



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**MANUAL DE LABORATORIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA Y
DISEÑO DE UN CANAL DE FLUJO, PARA LA CARRERA DE
INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA,
CAMPUS SUR**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR: Jonathan Esteban Yáñez Cobeña

TUTORA: Belén Shakira Tapia Montero

Quito - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jonathan Esteban Yáñez Cobeña con documento de identificación N° 1751707520; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de febrero del 2026

Atentamente,



Jonathan Esteban Yáñez Cobeña
1751707520

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Jonathan Esteban Yáñez Cobeña con documento de identificación N° 1751707520 expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Manual de Laboratorio de Hidrología e Hidráulica y Diseño de un Canal de Flujo, Para la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de febrero del 2026

Atentamente,



Jonathan Esteban Yáñez Cobeña
1751707520

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Belén Shakira Tapia Montero con documento de identificación N° 0250072170, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MANUAL DE LABORATORIO DE HIDROLOGÍA E HIDRÁULICA Y DISEÑO DE UN CANAL DE FLUJO, PARA LA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CAMPUS SUR, realizado por Jonathan Esteban Yáñez Cobeña con documento de identificación N° 1751707520, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de febrero del 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a horizontal line extending to the right.

Ing. Belén Shakira Tapia Montero, MSc.
0250072170

DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, por acompañarme en cada etapa de este proceso y brindarme la fortaleza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para superar los retos presentados. A mis padres, por su amor incondicional, su apoyo constante y el esfuerzo incansable que han demostrado a lo largo de mi formación académica y personal. Gracias por la confianza permanente que depositaron en mí, por los sacrificios realizados y por ser el pilar fundamental que me impulsó a seguir adelante incluso en los momentos de dificultad. Este trabajo es también reflejo de sus enseñanzas, valores y ejemplo, que han guiado mi camino y han hecho posible la culminación de esta meta profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su guía constante y por otorgarme la fortaleza y la perseverancia necesarias para culminar este proceso académico. De manera especial, expreso mi sincero agradecimiento a mi padre y a mi madre por su apoyo incondicional, su paciencia y su acompañamiento permanente a lo largo de cada etapa de este trabajo. Su esfuerzo, comprensión y confianza han sido fundamentales para superar las dificultades presentadas y alcanzar este objetivo. El respaldo brindado por ellos ha sido un pilar esencial en mi formación académica, personal y profesional, y constituye una motivación constante para continuar avanzando en mi desarrollo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema de estudio	1
1.2.1 Antecedentes	2
1.2.2 Importancia y alcance.....	3
1.2.3 Delimitación	4
1.4 Justificación.....	5
1.5 Objetivos	7
1.5.1 Objetivo general	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
CAPÍTULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1 Flujo en tuberías	8
2.1.1 Tipos de flujo	9
2.1.2 Número de Reynolds	10
2.1.3 Flujo volumétrico o caudal.....	12
2.1.4 Teoría de la Conservación de la Energía-Ecuación de Bernoulli.....	13
2.1.5 Pérdidas de Carga.....	14
2.1.6 Medidores de flujo en conductos cerrados	21
2.2 Flujo a superficie libre	23
2.3 Máquinas hidráulicas	30
2.4 Hidrología y topografía	33

2.5	Aforo de caudales en canales y rios.....	34
2.5.2.1	Molinete Redback PVD2000.....	36
2.5.2.2	Velocímetro acústico FlowTraker2	37
2.5.3.1	Método “Slug injection”	38
2.6	Infiltración	38
CAPÍTULO III.....		42
METODOLOGÍA.....		42
3.1	Tipo de investigación.....	42
3.2	Método de investigación.....	42
3.3	Técnicas de recolección de información	43
3.4	Proceso técnico de ingeniería civil	43
CAPÍTULO IV		45
MANUAL DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA E HIDRLOGÍA		45
4.1	Flujo en tuberías	45
4.1.1	Aparato de demostración de teorema de Bernoulli	45
4.1.2	Aparato de demostración de Osborne Reynolds.....	52
4.1.2.1.	Equipo de visualización de flujo en canales.	57
4.1.3	Tablero de visualización de pérdidas de energía en tuberías.....	62
4.1.4	Aparato de demostración de medidores de flujo en conductos cerrados....	81
4.2	Máquinas hidráulicas	90
4.2.1.	Turbina de demostración Pelton.....	90
4.3	Hidrología y topografía	105
4.3.1	Caja de arena de realidad aumentada.	105
4.4	Aforo de caudales en canales y rios.....	107
4.4.1	Método área-velocidad	107
4.4.1.1	Molinete Red Back PVD100	107

4.4.1.2	Sonda de ultrasonido Flow tracker2	114
4.4.2	Método químico.....	121
4.5	Anillos de infiltración-Velocidad de infiltración.....	134
CAPÍTULO V.....		140
DISEÑO DE CANAL DE FLUJO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO		140
CONCLUSIONES.....		145
RECOMENDACIONES		146
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del tipo de flujo según el número de Reynolds.	11
Tabla 2. Factores para el cálculo de longitudes equivalentes.....	21
Tabla 3. Velocidad estabilizada de infiltración en suelos.	40
Tabla 4. Clasificación de la infiltración básica.	41
Tabla 5. Recopilación de datos para aforo de caudal.	48
Tabla 6. Datos geométricos del tubo Venturi.	48
Tabla 7. Lecturas de presión estática en piezómetro.	49
Tabla 8. Tabla de resultados del ensayo 1 de Bernoulli.	50
Tabla 9. Tabla de resultados del ensayo 2 de Bernoulli.	51
Tabla 10. Tabla de resultados del ensayo 3 de Bernoulli.	51
Tabla 11. Recopilación de datos para aforo de caudal.	55
Tabla 12. Datos para ejecución de ensayo.....	56
Tabla 13. Resultados del ensayo de Osbourne Reynolds.	57
Tabla 14. Recopilación de datos para aforo de caudal.	60
Tabla 15. Resumen de datos para el cálculo del número de Reynolds.....	61
Tabla 16. Cálculo del número de Reynolds en flujo a superficie libre.	61
Tabla 17. Resumen de datos para el aforo de caudal.	66
Tabla 18. Resumen de características del tramo de tubería del esquema 1.....	66
Tabla 19. Presiones en manómetros del esquema 1.	69
Tabla 20. Resultados del cálculo de pérdidas de energía del esquema1	69
Tabla 21. Resumen de datos para el aforo de caudal.	70
Tabla 22. Resumen de características del tramo de tubería del esquema 2.....	71

Tabla 23. Presiones en manómetros del esquema 2.	72
Tabla 24. Factor de fricción “f” de Darcy-Weisbach y el coeficiente de Hazen-Williams para una tubería de PVC de ½”.....	72
Tabla 25. Resumen de datos para el aforo de caudal.	73
Tabla 26. Resumen de características del tramo de tubería del esquema 3.....	74
Tabla 27. Presiones en manómetros del esquema 3.	75
Tabla 28. Factor de fricción “f” de Darcy-Weisbach para una tubería de PVC de ½”.....	75
Tabla 29. Resumen de datos para el aforo de caudal.	76
Tabla 30. Resumen de características del tramo de tubería del esquema 3.....	77
Tabla 31. Presiones en manómetros del esquema 4.	79
Tabla 32. Resultados de cálculo de pérdidas locales y longitudinales aplicando 2 métodos de resolución.....	79
Tabla 33. Resumen de datos de caudales tomados en laboratorio.	86
Tabla 34. Tabla de recopilación de datos del laboratorio.....	88
Tabla 35. Tabla de resultados del ensayo.....	89
Tabla 36. Datos constantes para el cálculo.....	94
Tabla 37. Datos para el aforo de caudal.	94
Tabla 38. Tabla de datos medidos en laboratorio.....	94
Tabla 39. Datos constantes para el cálculo.....	95
Tabla 40. Datos para el aforo de caudal en ensayo 1.	96
Tabla 41. Datos tomados en laboratorio.....	96
Tabla 42. Tabla de procesamiento de datos.....	97
Tabla 43. Datos para el aforo de caudal en ensayo 1.	99
Tabla 44. Datos tomados en laboratorio.....	99

Tabla 45. Tabla de procesamiento de datos.....	100
Tabla 46. Datos para el aforo de caudal en ensayo 1.	102
Tabla 47. Datos tomados en laboratorio.....	102
Tabla 48. Tabla de procesamiento de datos.....	102
Tabla 49. Datos tomados in situ.	111
Tabla 50. Tabla de ancho de canal y secciones.....	113
Tabla 51. Tabla de resultados de aforo con Molinete	114
Tabla 52. Tabla de datos de la sección del canal.....	120
Tabla 53. Tabla de procesamiento de datos del equipo FlowTracker2.	121
Tabla 54. Datos tomados en in situ para calibración del equipo.....	127
Tabla 55. Resultados organizados en columnas.....	128
Tabla 56. Tabla de procesamiento de datos para determinar el caudal	130
Tabla 57. Datos de calibración del equipo en función de las condiciones del agua en el canal.....	131
Tabla 58. Resultado de conductividad medido en canal.	132
Tabla 59. Tabla de procesamiento de datos para determinar el caudal.....	133
Tabla 60. Tabla de resultados del ensayo del infiltrómetro de doble anillo.....	138

ÍDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del proyecto.....	5
Figura 2. Líneas de energía en un flujo a presión	9
Figura 3. Diagrama de Moody.	16
Figura 4. Elementos geométricos de secciones de canal.	26
Figura 5. Distribución de velocidades en un cauce natural.....	35
Figura 6. Aparato de demostración de Bernoulli F1-15.....	46
Figura 7. Aparato Osborne Reynolds F1-20.	54
Figura 8. Canal de visualización de flujo F1-19.	58
Figura 9. Tablero de visualización de pérdidas de energía.....	64
Figura 10. Esquema 1.	65
Figura 11. Esquema 2.	70
Figura 12. Esquema 3.	73
Figura 13. Esquema 4.	76
Figura 14. Aparato de demostración de medidor de caudal F1-21.....	83
Figura 15. Turbina de demostración Pelton F1-25.	91
Figura 16. Curva Velocidad del rotor vs Torque.	97
Figura 17. Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.....	98
Figura 18. Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.	98
Figura 19. Curva Velocidad del rotor vs Torque.....	100
Figura 20. Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.....	101
Figura 21. Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.	101
Figura 22. Curva Velocidad del rotor vs Torque.....	103
Figura 23. Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.....	103

Figura 24. Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.	104
Figura 25. Caja de arena de realidad aumentada.	106
Figura 26. Molinete RedBack y contador PVD100.	109
Figura 27. Sección del canal de estudio.	112
Figura 28. Sonda de Ultrasonido FlowTracker2.	116
Figura 29. Sección de canal del estudio.	119
Figura 30. Conductivímetro multiparámetro multi 3620 IDS.	123
Figura 31. Ecuación lineal de este canal.	127
Figura 32. Curva de concentración.	128
Figura 33. Curva de concentración.	131
Figura 34. Ecuación lineal de este canal.	132
Figura 35. Infiltrómetro de doble anillo.	136
Figura 36. Curva Tiempo (minutos) vs Infiltración acumulada (mm).	139
Figura 37. Diseño de 1er tramo de canal de aproximación.	141

RESUMEN

El proceso de enseñanza–aprendizaje en las asignaturas de Hidráulica e Hidrología exige una integración efectiva entre los fundamentos teóricos y la práctica experimental. En el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur, se identificó la necesidad de disponer de un manual técnico actualizado que sistematice el uso de los equipos disponibles y estandarice la ejecución de los ensayos, ya que la ausencia de directrices claras afecta la correcta interpretación de los fenómenos hidráulicos y la confiabilidad de los resultados. Asimismo, aunque el laboratorio cuenta con infraestructura existente, se evidenció la oportunidad de diseñar un canal de flujo a superficie libre con criterios hidráulicos y didácticos mejorados, considerando su posible acoplamiento a un dissipador de energía tipo vórtice ya instalado.

La metodología aplicada fue de carácter descriptivo y experimental, basada en la revisión bibliográfica y normativa de los principios hidráulicos fundamentales y en la ejecución de ensayos de laboratorio y campo relacionados con flujo en canales y tuberías, medición de caudales, pérdidas de energía e infiltración. Se emplearon medidores Venturi, rotámetro, placa de orificio, turbina Pelton, tablero de pérdidas, anillos de infiltración y métodos de aforo con molinete, FlowTracker2 y trazadores salinos.

Los resultados evidenciaron coherencia entre los valores experimentales y los modelos teóricos, confirmando que el canal diseñado cumple condiciones hidráulicas adecuadas y que el manual fortalece la formación práctica de los estudiantes.

Palabras clave: hidráulica experimental, canal a superficie libre, manual de laboratorio, medición de caudal, pérdidas de energía.

ABSTRACT

The teaching–learning process in Hydraulics and Hydrology requires an effective integration between theoretical principles and experimental practice. At the Hydraulics Laboratory of the Universidad Politécnica Salesiana, Quito Campus, the need for an updated technical manual was identified to systematize the use of available equipment and standardize experimental procedures, since the absence of clear guidelines affects the interpretation of hydraulic phenomena and the reliability of results. Additionally, although the laboratory has existing infrastructure, an opportunity was identified to design an open-channel flow system with improved hydraulic and educational criteria, considering its potential integration with an existing vortex-type energy dissipation structure.

A descriptive and experimental methodology was applied, including a bibliographic and regulatory review of fundamental hydraulic principles and the execution of laboratory and field experiments related to open-channel and pipe flow, discharge measurement, energy losses, and infiltration processes. Equipment such as Venturi meters, rotameters, orifice plates, a Pelton turbine, a head loss board, infiltration rings, and discharge measurement methods using a current meter, a FlowTracker2 ultrasonic probe, and salt tracers were employed.

The results showed consistency between experimental data and theoretical models, confirming that the designed channel meets appropriate hydraulic conditions and that the laboratory manual strengthens practical training for Civil Engineering students.

Keywords: experimental hydraulics, open-channel flow, laboratory manual, discharge measurement, energy losses

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

En la formación de Ingeniería Civil, el aprendizaje se vuelve más sólido cuando los conceptos de hidráulica e hidrología se comprueban mediante mediciones reales y prácticas experimentales. En el Laboratorio de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, Campus Sur, existe la capacidad de fortalecer ese componente práctico gracias a la disponibilidad de equipos y recursos para ensayos tanto en laboratorio como en campo; sin embargo, la ausencia de procedimientos técnicos sistematizados y la limitada capacidad del canal de flujo a superficie libre actualmente disponible restringen la ejecución continua, segura y comparable de las prácticas. Frente a esta situación, el presente proyecto plantea como eje principal el diseño de un canal de flujo a superficie libre para fines didácticos y experimentales, acompañado de la elaboración de un manual técnico que estandarice la operación de los equipos y la ejecución de ensayos, incorporando criterios técnicos y lineamientos claros de preparación, registro de datos y tratamiento de resultados. Con ello, se busca, promover la realización de las prácticas aprovechando de mejor manera los recursos del laboratorio y las campañas de medición en campo, orientadas al estudio del flujo y la estimación de caudales.

1.2 PROBLEMA DE ESTUDIO

Los equipos de laboratorio que en su momento pertenecieron a la carrera de ingeniería Ambiental, antes de su cierre, fueron transferidos a la carrera de ingeniería Civil. Gracias a ello, el laboratorio de Hidráulica cuenta hoy con equipos importantes

como turbina Pelton F1-25, aparato de Reynolds F1-20, Aparato de demostración de flujo F1-21, Canal de visualización de flujo F1-19 y el equipo de demostración de Bernoulli F1-15. También cuentan con otros equipos, como el tablero de visualización de pérdidas de energía y la caja de arena de realidad aumentada, que fueron proyectos técnicos desarrollados en semestres anteriores, pero que no se han utilizado en forma regular. Además, la universidad adquirió equipos complementarios como: anillos de infiltración, molinete Redback PVD100, FlowTracker2 y conductivímetro Multiparámetros 3620 IDS, que permanecen almacenados sin los manuales de operación para su funcionamiento o la realización de ensayos que pueden realizarse con ellos. Se identifica además que el laboratorio dispone de un canal de flujo a superficie libre que se encuentra operativo, el cual, pese a su utilidad, presenta limitaciones en cuanto a su longitud, materiales y condiciones de operación.

Frente a estas problemáticas surge la necesidad de realizar el diseño de un nuevo canal donde se optimice el tamaño y los equipos para que permitan su funcionamiento, adicional, el desarrollo de un manual de laboratorio de Hidráulica e Hidrología, que reúna y organice la información técnica de cada equipo y que establezca procedimientos claros y uniformes para los ensayos.

1.2.1 Antecedentes

En la formación del ingeniero civil, las asignaturas de Hidráulica e Hidrología desempeñan un papel fundamental, ya que proporcionan los conocimientos necesarios para el análisis, diseño, construcción y mantenimiento de obras e infraestructuras que interactúan con el agua y otros fluidos. Estas disciplinas permiten comprender el comportamiento hidráulico de los sistemas naturales y artificiales, así como la dinámica de los recursos hídricos, aspectos esenciales en el ejercicio profesional.

Diversos estudios y experiencias académicas han demostrado que la adecuada asimilación de estos conceptos requiere la integración de actividades experimentales que complementen la teoría. En este sentido, las prácticas de laboratorio orientadas a la visualización de pérdidas de energía en tuberías, el análisis del flujo en canales a superficie libre, la verificación experimental de principios hidráulicos y la evaluación de dispositivos de medición de caudal, constituyen antecedentes relevantes que han sido incorporados progresivamente en los laboratorios de hidráulica con fines didácticos. Estos ensayos permiten observar fenómenos como la disipación de energía, la variación del régimen de flujo y el comportamiento del agua frente a cambios geométricos y de pendiente, reforzando la comprensión de los modelos teóricos estudiados en clase.

En este contexto, la disponibilidad de un manual de laboratorio detallado y actualizado constituye un elemento clave para el correcto desarrollo de las prácticas experimentales, ya que contribuye a garantizar la seguridad de los estudiantes, la estandarización de los procedimientos, la calidad académica y la confiabilidad de los resultados obtenidos. La ausencia o desactualización de dicho material puede afectar negativamente el proceso de enseñanza–aprendizaje y limitar la correcta aplicación de los conocimientos adquiridos.

1.2.2 Importancia y alcance

La Universidad Politécnica Salesiana cuenta con equipos de laboratorio especializados y de alto costo, cuyo propósito principal es apoyar la formación de los estudiantes de Ingeniería Civil. Estos equipos permiten reforzar los conceptos básicos de hidráulica e hidrología y facilitar la comprensión de los contenidos teóricos mediante la práctica experimental. Sin embargo, a pesar de la relevancia de estos recursos, se evidencia una limitación significativa: no existe información clara, sistematizada y

accesible sobre el funcionamiento de los equipos ni sobre la correcta ejecución de los ensayos que pueden realizarse con ellos.

Esta situación provoca un uso ineficiente de los recursos disponibles, dificulta la continuidad en los procesos de enseñanza-aprendizaje y limita la posibilidad de que los estudiantes aprovechen plenamente las herramientas prácticas que complementan su formación profesional.

En consecuencia, se hace necesario elaborar un manual técnico que documente y estandarice el uso de los equipos de hidráulica e hidrología, con el propósito de garantizar su correcta utilización, incrementar la frecuencia de prácticas de laboratorio en las horas de clases y la calidad de los resultados en cada ensayo.

Este manual se enmarca en los procesos de mejora continua y en los criterios de acreditación establecidos para la carrera, y se proyecta como una herramienta académica fundamental para fortalecer las prácticas de laboratorio en las asignaturas de Hidráulica I, Hidráulica II, Hidrología e incluso en materias como Centrales Hidroeléctricas y Obras hidráulicas donde se analiza todos los fenómenos estudiados en los distintos ensayos.

1.2.3 Delimitación

El proyecto técnico se circunscribe al laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Campus Sur en donde se pretende ensayar los siguientes equipos: turbina Pelton F1-25, Aparato de demostración de flujo F1-21, Canal de visualización de flujo F1-19, Aparato de Reynolds F1-20, equipo de demostración de Bernoulli F1-15, tablero de visualización de pérdidas de energía, caja de arena de realidad aumentada, y anillos de infiltración. Por otro lado, el proyecto se complementa con

ensayos de campo en el cantón Machachi, donde se dispone de un canal adecuado para la ejecución de los ensayos con los equipos de aforo de caudal como son: molinete Redback PVD100, FlowTracker2 y trazador salino con Multiparámetros 3620 IDS.

La investigación se desarrollará durante el período académico de octubre 2025 – enero 2026. El enfoque del trabajo se centra en el diseño y elaboración de un manual académico que documente y estandarice el uso de los equipos de hidráulica e hidrología. La investigación está dirigida a los estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Civil que realizan y supervisan prácticas en el área de hidráulica e hidrología.

Figura 1.

Ubicación del proyecto.



Nota. Laboratorio de hidráulica de la Universidad Politécnica Salesiana donde se encuentran los equipos que se van a realizar las prácticas y se pretende ubicar el canal que se diseña en este proyecto. Elaborado por: El autor.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La investigación se justifica por la necesidad de hacer uso de los equipos de hidráulica e hidrología disponibles en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus sur. El desarrollo de un manual técnico permitirá documentar y estandarizar los procedimientos de operación y ensayo de estos equipos, garantizando su correcta utilización y fortaleciendo la comprensión

práctica de los conceptos teóricos de la hidráulica e hidrología. De igual forma, aunque la universidad cuente con un canal operativo, este presenta limitaciones en el diseño actual. Para ello se considera necesario diseñar un nuevo canal de flujo a superficie libre que optimice el espacio en el laboratorio y la relación costo/beneficio al momento de su construcción.

Asimismo, el proyecto contribuye al proceso de mejora continua y al cumplimiento de los criterios de acreditación de la carrera, al proporcionar un recurso académico que fortalece la calidad educativa y la pertinencia de la formación profesional. De igual manera, promueve un aprendizaje con enfoque técnico y experimental, optimiza el uso de los recursos institucionales y contribuye a la preparación de los estudiantes para enfrentar los desafíos del ejercicio profesional mediante el desarrollo de habilidades prácticas.

La viabilidad del proyecto está asegurada, dado que la universidad dispone de los equipos necesarios y del acceso al laboratorio, así como del personal docente capacitado para guiar y supervisar la elaboración y validación del manual. La implementación del manual no requiere recursos adicionales significativos, ya que se aprovecharán los equipos y materiales existentes, reduciendo los costos asociados a la capacitación y al uso de los equipos.

El proyecto se orienta a fortalecer el proceso de enseñanza–aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Civil mediante la estandarización de los procedimientos de operación y uso de los equipos de laboratorio de Hidráulica e Hidrología, así como la integración de prácticas de campo. Estas acciones permitirán asegurar la correcta aplicación de los conceptos teóricos y contribuirán al desarrollo y fortalecimiento de competencias prácticas esenciales para la formación profesional del futuro ingeniero civil.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general

- Fortalecer el proceso de enseñanza–aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Civil mediante el diseño de un canal de flujo a superficie libre y la elaboración de un manual de laboratorio para los ensayos de Hidráulica e Hidrología, que permitan la estandarización de los procedimientos experimentales, asegurando la correcta aplicación de los conceptos teóricos y desarrollando competencias prácticas en el ámbito hidráulico.

1.5.2 Objetivos específicos

- Analizar los fundamentos teóricos y los parámetros hidráulicos necesarios para el diseño de un canal de flujo a superficie libre destinado a la realización de ensayos experimentales.

- Diseñar el canal de flujo a superficie libre considerando criterios hidráulicos, la selección de materiales y la incorporación de equipos complementarios que optimicen su funcionamiento didáctico en el laboratorio de Hidráulica.

- Ejecutar ensayos experimentales empleando los equipos del laboratorio, obteniendo datos que permitan la validación de los principios teóricos fundamentales del flujo en canales abiertos.

- Elaborar un manual de laboratorio mediante la sistematización de la información técnica de cada ensayo, incluyendo el marco teórico, la descripción de los equipos y materiales, el procedimiento de ejecución y ejemplos ilustrativos de cálculo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El desarrollo de ensayos experimentales en el ámbito de la hidráulica e hidrología constituyen un pilar fundamental en la formación de los estudiantes de ingeniería civil, ya que permite vincular los conocimientos teóricos con la práctica aplicada. La estandarización de equipos, procedimientos y metodologías en un manual garantiza la uniformidad en la ejecución de las pruebas, facilita la comprensión de los fenómenos físicos y promueve la correcta interpretación de resultados. De esta manera, el manual no solo busca consolidar las bases teóricas, sino también proporcionar ejemplos claros y replicables que fortalezcan las competencias técnicas de los estudiantes.

En este sentido, los conceptos descritos en el marco teórico adquieren un valor práctico al ser aplicados en los ensayos experimentales y en el diseño del canal, pues permiten comprender de manera tangible el comportamiento del flujo, las pérdidas de energía, los métodos de aforo y otros fenómenos hidráulicos esenciales.

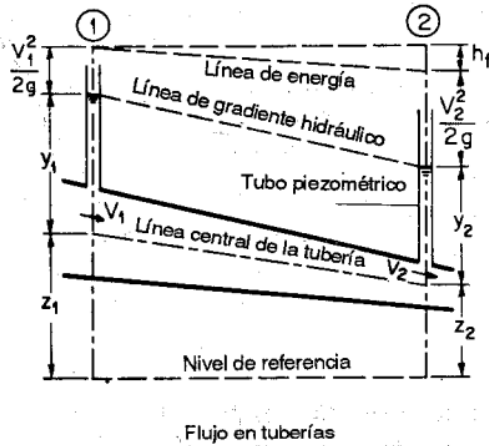
2.1 FLUJO EN TUBERÍAS

El flujo en tuberías corresponde al movimiento de un líquido confinado en un conducto cerrado, donde la presión es el factor dominante y la energía hidráulica se ve afectada principalmente por las pérdidas por fricción y las pérdidas menores en accesorios y uniones. De acuerdo con Rocha (2007), El análisis hidráulico de sistemas de tuberías requiere el uso combinado de la ecuación de continuidad y del principio de conservación de la energía, incorporando en el estudio factores como la longitud del conducto, el tipo de material y las condiciones del régimen de flujo, que puede presentarse en forma laminar o turbulenta. (p. 3). Estas variables permiten estimar la capacidad de conducción,

dimensionar las redes de abastecimiento y evaluar la eficiencia hidráulica en sistemas de transporte de agua a presión.

Figura 2.

Líneas de energía en un flujo a presión



Nota. La figura representa como disminuye la energía del agua al fluir por una tubería, ilustra la línea de energía, el gradiente hidráulico y la pérdida de carga entre dos secciones.

Fuente: Chow (1994, p.4)

2.1.1 Tipos de flujo

La naturaleza del flujo en un tubo está definida por el valor del número de Reynolds, un número adimensional que depende de la viscosidad, densidad, velocidad del flujo y del diámetro del tubo. Al analizar el flujo de un fluido, es necesario identificar sus características específicas, de acuerdo con Sotelo (1997), el flujo puede clasificarse de distintas maneras según sus características, pudiendo ser permanente o no permanente; uniforme o no uniforme; tridimensional, bidimensional o unidimensional; laminar o turbulento; compresible o incompresible; así como rotacional o irrotacional, entre otras categorías.

- **Flujo laminar**

El flujo laminar corresponde a un régimen de la mecánica de fluidos en el cual las partículas del fluido se desplazan de manera ordenada y paralela, organizándose en capas o láminas bien definidas. De acuerdo con Rocha (2007), El flujo laminar se manifiesta predominantemente en fluidos con alta viscosidad. En sistemas donde el fluido es agua, cuya viscosidad es relativamente baja, este régimen ocurre de manera limitada y generalmente está asociado a desplazamientos a través de materiales porosos.

- **Flujo turbulento**

En el estudio de los regímenes de flujo en conductos cerrados, resulta fundamental diferenciar el comportamiento laminar del turbulento, especialmente por su incidencia en la pérdida de carga y en el dimensionamiento hidráulico. En este contexto, como lo explica Agustín Martín Domingo. (2011), Se considera que un flujo se encuentra en régimen turbulento cuando el movimiento del fluido es irregular y caótico, caracterizado por una intensa mezcla entre las diferentes capas del flujo. Esta descripción evidencia que el régimen turbulento implica una mayor disipación de energía debido a la interacción desordenada de las partículas, lo cual justifica que la pérdida de carga sea proporcional al cuadrado de la velocidad media y que su análisis requiera el empleo de relaciones empíricas como la ecuación de Darcy-Weisbach.

2.1.2 Número de Reynolds

La clasificación de los regímenes de flujo constituye un aspecto fundamental en la mecánica de fluidos, ya que permite comprender el comportamiento dinámico del fluido en diferentes condiciones hidráulicas. En este sentido, según Rocha (2003), La influencia que ejerce la viscosidad del fluido sobre el comportamiento del escurrimiento se describe mediante un parámetro adimensional conocido como número de Reynold, el cual permite caracterizar las condiciones del flujo y sus régimen de movimiento.

Este planteamiento constituye la base teórica que delimitan el flujo laminar, transicional y turbulento, siendo un criterio ampliamente utilizado en el análisis y diseño de sistemas hidráulicos.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas de inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho * D * v}{\mu} = \frac{D * v}{\nu}$$

Donde:

ρ : densidad del fluido (Kg/m³)

D : diámetro interno de la tubería (m)

v : velocidad media del fluido (m²/s)

μ : viscosidad dinámica del fluido (m²/s)

Para el flujo interno en tuberías circulares, se toma de referencia los siguientes valores y su respectiva descripción de acuerdo con cada uno:

Tabla 1.

Clasificación del tipo de flujo según el número de Reynolds.

Tipos de flujo	Re
Laminar	Re < 2320
Transición	2320 ≤ Re ≤ 10000
Turbulento	Re ≥ 10000

Nota. Se presenta los tipos de flujo con su respectivo número de Reynolds. Fuente: Marcos Zambrano (2019, p.30)

- **Viscosidad dinámica**

La viscosidad es una propiedad fundamental de los fluidos que se manifiesta como una oposición interna al movimiento cuando estos son sometidos a una fuerza externa. Según Robert L. Mott (2006), A medida que un fluido se desplaza, se generan fuerzas internas asociadas a la resistencia al deslizamiento entre sus capas, las cuales dependen directamente de la viscosidad del fluido. Estas fuerzas representan la oposición al

movimiento relativo dentro del fluido y se manifiestan como esfuerzos distribuidos sobre las superficies en contacto. En fluidos de uso común en ingeniería, como el agua o el alcohol, la intensidad de estos esfuerzos está directamente relacionada con las variaciones de velocidad existentes entre capas adyacentes del flujo.

- **Viscosidad cinemática**

En un fluido que se mantiene a temperatura constante, la viscosidad cinemática según Robert L. Mott (2006) es una magnitud que relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido, la cual resulta especialmente útil para describir su comportamiento frente al movimiento. Esta propiedad, conocida como viscosidad cinemática, depende exclusivamente de características propias del fluido, dado que tanto la viscosidad como la densidad son propiedades intrínsecas del mismo.

$$v_c = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

v_c =Viscosidad cinemática (m²/s)

μ =Viscosidad dinámica (kg/m*s)

ρ =Densidad del fluido (kg/m³)

2.1.3 Flujo volumétrico o caudal

En el estudio de la hidráulica aplicada, la cuantificación del flujo constituye un parámetro esencial para el análisis y dimensionamiento de sistemas de conducción. En este contexto teórico, De acuerdo con Francisco Javier Domínguez S. (1999), una de las magnitudes fundamentales en el análisis hidráulico es el caudal, el cual representa el volumen de fluido que atraviesa una sección determinada por unidad de tiempo.

Desde un enfoque analítico, el caudal se define como la relación entre un volumen infinitesimal de fluido y el intervalo de tiempo en el que dicho volumen se desplaza a través de la sección considerada.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q= Caudal (m³/s)

V= Volumen (m³)

t= Tiempo (s)

2.1.4 Teoría de la Conservación de la Energía-Ecuación de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también conocido como ecuación de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido ideal, es decir, incompresible y sin viscosidad, estableciendo que la energía total se mantiene constante a lo largo de una línea de corriente (Sotelo Ávila, 1997). Este principio es fundamental en la conservación de la energía y reconoce tres formas principales de energía en un fluido en movimiento, la energía de presión, que está asociada a la fuerza ejercida por el fluido sobre las paredes de la tubería o cualquier superficie de control, la energía de posición o potencial, relacionada a la altura del fluido con respecto a un plano de referencia, y la energía cinética, que depende de la velocidad de flujo. La combinación de estas determina el comportamiento del sistema hidráulico y permite comprender fenómenos esenciales como la aceleración del fluido, variación de la presión y las pérdidas de energía que surgen en condiciones reales por la fricción.

Por consiguiente, para un fluido real se va a emplear la ecuación:

$$\frac{V1^2}{2g} + \frac{P1}{\gamma} + Z1 = \frac{V2^2}{2g} + \frac{P2}{\gamma} + Z2 + hf_{1-2}$$

Donde:

$\frac{P1}{\gamma}, = \frac{P2}{\gamma},$ = Carga de presión en los puntos 1 y 2 respectivamente (m.c.a)

Z1, Z2 = Altura de los puntos 1 y 2 respectivamente desde el nivel de referencia
(m)

$$\frac{v_1^2}{2g}, \frac{v_2^2}{2g} = \text{Energía de velocidad o cinética (m)}$$

hf₁₋₂ = Pérdidas de carga totales del sistema por fricción en la tubería y pérdidas menores por válvulas o accesorios. (m).

2.1.5 Pérdidas de Carga

Un factor clave que afecta a la carga total es decir a la reducción de presión y de caudal un sistema hidráulico son las pérdidas de carga, que se producen debido a la fricción de las partículas de agua con las paredes de la tubería, así como por los cambios de dirección, variaciones de diámetro, uniones y obstáculos internos que generan turbulencia y disipación de energía.

Este fenómeno es de suma importancia en el diseño de obras hidráulicas, por tal motivo se incluye un ensayo para su demostración en un equipo denominado “Tablero de pérdidas de carga”, el cual permite apreciar en los manómetros las variaciones de presión en distintos puntos de un sistema de tuberías compuesto por distintos materiales, cambios de sección y accesorios que promueven a la pérdida de energía.

2.1.5.1 Pérdidas longitudinales.

Cuando un fluido circula por el interior de una tubería, el contacto con las paredes genera rozamiento entre las capas del fluido, lo que da lugar a pérdidas de energía conocidas como pérdidas primarias. Según Heras (2019) la disminución de energía específica por unidad de peso que se genera a lo largo de tramos del sistema donde el flujo se mantiene permanente y uniforme. En este contexto, las pérdidas primarias se originan a lo largo de la tubería debido a la fricción del flujo, y su magnitud depende de

factores como el coeficiente de fricción, el diámetro interno del conducto, la velocidad del fluido y las características del régimen de flujo.

- **Ecuación de Darcy-Weisbach**

Esta expresión es ampliamente utilizada en la mecánica de fluidos, ya que permite establecer la relación entre la pérdida de presión ocasionada por la fricción del fluido a lo largo de un tramo de tubería y la velocidad de circulación del mismo. Según Sotelo (1997), en condiciones de flujo permanente dentro de una tubería de diámetro constante, la línea piezométrica mantiene un comportamiento paralelo a la línea de energía, la cual presenta una pendiente en el sentido del movimiento del fluido.

Una de las principales ventajas de esta formulación es su aplicabilidad universal, pues puede emplearse para describir flujos en régimen laminar, de transición o turbulento. El coeficiente de fricción “f”, de carácter adimensional, depende tanto de la rugosidad interna de la tubería como de las condiciones del flujo a presión, y su determinación se realiza a partir de las relaciones asociadas al número de Reynolds. De forma general, la ecuación de Darcy–Weisbach se expresa como:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g}$$

Donde:

hf=Pérdidas por fricción (m)

f=Factor de fricción

L=Longitud de tramo de tubería (m)

D=Diámetro interno de la tubería (m)

v=Velocidad media del flujo (m/s)

g=Aceleración de la gravedad (m/s²)

- **Diagrama de Moody**

En el análisis de las pérdidas de carga por fricción en tuberías, resulta indispensable contar con herramientas gráficas que permitan estimar el coeficiente de fricción en función del régimen de flujo y la rugosidad relativa. En este sentido, según Sotelo, (1997), A partir de los estudios experimentales realizados por Nikuradse, Moody desarrolló el conocido diagrama universal que lleva su nombre, el cual permite determinar el coeficiente de fricción en tuberías con rugosidad comercial que transportan distintos fluidos. En dicho diagrama se observa que el comportamiento hidráulico de estas tuberías es análogo al de aquellas con rugosidad Nikuradse. Asimismo, la curva límite inferior coincide con el caso de tuberías lisas y se ajusta estrechamente a la formulación propuesta por Blasius.

Figura 3.

Diagrama de Moody.

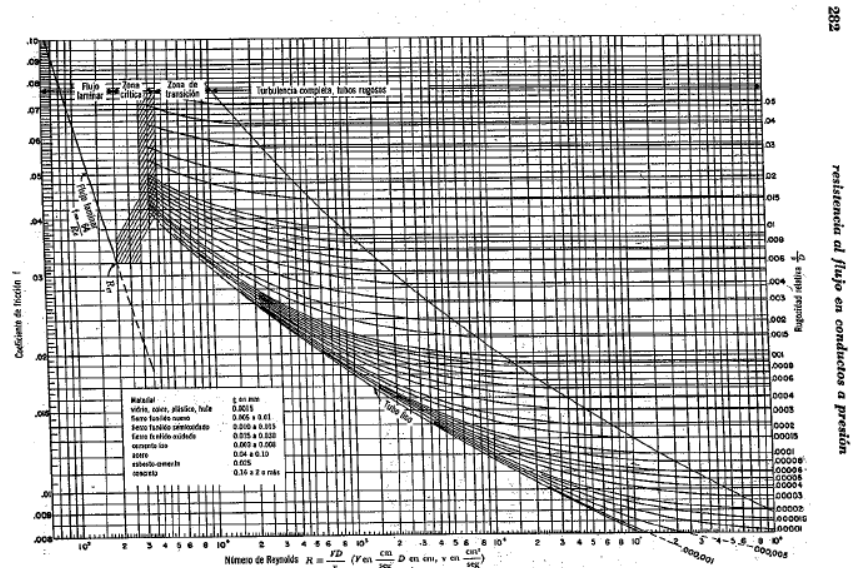


Figura 8.3. Coeficiente de fricción para cualquier tipo y tamaño de tubo; diagrama universal de Moody.

Nota. La figura muestra el factor de fricción “f” vs el número de Reynolds “Re”. Fuente: Sotelo, (1994, p. 282)

- **Factor de fricción (f)**

El factor de fricción “f” es un parámetro de carácter versátil cuya magnitud depende de la geometría del conducto, la rugosidad interna de la tubería y el número de Reynolds del flujo. Su determinación puede realizarse mediante expresiones matemáticas específicas, las cuales varían en función del régimen de flujo predominante, ya sea laminar, de transición o turbulento.

- **Colebrook y White**

En el estudio del régimen de flujo en tuberías, es necesario reconocer que las formulaciones teóricas no siempre reproducen con exactitud el comportamiento real del fluido en condiciones comerciales. En este contexto, según Sotelo, (1997), Al analizar el comportamiento del flujo en tuberías comerciales, se observa que los resultados obtenidos inicialmente para conductos idealizados también pueden extenderse a situaciones reales, tanto en régimen laminar como turbulento. Sin embargo, en la zona intermedia entre ambos regímenes, el comportamiento del flujo no sigue de manera exacta las expresiones teóricas tradicionales. Ante esta situación, se desarrolló una relación empírica que permite describir de mejor manera el comportamiento del flujo durante la transición de régimen en tuberías comerciales.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

Donde:

ε = Rugosidad de la tubería (mm)

D= Diámetro de la tubería (mm)

f= Factor de fricción (-)

Re= Número de Reynolds (-)

- **Ecuación de Hazen-Williams**

Cuando el fluido que circula por una tubería es agua, resulta conveniente adoptar un criterio de análisis distinto al de otras formulaciones generales. Tal como señala Mott (2016), “la fórmula de Hazen-Williams es una de las más populares para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos” (p. 243). En función de ello, se recomienda el empleo de esta expresión en sistemas de tuberías que transportan agua.

$$hl = L * \left[\frac{Q}{0.85 * A * C_h * R^{0.63}} \right]^{1.852}$$

Donde:

Q=Caudal (m³/s)

Ch= Coeficiente de Hazen-Williams

R=Radio hidráulico del conducto (m)

A=Área de la tubería (m²)

L=Longitud de la tubería (m)

2.1.5.2 Pérdidas locales

Pérdidas locales o también llamadas pérdidas secundarias, se originan por los efectos de fricción y perturbación del flujo al atravesar los accesorios de un sistema hidráulico y suelen concentrarse en tramos cortos de tubería. Entre los elementos que

generan este tipo de pérdidas se encuentran, principalmente, codos, té, derivaciones, válvulas, ensanchamientos y contracciones. Debido a la complejidad del comportamiento del flujo en estos accesorios, la estimación de las pérdidas secundarias se realiza generalmente a partir de coeficientes determinados de forma experimental.

- **Coefficiente de resistencia local (k)**

Según Sotelo (1997), las tuberías de conducción que se utilizan en la práctica están compuestas, generalmente, por tramos rectos y curvos para ajustarse a los accidentes topográficos del terreno, así como a los cambios que se presentan en la geometría de la sección y de los distintos dispositivos para el control de las descargas (válvulas y compuertas). Estos cambios originan pérdidas de energía, distintas a las de fricción, localizadas en el sitio mismo del cambio de geometría o de la alteración del flujo. Tal pérdida se conoce como pérdida local. (p. 296). Dado que estas pérdidas de energía se originan por la presencia de accesorios en la conducción, su evaluación se basa en relaciones de carácter experimental que dependen de un coeficiente de resistencia, el cual se determina a partir de la siguiente expresión:

$$hl = k * \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

hl=Pérdida de energía (m)

k=Coefficiente de resistencia del accesorio

V=Velocidad de flujo (m/s)

g=Aceleración de gravedad (m/s²)

2.1.5.3 Cálculo de pérdidas de carga por longitud equivalente.

En el diseño de sistemas hidrosanitarios, la determinación adecuada de las pérdidas de carga constituye un criterio esencial para garantizar el correcto

funcionamiento de las instalaciones. En este marco normativo, MIDUVI, (2011) establece que

“Para el cálculo de pérdidas de carga por longitud (en m c.a.) se aplicará la ecuación 16-6.”:

Esta disposición normativa define el procedimiento técnico que debe emplearse para cuantificar la pérdida de energía por fricción en tramos rectos de tubería, asegurando uniformidad metodológica y coherencia en el dimensionamiento hidráulico de las redes.

$$hf = m * L * \left(\frac{V^{1.75}}{D^{1.25}} \right)$$

Donde:

V=Velocidad (m/s)

D=Diámetro (m)

L=Longitud de la tubería (m)

m=Constante del material del tubo que adopta los siguientes valores.

m=0.00070 (acero)

m=0.00092 (acero galvanizado varios años de uso)

m=0.00056 (cobre)

m=0.00054 (plástico)

Para las pérdidas de carga por accesorios se utilizará la siguiente expresión:

$$L_e = \left(A * \left(\frac{d}{25.4} \right) \pm B \right) * \left(\frac{120}{C} \right)^{1.8519}$$

Donde:

Le=Longitud equivalente (m)

A, B=Factores que dependen del tipo de accesorios

d=Diámetro interno (mm)

C=Coefficiente según material de tubería (acero:120, plástico:150)

Tabla 2.

Factores para el cálculo de longitudes equivalentes.

Accesorio	Factor A	Factor B
Codo de 45°	0.38	+0.02
Codo radio largo 90°	0.52	+0.04
Entrada normal	0.46	-0.08
Reducción	0.15	+0.01
Salida de tubería	0.77	+0.04
Tee paso directo	0.53	+0.04
Tee paso de lado y tee salida bilateral	1.56	+0.37
Tee con reducción	0.56	+0.33
Válvula de compuerta abierta	0.17	+0.03
Válvula de globo abierta	8.44	+0.50
Válvula de pie con criba	6.38	+0.40
Válvula de retención	3.20	+0.03

Nota. La tabla muestra los factores A y B para el cálculo de longitudes equivalentes.

Fuente: MIDUVI, (2011, p.22)

2.1.6 Medidores de flujo en conductos cerrados.

La medición del caudal en conductos cerrados constituye uno de los aspectos fundamentales en la ingeniería hidráulica, ya que permite cuantificar la cantidad de fluido que atraviesa una sección transversal de una tubería en un determinado intervalo de tiempo. De acuerdo con Robert W. Fox y Alan T. McDonald, (1995), la mayoría de los medidores de flujo en conductos cerrados basan su funcionamiento en la aceleración del fluido al pasar por un elemento convergente, como una tobera, lo que provoca la separación del flujo y la formación de una vena contracta aguas abajo. En esta zona, el área del flujo es mínima y la presión es prácticamente uniforme, permitiendo relacionar el caudal teórico con la diferencia de presión entre secciones del conducto.

- **Medidores de caudal por presión diferencial.**

Los medidores por presión diferencial constituyen uno de los grupos más importantes de caudalímetros en conductos cerrados. Su principio de funcionamiento se basa en la generación de una diferencia de presión entre dos secciones de la tubería, producida por la introducción de un elemento que modifica la sección transversal efectiva del flujo.

Dentro de esta categoría se incluyen el tubo Venturi y la placa de orificio, dispositivos ampliamente utilizados tanto en aplicaciones industriales como en laboratorios de enseñanza, debido a que permiten ilustrar claramente la relación entre velocidad, presión y energía del flujo.

- **Tubo Venturi**

El tubo Venturi es un dispositivo de medición de caudal que consta de tres secciones claramente definidas: una entrada convergente, una sección de garganta de diámetro constante y una salida divergente. Según Víctor L. Streeter, et al. (1999), Las presiones registradas tanto en la sección de entrada como en la garganta representan las condiciones hidráulicas efectivas del flujo, al igual que las velocidades asociadas a dichas secciones. Mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli en su forma ideal, es decir, sin considerar las pérdidas de energía, se determina la velocidad teórica en la garganta. Esta velocidad es posteriormente ajustada mediante el coeficiente de descarga C_d , con lo cual se obtiene la velocidad efectiva del flujo. El caudal real se calcula finalmente a partir del producto entre la velocidad efectiva y el área transversal real de la garganta.

La siguiente expresión es el resultado de lo antes explicado.

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2gR' \left(\frac{S_0}{S_1 - 1} \right)}{1 - \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^4}}$$

La ecuación mostrada corresponde al caudal medido mediante un venturímetro para flujo incompresible. Esta expresión se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli y de la ecuación de continuidad, considerando que la contracción del flujo en la garganta del Venturi es prácticamente completa. Por esta razón, el coeficiente de contracción puede asumirse igual a la unidad y el coeficiente que corrige el caudal queda representado únicamente por el coeficiente de descarga C_d .

2.2 FLUJO A SUPERFICIE LIBRE

Uno de los aspectos fundamentales en el estudio del flujo a superficie libre es su correcta definición. De acuerdo con Domínguez, (2006), este tipo de flujo se caracteriza por presentar una superficie del líquido en contacto directo con la atmósfera, lo que implica que la presión en dicha interfase sea atmosférica. Bajo estas condiciones, el tirante o profundidad del flujo adquiere una relevancia esencial, ya que constituye una variable clave para la descripción y análisis del régimen hidráulico.

Los canales son conductos abiertos y en ciertos casos cerrados, pero con superficie libre por los cuales el agua circula principalmente por efecto de la gravedad, sin estar sometida a presión interna adicional. Esto se debe a que la lámina de agua mantiene una superficie libre en contacto con la atmósfera, por lo que el movimiento del flujo está gobernado por su peso propio y la presión atmosférica actuando sobre dicha superficie.

2.2.1 Clasificación de canales

- **Canales naturales.**

En la hidráulica de canales abiertos es necesario distinguir entre canales naturales y artificiales, debido a sus diferencias geométricas y de comportamiento del flujo. Según Chow Ven Te. (1994), los canales naturales corresponden a los cursos de agua que se forman y evolucionan de manera natural, sin intervención directa del ser humano, y que abarcan desde pequeños arroyos y quebradas en zonas montañosas hasta ríos de mayor tamaño y estuarios influenciados por las mareas. Incluso ciertas corrientes subterráneas que presentan una superficie libre pueden considerarse dentro de esta clasificación. A diferencia de los canales artificiales, estos sistemas suelen presentar condiciones hidráulicas irregulares y altamente variables; sin embargo, mediante aproximaciones empíricas es posible representar de forma aceptable su comportamiento y analizarlo con herramientas de la hidráulica teórica.

- **Canales artificiales.**

En la hidráulica de canales abiertos también es necesario diferenciar los sistemas construidos por el hombre, ya que presentan condiciones geométricas y operativas controladas. De acuerdo con Chow Ven Te, (1994), se denomina canales artificiales a aquellos sistemas hidráulicos cuya geometría y funcionamiento han sido definidos mediante intervención humana. También se incluyen dentro de esta categoría los modelos construidos en laboratorio con fines experimentales, en los cuales es posible regular las condiciones de operación. Gracias a este control, la aplicación de los principios de la hidráulica permite reproducir de manera confiable el comportamiento del flujo observado en situaciones reales, generando resultados suficientemente precisos para su uso en el análisis y diseño de obras hidráulicas.

2.2.2 Tipos de flujo en canales.

El flujo en canales abiertos puede clasificarse a partir del comportamiento de sus principales variables hidráulicas, como el tirante, la velocidad y el área, en función del tiempo y de la posición a lo largo del canal. De acuerdo con Rodríguez Ruiz (2008), el flujo se considera permanente cuando dichas características permanecen constantes en el tiempo, y no permanente cuando presentan variaciones temporales. De igual manera, el flujo se denomina uniforme cuando las variables hidráulicas no cambian a lo largo del canal, y variado cuando estas experimentan modificaciones espaciales.

Dentro del flujo variado se reconocen dos situaciones principales: se denomina rápidamente variado cuando la profundidad se modifica de forma brusca en una longitud reducida, como sucede en el resalto hidráulico; mientras que es gradualmente variado cuando el tirante cambia de manera lenta y progresiva a lo largo de distancias considerables, conservando una distribución de presiones aproximadamente hidrostática.

2.2.3 Geometría del canal








La sección transversal de un canal se define mediante un corte vertical perpendicular al eje del flujo. Según Pedro Rodríguez R. (2008), La geometría de la sección transversal de un canal está directamente relacionada con el uso previsto y las condiciones constructivas del proyecto. En canales revestidos se recurre con frecuencia a secciones trapezoidales, mientras que las secciones rectangulares se aplican en obras con materiales rígidos y durables, como concreto o mampostería. Para obras de menor escala, como cunetas viales, se emplean comúnmente secciones triangulares, en tanto que las secciones circulares se reservan para sistemas cerrados como alcantarillas y túneles. Adicionalmente, en ciertos proyectos hidráulicos se adoptan secciones compuestas que

combinan diferentes geometrías, especialmente en intervenciones urbanas destinadas a la rectificación de cauces naturales.

Figura 4.

Elementos geométricos de secciones de canal.

Tabla 2-1. Elementos geométricos de secciones de canal

Sección	Área A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Ancho superficial T	Profundidad hidráulica D	Factor de sección Z
 Rectángulo	by	$b + 2y$	$\frac{by}{b + 2y}$	b	y	by^3
 Trapecio	$(b + zy)y$	$b + 2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2y\sqrt{1 + z^2}}$	$b + 2zy$	$\frac{(b + zy)y}{b + 2zy}$	$\frac{[(b + zy)y]^3}{\sqrt{b + 2zy}}$
 Triángulo	zy^2	$2y\sqrt{1 + z^2}$	$\frac{zy^2}{2\sqrt{1 + z^2}}$	$2zy$	zy	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^3$
 Círculo	$\frac{1}{2}d^2(\theta - \sin\theta)$	$\frac{1}{2}d\theta$	$\frac{1}{4}\left(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right)d$	$\frac{(\sin\theta)d}{2\sqrt{1 - (\sin\theta)^2}}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{\theta - \sin\theta}{\sin\theta}\right)d$	$\frac{\sqrt{2}}{32}\frac{(\theta - \sin\theta)^3}{(\sin\theta)^3}d^3$
 Parábola	$\frac{2}{3}zy^2$	$T + \frac{5}{3}\frac{y^2}{z}$	$\frac{2T^3y}{3T^2 + 5y^2}$	$\frac{2}{3}\frac{A}{y}$	$\frac{2}{3}zy$	$\frac{3}{8}\sqrt{6}T^3y^3$
 Rectángulo con esquinas redondeadas ($r > y$)	$\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) r^2 + (b + 2r)y$	$(\pi - 2)\alpha r + b + 2y$	$\frac{(\pi/2 - \alpha)r^2 + (b + 2r)y}{(\pi - 2)\alpha r + b + 2y}$	$b + 2r$	$\frac{(\pi/2 - \alpha)r^2}{b + 2r} + y$	$\frac{[(\pi/2 - \alpha)r^2 + (b + 2r)y]^3}{\sqrt{b + 2r}}$
 Triángulo con fondo redondeado	$\frac{T^3}{4z} - \frac{r^2}{2}(1 - z \cos^2 \alpha)$	$\frac{T}{z}\sqrt{1 + z^2} - \frac{2r}{z}(1 - z \cos^2 \alpha)$	$\frac{A}{P}$	$2[(y - r) + r\sqrt{1 + z^2}]$	$\frac{A}{T}$	$A\sqrt{\frac{A}{P}}$

* Aproximación satisfactoria para el intervalo $0 < x \leq 1$, donde $x = 4y/7$. Cuando $x > 1$, utilice la expresión exacta $P = (T/2)[\sqrt{1 + x^2} + 1/x \ln(x + \sqrt{1 + x^2})]$.

Nota. La tabla muestra las propiedades geométricas y su fórmula para determinarlo según la forma de la sección. Fuente: Chow Ven Te (1994, p. 21).

2.2.4 Número de Froude

“El efecto de la gravedad sobre el estado de flujo se representa por la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Esta relación está dada por el número de Froude” (Chow Ven Te, 1994). El número de Froude constituye un parámetro adimensional fundamental en la hidráulica de flujos a superficie libre, ya que permite cuantificar la influencia de la gravedad sobre el movimiento del fluido y establecer el régimen de flujo, facilitando el análisis del comportamiento hidráulico en canales y estructuras asociadas.

El número de Froude se determina con la siguiente expresión:

$$F = \frac{V}{\sqrt{g * y}}$$

Donde:

F= Número de Froude (-)

g= Aceleración de la gravedad (m/s²)

y= Tirante hidráulico (m)

V= Velocidad media (m/s)

La clasificación dicta que el flujo es subcrítico cuando $Fr < 1$, crítico cuando $Fr = 1$, y supercrítico cuando $Fr > 1$. Clasificación de suma importancia en el análisis de transiciones y resaltos hidráulicos.

En los canales abiertos, el comportamiento del flujo no depende únicamente del caudal y de la geometría, sino también del equilibrio entre fuerzas inerciales, viscosas y gravitacionales. Por esta razón, el régimen hidráulico se define mediante dos criterios principales:

- Régimen viscoso (Reynolds): controla si el flujo es laminar o turbulento.
- Régimen gravitacional (Froude): controla si el flujo es subcrítico o supercrítico.

La combinación de ambos criterios genera cuatro estados posibles del flujo: subcrítico-laminar, subcrítico-turbulento, supercrítico-laminar y supercrítico-turbulento.

2.2.5 Energía específica y condición crítica

En el estudio del flujo a superficie libre, el enfoque energético permite comprender cómo se distribuye y transforma la energía del fluido a lo largo del canal, constituyendo una herramienta esencial para el análisis y diseño hidráulico. Según Robert L. Mott. (2006), el análisis energético del flujo en canales abiertos implica la evaluación de la energía que posee el fluido en una sección específica del canal. Esta energía se

determina con respecto al fondo del canal y está constituida por la energía potencial asociada al tirante del flujo, así como por la energía cinética derivada de la velocidad del mismo.

En este sentido, la energía en una sección puede representarse mediante la carga total, la cual integra el tirante y la carga de velocidad, permitiendo evaluar el comportamiento del flujo y su capacidad de transporte. Este análisis es fundamental para interpretar variaciones de energía a lo largo del canal, ya que cambios en la geometría, la pendiente o la rugosidad generan pérdidas por fricción y pueden modificar la distribución de velocidades. Por ello, el estudio de la energía constituye una base clave para el diseño hidráulico, la verificación de condiciones de flujo y la identificación de zonas donde se presentan transiciones o disipación de energía.

Matemáticamente se expresaría de la siguiente forma:

$$E = y + \frac{v^2}{2g}$$

Donde “y” representa la profundidad del flujo y “v” la velocidad media. Esta magnitud se denomina comúnmente energía específica (E). Para un caudal dado Q, la velocidad puede obtenerse como $v = Q/A$.

$$E = y + \frac{Q^2}{2g * A^2}$$

$$E = y + \frac{Q^2}{2g * (b * y)^2}$$

2.2.6 *Diseño de canales*

En la hidráulica aplicada, la definición conceptual del canal abierto constituye el punto de partida para su análisis y dimensionamiento. Según Chow, (1994), un canal abierto es un conducto en el cual el agua fluye con una superficie libre. De acuerdo con su origen puede ser natural o artificial.

En este sentido, el diseño de canales se fundamenta en principios hidráulicos que permiten garantizar su capacidad de conducción, estabilidad y eficiencia. En términos generales, el cálculo parte de la ecuación de continuidad, que relaciona el caudal con el área hidráulica y la velocidad media. Para estimar la velocidad se emplea, de manera tradicional, la fórmula de Manning, que considera la rugosidad del material, el radio hidráulico y la pendiente de energía, permitiendo dimensionar secciones capaces de transportar el caudal de diseño.

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{n}$$

$$Q = \frac{A}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

V=Velocidad de flujo (m/s)

S= Pendiente (m/m)

Q=Caudal (m³/s)

A=Área de sección (m²)

n=Rugosidad (-)

R=Radio hidráulico (m)

Otro concepto esencial es la energía específica, definida como la suma de la profundidad y la energía cinética, la cual sirve para determinar condiciones de flujo crítico, decisivas en el control hidráulico y en la ubicación de estructuras como vertederos o compuertas.

- Ecuación de Chézy

En 1769, el ingeniero francés Antoine de Chézy propuso una de las primeras expresiones para describir el flujo uniforme, conocida como la ecuación de Chézy, la cual se representa comúnmente como:

$$V = C * \sqrt{R * S}$$

Donde:

V=Velocidad de flujo (ft/s)

R=Radio hidráulico (ft)

S=Pendiente de energía (-)

C=Coeficiente de Chézy (-)

2.3 MÁQUINAS HIDRÁULICAS

Para modificar la trayectoria de un fluido o variar la magnitud de su velocidad es necesario aplicar fuerzas externas. Cuando un álabe en movimiento desvía un chorro de fluido y altera su cantidad de movimiento, se generan fuerzas de interacción entre el fluido y el álabe, produciéndose trabajo mecánico como resultado del desplazamiento de este último. Este principio constituye la base de funcionamiento de las turbomáquinas. En el caso de las bombas axiales y centrífugas, así como de los ventiladores y compresores, se suministra energía al fluido mediante un trabajo continuo; mientras que, en las turbinas

de impulso, Francis y de hélice, además de las turbinas de vapor y gas, la energía se extrae del fluido de forma continua y se transforma en par sobre un eje rotatorio.

La eficiencia de estas máquinas depende directamente de factores hidráulicos como el número de Reynolds, la cavitación, las pérdidas de energía y la correcta adaptación del flujo al diseño geométrico de los álabes. Según Mosonyi (1991), la selección y dimensionamiento de una turbina depende del caudal y del salto hidráulico disponible, lo cual determina su clasificación en turbinas de acción o de reacción.

2.3.1 Potencia Hidráulica

Las turbinas hidráulicas son máquinas motrices destinadas a transformar la energía hidráulica del agua en energía mecánica de rotación, aprovechando la energía asociada a la altura disponible y al caudal del flujo. Según Jara, el agua constituye un medio ideal para la transmisión de energía debido a su elevada densidad y a la posibilidad de ser conducida y regulada de manera eficiente mediante obras hidráulicas.

La potencia hidráulica disponible en una instalación se expresa como:

$$P_H = \rho g Q H$$

Donde:

ρ =Densidad del agua

g =Aceleración de la gravedad

H =Altura neta

Q =Caudal

2.3.2 Clasificación de las turbinas.

En el análisis de máquinas hidráulicas, la clasificación de las turbinas depende del modo en que el fluido transfiere energía al rodete y de las condiciones de presión durante el proceso. De acuerdo con Wilfredo Jara T. (1998), cuando la presión del fluido a la entrada y a la salida del rodete es la misma, la turbina se clasifica como de acción, ya que

el intercambio de energía se produce sin variaciones de presión y el flujo circula a presión atmosférica. Dentro de este grupo se encuentran las turbinas Pelton, ampliamente utilizadas en aplicaciones actuales.

En cambio, cuando existe una diferencia de presión entre la entrada y la salida del rodete, la turbina se considera de reacción, dado que la conversión de energía se genera tanto por la variación de presión como por el cambio de velocidad del flujo. A este tipo pertenecen las turbinas Francis y Kaplan. La distribución de presiones y velocidades características de ambos tipos de turbinas se representa esquemáticamente en las figuras correspondientes.

- **Turbina de acción Pelton**

La turbina Pelton es una turbina de acción diseñada para operar con altas alturas netas y bajos caudales. Está compuesta por un rodete provisto de un número determinado de cucharas dobles, sobre las cuales impacta uno o varios chorros de agua provenientes de una tobera. Según Wilfredo Jara T. (1998), la función de las cucharas es dividir el chorro en dos corrientes simétricas, produciendo una desviación cercana a 180°, lo que maximiza el cambio de cantidad de movimiento y, por tanto, el par transmitido al eje.

- **Turbina Francis**

En las turbinas hidráulicas de reacción, el funcionamiento se caracteriza por variaciones de presión a través del rodete y por la presencia de elementos que optimizan la recuperación de energía. Según Wilfredo Jara T. (1998), esta turbina se aplica en instalaciones con alturas de caída bajas a medias y cuenta con un sistema de regulación que permite controlar el caudal de ingreso al rodete mediante elementos móviles. La rueda móvil cuenta con un número determinado de paletas, definido según el tipo de máquina y su velocidad específica. Además, el difusor o tubo de aspiración conecta la salida de la

rueda con el nivel de descarga, y este conjunto se complementa con elementos como el caracol, el eje, el acoplamiento, los cojinetes y el regulador de velocidad.

2.4 HIDROLOGÍA Y TOPOGRAFÍA

Estas constituyen áreas fundamentales dentro de la ingeniería, ya que permiten comprender y gestionar la interacción entre el agua y el terreno, aspectos esenciales para la construcción de cualquier proyecto. De acuerdo con Villon (2002), “la hidrología es la ciencia natural que estudia el agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos” (p. 15). En este contexto, la incorporación de herramientas tecnológicas y a la vez didácticas como es la caja de arena de realidad aumentada resulta de gran ayuda para la comprensión de conceptos básicos como son las curvas de nivel, cuencas de drenaje, escorrentía y el comportamiento de los flujos de agua en diferentes condiciones, integrando de manera amigable y práctica la teoría de hidrología y topografía.

- Topografía

De acuerdo con Áurea Gallego S y Miguel Sánchez M. (2015), la necesidad de describir y representar gráficamente la superficie terrestre está presente en una amplia variedad de actividades prácticas y técnicas. La topografía es la disciplina que se ocupa del estudio de los equipos de medición, los procedimientos de levantamiento y los métodos de representación utilizados para plasmar con precisión las formas y características del terreno.

En otras palabras, consiste en el estudio y la representación detallada de las características físicas y naturales del terreno, como montañas, valles, colinas, cuerpos de agua y otros accidentes geográficos, tanto en su forma tridimensional como en sus características específicas.

- **Curvas de nivel**

En la representación cartográfica del relieve, es necesario emplear recursos gráficos que permitan interpretar con claridad las variaciones altimétricas del terreno. Según Áurea Gallego S y Miguel Sánchez M. (2015), las curvas de nivel se utilizan para representar el relieve mediante líneas que unen puntos de igual elevación, obtenidas a partir de la intersección del terreno con planos horizontales separados por una distancia vertical constante. El espacio delimitado entre dos de estas líneas consecutivas define una franja del terreno, cuya extensión superficial depende del grado de inclinación del relieve, de modo que en zonas con mayor pendiente dichas franjas son más reducidas, mientras que en áreas más planas se amplían.

Estas curvas son fundamentales para la representación del relieve en los mapas topográficos, ya que permiten visualizar la forma tridimensional de la superficie terrestre en un formato plano. Las curvas de nivel son herramientas esenciales para ingenieros, geógrafos y planificadores urbanos, ya que facilitan la interpretación de la topografía y apoyan la toma de decisiones en el desarrollo territorial y la gestión de riesgos naturales.

2.5 AFORO DE CAUDALES EN CANALES Y RIOS

Los aforos volumétricos son procedimientos utilizados para medir el caudal en ríos, canales y otros cuerpos de agua. El caudal es un parámetro fundamental en la gestión de recursos hídricos, el monitoreo ambiental y la prevención de desastres naturales, como inundaciones. Estos aforos pueden realizarse de diversas maneras, cada una con sus características y niveles de precisión.

Entre los métodos de aforo destaca el de velocidad-área, que consiste en determinar la velocidad media del flujo y multiplicarla por el área de la sección transversal del cauce. Empleando instrumentos como el molinete y el velocímetro de ultrasonido. Otro procedimiento ampliamente utilizado es el método químico que hace

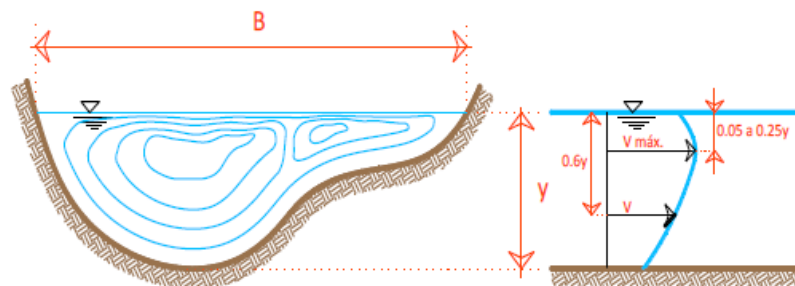
uso de los trazadores salinos, el cual permite calcular el caudal a partir de la dilución del trazador.

2.5.1 Distribución de velocidades

De acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (1992), la estimación de la velocidad promedio del agua en un cauce puede llevarse a cabo a través de técnicas de medición directa o mediante procedimientos de cálculo. En el primer caso, se utilizan dispositivos que permiten registrar el movimiento del flujo, mientras que en el segundo la velocidad se obtiene a partir de relaciones matemáticas y formulaciones hidráulicas.

Figura 5.

Distribución de velocidades en un cauce natural.



Nota. La imagen representa la distribución de velocidades en un cauce natural, mostrando que las mayores velocidades se concentran en la zona central y disminuyen hacia el fondo y las márgenes. Asimismo, se observa que la velocidad máxima se presenta ligeramente por debajo de la superficie libre y que la velocidad media se localiza aproximadamente a 0.6 del tirante, base del método de medición por puntos. Fuente: IMT, (2012, p.10)

2.5.2 Método velocidad-área

El método velocidad-área es una técnica ampliamente empleada para la determinación del caudal en corrientes abiertas, ya que se fundamenta en la relación entre el área hidráulica de la sección transversal y la velocidad media del flujo. De acuerdo con el IMTA. (1992), El método consiste en caracterizar geoméricamente la sección de paso

del flujo y en estimar la velocidad promedio del agua que circula por dicha sección, empleando para ello técnicas de medición o cálculo.

$$Q = V * A$$

Donde:

Q: Caudal (m³/s)

V: Velocidad (m/s)

A: Área (m²)

Al no tener velocidades uniformes en toda la sección, se debe dividir en subsecciones, y en cada una se mide la velocidad media con un equipo que pueden ser molinetes, y medidores de velocidad por ultrasonido. Por último, se multiplica la velocidad por el área de cada sección y se suma los resultados.

$$Q = \sum_{i=1}^n (V_i * A_i)$$

2.5.2.1 Molinete Redback PVD2000

El molinete hidráulico es un instrumento mecánico diseñado para medir la velocidad puntual del flujo en canales abiertos. Su funcionamiento se basa en la relación directa entre la velocidad del agua y la velocidad de giro de un rotor provisto de paletas. Al incidir el flujo sobre el rotor, este gira generando una señal que es convertida en velocidad mediante una ecuación de calibración propia del equipo. Según la Organización Meteorológica Mundial OMM-N°168, (1994), la medición puntual de la velocidad del agua en una corriente se realiza, por lo general, mediante dispositivos que registran el movimiento rotacional de un elemento móvil al ser impulsado por el flujo. Este movimiento se cuantifica durante un intervalo de tiempo previamente definido, permitiendo estimar la velocidad local. Entre los instrumentos más utilizados se encuentran los molinetes de eje vertical, provistos de cazoletas, y los de eje horizontal,

equipados con hélice, los cuales cuentan con sistemas de registro que convierten el giro del rotor en señales eléctricas u ópticas para su posterior contabilización.

2.5.2.2 *Velocímetro acústico FlowTracker2*

El medidor Doppler determina el caudal a partir del área hidráulica de la sección y de la velocidad media del flujo. Su funcionamiento se basa en la emisión de ondas ultrasónicas que, al propagarse en el agua, son reflejadas por partículas en suspensión o por pequeñas burbujas de aire. El equipo analiza la diferencia de frecuencia entre la señal emitida y la señal reflejada; esta variación, conocida como efecto Doppler, es proporcional a la velocidad del movimiento del agua, permitiendo así estimar la velocidad de la corriente y, en conjunto con el área hidráulica, el caudal circulante. Al igual que el molinete, el FlowTracker2 se integra conceptualmente al método área-velocidad, utilizando métodos de puntos para determinar la velocidad media en cada vertical y calcular el caudal total del cauce.

2.5.3 *Método químico*

El método químico de dilución se basa en el principio de conservación de la masa y constituye una alternativa al método área-velocidad. Según la OMM-N°168, (1994), la estimación del caudal mediante el uso de trazadores se basa en la evaluación del nivel de dilución que experimenta en el río una solución añadida al flujo. Este procedimiento resulta especialmente adecuado en situaciones donde los métodos convencionales de medición no son aplicables, como en corrientes de escasa profundidad, altas velocidades, fuerte turbulencia o presencia significativa de sedimentos. Entre las técnicas más empleadas se encuentran la inyección de trazador a caudal constante y la inyección instantánea, ambas sujetas a condiciones generales de aplicación similares.

2.5.3.1 Método “Slug injection”

El método de aforo por dilución mediante inyección tipo slug, consiste en la introducción instantánea de una masa conocida de trazador en el flujo y en el registro, aguas abajo, de la variación temporal de su concentración. El paso de la nube del trazador por la sección de medición genera una curva concentración–tiempo, cuya área es inversamente proporcional al caudal circulante. Este método se fundamenta en el principio de conservación de la masa y resulta especialmente adecuado en cauces pequeños y turbulentos, donde la medición directa de velocidades presenta dificultades.

El caudal medido mediante esta técnica se expresa como:

$$Q = \frac{M}{A_c}$$

Donde:

Q=Caudal del flujo

Ac=Área bajo la curva de concentración-tiempo

2.6 INFILTRACIÓN

En el análisis hidrológico, la infiltración constituye un proceso clave en la interacción entre la precipitación y el suelo, ya que condiciona la generación de escorrentía y la recarga de acuíferos. De acuerdo con Chow (1994):

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo

la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del terreno, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica (p. 110).

El ensayo que pretende explicar este manual es el infiltrómetro de doble anillo, el cual permite medir en campo la tasa de infiltración de líquido en el suelo, dato importante para poder realizar estudios como la distribución de recargas de agua y fugas de canales o embalses donde su principio de funcionamiento se basa en medir la disminución del nivel de agua en el anillo interno en función del tiempo.

2.6.1 Medición de la infiltración

La infiltración puede evaluarse mediante mediciones directas realizadas en el terreno utilizando un instrumento denominado infiltrómetro, el cual permite analizar el comportamiento del agua al ingresar en el suelo. A diferencia de otros procesos hidrológicos como la precipitación o la evaporación, la infiltración presenta una alta variabilidad espacial, incluso en zonas cercanas, por lo que los resultados obtenidos con infiltrómetros son representativos únicamente de áreas muy reducidas. Estos dispositivos se clasifican principalmente en simuladores de lluvia y en infiltrómetros de carga constante; estos últimos funcionan manteniendo una lámina de agua sobre una superficie delimitada del suelo. Los modelos más utilizados son los de tubo simple y los de tubos concéntricos, los cuales se instalan parcialmente en el terreno para minimizar pérdidas laterales y permitir el registro del descenso del nivel de agua con el tiempo.

Tabla 3.

Velocidad estabilizada de infiltración en suelos.

Tipo de suelo	Velocidad (mm/hora)
Arenoso	>30
Arenoso Franco	15-30
Franco arenoso	12-18
Franco	8-14
Franco limoso	6-10
Areno limoso	20-30
Limoso	10-20
Arcilloso limoso	5-8
Arcilloso	3-6

Nota. La tabla muestra la velocidad de infiltración del agua en función del tipo de suelo que se está analizando. Fuente: Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador, 2014. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

2.6.2 Tasa de infiltración y conductividad hidráulica

En estudios hidrológicos aplicados, la cuantificación de la infiltración permite evaluar la respuesta del suelo frente a eventos de lluvia y estimar su influencia en la generación de escorrentía. Según el Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador. (2014), la capacidad de infiltración del suelo se expresa a través de la tasa de infiltración, que representa la rapidez con la que el agua atraviesa la superficie del terreno. Esta se determina a partir de la relación entre la profundidad de agua que ingresa al suelo y el intervalo de tiempo durante el cual ocurre dicho proceso, y se expresa habitualmente en unidades de longitud por tiempo, como mm/h. Su valor máximo corresponde a la conductividad hidráulica del suelo en condiciones de saturación, cuando la influencia de la succión capilar es mínima y el flujo se encuentra dominado por la gravedad.

Tabla 4.

Clasificación de la infiltración básica.

Clasificación	Infiltración básica (mm/h)
Muy baja	2.5<
Baja	2.5-15
Media	15-28
Alta	28-53
Muy alta	>53

Nota. La tabla clasifica la infiltración básica del suelo según su valor en mm/h, diferenciándola en muy baja, baja, media, alta y muy alta, lo que permite evaluar de forma rápida la capacidad del suelo para absorber agua. Fuente: Consorcio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador, 2014. Elaborado por: Jonathan Yánez.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto se desarrollará con la investigación de carácter descriptivo y experimental, ya que, como señalan Guevara, Verdesoto y Castro (2020), la investigación descriptiva se centra en caracterizar fenómenos mediante criterios sistemáticos, mientras que la experimental busca comprobar los efectos de la manipulación de variables independientes sobre las dependientes. Esto resulta pertinente, puesto que busca generar un recurso técnico-pedagógico que compile, sistematice y estandarice la ejecución de ensayos hidráulicos e hidrológicos. Es descriptiva porque documenta y explica el funcionamiento de distintos equipos y ensayos, y es experimental porque incluye la ejecución de prácticas de laboratorio y campo que permiten validar los procedimientos y resultados.

3.2 MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método que guía el desarrollo del proyecto combina el enfoque analítico-sintético y el experimental. Desde lo analítico, se estudia cada equipo de manera individual, separando sus principios de funcionamiento y normativa aplicable. Luego, desde lo sintético, esta información se integra en protocolos claros y estandarizados que conformarán el manual. Finalmente, el componente experimental se materializa en la ejecución práctica de los ensayos, lo que asegura que los pasos descritos sean reproducibles, confiables y coherentes con los resultados esperados.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para la elaboración del manual y el diseño del canal de flujo a superficie libre se desarrollarán mediante la observación directa en laboratorio y campo, complementada con la revisión bibliográfica y normativa (ISO 748, ASTM D3385, INEN, NEC, entre otras). La sistematización de los datos experimentales se realizará en formatos estandarizados de laboratorio, utilizando Excel para el registro, procesamiento y análisis de resultados. De igual manera, el diseño hidráulico y estructural del canal se llevará a cabo en Microsoft Excel y AutoCAD, integrado cálculos, planos y especificaciones técnicas que aseguren un diseño óptimo.

3.4 PROCESO TÉCNICO DE INGENIERIA CIVIL

El proceso técnico para la elaboración del manual de laboratorio se desarrolla en varias etapas. En primer lugar, se realiza la identificación de los ensayos a ejecutar y de los equipos disponibles en el laboratorio, estableciendo los objetivos específicos de cada práctica. Posteriormente, se lleva a cabo el levantamiento y análisis de información técnica y normativa, así como el estudio de la teoría fundamental que sustenta los principales fenómenos hidráulicos, tales como el flujo en tuberías, los regímenes de flujo, las pérdidas de carga, la conservación de la energía, los métodos de aforo y los procesos de infiltración.

A continuación, se ejecutan los ensayos experimentales en laboratorio y en campo, siguiendo los protocolos de operación correspondientes a cada equipo. Durante esta etapa se registran los datos experimentales necesarios, considerando tiempos, mediciones y referencias normativas, con el fin de asegurar la validez y confiabilidad de los procedimientos aplicados.

Finalmente, toda la información recopilada se integra en la elaboración del manual de laboratorio, el cual incluye, para cada ensayo, los fundamentos teóricos, la normativa aplicable, la descripción de los materiales y equipos, el procedimiento paso a paso, los formatos para la recolección de datos, los cálculos requeridos y el análisis de resultados. El manual elaborado es validado mediante la revisión por parte de docentes del área, garantizando su utilidad académica y su pertinencia como recurso de apoyo en la formación de ingenieros civiles.

De manera complementaria, el proceso técnico para el diseño del canal de flujo a superficie libre comprende una serie de etapas coordinadas. Inicialmente, se identifican las necesidades del laboratorio y se definen las dimensiones adecuadas del canal para la correcta ejecución de los ensayos experimentales. Posteriormente, se recopila información teórica, normativa y constructiva proveniente de fuentes especializadas, la cual sirve de base para la elaboración de la memoria de cálculo hidráulico.

Con base en los resultados obtenidos, se desarrolla el diseño geométrico del canal y la elaboración de los planos constructivos mediante el software AutoCAD, asegurando su funcionalidad, seguridad y adecuada integración al espacio físico del laboratorio. Finalmente, se consolida toda la información teórica, los cálculos hidráulicos y los planos constructivos en un documento técnico que servirá como guía para la futura construcción del canal.

CAPÍTULO IV

MANUAL DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA E HIDRLOGÍA

4.1 FLUJO EN TUBERÍAS

4.1.4 *Aparato de demostración de teorema de Bernoulli*

El método de Bernoulli aplicado en laboratorio busca comprobar, en un flujo de agua controlado, cómo se intercambia la energía entre presión, velocidad y, si corresponde, elevación, a lo largo de un conducto, reconociendo que en condiciones reales aparece una pérdida de energía por fricción y efectos del flujo; en este contexto, el aparato de Bernoulli F1-15 está diseñado para visualizar y medir ese comportamiento mediante una sección de prueba tipo Venturi con zona convergente y divergente provista de tomas de presión conectadas a un banco de piezómetros para registrar la presión dinámica en varios puntos, además de una válvula de control de caudal y una sonda de carga total para comparar energía total con energía piezométrica, trabajando normalmente junto a un banco hidráulico de manera que al variar el caudal se observa que en la garganta aumenta la velocidad y disminuye la presión, y que la energía total decrece a lo largo del ducto por las pérdidas.

Objetivo general.

- Comprobar experimentalmente la validez de la teoría de Bernoulli cuando se aplica flujo constante de agua en un conducto tipo Venturi mediante el uso del equipo de demostración de la marca Armfield F1-15.

Objetivo específico.

- Determinar la presión dinámica a lo largo del ducto del equipo F1-15, midiendo las alturas piezométricas en cada toma para distintos caudales.
- Verificar experimentalmente la ecuación de Bernoulli, calculando la carga de velocidad a partir del caudal.

- Identificar la pérdida de carga entre la entrada y la salida del ducto del equipo F1-15 comparando las lecturas de los piezómetros para distintos caudales.

Equipos, materiales y herramientas.

- Banco hidráulico F1-10
- Aparato de Bernoulli F1-15.
- Cronómetro
- Hoja de registro de datos
- Lápiz o esfero

Figura 6.

Aparato de demostración de Bernoulli F1-15.



Nota. La figura muestra equipo de Bernoulli F1-15 montado en el banco hidráulico F1-10 Armfield, con un conducto tipo Venturi y un panel piezométrico para medir la presión en varios puntos del flujo. Elaborado por: Jonathan Yanez.

Procedimiento para ejecución de ensayo

1. Coloque el equipo de Bernoulli F1-15 en el banco de agua F1-10, asegurando que la descarga de agua caiga dentro del banco de agua. Si es necesario, nivele la base utilizando las patas ajustables y el nivel de burbuja, ya que esto es fundamental para medir con precisión las cargas mediante piezómetros.

2. Verifique que, al inicio, la sección de prueba esté orientada con el tramo cónico de 14° convergiendo en el sentido del flujo, es decir, ubicado en el extremo izquierdo. Si es necesario invertir la sección de prueba, retire primero el tubo de carga total antes de desatornillar las uniones y extraer la sección.

3. Cierre las válvulas de control tanto del banco de agua como del equipo de Bernoulli, encienda la bomba y posteriormente abra gradualmente la válvula del banco para llenar el equipo.

4. Antes de iniciar el ensayo es necesario purgar el equipo es decir eliminar todas las burbujas de aire, para ello vamos a cerrar nuevamente la válvula del banco y la del equipo. Luego, retire el tapón de la válvula de aire, conecte una manguera hacia el banco de agua y abra la válvula de purga.

5. A continuación, abra la válvula del banco y permita el paso de agua por el circuito de manómetros para eliminar las burbujas; cuando el flujo salga libre de aire, cierre o ajuste la purga. Después, abra parcialmente la válvula del banco y la del aparato, y afloje ligeramente la purga para que ingrese una pequeña cantidad de aire en la parte superior de los manómetros, de modo que los niveles se estabilicen en una zona cómoda (ver anexo 1) de lectura; una vez que queden en rango, vuelva a apretar.

6. Como recomendación, el caudal máximo estará condicionado, no exceder los límites del tablero, evitando que, por ejemplo, h_1 quede demasiado alto o h_5 demasiado bajo.

7. Considere como puntos de medición h_1 a h_6 , correspondientes a las tomas de presión dinámica, para cada caudal registre el volumen, el tiempo las lecturas manométricas y la lectura de carga total h_8 en cada punto.

8. Regule el caudal mediante la válvula del F1-15 y la válvula del banco, espere hasta que las columnas se estabilicen y, una vez logrado, registre las lecturas de

h1 a h6 y la carga total. Al ser este el primer conjunto de datos se tiene que h1 será la presión máxima y h5 la más baja que se puede tener en el equipo por lo tanto se deberá reducir el caudal para la toma del siguiente conjunto de presiones.

9. Realice el aforo volumétrico utilizando el banco de agua, coloque el tapón para iniciar la recolección y acumule un volumen previamente establecido. Tome el tiempo necesario para alcanzar dicho volumen y, con estos datos, determine el caudal, para mejorar la precisión, repita la medición al menos tres veces con el mismo ajuste de válvulas y promedie los resultados.

10. Repita el ensayo 2 veces más para tener 3 conjuntos de datos.

Ejemplo de cálculo.

Tabla 5.

Recopilación de datos para aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	5	lts
Tiempo 1	30.06	seg
Tiempo 2	32.91	seg
Tiempo 3	34.79	seg
Tiempo 4	33.25	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de Bernoulli. Elaborado por: Jonathan Yanez.

Tabla 6.

Datos geométricos del tubo Venturi.

Posición de toma	Piezometro	Diametro (mm)	Área (m²)
A	h1	25.0	4.91E-04
B	h2	13.9	1.52E-04
C	h3	11.8	1.09E-04
D	h4	10.7	8.99E-05
E	h5	10	7.85E-05
F	h6	25.0	4.91E-04

Nota. La tabla muestra los datos proporcionados por el fabricante respecto a las características geométricas del tubo Venturi. (Ver anexo 2). Elaborado por: Jonathan Yanez.

Tabla 7.

Lecturas de presión estática en piezómetro.

hx	P. estática (mm)	P. estática (m)
h1	296	0.296
h2	240	0.24
h3	180	0.18
h4	122	0.122
h5	50	0.05
h6	95	0.095

Nota. La tabla muestra los datos tomados en laboratorio de las presiones en distintos puntos de tubo Venturi. Elaborado por: Jonathan Yanez.

Caudal.

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0.005}{32.75} = 0.000153 \frac{m^3}{s}$$

Velocidad.

$$V_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.000153}{0.000491} = 0.312 \frac{m}{s}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{0.000153}{0.000152} = 0.582 \frac{m}{s}$$

$$V_5 = \frac{Q}{A_5} = \frac{0.000153}{0.0000785} = 1.125 \frac{m}{s}$$

Presión dinámica.

$$P_1 = \frac{V_1^2}{2 * g} = \frac{0.312^2}{2 * 9.81} = 0.005m$$

$$P_2 = \frac{V_2^2}{2 * g} = \frac{1.009^2}{2 * 9.81} = 0.052m$$

$$P_5 = \frac{V_5^2}{2 * g} = \frac{1.949^2}{2 * 9.81} = 0.194\text{m}$$

Presión total.

$$H_1 = h_1 + P_1 = 0.296 + 0.005 = 0.301\text{m}$$

$$H_2 = 0.24 + 0.052 = 0.292\text{m}$$

$$H_5 = 0.05 + 0.194 = 0.244\text{m}$$

Los tres ensayos evidencian el comportamiento esperado del teorema de Bernoulli en un conducto tipo Venturi: al aproximarse a la sección de menor área zona de garganta, la velocidad aumenta y la presión estática disminuye, identificándose h5 como el punto representativo de máxima aceleración del flujo (mínimo de presión estática dentro de la zona de contracción).

Resultados.

Tabla 8.

Tabla de resultados del ensayo 1 de Bernoulli.

Caudal (m3/s)	Piezómetros (mm)	Área de tubo (m2)	Presión estática (m)	Velocidad (m/s)	Presión dinámica (m)	Presión total (m)
0.000153	h1	4.91E-04	0.296	0.312	0.005	0.301
	h2	1.52E-04	0.24	1.009	0.052	0.292
	h3	1.09E-04	0.18	1.399	0.100	0.280
	h4	8.99E-05	0.122	1.702	0.148	0.270
	h5	7.85E-05	0.05	1.948	0.193	0.243
	h6	4.91E-04	0.095	0.312	0.005	0.100

Nota. La tabla presenta el procesamiento de datos para el primer ensayo, mostrando el caudal de operación y las lecturas en los piezómetros h1 a h6. Para cada punto se calcula el área de la sección del tubo, la presión estática, la velocidad del flujo, la presión dinámica y la presión total, permitiendo analizar la distribución de energía a lo largo del sistema. Elaborado por: Jonathan Yánez.

Tabla 9.

Tabla de resultados del ensayo 2 de Bernoulli.

Caudal (m ³ /s)	Piezómetros (mm)	Área de tubo (m ²)	Presión estática (m)	Velocidad (m/s)	Presión dinámica (m)	Presión total (m)
0.000088	h1	4.91E-04	0.23	0.179	0.002	0.232
	h2	1.52E-04	0.214	0.580	0.017	0.231
	h3	1.09E-04	0.198	0.804	0.033	0.231
	h4	8.99E-05	0.18	0.979	0.049	0.229
	h5	7.85E-05	0.163	1.120	0.064	0.227
	h6	4.91E-04	0.182	0.179	0.002	0.184

Nota. La tabla resume los resultados del segundo ensayo, en el que se determinan los componentes de presión y velocidad en cada punto de medición. Se reportan la presión estática, la presión dinámica y la presión total asociadas a los piezómetros, con el fin de evaluar el comportamiento hidráulico del flujo para el caudal ensayado. Elaborado por: Jonathan Yanez.

Tabla 10.

Tabla de resultados del ensayo 3 de Bernoulli.

Caudal (m ³ /s)	Piezómetros (mm)	Área de tubo (m ²)	Presión estática (m)	Velocidad (m/s)	Presión dinámica (m)	Presión total (m)
0.0000650	h1	4.91E-04	0.18	0.132	0.00089	0.181
	h2	1.52E-04	0.168	0.428	0.00936	0.177
	h3	1.09E-04	0.156	0.594	0.01799	0.174
	h4	8.99E-05	0.145	0.723	0.02664	0.172
	h5	7.85E-05	0.131	0.828	0.03491	0.166
	h6	4.91E-04	0.115	0.132	0.00089	0.116

Nota. La tabla corresponde al tercer ensayo y muestra el cálculo de variables hidráulicas en los puntos h1 a h6. Se incluyen el área de tubo, la velocidad y las presiones estática, dinámica y total, información utilizada para verificar la aplicación de la ecuación de Bernoulli y la variación de energía entre secciones del conducto. Elaborado por: El autor.

Conclusiones.

- En el presente ensayo se verificó el comportamiento descrito por el teorema de Bernoulli en el equipo F1-15, evidenciando el intercambio entre energía de presión y energía cinética a lo largo de un conducto de sección variable. Los resultados indican que, conforme el flujo avanza hacia la zona de contracción, la velocidad aumenta y la presión estática disminuye, alcanzando su valor mínimo en el punto h5, lo cual permite asociarlo con la región de sección mínima. Asimismo, al comparar los ensayos, se confirmó que el incremento del caudal conduce a mayores velocidades y a una caída de presión más pronunciada, consistente con el comportamiento hidráulico esperado en un Venturi.

- Se constató que el flujo real presenta pérdidas de energía, reflejadas en la disminución de la carga total y en la recuperación parcial de presión en la zona divergente, fenómeno que se intensifica a mayores caudales. En particular, para el Ensayo 2 y 3 (menor caudal), la carga total entre h1 y h5 se mantuvo prácticamente constante, lo que indica una aproximación favorable al modelo ideal de Bernoulli en ese tramo; no obstante, las desviaciones observadas hacia la salida (h6) se atribuyen a pérdidas adicionales y a efectos locales asociados a la sección final del sistema, por lo que este punto debe interpretarse principalmente como una condición de salida más que como un punto interno de comparación ideal.

4.1.5 Aparato de demostración de Osborne Reynolds

La mecánica de fluidos describe el comportamiento de los líquidos a partir de las leyes de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, las cuales se simplifican según el régimen del flujo para poder modelar y predecir fenómenos hidráulicos. El experimento clásico de Osborne Reynolds permite visualizar el flujo laminar, transicional o turbulento, estos regímenes mediante la inyección controlada de

un trazador en una tubería con caudal constante, observando la estabilidad del filamento de colorante y relacionando el fenómeno con el número de Reynolds, parámetro adimensional que clasifica el régimen del flujo.

Objetivo general.

- Determinar experimentalmente el régimen de flujo en una tubería mediante el aparato Armfield F1-20, correlacionando las observaciones con el número de Reynolds calculando a partir del caudal y la viscosidad cinemática del agua.

Objetivos específicos.

- Visualizar el comportamiento del flujo en una tubería mediante la inyección de trazador (azul de metileno), identificando cualitativamente los patrones del flujo laminar, transicional y turbulento al variar el caudal.

- Calcular el caudal, la velocidad media y el número de Reynolds para cada condición de operación, y comparar si el régimen observado coincide con el rango esperado del número de Reynolds.

Equipos, materiales y herramientas.

- Banco hidráulico F1-10
- Equipo Armfield F1-20 Osborne Reynolds.
- Cronómetro
- Azul de metileno en polvo
- Recipiente

Figura 7.

Aparato Osborne Reynolds F1-20.



Nota. La figura muestra el “Aparato Osborne Reynolds F1-20” para determinar el tipo de flujo mediante el cálculo del número de Reynolds. Elaborado por: Jonathan Yanez.

Procedimiento para ejecución de ensayo

1. Colocar el aparato de Reynolds sobre una superficie firme y sin vibraciones, no sobre el banco de agua.
2. Conectar manguera de acople rápido de entrada al banco al equipo y asegurarse que la manguera de rebosadero este conectada hacia el banco de agua.
3. Instalar la aguja para permitir el goteo de tinta, ubicándola por debajo del vaso donde se colocará el azul de metileno. Luego, montar el sistema de goteo en el equipo de Osborne Reynolds, asegurándose de que la aguja quede correctamente alineada y posicionada justo en el centro del rebosadero del equipo, para garantizar una inyección uniforme del trazador.
4. Encienda la bomba. Abra ligeramente la válvula de control de caudal del aparato, luego abra la válvula del banco y permita que el sistema se llene de agua. Una vez que el nivel de agua en el tanque de carga alcance la entrada de campana, ajuste la válvula del banco para producir un rebose bajo.

5. Con la válvula de control del aparato ligeramente abierta regular la válvula del banco para producir un flujo continuo y lento por el tubo vertical.

6. Para observar el perfil de velocidad en flujo laminar, cierre la válvula del banco y permita la caída de tinte en la entrada tipo campana. Posteriormente, abra la válvula de salida y observe cómo el tinte se desplaza de manera uniforme, característico de este régimen de flujo.

7. Determine el caudal mediante el aforo volumétrico ayudándose del banco hidráulico F1-10.

8. Tome la temperatura del agua a la salida y determine la viscosidad cinemática a partir de los datos proporcionados por el fabricante en la tabla “Viscosidad cinemática del agua a presión atmosférica” y verifique el número de Reynolds correspondiente a este tipo de flujo.

9. Aumente el caudal abriendo la válvula de control del aparato y repita las inyecciones de tinte para visualizar el flujo transicional y luego, a los caudales más altos, el flujo turbulento. A medida que el caudal en la sección de prueba se reduzca, ajuste la válvula del banco para mantener el rebose a un nivel bajo.

Ejemplo de cálculo.

Tabla 11.

Recopilación de datos para aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	1	lts
Tiempo 1	118	seg
Tiempo 2	122	seg
Tiempo 3	120	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de Reynolds. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 12.

Datos para ejecución de ensayo.

Descripción	Canitdad	Unidad
Diámetro	0.01	m
Volumen	0.001	m ³
Área	0.0007854	m ²
Temperatura	20	°C
Viscosidad cinemática	1.0X10-6	m ² /s

Nota. La tabla presenta los valores correspondientes al diámetro y al área de la tubería del equipo, así como el volumen de agua destinado al aforo. Además, se incluye la temperatura del agua en el sistema y la viscosidad cinemática asociada, la cual depende directamente de la temperatura. La determinación de este último parámetro se realizó conforme a los valores indicados en el Anexo 6. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Resolución

$$T_{prom} = \frac{T1 + T2 + T3}{3} = \frac{97.32 + 95.41 + 96.32}{3} = 96.35 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.001}{96.35} = 0.00001038 \frac{m^3}{s}$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00001038}{0.00007854} = 0.132 \frac{m}{s}$$

$$R_e = \frac{V * D}{\nu_c} = \frac{0.106 * 0.001}{1.002 \times 10^{-6}} = 1318.83$$

$$R_e \leq 2300 = \text{Flujo laminar}$$

Resultados.

Tabla 13.

Resultados del ensayo de Osbourne Reynolds.

Datos del equipo			Datos del agua			
d	0.01	m	Viscosidad cinemática	1.00E-06	[m ² /s]	
A	0.00007854	m ²	Temperatura	20	°C	
PROCEDIMIENTO						
Item	V [m ³]	t prom [s]	Q [m ³ /s]	v [m/s]	Re	Régimen
1	0.0010	96.35	0.00001038	0.132	1318.83	Laminar
2	0.0010	56.88	0.00001758	0.224	2233.99	Transicional
3	0.0010	12.23	0.00008177	1.041	10389.99	Turbulento

Nota. La tabla muestra los resultados del aforo y el cálculo del número de Reynolds indicando similitud con lo visto en el laboratorio. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Conclusión.

- Con $Re = 1318.33$ se observó flujo laminar, (ver anexo 3), con filamento de tinte estable; al aumentar a $Re = 2233.99$ apareció el régimen transicional, (ver anexo 4), confirmando el cambio gradual entre estados, para $Re = 10389.99$ el flujo fue turbulento, (ver anexo 5), con mezcla rápida del tinte, validando que el número de Reynolds predice correctamente el régimen en la tubería del equipo F1-20

4.1.2.1. Equipo de visualización de flujo en canales.

En el estudio del flujo a superficie libre, la caracterización hidráulica no se limita únicamente a la medición del caudal y del tirante, sino que requiere el uso de parámetros adimensionales que permitan interpretar el comportamiento del flujo de forma generalizada. Entre estos parámetros destaca el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas, permitiendo identificar el régimen interno del flujo y determinar si este se desarrolla de manera laminar, transicional o turbulenta. En canales abiertos, este análisis es especialmente útil porque la presencia de una lámina

libre y las condiciones de borde influyen en la estructura del movimiento, haciendo necesario evaluar el comportamiento del flujo a partir de criterios hidráulicos confiables.

El canal de flujo Armfield F1-19 permite determinar de forma indirecta este parámetro mediante la medición experimental del caudal, el tirante y la geometría de la sección de flujo.

Objetivo general.

- Determinar el número de Reynolds en un canal a superficie libre utilizando el canal de flujo Armfield F1-19, caracterizando el régimen hidráulico del flujo.

Objetivos específicos.

- Calcular el número de Reynolds a partir de la velocidad media y el radio hidráulico, para identificar el régimen del flujo.

Equipos, materiales y herramientas.

- Canal de visualización de flujo F1-19
- Banco hidráulico F1-10
- Azul de metileno
- Cronómetro

Figura 8.

Canal de visualización de flujo F1-19.



Nota. En la figura se muestra un equipo Armfield de laboratorio para visualización de flujo en canal abierto, compuesto por un canal transparente de ensayo conectado a un depósito lateral y mangueras de recirculación. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Procedimiento para ejecución de ensayo.

1. Colocar el equipo sobre el banco hidráulico y verificar la horizontalidad del canal mediante un nivel de burbuja, en caso de detectarse desniveles, se ajustarán los apoyos o tornillos de regulación hasta lograr una alineación adecuada.

2. Preparar una solución de tinta diluida en agua, asegurando que el colorante sea completamente soluble; posteriormente, ajustar la concentración hasta obtener una coloración visible pero ligera, de modo que la tinta pueda desplazarse con el flujo sin generar mezcla excesiva ni alterar el régimen hidráulico, y finalmente verter la solución preparada en el depósito del sistema de inyección.

3. Antes de iniciar el ensayo, se debe asegurar que la válvula de control de caudal se encuentre parcialmente cerrada, encender la bomba del banco hidráulico y permitir el ingreso progresivo del agua al canal hasta alcanzar el nivel operativo, ajustando posteriormente el caudal a un valor bajo o medio que sea suficiente para que las líneas de flujo resulten claramente visibles sin generar perturbaciones innecesarias.

4. Activar el sistema de inyección de tinta mediante las agujas, introduciendo el colorante de forma lenta y continua en el flujo.

5. Observar el desplazamiento de la tinta a lo largo del canal e identificar el comportamiento del flujo a partir de las trazas generadas, considerando que líneas paralelas y suaves corresponden a un flujo uniforme, las desviaciones de las líneas alrededor del cuerpo indican aceleración del flujo, y las zonas donde la tinta se separa o forma remolinos evidencian fenómenos de separación y turbulencia.

6. Determine el caudal utilizando el sistema volumétrico del banco hidráulico, seguidamente, mida el tirante en un tramo del canal con flujo uniforme, libre de perturbaciones locales; finalmente, registre el ancho del canal correspondiente a la sección de análisis, como dato geométrico requerido para la caracterización hidráulica del flujo.

7. Una vez obtenidos el caudal, el tirante y el ancho del canal, utilice estos datos para calcular la velocidad media del flujo y, a partir de ella, determinar el número de Reynolds identificando si el flujo es laminar, transicional o turbulento.

Ejemplo de cálculo.

Tabla 14.

Recopilación de datos para aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	1	lts
Tiempo 1	20.71	seg
Tiempo 2	20.76	seg
Tiempo 3	20.74	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de Reynolds. Elaborado por: El autor.

$$T_{prom} = \frac{T1 + T2 + T3}{3} = \frac{27.19 + 27.12 + 27.16}{3} = 20.74 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.001}{27.16} = 0.000048 \frac{m^3}{s}$$

$$Y = 0.045m$$

$$A = b * Y = 0.015 * 0.045 = 0.000675m^2$$

$$P = b + 2Y = 0.015 * 0.045 = 0.105m$$

$$R_H = \frac{A}{P} = \frac{0.00018}{0.039} = 0.00643m$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.000048}{0.000675} = 0.071 \frac{m}{s}$$

$$R_e = \frac{4 * V * R_H}{v_c} = \frac{4 * 0.071 * 0.00643}{1.002 \times 10^{-6}} = 1833.134$$

$R_e \leq 2000 = \text{Flujo laminar}$

Resultados.

Tabla 15.

Resumen de datos para el cálculo del número de Reynolds.

DATOS DE LABORATORIO	
Temperatura	20 °c
vc	1.00E-06 m ² /s
g	9.81 m/s ²
DIMENSIONES DE CANAL	
Ancho canal	1.5 cm
DATOS DE AFORO 1	
Volumen	0.001 m ³
Tiempo	20.74 s
Caudal	4.8216E-05 m ³ /s
DATOS DE AFORO 2	
Volumen	0.001 m ³
Tiempo	9.83 s
Caudal	0.000101729 m ³ /s
DATOS DE AFORO 3	
Volumen	0.002 m ³
Tiempo	4.73 s
Caudal	4.228E-04 m ³ /s

Nota. La 1era tabla indica la temperatura del agua, la viscosidad cinemática en función de la temperatura y la gravedad. En la 2da tabla se muestra el ancho del canal. Y por último la tabla de aforo muestra el volumen y el tiempo promedio, a partir de los cuales se determina el caudal. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 16.

Cálculo del número de Reynolds en flujo a superficie libre.

Caudal Q (m ³ /s)	Ancho canal b (m)	Tirante y (m)	Área A (m ²)	Perímetro mojado P (m)	Rádío hidráulico Rh (m)	Velocidad v (m/s)	Número de Reynolds Re	Tipo de flujo
0.000048	0.015	0.045	0.000675	0.105	0.00643	0.071	1833.134	Laminar
0.000102	0.015	0.062	0.00093	0.139	0.00669	0.109	2921.621	Transicional
0.000423	0.015	0.1	0.0015	0.215	0.00698	0.282	7850.958	Turbulento

Nota. La tabla presenta la caracterización del flujo en un canal a superficie libre mediante el cálculo del número de Reynolds, permitiendo identificar el régimen interno del flujo.

Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Conclusiones.

- El cálculo del número de Reynolds en el canal a superficie libre permitió caracterizar adecuadamente el régimen interno del flujo, empleando como longitud característica el diámetro hidráulico $L=4R$. Los valores obtenidos evidencian la presencia de regímenes laminar, (ver anexo 6), transicional (ver anexo 7), y turbulento (ver anexo 8), lo cual confirma la sensibilidad del número de Reynolds frente a variaciones del caudal, el tirante y la geometría hidráulica del canal, y valida el uso de esta formulación para el análisis experimental en canales abiertos de laboratorio.

4.1.6 Tablero de visualización de pérdidas de energía en tuberías.

El ensayo se realiza en un tablero didáctico provisto de varios esquemas de tuberías, diseñado para estudiar el comportamiento de las pérdidas de carga en conductos cerrados bajo condiciones controladas. Su objetivo es identificar y cuantificar las pérdidas de energía que se generan en cada caso de estudio. Para cada configuración montada en el tablero se establece un caudal de trabajo y se registran las presiones en distintos puntos, con el fin de determinar la caída de presión y la pérdida de carga asociada a cada tramo y accesorio. Posteriormente, los resultados experimentales se comparan con los valores teóricos obtenidos por el método de longitud equivalente, conforme a los criterios de la Norma Hidrosanitaria NHE Agua, evaluando la concordancia entre el comportamiento real del sistema y las estimaciones normativas.

Objetivo general.

- Determinar cuantitativamente las pérdidas de energía longitudinales y locales que se presentan en distintos casos.

Objetivos específicos.

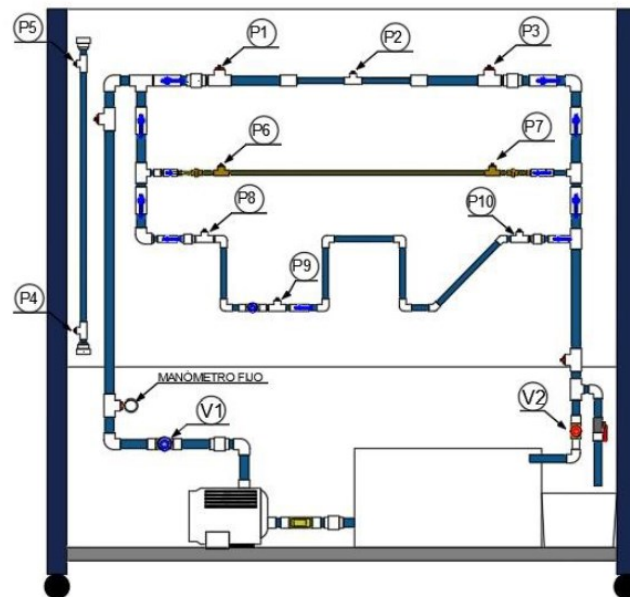
- Evaluar experimentalmente las pérdidas de carga producidas por reducciones de diámetro en la tubería de PVC, mediante la medición de presiones y cálculo de coeficientes de resistencia asociados a cambios de sección.
- Determinar el coeficiente de fricción “ f ” en un tramo recto de tubería de PVC de diámetro constante, mediante la medición de la caída de presión por fricción y su relación con el caudal circulante.
- Analizar las pérdidas de energía por fricción en un tramo de tubería de cobre de diámetro constante.
- Calcular las pérdidas de energía locales y longitudinales usando la ecuación que indica la norma NEC-11.

Equipos, materiales y herramientas.

- Tablero de visualización de pérdidas de energía
- Manómetros móviles (3)
- Válvulas de compuerta
- Balde con escala
- Llave de tubo
- Cronómetro

Figura 9.

Tablero de visualización de pérdidas de energía.



Nota. La figura muestra el tablero de visualización de pérdidas, enumerando los puntos donde se colocarán los manómetros móviles para visualizar las presiones. Fuente: Janina V. Alarcón y Danny J. Chuqi. (2022, p. 39).

4.1.3.1. Caso 1: Pérdidas de energía en tubería de PVC por cambio de diámetro.

Procedimiento para ejecución de ensayo

1. Verificar que el tanque de almacenamiento se encuentre limpio y libre de sedimentos, a continuación, llenarlo con agua hasta un nivel operativo que garantice la succión continua de la bomba evitando el ingreso de aire al sistema.
2. Montar el tramo de tubería correspondiente al caso 1, y comprobar que las uniones universales ubicadas en ambos extremos de la tubería estén correctamente ajustadas, ya que al tratarse de un tramo desmontable pueden presentarse fugas si no se aseguran adecuadamente.

3. Cerrar todas las válvulas que permiten el paso de agua hacia los demás tramos del tablero, verificando que el caudal circule únicamente por el esquema 1.

4. Poner en funcionamiento el sistema y abrir gradualmente la válvula de compuerta ubicada cerca al tanque de almacenamiento para regular la presión del sistema hasta alcanzar los 15 PSI en el manómetro fijo.

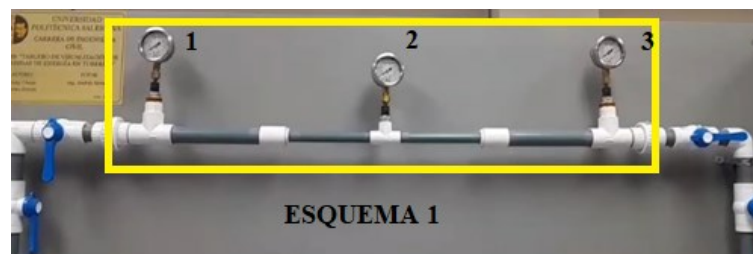
5. Mantener de 2 a 3 minutos el sistema en funcionamiento para alcanzar condiciones estacionarias, una vez estabilizada la presión en 15 PSI, conectar los manómetros móviles en cada punto de medición mediante los acoples rápidos y registrar los datos de presión obtenidos en los manómetros.

6. Medir el caudal mediante aforo volumétrico utilizando un recipiente calibrado. Dirigir el chorro de salida hacia el recipiente e iniciar simultáneamente el cronómetro, recolectar hasta un volumen conocido, detener el tiempo y registrar el valor. Repetir el procedimiento al menos 3 veces y calcular el caudal promedio.

7. Determine las pérdidas de presión a lo largo del tramo de tubería correspondiente al esquema 1.

Figura 10.

Esquema 1.



Nota. La figura muestra un tramo de tubería de PVC con cambio diámetro correspondiente al caso 1 y el orden considerado para la toma de lecturas en los manómetros móviles. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Ejemplo de Cálculo

Tabla 17.

Resumen de datos para el aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	7	lts
Tiempo 1	10.13	seg
Tiempo 2	10.23	seg
Tiempo 3	10.07	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo del caudal que circula por el esquema 1. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 18.

Resumen de características del tramo de tubería del esquema 1.

Descripción	Cantidad	Unidad
Diámetro (D)	25.4	mm
Longitud (L)	0.25	m
Viscosidad Cinempatica (ν)	1×10^{-6}	m^2/s
Rugosidad del material (ϵ)	0.0015	mm
Gravedad (g)	9.81	m/s^2

Nota. La tabla muestra los datos necesarios para evaluar las pérdidas de energía en el esquema 1. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Resolución

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} = \frac{10.13 + 10.23 + 10.07}{3} = 10.14 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.007}{10.14} = 0.00069 \frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0254^2}{4} = 0.000507 m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00069}{0.000507} = 1.362 \frac{m}{s}$$

$$R_e = \frac{V * D}{\nu_c} = \frac{1.362 * 0.0254}{1 \times 10^{-6}} = 34593.439$$

Pérdidas longitudinales tramo 1.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{R_e * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.022888$$

$$h_l = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.022888 * \frac{0.25}{0.0254} * \frac{1.362^2}{2 * 9.81} = 0.021m$$

Pérdidas locales tramo 1.

$$K_{Bushing} = 0.30 \quad K_{Tee} = 0.10$$

$$h_{Bushing} = K_{Bushing} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.30 * \frac{1.362^2}{2 * 9.81} = 0.028m$$

$$h_{Tee} = K_{Tee} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.10 * \frac{1.362^2}{2 * 9.81} = 0.009m$$

$$h_k = h_{Bushing} + h_{Tee} = 0.038m$$

$$h_f = h_k + h_l = 0.059m$$

Tramo 2.

$$D = 0.0127 m \quad \nu_c = 1 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}$$

$$L = 0.25 m \quad g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\varepsilon = 0.0000015 m$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2}{4} = 0.000127m^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00069}{0.000127} = 5.448 \frac{m}{s}$$

$$R_e = \frac{V * D}{v_c} = \frac{5.488 * 0.0127}{1 \times 10^{-6}} = 69186.879$$

Pérdidas longitudinales tramo 2.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{2.51}{R_e * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.019953922$$

$$h_l = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.019953922 * \frac{0.25}{0.0127} * \frac{5.488^2}{2 * 9.81} = 0.594m$$

Pérdidas locales tramo 2.

$$K_{Bushing} = 0.30 \quad K_{Tee} = 0.10$$

$$h_{Bushing} = K_{Bushing} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.30 * \frac{5.488^2}{2 * 9.81} = 0.454m$$

$$h_{Tee} = K_{Tee} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.10 * \frac{5.488^2}{2 * 9.81} = 0.151m$$

$$h_k = h_{Bushing} + h_{Tee} = 0.605m$$

$$h_f = h_k + h_l = 1.199m$$

$$h_{f1.2} = h_{f1} + h_{f2} = 1.258m$$

Diferencia de presiones en manómetros.

$$P_1 = 11.7PSI \quad P_2 = 9.5PSI$$

$$P_1 = P_1 * 0.703 = 8.23mca$$

$$P_2 = P_2 * 0.703 = 6.68mca$$

$$\Delta P_{1.2} = P_1 - P_2 = 1.55mca$$

Resultados.

Tabla 19.

Presiones en manómetros del esquema 1.

Item	Presión en manómetros (PSI)	Presión (m.c.a)	Δ Presión en manómetros (m)
P1	11.7	8.23	1.55
P2	9.5	6.68	
P3	8.6	6.05	0.63

Nota. La tabla muestra los resultados de presión leídos en los manómetros ubicados en cada punto del esquema 1. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Pérdidas de energía por tramos

Tabla 20.

Resultados del cálculo de pérdidas de energía del esquema 1

Tramo	Diametro [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Re [-]	f [-]	hf [m]	Δ hf [m]
T1	0.0254	0.000507	1.362	34593.439	0.022888	0.059	1.25
T2	0.013	0.000127	5.44	69186.879	0.019953	1.199	
T3	0.013	0.000127	5.44	69186.879	0.019953	0.63	1.11
T4	0.0254	0.000507	1.362	34593.439	0.022888	0.485	

Nota. La tabla muestra los resultados del cálculo de pérdidas de energía usando la ecuación de Darcy-Weisbach y coeficientes de resistencia local “K”. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

4.1.3.2. Caso 2: Pérdidas de energía en tubería de PVC por fricción.

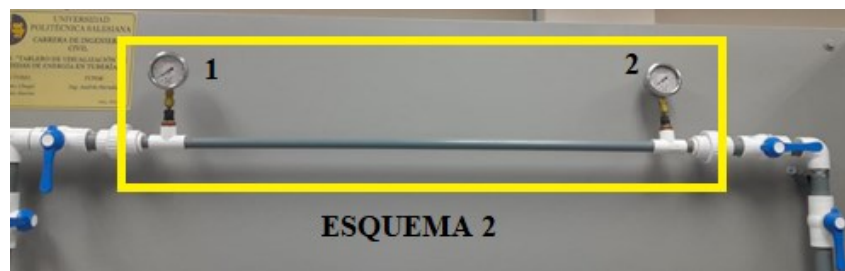
Procedimiento

1. Verificar que las uniones universales ubicadas en ambos extremos de la tubería del esquema 1 estén correctamente ajustadas, ya que al tratarse de un tramo desmontable pueden presentarse fugas si no se aseguran adecuadamente.

2. Poner en marcha el sistema asegurando que la válvula de compuerta se encuentre totalmente abierta, y la válvula de bola correspondientes a los demás esquemas permanezcan cerrados, de modo que el flujo circule únicamente por el esquema 2.
3. Regular la presión del sistema hasta alcanzar 15 PSI en el manómetro fijo, utilizando la válvula de compuerta ubicada cerca del tanque de almacenamiento.
4. Una vez estabilizada la presión en 15 psi, conecte los manómetros móviles en cada punto de medición mediante los acoples rápidos y registre la presión.
5. Determine las pérdidas de presión a lo largo de la tubería del esquema 1, cuya longitud es de 0.94m.

Figura 11.

Esquema 2.



Nota. La figura muestra un tramo de tubería de PVC de ½” correspondiente al caso 2.
Elaborado por: Jonathan Yánez.

Cálculos

Tabla 21.

Resumen de datos para el aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	7	lts
Tiempo 1	10.13	seg
Tiempo 2	10.23	seg
Tiempo 3	10.07	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo del caudal que circula por el esquema 2. Elaborado por: El autor.

Tabla 22.

Resumen de características del tramo de tubería del esquema 2.

Descripción	Cantidad	Unidad
Diámetro (D)	12.7	mm
Longitud (L)	0.94	m
Viscosidad Cinempatica (ν)	1x10-6	m ² /s
Rugosidad del material (ϵ)	0.0015	mm
Gravedad (g)	9.81	m/s ²

Nota. La tabla muestra los datos necesarios para evaluar las pérdidas de energía en el esquema 2. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Resolución.

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} = \frac{10.13 + 10.23 + 10.07}{3} = 10.14 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.007}{10.14} = 0.00069 \frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.013^2}{4} = 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.00069}{0.000127} = 5.448 \frac{m}{s}$$

Diferencia de presiones en manómetros.

$$P_1 = 10.2 \text{ PSI} \quad P_2 = 7.8 \text{ PSI}$$

$$P_1 = P_1 * 0.703 = 7.17 \text{ mca}$$

$$P_2 = P_2 * 0.703 = 5.48 \text{ mca}$$

$$\Delta P_{1,2} = P_1 - P_2 = 1.69 \text{ mca}$$

Factor de fricción “f”.

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$1.69 = f * \frac{0.94}{0.000127} * \frac{5.448^2}{2 * 9.81}$$

$$f = 0.0150934$$

Resultados

Tabla 23.

Presiones en manómetros del esquema 2.

Item	Presión en manómetros (PSI)	Presión (m.c.a)	ΔPresión en manómetros (m)
P1	10.2	7.17	1.69
P2	7.8	5.48	

Nota. La tabla indica las presiones de los manómetros móviles ubicados en los extremos de un tramo de tubería de PVC de ½” correspondiente al caso 2. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 24.

Factor de fricción “f” de Darcy-Weisbach y el coeficiente de Hazen-Williams para una tubería de PVC de ½”.

Tramo	Diametro [m]	Área [m2]	Velocidad [m/s]	hf [m]	f [-]	Rh [m]	C [-]
T1	0.013	0.000127	5.448	1.690	0.0150934	0.003	180.94

Nota. La tabla muestra el resultado del cálculo del factor de fricción usando la ecuación de Darcy-Weisbach y el coeficiente de Hazen-Williams, obtenido a partir del valor de la diferencia de presiones de los manómetros que se traducen a pérdidas por fricción.

Elaborado por: Jonathan Yáñez.

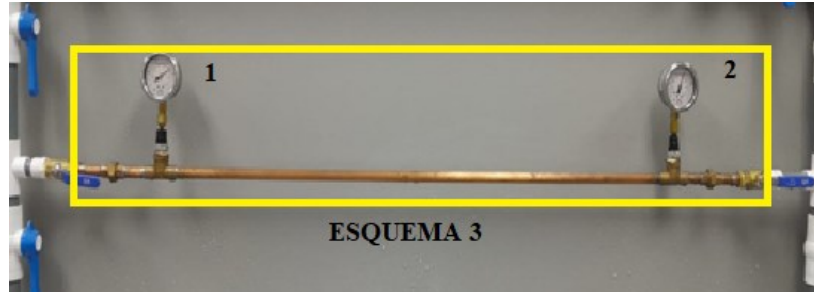
4.1.3.3. Caso 3: Pérdidas de energía en tubería de cobre por fricción.

Procedimiento

1. Poner en marcha el sistema asegurando que la válvula de compuerta se encuentre totalmente abierta, y la válvula de bola correspondientes a los demás esquemas permanezcan cerrados, de modo que el flujo circule únicamente por el esquema 3.
2. Regular la presión del sistema hasta alcanzar 15 PSI en el manómetro fijo, utilizando la válvula de compuerta ubicada cerca del tanque de almacenamiento.
3. Una vez estabilizada la presión en 15 psi, conecte los manómetros móviles en cada punto de medición mediante los acoples rápidos y registre la presión.
4. Determine las pérdidas de presión a lo largo de la tubería de cobre del esquema 3, cuya longitud es de 95.5 cm.

Figura 12.

Esquema 3.



Nota. La figura muestra un tramo de tubería de cobre de ½” correspondiente al caso 3.
Elaborado por: Jonathan Yánez.

Ejemplo de cálculo.

Tabla 25.

Resumen de datos para el aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	7	lts
Tiempo 1	9.94	seg
Tiempo 2	9.88	seg
Tiempo 3	9.97	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo del caudal que circula por el esquema 3. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 26.

Resumen de características del tramo de tubería del esquema 3.

Descripción	Cantidad	Unidad
Diámetro (D)	12.7	mm
Longitud (L)	0.955	m
Viscosidad Cinematica (ν)	1x10-6	m ² /s
Gravedad (g)	9.81	m/s ²

Nota. La tabla muestra los datos necesarios para evaluar las pérdidas de energía en el esquema 3. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Resolución.

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} = \frac{9.94 + 9.88 + 9.97}{3} = 9.93 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.007}{9.93} = 0.0007049 \frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.014^2}{4} = 0.000153 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0007049}{0.000153} = 4.599 \frac{m}{s}$$

Diferencia de presiones en manómetros.

$$P_1 = 9.9PSI \quad P_2 = 7.8PSI$$

$$P_1 = P_1 * 0.703 = 6.96mca$$

$$P_2 = P_2 * 0.703 = 5.48mca$$

$$\Delta P_{1,2} = P_1 - P_2 = 1.48mca$$

Factor de fricción “f”.

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$

$$1.48 = f * \frac{0.955}{0.000153} * \frac{4.599^2}{2 * 9.81}$$

$$f = 0.02012605$$

Resultados

Tabla 27.

Presiones en manómetros del esquema 3.

Item	Presión en manómetros (PSI)	Presión (m.c.a)	Δ Presión en manómetros (m)
P1	9.9	6.96	1.48
P2	7.8	5.48	

Nota. La tabla indica las presiones de los manómetros móviles ubicados en los extremos de un tramo de tubería de cobre de ½” correspondiente al caso 3. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 28.

Factor de fricción “f” de Darcy-Weisbach para una tubería de PVC de ½”.

Tramo	Diametro [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	hf [m]	f [-]	Rh [m]
T1	0.01397	0.000153	4.599	1.480	0.0201261	0.0037

Nota. La tabla muestra el resultado del cálculo del factor de fricción usando la ecuación de Darcy-Weisbach, obtenido a partir del valor de la diferencia de presiones de los manómetros que se traducen a pérdidas por fricción. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

4.1.3.4. Caso 4: Pérdidas de energía en tubería de PVC por accesorios.

Procedimiento

1. Para la ejecución de este caso se debe considerar que el sistema se va a dividir en 2 tramos.
2. Poner en marcha el sistema asegurando que la válvula de compuerta se encuentre totalmente abierta, y la válvula de bola correspondientes a los demás esquemas permanezcan cerrados, de modo que el flujo circule únicamente por el esquema 4.

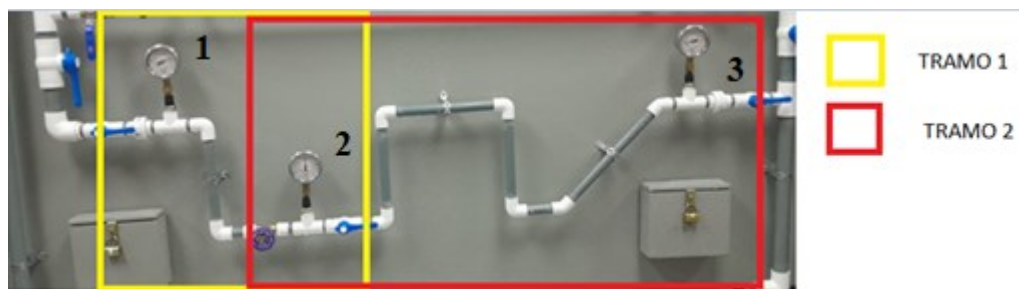
3. Inicialmente la presión del sistema con las válvulas completamente abiertas es de 19 psi, debido a que los manómetros móviles tienen un límite de hasta 15 psi, reduzca la presión del sistema hasta obtener una presión inicial de 13 psi en el manómetro fijo. Para lograr esto se debe cerrar la válvula de compuerta dando 5 vueltas y media, y de igual manera cerrar la válvula de compuerta cercana al tanque de almacenamiento dando 3 vueltas.

4. Una vez estabilizado el flujo, registre los datos de presión obtenidos en los manómetros móviles.

5. Determine las pérdidas de presión a lo largo de la tubería

Figura 13.

Esquema 4.



Nota. La figura muestra los 2 tramos de tubería correspondiente al caso 4. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Cálculos

Tabla 29.

Resumen de datos para el aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	7	lts
Tiempo 1	12.36	seg
Tiempo 2	12.33	seg
Tiempo 3	12.37	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo del caudal que circula por el esquema 4. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 30.

Resumen de características del tramo de tubería del esquema 3.

Descripción	Cantidad	Unidad
Diámetro (D)	12.7	mm
Longitud (L)	0.5181	m
Viscosidad Cinematica (ν)	1x10-6	m ² /s
Coef. Hazen Williams (PVC)	150	-
Gravedad (g)	9.81	m/s ²
Z1	0.25	m
Z2		m

Nota. La tabla muestra los datos necesarios para evaluar las pérdidas de energía, también se incluye la distancia de Z1 y Z2, además del valor del coeficiente de Hazen Williams establecido por los autores del tablero de visualización a partir de la experimentación.

Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Resolución método 1.

$$T_{prom} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{3} = \frac{12.36 + 12.33 + 12.37}{3} = 12.35 \text{ s}$$

$$Q = \frac{V}{T_{prom}} = \frac{0.007}{12.35} = 0.0005666 \frac{m^3}{s}$$

$$A = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * 0.0127^2}{4} = 0.000127 \text{ m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.0005666}{0.000127} = 4.473 \frac{m}{s}$$

Diferencia de presiones en manómetros.

$$P_1 = 11.7 \text{ PSI} \quad P_2 = 9.8 \text{ PSI}$$

$$P_1 = P_1 * 0.703 = 8.225 \text{ mca}$$

$$P_2 = P_2 * 0.703 = 6.889 \text{ mca}$$

$$\Delta P_{1,2} = P_1 - P_2 = 1.336 \text{ mca}$$

Aplicación del teorema de Bernoulli para hallar carga total.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 * g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 * g} + \Sigma hf, hk$$

$$htotal = \Delta P_{1,2} + (Z_1 - Z_2) = 1.336 + (0.25) = 1.586m$$

$$hl = L * \left(\frac{Q}{0.85 * A * C_h * R^{0.63}} \right)^{1.852}$$

$$P_{mojado} = \pi * D = \pi * 0.0127 = 0.04m$$

$$R = \frac{A}{P_{mojado}} = \frac{0.000127}{0.04} = 0.003m$$

$$hl = 0.5181 * \left(\frac{0.0005666}{0.85 * 0.000127 * 150 * 0.003^{0.63}} \right)^{1.852} = 0.915m$$

$$hk = htotal - hl = 1.586 - 0.915 = 0.671m$$

Resolución método 2.

$$Le = \left(A * \left(\frac{d}{25.4} \right) \pm B \right) * \left(\frac{120}{C} \right)^{1.8519}$$

Codo de 90°

$$A_{C90}=0.52 \quad B_{C90}=+0.04 \quad (\text{ver anexo 11})$$

Válvula de compuerta abierta

$$A_{valvula}=0.17 \quad B_{valvula}=+0.03$$

$$Le_{C90} = \left(0.52 * \left(\frac{12.7}{25.4} \right) + 0.04 \right) * \left(\frac{120}{150} \right)^{1.8519} = 0.198m$$

$$Le_{vcomp} = \left(0.17 * \left(\frac{12.7}{25.4} \right) + 0.03 \right) * \left(\frac{120}{150} \right)^{1.8519} = 0.073m$$

$$Le_{tramo1} = 2 * Le_{C90} + Le_{vcomp} = 0.988m$$

$$hf = m * Le * \left(\frac{V^{1.75}}{D^{1.25}} \right)$$

$$m = 0.00054 \quad (\text{ver anexo 10})$$

$$C = 150$$

$$hf = 0.00054 * 0.988 * \left(\frac{4.47^{1.75}}{0.0127^{1.25}} \right) = 1.72m$$

Resultados

Tabla 31.

Presiones en manómetros del esquema 4.

Item	Presión en manómetros (PSI)	Presión (m.c.a)	ΔPresión en manómetros (m)
P1	11.7	8.23	1.34
P2	9.8	6.89	
P3	0.3	0.21	6.68

Nota. La tabla indica las presiones de los manómetros móviles ubicados en distintos puntos de dos tramos de tubería de PVC de ½” correspondiente al caso 4. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 32.

Resultados de cálculo de pérdidas locales y longitudinales aplicando 2 métodos de resolución.

Método 1								
Tramo	Caudal [m3/s]	Diametro [m]	Área [m2]	Velocidad [m/s]	Coef. Hazen Williams	ht [m]	hl [m]	hk [m]
T1	0.0005666	0.0127	0.000127	4.473	150	1.586	0.915	0.671
T2	0.0005666	0.0127	0.000127	4.473	150	6.428	2.623	3.8

Tramo	Caudal [m3/s]	Diametro [mm]	Área [m2]	Velocidad [m/s]	m, const material	Coef. Hazen Williams	hf [m]
T1	0.0005666	12.7	0.000127	4.473	0.000540	150	1.722
T2	0.0005666	12.7	0.000127	4.473	0.000540	150	9.896

Nota. La tabla muestra el resultado del cálculo de las pérdidas de energía totales, de fricción y locales haciendo uso de un método más tradicional y el método que indica la norma NEC-11, capítulo 16. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Conclusiones esquema tramo 1

- Las lecturas de presión evidencian una pérdida total de carga de 2.18 m.c.a., valor que concuerda estrechamente con el resultado calculado por tramos (2.136 m.c.a.), presentando una diferencia del 2%, lo que confirma la validez del modelo hidráulico empleado.

- La mayor pérdida de carga se concentra en el tramo P1–P2, asociada al cambio de diámetro, donde la reducción de sección incrementa la velocidad del flujo y provoca las pérdidas más significativas, identificándose este efecto como el principal mecanismo de disipación de energía del sistema.

Conclusiones esquema 2.

- El valor $f \approx 0.015$ es típico de una conducción lisa como el PVC trabajando en régimen turbulento. En consecuencia, se confirma que la pérdida de energía del ensayo está dominada por el rozamiento pared–fluido.

Conclusiones esquema 3.

- En el Esquema 3, la diferencia de carga de presión registrada en los manómetros ($P1 = 6.96$ m.c.a y $P2 = 5.48$ m.c.a) evidencia una pérdida de carga por fricción de $\Delta H = 1.48$ m a lo largo del tramo de cobre. A partir de esta pérdida y de las condiciones hidráulicas del ensayo, la aplicación de la ecuación de Darcy–Weisbach permitió obtener un factor de fricción experimental de $f = 0.0201$, el cual se encuentra dentro del rango esperado para flujo turbulento en tuberías hidráulicamente lisas, de acuerdo con referencias clásicas como Sotelo.

Conclusiones esquema tramo 4

- En el esquema 4, los resultados indican que la disipación de energía del sistema está dominada por las pérdidas locales asociadas a los accesorios, superando a las pérdidas por fricción en tramos rectos.

- En el tramo 2, el método NEC-11 sobreestima la pérdida total respecto a Bernoulli, debido a que la pérdida queda dominada por la longitud equivalente asignada a accesorios (especialmente la válvula de bola, con coeficientes altos). En contraste, el balance experimental evidencia que la pérdida total está controlada principalmente por pérdidas locales, por lo que la comparación sugiere revisar el número/tipo real de accesorios y el porcentaje de apertura de válvulas considerado en el modelo normativo.

4.1.7 Aparato de demostración de medidores de flujo en conductos cerrados.

El Armfield F1-21 Flow Meter Demonstration Apparatus es un equipo didáctico diseñado para el estudio experimental de los principios fundamentales de la medición de caudal en conductos cerrados. El sistema permite analizar y comparar el comportamiento hidráulico de tres dispositivos de medición ampliamente utilizados en ingeniería: el medidor Venturi, el medidor de área variable (rotámetro) y la placa de orificio, los cuales se encuentran instalados en configuración en serie dentro de una misma línea de ensayo.

El equipo se monta sobre el banco hidráulico Armfield F1-10 y opera mediante un sistema de circulación de agua controlado por válvulas de regulación de caudal y presión. Las diferencias de presión generadas a través de cada medidor son registradas mediante un manómetro múltiple de ocho columnas, lo que permite determinar pérdidas de carga y caudales a partir de la aplicación de la ecuación de Bernoulli. Adicionalmente, el sistema incorpora un tanque volumétrico que permite obtener un caudal de referencia mediante el método volumétrico, el cual se utiliza para evaluar la exactitud de cada dispositivo.

Desde el punto de vista académico y práctico, el equipo F1-21 es una herramienta fundamental para demostrar la aplicabilidad de los principios teóricos de la hidráulica, analizar la relación entre caudal y pérdida de energía, y cuantificar los errores asociados

a distintos métodos de medición, aspectos esenciales en el diseño, operación y calibración de sistemas hidráulicos reales.

Objetivo general.

- Analizar el funcionamiento, la precisión y las pérdidas de energía asociadas a distintos medidores de caudal instalados en línea, mediante el uso del equipo Armfield F1-21, comparando los resultados experimentales con un caudal de referencia obtenido por el método volumétrico.

Objetivos específicos.

- Determinar el caudal de agua mediante los medidores Venturi, placa de orificio y rotámetro, aplicando la ecuación de Bernoulli y las lecturas manométricas del sistema.

- Evaluar la precisión y el comportamiento hidráulico de cada medidor mediante el cálculo del error relativo y el análisis de las pérdidas de carga en función del caudal.

Equipos, herramientas y materiales.

- Aparato de demostración de medidor de flujo F1-21
- Banco hidráulico F1-10
- Cronómetro
- Tabla de registro de datos
- Lápiz o esferos

Figura 14.

Aparato de demostración de medidor de caudal F1-21.



Nota. La figura muestra el equipo de demostración de medidor de flujo F1-21, el cual permite calcular el caudal con un rotámetro, un tubo Venturi, y una placa de orificio.

Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Proceso para ejecución de ensayo.

1. Colocar el equipo F1-21 sobre el banco hidráulico, revisando que se encuentre correctamente nivelado.
2. Conectar la manguera flexible de acople rápido del equipo F1-21 al suministro del banco hidráulico así mismo procurar que la tubería de descarga se ubique en el tanque volumétrico.
3. Abrir completamente la válvula de salida del equipo.
4. Encender la bomba y abrir progresivamente la válvula de control de flujo del banco hidráulico, permitiendo el llenado completo del sistema y eliminando las burbujas de aire atrapado en el sistema de tuberías del equipo.
5. Para el ajuste de los manómetros se debe cerrar temporalmente las válvulas del banco y del equipo. Abrir el tornillo de purga de aire de manómetro y permitir la

entrada controlada de agua hasta estabilizar los niveles (ver anexo 12). Ajustar los niveles de purga, de modo que las columnas se encuentren dentro del rango de lectura.

6. Abrir las válvulas y establecer un caudal fijo.
7. Registrar las lecturas manométricas correspondientes a cada medidor.
8. Medir el caudal real recolectando un volumen conocido de agua en el tanque volumétrico del banco y cronometrando el tiempo. Se debe repetir el proceso al menos 4 veces asegurando tiempos de medición mayores a 1 minuto para reducir errores.
9. Una vez registrado los datos cierre las válvulas y apague la bomba del banco. Posteriormente se procede con el cálculo de caudales para cada medidor y las pérdidas de energía, haciendo uso de las siguientes ecuaciones.

Caudal aforo

$$Q_t = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}} \quad m^3/s$$

Caudal en rotámetro

$$Q_r = \text{Lectura en } \frac{\text{lts}}{\text{min}} \div 1000 = \frac{m^3}{s}$$

Caudal en placa de orificio

$$Q_o = \frac{C_d * A_2}{\sqrt{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} * \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

Donde:

$$\sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} = \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

$$C_d = 0.63$$

$$A_2 = 3.14 \times 10^{-4} m^2$$

$$A_1 = 7.92 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Caudal en Venturímetro

$$Q_v = \frac{C_d * A_2}{\sqrt{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} * \sqrt{2 * g * \Delta h}$$

Donde:

$$C_d = 0.98$$

$$A_2 = 1.77 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$A_1 = 7.92 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

Porcentaje de error de caudal en rotámetro

$$\left(\frac{Q_r - Q_t}{Q_t} \right) * 100$$

Porcentaje de error de caudal en orificio de placa

$$\left(\frac{Q_o - Q_t}{Q_t} \right) * 100$$

Porcentaje de error de caudal en Venturímetro

$$\left(\frac{Q_v - Q_t}{Q_t} \right) * 100$$

Pérdidas de carga en rotámetro

$$H_r = h_4 - h_5$$

Pérdidas de carga en orificio de placa

$$H_o = h_6 - h_8$$

Pérdidas de carga en Venturímetro

$$H_v = h_1 - h_3$$

Pérdidas de carga del banco hidráulico

$$H_Q = Q_t^2$$

Ejemplo de cálculo.

Tabla 33.

Resumen de datos de caudales tomados en laboratorio.

Volumen V (m ³)	Tiempo t (sec)	Caudal en rotámetro Q _r (lts/min)	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
			Tubo Venturi			Rotámetro		Placa de orificio		
0.005	61.78	5	170	158	160	160	90	90	83	85

Nota. La Tabla presenta los datos registrados durante el ensayo de medición de caudal, incluyendo el volumen aforado y el tiempo de llenado, a partir de los cuales se obtiene el caudal experimental. Adicionalmente, se reporta el caudal indicado por el rotámetro y las lecturas de alturas manométricas h1 a h8, expresadas en milímetros, correspondientes a los puntos de medición de presión asociados al tubo Venturi, rotámetro y placa de orificio.

Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Caudal aforo

$$Q_t = \frac{0.005}{61.78} = 8.09 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

Caudal en rotámetro

$$Q_r = 5 \frac{\text{lts}}{\text{min}} \div 6000 = 8.33 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal en placa de orificio

$$Q_o = \frac{C_d * A_2}{\sqrt{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} * \sqrt{2 * 9.81 * \Delta h}$$

Donde:

$$C_d = 0.63$$

$$A_2 = 3.14 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$A_1 = 7.92 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$\Delta h = h_6 - h_8 = 0.005 \text{m}$$

$$g = 9.81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Q_0 = \frac{0.63 * 3.14 \times 10^{-4}}{\sqrt{1 - \frac{3.14 \times 10^{-4}^2}{7.92 \times 10^{-4}}}} * \sqrt{2 * g * 0.005} = 6.75 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Caudal en tubo Venturi

$$Q_v = \frac{0.98 * 1.77 \times 10^{-4}}{\sqrt{1 - \frac{1.77 \times 10^{-4}^2}{7.92 \times 10^{-4}}}} * \sqrt{2 * 9.81 * 0.010} = 9.30 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Donde:

$$C_d = 0.98$$

$$A_2 = 1.77 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$A_1 = 7.92 \times 10^{-4} \text{m}^2$$

$$\Delta h = h_1 - h_3 = 0.010 \text{m}$$

Porcentaje de error de caudal en rotámetro.

$$Qr\%error = \left(\frac{8.33 \times 10^{-5} - 8.09 \times 10^{-5}}{8.09 \times 10^{-5}} \right) * 100 = 2.96\%$$

Porcentaje de error de caudal en orificio de placa

$$Qo\%error = \left(\frac{6.75 \times 10^{-5} - 8.09 \times 10^{-5}}{8.09 \times 10^{-5}} \right) * 100 = 16.62\%$$

Porcentaje de error de caudal en venturímetro

$$Qv\%error = \left(\frac{9.30 \times 10^{-5} - 8.09 \times 10^{-5}}{8.09 \times 10^{-5}} \right) * 100 = 14.93\%$$

Pérdidas de carga en rotámetro

$$H_r = h_4 - h_5 = 160 - 90 = 70mm$$

Pérdidas de carga en orificio de placa

$$H_o = h_6 - h_8 = 90 - 85 = 5mm$$

Pérdidas de carga en rotámetro

$$H_v = h_1 - h_3 = 170 - 160 = 10mm$$

Pérdidas de carga del banco hidráulico

$$H_Q = Q_t^2 = 8.09 \times 10^{-5^2} = 6.55 \times 10^{-9}mm$$

Resultados.

Tabla 34.

Tabla de recopilación de datos del laboratorio.

Volumen V (m ³)	Tiempo t (sec)	Caudal en rotámetro Q _r (lts/min)	h1	h2	h3	h4	h5	h6	h7	h8
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
			Tubo Venturi			Rotámetro		Placa de orificio		
0.005	61.78	5	170	158	160	160	90	90	83	85
0.005	31.36	10	240	196	216	210	140	140	105	118
0.005	20.98	15	355	265	314	300	225	230	150	167

Nota. La tabla presenta los datos experimentales obtenidos en laboratorio para tres condiciones de operación, registrando el volumen aforado y el tiempo de medición, junto con el caudal indicado por el rotámetro. Además, se incluyen las lecturas de alturas

manométricas h1 a h8 en mm, asociadas a los puntos de presión del tubo Venturi, el rotámetro y la placa de orificio. Elaborado por: Jonathan Yánez.

Tabla 35.

Tabla de resultados del ensayo.

CALCULO DE CAUDALES						
Caudal por aforo Qt (m ³ /s)	Caudal en rotámetro Qr (m ³ /s)	Caudal en placa de orificio Qo (m ³ /s)	Caudal en tubo venturi Qv (m ³ /s)	Porcentaje de error de Qr (%)	Porcentaje de error de Qo (%)	Porcentaje de error de Qv (%)
8.09E-05	8.33E-05	6.75E-05	9.30E-05	2.96%	16.62%	14.90%
1.59E-04	1.67E-04	1.42E-04	1.42E-04	4.52%	11.22%	10.95%
2.38E-04	2.50E-04	2.40E-04	1.88E-04	4.91%	-0.53%	21.11%

PÉRDIDAS DE ENERGÍA			
P. energía en rotámetro Hr (mm)	P. energía en orificio de placa Ho (mm)	P. energía en tubo venturi Hv (mm)	Relación entre Qt y pérdidas Qt2 (mm)
70	5	10	6.55E-09
70	22	24	2.54E-08
75	63	41	5.68E-08

Nota. Las tablas muestran el resultado de los cálculos de caudal y pérdidas de energía en el rotámetro, la placa de orificio y el tubo Venturi. Elaborado por: Jonathan Yánez.

Conclusiones.

- El caudal obtenido por el rotámetro presentó buena concordancia con el caudal de referencia volumétrico, con errores del 3% al 5%, lo que indica un desempeño aceptable para medición rápida en laboratorio. La placa de orificio mostró una aproximación razonable y mejoró su ajuste a caudales medios–altos, mientras que el tubo Venturi evidenció mayor dispersión en el punto de caudal máximo, lo que sugiere influencia de la lectura manométrica, purga o selección de tomas de presión.

- Las lecturas manométricas confirmaron que las pérdidas de carga aumentan al incrementar el caudal, y que los dispositivos generan pérdidas distintas según su geometría. El rotámetro presentó pérdidas relativamente altas y constantes, mientras que la placa de orificio y el tubo Venturi incrementaron su Δh con el caudal, verificando

el comportamiento esperado de dispositivos de presión diferencial, donde la pérdida de energía se relaciona fuertemente con el régimen de flujo y la velocidad.

4.2 MÁQUINAS HIDRÁULICAS

4.2.1. *Turbina de demostración Pelton*

El ensayo hace uso de dos equipos llamados F1-25 Turbina Pelton y F1-10 Banco Hidráulico diseñados por Armfield para evaluar el desempeño de la turbina en condiciones de operación controladas. Este ensayo se centra en medir la eficiencia y el rendimiento de la turbina al convertir la energía hidráulica en trabajo mecánico. Durante el ensayo, se analiza el flujo de agua a alta presión que impacta las palas de la turbina, y se mide la potencia generada en función del caudal y la presión del agua. Se examinan diversos parámetros operativos, como la velocidad de rotación de la turbina y la capacidad de esta para generar energía, con el objetivo de optimizar su rendimiento y comprender mejor su comportamiento en distintas condiciones de operación. Este estudio es fundamental para evaluar la eficiencia de la turbina y su adecuación para aplicaciones específicas en sistemas hidroeléctricos.

Objetivo general.

- Determinar el punto máximo de eficiencia de operación de la turbina de demostración Pelton F1-25.

Objetivos específicos.

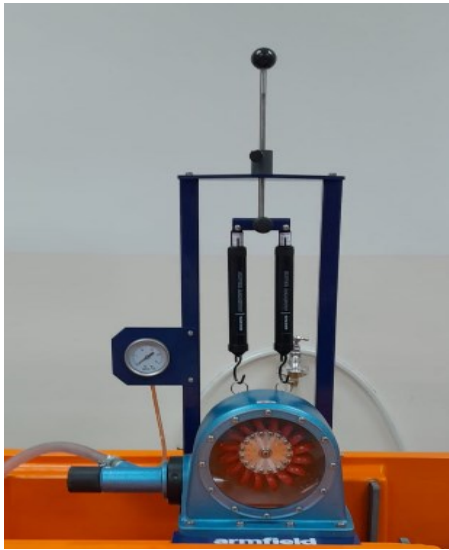
- Calcular la energía hidráulica, energía mecánica, el torque y la eficiencia de la turbina.
- Medir con el tacómetro la velocidad de rotación.
- Graficar la curva de características de la turbina Pelton para distintos caudales.

Equipos, materiales y herramientas.

- Banco Hidráulico F1-10
- Turbina de demostración Pelton F1-25
- Tacómetro
- Cronómetro

Figura 15.

Turbina de demostración Pelton F1-25.



Nota. La figura muestra el equipo de demostración de la turbina Pelton F1-25. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Proceso para ejecución de ensayo.

1. Verificar que el equipo se encuentre limpio, sin obstrucciones en la boquilla, y que el rotor gire libremente.
2. Revisar que el dinamómetro se encuentre bien instalada y regulado, es decir no exista una precarga en las balanzas.
3. Coloque la turbina sobre el canal de trabajo del banco hidráulico y conecte la manguera flexible al suministro del banco utilizando el acople rápido.
4. Afloje el perno que se encuentra en la parte superior del dinamómetro de forma que la banda no tenga contacto alguno con el rotor.

5. Ajuste la válvula de control del banco hidráulico y la válvula de aguja de la turbina de manera que no haya mucho caudal ni mucha presión al encender la bomba.
6. Encender la bomba del banco y abrir válvula de control del banco permitiendo el paso de mayor caudal y regular la válvula de aguja aumentando la presión en el manómetro de Bourdon al menos hasta los 20 m.c.a.
7. Medir la velocidad haciendo uso del tacómetro, existe la posibilidad mediante un láser o en contacto. (ver anexo 13). Registrar la velocidad del rotor, esta será nuestra velocidad máxima ya que no tenemos aplicado carga al rotor, es decir torque igual a 0. Considerar que para cada lectura que se haga se debe esperar al menos 30 segundos para que el flujo se estabilice.
8. Calcular el caudal mediante un aforo volumétrico (volumen recomendado 10 litros), haciendo uso del tanque del banco hidráulico y un cronómetro.
9. Añadir carga al rotor ajustando la banda anclada al dinamómetro.
10. Tomar lectura de la fuerza que hay en el dinamómetro T1 y T2, de la misma forma registrar el dato de velocidad del rotor y la presión de entrada.
11. Repetir los pasos 9 y 10 para obtener un rango de operación entre alta velocidad-torque bajo y baja velocidad-torque alto. Se recomienda tomar al menos 5 lecturas con distinto torque.
12. Una vez se haya registrado los datos con un caudal determinado, se procede a ajustar la válvula de control de caudal del banco hidráulico para repetir el mismo procedimiento con un caudal distinto. Para aquello es necesario realizar nuevamente un aforo para cuantificar el caudal, tomar lectura sin carga en el rotor para obtener una velocidad máxima, e ir aumentando la carga de la misma forma hasta tener 5 lecturas al menos.
13. Realice el ensayo con 3 caudales distintos.

Usar las siguientes expresiones para el respectivo cálculo de las variables.

1. Calcular la potencia hidráulica con la siguiente expresión.

$$P_H = \rho g H Q \text{ [Watts]}$$

2. La potencia mecánica de la turbina está dada por:

$$P_b = \frac{2\pi n T}{60 \text{ seg}} \text{ [Watts]}$$

Donde:

n=Velocidad del rotor [rps]

Fb=Fuerza de frenado= (T2-T1)

T=Torque=(Nm)

$$T = F_b r \text{ [Nm]}$$

Donde:

r=Radio de la polea del freno=0.030m

Fb=Fuerza de frenado= (T2-T1)

T2 y T1=Fuerzas obtenidas del dinamómetro=Lectura en Kg*9.81

3. Determinar la eficiencia global de la turbina a partir de la siguiente ecuación:

$$E_T = \frac{P_b}{P_H} * 100\%$$

4. Para cada caudal, graficar las curvas características de la turbina, Torque, potencia de freno y eficiencia global todas en función de la velocidad del rotor.

Ejemplo de calculo

Tabla 36.

Datos constantes para el cálculo.

r	0.03	m
g	9.81	m/s ²
ρ	1000	kg/m ³

Nota. La tabla muestra los valores de las constantes de gravedad, peso específico y radio del rotor. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 37.

Datos para el aforo de caudal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	10	lts
Tiempo1	49.74	seg
Tiempo2	51.47	seg
Tiempo3	53.04	seg
Tiempo4	53.21	seg
Tpromedio	51.865	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de la Turbina Pelton. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Tabla 38.

Tabla de datos medidos en laboratorio.

Número de ensayo	Velcidad del rotor n (rpm)	Velcidad del rotor n (Hz)	Lectura balanza T1 (kg)	Lectura balanza T2 (kg)	Carga de entrada a la turbina H (m.c.a)
1	2214	36.9	0	0	20
1	1975	32.917	260	180	20

Nota. La tabla muestra los valores de las constantes de gravedad, peso específico y radio del rotor. Elaborado por: El autor.

Fuerza T1 y T2 (N)

*Lectura T1 = 260 Kg Fuerza T1 = 2.60 * 9.81 = 2.551 N*

*Lectura T2 = 180 Kg Fuerza T2 = 180 * 9.81 = 1.766 N*

Fuerza de freno Fb (N)

Fb = T1 – T2 = 2.55 – 1.76 = 0.78 N

Torque T (Nm)

*T = Fb * r = 0.78 * 0.03 = 0.0235 Nm*

Potencia mecánica Pb (W)

$$P_b = \frac{2\pi nT}{60seg} = \frac{2\pi 19750.0235}{60seg} = 4.87 W$$

Caudal Q (m3/s)

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{0.01}{51.87} = 0.0001928 \frac{m^3}{s}$$

Potencia hidráulica Ph (W)

*PH = ρgHQ = 1000 * 9.81 * 20 * 0.0001928 = 37.83 W*

Eficiencia global de turbina Et (%)

$$E_T = \frac{P_b}{P_H} * 100\% = \frac{4.87}{37.83} * 100\% = 13\%$$

Resultados.

Tabla 39.

Datos constantes para el cálculo.

r	0.03	m
g	9.81	m/s ²
ρ	1000	kg/m ³

Nota. La tabla muestra los valores de las constantes de gravedad, peso específico y radio del rotor. Elaborado por: El autor.

Ensayo 1.

Tabla 40.

Datos para el aforo de caudal en ensayo 1.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	10	lts
Tiempo1	49.74	seg
Tiempo2	51.47	seg
Tiempo3	53.04	seg
Tiempo4	53.21	seg
Tpromedio	51.865	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de la Turbina Pelton, ensayo 1. Elaborado por: El autor.

Tabla 41.

Datos tomados en laboratorio.

Número de ensayo	Velcidad del rotor n (rpm)	Velcidad del rotor n (Hz)	Lectura balanza T1 (kg)	Lectura balanza T2 (kg)	Carga de entrada a la turbina H (m.c.a)
1	2214	36.9	0	0	20
1	1975	32.917	260	180	20
1	1887	31.45	330	175	20
1	1540	25.667	450	160	20

Nota. La Tabla resume los datos del ensayo de la turbina, incluyendo la velocidad de rotación del rotor medida en rpm y transformada en Hz, las lecturas de masa en las balanzas T1 y T2, el volumen aforado, el tiempo de medición y la carga hidráulica de entrada (H), parámetros utilizados para el análisis del caudal y del desempeño del equipo. Elaborado por: El autor.

Ensayo 1.

Tabla 42.

Tabla de procesamiento de datos.

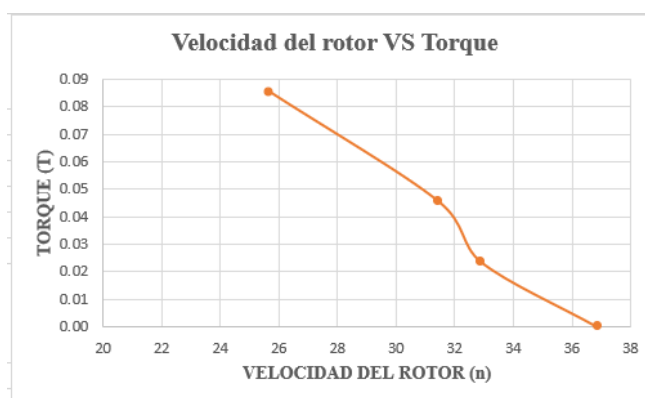
Número de ensayo	Fuerza T1 (N)	Fuerza T2 (N)	Fuerza de freno Fb (N)	Torque T (Nm)	Potencia mecánica Pb (W)	Caudal Q (m3/s)	Potencia hidráulica Ph (W)	Eficiencia global de turbina Et (%)
1	0	0	0.00	0.00	0.00		37.83	0%
1	2.551	1.766	0.78	0.0235	4.87		37.83	13%
1	3.237	1.717	1.52	0.0456	9.01	0.0001928	37.83	24%
1	4.415	1.570	2.84	0.0853	13.76		37.83	36%

Nota. La Tabla presenta el cálculo de variables hidráulicas y mecánicas obtenidas a partir de los datos experimentales del ensayo de la turbina. Se incluyen las fuerzas registradas en T1 y T2, la fuerza de freno, el torque desarrollado, la potencia mecánica, el caudal de operación, la potencia hidráulica y la eficiencia global, parámetros utilizados para evaluar el desempeño y el rendimiento energético del equipo bajo distintas condiciones de carga.

Elaborado por: El autor.

Figura 16.

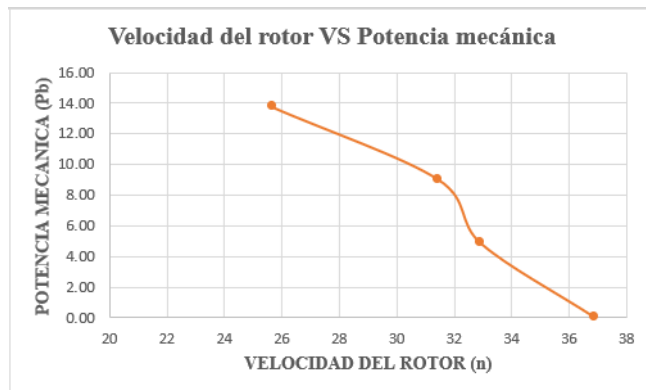
Curva Velocidad del rotor vs Torque.



Nota. La curva evidencia una relación inversa entre la velocidad de rotación y el torque, mostrando que el torque disminuye progresivamente conforme aumenta la velocidad del rotor. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 17.

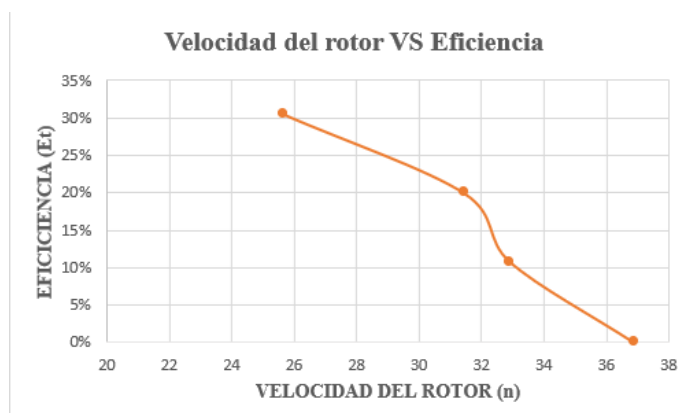
Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.



Nota. El gráfico muestra que la potencia mecánica es mayor a menores velocidades y se reduce a medida que el rotor incrementa su velocidad, reflejando la disminución de carga en el sistema. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 18.

Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.



Nota. La curva indica que la eficiencia global alcanza sus valores más altos a velocidades menores y decrece conforme aumenta la velocidad del rotor, identificando el rango de operación de mejor rendimiento. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Ensayo 2.

Tabla 43.

Datos para el aforo de caudal en ensayo 2.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	10	lts
Tiempo1	28.66	seg
Tiempo2	30.48	seg
Tiempo3	30.1	seg
Tiempo4	30.74	seg
Tpromedio	30.00	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de la Turbina Pelton, ensayo 2. Elaborado por: El autor.

Tabla 44.

Datos tomados en laboratorio.

Número de ensayo	Velocidad del rotor n (Hz)	Velocidad del rotor n (Hz)	Lectura balanza T1 (Kg)	Lectura balanza T2 (Kg)	Carga de entrada a la turbina H (m.c.a)
2	2305	38.42	0	0	18
2	2233	37.22	180	150	18
2	2195	36.58	270	140	18
2	2042	34.033	430	115	18

Nota. La Tabla resume los datos del ensayo de la turbina, incluyendo la velocidad de rotación del rotor medida en rpm y transformada en Hz, las lecturas de masa en las balanzas T1 y T2, el volumen aforado, el tiempo de medición y la carga hidráulica de entrada (H), parámetros utilizados para el análisis del caudal y del desempeño del equipo. Elaborado por: El autor.

Tabla 45.

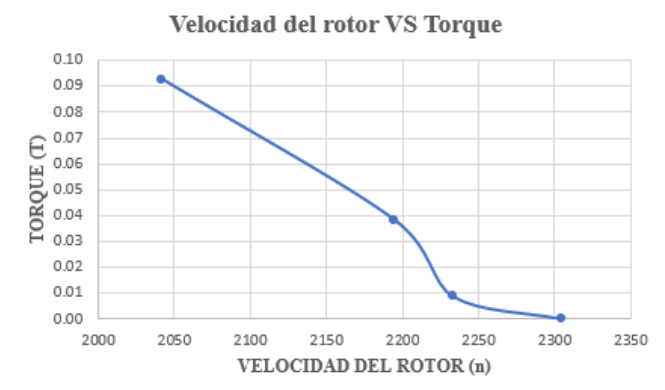
Tabla de procesamiento de datos.

Número de ensayo	Fuerza T1 (N)	Fuerza T2 (N)	Fuerza de freno Fb (N)	Torque T (Nm)	Potencia mecánica Pb (W)	Caudal Q (m ³ /s)	Potencia hidráulica Ph (W)	Eficiencia global de turbina Et (%)
2	0.0	0.0	0	0.00	0.00		58.87	0%
2	1.8	1.5	0.29	0.01	2.06	0.0003334	58.87	4%
2	2.6	1.4	1.28	0.04	8.79		58.87	15%
2	4.2	1.1	3.09	0.09	19.82		58.87	34%

Nota. La Tabla presenta el cálculo de variables hidráulicas y mecánicas obtenidas a partir de los datos experimentales del ensayo 2 de la turbina Pelton. Elaborado por: El autor.

Figura 19.

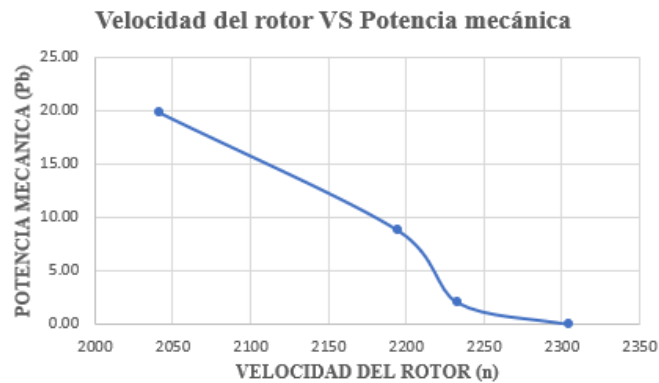
Curva Velocidad del rotor vs Torque



Nota. La curva muestra que el torque disminuye de forma progresiva a medida que aumenta la velocidad del rotor, evidenciando una reducción de la carga aplicada durante el ensayo. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 20.

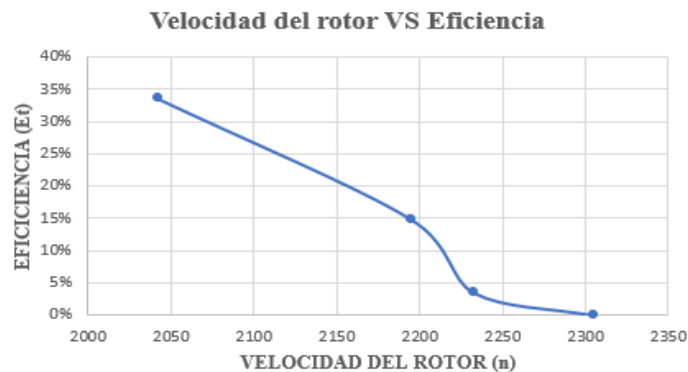
Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.



Nota. El gráfico indica que la potencia mecánica es mayor a menores velocidades y se reduce conforme el rotor incrementa su velocidad, hasta aproximarse a valores mínimos en el régimen de mayor rotación. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 21.

Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.



Nota. La curva evidencia que la eficiencia global alcanza su mejor desempeño a bajas velocidades, disminuyendo rápidamente conforme aumenta la velocidad del rotor, lo que permite identificar el rango de operación más eficiente. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Ensayo 3.

Tabla 46.

Datos para el aforo de caudal en ensayo 3.

Descripción	Cantidad	Unidad
Volumen	10	lts
Tiempo1	20.13	seg
Tiempo2	19.36	seg
Tiempo3	21.33	seg
Tiempo4	20.03	seg
Tpromedio	20.21	seg

Nota. La tabla muestra los datos para realizar el aforo de caudal para el ensayo de la Turbina Pelton, ensayo 3. Elaborado por: El autor.

Tabla 47.

Datos tomados en laboratorio.

Número de ensayo	Velocidad del rotor n (rpm)	Velocidad del rotor n (Hz)	Lectura balanza T1 (Kg)	Lectura balanza T2 (Kg)	Presión de entrada P (N/m ²)
3	2217	36.95	0	0	15
3	2041	34.02	425	125	15
3	1889	31.48	625	175	15
3	1811	30.183	820	180	15

Nota. La tabla resume los datos tomados en el ensayo número 3 de la Turbina Pelton. Elaborado por: El autor.

Tabla 48.

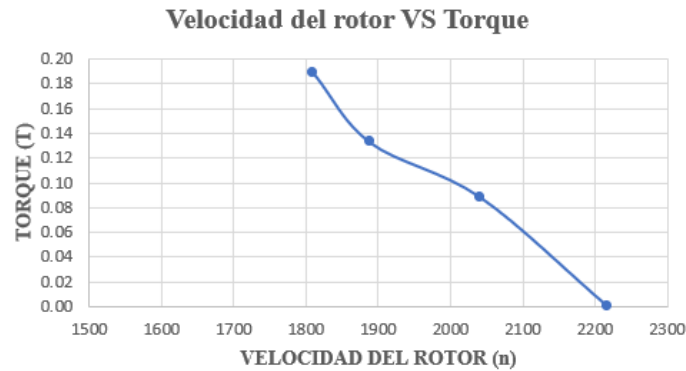
Tabla de procesamiento de datos.

Número de ensayo	Fuerza T1 (N)	Fuerza T2 (N)	Fuerza de freno Fb (N)	Torque T (Nm)	Potencia mecánica Pb (W)	Caudal Q (m ³ /s)	Potencia hidráulica Ph (W)	Eficiencia global de turbina Et (%)
3	0	0	0	0.00	0.00		72.80	0%
3	4.169	1.226	2.94	0.09	18.87	0.0004948	72.80	26%
3	6.131	1.717	4.41	0.13	26.20		72.80	36%
3	8.044	1.766	6.28	0.19	35.72		72.80	49%

Nota. La Tabla presenta el cálculo de variables hidráulicas y mecánicas obtenidas a partir de los datos experimentales del ensayo 3 de la turbina Pelton. Elaborado por: El autor.

Figura 22.

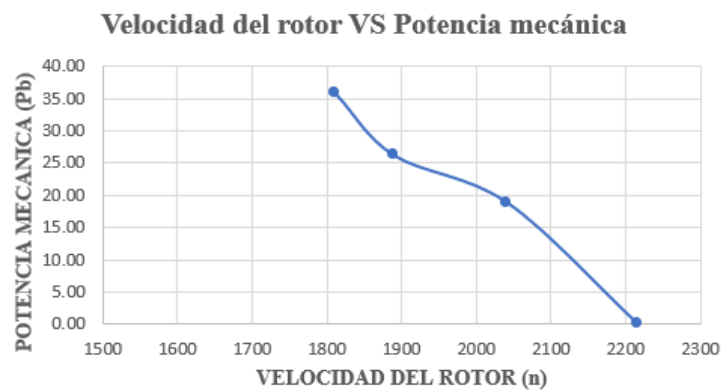
Curva Velocidad del rotor vs Torque



Nota. La curva evidencia que el torque disminuye conforme aumenta la velocidad del rotor, indicando que al incrementarse la rotación se reduce el par disponible en el eje. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 23.

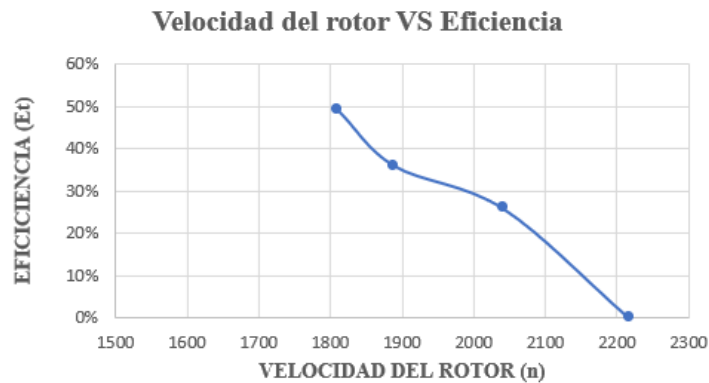
Curva Velocidad del rotor vs Potencia mecánica.



Nota. El gráfico muestra que la potencia mecánica alcanza sus valores más altos a menores velocidades y decrece progresivamente a medida que el rotor gira más rápido, hasta aproximarse a valores mínimos en la condición de mayor velocidad. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Figura 24.

Curva Velocidad del rotor vs Eficiencia.



Nota. La curva indica que la eficiencia global es mayor en el rango de velocidades bajas a medias, y disminuye al incrementarse la velocidad del rotor, lo que permite identificar el intervalo de operación con mejor desempeño energético. Elaborado por: El autor a través del uso de Microsoft Excel.

Conclusiones.

- En los tres bloques de operación, al aumentar la carga aplicada (F_b) el torque crece y la velocidad del rotor disminuye, mientras que la potencia mecánica aumenta hasta un valor representativo. Esto confirma la relación típica entre par-velocidad en una turbina Pelton con freno.

- Los resultados experimentales evidencian que la potencia desarrollada por la turbina aumenta con el incremento del caudal y la carga disponible, alcanzando un punto de máximo rendimiento antes de disminuir por efectos de pérdidas hidráulicas y mecánicas.

- La eficiencia obtenida confirma el comportamiento característico de las turbinas de acción, donde el rendimiento óptimo se presenta para una relación adecuada entre velocidad periférica del rodete y velocidad del chorro, validando el principio teórico de conversión de energía cinética en energía mecánica.

-

4.3 HIDROLOGÍA Y TOPOGRAFÍA

4.3.1 Caja de arena de realidad aumentada.

La enseñanza de la topografía y la hidrología aplicada exige que el estudiante no solo interprete planos y curvas de nivel, sino que comprenda la relación entre el relieve y el comportamiento del agua en una cuenca. En este contexto, los modelos físicos interactivos basados en realidad aumentada constituyen una alternativa didáctica de alto valor, porque permiten representar el terreno en 3D y observar, en tiempo real, la delimitación de cuencas y la formación de cursos de agua.

Objetivo general.

- Manipular la arena dispuesta en la caja con el fin de conformar relieves y depresiones que permitan representar cuencas, lagos y otras formas del terreno, así como simular eventos de precipitación para analizar su influencia en el escurrimiento superficial.

Objetivos específicos.

- Analizar la influencia de la topografía del terreno sobre los patrones de escorrentía superficial y acumulación de flujo mediante la interacción con el sistema de realidad aumentada.

- Interpretar el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica a partir de la delimitación del relieve y la simulación de escorrentía superficial mediante la caja de arena de realidad aumentada.

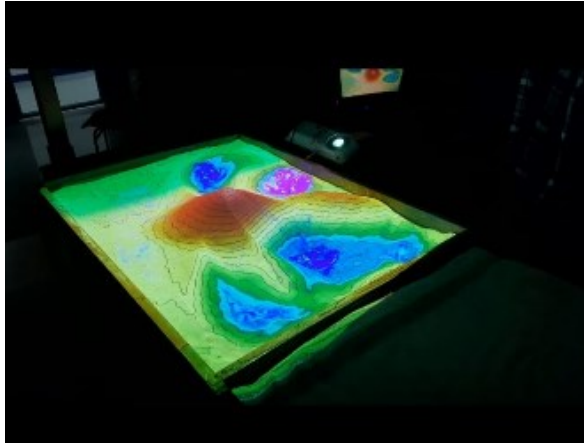
Equipos, materiales y herramientas.

- Caja con arena
- Computador con software Linux Mint 19.3
- Sensor Kinect 360 Xbox
- Software ARSanbox

- Proyector

Figura 25.

Caja de arena de realidad aumentada.



Nota. La figura muestra la caja de arena de realidad aumentada con las curvas de nivel y los colores que representan el relieve formado. Elaborado por: El autor.

Procedimiento de uso del equipo.

1. Verificar que la mesa, así como el sensor y el proyector se encuentren fijos y no exista vibración.
2. Evitar la luz directa sobre la caja de arena para tener una mejor visualización de las curvas de nivel.
3. Encender computadora y el proyector. De ser el caso ajustar el enfoque y encuadre para que cubra toda el área útil de arena.
4. Abrir el programa AR Sandbox, y esperar a que reconozca el sensor y que aparezca la proyección sobre la arena.
5. En el programa AR Sandbox podemos configurar la separación de las curvas de nivel, de ser el caso se pueden desactivar las curvas, también nos permite cambiar la paleta de colores y generar la lluvia.

6. Para generar la lluvia, existen dos opciones, la primera seleccionar la opción correspondiente dentro del programa y la segunda es mantener la mano o un objeto sobre la superficie de la arena, a una distancia adecuada del sensor, de modo que el sistema interprete esta acción y simule la precipitación sobre el modelo topográfico.

Conclusiones.

- El ensayo de la caja de arena con realidad aumentada permitió comprender de manera integral el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica, evidenciando cómo la topografía del terreno controla la dirección de la escorrentía superficial, la delimitación de divisorias y la concentración del flujo hacia el cauce principal.

4.4 AFORO DE CAUDALES EN CANALES O RIOS

4.4.1 Método área-velocidad

La determinación experimental del caudal en cauces naturales y canales es una actividad fundamental en ingeniería civil, pues sustenta el diseño, operación y verificación de obras hidráulicas y el control hidrométrico de una cuenca.

El presente proyecto técnico adopta el método velocidad-área descrito por la ISO 748:2021, el cual establece que el caudal se obtiene a partir de una sección de medición definida y normal al flujo, donde se mide el ancho y la profundidad en varias verticales y se realizan observaciones de velocidad con molinete para representar la variación espacial del flujo. La norma enfatiza la selección de un tramo recto, de sección y pendiente uniformes, con lecho y márgenes estables, sin vórtices ni flujo inverso y libre de obstáculos, de modo que la distribución de velocidades sea regular durante el periodo de medición.

4.4.1.1 Molinete Red Back PVD100

Para la medición de velocidades puntuales en campo se emplea el molinete hidrométrico, un instrumento mecánico que transforma la energía del flujo en rotación de

un rotor y permite estimar la velocidad a partir del conteo de revoluciones durante un intervalo de tiempo. En este sentido, la OMM-N°168, (1994), explica que, “La velocidad del flujo en un punto determinado se mide generalmente contando el número de revoluciones del rotor de un molinete durante un corto período de tiempo” (p. 150). Esta relación entre rotación y velocidad se establece mediante una calibración del fabricante ecuación o curva de aforo del instrumento, lo que permite convertir los pulsos/revoluciones registradas en una lectura de velocidad con fines hidrométricos.

El molinete tipo Redback, el cual corresponde a un molinete de copas (cazoletas), clasificación comúnmente asociada a rotor de eje vertical, diseñado para mediciones por vadeo en cauces naturales o canales. Este molinete trabaja de manera conjunta con el contador PVD100, un dispositivo electrónico que registra los impulsos del sensor del molinete, controla el tiempo de medición y entrega en pantalla el valor de velocidad, normalmente en m/s o ft/s según la configuración.

Objetivo general.

- Realizar el ensayo de aforo de caudales mediante el método velocidad-área, utilizando el molinete hidrométrico con el contador PVD100, para determinar el caudal de un canal.

Objetivos específicos.

- Seleccionar sitio de aforo considerando las recomendaciones de la norma y realizar levantamiento de medidas de la sección del canal.

- Medir velocidades de flujo en la sección de estudio mediante el molinete Red Back y el contador PVD100.

- Determinar la velocidad media usando de las ecuaciones que brinda el fabricante a partir del número de giros.

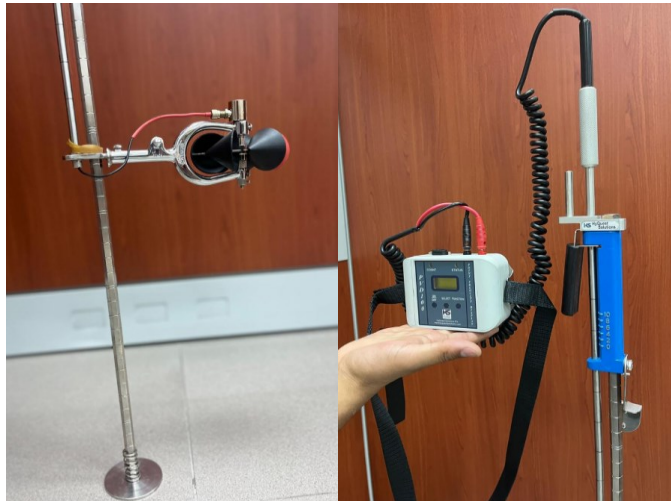
- Calcular el caudal total del canal.

Materiales, herramientas y equipos.

- Molinete Red Back.
- Contador PVD100.
- Varilla de vadeo escalada.
- Flexómetro.
- Piola.
- Marcadores o pintura en spray.

Figura 26.

Molinete RedBack y contador PVD100.



Nota. La figura muestra el molinete RedBack tipo copa acoplado a la barra de vadeo y el contador electrónico PVD100. Elaborado por: El autor.

Procedimiento de uso del equipo.

1. Seleccionar un tramo recto y uniforme, con flujo estable. (ver anexo 14)
2. Montar el molinete mediante el sistema de fijación de la varilla de vadeo, asegurándose de que no quede flojo, además revisar que el rotor del molinete gire libremente. (ver anexo 15)

3. Con el equipo apagado insertar el conector del molinete en el puerto correspondiente del PVD100.

4. Encender el contador y configurar las unidades. El equipo nos permite medir directamente la velocidad media en m/s y también tiene el modo contador que entrega en rps.

5. Medir el ancho de la sección, utiliza una piola para cruzarla a través del canal para tener una referencia y poner definir bien cada vertical.

6. Para ubicar los puntos verticales de estudio, dividir en secciones iguales el ancho del canal y colocar una referencia para cada vertical.

7. Medir la profundidad en cada vertical, idealmente en los mismos puntos donde se mide la velocidad. La norma dicta que se debe tomar dos medidas por punto y promediarlas si difieren en más del 5%.

8. La norma ISO 748 indica que para determinar la profundidad en cada vertical para medir la velocidad media se debe hacer el uso del método de puntos la cual nos indica un rango de valores para una profundidad “P”:

- $P < 70\text{cm}$ la velocidad media será medida en 1 punto a $0.6P$ desde la superficie.

- $70\text{cm} < P < 120\text{cm}$ la velocidad media será medida en 2 puntos a $0.2P$ y $0.8P$ desde la superficie.

- $120\text{cm} < P < 180\text{cm}$ la velocidad media será medida en 3 puntos a $0.2P$, $0.6P$ y $0.8P$ desde la superficie.

9. Colocar el molinete alineado al flujo y a la profundidad calculada en cada vertical cuidando que la varilla se encuentre recta para esto se puede apoyar en el nivel tipo ojo de pollo que se encuentra en la varilla de vadeo. (ver anexo 16).

10. Tomar lectura que arroja el contador. La variable “n” denota el número de revoluciones de rotor por segundo.
11. Mediante la aplicación de las ecuaciones que brinda el fabricante, (ver anexo 17), calcular la velocidad media en m/s.
12. Calcular el área de cada sección.
13. Determinar el caudal de flujo en m³/s para cada sección.
14. Realizar la sumatoria de caudales parciales para obtener el caudal total del canal.

Ejemplo de cálculo.

Tabla 49.

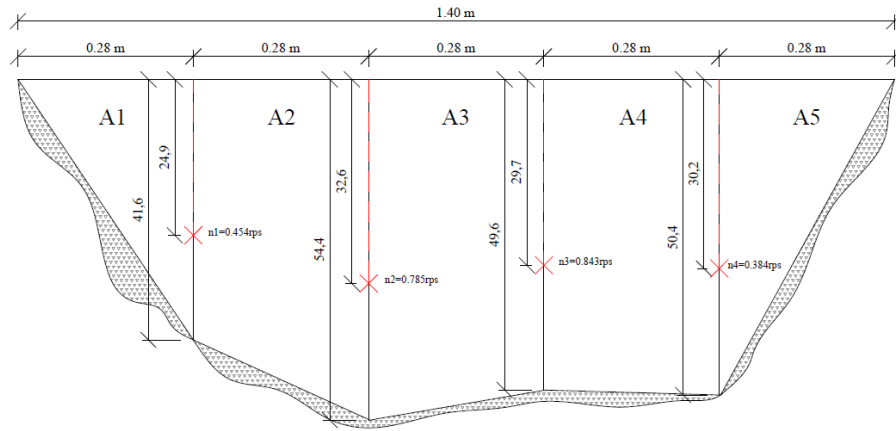
Datos tomados in situ.

Ancho canal	1.4	m
Ancho secciones	0.28	m
DATOS DE CADA VERTICAL		
Descripción	Profundidad (m)	n (rps)
P1	0.416	0.843
P2	0.544	0.785
P3	0.496	0.454

Nota. La tabla indica las dimensiones del canal tomadas en campo, así como la distancia vertical medida desde la superficie para medir la velocidad en los 3 puntos. Elaborado por: El autor.

Figura 27.

Sección del canal de estudio.



SECCIÓN DE CANAL

Nota. La figura muestra la sección del canal de estudio, acotado el ancho total, el ancho de cada sección, y profundidad al 60% desde la superficie. Elaborado por: El autor a través del programa AutoCAD 2025.

Transformación de n en rps a Velocidad media en m/s usando ecuación del fabricante. (ver anexo 17)

$$Vm1 = 0.6981 * n1 + 0.0035 = 0.326 \text{ m/s}$$

$$Vm2 = 0.6981 * n2 + 0.0035 = 0.557 \text{ m/s}$$

Determinación del área para cada sección

$$A1 = \frac{\text{Ancho sección} * \text{Profundidad1}}{2} = \frac{0.28 * 0.416}{2} = 0.058 \text{ m}^2$$

$$A2 = \frac{\text{Profundidad1} + \text{Profundidad2}}{2} * \text{Ancho sección} = \frac{0.416 + 0.544}{2} * 0.28 = 0.134 \text{ m}^2$$

$$A4 = \frac{\text{Profundidad3} + \text{Profundidad4}}{2} * \text{Ancho sección} = \frac{0.496 + 0.504}{2} * 0.28 = 0.140 \text{ m}^2$$

$$A5 = \frac{\text{Ancho sección} * \text{Profundidad4}}{2} = \frac{0.28 * 0.496}{2} = 0.071 \text{ m}^2$$

Determinación del caudal parcial para cada sección y caudal total.

$$Q_{parcial1} = A1 * Vm1 = 0.058 * 0.326 = 0.019 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{parcial2} = A2 * \left(\frac{Vm1 + Vm2}{2}\right) = 0.134 * \left(\frac{0.326 + 0.557}{2}\right) = 0.059 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{parcial4} = A4 * \left(\frac{Vm3 + Vm4}{2}\right) = 0.140 * \left(\frac{0.597 + 0.277}{2}\right) = 0.061 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{parcial5} = A5 * Vm4 = 0.071 * 0.277 = 0.020 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{total} = \sum Q_{parcial1}, Q_{parcial2} \dots Q_{parcial5} = 0.243 \frac{m^3}{s}$$

Resultados.

Tabla 50.

Tabla de ancho de canal y secciones.

Descripción	Cantidad	Unidad
Ancho del canal	1.4	m
Ancho de secciones	0.28	m
Número de verticales	4	u
Número de secciones	5	u

Nota. La tabla muestra los datos geométricos levantados en campo propios del canal, así como la cantidad de secciones y verticales. Elaborado por: El autor.

Tabla 51.

Tabla de resultados de aforo con Molinete

Sección/Punto	Profundidad (m)	n (rps)	V _m (m/s)	Área de sección (m ²)	Caudal parcial (m ³ /s)
S1				0.058	0.019
P1	0.416	0.454	0.32		
S2				0.134	0.059
P2	0.544	0.785	0.552		
S3				0.146	0.083
P3	0.496	0.843	0.592		
S4				0.140	0.060
P4	0.504	0.384	0.272		
S5				0.071	0.019
CAUDAL TOTAL (m³/s)					0.240

Nota. La figura muestra los resultados del aforo para esa sección de canal. Elaborado por:
El autor.

Conclusiones.

- El caudal total obtenido es de $Q=0.24$ m³/s, obtenido a partir de la sumatoria de caudales parciales.
- La aplicación del método de un punto (P0.6) fue adecuada para este aforo, ya que las profundidades medidas en las verticales se mantuvieron dentro de un rango que permite que una lectura única represente de forma confiable la velocidad media de la vertical,
- Los datos evidencian un comportamiento hidráulico consistente, con aportes de caudal más bajos en las márgenes y más altos hacia la zona central. Esto indica que la segmentación de 4 verticales y 5 subsecciones fue adecuada para captar la variación transversal de profundidades y velocidades.

4.4.1.2 Sonda de ultrasonido Flow tracker2

El equipo se trata de un velocímetro acústico Doppler (ADV) portátil diseñado para mediciones de velocidad puntual y para el aforo de caudales por el método

velocidad–área en cauces medios y bajos. En el ensayo, el equipo mide la velocidad en un volumen pequeño de muestreo y, a partir de lecturas puntuales dentro de cada vertical, calcula la velocidad media por vertical según el método seleccionado.

Para el cálculo del caudal, el FlowTracker2 usa el método de la media sección media y explícitamente indica que solo se usa el componente X de la velocidad (V_x) en el cálculo de descarga, independientemente de la dirección del flujo (la dirección también se mide y registra).

Objetivo general.

- Determinar el caudal en un canal mediante el método velocidad-área, utilizando la sonda ultrasónica FlowTracker2 para la medición de velocidades puntuales, conforme a la norma ISO 748:2021.

Objetivos específicos.

- Seleccionar el sitio de aforo considerando las recomendaciones de la norma y el levantamiento de las medidas de la sección del canal.

- Determinar el tipo de método a usar para la toma de velocidades a partir de la profundidad que se presenta el canal.

- Medir las velocidades puntuales del flujo en el cauce mediante la sonda ultrasónica FlowTracker2.

- Calcular el caudal total del canal.

Materiales, herramientas y equipos.

- FlowTracker2.
- Varilla de vadeo escalada.
- Flexómetro.
- Piola.
- Marcadores o pintura en spray.

Figura 28.

Sonda de Ultrasonido FlowTracker2.



Nota. La figura muestra el equipo FlowTracker2 y el nombre de sus partes. Fuente: SonTek-a Xylem Brand. Elaborado por: El autor.

Procedimiento de uso del equipo.

1. Antes de salir a campo se debe revisar la integridad del equipo, esto engloba a colocar el cartucho con pilas, verificar que los conectores se encuentren limpios y confirmar que el equipo tenga espacio de almacenamiento.
2. Armar la varilla de vadeo y fijar la sonda al soporte de la varilla, asegurándose que el cable no quede muy holgado para evitar tirones.
3. Encender el equipo y dirigirse a Device configuration, (ver anexo 18), seleccionar la opción Application Settings, donde podrá configurar las unidades, colocar en métricas. (ver anexo 19). En la misma sección encuentra Wading Rod en donde se puede configurar el tipo de varilla de vadeo que se está utilizando y la referencia (superficie o fondo) para determinar la profundidad de medición de la velocidad, (ver anexo 20), en este caso se tiene que configurar en la opción “top settings” ya que es la que corresponde a la disponible en la universidad.

4. Seleccionar un tramo de canal recto, de bordes uniformes y con flujo estable.
5. Medir el ancho de la sección, utiliza una piola para cruzarla a través del canal para tener una referencia y poder definir bien cada vertical.
6. Para ubicar los puntos verticales de estudio, dividir en secciones iguales el ancho del canal y colocar una referencia para cada vertical, teniendo en cuenta que la norma permite hasta el 15% de paso de caudal por cada sección delimita por las verticales.
7. Una vez en campo y todo listo para iniciar el aforo, encender el equipo y desde el menú principal, dirigirse a la opción Measurement, (ver anexo 21), una vez ahí seleccionar el modo descarga, (ver anexo 22), después seleccionar la opción “default”. (ver anexo 23),
8. Seleccionar “New Data File” para crear un nuevo archivo, (ver anexo 24), posteriormente completar los datos generales del sitio. Presionar ok y después skip.
9. Se abrirá una ventana denominada “Data collection” la cual funciona como el centro de control del proceso de medición de caudal. (ver anexo 25)
10. Para añadir la primera estación, seleccionamos “add station”, en la cual debe definir algunos parámetros como: (ver anexo 26)
 - El parámetro locación, el cual será la distancia del borde del canal hasta el primer vertical en metros.
 - El parámetro de profundidad el cual se refiere a ese punto.
 - Ubicación, aquí debemos colocar si se trata del costado derecho o izquierdo del canal. (ver anexo 27)
 - Factor de corrección, basado en las tablas del manual del fabricante se obtiene que es igual a 1.

11. Añadir la estación número 2 definiendo los mismos parámetros anteriormente mencionados tomando en cuenta que:

- La ubicación se debe colocar la ubicación “Open Water”. (ver anexo 28).
- El parámetro del método de velocidad debe ser elegido en función de lo que dicta la norma ISO 748 sobre la profundidad. (ver anexo 29)

12. Ubicar la sonda dentro del canal y posicionarlo a la altura que nos indica el equipo, según el método que se requiera se tomará 1, 2, 3 o más puntos de lectura en una vertical. Sostener fijo la varilla de vadeo y la sonda perpendicular al sentido del flujo.

13. Presionar Start, (ver anexo 30), y esperar a que se tome lectura de la velocidad media, así en cada uno de los puntos de la vertical.

14. Repetir los pasos 9, 10 y 11 para cada vertical, considerando que para el último vertical se deberá colocar que es costado contrario a la primera estación registrada. Es decir, si en la primera estación empezamos por el borde izquierdo nuestra última estación será el borde derecho.

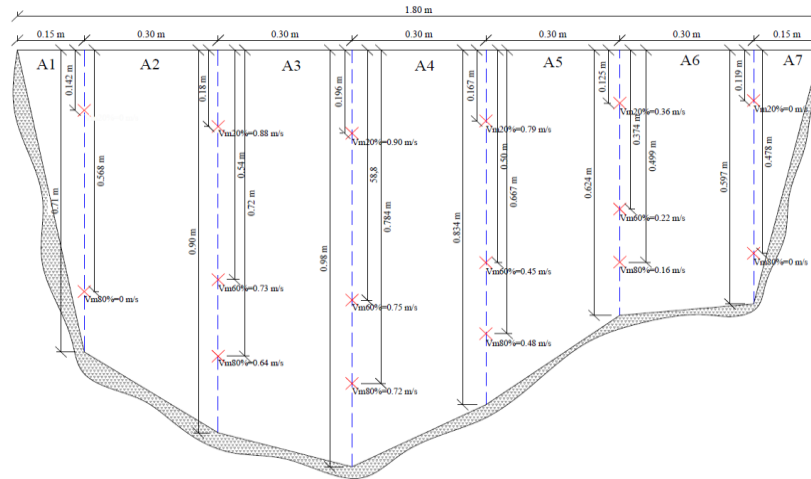
15. Dirigirse a la opción “Data Collection Menu”, seleccionar “Complete Measurement”, y confirmar la conclusión del ensayo. (ver anexo 31).

16. En la opción “settings”, dentro del “Data Collection Menu” seleccionar “Discharge Summary”, (ver anexo 32), y revisar los valores tomados en campo y el caudal total de la sección aforada.

Ejemplo de cálculo.

Figura 29.

Sección de canal del estudio.



SECCIÓN DE CANAL

Nota. La figura muestra la sección del canal de estudio, acotado el ancho total, el ancho de cada sección, y profundidad al 20%, al 60% y al 80% desde la superficie. Elaborado por: El autor a través del programa AutoCAD 2025.

Promedio de velocidades medias obtenidas en campo para cada vertical.

$$Vm2 = \frac{Vm_{20\%} + Vm_{60\%} + Vm_{80\%}}{3} = \frac{0.88 + 0.73 + 0.64}{3} = 0.750 \frac{m}{s}$$

$$Vm4 = \frac{Vm_{20\%} + Vm_{60\%} + Vm_{80\%}}{3} = \frac{0.79 + 0.45 + 0.48}{3} = 0.573 \frac{m}{s}$$

$$Vm6_{MargenIzq} = \frac{Vm_{20\%} + Vm_{80\%}}{2} = \frac{0 + 0}{2} = 0.00 \frac{m}{s}$$

Determinación del área para cada sección

$$A2 = \frac{Profundidad1 + Profundidad2}{2} * Ancho sección = \frac{0.71 + 0.90}{2} * 0.30 =$$

$$0.242 m^2$$

$$A4 = \frac{\text{Profundidad3} + \text{Profundidad4}}{2} * \text{Ancho sección} = \frac{0.98 + 0.83}{2} * 0.30 =$$

$$0.272 \text{ m}^2$$

$$A7 = \frac{\text{Ancho sección} * \text{Profundidad4}}{2} = \frac{0.30 * 0.597}{2} = 0.045 \text{ m}^2$$

Determinación del caudal parcial para cada sección y caudal total.

$$Q_{\text{parcial1}} = A2 * Vm2 = 0.242 * 0.750 = 0.181 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{parcial4}} = A4 * Vm4 = 0.272 * 0.573 = 0.156 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{parcial5}} = A5 * Vm5 = 0.219 * 0.247 = 0.054 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{parcial7}} = A7 * Vm6_{\text{MargenIzq}} = 0.045 * 0 = 0.00 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_{\text{total}} = \sum Q_{\text{parcial1}}, Q_{\text{parcial2}} \dots Q_{\text{parcial7}} = 0.659 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Resultados.

Tabla 52.

Tabla de datos de la sección del canal.

Descripción	Cantidad	Unidad
Ancho del canal	1.8	m
Ancho de secciones centrales	0.3	m
Ancho secciones de bordes	0.15	m
Número de verticales	6	u
Número de secciones	7	u

Nota. La tabla muestra el ancho del canal y de cada una de las secciones en las que se subdividió, también indica la cantidad de verticales. Elaborado por: El autor.

Tabla 53.

Tabla de procesamiento de datos del equipo FlowTracker2.

Sección/ Punto	Profundidad (m)	Vm 20% (m/s)	Vm 60% (m/s)	Vm 80% (m/s)	Vprom (m/s)	Área de sección (m ²)	Caudal parcial (m ³ /s)
S1						5.325	0.000
P1	0.71				0.000		
S2						0.242	0.181
P2	0.9	0.88	0.73	0.640	0.750		
S3						0.282	0.223
P3	0.98	0.9	0.75	0.720	0.790		
S4						0.272	0.156
P4	0.834	0.79	0.45	0.480	0.573		
S5						0.219	0.054
P5	0.624	0.36	0.22	0.160	0.247		
S6						0.183	0.045
P6	0.597				0.000		
S7						4.478	0.000
CAUDAL TOTAL (m³/s)							0.659

Nota. La figura muestra los datos de velocidad media medidos en campo con el equipo FlowTracker2 y los resultados de las áreas y caudales de cada sección para obtener el caudal total. Elaborado por: El autor.

Conclusiones.

- El caudal total obtenido es mediante el cálculo manual es de $Q=0.659$ m³/s, obtenido a partir de la sumatoria de caudales parciales, mientras que el equipo nos arroja un $Q=0.68$ m³/s

- La sección del canal presenta profundidades que varían entre los 0.60 y 0.90 m. Según la normativa, el método de dos puntos es suficiente para estimar una velocidad media representativa en este rango de profundidades. No obstante, con el propósito de presentar los tres métodos de medición, se usó el método de los 3 puntos en las verticales del centro del cauce, y el método de dos puntos en las verticales de los bordes.

4.4.2 Método químico

4.4.2.1 Trazador salino Multi 3620 IDS

El aforo por dilución permite, en muchos casos, medir el caudal con buena precisión en canales donde la turbulencia intensa y un fondo irregular vuelven poco fiables o inviables los aforos con molinete. En realidad, ambos métodos se complementan: cuando el flujo es demasiado turbulento para usar molinete, la dilución suele ser la alternativa más adecuada.

Para que el método funcione, es imprescindible disponer de un tramo del canal lo bastante turbulento y encajonado como para garantizar que el trazador se mezcle por completo en toda la sección del flujo.

Dentro de estos métodos, el método slug consiste en inyectar de golpe una cantidad conocida de trazador y medir aguas abajo la curva concentración–tiempo (o señal equivalente). Para que el cálculo sea válido, se debe recuperar “toda” la masa en la medición por eso también se conoce como método de recuperación total, lo que exige mezcla suficiente y registrar la señal hasta que vuelva al valor de fondo.

Objetivo general.

- Determinar el caudal del cauce mediante el aforo por dilución con trazador, aplicando el método slug con solución salina y registro continuo de conductividad.

Objetivos específicos.

- Medir la infiltración incremental manteniendo un nivel de agua constante en el anillo interno, registrando el volumen agregado por intervalos de tiempo.

- Calcular la infiltración entre lecturas, velocidad de infiltración e infiltración acumulada y construir las curvas correspondientes.

Materiales, herramientas y equipos.

- Conductivímetro multiparámetro Multi 3620 IDS.
- Sonda de conductividad TetraCon 925-3.
- Sal (NaCl)

- Cronómetro
- Balanza.
- Balde escalado con tapa.

Figura 30.

Conductivímetro multiparámetro multi 3620 IDS.



Nota. La figura muestra el conductivímetro multiparámetro multi 3620 IDS y sonda de conductividad en su estuche. Elaborado por: El autor.

Procedimiento de uso del equipo.

1. Seleccionar un tramo del cauce con un flujo turbulento, de manera que se garantice la mezcla completa del trazador con la totalidad del caudal circulante antes de realizar el registro de medición.
2. En la sección seleccionada definir dos puntos, el punto de inyección, aguas arriba, y el punto de medición, aguas abajo.
3. Preparar la solución trazadora, con una concentración de sal de 7.5g/L.
4. En un balde escalado, recoger 1L de agua del cauce.
5. Conectar el sensor IDS TetraCon 925 al conductivímetro Multi 3620 IDS, mediante el acople que tiene en la parte superior.

6. Encender el equipo y revisar que el parámetro a medir este en la pantalla inicial, en caso de no ser así, cambiar con el botón “M” hasta ubicar el parámetro de conductividad en unidades de $\mu\text{S}/\text{cm}$.

7. Agregar 6ml de solución trazadora de 7.5g/L, y colocar la tapa hermética en el balde para agitar el contenido, con el objetivo de promover la disolución de los componentes. Nuevamente mida la conductividad en el balde y registre sus valores.

8. Colocar el sensor TetraCon 925 dentro del balde y medir la conductividad una vez estabilizada la lectura, (el valor de la lectura aparecerá en la pantalla una vez coloque el sensor dentro del fluido), registre el valor obtenido.

9. Repetir el paso anterior 7 y 8.

10. Con la información obtenida organizar una tabla que relaciona la concentración de sal con la conductividad eléctrica. A partir de estos datos se determina, para cada cauce, una ecuación de ajuste lineal, que expresa la dependencia de la concentración de sal en función de la conductividad, la cual es utilizada posteriormente en el procesamiento y análisis de los resultados del aforo. La ecuación lineal que es obtiene de la gráfica en Excel es de la forma, $Y=mx+b$, donde Y es la concentración del trazador, m es la pendiente, X es la conductividad y b es el punto de corte.

11. Una vez se tiene el equipo calibrado con las condiciones del sitio se podrá proceder a tomar las mediciones vertiendo la solución en el cauce, para esto, se debe configurar el intervalo de registro en el quipo. Para ello, mantenga presionado durante al menos 5s el botón “STO”, se abrirá una ventana de configuración donde se establece el número de ensayo, el intervalo de tiempo en que se registrarán los datos y la duración total de la grabación.

12. Coordine previamente con el operador de inyección, de modo que una persona se ubique aguas arriba para inyectar el trazador y otra permanezca aguas abajo

sosteniendo el sensor para realizar la medición. La persona que va a inyectar el trazador debe disolver 15g de sal en aproximadamente 600ml de agua del canal.

13. Para iniciar la grabación automática de la conductividad con el intervalo de tiempo configurado, presione el botón “Enter”. A continuación, inyecte el trazador vertiendo rápidamente todo el volumen en una descarga continua. Mantenga el sensor firme durante el proceso y continúe registrando hasta completar el ensayo.

14. Para la descarga de los datos del equipo a nuestra computadora debemos instalar el programa MultiLab Importer, el cual es un complemento de Microsoft Excel.

15. Una vez instalado nuestro programa, abra una hoja de cálculo en Microsoft Excel y conecte el conductivímetro al computador mediante la interfaz USB. Encienda el instrumento y, dentro del archivo de Excel, seleccione la celda donde desea que se inserten los datos, considerando que la tabla se generará a partir de ese punto hacia abajo y hacia la derecha. Luego, en la barra de complementos, presione la opción “Import data” para que el programa detecte el equipo conectado y quede listo para la importación.

16. Para realizar la transferencia de datos a la computadora, mantenga presionado durante 5 s el botón “MENU” hasta que se abra la ventana “Archivar y configurar”; seleccione la opción “Memoria” presionando “ENTER”, luego la opción “Memoria automática” o “Memoria manual”. En la memoria automática se encuentran los datos medidos en un intervalo del tiempo y, finalmente, seleccione “Salida vía memoria/impresora USB”.

17. Ordenar los datos obtenidos en tablas de tal forma que en la columna 1, se ubica el tiempo en intervalos de 5s, en la columna 2, la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y en la columna 3 la concentración de sal medida en (g/L).

18. Graficar la curva de concentración, para ello en el eje X se ubicará el tiempo y en el eje Y, los datos de conductividad.

19. En otra tabla proceda a organizar el cálculo en tres columnas consecutivas. En la primera columna registre la concentración en exceso, obtenida como la diferencia entre la concentración medida y la concentración inicial, expresada en g/L. En la segunda columna calcule el área parcial correspondiente a cada intervalo de tiempo, aplicando el método del trapecio mediante el promedio de las concentraciones en exceso de dos registros consecutivos multiplicado por el intervalo de tiempo. En la tercera columna realice la suma acumulada de las áreas parciales, de manera que cada fila incluya el valor del intervalo actual más el acumulado anterior, obteniendo así la integral total de la curva concentración–tiempo, expresada en gxs/L.

20. Determine el caudal dividiendo la cantidad total de sal vertida en la quebrada entre el área total integrada bajo la curva concentración–tiempo. El resultado obtenido corresponde al caudal del flujo, el cual puede expresarse en (L/s) o (m^3/s), según el sistema de unidades adoptado.

21. En el método de trazador tipo slug, el caudal se obtiene dividiendo la masa total de sal inyectada entre el área bajo la curva concentración–tiempo. Para entender por qué el resultado queda en litros por segundo, se analizan únicamente las unidades. La masa inyectada está en gramos. La concentración se expresa en gramos por litro, y al multiplicarla por el tiempo en segundos, el resultado queda en gramos por litro por segundo acumulado, es decir, gramos por litro multiplicado por segundos. Cuando se divide la masa en gramos entre esa magnitud, los gramos se eliminan. Al desaparecer los gramos, lo único que queda es litro dividido para segundo. Por lo tanto, el resultado final necesariamente queda expresado en litros por segundo, que es la unidad de caudal volumétrico.

Ejemplo de cálculo.

- Como se explica en el procedimiento primero se debe calibrar el equipo en función de las condiciones del agua del sitio. Para eso se toman los siguientes datos y se elabora la gráfica en Excel.

Tabla 54.

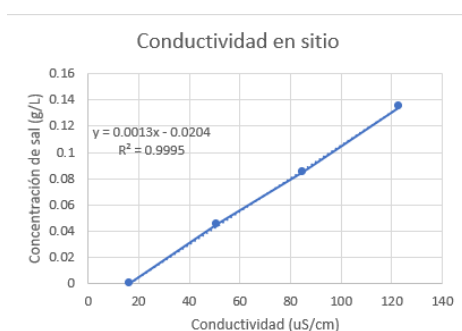
Datos tomados en in situ para calibración del equipo.

Conductividad del sitio ($\mu\text{S/cm}$)	Concentración de sal (g/L)
16.53	0
51	0.0453
85	0.085
123	0.135

Nota. La tabla presenta los valores de conductividad eléctrica y las concentraciones de sal obtenidas a medida que se adiciona el trazador salino a la muestra de agua. En este caso, se empleó una solución patrón con una concentración de 7,5g/L, incorporando incrementos de 6mL de dicha solución en el balde que contiene la muestra recolectada del canal. Este procedimiento permite establecer la relación entre conductividad y concentración, generando la curva de calibración del conductivímetro bajo las condiciones específicas del agua del sitio de estudio. Elaborado por: El autor.

Figura 31.

Ecuación lineal de este canal.



Nota. La tabla muestra la ecuación lineal propia de este canal de estudio. Elaborado por: El autor a través del programa Microsoft Excel.

- Una vez haya ejecutado todo el ensayo en campo y se haya descargado los datos del equipo se procede a organizar una tabla de tal forma que en la columna 1 se ubique el tiempo en intervalo de 5s, en la columna 2, la conductividad medida en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y por último en la columna 3 la concentración de sal en g/L . Con estos datos graficamos la curva Tiempo (s) vs Concentración de sal (g/L).

Tabla 55.

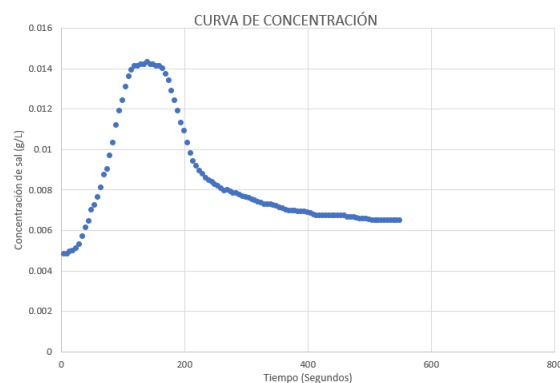
Resultados organizados en columnas.

Tiempo (S)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Concentración de sal (g/L)
5	16.53	0.00482
10	16.53	0.00482
15	16.63	0.00493
20	16.73	0.00498
25	16.85	0.00511
30	16.97	0.00528
35	17.1	0.00568
40	17.4	0.00612
45	17.9	0.00645
50	18.3	0.00698

Nota. La imagen muestra la tabla de datos organizados por columnas y la curva graficada en Microsoft Excel. Elaborado por: El autor.

Figura 32.

Curva de concentración



Nota. La figura muestra la curva de concentración de sal en función del tiempo, realizada en Microsoft Excel a partir de los datos levantados en campo. Elaborado por: El autor a través del programa Microsoft Excel.

- Para hallar el área bajo la curva se añade una columna 4 de concentración en g/L en la cual procedemos a restar la concentración de sal de las lecturas C_o , menos la concentración inicial C_i , de la siguiente manera.

$$C_o - C_i = 0.00482 - 0.00482 = 0 \frac{g}{L}$$

$$C_o - C_i = 0.00493 - 0.00482 = 0.00011 \frac{g}{L}$$

$$C_o - C_i = 0.00498 - 0.00482 = 0.00016 \frac{g}{L}$$

Continuando con esta lógica obtenemos los valores para toda la serie de datos.

- En la columna 5 se calcula el área parcial correspondiente a cada intervalo de tiempo, se obtiene el área de un trapecio mediante el promedio de las concentraciones en exceso de dos registros consecutivos multiplicado por el intervalo de tiempo.

$$\frac{C_o - C_i}{2} * tiempo = \frac{0 - 0.00011}{2} * 5 = 0.000275 \frac{g * s}{L}$$

$$\frac{C_o - C_i}{2} * tiempo = \frac{0.00011 - 0.00016}{2} * 5 = 0.000675 \frac{g * s}{L}$$

$$\frac{C_o - C_i}{2} * tiempo = \frac{0.00016 - 0.00029}{2} * 5 = 0.001125 \frac{g * s}{L}$$

- En la columna 6 se realiza la suma acumulada de las áreas parciales, como resultado tenemos la integral total de la curva concentración-tiempo, expresada en gxs/L.

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{(C_i + C_{i-1})}{2} * \Delta t$$

$$A_2 = 0.000675 + 0.000275 = 0.000950 \frac{g * s}{L}$$

$$A_3 = 0.001125 + 0.000950 = 0.0021 \frac{g * s}{L}$$

$$A_{110} = 0.008300 + 1.9874 = 1.995 \frac{g * s}{L}$$

- Finalmente determine el caudal dividiendo la Masa total del trazador inyectado

(g) para el área bajo la curva de concentración.

$$Q = \frac{M}{\int C(t)dt} = \frac{5}{1.995} = 2.505 \frac{L}{s}$$

Tabla 56.

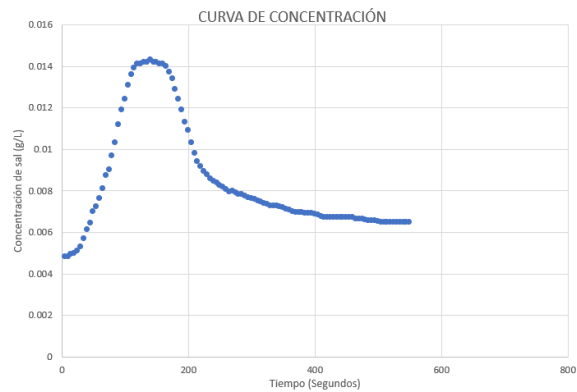
Tabla de procesamiento de datos para determinar el caudal.

Sal inyectada	15	g			
Inicial (Co)	0.00482	(μ S/cm)			
Tiempo (S)	Conductividad (μ S/cm)	Concentración de sal C (g/L)	C-Co (g/L)	(C-Co)/2* Δ t	Integral. C (grxseg/L)
5	16.53	0.00482	0	0	0.00
10	16.53	0.00482	0	0.00	0.00
15	16.63	0.00493	0.00011	0.000275	0.000275
20	16.73	0.00498	0.00016	0.000675	0.000950
25	16.85	0.00511	0.00029	0.001125	0.0021
30	16.97	0.00528	0.00046	0.001875	0.003950
35	17.1	0.00568	0.00086	0.003300	0.0073
40	17.4	0.00612	0.0013	0.005400	0.0127
45	17.9	0.00645	0.00163	0.007325	0.0200
50	18.3	0.00698	0.00216	0.009475	0.0295
55	18.9	0.00722	0.0024	0.011400	0.0409
60	19.2	0.00762	0.0028	0.013000	0.0539
65	20.4	0.00811	0.00329	0.015225	0.0691
70	21.1	0.00873	0.00391	0.018000	0.0871
75	21.8	0.00903	0.00421	0.020300	0.1074
80	22.4	0.00967	0.00485	0.022650	0.1300
85	22.6	0.0103	0.00548	0.025825	0.1559
90	23.25	0.0112	0.00638	0.029650	0.1855
95	23.76	0.0119	0.00708	0.033650	0.2192
100	24.27	0.0124	0.00758	0.036650	0.2558
105	24.27	0.0131	0.00828	0.039650	0.2955
110	24.28	0.0136	0.00878	0.042650	0.3381
115	24.27	0.0139	0.00908	0.044650	0.3828
120	25.3	0.0141	0.00928	0.045900	0.4287
125	25.7	0.0141	0.00928	0.046400	0.4751
130	25.9	0.0142	0.00938	0.046650	0.5217
135	26.2	0.0142	0.00938	0.046900	0.5686
140	26.8	0.0143	0.00948	0.047150	0.6158
145	27.1	0.0142	0.00938	0.047150	0.6629
150	27.4	0.0142	0.00938	0.046900	0.7098
155	27.9	0.0141	0.00928	0.046650	0.7565
160	28.6	0.0141	0.00928	0.046400	0.8029
165	28.9	0.014	0.00918	0.046150	0.8490
170	29.47	0.0137	0.00888	0.045150	0.8942
175	29.97	0.0134	0.00858	0.043650	0.9378
180	30.30	0.0129	0.00808	0.041650	0.9795
185	30.95	0.0124	0.00758	0.039150	1.0186
190	31.47	0.0119	0.00708	0.036650	1.0553
195	31.97	0.0113	0.00648	0.033900	1.0892
200	32.3	0.0109	0.00608	0.031400	1.1206
205	32.5	0.0103	0.00548	0.028900	1.1495
210	32.9	0.00982	0.005	0.026200	1.1757
215	33.3	0.00942	0.0046	0.024000	1.1997
220	33.7	0.00915	0.00433	0.022325	1.2220
225	33.8	0.00893	0.00411	0.021100	1.2431
230	34.2	0.00876	0.00394	0.020125	1.2632
235	34.6	0.00856	0.00374	0.019200	1.2824
240	34.9	0.00846	0.00364	0.018450	1.3009
245	35.4	0.00836	0.00354	0.017950	1.3188
250	35.9	0.00827	0.00345	0.017475	1.3363
Caudal (l/s)	7.52				
Caudal (m3/s)	0.0075				

Nota. La tabla presenta los resultados de los cálculos para cada columna y la obtención del caudal tanto L/s y en m³/s. Elaborado por: El autor.

Figura 33.

Curva de concentración



Nota. La figura muestra la curva de concentración de sal en función del tiempo, realizada en Microsoft Excel a partir de los datos levantados en campo. Elaborado por: El autor a través del programa Microsoft Excel.

Resultados.

Tabla 57.

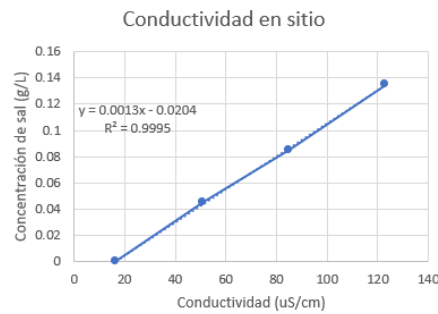
Datos de calibración del equipo en función de las condiciones del agua en el canal.

Conductividad del sitio (μS/cm)	Concentración de sal (g/L)
16.53	0
51	0.0453
85	0.085
123	0.135

Nota. La tabla muestra los resultados de la calibración del conductímetro con agua del canal de estudio. Elaborado por: El autor.

Figura 34.

Ecuación lineal de este canal.



Nota. La tabla muestra la ecuación lineal propia de este canal de estudio. Elaborado por: El autor a través del programa Microsoft Excel.

Tabla 58.

Resultado de conductividad medido en canal.

Tiempo (S)	Conductividad (μS/cm)	Concentración de sal (g/L)
5	16.53	0.00482
10	16.53	0.00482
15	16.63	0.00493
20	16.73	0.00498
25	16.85	0.00511
30	16.97	0.00528
35	17.1	0.00568
40	17.4	0.00612
45	17.9	0.00645
50	18.3	0.00698
55	18.9	0.00722
60	19.2	0.00762
65	20.4	0.00811
70	21.1	0.00873
75	21.8	0.00903
80	22.4	0.00967
85	22.6	0.0103
90	23.25	0.0112
95	23.76	0.0119
100	24.27	0.0124
105	24.27	0.0131
110	24.28	0.0136
115	24.27	0.0139
120	25.3	0.0141
125	25.7	0.0141
130	25.9	0.0142
135	26.2	0.0142
140	26.8	0.0143
145	27.1	0.0142
150	27.4	0.0142
155	27.9	0.0141
160	28.6	0.0141
165	28.9	0.014
170	29.47	0.0137
175	29.97	0.0134
180	30.30	0.0129
185	30.95	0.0124
190	31.47	0.0119
195	31.97	0.0113
200	32.3	0.0109

Nota. La imagen muestra la tabla de datos de conductividad y concentración de sal en el tiempo y su curva de concentración, donde se observa un pico máximo seguido de un

descenso gradual, comportamiento típico del ensayo de trazador salino tipo slug utilizado para el cálculo del caudal. Elaborado por: El autor.

Tabla 59.

Tabla de procesamiento de datos para determinar el caudal.

Sal inyectada		15 g				
Inicial (Co)	0.00482	($\mu\text{S/cm}$)				
Tiempo (S)	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Concentración de sal C (g/L)	C-Co (g/L)	(C-Co)/2* Δt	Integral. C (grxseg/L)	
5	16.53	0.00482	0	0		
10	16.53	0.00482	0	0.00	0.00	
15	16.63	0.00493	0.00011	0.000275	0.000275	
20	16.73	0.00498	0.00016	0.000675	0.000950	
25	16.85	0.00511	0.00029	0.001125	0.0021	
30	16.97	0.00528	0.00046	0.001875	0.003950	
35	17.1	0.00568	0.00086	0.003300	0.0073	
40	17.4	0.00612	0.0013	0.005400	0.0127	
45	17.9	0.00645	0.00163	0.007325	0.0200	
50	18.3	0.00698	0.00216	0.009475	0.0295	
55	18.9	0.00722	0.0024	0.011400	0.0409	
60	19.2	0.00762	0.0028	0.013000	0.0539	
65	20.4	0.00811	0.00329	0.015225	0.0691	
70	21.1	0.00873	0.00391	0.018000	0.0871	
75	21.8	0.00903	0.00421	0.020300	0.1074	
80	22.4	0.00967	0.00485	0.022650	0.1300	
85	22.6	0.0103	0.00548	0.025825	0.1559	
90	23.25	0.0112	0.00638	0.029650	0.1855	
95	23.76	0.0119	0.00708	0.033650	0.2192	
100	24.27	0.0124	0.00758	0.036650	0.2558	
105	24.27	0.0131	0.00828	0.039650	0.2955	
110	24.28	0.0136	0.00878	0.042650	0.3381	
115	24.27	0.0139	0.00908	0.044650	0.3828	
120	25.3	0.0141	0.00928	0.045900	0.4287	
125	25.7	0.0141	0.00928	0.046400	0.4751	
130	25.9	0.0142	0.00938	0.046650	0.5217	
135	26.2	0.0142	0.00938	0.046900	0.5686	
140	26.8	0.0143	0.00948	0.047150	0.6158	
145	27.1	0.0142	0.00938	0.047150	0.6629	
150	27.4	0.0142	0.00938	0.046900	0.7098	
155	27.9	0.0141	0.00928	0.046650	0.7565	
160	28.6	0.0141	0.00928	0.046400	0.8029	
165	28.9	0.014	0.00918	0.046150	0.8490	
170	29.47	0.0137	0.00888	0.045150	0.8942	
175	29.97	0.0134	0.00858	0.043650	0.9378	
180	30.30	0.0129	0.00808	0.041650	0.9795	
185	30.95	0.0124	0.00758	0.039150	1.0186	
190	31.47	0.0119	0.00708	0.036650	1.0553	
195	31.97	0.0113	0.00648	0.033900	1.0892	
200	32.3	0.0109	0.00608	0.031400	1.1206	
205	32.5	0.0103	0.00548	0.028900	1.1495	
210	32.9	0.00982	0.005	0.026200	1.1757	
215	33.3	0.00942	0.0046	0.024000	1.1997	
220	33.7	0.00915	0.00433	0.022325	1.2220	
225	33.8	0.00893	0.00411	0.021100	1.2431	
230	34.2	0.00876	0.00394	0.020125	1.2632	
235	34.6	0.00856	0.00374	0.019200	1.2824	
240	34.9	0.00846	0.00364	0.018450	1.3009	
245	35.4	0.00836	0.00354	0.017950	1.3188	
250	35.9	0.00827	0.00345	0.017475	1.3363	
Caudal (l/s)	7.52					
Caudal (m3/s)	0.0075					

Nota. La tabla presenta el procesamiento de datos del ensayo de aforo mediante trazador salino, mostrando la evolución temporal de la conductividad, la concentración de sal, y la concentración excedente respecto al valor inicial (C – Co). Además, incluye el cálculo del área bajo la curva y su sumatoria, utilizados para la determinación del caudal del flujo, cuyo resultado final se reporta en L/s y m³/s. Elaborado por: Jonathan Yáñez.

Conclusiones.

- La curva de concentración en función del tiempo presenta una forma unimodal bien definida, con un incremento rápido hasta un pico máximo y una fase de decaimiento gradual, lo que indica que el trazador se mezcló adecuadamente en la sección de medición y que las condiciones hidráulicas del cauce fueron apropiadas para la aplicación del método de dilución.
- El caudal obtenido $Q = 7.5 \text{ L/s}$ a partir de la integración de la concentración excedente respecto a la concentración de fondo demuestra coherencia entre la calibración conductividad–concentración y el registro temporal, validando la consistencia de los datos experimentales y la confiabilidad del cálculo de caudal mediante el método de trazador salino.

4.5 ANILLOS DE INFILTRACIÓN-VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

La determinación experimental de la infiltración en campo se realiza comúnmente mediante anillos de infiltración, los cuales permiten medir la variación de la lámina de agua en función del tiempo y estimar la velocidad de infiltración del suelo bajo condiciones controladas. De acuerdo con Chow (1994), “la infiltración es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el suelo.” (p. 110). En general, la infiltración inicia con una velocidad alta y, a medida que el suelo alcanza condiciones de saturación, disminuye hasta alcanzar un valor prácticamente constante llamada velocidad básica de infiltración. Este comportamiento depende principalmente de la textura y estructura del suelo, del grado de humedad inicial, y de condiciones que pueden reducir la infiltración.

Con el ensayo del infiltrómetro de doble anillo se quiere medir la tasa de infiltración del suelo en función del tiempo bajo una lámina de agua controlada. El procedimiento consiste en registrar, en intervalos de tiempo el descenso del nivel de agua

y con ello calcular la infiltración, construyendo la curva típica: tasas iniciales altas que descienden progresivamente hasta una fase estable.

Objetivo general.

- Determinar en campo la tasa de infiltración del suelo mediante el infiltrómetro de doble anillo, para construir la curva de infiltración.

Objetivos específicos.

- Medir la infiltración incremental manteniendo un nivel de agua constante en el anillo interno, registrando el volumen agregado por intervalos de tiempo.

- Calcular la infiltración entre lecturas, velocidad de infiltración e infiltración acumulada y construir las curvas correspondientes.

Materiales, herramientas y equipos.

- Infiltrómetro doble anillo.
- Soporte.
- Combo 2.5lb
- Nivel de burbuja.
- Cronómetro
- Flexómetro.
- Balde
- Tablón de madera
- Marcadores o pintura en spray.

Figura 35.

Infiltrómetro de doble anillo.



Nota. La figura muestra los anillos de infiltración de distintos diámetros, combo, cronometro y soportes. Fuente: Van Walt equipment for soil and water research.

Procedimiento de uso del equipo.

1. Seleccionar el punto de ensayo y preparar el área, retira piedras u otros objetos que puedan afectar el correcto asentamiento del equipo. Verificar el nivel de los anillos para evitar sesgos en el control del tirante.
2. Revisar los anillos e identificar el lado biselado, asegurando que quedará orientado para facilitar la penetración en el suelo.
3. Realizar marcas de referencia en el anillo exterior para controlar la profundidad de hincado.
4. Instalar el soporte y verifica que los seguros calcen correctamente en el anillo exterior e interior, garantizando un hincado homogéneo y evitando deformaciones.
5. Con ayuda del combo y el tablón de madera, hincar los anillos con golpes firmes, uniformes y constantes, manteniendo la verticalidad. Revisar con el nivel de burbuja.
6. Llenar con agua ambos anillos hasta la marca previamente establecida que puede estar entre los 50 y 55 cm.

7. Registrar lectura inicial y comenzar el cronometraje.
8. En cada intervalo, se deberá registrar el tiempo y la variación, lectura del nivel antes de recargar y el nivel de recarga, la recarga se la hace hasta el nivel de referencia al se repone el agua.
9. La prueba debe mantenerse en ejecución hasta que el descenso del nivel de agua sea prácticamente igual en intervalos de tiempo iguales, lo que indica una condición cercana a estabilización. Se recomienda realizar lecturas más frecuentes al inicio y, conforme avanza el ensayo, aumentar el intervalo de medición, por ejemplo, cada 20 a 30 minutos.
10. Los registros se consignan en una tabla de registro de datos, donde:
 - Columna 1: corresponde a la hora y minuto en que se realiza cada lectura.
 - Columna 2: indica el intervalo de tiempo entre lecturas consecutivas, expresado en minutos.
 - Columna 3: representa el tiempo acumulado desde el inicio del ensayo, en minutos.
 - Columna 4: registra las lecturas del nivel de agua en mm medidas sobre la regla, tanto antes como después de reponer el agua.
 - Columna 5: muestra la infiltración incremental en mm entre dos lecturas, calculada como la diferencia de niveles medidos.
 - Columna 6: corresponde a la velocidad de infiltración en mm/min, obtenida al dividir la infiltración del intervalo (Col. 5) para el tiempo transcurrido (Col. 2).
 - Columna 7: expresa la velocidad en mm/h, calculada como $\text{Col. 6} \times 60$.
 - Columna 8: presenta la infiltración acumulada en mm, sumando progresivamente los valores de infiltración de cada intervalo.

11. Con la información registrada en este cuadro es posible construir, la curva de velocidad básica de infiltración (tasa vs. tiempo) y la curva de infiltración acumulada (lámina acumulada vs. tiempo).

Resultados.

Tabla 60.

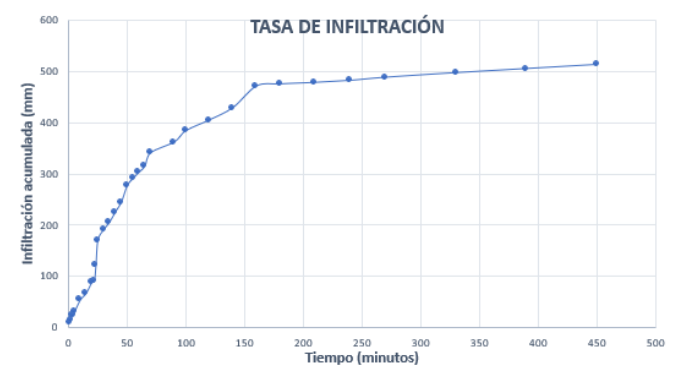
Tabla de resultados del ensayo del infiltrómetro de doble anillo.

1	2	3	4		5	6	7	8
Lectura cronometro (h:min:seg)	Atiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Nivel del agua (mm)		Infiltración (mm)	Velocidad de infiltración (mm/min)	Velocidad de infiltración (mm/h)	Infiltración acumulada (mm)
			Antes de recarga	Despues de recarga				
0:00:00	0		554					
0:01:00	1	1	550	540	10	10	600	10
0:02:00	1	2	555	550	5	5	300	15
0:03:00	1	3	563	555	8	8	480	23
0:04:00	1	4	565	563	2	2	120	25
0:05:00	1	5	570	565	5	5	300	30
0:10:00	5	10	594	570	24	4.8	288	54
0:15:00	5	15	563	550	13	2.6	156	67
0:20:00	5	20	585	563	22	4.4	264	89
0:22:00	2	22	565	563	2	1.00	60	91
0:23:18	1.3	23.3	570	540	30	23.08	1384.62	121.00
0:25:00	1.7	25	590	540	50	29.41	1764.71	171.00
0:30:00	5	30	560	540	20	4	240	191
0:35:00	5	35	575	560	15	3	180	206
0:40:00	5	40	595	575	20	4	240	226
0:45:00	5	45	556	537	19	3.8	228	245
0:50:00	5	50	572	540	32	6.4	384	277
0:55:00	5	55	586	572	14	2.8	168	291
1:00:00	5	60	552	540	12	2.4	144	303
1:05:00	5	65	564	552	12	2.4	144	315
1:10:00	5	70	590	564	26	5.2	312	341
1:30:00	20	90	561	540	21	1.05	63	362
1:40:00	10	100	583	561	22	2.2	132	384
2:00:00	20	120	561	540	21	1.05	63	405
2:20:00	20	140	585	561	24	1.2	72	429
2:40:00	20	160	582	540	42	2.1	126	471
3:00:00	20	180	580	576	4	0.2	12	475
3:30:00	30	210	578	575	3	0.1	6	478
4:00:00	30	240	575	571	4	0.133	8	482
4:30:00	30	270	575	569	6	0.2	12	488
5:30:00	60	330	572	563	9	0.150	9	497
6:30:00	60	390	573	565	8	0.13333333	8	505
8:30:00	60	450	572	564	8	0.133	8	513

Nota. La tabla muestra los datos levantados en el ensayo de infiltración, además del cálculo para cada columna. Elaborado por: El autor.

Figura 36.

Curva Tiempo (minutos) vs Infiltración acumulada (mm).



Nota. La figura muestra la curva que representa la tasa de infiltración del suelo. Elaborado por: El autor a través del uso del programa Microsoft Excel.

Conclusiones.

- El ensayo presenta una tasa inicial alta 600 mm/h y, conforme avanza el tiempo, la velocidad disminuye progresivamente, reflejando el humedecimiento del suelo. A partir de aproximadamente 180–240 min la infiltración muestra un comportamiento más estable, con valores bajos del orden de 1 a 12 mm/h, lo que es consistente con una fase cercana a la infiltración básica.

- En la serie aparecen picos atípicos, que son indicativos de variaciones en la recarga o inconsistencias operativas; sin embargo, no cambian la tendencia general decreciente. En términos acumulados, el ensayo registra una infiltración total aproximada de 493 mm, lo que resume la capacidad de ingreso de agua del suelo durante todo el periodo de medición.

CAPÍTULO V

DISEÑO DE CANAL DE FLUJO PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

El diseño de canales a superficie libre se fundamenta en la hidráulica del flujo gradualmente variado y en la conservación de energía, donde la geometría del canal, la rugosidad y la pendiente controlan la relación entre caudal, tirante y velocidad. A diferencia de los conductos a presión, en los canales abiertos la presencia de una superficie libre introduce un grado adicional de libertad: el tirante se ajusta en función de las condiciones de borde y del régimen de flujo, lo que obliga a emplear criterios específicos para caracterizar el comportamiento hidráulico. En este marco, parámetros como el radio hidráulico, el factor de sección y la pendiente de la línea de energía permiten estimar la capacidad de conducción y el tirante normal mediante formulaciones empíricas como la ecuación de Manning, ampliamente usada en ingeniería por su aplicabilidad en régimen turbulento. Complementariamente, el canal debe integrarse a un sistema de recirculación que garantice suministro continuo y control del caudal. Dicho sistema comprende un tanque de almacenamiento, tuberías de succión e impulsión, accesorios y dispositivos de regulación. La elección de la bomba se determina a partir del caudal de diseño y de la carga total requerida, que incluye la elevación estática y las pérdidas de carga. Una selección adecuada no solo asegura que el caudal objetivo sea alcanzable, sino que también facilita el control operativo y evita condiciones indeseables como cavitación, exceso de turbulencia en la alimentación o inestabilidad del nivel en el tanque. En conjunto, el diseño hidráulico del canal y el diseño del sistema de recirculación constituyen un solo problema de ingeniería, cuya solución debe responder a las restricciones reales de montaje e integración del laboratorio.

En este proyecto, el diseño se ajusta al espacio disponible y a la necesidad de acoplar el canal a una estructura disipadora tipo vórtice ya existente, por lo que se plantea un sistema compacto de dos tramos a superficie libre: un canal superior de alimentación

que conduce el flujo hacia el dissipador y un canal inferior que recibe la descarga y la dirige al retorno. Para favorecer la observación del comportamiento hidráulico y facilitar el control del tirante durante las prácticas, el canal se proyecta con paredes transparentes de acrílico, mientras que su soporte consta de madera y elementos de acero, que aporta rigidez, estabilidad y facilidad al momento de tejer la estructura mediante suelda. El circuito de recirculación se completa con tuberías de PVC para la conducción, un tanque de almacenamiento ubicado en el nivel inferior (debajo de la descarga) y una bomba de recirculación seleccionada según el caudal requerido y la carga total del sistema, considerando la elevación hasta el punto de entrega, las pérdidas por fricción y accesorios, y la necesidad de regulación para operar de forma segura y repetible. De esta manera, el diseño integra criterios hidráulicos y constructivos para lograr un montaje funcional.

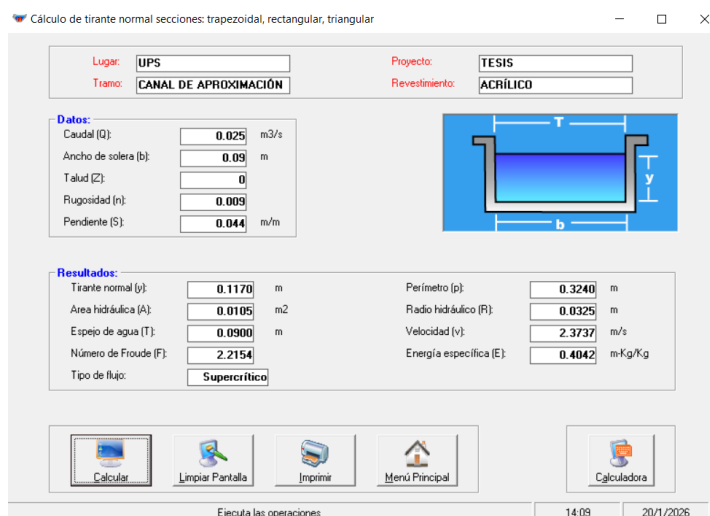
Memoria de cálculo.

Canal de aproximación.

Datos propuestos en función de requerimientos del laboratorio.

Figura 37.

Diseño de 1er tramo de canal de aproximación.



Nota. La imagen corresponde a la interfaz del software Hcanales, que calcula el tirante normal en un canal de aproximación con sección rectangular y revestimiento acrílico. En la pantalla se ingresan las condiciones hidráulicas del tramo y el programa entrega como resultado el tirante, parámetros geométricos e hidráulicos, además de la clasificación del régimen de flujo, indicando que el comportamiento es supercrítico. Elaborado por: El autor a través del uso del programa de diseño Hcanales.

Borde libre.

$$B_L = Y * 30\% = 0.15 * 30\% = 0.045m$$

Altura de canal.

$$Y = 0.12m$$

$$H = Y + B_L = 0.15 + 0.045 = 0.20m$$

Se asume Y=0.15m por adoptar una medida constructiva

Pérdidas de energía en el sistema de recirculación.

$$D = 125mm$$

$$L = 7.5m$$

$$v_c = 0.000001 \frac{m^2}{s}$$

$$e = 0.0015mm$$

$$Q_{dis} = 0.025 \frac{m^3}{s}$$

$$A = \left(\frac{\pi * 0.125^2}{4} \right) = 0.0122m^2$$

$$v = \frac{Q_{dis}}{A} = \frac{0.025}{0.0122} = 2.04 \frac{m}{s}$$

$$R_e = \frac{v * D}{v_c} = 1953003 \text{ Flujo Turbulento}$$

$$\epsilon = \frac{e}{D} = 0.00000984$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left(\frac{\epsilon}{3.71} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0.04052$$

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} = 0.515m$$

Carga de trabajo de la bomba.

$$\Delta h = 1.70m$$

$$Ht = hf + \Delta h = 2.22m$$

Potencia de la bomba.

$$n = 0.65$$

$$Pb = \frac{\rho g Q_{dis} Ht}{n} = 1557.59Watts$$

$$Pb = \frac{Pb}{1000} = 1.56 Kwatts$$

$$Pb = Pb * 1.34 = 2.09 Hp$$

Tanque de almacenamiento.

$$V_{tanque} = 2500 lts$$

Conclusiones del diseño.

Con base en los resultados obtenidos, el canal de aproximación se comporta bajo un régimen supercrítico, condición coherente con la pendiente adoptada y la geometría de la sección rectangular. En este contexto, la definición del borde libre como un porcentaje del tirante de diseño y la determinación de la altura total del canal constituyen un criterio adecuado para garantizar una operación segura, reduciendo el riesgo de desbordamientos, salpicaduras y variaciones locales de la lámina de agua antes del ingreso al dissipador de energía tipo vórtice. Por otra parte, el sistema de recirculación fue dimensionado mediante el análisis de pérdidas de carga por fricción y la carga estática

asociada al desnivel geométrico, permitiendo estimar la carga total de trabajo y, en consecuencia, la potencia requerida de la bomba, la cual se encuentra dentro de un rango técnicamente razonable para abastecer el caudal de diseño. Finalmente, la selección de un tanque comercial de almacenamiento proporciona una capacidad suficiente para la recirculación continua del sistema.

CONCLUSIONES

El presente trabajo de titulación consolidó una propuesta orientada al fortalecimiento de la formación práctica en Hidrología e Hidráulica para la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur, mediante el diseño de un canal de flujo a superficie libre y la elaboración de un manual técnico de laboratorio que estandariza la ejecución de ensayos hidráulicos e hidrológicos.

El canal fue diseñado bajo criterios hidráulicos, geométricos y didácticos, permitiendo reproducir condiciones controladas de flujo y facilitar el análisis experimental de las variables fundamentales. Por su parte, el manual de laboratorio integró fundamentos teóricos, procedimientos operativos y lineamientos para la medición y tratamiento de datos, contribuyendo a obtener resultados más consistentes y confiables.

Los ensayos de aforo de caudal realizados en laboratorio y campo demostraron la aplicabilidad de métodos reconocidos, como el método velocidad-área y el método de trazadores, apoyados por instrumentación especializada. Adicionalmente, la caja de arena con realidad aumentada evidenció su utilidad como herramienta didáctica para la comprensión de procesos hidrológicos y el comportamiento del flujo en una cuenca.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar el canal de flujo a superficie libre diseñado en el presente trabajo, asegurando su correcta construcción, nivelación y mantenimiento, con el fin de preservar las condiciones hidráulicas previstas y garantizar su funcionamiento como herramienta experimental.

Es aconsejable adoptar el manual técnico de laboratorio como documento de referencia para la ejecución de prácticas de Hidrología e Hidráulica, promoviendo su uso sistemático por parte de estudiantes y docentes, así como su actualización periódica en función de nuevas normativas, equipos o requerimientos académicos.

Durante la realización de los ensayos de aforo, se recomienda reforzar la capacitación previa en el manejo de los instrumentos de medición, especialmente en el uso de la sonda ultrasónica FlowTracker2 y equipos empleados en el método de trazadores, con el propósito de minimizar errores operativos y mejorar la calidad de los datos obtenidos.

Para los ensayos de campo, se sugiere seleccionar cuidadosamente los sitios de aforo considerando criterios hidráulicos, normativos y de seguridad, de manera que las mediciones realizadas sean representativas del flujo y se reduzcan las fuentes de incertidumbre.

Finalmente, se sugiere continuar incorporando herramientas didácticas innovadoras, como la caja de arena con realidad aumentada, integrándolas de forma sistemática en las prácticas de laboratorio, debido a su aporte en la comprensión visual y conceptual de los procesos hidráulicos e hidrológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alarcón Quintanilla, J. V., & Chuqui Jami, D. J. (2022). *Diseño de un tablero de visualización de pérdidas de energía en tuberías para el laboratorio de hidráulica, de la carrera de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica Salesiana, Campus Sur*. Universidad Politécnica Salesiana. [Trabajo de titulación, opción Proyecto Técnico, Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23169>
- Consortio de Gobiernos Autónomos Provinciales del Ecuador. (conGope). (2014). *Hablemos de riego*. (1.ª ed.). Editorial El Telégrafo EP.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Editorial McGraw-Hill.
- Domingo, A Martín. (2011). Apuntes de mecánica de fluidos. <https://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- Domínguez, F. J. (1999). *Hidráulica* (2.ª ed.). Editorial Universitaria, Santiago de Chile.
- Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua (IMTA). (1992). *Manual de aforos* (1.ª ed.). Subordinación Editorial: IMTA.
- Instituto Mexicano Del Transporte. (IMT). (2012). Metodología para la medición de la velocidad de flujo en un río en el diagnóstico de la socavación en pilas de un puente, utilizando un dispositivo electrónico. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnicapt356.pdf>
- Fox, Robert, W. & McDonald, Alan, T. (1995). *Introducción a la mecánica de fluidos* (2.ª ed.). Editorial McGraw-Hill.
- Gallego Salguero, Á., & Sánchez Marco, M. (2015). *Manual de topografía en ingeniería* (1.ª ed.). Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- International Organization for Standardization. (2021). *ISO 748:2021. Hydrometry- Measurement of liquid Flow in open channels-Velocity area methods using point velocity measurements*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/72754/c387daa748c74680b4f3e1cc9ea92147/ISO-748-2021.pdf>
- Jara, T. Wilfredo. (1998). *Máquinas Hidráulicas*. Editorial INIFIM.

- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de fluidos* (6.ª ed.). Pearson Educación S.A. de C.V.
- Mosonyi, E. (1991). *Water power development: voll.* Akadémiai Kiadó.
- Organización Meteorológica Mundial. (OMM-N°168). (1994). Guía de prácticas hidrológicas (5.ª ed.).
https://www.academia.edu/14015021/Guia_de_Practicas_Hidrogeologicas_OMM
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2011). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-11: Capítulo 16. Norma Hidrosanitaria NHE Agua*. Editorial: MIDUVI.
- Rocha, A. (2003). *Hidráulica de tuberías y canales*. México: Editorial Limusa.
- Rocha, A. F. (2007). *Hidráulica de tuberías y canales*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Rodríguez, R, P. (2008). *Hidráulica II*.
https://www.academia.edu/25000821/Hidr%C3%A1ulica_de_Canales_Pedro_Rodr%C3%ADguez_Ruiz.
- Sotelo, A. G. (1997). *Hidráulica general* (Vol. 1). Editorial LIMUSA, S.A. de C.V.
- Torres Chamorro, D. N. (2023). *Elaboración de un modelo físico de realidad aumentada para el estudio de la hidrotopografía de una cuenca tipo*. [Trabajo de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito].
<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/25567>
- Villon Béjar, M. (2002). *Hidrología* (1ra ed.). Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Zambrano, M. F., & Gallardo Armijos, P. (2019). *Estimación de pérdidas de carga en tuberías a presión mediante un modelo hidráulico de laboratorio*. [Tesis de Pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manabí].
<https://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/1735>