%, lo que se tradujo en una disminución del 3% en la eficiencia eléctrica. Los hallazgos de Calmet (20), Zamora y Juárez (22) respaldan la hipótesis, subrayando la importancia de minimizar la longitud de la tubería de presión para mejorar la eficiencia del sistema hidroeléctrico, de acuerdo con lo planteado en el presente trabajo de investigación.

Tomando en cuenta los hallazgos de la investigación y los resultados de la prueba estadística, se evidenció que, en un escenario hipotético, un incremento del 10% en la longitud actual de la tubería de presión de la MCH Ingenio provocará una reducción del 0.153% en la eficiencia con respecto a la eficiencia inicial del sistema, este hallazgo es relativamente inferior en comparación con el análisis de variables ya mencionadas, pero es significativa respecto con el incremento proporcional que se dio a la tubería de la MCH Ingenio en comparación con los estudios previos. Esto se debe a que un aumento en la longitud de la tubería de presión genera mayores pérdidas por fricción, lo que impacta el rendimiento del flujo y, en consecuencia, reduce la eficiencia del sistema.

4.4 Trabajos futuros

En base a los hallazgos obtenidos en la presente investigación, se sugiere que futuros trabajos podrían enfocarse en profundizar en el análisis de las pérdidas de carga menores que, aunque a menudo son consideradas marginales, pueden tener un impacto considerable en el rendimiento global de la minicentral hidroeléctrica. Se sugiere realizar investigaciones enfocadas en identificar y cuantificar las pérdidas asociadas a cavitaciones, que pueden ocurrir en condiciones específicas de operación, así como evaluar la influencia de la reorientación de la tubería de presión en el flujo de agua. Cambiar la dirección de las tuberías o agregar elementos como codos y válvulas podría generar turbulencias adicionales, lo que afectaría la fricción y, por ende, la eficiencia operativa. A través de simulaciones avanzadas y experimentación, se puede determinar si estas transformaciones en la disposición del sistema contribuyen a reducir las pérdidas menores y mejorar la eficiencia total. Este enfoque holístico y detallado no solo maximizaría la producción de energía, sino que también ayudaría a optimizar la vida útil y el mantenimiento de la infraestructura hidráulica en el tiempo.

CONCLUSIONES

Primera:

Las pérdidas de carga tuvieron una influencia significativa en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio, lo que permitió validar la hipótesis general (H1). Asimismo, se determinó que la optimización de variables clave, como el diámetro, la rugosidad y la longitud de la tubería, desempeñó un papel fundamental en la reducción efectiva de dichas pérdidas. En consecuencia, la disminución de estas pérdidas favoreció un aumento en la eficiencia del sistema, manteniendo las mismas condiciones operativas de caudal. En el escenario más favorable, se logró una mejora en la eficiencia eléctrica de hasta un 2.0632% con respecto a la eficiencia inicial del sistema. Por lo tanto, estos resultados resaltaron la importancia de un diseño óptimo de las tuberías en sistemas hidroeléctricos, lo que pudo haberse traducido en mejoras operativas y reducción de costos energéticos.

Segunda:

El análisis realizado permitió confirmar que el aumento en el diámetro de la tubería de presión mejoró significativamente la eficiencia eléctrica en la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio. En consecuencia, se respaldó la hipótesis específica (H1a) y se rechazó la hipótesis nula (H0a), dado que los resultados evidenciaron que, al incrementar hipotéticamente el diámetro en 10 cm bajo una misma condición operativa de caudal, las pérdidas de carga se redujeron en 0.6575 m. Como resultado, se logró una mejora en la eficiencia de hasta un 2.0553% en comparación con la eficiencia registrada con el diámetro inicial, lo que puso de manifiesto la importancia de una adecuada optimización del diseño hidráulico basada en un mayor diámetro.

Tercera:

Los hallazgos de la investigación confirmaron que la rugosidad interna de la tubería de presión tuvo una influencia directa en las pérdidas de carga y, por ende, en la eficiencia del sistema hidroeléctrico, respaldando así la hipótesis H1.b. Se evidenció que, a medida que la rugosidad de la tubería de presión aumentaba, la fricción del flujo se intensificaba, lo que generaba mayores pérdidas de carga. Bajo las mismas condiciones operativas de caudal, cuando la rugosidad interna se estableció en 2.1 μm , las pérdidas de carga total en el sistema alcanzaron los 1.7621 m, mientras que con una rugosidad de 0.5 μm , estas pérdidas se redujeron en 5.2 mm, lo que permitió mejorar la eficiencia eléctrica hasta en un 0.02% respecto a la eficiencia inicial. Por lo tanto, estos resultados evidenciaron que la selección de materiales con menor rugosidad optimizó la eficiencia del sistema hidroeléctrico al minimizar las pérdidas de carga por fricción y mejorar el rendimiento

general de la infraestructura, lo que resaltó la importancia de considerar criterios de selección de materiales en el diseño hidráulico, permitiendo una mayor eficiencia operativa y una reducción de costos energéticos en futuros proyectos hidroeléctricos.

Cuarta:

Los resultados de la investigación evidenciaron que la longitud de la tubería de presión tuvo una influencia significativa en las pérdidas de carga y, en consecuencia, en la eficiencia eléctrica del sistema hidroeléctrico, lo que permitió respaldar la hipótesis H1.c y rechazar la hipótesis nula. A través del análisis de la relación entre la longitud de la tubería de presión y su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema, se determinó que, bajo un mismo caudal operativo, al aumentar en un 10% la longitud de cada tramo de la tubería, las pérdidas de carga total alcanzaron hasta un 2.79% más en comparación con las pérdidas registradas con la longitud inicial de cada tramo, lo que se tradujo en una reducción de la eficiencia de hasta un 0.153% respecto a la eficiencia inicial del sistema operando con la longitud original. Por lo tanto, estos hallazgos resaltaron la importancia de un diseño hidráulico optimizado, ya que una extensión inadecuada de la tubería de presión puede comprometer la eficiencia energética del sistema.

RECOMENDACIONES

Primera:

A Electrocentro S.A mejorar la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio, se recomienda implementar un programa exhaustivo de optimización en el diseño de las tuberías forzadas. Este programa debe basarse en el análisis detallado de las características actuales de las tuberías y las condiciones operativas que influyen en las pérdidas de carga. La optimización debe incluir la selección de tuberías adecuadas en términos de diámetro y rugosidad, así como la reconfiguración del sistema hidráulico para minimizar la fricción y la turbulencia. Esto permitirá no solo reducir las pérdidas de carga, sino también incrementar la producción de energía, contribuyendo así a un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles, tal como se sugirió en las conclusiones que reflejan un posible aumento del 2.0632% en la eficiencia.

Segunda:

A Electrocentro S.A abordar la interacción entre el diámetro de la tubería de presión y las pérdidas hidráulicas, es crucial desarrollar un estudio que evalúe cómo diferentes diámetros afectan la eficiencia eléctrica del sistema. Se sugiere realizar simulaciones utilizando el software Epanet 2.0 que permitan proyectar los resultados de diferentes configuraciones de diámetro y su impacto en las pérdidas de carga. También se recomienda establecer un protocolo de medición del caudal en tiempo real, de modo que se puedan basar las decisiones en datos confiables. Esta estrategia no solo proporcionó información valiosa para la toma de decisiones, sino que también ayudará a identificar la configuración óptima de diámetro que maximice el rendimiento del sistema.

Tercera:

A Electrocentro S.A respecto a la rugosidad interna de la tubería, se debe llevar a cabo un análisis exhaustivo que determine el impacto que diferentes materiales y acabados pueden tener en la eficiencia del sistema. La implementación de revestimientos de baja fricción en las tuberías y utilizar materiales más eficientes pueden resultar en una significativa reducción de las pérdidas de carga. Además, es necesario llevar a cabo un seguimiento de las condiciones operativas en las que se reinvierte en estos aspectos, garantizando que las decisiones de diseño se basen en las condiciones de operación reales. Este enfoque proactivo contribuirá a una mayor eficiencia eléctrica, como se concluyó en la investigación.

Cuarta:

Finalmente, a Electrocentro S.A para optimizar la longitud de la tubería de presión y su impacto en la eficiencia eléctrica, se sugiere realizar una reevaluación del diseño del sistema hidráulico. Esto incluiría el rediseño de la red de tuberías para minimizar la longitud total, siempre que sea posible, y así reducir las pérdidas asociadas. Se recomienda que este análisis se realice en conjunto con técnicas de modelado hidráulico y simulación, permitiendo iterar diferentes configuraciones y evaluar su impacto en la eficiencia general. Las conclusiones del estudio resaltaron la importancia de este enfoque, indicando que la disminución de las pérdidas de carga se traduce en un incremento en la eficiencia del sistema. Además, estos cambios estructurales fomentarán una operación más rentable y sostenible a largo plazo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WASKAAS, M., et al. Reduction in pressure drop for pipe flow due to applied electric potentials to the pipe. *Russian Journal of Electrochemistry*. 2008. Vol. 44, no.5, p. 602–609. DOI 10.1134/S1023193508050157. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/VytautasDaujotis/publication/225763525_Reduction_in_pressure_drop_for_pipe_flow_due_to_applied_electric_potentials_to_the_pipe/links/565c629908aeafc2aac70811/Reduction-in-pressure-drop-for-pipe-flow-due-to-applied-electric-potentials-to-the-pipe.pdf
2. TORO MARTÍNEZ, D. Evaluación Financiera de las pérdidas energéticas en las tuberías de conducción de pequeñas centrales hidroeléctricas. 2016. Tesis Doctoral. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/59716/1152186190.217.pdf?sequence=1>
3. ARECHUA DE LA CRUZ, G. “Diseño hidráulico de la tubería de presión de la minicentral hidráulica Huaura, distrito de Paccho, provincia de Huaura, Lima. Online. ”2018. Available from: http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10569/Arechua_dg.pdf?sequence=5&isAllowed=y
4. SEGURA, JR ARAUCO. “Cambio del sistema de sincronización manual por un sistema automático en la Central Hidroeléctrica Ingenio para optimizar la transferencia de energía eléctrica” 2020. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12394/7135>
5. ESPINEL, C. and IZA, J. Estudio y mejora de la eficiencia de generación eléctrica del grupo No. 3 de la Central Hidroeléctrica Illuchi 1.2022. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstreams/0b61ce98-7b0e-47b7-b411-e3c0e587a45b/download>
6. COES SINAC. Informe Energético nacional año 2023 recuperado el 15 de noviembre del 2024. Disponible en: <https://www.coes.org.pe/Portal/portalinformacion/demanda?indicador=maxima>
7. DAMETEW, Alie Wube. Design and analysis of small hydro power for rural electrification. *Global Journal of Research in Engineering*, 2016, vol. 16, no 6, p. 234-241 ISSN:2249-4596 Disponible en: https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=DAMETEW%2C+Alie+Wube.+Design+and+analysis+of+small+hydro+power+for+rural+electrification.+Global+Journal+of+Research+in+Engineering%2C+2016&btnG=
8. HOUNNOU, Amèdédjihundé Hypolite Jordão, et al. Dimensionnement technico-économique de conduite forcee pour microcentrale hydroelectrique en utilisant les algorithmes genetiques. *J. la Rech. Sci. L’Université Lomé*, 2019, vol. 21, no 1, p. 113-122. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Frederic-Dubas/publication/337943144_Dimensionnement_technico-economique_de_conduite_forcee_pour_microcentrale_hydroelectrique_en_utilisant_les_algorithmes_genetiques/links/5df6685a4585159aa480790c/Dimensionnement-

[technico-economique-de-conduite-forcee-pour-microcentrale-hydroelectrique-en-utilisant-les-algorithmes-genetiques.pdf](#)

9. ÁLVAREZ-SEVILLA, I.; BROWN-MANRIQUE, O. DEL CID-COLINDRES, E. Mathematical Models for the Estimation of Hydro Energetic Variables in Suchiate River Basin, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 2017, vol. 26, no 4, p. 47-55. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/932/93254138004.pdf>
10. PALOMEQUE, V. et al. Diseño de una minicentral hidroeléctrica. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Información*, 2020, no E30, p. 30-43. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/NelsonJara/publication/342328500_Diseño_de_una_mini_central_hidroelectrica/links/5eed7e65a6fdcc73be8d85ea/Diseño-de-una-mini-central-hidroelectrica.pdf
11. JARRY-BOLDUC, D. y CÔTÉ, E. Generación de energía hidroeléctrica e instrumentación y medición: pruebas de eficiencia de plantas hidroeléctricas. 2022., vol. 17, no 2, p. 10-14. <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2016/03/EIM05113-Badanie-sprawno%C5%9Bci-elektrowni-wodnych.pdf>
12. GARRIDO, J. ZAFRA, Á. and VÁZQUEZ, F. Modelado y Simulación de Centrales Hidráulicas. XXVIII Jornadas de Automática. 2007. No. June, p. 5. https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/CEA_2007_28JA_1.pdf
13. ARTINS DA SILVA, F., CAMACHO, J. and FERREIRA, J. Analysis of hydraulic losses in the series from 1990 to 2022 at the Retiro small hydroelectric power plant. *Heliyon*. 2024. Vol. 10, no. 8. DOI 10.1016/j.heliyon. 2024.e29627. Disponible: [https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(24\)05658-5.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(24)05658-5.pdf)
14. ILIEV, V.; MARKOV, Z.; POPOVSKI, P. A dynamic behavior of low head Hydro Power Plant during the transient operational regimes. *Cavitation and dynamic problems*, 2015, p.315. Disponible en: https://www.academia.edu/download/106503373/zbornik_iahr_barvni.pdf#page=325
15. SEPETCI, G., et al. Conceptual design of a hydroelectric power plant for a rehabilitation project. 2016. Disponible en: https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/62051/Sepetci_Conceptual_2016.pdf?sequence=1
16. LÓPEZ VILLAYZÁN, S. Diseño Hidráulico óptimo De La Tubería Forzada De La Central Hidroeléctrica Yuracyacu. 2014. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/12750>
17. ESTEBAN MENDOZA, H. Diseño de la bocatoma, tubería forzada, y casa de máquinas para Central Hidroeléctrica en el río Yarumayo, provincia y región Huánuco. 2021. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UNHE_7184d443c25673c32f827d7823e8a9d.

18. VEGA, Y., FERNANDO, G. Diseño hidráulico de la conducción forzada de la Central Hidroeléctrica Aricota 3. 2016. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/323351937.pdf>
19. VÁSQUEZ ORTEGA, D.; RAYME CHALCO, F. Optimización del diámetro, diseño preliminar y simulación fluidodinámica de la tubería forzada de la minicentral hidroeléctrica Hydrika 4. 2018. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/196535875.pdf>
20. CALMET SOTO, J. Planificación y diseño de una pequeña central hidroeléctrica. Online. 2014. P. 277. Disponible en: https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/USMP_b81eb69c68f8456a2a35173c30ef63af
21. CARBAJAL CRUZADO, S. Análisis de los parámetros de operación para determinar la eficiencia de la turbina Francis en la Minicentral Hidroeléctrica Huarandoza. 2020. Disponible en: http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/47102/Gutierrez_RS-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
22. ZAMORA JUAREZ, M., et al. Eficiencia de micro central hidroeléctrica relativa al dimensionamiento geométrico de la turbina. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma del Estado de México. Disponible en: http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/104406/TesisMCA_MAZJ_para_repositorio.pdf?sequence=3
23. TITUAÑA VÁSQUEZ, G.; TORRES RIVAS, E. Diseño de tubería de presión en centrales hidroeléctricas y análisis comparativo de tecnología de materiales acero y poliéster reforzado con fibra de vidrio. 2018. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/items/fe9b843a-31f1-4edd-b1f3-6c2b192476a9>
24. CASTRO, A. Minicentrales hidroeléctricas. *Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía: Madrid, Spain*, 2006. Disponible en: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_2.1.7_Minicentrales_hidroelectricas_125f6cd9.pdf
25. FRAILE MORA, J. Máquinas eléctricas. Mc Graw Hill, 2008. Disponible en: <https://dspace.itsjapon.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/4031/Maquinas-Electricas-6.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
26. ROMERO, A., et al. Informe: BALANCE DEL SISTEMA 2012. Disponible en: https://ovidiouscuvilca.files.wordpress.com/2012/01/primerinforme_grupoingenioouc.docx
27. COTOS MORALES, R. Mecánica de fluidos. Impulsión de fluidos. Online. 2019. ISBN 9702608058. Disponible en: <http://repositorio.uladech.edu.pe/handle/123456789/>
28. HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R.; MENDOZA, C. Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. 2020 disponible en: https://www.academia.edu/download/64312353/Investigacion_Rutas_cualitativa_y_cuantitativa.pdf

29. ESPINOZA MONTES, C. Metodología de investigación tecnológica Pensando en sistemas. 2014. Disponible en: <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1148/mit2.pdf?sequence=1>
30. QUISPE ANCCASI, C.; CAMAYO HUAMANCULI, K. Metodología de investigación tecnológica para ingenierías. 2020. Disponible en: <https://isbn.bnpgob.pe/catalogo.php?mode=detalle&nt=112388>
32. SÁNCHEZ, J. *Metodología de la investigación científica y tecnológica*. Ediciones Díaz de Santos, 2011. Disponible en: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-XG4KMFNnP4C&oi=fnd&pg=PA2&dq=JOSE+CEGARRA+SANCHEZ+metodologia%C3%ADa+DE+INVESTIGACION%C3%93N&ots=ex_YwdECyI&sig=Ta66Xua1o3Atp9Cxdfou9lnFQ8
33. DE ARMAS TEYRA, M.; CASTRO FERNÁNDEZ, M. Software para la Evaluación y Selección de Generadores Independientes. *Ingeniería Energética*, 2014, vol. 35, no 1, p. 4-14. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59012014000100002&script=sci_arttext&tlng=en
34. MILLÁN, L y VECCHI, Comportamiento y Evaluación de la Eficiencia de una Turbina Hidráulica del Tipo Francis. *Mecánica Computacional*, 2000, vol. 19, no 12, p. 441-446. Disponible en: <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/2141/2101>
35. ZAMORA, A., et al. DETERMINACIÓN DE LA MÁXIMA EFICIENCIA DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA TRIFÁSICO UTILIZANDO MÉTODOS GRÁFICOS Y ANALÍTICOS. Disponible en: https://congresos.cio.mx/12_enc_mujer_previa/archivos/extensos/sesion4/S4-ING09.pdf

ANEXOS

ASPECTOS ADMINISTRATIVOS PRESUPUESTO

Tabla 38. Presupuesto del Proyecto

PRESUPUESTO							
Tesis:	: “Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.”						
Duración	: XII meses						
Autor	: Lulo Rivera Jean Piero						
ITEM	DESCRIPCION DE RECURSOS	UND	CANT.	P.U(S/)	MES	SUB TOTAL (S/)	TOTAL (S/)
1	RECURSO HUMANO						
1.1	Lulo Rivera Jean Piero	UND.	1		12	12	-
2	SERVICIOS ACADÉMICOS						
2.1	PAGOS POR SERVICIOS ACADÉMICOS	CJTO	1	S/.1,00	12	12	S/.7.000,00
2	SERVICIOS						
2.1	MOVILIDAD		1	S/.100,00	1	100	S/.50,00
2.2	BUSQUEDA DE INTERNET	gb	1	S/.60,00	12	720	S/.720,00
2.3	CORRECTOR DE ESTILOS	per	1	S/.500,00	1	500	S/.525,00
2.4	Impresiones + Ploteos + Fotocopias + Anillados	cjto	1	S/.100,00	1	100	S/.50,00
3	EQUIPOS Y UTILES DE OFICINA						
3.1	Laptop (RYZEN 5 AMD RADEON)	UND	1	S/.3.000,00	1	3	S/.3.000,00
TOTAL, PRESUPUESTO DEL PROYECTO							S/.11.345,00

Fuente: Elaboración propia

CRONOGRAMA

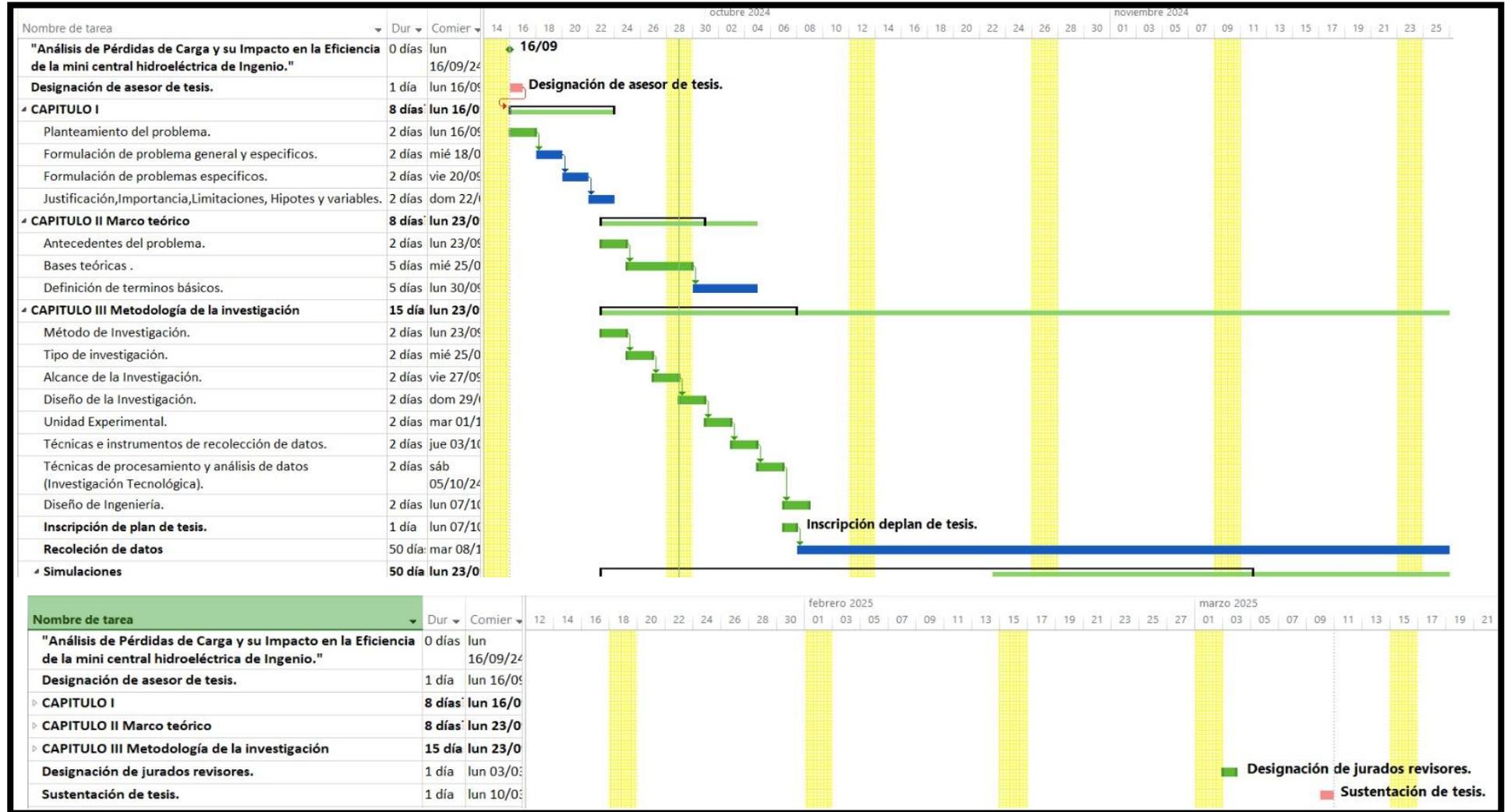


figura 44. Cronograma de actividades

Fuente: elaboración propia

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Autor: Jean Piero Lulo Rivera

Título: “Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.”

Tabla 39. Matriz de consistencia

Planteamiento del problema		Marco teórico	Metodología
Problema general		Antecedentes	Variables:
¿De qué manera las pérdidas de carga en la tubería de presión impactan en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio?		<p>“Dimensionamiento tecno económico de tubería forzada para micro central hidroeléctrica mediante algoritmos genéticos”(13).</p> <p>“Diseño de una minicentral hidroeléctrica” (15).</p> <p>“Diseño hidráulico de la tubería de presión de la minicentral hidráulica Huaura, distrito de Pacho, provincia de Huaura, Lima”(3).</p> <p>“Optimización del diámetro, diseño preliminar y simulación fluidodinámica de la tubería forzada de la minicentral hidroeléctrica hydrika 4”(10).</p>	<p>- Diámetro de la tubería</p> <p>- Rugosidad del material de la tubería.</p> <p>- Longitud de la tubería</p>
Objetivo general			
Analizar las pérdidas de carga que se dan en la tubería de presión para maximizar la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.			
Problemas específicos	Objetivos específicos	Teoría básica	Método:
<ul style="list-style-type: none"> ➤ ¿Cómo influye el diámetro de la tubería de presión en la eficiencia eléctrica del sistema? ➤ ¿De qué manera la rugosidad interna de la tubería de presión influye en la eficiencia eléctrica de la minicentral? 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Analizar la relación entre el diámetro de la tubería de presión y las pérdidas de carga, y evaluar su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema. ➤ Describir cómo la rugosidad interna de la tubería de presión influye en 	Pérdidas de carga, eficiencia energética.	
		Definición conceptual	

Planteamiento del problema		Marco teórico	Metodología
<p>➤ ¿En qué medida la longitud de la tubería de presión en la eficiencia eléctrica del sistema?</p>	<p>las pérdidas de carga y determinar su relación con la eficiencia eléctrica de la minicentral de Ingenio.</p> <p>➤ Analizar la relación entre la longitud de la tubería de presión y las pérdidas de carga, y evaluar su impacto en la eficiencia eléctrica del sistema.</p>	<p>Las pérdidas de carga en la tubería representan la pérdida de presión y energía a lo largo de la conducción del agua debido a la fricción, la turbulencia y los obstáculos dentro de la tubería (11).</p> <p>La eficiencia de las máquinas eléctricas se define como la relación entre la energía de salida y la energía de entrada. En teoría, ambas magnitudes podrían ser equivalentes; sin embargo, en la práctica, siempre se presentan pérdidas energéticas. Esto se debe al principio de conservación de la materia, el cual establece que la materia no se crea ni se destruye, sino que se transforma (7)..</p>	<p>El presente trabajo de investigación “Análisis de Pérdidas de Carga en la Tubería y su Impacto en la Eficiencia Eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio en el año 2024.” Se utilizará el método hipotético - deductivo. Según Sánchez (31) el método hipotético - deductivo se basa en emitir hipótesis de las posibles soluciones al problema planteado y validarlo con la data disponible que se tiene mediante experimentos u observaciones, aceptando o rechazando la hipótesis según los resultados.</p>
Hipótesis general y específicas			
<p>H1: Las pérdidas de carga influyen significativamente en la eficiencia eléctrica de la Minicentral Hidroeléctrica de Ingenio.</p> <p>H1 a: Un incremento en el diámetro de la tubería de presión mejorará la eficiencia eléctrica del sistema.</p> <p>H1 b: A menor rugosidad interna de la tubería de presión se producirá un aumento en la eficiencia del sistema eléctrico.</p>	<p>La eficiencia eléctrica se refiere a la capacidad del sistema hidroeléctrico para convertir la energía potencial del agua en energía eléctrica, minimizando las pérdidas de energía a lo largo del proceso (5).</p>		
		Definición operacional	
		<p>Las pérdidas por carga se medirán como la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la tubería, y se expresarán en términos de pérdida de energía (en vatios) o pérdida de presión (en metros de columna de agua o pascales) (11).</p>	

Planteamiento del problema	Marco teórico	Metodología
H1 c: A mayor longitud de tubería de presión se produce una disminución significativa de eficiencia eléctrica en el sistema.	La eficiencia eléctrica se medirá como el porcentaje de energía eléctrica generada respecto a la energía potencial teórica disponible en el agua que fluye a través del sistema de tuberías y turbinas (5).	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO A

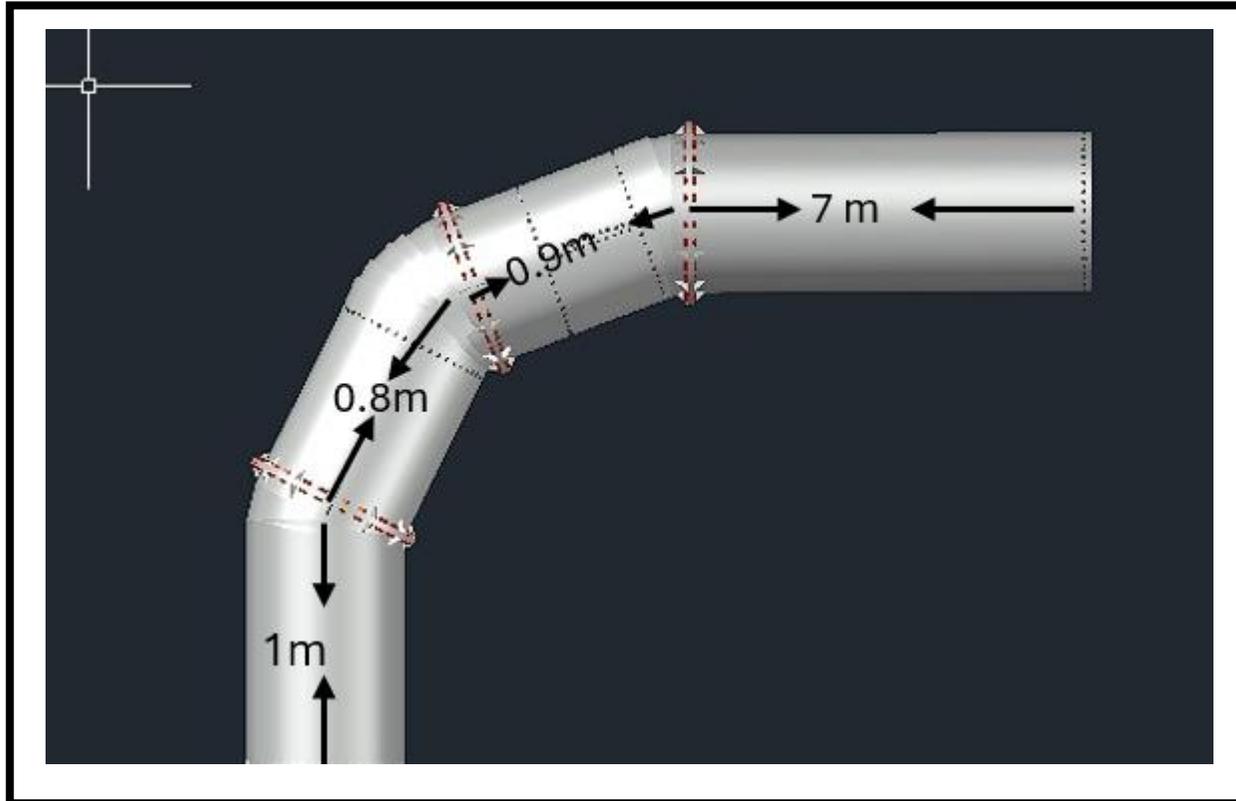


figura 45. Modelado de tubería de presión, vista de planta

fuelle: elaboración propia

ANEXO B

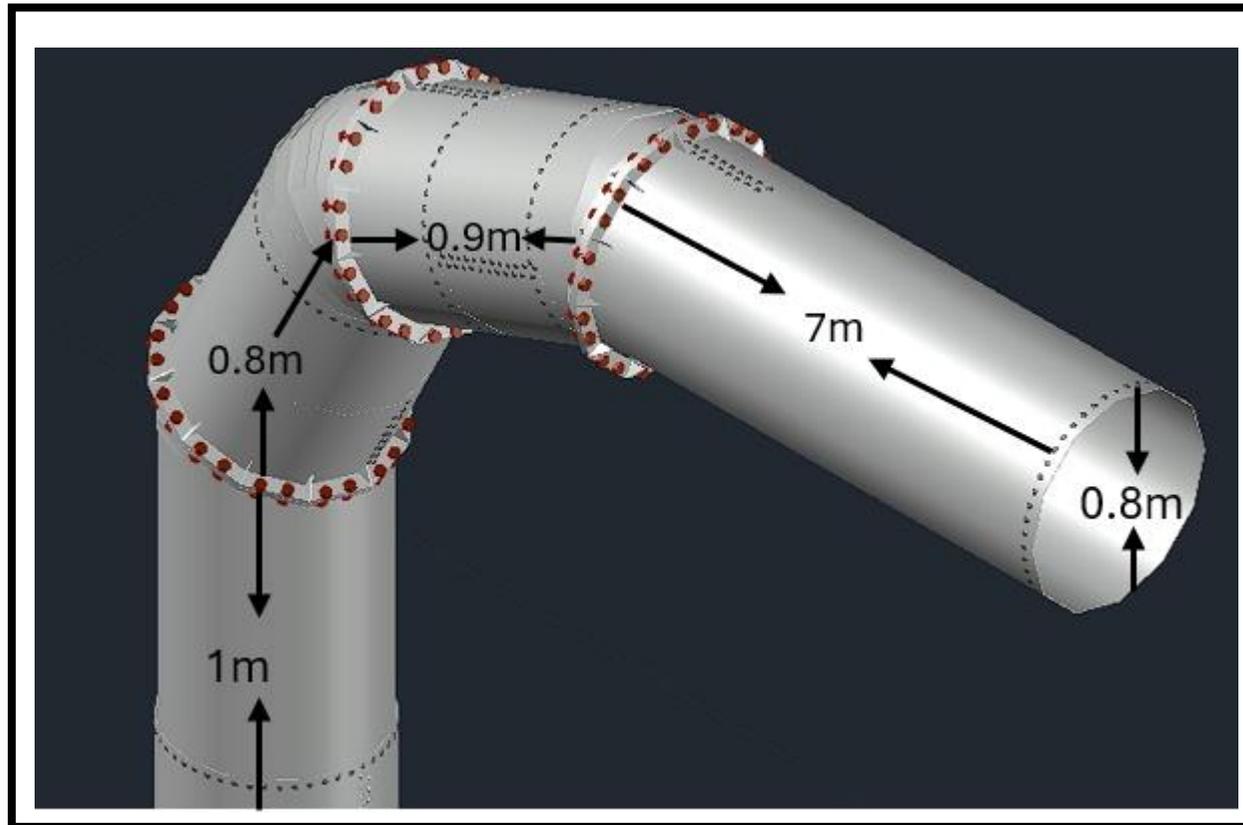


figura 46. Tubería de presión vista en 3 dimensiones

fuelle: elaboración propia.

ANEXO C

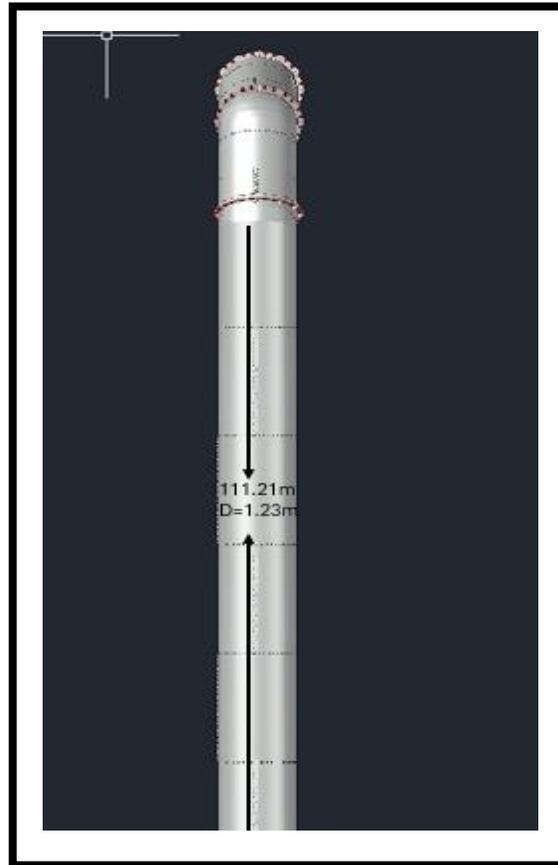


figura 47. Diseño CAD de tubería

Fuente: elaboración propia

ANEXO E

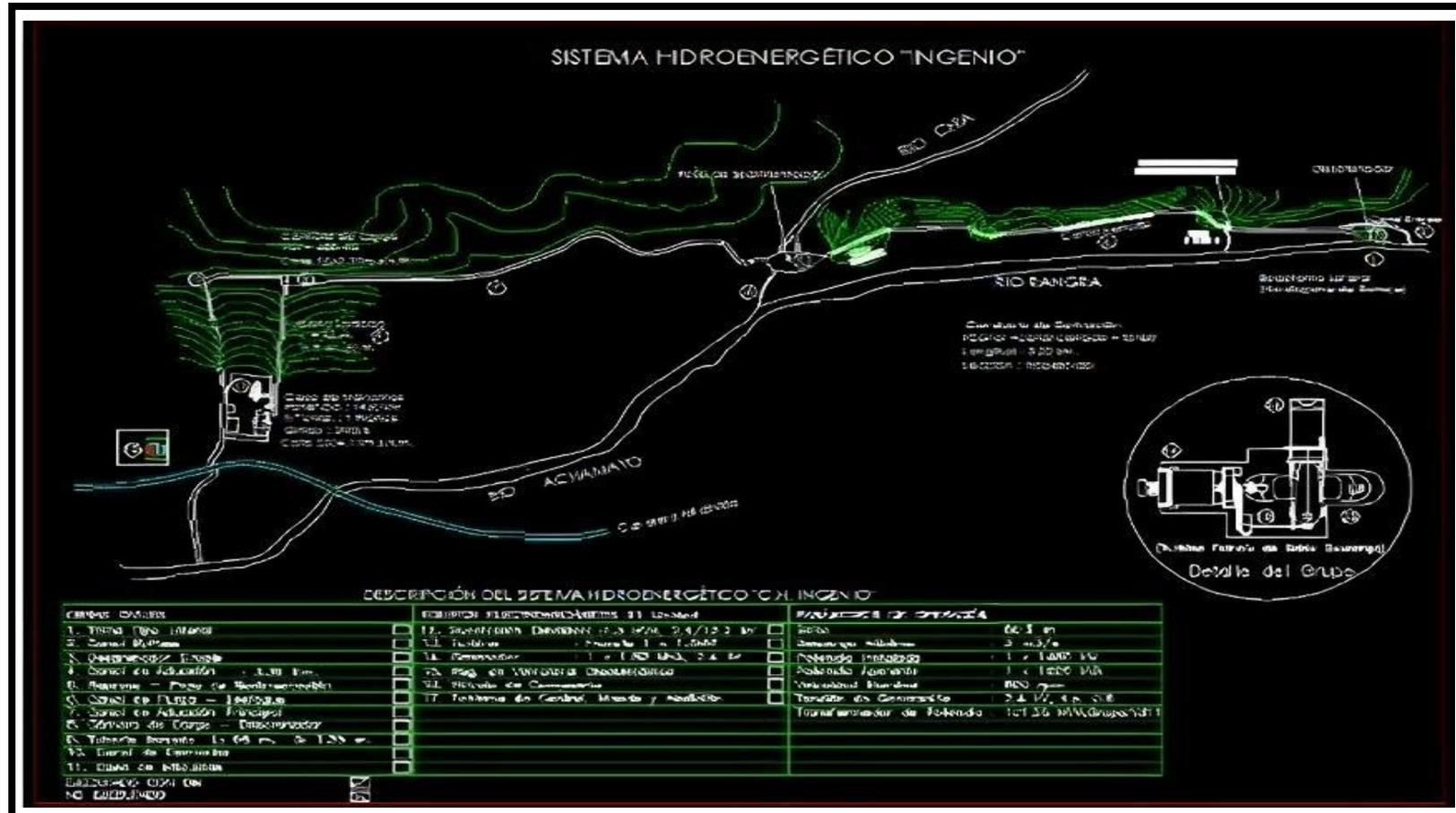


figura 49. Sistema Hidroenergético de Ingenio

Fuente: (26)

ANEXO F

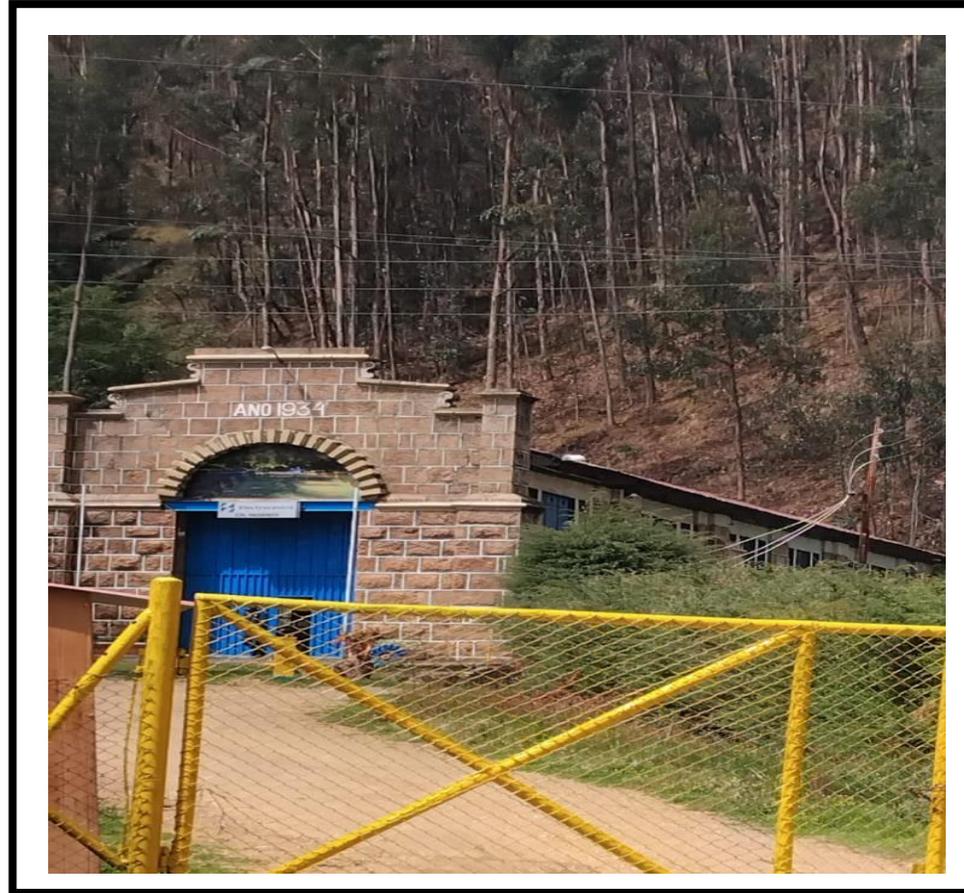


figura 50. Fotografía inédita del acceso a MCH de Ingenio.

Fuente: elaboración propia

ANEXO G



figura 51. Fotografía inédita del río Rangra

Fuente: elaboración propia

ANEXO H



figura 52. Fotografía inédita de tablero eléctrico.

Fuente: elaboración propia

ANEXO I



figura 53. Fotografía inédita del patio de llaves de la MCH Ingenio

Fuente: elaboración propia.

ANEXO J



figura 54. Fotografía de la visita efectuada por el suscrito

Fuente elaboración propia.