

Prácticas básicas de laboratorio de flujo a presión para ingeniería civil

Uno de los aspectos fundamentales para entender los conceptos de la mecánica de fluidos, asociados al flujo, es el análisis experimental, puesto que permite contrastar la teoría con la práctica. Este libro permite abordar los conceptos teóricos más relevantes del flujo a presión y comprender su implicación en el diseño de sistemas de tuberías a presión mediante el desarrollo de prácticas de laboratorio.

Además, plantea, de manera simplificada, los conocimientos necesarios para el desarrollo de las prácticas de laboratorio que permiten analizar las pérdidas de energía por fricción que se producen en un flujo a través de sistemas de tuberías a presión y las pérdidas asociadas a la presencia de accesorios en estos sistemas. También se aproxima al análisis de instrumentos que permiten establecer la velocidad del flujo y determinar el correspondiente caudal.

Dirigido a estudiantes de pregrado que requieren en su proceso de formación adquirir conocimientos sobre mediciones de velocidad, caudal y pérdidas de energía en sistemas de tuberías a presión, como es el caso de programas de Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica y afines.

Incluye

- ▶ Recomendaciones generales para el desarrollo de prácticas de laboratorio.
- ▶ Descripción simplificada de los conceptos fundamentales para analizar pérdidas en flujo en tuberías a presión.
- ▶ Desarrollo paso a paso de un conjunto de prácticas de laboratorio y recomendación de formatos para la tabulación de datos.
- ▶ Procedimiento detallado de los cálculos a realizar con los datos de laboratorio e indicaciones para su análisis.

Romel Jesús Gallardo Amaya

Magíster en Geotecnia de la UIS, especialista en Práctica Docente Universitaria de la UFPSO, especialista en Ingeniería Ambiental e Ingeniero Civil de la UIS. Profesor asociado del Departamento de Ingeniería Civil de la UFPSO, donde ha desempeñado cargos como jefe de la División de Posgrados y Educación Continuada, decano de la facultad de ingeniería, director del departamento de Ingeniería Civil, coordinador del Programa de Ingeniería Civil, coordinador de la Especialización en Interventoría de Obras Civiles y de la Maestría en Construcción: Director del grupo de investigación GIGMA, categoría B, e investigador asociado según clasificación de Minciencias.

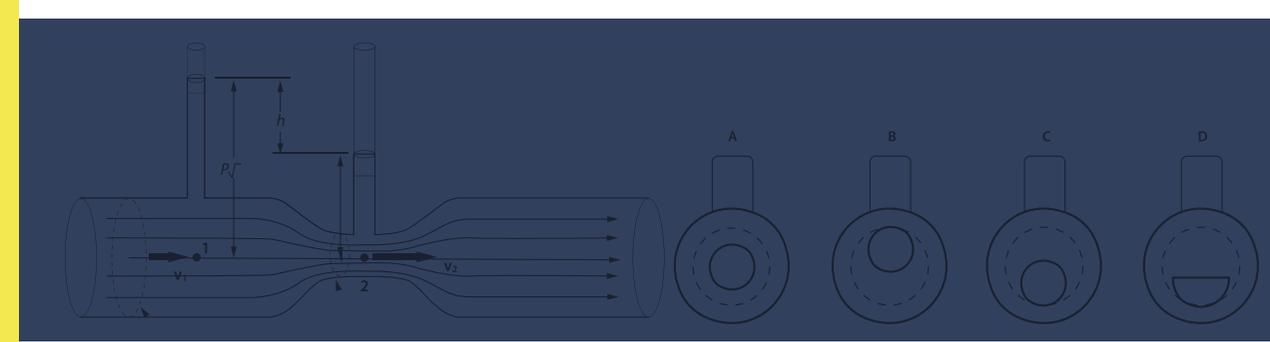
Nelson Afanador García

Doctor en Estructuras de la Universidad de Brasilia (Brasil), magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras de la Uniandes e Ingeniero Civil de la Universidad de La Salle. Profesor Asociado de la UFPSO. Autor de varios artículos y libros, ponente en congresos nacionales e internacionales y miembro del Grupo de Investigación en Tecnología y Desarrollo en Ingeniería (GITYD) de la UFPSO, categoría A según Minciencias.

Gustavo Guerrero Gómez

Magíster en Sistemas Energéticos Avanzados de la UDES, especialista en Práctica Docente Universitaria de la UFPSO e Ingeniero Mecánico de la UFPS. Profesor asociado de la UFPSO. Ha desempeñado cargos como coordinador del Plan de Estudios de Ingeniería Mecánica, jefe de Departamento Ingeniería Mecánica y coordinador de Bienestar Universitario de la UFPSO. Autor de artículos y ponente en eventos nacionales e internacionales. Miembro del grupo de investigación GITYD de la UFPSO, categoría A.

Prácticas básicas de laboratorio de flujo a presión para ingeniería civil



Romel Jesús Gallardo Amaya
Nelson Afanador García
Gustavo Guerrero Gómez



Universidad Francisco
de Paula Santander
Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación



e-ISBN 978-958-503-353-5



Universidad Francisco
de Paula Santander
Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación

**PRÁCTICAS BÁSICAS
DE LABORATORIO DE
FLUJO A PRESIÓN PARA
INGENIERÍA CIVIL**

ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA
NELSON AFANADOR GARCÍA
GUSTAVO GUERRERO GÓMEZ



Área: Ingeniería, Arquitectura, Urbanismo y afines

Subárea: Ingeniería civil



**Universidad Francisco
de Paula Santander**

Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación

© Romel Jesús Gallardo Amaya
© Nelson Afanador García
© Gustavo Guerrero Gómez

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Vía Acolsure, Sede el Algodonal
Ocaña Norte de Santander -
Colombia
Teléfono (057)(7) 5690088
Bogotá, Colombia

► Ecoe Ediciones S.A.S.
info@ecoeediciones.com
www.ecoeediciones.com
Carrera 19 # 63C 32, Tel.: 919 80 02
Bogotá, Colombia

Primera edición: Bogotá, mayo del 2022

ISBN: 978-958-503-352-8
e-ISBN: 978-958-503-353-5

Directora editorial: Claudia Garay Castro
Coordinadora editorial: Paula Bermúdez B.
Corrección de estilo: Nicolás Martínez
Diagramación: Magda Barrero
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz
Impresión: Carvajal Soluciones de
Comunicación S.A.S.
Carrera 69 #15-24

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia–Todos los derechos reservados



DEDICATORIA



*Este libro está dedicado a mis padres y a mi familia,
quienes siempre me han dado su apoyo.*

Romel Jesús Gallardo Amaya

*Este trabajo está dedicado a mis hijas, a mi hijo y a mi esposa,
quienes son el motor de mi trabajo.*

Nelson Afanador García

*Dedico este texto a mi mamá, a mi papá y a mis hermanos,
quienes me han brindado todo su apoyo y respaldo.*

Gustavo Guerrero Gómez

AGRADECIMIENTOS

*A Dios. A mi familia. A la Universidad Francisco de Paula Santander,
Seccional Ocaña.*

Romel Jesús Gallardo Amaya

*A Dios. A la Universidad Francisco de Paula Santander,
Seccional Ocaña.*

Nelson Afanador García

*A mi madre María Elena Gómez de Guerrero y a mi padre Gustavo Guerrero
Farelo. A mis hermanos, Iván Guerrero Gómez y Mario Guerrero Gómez.
A la Universidad Francisco de Paula Santander, Seccional Ocaña. A Dios.*

Gustavo Guerrero Gómez

CONTENIDO

LISTA DE ABREVIATURAS	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
CAPÍTULO 1. RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO	1
1.1. Recomendaciones de ingreso y permanencia.....	1
1.2. Recomendaciones durante la ejecución de la práctica	2
1.3. Recomendaciones para el uso de equipos e implementos de laboratorio	2
1.4. Recomendaciones generales para la toma de datos	2
CAPÍTULO 2. CONCEPTOS BÁSICOS DEL FLUJO A PRESIÓN EN TUBERÍAS...	5
2.1. Sistemas de unidades y conversiones.....	5
2.1.1. Unidades de capacidad	7
2.1.2. Factores de conversión	8
2.2. Pérdidas en el flujo en tuberías.....	9
2.2.1. Pérdidas mayores.....	9
2.2.2. Pérdidas menores.....	12
2.3. Ecuaciones empíricas del flujo a presión	17
2.3.1. Fórmula de Hazen – Williams	17
2.3.2. Fórmula de Manning	18

2.3.3. Fórmula de Hagen - Poiseuille.....	19
2.3.4. Fórmula de Wood.....	20
2.3.5. Fórmula de Barr.....	20
2.3.6. Fórmula de Swamee - Jain.....	21
2.4. Dispositivos para medición de velocidad de flujo	22
2.4.1. Tubo Venturi	22
2.4.2. Placa de orificio	25
2.4.3. Rotámetro.....	28
CAPITULO 3. PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....	29
3.1. Práctica 1. Cálculo de Velocidades a través de Dispositivos en Sistemas a Presión	29
3.1.1. Objetivos.....	29
3.1.2. Equipos	30
3.1.3. Procedimiento.....	35
3.1.4 Modelo tabla de datos a recolectar.....	41
3.1.5. Cálculo tipo para determinar velocidad mediante el venturímetro.....	42
3.1.6. Calculo tipo – Placa de orificio	43
3.1.7. Análisis de datos	45
3.2. Práctica 2. Pérdidas por fricción en sistemas de tuberías	45
3.2.1. Objetivos.....	45
3.2.2. Equipos	45
3.2.3. Procedimiento.....	49
3.2.4. Modelo Tabla de Datos a Recolectar.....	50
3.2.5. Calculo Tipo.....	52
3.2.6. Análisis de datos	53
3.3. Práctica 3. Pérdidas por accesorios en sistemas de tuberías.....	54
3.3.1. Objetivos.....	54
3.3.2. Equipos	54
3.3.3. Procedimiento.....	59
3.3.4. Modelo tabla de datos a recolectar	60
3.3.5. Calculo Tipo.....	63
3.3.6. Análisis de datos	64
BIBLIOGRAFÍA.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Nikuradse.....	12
Figura 2. Diagrama de Moody	14
Figura 3. Accesorios representativos para cálculo de pérdidas menores	15
Figura 4. Comportamiento del flujo en reducciones	16
Figura 5. Comportamiento del flujo en ensanchamientos.....	17
Figura 6. Tubo Venturi en aluminio instalado en banco de flujo a presión	23
Figura 7. Diagrama – Tubo Venturi	23
Figura 8. Coeficiente de descarga para venturímetros y boquillas	25
Figura 9. Placa de Orificio / Platina de orificio instaladas en banco de flujo a presión	26
Figura 10. Tipos de Orificios	26
Figura 11. Coeficiente de descarga para orificios y rotámetros	27
Figura 12. Rotámetro.....	28
Figura 13. Banco de Prueba – Sistema flujo a presión	31

Figura 14. Banco de prueba para las prácticas de flujo a presión.....	32
Figura 15. Línea 3 del sistema	33
Figura 16. Válvulas de globo para control de flujo al inicio de cada una de las líneas del banco de pruebas de flujo a presión.....	34
Figura 17. Bomba del sistema	35
Figura 18. Sistema eléctrico del sistema	36
Figura 19. Tanque elevado del sistema	36
Figura 20. Preparación de la línea de trabajo.....	37
Figura 21. Toma de información en la línea de trabajo	38
Figura 22. Canal de descarga de las líneas del banco de prácticas de flujo a presión	38
Figura 23. Vertedero de cresta delgada con ranura de 45°, para realizar aforo del flujo a través del sistema de tuberías	39
Figura 24. Toma de lectura de la lámina sobre la cresta del vertedero con ranura de 45°	39
Figura 25. Válvulas para toma de lecturas sobre el sistema de flujo a presión	40
Figura 26. Manómetro en U del sistema.....	40
Figura 27. Línea 4 del sistema	47
Figura 28. Línea 5 del sistema	48
Figura 29. Bomba y Sistema eléctrico del sistema - Tanque elevado	49
Figura 30. Vertedero de cresta delgada con ranura de 45°, para realizar aforo del flujo a través del sistema de tuberías	50
Figura 31. Línea 1 del sistema	56
Figura 32. Línea 2 del sistema	57
Figura 33. Línea 3 del sistema	58
Figura 34. Bomba y Sistema eléctrico del sistema - Tanque elevado	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Unidades para dimensiones fundamentales.....	6
Tabla 2.	Unidades secundarias o derivadas.....	6
Tabla 3.	Prefijos en el Sistema Internacional – Símbolos	7
Tabla 4.	Unidades de capacidad.....	8
Tabla 5.	Factores de Conversión usados con frecuencia.....	8
Tabla 6.	Rugosidad absoluta de los materiales.....	11
Tabla 7.	Coeficientes de pérdidas menores en accesorios tipo.....	15
Tabla 8.	Coeficiente de rugosidad “C” de Hazen – Williams de materiales característicos.....	18
Tabla 9.	Coeficiente de rugosidad “n” de Manning de materiales característicos	19
Tabla 10.	Datos a recolectar.....	41
Tabla 11.	Datos para cálculo de velocidad mediante platina de orificio	43
Tabla 12.	Datos a recolectar para estimar las pérdidas en un sistema de tuberías.....	51
Tabla 13.	Datos a recolectar para determinar pérdidas de energía en accesorios.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Área
A_o	Área del orificio
A_T	Área de la sección transversal del depósito
°C	Grados Centígrados
c.p	Centro de presión
Cc	Coeficiente de contracción
Cd	Coeficiente de gasto
Cv	Coeficiente de Velocidad
Dr	Densidad Relativa
S	Densidad Relativa
E	Energía de flujo o Energía específica
Ev	Módulo de compresibilidad
F	Fuerza
F_E	Fuerza de empuje
F_H	Fuerza hidrostática
F_r	Número de Froude
g	Gravedad
HP	Caballos fuerza
J	Pérdida de energía

K	Módulo de compresibilidad
kgf	Kilogramo fuerza
kg-masa	Kilogramo masa
l	Litro
lps	Litros por segundo
m.c.a	Metros de columna de agua
m	Masa
N	Newton
Pa	Pascal
Q	Caudal
q	Flujo por unidad de ancho
R_h	Radio hidráulico
R_e	Número de Reynolds
S.I	Sistema Internacional
s	Segundo
v	Velocidad de flujo
V	Volumen
V_e	Volumen Específico
V_s	Volumen Específico
W	Peso
y	Altura de flujo
z	Cota topográfica
η	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica o absoluta
ρ	Densidad
σ	Tensión superficial
τ	Esfuerzo cortante



INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo de un fluido incompresible, como es el caso del agua, bajo condiciones de flujo a presión hace parte tanto del ámbito de la mecánica de fluidos como de la hidráulica, aun cuando esta última es considerada una aplicación de la primera. Este texto aborda algunas de las prácticas básicas, desarrolladas para analizar conceptos asociados al flujo del agua a través de sistemas de tuberías a presión. En primer lugar, se describen algunas recomendaciones generales a tener en cuenta en el desarrollo de actividades, dentro de un laboratorio de mecánica de fluidos. Posteriormente, se abordan conceptos asociados a la mecánica de fluidos, en particular los relacionados al flujo de fluidos por tuberías, donde se incluyen las fórmulas más comunes para el estudio del flujo a presión. Finalmente, se describen algunas de las prácticas más relevantes para el análisis de flujo del agua a través de tuberías a presión.

Todos los conceptos básicos, descritos en los tres capítulos que componen este libro, serán indispensables para que el lector pueda abordar de forma adecuada cada una de las prácticas de laboratorio planteadas. Cada práctica consta de una estructura conformada por sus objetivos y es seguida por una lista de equipos, montaje experimental, procedimiento, plantilla para toma de datos y calculo tipo, con lo cual el lector podrá reforzar cada uno de los conceptos teóricos descritos al inicio de cada capítulo.

Muchos de los conceptos, ecuaciones y aplicaciones importantes para describir el flujo a presión han sido tratados de forma simplificada, ya que el diseño de este texto tiene como objetivo principal desplegar solamente lo requerido en la formación académica básica de un ingeniero civil y, por ende, no busca adoptar un enfoque de aplicaciones avanzadas del campo de la mecánica de fluidos.

CAPÍTULO 1

RECOMENDACIONES PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Esta sección tiene por objeto realizar una serie de recomendaciones generales, necesarias para el desarrollo de cada una de las prácticas planteadas para el análisis del flujo a presión, de modo que se cumplan las normas mínimas de permanencia en un laboratorio, se haga un adecuado uso y cuidado de los equipos y, por último, que los datos recolectados permitan un adecuado análisis de los conceptos que se abordan con cada práctica.

1.1. Recomendaciones de ingreso y permanencia

- A. Planificar las actividades a desarrollar para cada una de las prácticas de laboratorio, realizando lecturas complementarias que permitan reforzar y aclarar los conceptos que serán aplicados en el desarrollo de las mismas.
- B. Llegar puntual y con actitud positiva a cada una de las prácticas de laboratorio, ya que esto permitirá adquirir de forma adecuada los temas a tratar en cada una de las actividades.
- C. Respetar las normas de seguridad establecidas por la institución en lo que respecta al uso de instalaciones para el desarrollo de prácticas de laboratorio. Usar vestuario cómodo acompañado de los respectivos elementos de protección personal, tales como calzado cerrado, protección auditiva, bata

manga larga y gafas de uso industrial. Lo anterior evitará complicaciones ante un evento en las instalaciones del laboratorio, donde se vea comprometido la integridad física de los asistentes.

- D. Evitar consumir alimentos o bebidas dentro de las instalaciones del laboratorio.

1.2. Recomendaciones durante la ejecución de la práctica

- A. Mantener aseados los equipos e instalaciones del laboratorio, disponer de los residuos sólidos en los recipientes destinados para tal fin, después de terminar cada una de las prácticas.
- B. Identificar las salidas de emergencia, así como la localización de extintores y botiquín dentro de las instalaciones, esto con el fin de actuar de forma adecuada ante cualquier imprevisto que involucre la integridad física de los asistentes.

1.3. Recomendaciones para el uso de equipos e implementos de laboratorio

- A. Hacer un buen uso del banco de flujo a presión, así como de las instalaciones del laboratorio, esto con el fin de conservar todo en buen estado. Recordar que en un laboratorio el desarrollo de prácticas es permanente, por lo cual los equipos y el espacio físico serán utilizados por otros grupos de estudiantes.
- B. Manipular los bancos de ensayo es responsabilidad del personal a cargo de las actividades del laboratorio, por lo tanto, hay que evitar manipular equipos fuera del alcance de dicho personal, así como de válvulas y soporte eléctrico que pueda existir en las instalaciones.
- C. Evitar manipular el sistema de manómetros del banco de tuberías o el tablero del sistema de bombeo sin la previa autorización y/o acompañamiento del personal responsable del laboratorio.

1.4. Recomendaciones generales para la toma de datos

Durante la realización de las prácticas de laboratorio se debe tener, además de una buena actitud, responsabilidad y atención para seguir cada una de las indicaciones que realice el personal responsable del laboratorio, para lo cual se hace necesario tener en cuenta las siguientes apreciaciones de orden general.

- a. Salir sin justificación de las instalaciones del laboratorio, mientras se está explicando el procedimiento para la realización de una práctica, podría llevar

- a no tener en cuenta recomendaciones de seguridad en la manipulación de equipos e implementos y cuidados en la toma de datos.
- b. Realizar las respectivas tomas de datos de forma ordenada es fundamental, ya que esto permitirá una fácil comprensión durante el procesamiento de los mismos, así como ayudará a tener en cuenta las unidades y el número de cifras significativas.

CAPÍTULO 2

CONCEPTOS BÁSICOS DEL FLUJO A PRESIÓN EN TUBERÍAS

La unidad 2 tiene como propósito el estudio experimental de las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios que hacen parte de un sistema de tuberías. Inicialmente se definirán los diferentes sistemas de unidades, mediante los cuales se establecen las variables que se analizan en el flujo a presión y las correspondientes conversiones entre dichos sistemas. Posteriormente, se realizará una conceptualización de los principios generales que se aplican al análisis del flujo a presión en las prácticas de laboratorio.

2.1. Sistemas de unidades y conversiones

Teniendo en cuenta que en el desarrollo de las prácticas de laboratorio se analizarán diferentes variables relacionadas con el flujo a presión, es necesario hacer un repaso de las principales unidades con las que se definen estas variables y los sistemas de unidades más utilizados, que son el CGS, el Sistema Inglés y el Sistema Internacional, siendo este último, a partir del año 1971, considerado el sistema universal de unidades.

En la Tabla 1, el lector encontrará una compilación de las unidades fundamentales o básicas en cada uno de los tres sistemas de unidades (CGS, inglés e internacional).

Tabla 1. Unidades para dimensiones fundamentales

Sistema	Longitud	Tiempo	Masa	Temperatura
Internacional	Metro (m)*	Segundo (s)*	Kilogramo (kg)*	Kelvin (°K)
CGS	Centímetro (cm)*	Segundo (s)*	Gramo (g)*	Kelvin (°K)
Inglés	Pie (ft)*	Segundo (s)*	Libra - masa (lbm)*	Rankine (°R)

* Símbolo de la unidad

Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 2, se encuentran las unidades secundarias o derivadas, las cuales son definidas a partir del uso de dimensiones básicas; estas unidades son estructuradas basadas en leyes o definiciones.

Tabla 2. Unidades secundarias o derivadas

Dimensión	Sistema		
	Internacional	CGS	Inglés
Velocidad	m/s	cm/s	Pie/s
Volumen	m ³	cm ³	pie ³
Fuerza	Newton (N)*	dina	Libra - Fuerza (lbf)*
Presión	Pascal = N/m ² (Pa)*	dina/cm ² (baría)*	lbf/pie ²
Caudal	m ³ /s	cm ³ /s	pie ³ /s
Energía	Joule (J)*	Ergio (erg)*	poundal*pie (pd*ft)*
Potencia	Watt = J/s (W)*	ergio/s	lbf*pie/s
Viscosidad	Pa*s	poise	lbf*s/pie ²
Viscosidad cinemática	m ² /s	Stoke	pie ² /s

* Símbolo de Unidad

Fuente: elaboración propia.

Para el caso particular de la unidad de fuerza en el Sistema Internacional, esta se define a partir de las dimensiones básicas de masa, longitud y tiempo; este último se define en función de la Segunda Ley de Newton, donde $Fuerza = masa \times aceleración$. Por lo cual, la fuerza se expresa de la siguiente forma: $N = kg \times m/s^2$. La equivalencia de dicha unidad en el Sistema Inglés está dada por: $1N = 0,224809 \text{ lbf}$.

Con mucha frecuencia, las cantidades secundarias expresan cantidades muy grandes o muy pequeñas para lo cual es necesario el uso de prefijos, permitiendo así una mejor lectura o descripción de dichos valores. En la Tabla 3 se describen algunos prefijos y símbolos usados frecuentemente en el sistema internacional.

Tabla 3. Prefijos en el Sistema Internacional – Símbolos

Prefijo	Factor multiplicador	Símbolo
exa	1000000000000000000 = 10^{18}	E
peta	1000000000000000 = 10^{15}	P
tera	1000000000000 = 10^{12}	T
giga	1000000000 = 10^9	G
mega	1000000 = 10^6	M
kilo	1000 = 10^3	k
hecto	100 = 10^2	h
deca	10	da
deci	0.1 = 10^{-1}	d
centi	0.01 = 10^{-2}	c
mili	0.001 = 10^{-3}	m
micro	0.000001 = 10^{-6}	μ
nano	0.000000001 = 10^{-9}	n
pico	0.000000000001 = 10^{-12}	p
fento	0.000000000000001 = 10^{-15}	f
atto	0.000000000000000001 = 10^{-18}	a

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Unidades de capacidad

En algunos casos, es propio expresar algunas unidades de volumen, siendo estas referidas al espacio que ocupa un cuerpo, con algunas unidades denominadas de capacidad, debido a que guardan una estrecha relación, ya que, en este caso en particular, capacidad se refiere al espacio vacío de una cosa que es suficiente para contener a otra. Uno de los casos más recurrentes en la mecánica de fluidos y la hidráulica es el uso de la unidad de litro para definir el caudal que fluye por algún sistema a presión o libre, siendo este expresado por ejemplo como 20 litros por segundo = 20 l/s.

En la Tabla 4, se muestra un breve resumen de algunas equivalencias de unidades de capacidad expresada en unidades de litros.

Tabla 4. Unidades de capacidad

Nombre	Símbolo	Equivalencia en litros
kilolitro	kl	1000 L
hectolitro	hl	100 L
decalitro	dal	10 L
litro	l	1 L
decilitro	dl	0,1 L
centilitro	cl	0,01 L
mililitro	ml	0,001 L

Fuente: elaboración propia.

2.1.2. Factores de conversión

En la Tabla 5, el lector encontrará un resumen general de los factores de conversión entre los diferentes sistemas unidades, usados con mayor frecuencia en la mecánica de fluidos y la hidráulica.

Tabla 5. Factores de Conversión usados con frecuencia

Magnitud	al Sistema internacional
Longitud	1 in = 25,40 mm
	1 pie = 0,3048 m
	1 mi = 1,609 km
Volumen	1 in ³ = 16,39 x 10 ³ mm ³
	1 pie ³ = 0,02832 m ³
	1 gal = 3,785 L
masa	1 lbm = 0,454 kg
Fuerza	1 lbf = 4,448 N
Presión o esfuerzo	1 psi = 6,895 kPa
	1 ksi = 6,895 kPa
Potencia	1 pie*lbf/s = 1,356 W
	1 hp = 746 W

Otros factores - útiles
1 litro = 1 L = 1000 ml = 1000 cm ³
1 ml = 1 cm ³
1 galón = 1 gal = 231 in ³
1 pie ³ = 7,48 gal
1 poise = 0,1 kg/(m*s)
1 stoke = 0,0001m ² /s
1 bar = 10 ⁵ Pa
1 atmosfera = 1 atm = 1,01325 bar
1 atm = 101.325 Pa
1 caballo de fuerza = 1 hp = 550 pie*lb/s
1 milla = 1 mi = 5280 pies
1 kilogramo fuerza = 1 kgf = 9,806 N

Fuente: elaboración propia.

2.2. Pérdidas en el flujo en tuberías

Las pérdidas que se presentan cuando un fluido se mueve a través de una tubería corresponden a pérdidas por fricción o, como se definen en Cengel y Cimbala (2004), pérdidas de carga, comúnmente conocidas por otros autores como “pérdidas mayores”, correspondientes a las que se presentan en los tramos de tubería, y como “pérdidas menores” para las correspondientes a los accesorios del sistema de tuberías.

2.2.1. Pérdidas mayores

Las Pérdidas Mayores se presentan por la resistencia que se genera al movimiento de un fluido, en un sistema cerrado de tuberías, la cual convierte parte de la energía del sistema en energía térmica (calor), que se disipa a través de las paredes de las tuberías por donde circula el fluido. Esta pérdida igualmente se puede considerar como la energía que se requiere para vencer los esfuerzos de corte en un determinado sistema. Estas Pérdidas Mayores se expresan, según Darcy, en función de la cabeza de velocidad $v^2/2g$, el cociente de la longitud sobre el diámetro del tramo de estudio (L/D) y una constante de fricción f , de acuerdo a la Ecuación 1 descrita en White (2004).

$$h_f = f \frac{v^2}{2 \times g} \times \frac{L}{D}$$

Ecuación 1

Donde:

h_f = pérdida de carga debido a la fricción

f = factor de Fricción de Darcy

$v^2/2g$ = cabeza de velocidad

L/D = relación entre la longitud de la tubería y el diámetro

La constante de fricción depende de dos variables adimensionales: el número de Reynolds y la relación entre la rugosidad interna (ϵ) y el diámetro del ducto (D). Al momento de determinar el número de Reynolds, se deben tener en cuenta consideraciones como el régimen de flujo, ya que este se puede adoptar de tipo laminar (regular), debido a que las fuerzas de inercia del fluido son muy bajas conllevando, de esta manera, que la viscosidad del fluido sea de carácter dominante o de tipo turbulento (caótico), en donde sucede todo lo contrario, ya que las fuerzas que dominan el régimen son las de inercia, correspondiendo, como lo define Fernández (2018), en un flujo de movimiento irregular.

Para estimar el valor del número de Reynolds en conductos circulares se puede usar la Ecuación 2 mostrada por Mott (2012).

$$Re = \frac{v \times D}{\eta} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

v = velocidad del flujo

D = diámetro nominal del conducto

η = viscosidad cinemática del fluido

Para el respectivo análisis del tipo de flujo se debe considerar lo siguiente:

Si $Re < 2000$ el flujo es de tipo laminar

Si $Re > 4000$ el flujo es de tipo turbulento

Sin embargo, en el rango de 2000 a 4000 el número de Reynolds toma una consideración difícil para predecir el tipo de flujo, por lo que a este rango se le considera zona crítica de análisis.

Con el tipo de flujo establecido se puede hacer uso de las ecuaciones 3 y 4 para el respectivo cálculo del factor de fricción.

- Flujos laminares. El factor de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds.

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Re: Numero de Reynolds

- Flujos turbulentos. se puede usar la expresión de Colebrook – White, la cual permite estimar el valor del coeficiente de fricción o rozamiento usado en la ecuación de Darcy.

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \frac{D}{\varepsilon} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

D = Diámetro nominal de la tubería

ε = Rugosidad del material

En la Tabla 6 se puede ver los registros de valores característicos de rugosidad de algunos materiales.

Tabla 6. Rugosidad absoluta de los materiales

Material	ε (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,0100
Tubos estirados de acero	0,0024
Tubos de latón de cobre	0,0015
Fundición revestida de cemento	0,0024
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024
Fundición centrífuga	0,0030
Fundición asfáltica	0,06 - 0,18
Fundición	0,12 - 0,60
Acero comercial y soldado	0,03 - 0,09
Hierro forjado	0,03 - 0,09
Hierro galvanizado	0,06 - 0,024
Madera	0,18 - 0,9
Hormigón	0,3 - 3,0

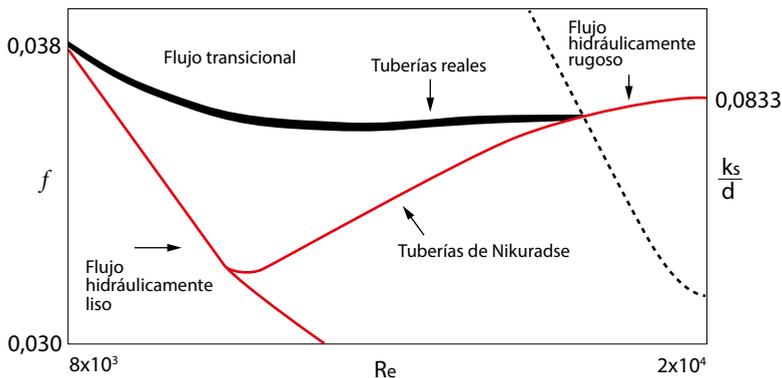
Fuente: obtenido de <https://tinyurl.com/2btmmd8d>.

El diagrama Nikuradse es un método gráfico que permite estimar el coeficiente de fricción de tuberías a partir de la relación que existe entre la rugosidad y el diámetro. La limitante de este diagrama es que no incluye el análisis de los flujos en transición, por lo que no es posible involucrar las ecuaciones de Prandtl y Von

Kármán. Asimismo, es de reconocer que los flujos de transición son los que con más frecuencia se encuentran en los análisis de tuberías cerradas.

En la Figura 1 se puede ver una parte del diagrama de Nikuradse, donde se observa la diferencia que existe entre el comportamiento de los tubos reales versus los tubos de Nikuradse.

Figura 1. Diagrama de Nikuradse



Fuente: Saldarriaga (2007).

Existe de igual forma un método gráfico, el *diagrama de Moody*, el cual permite estimar el valor de f de forma directa a partir de la relación ε/D (relación entre la rugosidad del material y el diámetro) y el número de Reynolds. En este diagrama se evalúa, a través de una representación log – log, el factor de fricción frente al número de Reynolds, tomando como referencia la relación ε/D ; sobre dicho gráfico se distinguen cinco zonas que corresponden a los regímenes de flujo en el cual el factor de fricción f puede adoptar valores para cada uno de los casos. En la Figura 2 se puede observar el diagrama de Moody.

2.2.2. Pérdidas menores

En el flujo de un fluido en un sistema de tuberías a presión también se deben contemplar las pérdidas generadas por accesorios en el sistema. Estas pérdidas son consideradas como “pérdidas menores” ya que, comparadas con las pérdidas por fricción, ellas son notoriamente inferiores. Por lo general este tipo de pérdidas están asociadas a las que se producen en válvulas y accesorios como: téns, codos, aberturas graduales o súbitas entre otros; se generan por cambio de dirección y de velocidad del fluido y se pueden estimar según la Ecuación 5, como el producto de una constante K por el gradiente de velocidad ($v^2/2g$) del fluido sobre estos elementos.

$$h_f = K \frac{v^2}{2 \times g}$$

Ecuación 5

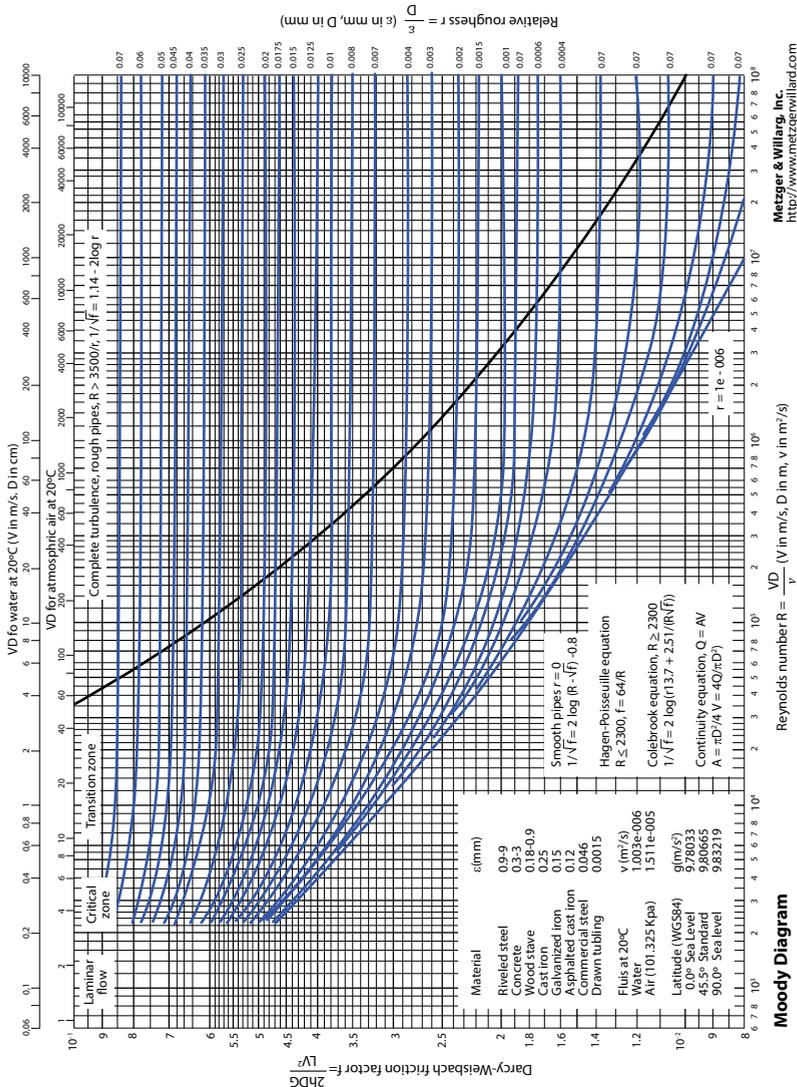
Donde:

K = coeficiente de pérdidas

v = velocidad del flujo

g = aceleración de la gravedad

Figura 2. Diagrama de Moody



Fuente: obtenido de <https://tinyurl.com/2w3zdrph>.

En la Figura 3, se pueden apreciar algunos de los accesorios más representativos en el estudio de pérdidas menores.

Figura 3. Accesorios representativos para cálculo de pérdidas menores

Codo 90°	Codo 45	Adaptador macho	Uniones
			
			
Tees	Tapones roscados	Adaptador hembra	Cruz

Fuente: obtenido de <https://tinyurl.com/4fa5f43k>.

En la Tabla 7, se muestran los coeficientes para cálculo de pérdidas de algunos accesorios más utilizados.

Tabla 7. Coeficientes de pérdidas menores en accesorios tipo

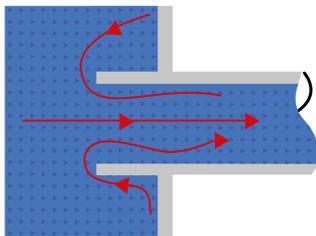
Componente	K
Codos	
Radio corto 90° con brida o extremo liso	0,3
Radio corto 90° extremos roscados	1,5
Radio largo 90° con brida o extremo liso	0,2
Radio largo 90° extremos roscados	0,7
Radio largo 45° con brida	0,2
Radio corto 45° extremos roscados	0,4
Curvas	
Curvas a 180° con bridas	0,2
Curvas a 180° con extremos roscados	1,5
Tés	
Paso directo con bridas o extremos lisos	0,2
Paso directo con extremos roscados	0,9
Salida de lado con bridas o extremos lisos	1
salida de lado con extremos roscados	2

Componente	K
Uniones	
Unión con extremos roscados	0,08
Válvulas	
Globo totalmente abierta	10
Angulo totalmente abierta	2
Compuerta totalmente abierta	0,15
Compuerta 1/4 cerrada	0,26
Compuerta 1/2 cerrada	2,1
Compuerta 3/4 cerrada	17
Cheque en el sentido del flujo	2
Bola totalmente abierta	0,05
Bola 1/3 cerrada	5,5
Bola 2/3 cerrada	2,15

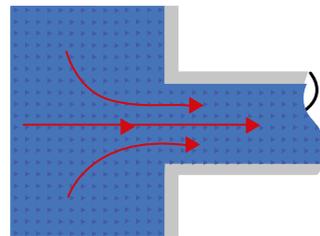
Fuente: obtenido de <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/presentacion1.pdf>.

En las figuras 4 y 5, se aprecian los coeficientes para el cálculo de pérdidas en reducciones o ensanchamientos.

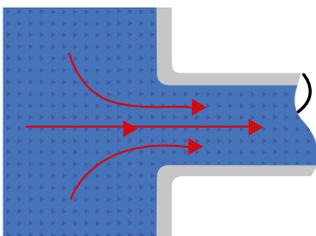
Figura 4. Comportamiento del flujo en reducciones



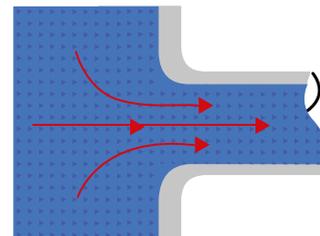
Re-entrante $k_l:0,5$



Borde ahusado $k_l:0,5$

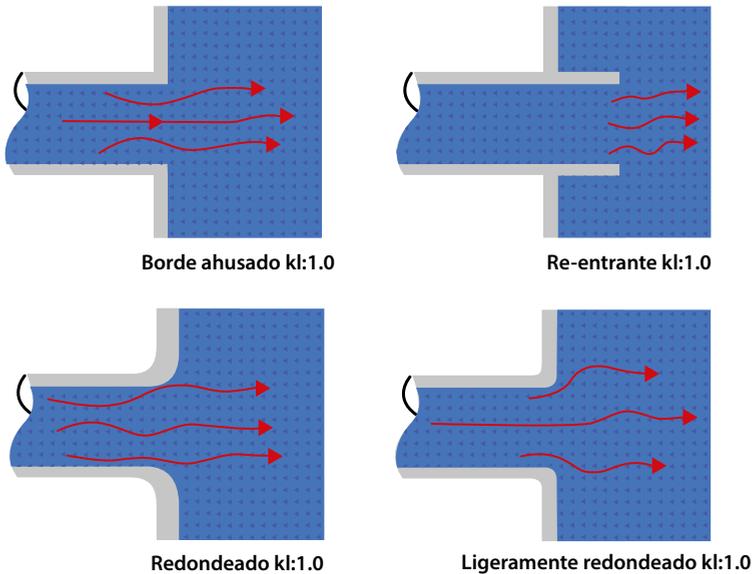


Ligeramente redondeado $k_l:0,2$



Redondeado $k_l:0,04$

Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Comportamiento del flujo en ensanchamientos

Fuente: elaboración propia.

2.3. Ecuaciones empíricas del flujo a presión

En la actualidad, se disponen de varias fórmulas aproximadas para resolver problemas de flujo en conductos cerrados, a continuación, se muestran algunas de las más usadas.

2.3.1. Fórmula de Hazen – Williams

Es una de las fórmulas más utilizadas para resolver diseños de sistemas de alimentación de agua, a través de conductos cerrados, como podemos ver en la Ecuación 6, para determinar la velocidad del flujo conocidas las pérdidas, y en la Ecuación 7 definida en PAVCO (2020). La fórmula es sencilla y su aplicación es simple. El coeficiente de rugosidad “C” que maneja no está en función ni de la velocidad ni del diámetro del conducto, además es utilizada con frecuencia para cálculos de pérdidas en redes de distribución con diversos materiales.

$$v = 0,8494 \times C \times \left(\frac{D}{4}\right)^{0,63} \times \left(\frac{h_f}{L}\right)^{0,54} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$h_f = 10,675 \times \frac{L}{D^{4,87}} \times \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,85} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

L = longitud de la tubería en metros (m)

D = diámetro de la tubería en metros (m)

C = coeficiente de rugosidad de Hazen Williams

Q = caudal en metros cúbicos sobre segundo (m^3/s)

En la Tabla 8, se muestran diversos valores para el coeficiente C según el tipo de material de la tubería.

Tabla 8. Coeficiente de rugosidad "C" de Hazen – Williams de materiales característicos

Material	C
Asbesto cemento	140
Hierro galvanizado	120
Latón	130 - 140
Vidrio	140
Ladrillo de saneamiento	100
Plomo	130 - 140
Hierro fundido, Nuevo	130
Plástico (PE, PVC)	140 - 150
Hierro fundido, 10 años de edad	107 - 113
Hierro fundido, 20 años de edad	89 - 100
Hierro fundido, 30 años de edad	75 - 90
Tubería lisa, nueva	140 - 150
Acero	130
Acero rolado	110
Concreto	120 - 140
Lata	130
Cobre	130 - 140
Madera	120
Hierro dúctil	120
Hormigón	120 - 140

Fuente: obtenido en <https://tinyurl.com/4hph5cb2>.

2.3.2. Fórmula de Manning

Esta fórmula es considerada una evolución de la planteada por Chezy para el cálculo de velocidades en canales abiertos y conductos cerrados, ver Ecuación 8.

$$v = \frac{1}{n} \times (R_h)^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación: 8

Donde:

n = coeficiente de rugosidad de Manning adimensional.

Rh = radio hidráulico (m)

S = pendiente del conducto (m/m)

En la tabla 9 se muestran valores del coeficiente “n” para diversos materiales.

Tabla 9. Coeficiente de rugosidad “n” de Manning de materiales característicos

Material	n		
	Mínimo	Normal	Máximo
Metal			
Latón liso	0,009	0,001	0,013
Acero estriado y soldado	0,010	0,012	0,014
Acero ribeteado y en espiral	0,013	0,016	0,017
Hierro Fundido recubierto	0,010	0,013	0,014
Hierro fundido no recubierto	0,011	0,014	0,015
Hierro forjado negro	0,012	0,014	0,015
Hierro forjado galvanizado	0,013	0,016	0,017
Metal corrugado, Sub - drenaje	0,017	0,019	0,021
Metal corrugado, drenaje de aguas lluvias	0,021	0,024	0,030
No Metal			
Lucita	0,008	0,009	0,001
Vidrio	0,009	0,001	0,013
Cemento superficie pulida	0,001	0,011	0,013
Cemento, Mortero	0,011	0,013	0,015

Fuente: Chow (1994).

2.3.3. Fórmula de Hagen - Poiseuille

Esta fórmula recibe el nombre en honor a los dos investigadores que participaron en el proceso de deducción de una ecuación para definir la velocidad en flujos laminares, con una buena aproximación para flujo uniforme (permanente), unidimensional en tuberías cerradas. Tal como se encuentra en Streeter et al. (2000), la forma más común de la fórmula es la indicada en la Ecuación 9.

$$Q = \frac{\pi \times D^4}{128 \times \mu \times l} \times \Delta P$$

Ecuación: 9

Donde:

μ = viscosidad dinámica del fluido en $N \cdot s/m^2$

D = diámetro de la tubería en metros (m)

ΔP = caída de presión en N/m^2

2.3.4. Fórmula de Wood

Formulada en el año de 1960, en la Universidad de Kentucky por el ingeniero Donald Wood, es una ecuación donde el factor de fricción de Darcy se encuentra en función de la rugosidad relativa y el número de Reynolds. El planteamiento es totalmente diferente a la de Colebrook - White, pero, al evaluarla realizando comparación de resultados con la de Moody, deja en evidencia que la ecuación de Wood es menos precisa, ya que es útil para valores de rugosidades relativas superiores a los 10^{-5} y número de Reynolds entre el rango de 3×10^4 y 10^7 , ver Ecuación 10.

$$f = a + b \times Re^{-c} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$$a = 0,094 \times \left(\frac{K_s}{d}\right)^{0,225} + 0,053 \times \frac{K_s}{d}$$

$$b = 88 \times \left(\frac{K_s}{d}\right)^{0,44}$$

$$c = 1,62 \times \left(\frac{K_s}{d}\right)^{0,134}$$

K_s = rugosidad absoluta de la tubería

D = diámetro de la tubería en metros (m)

Re = número de Reynolds

2.3.5. Fórmula de Barr

Es una ecuación que fue usada con frecuencia antes de la llegada de los computadores, en la cual se establecía el comportamiento del coeficiente de fricción de Darcy. Es de resaltar que, para el caso de la fórmula de Barr, el coeficiente de fricción no es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, sino que se estableció como una función explícita del caudal, de la pendiente de fricción, de la aceleración de la gravedad, de la rugosidad absoluta y de la viscosidad cinemática. Los resultados comparados a los obtenidos a partir del uso de la ecuación de Colebrook - White dejan en evidencia un margen de error considerable, ver Ecuación 11.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log_{10} \left(\left(\frac{A}{\Pi_1^B} \right) + \left(\frac{C}{\Pi_2^D} \times E \right) \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde

$$A = 0,325 \times 0,027 \text{Log}_{10} \Pi_1$$

$$B = 0,93 \times 0,0068 \text{Log}_{10} \Pi_1$$

$$C = 2,95 \times 0,29 \text{Log}_{10} \Pi_2$$

$$D = 0,914 \times 0,0052 \text{Log}_{10} \Pi_2$$

$$E = 1 + \left(\frac{\Pi_2^{0,44}}{11 \Pi_1^{0,54}} \right)$$

$$\Pi_1 = \frac{0,958866 \times Q^{\frac{2}{5}}}{\left(\frac{h_f}{l} * g \right)^{\frac{1}{3}} \times K_s}$$

$$\Pi_2 = \frac{1,32786 \times Q^{\frac{3}{5}} \times \left(\frac{h_f}{l} \times g \right)^{\frac{1}{5}}}{\mu}$$

Q = caudal en (m³/s)

μ = viscosidad dinámica

$\frac{h_f}{l}$ = pendiente

K_s = rugosidad absoluta

g = aceleración de la gravedad en m/s²

2.3.6. Fórmula de Swamee - Jain

Ecuación desarrollada en el año 1976 por los ingenieros Prabhata K. Swamee y Akalank K. Jain, los cuales resolvieron la ecuación de Colebrook - White calculando el factor de fricción en los diferentes extremos del flujo turbulento. Las ecuaciones formuladas por los investigadores corresponden a las ecuaciones 12a y 12b, que posteriormente se condensaron en la Ecuación 12c a partir de la solución de Colebrook - White.

Flujo Turbulento - Rugoso

$$f = \frac{0,25}{\left[\text{Log} \left(\frac{k_s}{3,7 \times d} \right) \right]^2}$$

Ecuación 12a

Flujo Turbulento – Liso

$$f = \frac{0,25}{\left[\text{Log} \left(\frac{5,74}{Re^{6,9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 12b}$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\text{Log} \left(\left(\frac{k_s}{3,7 \times d} \right) + \frac{5,74}{Re^{6,9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 12c}$$

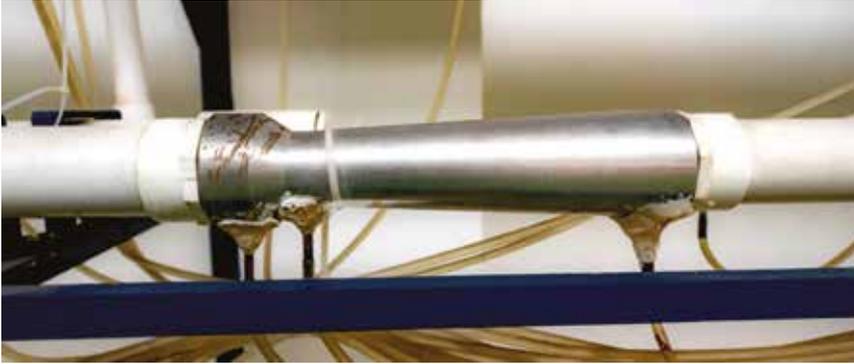
La ecuación finalmente encontrada a partir de la investigación de los ingenieros Swamee – Jain y correlacionada con los obtenidos a partir del uso de la ecuación de Colebrook- White en rangos de $10^{-6} < K_s/d < 10^{-2}$ y para $5 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^8$, se llegó a la conclusión que solo existe un rango de error del 1%.

2.4. Dispositivos para medición de velocidad de flujo

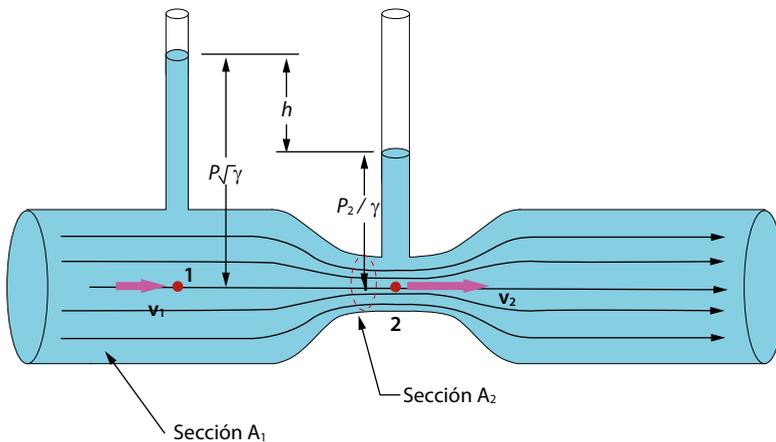
Los dispositivos de medición de velocidad o caudal, instalados sobre líneas de corriente de un fluido, dependen en gran medida, para su elección, de factores como rango, exactitud requerida, pérdida de presión, tipo de fluido a medir y calibración. Los dispositivos de medición de velocidad se pueden clasificar en dos grandes grupos: medidores de cabeza variable, entre los que se encuentra el tubo Venturi, placa de orificios y los de medición de área variable, donde se destaca el rotámetro. A continuación, se encuentra una descripción general de algunos de los dispositivos más utilizados en las prácticas de laboratorio.

2.4.1. Tubo Venturi

Este medidor es uno de las más representativos y exactos a la hora de realizar aforos sobre conductos cerrados, ya que tiene una mínima pérdida de presión permanente, permitiendo el paso del fluido 1,6 veces más que una placa de orificio; está compuesto por tres secciones, una convergente con un ángulo inferior a 7° , una sección intermedia que constituye la garganta y una divergente. Este es un dispositivo diseñado para separar las capas próximas a los bordes y, en consecuencia, para producir arrastre. El cambio de sección de la parte convergente a la garganta produce un cambio de presión el cual permite estimar el caudal a partir de dicha caída, aunque se asimila a la placa de orificios tiene una pérdida mucho menor, ver figuras 6 y 7.

Figura 6. Tubo Venturi en aluminio instalado en banco de flujo a presión

Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Diagrama – Tubo Venturi

Fuente: elaboración propia.

Para realizar los respectivos cálculos de la velocidad del flujo, se puede establecer el siguiente procedimiento:

- La ley de conservación de masa establece que toda masa que pasa a través de conducto cerrado debe ser igual, lo que entra a lo que sale; en su defecto, el flujo que pasa a través de este dispositivo debe cumplir la Ecuación 13.

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 \quad \text{Ecuación 13}$$

- Teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por Giles (1996), al aplicar el teorema de Bernoulli en dos puntos del dispositivo (Convergente – Garganta), se tiene la expresión de la Ecuación 14.

$$p_1/\gamma + (z_1) + \left(v_1^2/2g\right) = p_2/\gamma + (z_2) + \left(v_2^2/2g\right) \quad \text{Ecuación 14}$$

- Si los puntos se encuentran a la misma altura, esto indica que tienen igual presión, la Ecuación 14 se reduce a la Ecuación 14a.

$$p_1/\gamma + \left(v_1^2/2g\right) = p_2/\gamma + \left(v_2^2/2g\right) \quad \text{Ecuación 14a}$$

- Ordenando términos en función de la velocidad y realizado una sustitución de variables se tiene la Ecuación 14b.

$$v_1^2 \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right) = \frac{2 \times g \times (p_2 - p_1)}{\gamma} \quad \text{Ecuación 14b}$$

- Despejando la velocidad se obtiene la Ecuación 14c.

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \times g \times (p_1 - p_2)}{\gamma \times (A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 14c}$$

Donde:

A_1 = área de sección transversal mayor (ver Figura 7).

A_2 = área de sección transversal menor, zona de la contracción (ver Figura 7).

P_1 = presión en la sección 1 del venturímetro, sección antes de la reducción.

P_2 = presión en la sección 2 del venturímetro, sección de la reducción.

γ = peso específico del fluido.

g = aceleración de la gravedad.

- Para el cálculo de caudal a través del dispositivo, haciendo uso de manómetros para estimar la diferencia de presiones, la expresión simplificada corresponde a la Ecuación 14d.

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = A_1 \times A_2 \times \sqrt{\frac{2 \times (g \times h)}{(A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 14d}$$

Siendo h la altura de caída de presión entre las secciones 1 y 2 del venturímetro, equivalente al término $\frac{p_2 - p_1}{\gamma}$ de la Ecuación 14c.

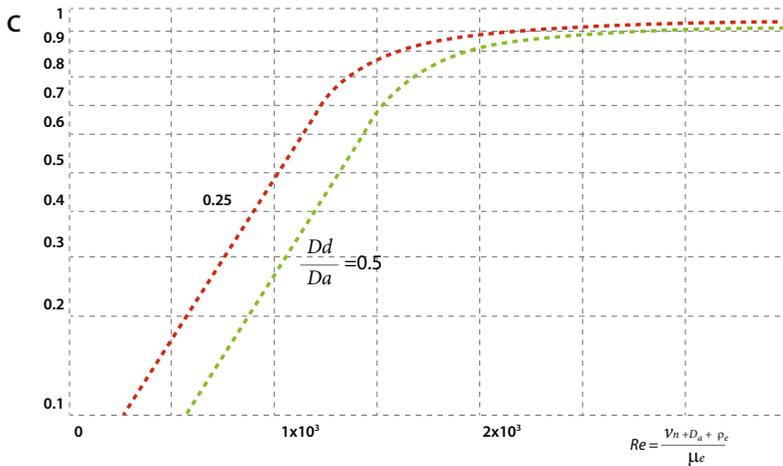
- En caso de considerar las pérdidas por fricción, se debe considerar un coeficiente de descarga (C_v), así se obtiene la Ecuación 15. El valor promedio de C_v es de 0,98.

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = C_v \times (A_1 \times A_2) \times \sqrt{\frac{2 \times (g \times h)}{(A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Para el cálculo del coeficiente de descarga en venturímetros y boquillas, se cuenta con la Figura 8, en la cual se puede observar que los valores de C_v presentan una notable variación respecto a 1 en la zona laminar, mientras que en la región turbulenta crece notablemente aproximándose a 1, valor que se mantiene constante en un valor promedio de 0,98 como se había expresado anteriormente. Las pérdidas medidas sobre manómetros se pueden considerar como permanentes y no requieren un ajuste, por lo que se cumple lo indicado en la Ecuación 16.

$$\Delta p_{\text{permanente}} = \Delta p_{\text{medido}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Figura 8. Coeficiente de descarga para venturímetros y boquillas



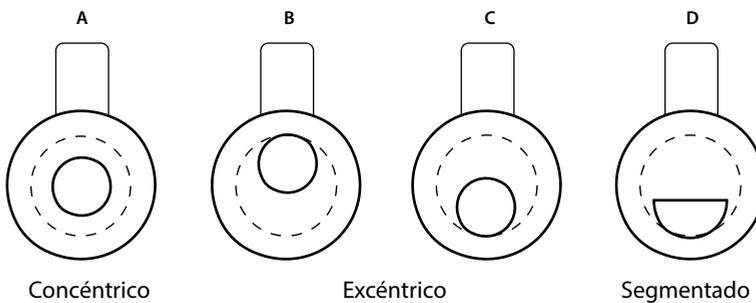
Fuente: obtenido de <https://tinyurl.com/4s4tsu34>.

2.4.2. Placa de orificio:

Es uno de los dispositivos más comunes y confiables para medir flujo a través de conductos cerrados, consiste en una reducción en la sección de flujo de una tubería de modo que se produzca una caída de presión a consecuencia del aumento de velocidad, ver figuras 9 y 10.

Figura 9. Placa de Orificio / Platina de orificio instaladas en banco de flujo a presión

Fuente: Figura izquierda: obtenida de <https://tinyurl.com/um85n622> – Figura derecha: elaboración propia.

Figura 10. Tipos de Orificios

Fuente: adaptado de <https://tinyurl.com/2p936b55>.

Los cálculos para determinar la velocidad del flujo con este dispositivo son similares a los indicados anteriormente para el Venturi. La expresión que permite realizar el cálculo de velocidad corresponde a la Ecuación 17.

$$v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2 \times g \times (p_2 - p_1)}{\gamma \times (A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde:

A_1 = área del orificio

A_2 = área de la sección transversal de la tubería

Considerando las pérdidas por fricción y haciendo algunas sustituciones, se tiene la Ecuación 18 para determinar el caudal.

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = C_o \times (A_1 \times A_2) \times \sqrt{\frac{2 \times (g \times h)}{\gamma \times (A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde

C_o = coeficiente de orificio o coeficiente de descarga.

$$C_o = \frac{Q \times (1 - \beta^4)}{A_2 \times \left[2 \times g \times \Delta z \times \left(\frac{\rho_m - \rho}{\rho} \right) \right]^{0,5}} \quad \text{Ecuación 18a}$$

En la Ecuación 18a se tiene: Q = *cuadal en cm³/s*

g = *aceleración de la gravedad en cm/s²*

ρ_m = *densidad del mercurio en g/cm³*

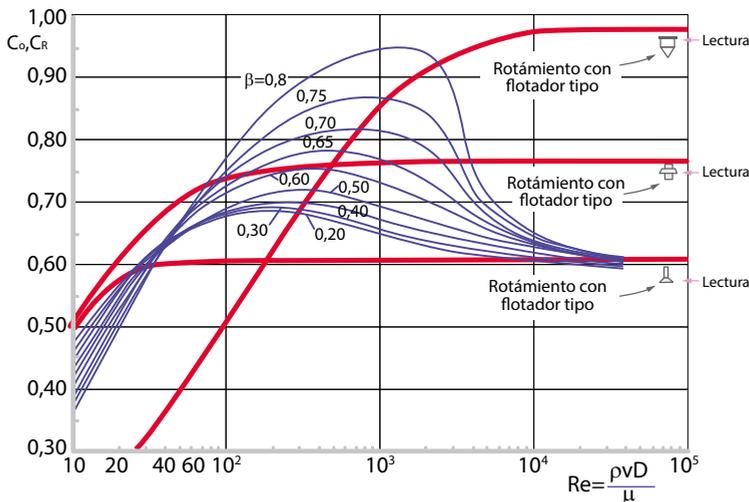
ρ = *densidad del agua = 1g/cm³*

$\Delta z = h = (p_2 - p_1)$ = *caída de presión en cm*

El coeficiente de descarga C_o , en orificios concéntricos y de bordes afilados con número de Reynolds mayor a 20000, presenta una variación entre 0,60 a 0,62. Mediante la Figura 11 se puede estimar el valor de este coeficiente, teniendo en cuenta la Ecuación 18a. La toma de la respectiva información antes de la platina se debe realizar a una longitud de un diámetro de la tubería medido desde la cara del orificio y después de la platina a una distancia de 0.5 veces el diámetro de la tubería. Constantemente los diámetros de los oricios oscilan en rangos entre el 50% a 75% del diámetro de la tubería de donde se instala el dispositivo. Las pérdidas permanentes por fricción se estiman a partir de la Ecuación 19.

$$\Delta p_{\text{permanente}} = \Delta p_{\text{medido}} \times \left[1 - \left(\frac{D_o}{D_2} \right)^2 \right] \quad \text{Ecuación 19}$$

Figura 11. Coeficiente de descarga para orificios y rotámetros



Fuente: Adaptado de <https://tinyurl.com/bzpza2w>.

2.4.3. Rotámetro

Es un flotador que se desliza sobre un tubo cónico, con la sección de menor diámetro en la parte inferior. Su funcionamiento se realiza haciendo pasar el fluido por la parte inferior del tubo cónico, el cual genera una fuerza ascendente sobre el flotador; al subir el flotador, se permite que pase determinado flujo entre el área que conforma las paredes del tubo y el flotador. En algún momento, el flotador permanecerá estacionario ya que existirá un equilibrio entre el peso de este y la fuerza gravitacional, ocasionado por la caída de presión en dicho ensanchamiento; dicha pérdida se mantiene constante sobre el intervalo de paso del fluido para una altura constante del flotador. El tubo cónico que contiene al flotador lleva una escala lineal con su respectiva unidad de medida que indica la cantidad de flujo o en su defecto el porcentaje de flujo máximo, ver Figura 12.

Figura 12. Rotámetro



Fuente: obtenido de <https://tinyurl.com/8ztc448w>.

CAPÍTULO 3

PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Con el objeto de aplicar las diferentes ecuaciones y conceptos definidos anteriormente, se plantean una serie de prácticas de laboratorio mediante las cuales se realizará el cálculo de caudal a través de dispositivos como lo son el venturímetro y la placa de orificio, así como la estimación de pérdidas por fricción y aditamentos (accesorios), a través de 5 diferentes líneas de tuberías con las cuales cuenta el banco de flujo a presión utilizado para el desarrollo de las prácticas definidas en este texto. En el desarrollo de cada práctica se establecen los objetivos, equipos a utilizar, procedimiento, instructivos y formatos para recolección de datos, cálculo tipo y finalmente procesamiento de información y los resultados correspondientes.

3.1. Práctica 1. Cálculo de Velocidades a través de Dispositivos en Sistemas a Presión

3.1.1. Objetivos

Objetivo general:

Calcular las velocidades en un sistema de flujo a presión a través de dispositivos como el venturímetro y la placa de orificio.

Objetivos específicos:

- Calcular las velocidades a través del uso de dispositivos como el venturímetro y placa de orificio.
- Comparar los resultados obtenidos con los de un aforo a través de un vertedero triangular.

3.1.2. Equipos

Para el desarrollo de la práctica de laboratorio se usa un banco de prueba, que consiste en un sistema de tuberías con flujo a presión ver Figura 13 y Figura 14. Para el desarrollo de la práctica en específico se utiliza la denominada línea 3 del sistema, ver Figura 15, dotada con los siguientes accesorios:

- Válvulas de globo
- Tubo Venturi
- Placa de Orificio
- Uniones mecánicas
- Uniones no mecánicas
- Codos
- Dispositivo para medir caída de presión, el cual contiene tablero con manómetro en “U” ocupado con mercurio, juego de válvulas que comunican las líneas con el tablero de toma de lecturas del manómetro, a través de mangueras ajustadas en puntos clave de lectura, permitiendo medir caídas de presión en aditamentos como en tramos de tubería.

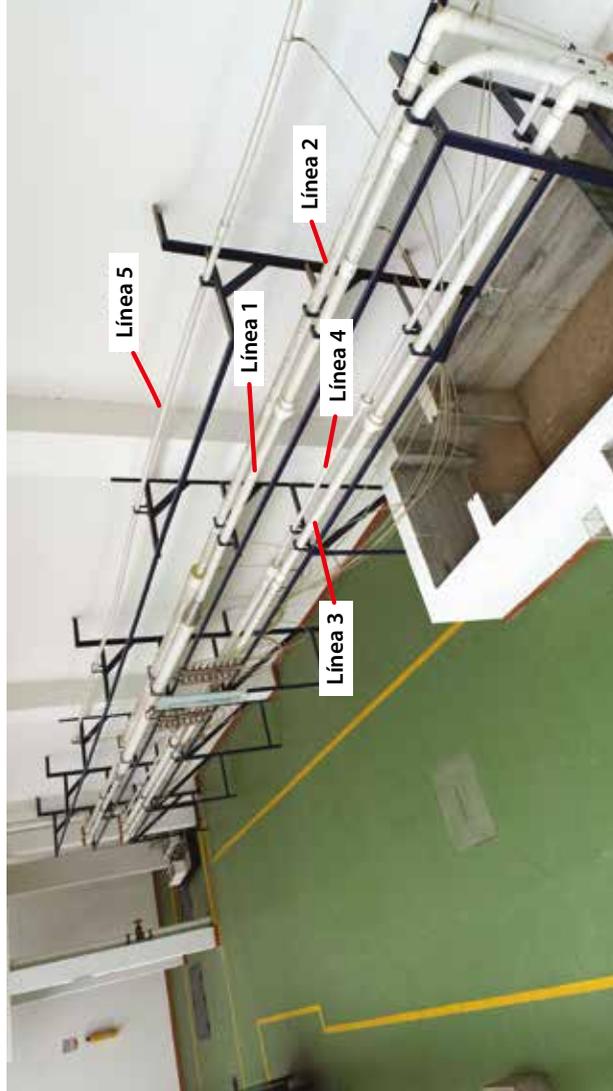
En la Figura 15, se detalla la línea 3 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, ver Figura 16, seguido de un dispositivo tipo venturímetro, con el cual se espera estimar el caudal de forma teórica a través de dicho elemento, así como la caída de presión que se tiene por el paso del fluido. Posteriormente se encuentran unas placas de orificio con el cual se espera estimar el caudal y las caídas de presión debido a dicho dispositivo. Siguiendo el recorrido de la línea se encuentran unión con soldadura donde se evalúa la pérdida en este tipo de accesorio, finalmente se encuentra un cambio de dirección a través de un codo de 90° y una válvula de evacuación del fluido en el depósito de control.

Figura 13. Banco de Prueba – Sistema flujo a presión



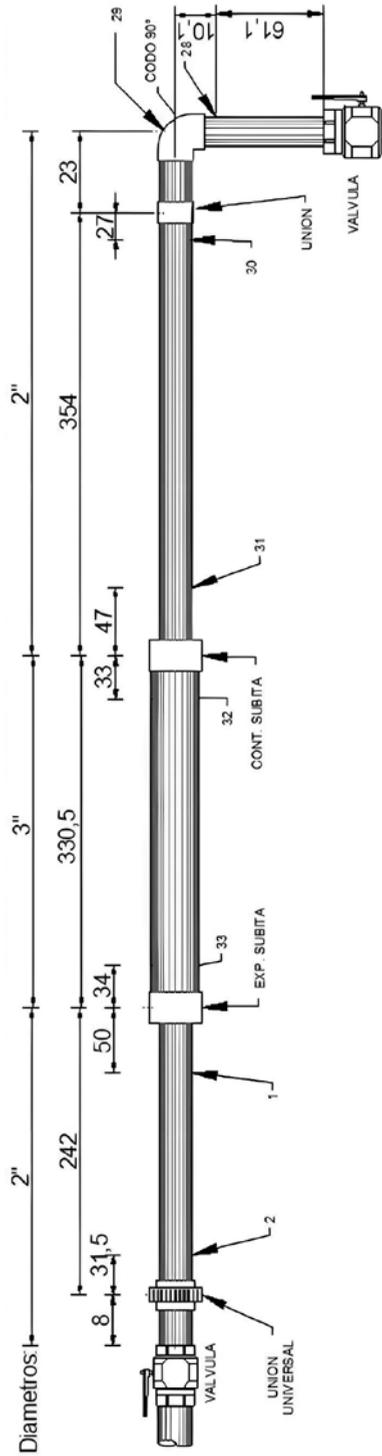
Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Banco de prueba para las prácticas de flujo a presión



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Línea 3 del sistema



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. Válvulas de globo para control de flujo al inicio de cada una de las líneas del banco de pruebas de flujo a presión



Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Procedimiento

Paso 1. Verificar el sistema de bombeo y el nivel de los tanques, ya que la práctica hace uso de la carga constante del tanque elevado del sistema, ver figuras 17, 18 y 19.

Figura 17. Bomba del sistema



Fuente: elaboración propia.

La motobomba, que es el corazón del sistema de bombeo, posee las siguientes características:

- Marca: Pedrollo italiana
- Tipo de bomba: Centrífuga
- Materiales construcción: hierro fundido
- Tipo de impulsor: cerrado
- Tipo de sello: mecánico
- Diámetro succión x descarga: 4" x 3"
- Potencia motora: 15 HP
- Velocidad: 3600 R.P.M.
- Máximo caudal: 4000 L.P.M.
- Máxima altura: 25 m

Figura 18. Sistema eléctrico del sistema

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Tanque elevado del sistema

Fuente: elaboración propia.

Este es un tanque fabricado en polietileno de alta densidad - HDPE-, utilizando la técnica de *rotomoldeo*, la cual, entre otras particularidades, está protegida de la acción de los rayos ultravioleta, no genera color, olor ni sabor al producto almacenado, no se oxidan ni se corroen y no requieren mantenimiento.

El tanque de almacenamiento elevado -T.E.- posee una capacidad de almacenaje de 4000 litros, que rebasa sobradamente las necesidades de almacenamiento requeridos por los bancos de estudio de flujos a presión, que es el banco que requiere una cabeza hidráulica y una presión constante (según el diseño se necesita $2,0 \text{ m}^3$).

Paso 2. Seleccionar la línea sobre la cual se tomarán los registros, para este caso en especial se trabaja con la línea 3, línea donde se encuentran los dispositivos. Para ello se debe verificar que las válvulas de las otras 4 líneas se encuentren cerradas, ver Figura 20.

Figura 20. Preparación de la línea de trabajo



Fuente: elaboración propia.

Paso 3. Tomar las medidas y características de cada uno de dispositivos (Venturímetro – Placa de Orificio) que hacen parte de la línea. Abrir la válvula de entrada, ver Figura 21.

Figura 21. Toma de información en la línea de trabajo

Fuente: elaboración propia.

Paso 4. Abrir la válvula de entrada. Una vez comience a moverse el flujo por la tubería, hay que esperar a que este se estabilice. El caudal de agua que circula por la tubería será descargado en un canal de pendiente constante, donde se realizará el aforo por medio de un vertedero triangular de cresta delgada. Se deberá tomar la lectura de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero por medio de un piezómetro, el cual se encuentra ubicado al lado de dicho vertedero, ver figuras 22, 23 y 24.

Figura 22. Canal de descarga de las líneas del banco de prácticas de flujo a presión

Fuente: elaboración propia.

Figura 23. Vertedero de cresta delgada con ranura de 45°, para realizar aforo del flujo a través del sistema de tuberías



Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Toma de lectura de la lámina sobre la cresta del vertedero con ranura de 45°

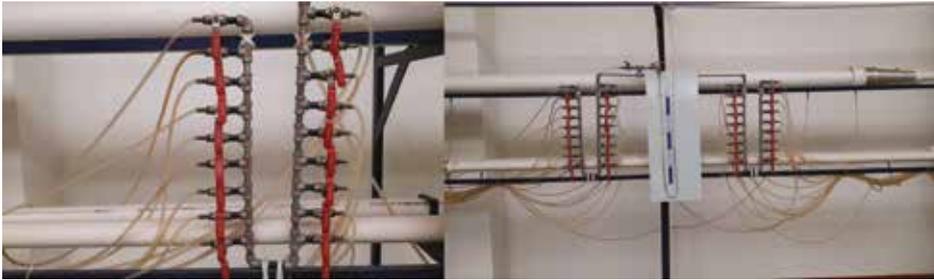


Fuente: elaboración propia.

Paso 5. Para medir la caída de presión, el banco de flujo a presión cuenta con una serie de mangueras conectadas a puntos específicos en toda la longitud de cada ramal y, en su otro extremo, conectadas a un sistema de válvulas y a un tablero de lectura. Este sistema a su vez se conecta a un manómetro en “U” que contiene mercurio para las respectivas lecturas de caída de presión (Figura 25 y Figura 26). Durante el desarrollo de la práctica se debe seleccionar el dispositivo sobre el cual se realizará la toma de lecturas (venturímetro o placa de orificio), esto con el

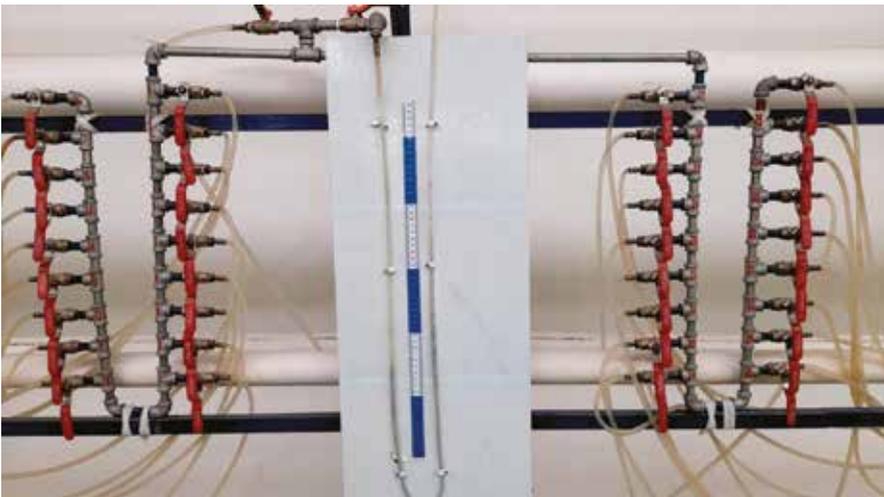
objetivo de identificar las válvulas que se deben utilizar para la medida de la caída de presión. Antes de comenzar a operar el sistema de válvulas, se recomienda realizar una purga del posible aire dentro de las válvulas. Las válvulas correspondientes al tramo de tubería, accesorio o instrumento de medida de velocidad, sobre el que se realizará la toma de datos, se abren simultáneamente, se deja estabilizar el flujo y posteriormente se procede a realizar la lectura sobre el manómetro que indica la caída de presión que se presenta en el flujo entre los dos (2) puntos de control.

Figura 25. Válvulas para toma de lecturas sobre el sistema de flujo a presión



Fuente: elaboración propia.

Figura 26. Manómetro en U del sistema



Fuente: elaboración propia.

Paso 6. Realizar los pasos anteriores variando el dispositivo de medición de velocidad con el objetivo de conocer y comparar los resultados de velocidad del flujo.

Paso 7. Con el objetivo de variar los caudales que se mueven por el tramo de tuberías, donde se encuentran los dispositivos medidores de velocidad, se cuenta con una válvula de globo al inicio del tramo, la válvula se manipula a cada $\frac{1}{4}$ de abertura de la totalidad de la misma, logrando obtener cuatro caudales diferentes para cada proceso de análisis.

3.1.4 Modelo tabla de datos a recolectar

Utilizando la plantilla mostrada en la Tabla 10 se recolectarán datos para tres caudales diferentes.

Cálculo de la velocidad del flujo mediante de un venturímetro. Para los 3 caudales regulados mediante la abertura de la válvula de globo, ubicada al inicio de la línea 3 del sistema de tuberías, se procede a realizar la toma de lecturas necesarias para la determinación de la velocidad del flujo. En la Tabla 10, se recolectarán los datos correspondientes al venturímetro. Además, se muestran datos típicos para uno de los caudales.

Tabla 10. Datos a recolectar

Nombre del Dispositivo		# Lectura	# Piezómetro	Lectura de manómetro Izquierdo [m] (1)	Lectura de manómetro Derecho [m] (2)	Y [m] (1) - (2)	Lectura del vertedero [m]
Venturímetro		1	12 - 13	0,035	0,135	0,10	0,11
Diámetro en Pulgadas							
Entrada	Salida	2					
2"	1"						
Placa de Orificio		3					
Diámetro en Pulgadas							
Material							
ACERO							

Fuente: elaboración propia.

3.1.5. Cálculo tipo para determinar velocidad mediante el venturímetro

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 10 se tiene:

Zona 1 - Línea 3

- Sector: Uno (1) Piezómetros 12 y 13
- Dispositivo: venturímetro
- Ecuación para cálculo de velocidad del Equipo: se tiene la Ecuación 14c

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \times (p_2 - p_1) \times (g * \rho)}{\rho \times (A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 14c}$$

- *Datos del canal de Aforo.* Cada una de las 5 líneas, que conforman el banco de prácticas para flujo a presión, descargan en un canal de concreto de sección rectangular, con altura 0,64 m, ancho de 1,07 m y largo de 2,68 m, en el cual se ha instalado un dispositivo tipo malla para estabilizar el flujo en el canal. Posteriormente se tiene un vertedero triangular de cresta delgada construido en acrílico.
- *Equipo de Aforo.* Vertedero Triangular de cresta delgada, ver Figura 24.

Remplazando los datos siguientes en la Ecuación 14d, sin considerar las pérdidas por fricción (sin incluir el coeficiente C_v), se tiene:

$$A_1 = 0,0020 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,00050 \text{ m}^2$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$P_2 - P_1 = 0,1 \text{ m}$$

$$v_1 = 1,46 \text{ m/s}$$

$$Q = 1,46 \text{ m/s} * 0,0020 \text{ m}^2 = 0,0029 \text{ m}^3/\text{s} = 2,92 \text{ l/s}$$

En caso de considerar las pérdidas por fricción, se debe considerar un coeficiente de descarga (C_v), como se indica en la Ecuación 14d. El valor promedio de es de 0,98.

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2 = C_v \times (A_1 \times A_2) * \sqrt{\frac{2 \times (g \times h)}{(A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 14d}$$

$$Q = 0,98 \times 2,92 \text{ l/s} = 2,86 \text{ l/s}$$

- Caudal obtenido del aforo a través del uso del vertedero triangular. De acuerdo a Marbello (2005), para determinar el caudal que fluye a través del vertedero se utiliza la Ecuación 20.

$$Q_t = \frac{8}{15} \times Cd \times \tan \frac{\theta}{2} \times \sqrt{2 \times g} \times H^{\frac{5}{2}}$$

Ecuación 20

Donde:

C_d = coeficiente de descarga del vertedero, se tomará un valor de 0,64.

ϕ = ángulo de la ranura del vertedero

g = aceleración de la gravedad en m/s

H = altura del agua sobre la cresta del vertedero en metros

Datos del aforo

$H = 0,11$ m

Reemplazando en la Ecuación 20:

$Q_t = 0,00249$ m³/s = 2,49 l/s

3.1.6. Calculo tipo – Placa de orificio

Análisis para determinar velocidad mediante una placa de Orificio

Para los 3 caudales regulados mediante la abertura de la válvula de globo, ubicada al inicio de la línea 3 del sistema de tuberías, se procede a realizar la toma de lecturas necesarias para la determinación de la velocidad del flujo. En la Tabla 11, se coleccionarán los datos correspondientes a la placa de orificio. Además, se muestran datos típicos para uno de los caudales.

Tabla 11. Datos para cálculo de velocidad mediante platina de orificio

Nombre del Dispositivo		# Lectura	# Piezómetro	Lectura de manómetro izquierdo [m] (1)	Lectura de manómetro Derecho [m] (2)	Y [m] (1) – (2)	Lectura del vertedero [m]
Venturímetro		1	19 – 20	0,035	0,197	0,162	0,11
Diámetro en Pulgadas							
Entrada	Salida	2					
Placa de Orificio		3					
Diámetro en Pulgadas							
2"							
Material							
ACERO							

Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 11 se tiene:

Zona 2

- Sector: Uno (1) Piezómetros 19 y20
- Dispositivo: Placa de Orificio
- Ecuación para cálculo de velocidad del Equipo:

$$v_1 = A_2 \sqrt{\frac{2 \times g \times (p_2 - p_1)}{\gamma \times (A_1^2 - A_2^2)}} \quad \text{Ecuación 17}$$

- *Datos del canal de Aforo.* Cada una de las 5 líneas, que conforman el banco de prácticas para flujo a presión, descargan en un canal de concreto de sección rectangular, con altura 0,64 m, ancho de 1,07 m y largo de 2,68 m, en el cual se ha instalado un dispositivo tipo malla para estabilizar el flujo en el canal. Posteriormente, se tiene un vertedero triangular de cresta delgada construido en acrílico.
- *Equipo de Aforo.* Vertedero Triangular de cresta delgada, ver Figura 24.

Remplazando en la Ecuación 18, sin considerar el coeficiente de descarga C_o , se tiene:

$$A_1 = 0,0020 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,00050 \text{ m}^2$$

$$g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$P_2 - P_1 = 0,162 \text{ m}$$

$$C_o = 0,6 \text{ Coeficiente de descarga}$$

$$v_1 = 1,853 \text{ m/s}$$

$$Q = 1,853 \text{ m/s} \times 0,0020 \text{ m}^2 = 0,0037 \text{ m}^3/\text{s} = 3,76 \text{ l/s}$$

Considerando las pérdidas por fricción, acorde a la Ecuación 18, se determina el correspondiente caudal para un C_o de 0,60.

$$Q = 0,6 \times 3,76 \text{ l/s} = 2,25 \text{ l/s}$$

- Caudal obtenido del aforo a través del uso del vertedero triangular. Para determinar el caudal que fluye a través del vertedero se utiliza la Ecuación 20.

Datos del aforo

$$H = 0,11 \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 20:

$$Q_t = 0,00249 \text{ m}^3/\text{s} = 2,49 \text{ l/s}$$

3.1.7. Análisis de datos

Se deberá realizar la comparación entre los valores de velocidad y caudal, determinados mediante los dispositivos de medición tipo venturímetro y platina de orificios. Por otro lado, se deberá comparar el caudal determinado con cada uno de estos dispositivos y el calculado mediante el vertedero triangular de cresta delgada. El análisis deberá incluir la determinación de los porcentajes de error y la descripción de las posibles causas de la discrepancia entre los valores calculados con cada uno de los dispositivos, así como evaluar ventajas y desventajas de cada uno y su aplicabilidad.

3.2. Práctica 2. Pérdidas por fricción en sistemas de tuberías

3.2.1. Objetivos

Objetivo general

Visualizar los diferentes procedimientos que permitan la obtención de variables para el cálculo de pérdidas por fricción en un sistema de tuberías.

Objetivos específicos

- Calcular las pérdidas por fricción o principales en un sistema de tuberías.
- Estimar los coeficientes de pérdidas de Darcy - Weisbach.

3.2.2. Equipos

Para el desarrollo de la práctica de laboratorio se usa un banco de prueba, que consiste en un sistema de tuberías con flujo a presión, ver Figura 13, dotado con los siguientes accesorios:

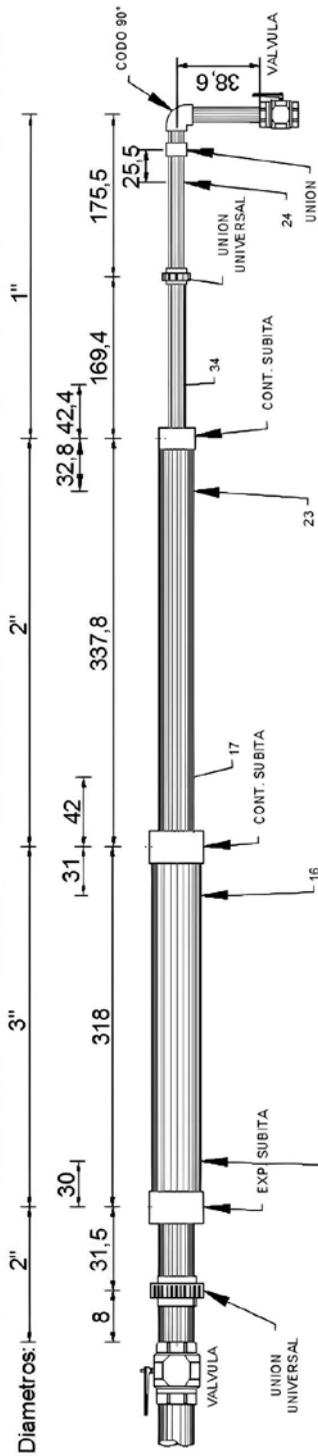
- Contracción y Expansión gradual
- Válvulas de globo
- Tubo Venturi
- Placa de Orificio
- Uniones mecánicas
- Uniones no mecánicas
- Codos

- Contracción y Expansión súbita
- Dispositivo para medir caída de presión, el cual contiene tablero con manómetro en “U” con mercurio, juego de válvulas que comunican las líneas con el tablero de toma de lecturas del manómetro, a través de mangueras ajustadas en puntos clave de lectura, permitiendo medir caídas de presión en accesorios y en los tramos de tubería.

En las figuras 14 y 27 se detalla la línea 4 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, seguidamente se encuentran una expansión súbita de 2” a 3” y una reducción súbita de 3” a 2”. En ambos accesorios se evalúan las pérdidas con ayuda del sistema de mangueras y manómetro de tubo en U. Posteriormente, se encuentra una expansión súbita de 2” a 1”; siguiendo el recorrido de la línea se encuentran de forma simultánea una unión mecánica y unión con soldadura, finalmente se encuentra un cambio de dirección a través de un codo de 90° y una válvula que controla la descarga del flujo en el depósito para control del flujo.

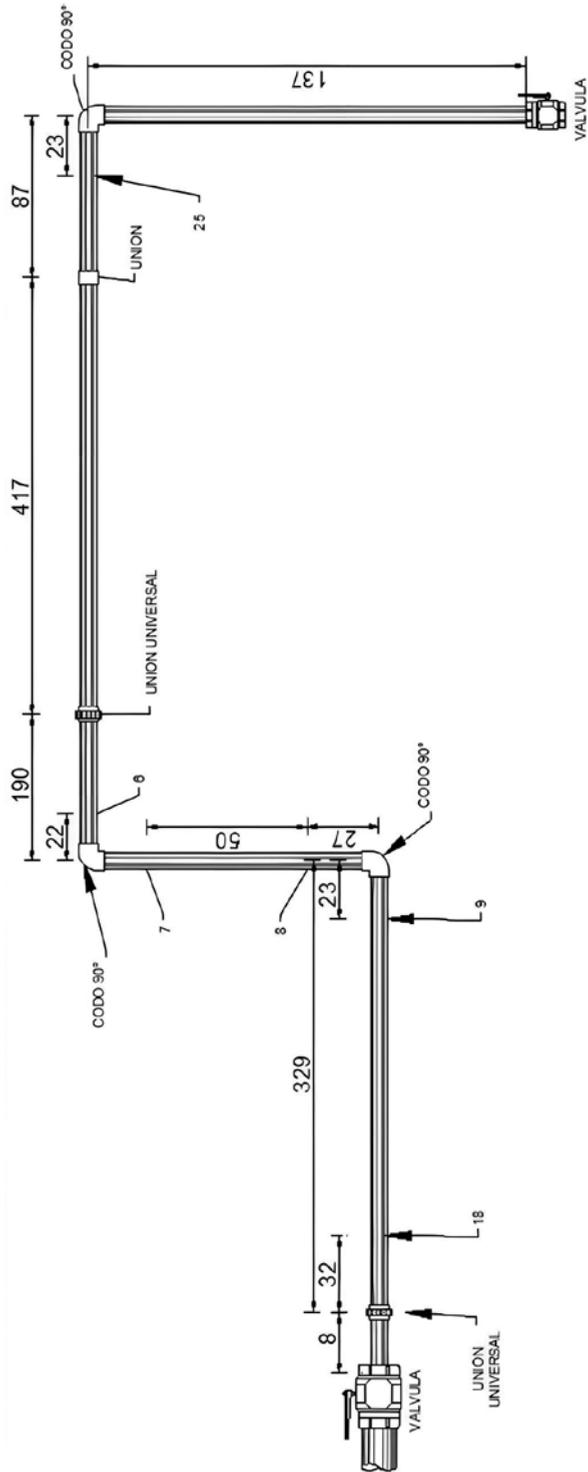
Por otro lado, en las figuras 14 y 28 se detalla la línea 5 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, seguidamente se encuentran dos codos de 90° que permiten el cambio de dirección del flujo, siguiendo el recorrido de la línea se encuentran de forma simultánea una unión mecánica y unión con soldadura, luego se encuentra un nuevo cambio de dirección del flujo a través de un codo de 90° y una válvula de evacuación del fluido en el depósito de control.

Figura 27. Línea 4 del sistema



Fuente: elaboración propia.

Figura 28. Línea 5 del sistema



Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Procedimiento

Paso 1. Verificar el sistema de bombeo y el nivel de los tanques, ya que la práctica hace uso de la carga constante del tanque elevado del sistema, ver Figura 29.

Figura 29. Bomba y Sistema eléctrico del sistema - Tanque elevado



Fuente: elaboración propia.

Paso 2. Seleccionar la línea sobre la cual se tomarán los registros. Para ello se debe verificar que las válvulas de las otras 4 líneas se encuentren cerradas, ver Figura 16.

Paso 3. Tomar las medidas y características de cada uno de los tramos de tubería que hacen parte de la línea.

Paso 4. Abrir la válvula de entrada. Una vez comience a moverse el flujo por la tubería, esperar a que se establezca el flujo. El caudal de agua que circula por la tubería será descargado en un canal de pendiente constante, en donde se realizará el aforo por medio de un vertedero rectangular de cresta delgada. Se deberá tomar la lectura de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero por medio de un piezómetro que se encuentra ubicado al lado de dicho vertedero, ver Figura 30.

Figura 30. Vertedero de cresta delgada con ranura de 45°, para realizar aforo del flujo a través del sistema de tuberías



Fuente: elaboración propia.

Paso 5. Para medir la caída de presión, el banco de flujo a presión cuenta con una serie de mangueras piezométricas, debidamente numeradas, que se conectan a diversos puntos a lo largo de cada ramal de tubería, ver Figura 25. El otro extremo de cada manguera se conecta a un tablero de válvulas, que a su vez se conectan a un manómetro de mercurio de tubo en U, en el cual se realiza la lectura de la caída de presión entre los dos puntos que conecta cada manguera, ver Figura 26. Al momento de desarrollo de la práctica se debe seleccionar el tramo de análisis, dispositivo o accesorio de estudio, lo anterior con el objetivo de identificar las válvulas que se van a utilizar. Antes de comenzar a operar el sistema de válvulas se recomienda realizar una purga para la evacuación del posible aire atrapado en el sistema. Las válvulas identificadas se abren simultáneamente, se deja estabilizar el flujo y posteriormente se procede a realizar la lectura sobre el manómetro que indica la caída de presión del sector o dispositivo de estudio.

Paso 6. Realizar los pasos anteriores variando los tramos de tubería (desde la 1 a la 5), permitiendo así el análisis de pérdidas por fricción en sistemas de tuberías de varias longitudes, diámetros y presencia de diversos accesorios.

Paso 7. Al inicio de cada ramal de tubería se cuenta una válvula de globo, con la cual se puede variar el caudal que fluye por dicho ramal. Este accesorio se dispone con el objetivo de estudiar las pérdidas para diferentes caudales; para ello la válvula se manipula a cada $\frac{1}{4}$ de abertura de la totalidad de la misma, logrando obtener cuatro caudales diferentes para cada proceso de análisis.

3.2.4. Modelo Tabla de Datos a Recolectar

Utilizando la plantilla mostrada en la tabla 12 se coleccionarán datos para dos caudales diferentes.

Tabla 12. Datos a recolectar para estimar las pérdidas en un sistema de tuberías

Caudal 1 (m³/s)		0,0042	Línea	4			
Tipo de Pérdida		# Lectura	# Piezómetro	Lectura Izquierdo de manómetro [m] (1)	Lectura Derecho de manómetro [m] (2)	Y [m] (1) - (2)	Lectura vertedero [m]
Fricción	Local	1	15 – 16	0,051	0,059	0,008	0,136
x							
Diámetro	Nombre del Dispositivo	2					
3"							
Material							
PVC	3						
Caudal 2 (m³/s)			Línea				
Tipo de Pérdida		# Lectura	# Piezómetro	Lectura de manómetro Izquierdo [m] (1)	Lectura de manómetro Derecho [m] (2)	Y [m] (1) - (2)	Lectura del vertedero [m]
Fricción	Local	1					
Diámetro	Nombre del Dispositivo	2					
Material							
	3						

Fuente: elaboración propia.

3.2.5. *Calculo Tipo*

Teniendo en cuenta los datos de la Tabla 12 se tiene:

Zona 1 Línea 4

- Sector: 2, corresponde a los piezómetros 17 y 23
- Tramo de Tubería: 337 mm de Tubería de 2"
- Cálculo de Numero de Reynolds: Se utiliza la Ecuación 2
- Caudal obtenido del aforo a través del uso del vertedero triangular utilizando la Ecuación 20

Datos del aforo

$$C_d = 0,64$$

$$H = 0,136 \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 20

$$Q_t = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s} = 4,2 \text{ l/s}$$

Datos

$$\text{Caudal} = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Diámetro} = 3''$$

$$\text{Área} = 0,0045 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} = 0,93 \text{ m/s}$$

$$\eta = \text{Viscosidad cinemática} = 1,488 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \text{ agua a temperatura de } 20^\circ \text{ C}$$

$$\text{Material} = \text{PVC}$$

$$\varepsilon = \text{Rugosidad Absoluta} = 0,0015 \text{ mm (Ver Tabla 1)}$$

Reemplazando los valores en la Ecuación 2

$$\text{Re} = 4762, \text{ corresponde a un flujo turbulento}$$

Cálculo del Factor de fricción – Colebrook – White

Dado que se trata de un flujo turbulento se puede usar la expresión de Colebrook – White, Ecuación 4, para estimar el valor del coeficiente de fricción o rozamiento usado en la ecuación de Darcy.

Reemplazando los valores en la Ecuación 4 se obtiene:

$$f = 0,0483$$

Cálculo de pérdidas por fricción

Utilizando la Ecuación 1 y reemplazando los valores correspondientes se tiene:

$$h_f = 0,0089 \text{ m}$$

Cálculo de caída de Presión

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre los dos puntos de interés de la línea de tubería bajo análisis, se obtiene la expresión indicada por la Ecuación 10, a partir de la cual se establece que la caída de presión entre los dos puntos de análisis corresponde a la diferencia de altura medida en el manómetro de mercurio de tubo en U.

$$p_1/\gamma + (z_1) + \left(v_1^2/2g\right) - h_f = p_2/\gamma + (z_2) + \left(v_2^2/2g\right)$$

Simplificando la ecuación:

$$Z_1 = Z_2$$

$$v_1^2/2g = v_2^2/2g$$

$$\frac{p_1 - p_2}{\gamma} = 0,08 \text{ m}$$

$$p_1/\gamma - p_2/\gamma = h_f$$

$$h_f = 0,080 \text{ m}$$

3.2.6. Análisis de datos

Con los valores de pérdidas por fricción, obtenidos en cada una de las líneas del banco de prácticas de flujo a presión, se deberá comparar los resultados obtenidos para los diferentes caudales y las diferentes configuraciones de las líneas, donde se hayan determinado datos de caída de presión. De la misma manera, es importante describir los resultados teniendo en cuenta el diámetro de la tubería en cada línea y su longitud, así como comparar resultados de pérdidas con los que se obtendrían con la ecuación de Hazen - Williams.

3.3. Práctica 3. Pérdidas por accesorios en sistemas de tuberías

3.3.1. Objetivos

Objetivo general

Visualizar los diferentes procedimientos que permitan la obtención de variables para el cálculo de pérdidas menores (Accesorios) en un sistema de tuberías.

Objetivos específicos

- Calcular las pérdidas por accesorios o menores en un sistema de tuberías.
- Estimar los coeficientes de pérdidas de Manning, Darcy - Weisbach y Hazen - Williams.

3.3.2. Equipos

Para el desarrollo de la práctica de laboratorio se usa un banco de prueba, que consiste en un sistema de tuberías con flujo a presión, ver Figura 13, dotado con los siguientes accesorios:

- Contracción y Expansión gradual
- Válvulas de globo
- Tubo Venturi
- Placa de Orificio
- Uniones mecánicas
- Uniones no mecánicas
- Codos
- Contracción y Expansión súbita
- Dispositivo para medir caída de presión, el cual contiene tablero con manómetro en "U" ocupado con mercurio, juego de válvulas que comunican las líneas con el tablero de toma de lecturas del manómetro, a través de mangueras ajustadas en puntos clave de lectura, permitiendo medir caídas de presión en aditamentos como en tramos de tubería.

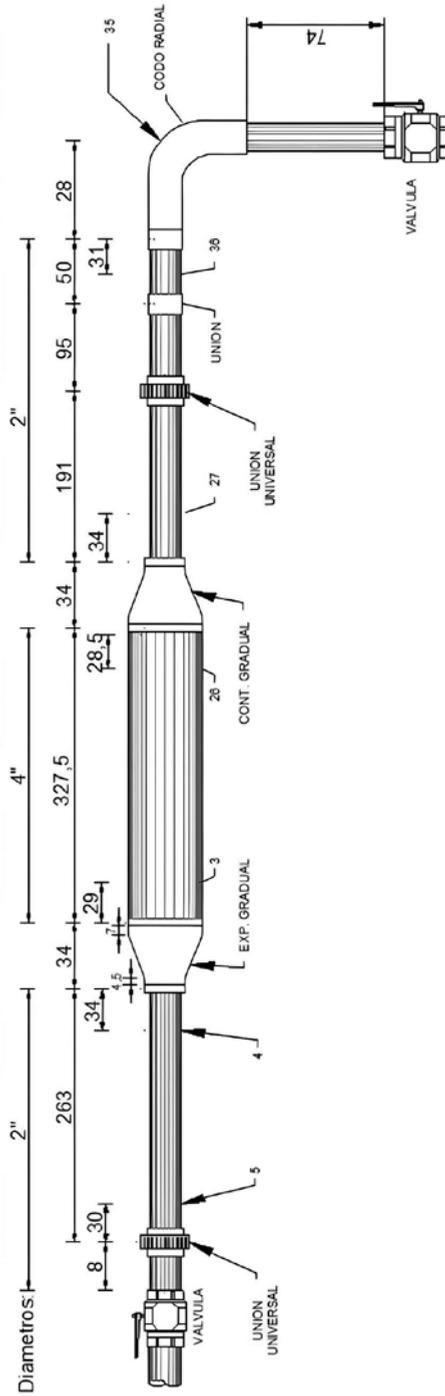
En la Figura 14, así como en la Figura 31, se muestra la línea 1 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, seguido de una unión mecánica que permite el empalme de dos tramos de tubería de 2". Posteriormente se encuentra una expansión gradual de 2" a 4", así como una reducción gradual de 4" a 2", para las cuales se busca evaluar la pérdida de energía mediante esta práctica. Siguiendo

el recorrido de la línea 1, se encuentran de forma simultánea una unión mecánica y una unión con soldadura, donde se espera evaluar la diferencia en las pérdidas entre el uso de estos 2 accesorios. Finalmente, se encuentra un cambio de dirección a través de un codo radial de 90° y una válvula de evacuación del fluido en el depósito de control.

En la Figura 32 se detalla la línea 2 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, seguido de una unión mecánica que permite el empalme de dos tramos de tubería de 2". Luego se encuentra una expansión súbita de 2" a 3" así como una reducción súbita de 3" a 2", para las cuales se evaluará la pérdida de energía. Siguiendo el recorrido de la línea 2, se encuentran una unión con soldadura, donde se espera evaluar la pérdida de energía en este tipo de accesorio, finalmente, se encuentra un cambio de dirección a través de un codo de 90° y una válvula de evacuación del fluido en el depósito de control.

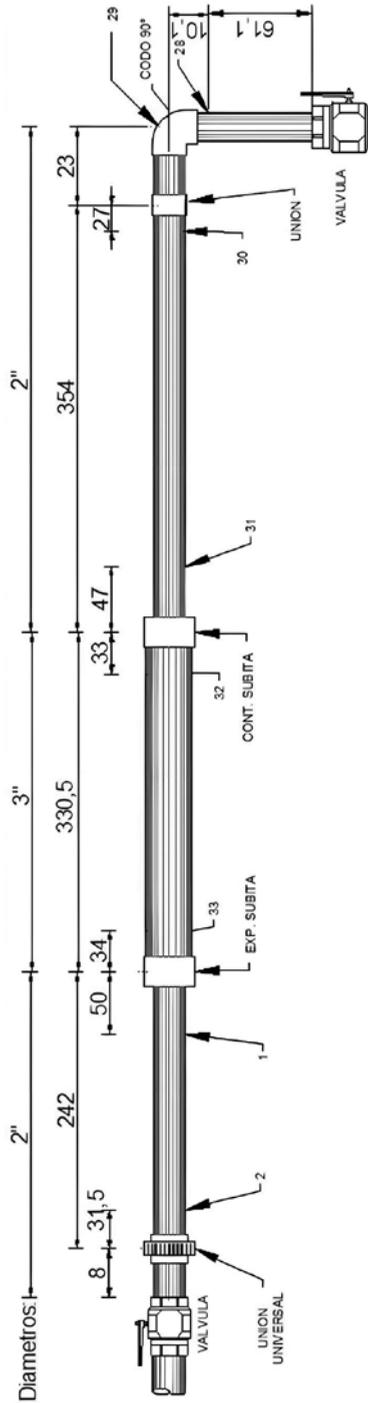
En la Figura 33 se observa la línea 3 del banco para análisis de flujo en tuberías. En esta línea se tiene inicialmente una válvula de globo que permite alimentar el sistema, seguido de un dispositivo para medición de velocidad de flujo tipo venturímetro, con el cual se espera estimar el caudal que fluye a través de la línea 3, midiendo la caída de presión que se tiene por el paso del fluido a través de este dispositivo. Seguidamente, se encuentran unas placas o platinas de orificio, mediante las cuales se determinará igualmente el caudal que circula por la línea 3 del sistema de tuberías. Siguiendo el recorrido de esta línea se encuentran unión con soldadura para, finalmente, encontrar un cambio de dirección a través de un codo de 90° y una válvula de evacuación del fluido en el depósito de control.

Figura 31. Línea 1 del sistema



Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Línea 2 del sistema



Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Procedimiento

Paso 1. Verificar el sistema de bombeo y el nivel de los tanques, ya que la práctica hace uso de la carga constante del tanque elevado del sistema, ver Figura 34.

Figura 34. Bomba y Sistema eléctrico del sistema - Tanque elevado



Fuente: elaboración propia.

Paso 2. Seleccionar la línea sobre la cual se tomarán los registros. Para ello se debe verificar que las válvulas de las otras 4 líneas se encuentren cerradas, ver Figura 16.

Paso 3. Tomar las medidas y características de cada uno de los accesorios que hacen parte de la línea de trabajo.

Paso 4. Abrir la válvula de entrada. Una vez inicie el flujo por la tubería, esperar a que este se estabilice. El caudal de agua que circula por la tubería será descargado en un canal de concreto, en donde se realizará el aforo por medio de un vertedero rectangular de cresta delgada. Se deberá tomar la lectura de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero por medio de un piezómetro que se encuentra ubicado al lado de dicho vertedero, ver Figura 24.

Paso 5. Para medir la caída de presión el banco de flujo a presión se cuenta con una serie de mangueras piezométricas, debidamente numeradas, que se conectan a diversos puntos a lo largo de cada ramal de tubería, como se aprecia en la Figura 25. El otro extremo de cada manguera se conecta a un tablero de válvulas, que a su vez se conectan a un manómetro de mercurio de tubo en U, en el cual se realiza la lectura de la caída de presión entre los dos puntos que conecta cada manguera, ver Figura 26. Al momento del desarrollo de la práctica, se debe seleccionar el tramo

de análisis, dispositivo o accesorio de estudio, esto con el objetivo de identificar las válvulas que se van a utilizar. Antes de comenzar a operar el sistema de válvulas, se recomienda realizar una purga para la evacuación del posible aire atrapado en el sistema. Las válvulas identificadas se abren simultáneamente, se deja estabilizar el flujo y posteriormente se procede a realizar la lectura sobre el manómetro que indica la caída de presión del accesorio en estudio

Paso 6. Realizar los pasos anteriores variando la línea y los accesorios, permitiendo así el análisis de pérdidas en diferentes tipologías y configuraciones de accesorios.

Paso 7. Cada ramal de estudio cuenta con una válvula de globo al inicio de cada trazado con el cual se puede variar el caudal que alimenta el sistema, con el objetivo de realizar toma de datos para diferentes caudales, la válvula se manipula a cada $\frac{1}{4}$ de abertura de la totalidad de la misma, logrando obtener hasta cuatro caudales diferentes para cada proceso de análisis.

3.3.4. Modelo tabla de datos a recolectar

Utilizando la plantilla mostrada en la Tabla 13, se colectarán datos para tres caudales diferentes.

Caudal 2 (m ³ /s)		Línea		Lectura de manómetro Izquierdo [m] (1)	Lectura de manómetro Derecho [m] (2)	Y [m] (1) - (2)	Lectura del vertedero [m]
Tipo de Pérdida		# Lectura	# Piezómetro				
Fricción	Local	1					
	x						
Diámetro	Nombre del Dispositivo	2					
Material	3						
PVC							

Fuente: elaboración propia.

3.3.5. Cálculo Tipo

Teniendo en cuenta los datos de la tabla 13 se tiene:

Zona 1 Línea 1

- Sector: se tomaron datos de caída de presión en el tramo correspondiente a los piezómetros 17 y 23, en el cual se incluyen una contracción gradual y una expansión gradual.
- Dispositivos: Contracción Gradual 4" a 2" – Expansión Gradual 2" a 4".
- Cálculo de Numero de Reynolds: Se utiliza la Ecuación 2.
- Caudal obtenido del aforo a través del uso del vertedero triangular, aplicando la Ecuación 20.

Datos del aforo

$$\phi = 45^\circ$$

$$C_d = 0,64.$$

$$H = 0,136 \text{ m}$$

Reemplazando en la Ecuación 20:

$$Q_t = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s} = 4,2 \text{ l/s}$$

Número de Reynolds

$$\text{Caudal} = 0,0042 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Diámetro} = 4''$$

$$\text{Área} = 0,0081 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} = 0,51 \text{ m/s}$$

$$\text{Diámetro} = 2''$$

$$\text{Área} = 0,0020 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidad} = 2,1 \text{ m/s}$$

$$\eta = \text{Viscosidad cinemática} = 1,488 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \text{ agua a temperatura de } 20^\circ \text{ C}$$

$$\text{Material} = \text{PVC}$$

$$\epsilon = \text{Rugosidad Absoluta} = 0,0015 \text{ mm}$$

$$g = \text{gravedad en m/s}^2$$

Reemplazando los valores en la Ecuación 2 se tiene:

$Re = 4762$, corresponde a un flujo turbulento.

Cálculo de pérdidas por fricción

Para el cálculo de pérdidas en accesorios se utiliza la Ecuación 5. Los valores de K a los indicados para cada accesorio por el fabricante, para un $\phi = 60^\circ$, tomando como referencia para el cálculo de h_f la velocidad del diámetro más pequeño (2") se tiene:

K contracción Gradual 4" a 2" = 0,20

K expansión Gradual 2" a 4" = 0,07

Reemplazando los valores en la Ecuación 5:

0,015 m

0,041 m

Cálculo de caída de Presión

Al aplicar el teorema de Bernoulli en dos puntos del dispositivo se tiene la expresión de la Ecuación 14.

$$p_1/\gamma + (z_1) + \left(v_1^2/2g\right) - h_f = p_2/\gamma + (z_2) + \left(v_2^2/2g\right)$$

Remplazando en la Ecuación 14 $Z_1=Z_2$ y $\frac{p_1-p_2}{\gamma} = 0,16$ m y teniendo en cuenta la ecuación de continuidad $A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$, para un caudal de 0,0042 m³/s, área 2 de 0,0081 m² para 4 pulgadas, se puede determinar la velocidad 2.

$v_2 = 0,51$ m/s

Reemplazando valores

$v_1 = 2,1$ m/s

Reemplazando valores en la Ecuación 14 se tiene $h_f = 0,047$ m

3.3.6. Análisis de datos

Comparar los valores de pérdidas, presentadas en los diferentes accesorios analizados en cada una de las líneas del banco de ensayos de flujo en tuberías a presión. Verificar los valores indicados en la literatura con los valores determinados en laboratorio y, por último pero no menos importante, analizar los datos de pérdidas en cada accesorio para cada uno de los caudales estudiados.

BIBLIOGRAFÍA

- Cengel, Y. & Cimbala, J. (2004). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. Mc Graw Hill.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. Mc Graw-Hill.
- Fernández, L. (2018). *Introducción a la mecánica de fluidos*. Alfaomega.
- Giles, R., Evett, J., y Liu, C. (1996). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. Mc Graw-Hill.
- Marbello Pérez, R. V. (2005). *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/21725>.
- Mott, R. L. (2012). *Mecánica de fluidos aplicada (7a edición)*. Pearson Educacion.
- PAVCO (2020). *Manual técnico, Sistemas de tuberías y accesorios presión*. PAVCO.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías*. Editorial AlfaOmega.
- Streeter, V. L., Wylie, E. B. & Bedford K. W. (2000). *Mecánica de fluidos (9a edición)*. Mc Graw-Hill.
- White, F. (2004). *Mecánica de fluidos (5a edición)*. Mc Graw Hill.

Este libro fue compuesto en caracteres
Minion a 11 puntos, impreso sobre papel
Bond de 75 gramos y encuadernado con el
método hot melt en Bogotá, Colombia.