

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE
PÉRDIDAS DE CARGA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS Y EN ACCESORIOS,
PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA PUCE”

ALEXIS JESÚS HIDALGO CRUZ
DARÍO FERNANDO MORALES JARAMILLO

DIRECTOR: ING. MIGUEL ARAQUE

QUITO, 2019

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por bendecirme y guiarme cada día, ayudándome a reconocer y aprovechar las oportunidades que ha puesto en mi camino.

A mis padres, Jaime y Amparito, quienes con su amor siempre me han apoyado en las decisiones que he tomado tanto en lo personal como en lo estudiantil, guiándome y aconsejándome para seguir el camino correcto.

A mi hermano Iván, quien siempre ha sido un apoyo y un gran amigo con quien he compartido y jugado toda mi vida.

A mis demás familiares, quienes son parte de mi vida y han sabido dar un sentido de unión y fortaleza en familia.

A Nicole, quien me ha acompañado durante varios años, ayudándome a priorizar los objetivos universitarios.

A mis amigos, con quienes he compartido mi vida estudiantil y con quienes he llegado a formar una amistad que perdurará por siempre.

Además agradezco a Darío, mi compañero de tesis con quien logramos sacar adelante este proyecto y culminarlo con éxito.

Agradecemos al director de tesis Ing. Miguel Araque, quien ha ayudado a culminar este trabajo de la mejor manera gracias a sus conocimientos y predisposición; también a los correctores Ing. Pablo Daza e Ing. Roberto Unda quienes mediante comentarios y sugerencias oportunas hicieron posible la finalización de esta tesis.

Además un agradecimiento especial a quienes de manera directa o indirecta contribuyeron para la construcción de este equipo.

Y un grandísimo agradecimiento a toda la Pontificia Universidad Católica del Ecuador que con su trayectoria y experiencia forma profesionales con valores éticos y morales de justicia y respeto a la dignidad humana.

Alexis Hidalgo

DEDICATORIA

Quiero dedicar esta tesis con todo mi cariño para mis padres y mi hermano quienes siempre me han acompañado en toda mi vida, en cada logro y en cada fracaso, motivándome para seguir adelante y enseñándome un camino de superación gracias al esfuerzo propio.

Alexis Hidalgo

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por sus bendiciones y por permitirme culminar mis estudios universitarios, dando un paso para mi vida profesional.

Agradezco a mis padres y a mi hermano, quienes me han demostrado su cariño y su apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria y quienes siempre me han enseñado valores éticos y morales.

Además a mis amigos, con quienes he compartido gratos momentos de felicidad en mi vida.

Además agradezco a Alexis, mi compañero de tesis con quien logramos sacar adelante este proyecto y culminarlo con éxito.

Agradecemos al director de tesis Ing. Miguel Araque, quien ha ayudado a culminar este trabajo de la mejor manera gracias a sus conocimientos y predisposición; también a los correctores Ing. Pablo Daza e Ing. Roberto Unda quienes mediante comentarios y sugerencias oportunas hicieron posible la finalización de esta tesis.

Además un agradecimiento especial a quienes de manera directa o indirecta contribuyeron para la construcción de este equipo.

Y un grandísimo agradecimiento a toda la Pontificia Universidad Católica del Ecuador que con su trayectoria y experiencia forma profesionales con valores éticos y morales de justicia y respeto a la dignidad humana.

Darío Morales

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a mi familia, mis padres y mi hermano con quienes siempre he compartido mi vida y son el pilar fundamental de la misma. Todo mi esfuerzo se lo dedico a ellos.

Darío Morales

INDICE

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes	1
1.2	Justificación.....	1
1.3	Objetivos	2
1.3.1	Objetivo General	2
1.3.2	Objetivos Específicos.....	2
1.4	Metodología	2
1.5	Alcance.....	3
CAPÍTULO 2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	4
2.1	Fluido	4
2.1.1	Definición de Fluido	4
2.1.2	Propiedades físicas de los fluidos	4
2.1.2.1.	Peso específico	4
2.1.2.2.	Densidad.....	4
2.1.2.3.	Viscosidad.....	5
2.1.2.4.	Viscosidad absoluta o dinámica	5
2.1.2.5.	Viscosidad cinemática.....	5
2.2	Caudal.....	6
2.3	Presión.....	6
2.3.1	Presión atmosférica	6
2.3.2	Presión absoluta	7
2.3.3	Presión manométrica.....	7
2.3.4	Presión barométrica	7
2.3.5	Vacío	7
2.4	Ecuación de Bernoulli	8
2.5	Conservación de la Energía.....	8
2.6	Ecuación General de la Energía	9
2.6.1	Energía Cinética.....	11
2.6.2	Energía Potencial	11
2.7	Número de Reynolds.....	11
2.7.1	Flujo laminar	12
2.7.2	Flujo turbulento.....	12
2.8	Pérdidas de Carga por Fricción	13
2.8.1	Ecuación de Darcy - Weisbach	13
2.8.2	Pérdida por fricción en el flujo laminar	14

2.8.3	Pérdida por fricción en el flujo turbulento	14
2.8.4	Factor de fricción (f).....	14
2.8.5	Factor de fricción para el flujo turbulento	15
2.8.6	Diagrama de Moody	16
2.8.7	Rugosidad relativa	17
2.9	Pérdidas de Carga por Accesorios.....	20
2.9.1	Tipos de accesorios	23
2.9.1.1.	Ampliación súbita	23
2.9.1.2.	Ampliación gradual.....	25
2.9.1.3.	Contracción súbita.....	27
2.9.1.4.	Contracción gradual	30
2.9.2	Válvulas	32
2.9.2.1.	Válvula de Globo	32
2.9.2.2.	Válvula de Compuerta	33
2.9.2.3.	Válvula de Bola.....	34
2.9.3	Bombas	36
2.9.3.1.	Bombas cinéticas.....	37
2.9.3.2.	Bombas centrífugas.....	37
2.9.3.3.	Aplicación de bombas	39
2.9.3.4.	Carga total en una bomba.....	39
2.9.3.5.	Leyes de afinidad para bombas centrífugas	39
2.9.3.6.	Potencia requerida por las bombas.....	41
2.9.3.7.	Eficiencia mecánica de las bombas.....	41
2.9.3.8.	Cavitación	42
2.9.4	Curva de resistencia del sistema	42
2.9.5	Selección de la bomba y punto de operación del sistema.....	44
2.9.5.1.	Directrices para la selección de la bomba	44
2.10	Laboratorio de Hidráulica	46
2.10.1	Historia de fundación del primer Laboratorio de Hidráulica.....	46
2.10.2	Objetivo de un Laboratorio de Hidráulica	46
2.10.3	Laboratorios de Hidráulica en el mundo y en Ecuador.....	47
2.10.4	Ejemplos comerciales del equipo diseñado en esta tesis	48
CAPÍTULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO		50
3.1	Partes del equipo	50
3.2	Selección de tuberías para el sistema hidráulico	51
3.3	Selección de accesorios para el sistema hidráulico.....	51
3.4	Diseño hidráulico del equipo.....	52

3.4.1	Curva de operación del sistema	52
3.4.1.1.	Trayectoria 1	54
3.4.1.2.	Trayectoria 2	58
3.4.1.3.	Trayectoria 3	60
3.4.1.4.	Trayectoria 4	61
3.4.1.5.	Trayectoria 5	63
3.4.1.6.	Trayectoria 6	65
3.4.1.7.	Trayectoria 7	67
3.4.1.8.	Tabla resumen y curvas de operación del sistema	74
3.5	Selección de bomba para el sistema hidráulico.....	75
3.5.1	Potencia de la bomba	75
3.5.2	Curva de operación de la bomba.....	76
3.5.3	Punto de operación.....	77
3.5.4	Aparatos de medición	81
3.6	Planos de diseño	83
3.6.1	Dimensiones del tablero y posiciones de tirafondos.....	83
3.6.2	Dimensiones del sistema de tuberías y accesorios.....	84
3.6.3	Materiales y diámetros de las tuberías	85
3.6.4	Accesorios.....	85
3.6.5	Tablero de piezómetros de columna de agua	86
3.7	Proceso constructivo del equipo.....	87
3.7.1	Unión de tuberías con accesorios.....	87
3.7.2	Instalación de collarines de derivación.	89
3.7.3	Colocación del sistema de tuberías sobre el tablero.	94
3.7.4	Empotramiento en pared.	96
3.7.5	Conexión de bomba al sistema de tuberías y a tanques de almacenamiento.	97
3.7.6	Instalación de tubería para medición de caudal	99
3.7.7	Instalación de válvula de liberación de presión	100
3.7.8	Instalación de piezómetros de columna de agua.....	101
3.8	Partes del equipo construido.	102
3.8.1	Bomba Centrífuga, tubería de succión y tubería de bombeo.	102
3.8.2	Válvula Check (para flujo vertical).....	102
3.8.3	Válvula de regulación de caudal (verde) y válvula de liberación de presión (roja).....	103
3.8.4	Válvulas para seleccionar trayectoria	104
3.8.5	Tubería de PVC de 1" de 1.8m	104
3.8.6	Tuberías de 2m de longitud de PVC, cobre y hierro galvanizado.	105

3.8.7	Ampliación gradual de ½” a 1”	105
3.8.8	Reducción gradual de ½” a 1”	106
3.8.9	Codos de PVC de 90° rectos.....	106
3.8.10	Codos de PVC de 90° curvos.....	107
3.8.11	Yee de derivación a 45° de PVC.....	107
3.8.12	Codo de PVC a 45°	108
3.8.13	Tee de PVC	108
3.8.14	Válvula de globo de bronce de ½”.....	109
3.8.15	Válvula de bola de acero de ½”.....	109
3.8.16	Válvula de compuerta de bronce de ½”.....	110
3.8.17	Válvula de bola de PVC ½”	110
3.8.18	Válvulas reguladoras de descarga a tanque de almacenamiento o a tanque de medición de caudal.....	111
3.8.19	Tanque de almacenamiento.....	111
3.8.20	Tanque para medición de caudal.....	112
3.8.21	Válvula de comunicación entre tanques.....	112
3.8.22	Piezómetros de columna de agua	113
3.8.23	Acoples para piezómetros	113
3.8.24	Manómetros de 0 a 30 PSI con glicerina	114
CAPÍTULO 4 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO		116
4.1.	Definición de Prácticas a Desarrollarse.....	116
4.1.1.	Ensayo de pérdidas de energía por fricción en tuberías.....	116
4.1.2.	Ensayo de pérdidas de energía por accesorios	116
4.1.3.	Ensayo de pérdidas de energía por válvulas	116
4.2.	Pruebas de Funcionamiento del Equipo	116
4.2.1.	Ensayo de pérdidas de energía por fricción en tuberías.....	116
4.2.2.	Ensayo de pérdidas de energía por accesorios	118
4.2.3.	Ensayo de pérdidas de energía por válvulas	120
4.3.	Tabla de Resultados	123
4.4.	Análisis de Resultados	125
4.5.	Guía de Prácticas de Laboratorio	125
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		169
4.1	Conclusiones	169
4.2	Recomendaciones.....	170
Bibliografía	171

Indice de Tablas

Tabla 1: Rugosidad de Tuberías	17
Tabla 2: Rugosidad de Tuberías	19
Tabla 3: Longitud Equivalente en Diámetros de Tubería.....	22
Tabla 4: Factor de Fricción.....	23
Tabla 5: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Súbita	24
Tabla 6: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Súbita	25
Tabla 7: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Gradual.....	27
Tabla 8: Coeficiente de Resistencia – Contracción Súbita.....	29
Tabla 9: Coeficiente de Resistencia – Contracción Súbita.....	29
Tabla 10: Clasificación de Tipos de Bombas	37
Tabla 11: Viscosidad Cinemática	52
Tabla 12: Trayectoria 1 - Pérdida de Energía por Fricción	55
Tabla 13: Trayectoria 1- Pérdida de Energía por Accesorios.....	56
Tabla 14: Trayectoria 1 - Resumen	57
Tabla 15: Trayectoria 2 - Resumen	58
Tabla 16: Trayectoria 3 - Resumen	60
Tabla 17: Trayectoria 4 - Resumen	62
Tabla 18: Trayectorias 5.1, 5.2 - Resumen.....	64
Tabla 19: Trayectoria 6 - Resumen	66
Tabla 20: Trayectoria 7 - Iteración 1	70
Tabla 21: Trayectoria 7 - Iteración 2	71
Tabla 22: Trayectoria 7 - Iteración 57	72
Tabla 23: Trayectoria 7 - Pérdidas de Energía por Fricción.....	73
Tabla 24: Trayectoria 7 - Pérdidas de Energía por Accesorios	73
Tabla 25: Trayectoria 7 - Resumen	73
Tabla 26: Resumen	74
Tabla 27: Curva de operación de la Bomba	76
Tabla 1: Ensayo de Pérdidas de Energía por Fricción.....	123
Tabla 2: Ensayo de Pérdidas de Energía por Accesorios	123

Indice de Figuras

Figura 1: Ecuación General de la Energía	10
Figura 2: Rugosidad Relativa de Materiales de Tuberías.....	18
Figura 3: Ampliación Súbita	23
Figura 4: Ampliación Gradual.....	25
Figura 5: Coeficiente de Resistencia - Ampliación Gradual	26
Figura 6: Contracción Súbita.....	27
Figura 7: Contracción Súbita.....	28
Figura 8: Contracción Gradual	30
Figura 9: Coeficiente de Resistencia - Contracción Gradual	31
Figura 10: Coeficiente de Resistencia - Contracción Gradual	31
Figura 11: Válvula de Globo	33
Figura 12: Válvula de Compuerta	34
Figura 13: Válvula de Bola.....	35
Figura 14: Válvula de Bola.....	36
Figura 15: Bomba Centrífuga.....	38
Figura 16: Bomba Centrífuga.....	38
Figura 17: Bomba Centrífuga.....	39
Figura 18: Curva de Resistencia del Sistema	44
Figura 19: Punto de Operación del Sistema	45

Indice de Ilustraciones

Ilustración 1: Trayectorias y Partes del Equipo.....	50
Ilustración 2: Trayectoria 1 – Tubería de PVC 1”.....	54
Ilustración 3: Trayectoria 2 – Tubería de PVC ½”.....	58
Ilustración 4: Trayectoria 3 - Tubería de Cobre 1/2".....	60
Ilustración 5: Trayectoria 4 - Tubería de Hierro Galvanizado 1/2".....	61
Ilustración 6: Trayectoria 5.1 - Accesorios.....	63
Ilustración 7: Trayectoria 5.2 - Accesorios.....	63
Ilustración 8: Trayectoria 6 - Válvulas.....	65
Ilustración 9: Trayectoria 7 - Circuito Cerrado.....	67
Ilustración 10: Trayectoria 7 - Sentido.....	69
Ilustración 11: Tablero.....	83
Ilustración 12: Dimensiones del Sistema.....	84
Ilustración 13: Características del Sistema.....	85
Ilustración 14: Tipos de Accesorios.....	85
Ilustración 15: Piezómetros de Columna de Agua.....	86

Indice de Gráficas

Gráfica 1: Trayectoria 1 - Curva del Sistema	57
Gráfica 2: Trayectoria 2 - Curva del Sistema	59
Gráfica 3: Trayectoria 3 - Curva del Sistema	61
Gráfica 4: Trayectoria 4 - Curva del Sistema	62
Gráfica 5: Trayectoria 5.1, 5.2 - Curva del Sistema	65
Gráfica 6: Trayectoria 6 - Curva del Sistema	66
Gráfica 7: Trayectoria 7 - Curva del Sistema	74
Gráfica 8: Resumen	75
Gráfica 9: Curva de Operación de la Bomba.....	77
Gráfica 10: Trayectoria 1 - Punto de Operación de la Bomba	78
Gráfica 11: Trayectoria 2 - Punto de Operación de la Bomba	78
Gráfica 12: Trayectoria 3 - Punto de Operación de la Bomba	79
Gráfica 13: Trayectoria 4 - Punto de Operación de la Bomba	79
Gráfica 14: Trayectoria 5 - Punto de Operación de la Bomba	80
Gráfica 15: Trayectoria 6 - Punto de Operación de la Bomba	80
Gráfica 16: Trayectoria 7 - Punto de Operación de la Bomba	81

Indice de Fotografías

Fotografía 1: Equipo HM 150.11 GUNT	48
Fotografía 2: C6MKII Fluid Friction Measurements – Issue 3	49
Fotografía 3: Tuberías y Accesorios.....	87
Fotografía 4: Tuberías y Accesorios.....	88
Fotografía 5: Tuberías y Accesorios.....	88
Fotografía 6: Collarines	89
Fotografía 7: Collarines	89
Fotografía 8: Collarines	90
Fotografía 9: Collarines	90
Fotografía 10: Collarines	91
Fotografía 11: Collarines	91
Fotografía 12: Collarines	92
Fotografía 13: Collarines	92
Fotografía 14: Collarines	93
Fotografía 15: Collarines	93
Fotografía 16: Sistema de Tuberías en Tablero.....	94
Fotografía 17: Sistema de Tuberías en Tablero.....	94
Fotografía 18: Sistema de Tuberías en Tablero.....	95
Fotografía 19: Sistema de Tuberías en Tablero.....	95
Fotografía 20: Empotramiento de Tablero	96
Fotografía 21: Empotramiento de Tablero	96
Fotografía 22: Bomba y Tanques de Almacenamiento	97
Fotografía 23: Bomba y Tanques de Almacenamiento	98
Fotografía 24: Bomba y Tanque de Almacenamiento.....	99
Fotografía 25: Medición de Caudal	99
Fotografía 26: Medición de Caudal	100
Fotografía 27: Válvula de Liberación de Presión	100
Fotografía 28: Empotramiento de Piezómetros de Columna de Agua	101
Fotografía 29: Bomba.....	102
Fotografía 30: Válvula Check	102
Fotografía 31: Válvulas de Regulación y Liberación.....	103
Fotografía 32: Válvulas de Regulación y Liberación.....	103
Fotografía 33: Válvulas de Trayectorias	104
Fotografía 34: Tuberías	104
Fotografía 35: Tuberías	105
Fotografía 36: Ampliación	105
Fotografía 37: Reducción	106
Fotografía 38: Codo Recto 90°	106
Fotografía 39: Codo Curvo 90°	107
Fotografía 40: Yee	107
Fotografía 41: Codo 45°	108
Fotografía 42: Tee	108
Fotografía 43: Válvula de Globo	109
Fotografía 44: Válvula de Bola	109
Fotografía 45: Válvula de Compuerta	110
Fotografía 46: Válvula de Bola de PVC.....	110
Fotografía 47: Válvulas de Tanques de Almacenamiento.....	111

Fotografía 48: Tanque de Almacenamiento	111
Fotografía 49: Tanque de Medición de Caudal	112
Fotografía 50: Válvula entre Tanques	112
Fotografía 51: Piezómetros de Columna de Agua.....	113
Fotografía 52: Acople de Manguera.....	113
Fotografía 53: Acople de Válvula	114
Fotografía 54: Manómetros de Glicerina.....	114
Fotografía 55: Manómetros de Glicerina.....	115

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador no posee un Laboratorio de Hidráulica que complemente el aprendizaje teórico de los estudiantes en las materias relacionadas con la Hidráulica.

Ante esta situación, la Facultad desea formar el laboratorio con equipos que permitan realizar los diferentes ensayos hidráulicos para fomentar el aprendizaje de los estudiantes.

1.2 Justificación

En el estudio de la carrera de Ingeniería Civil, en las materias de Mecánica de Fluidos, Hidráulica General e Hidráulica Aplicada es necesario además de los conocimientos teóricos la realización de prácticas en laboratorio que ayuden en el aprendizaje y comprensión de lo aprendido en clases.

Con el equipo que se plantea diseñar y construir mediante este trabajo de titulación, además de beneficiar a los egresados se verán beneficiados los alumnos que tomarán las materias relacionadas con la Hidráulica, realizando ensayos de pérdidas de carga mediante la toma de mediciones para determinar las pérdidas que experimenta el fluido debido a la fricción de las tuberías y las pérdidas menores debido a la utilización de los diferentes accesorios por los que circula el fluido.

Además este equipo servirá de precursor para la formación del Laboratorio de Hidráulica, que a su vez será un aporte importante para la Facultad de ingeniería que se encuentra en proceso de acreditación de la carrera.

Y hará que la carrera de Ingeniería Civil de la PUCE se vuelva más competitiva ya que en el medio universitario cada vez hay más universidades que ofertan la carrera dentro de sus planes de pregrado.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Construir un equipo para la determinación de pérdidas de carga por fricción en tuberías y en accesorios, para el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la PUCE.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Resumir los aspectos relevantes de la Hidráulica de sistemas a presión.
- Diseñar y construir un sistema hidráulico que tenga tuberías de diferentes rugosidades y varios tipos de accesorios para medición de pérdidas de carga.
- Elaborar una de guía de laboratorio para los ensayos que se podrán realizar con este equipo.

1.4 Metodología

La instalación en la que se lleva a cabo esta práctica es un equipo de ensayos preparado con fines docentes, que contiene muchos de los elementos típicos que se suelen encontrar en un sistema de tuberías real. También se dispone de instrumentos para la medida de las pérdidas de carga y del caudal. A continuación, se enumeran todos los elementos:

Tuberías de diferentes materiales: acero, cobre, poli-carbonato; con diferentes diámetros y longitudes; y colocadas en combinaciones de serie y paralelo.

Válvulas de varios tipos: compuerta, esfera, mariposa. Su misión es, en unos casos, abrir o cerrar el paso de fluido por los diferentes tramos, y en otros regular el caudal circulante.

Bomba centrífuga que proporciona la energía necesaria para que el agua circule por la instalación. Esta energía se disipa en los distintos elementos del sistema.

Depósito: la instalación funciona en circuito cerrado, de manera que la bomba aspira agua de un depósito, y tras hacer un recorrido determinado vuelve al mismo.

Accesorios: existen en la instalación ciertos elementos que provocan pérdidas singulares. En algunos casos son elementos necesarios: válvulas, codos, uniones en “T”, etc. También

se ha incluido algún elemento con fines didácticos, para poder determinar la pérdida de carga singular que produce; es el caso de varias válvulas de distintos tipos.

Manómetro: la pérdida de carga entre dos puntos de la instalación se mide con un manómetro piezométrico de columna de líquido en “U” conectado entre los dos puntos. El líquido que contiene el manómetro es mercurio, y la escala graduada permite una resolución de 1 mm. La pérdida de carga en metros de columna de agua (el líquido que circula por la instalación) entre dos secciones situadas a la misma cota geométrica y con el mismo diámetro.

Breve descripción del procedimiento:

- Diseño del modelo hidráulico.
- Construcción del modelo hidráulico.
- Realización de pruebas de ensayo.
- Elaboración de guía de prácticas de laboratorio.

1.5 Alcance

Este trabajo previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil se limita al diseño y construcción de un equipo para ensayos de Hidráulica mediante la medición de carga tanto al inicio y al final de tuberías de diferentes rugosidades como antes y después de varios accesorios. Con el objeto de que el equipo sea utilizado por estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador; se elaborará una guía de laboratorio para los ensayos a realizarse con este equipo.

CAPÍTULO 2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 Fluido

2.1.1 Definición de Fluido

“Un fluido es una sustancia que se encuentra en fase líquida o gaseosa, que se deforma de manera continua bajo la influencia del esfuerzo cortante, sin importar lo pequeño que sea, este puede estar en reposo o en movimiento” (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 2).

2.1.2 Propiedades físicas de los fluidos

2.1.2.1. Peso específico

El peso específico (o densidad relativa) es una medida relativa de la densidad que como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe ser tomada en cuenta al sentar las bases para el peso específico. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura, con respecto al agua a una temperatura normalizada. A menudo estas temperaturas son las mismas y se suele utilizar 60°F/60°F (15.6°C/15.6°C). Al redondear 15.0°C/15.0°C no se introduce ningún error apreciable. (CRANE, 1989, págs. 1-3)

$$S = \frac{\rho \text{ Cualquier líquido a cierta temperatura}}{\rho \text{ agua a } 15^{\circ}\text{C (60}^{\circ}\text{F)}}$$

Donde: S = Peso específico

ρ = Densidad del líquido

2.1.2.2. Densidad

La densidad de una sustancia se define como masa por unidad de volumen. En general la densidad de una sustancia depende de la temperatura y de la presión. La densidad en la mayoría de los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura. Por otro lado los líquidos y sólidos en esencia son sustancias incompresibles y la variación de su densidad con la presión suele ser despreciable. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 37)

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Donde: ρ = Densidad del fluido

m = Masa (kg)

V = Volumen del líquido (m³)

2.1.2.3. *Viscosidad*

“La viscosidad expresa la facilidad que tiene un fluido cuando se le aplica una fuerza externa” (CRANE, 1989, págs. 1-2).

2.1.2.4. *Viscosidad absoluta o dinámica*

La viscosidad absoluta de un fluido, es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. Sus unidades en el sistema internacional (SI) son pascal segundo (Pa s) o también newton segundo por metro cuadrado (N s/m²) o kilogramo por metro segundo (Kg/ms). (CRANE, 1989, págs. 1-2)

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ kg/(m s)}$$

2.1.2.5. *Viscosidad cinemática*

“Es el cociente entre la viscosidad y la densidad. En el sistema internacional (SI) la unidad de la viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m²/s)” (CRANE, 1989, págs. 1-2).

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

Donde: v = Viscosidad cinemática del fluido (m²/s)

μ = Viscosidad dinámica o absoluta del fluido (kg.s/m²)

ρ = Densidad del fluido (kg.s/m⁴)

2.2 Caudal

Como definición general, se conoce como caudal, a la cantidad de fluido que circula a través de una sección de un ducto, ya sea tubería, cañería, oleoducto, río, canal, por unidad de tiempo. Generalmente, el caudal se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo específico. (FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA, s.f.)

$$Q = V A$$

Dónde: Q = Caudal (m^3/s , lts/s)

V = Volumen del líquido (m^3)

A = Área (m^2)

2.3 Presión

La presión se define como una fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área. Puesto que la presión se define como fuerza por unidad de área, tiene la unidad de newtons por metro cuadrado (N/m^2), la cual se llama pascal (Pa). (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 66)

$$1 Pa = 1 N/m^2$$

2.3.1 Presión atmosférica

La presión atmosférica se mide con un instrumento llamado barómetro; por tanto, con frecuencia se hace referencia de la presión atmosférica como presión barométrica. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 75)

Una unidad de presión que se usa con frecuencia es la atmósfera estándar, la cual se define como la presión producida por una columna de mercurio de 760 mm de altura a $0^\circ C$ bajo la aceleración gravitacional estándar ($g = 9.807 m/s^2$). Recuérdese que la presión atmosférica en un lugar es sencillamente el peso del aire que se encuentra arriba de ese lugar por unidad de área superficial. Por lo tanto, cambia no sólo en elevación, sino también con las condiciones atmosféricas. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 75-76)

2.3.2 Presión absoluta

“La presión real que se encuentra en una posición dada se llama presión absoluta, y se mide en relación con el vacío absoluto (es decir, presión cero absoluta)” (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 66).

2.3.3 Presión manométrica

La mayoría de los instrumentos para medir la presión se calibran para que den una lectura de cero en la atmósfera, de modo que indican la diferencia entre la presión absoluta y la presión atmosférica local. Esta diferencia se llama presión manométrica. Las presiones por debajo de la atmosférica se conocen presiones de vacío y se miden con instrumentos de vacío que indican la diferencia entre presión atmosférica y la absoluta. Las presiones absoluta, manométrica y de vacío son todas cantidades positivas y están interrelacionadas por: (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 66)

$$P_{man} = P_{abs} - P_{atm}$$

$$P_{vac} = P_{atm} - P_{abs}$$

2.3.4 Presión barométrica

“Es el nivel de la presión atmosférica por encima del vacío perfecto” (CRANE, 1989, págs. 1-7).

2.3.5 Vacío

Es la depresión por debajo del nivel atmosférico. La referencia a las condiciones de vacío se hace a menudo expresando la presión absoluta en términos de altura de columna de mercurio o de agua. Las unidades utilizadas normalmente son milímetros de mercurio, micras de mercurio, pulgadas de agua y pulgadas de mercurio. (CRANE, 1989, págs. 1-7)

2.4 Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la elevación, y es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables. Pese a su simplicidad la ecuación de Bernoulli demostró que es un instrumento muy potente en mecánica de fluidos. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 185,187)

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante (a lo largo de una línea de corriente)}$$

Donde: P = Presión

ρ = Densidad

g = Gravedad

z = altura

La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente: (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 188)

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

2.5 Conservación de la Energía

La energía se puede transferir a un sistema cerrado, o extraerse de éste por medio de calor o de trabajo, y el principio de conservación de la energía exige que la energía neta transferida a un sistema, o extraída de él durante un proceso, sea igual al cambio en el contenido de energía de ese sistema. Los volúmenes de control incluyen la transferencia de energía también por la vía del flujo de masa, y el principio de conservación de la energía, también conocido como balance de energía, se expresa como: (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 172)

Conservación de la energía: $\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sal} = \frac{dE_{VC}}{dt}$

donde \dot{E}_{ent} y \dot{E}_{sal} son las razones de transferencia de energía hacia dentro y hacia afuera del volumen de control. En la mecánica de fluidos se suele limitar la consideración sólo a las formas mecánicas de la energía. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 172,173)

La energía cinética, la potencial y de flujo son las formas mecánicas de la energía y la ecuación de Bernoulli puede concebirse como el "principio de conservación de la energía mecánica". Esto equivale al principio general de conservación de la energía para los sistemas que no se relacionan con la conversión de la energía mecánica a la térmica entre sí y, en consecuencia, la energía mecánica y térmica se conservan por separado. La ecuación de Bernoulli expresa que, en el transcurso de flujo estacionario e incompresible, con fricción despreciable, las diversas formas de la energía mecánica se transforman entre sí, pero su suma permanece constante. En otras palabras, no se tiene disipación de energía mecánica en el curso de ese tipo de flujos, puesto que no existe fricción que convierta esa energía mecánica en energía térmica sensible (interna). (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 188)

Debe recordarse que la energía se transfiere a un sistema como trabajo cuando se aplica una fuerza a este sistema a lo largo de una distancia. Si se toma en cuenta la segunda ley de Newton del movimiento, la ecuación de Bernoulli también puede concebirse como: el trabajo realizado por las fuerzas de presión y de gravedad sobre la partícula de fluido es igual al aumento en la energía cinética de esa partícula. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 188)

2.6 Ecuación General de la Energía

Es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, la cual permite resolver problemas en los que se producen pérdidas y ganancias de energía. Se muestran las respectivas ganancias, remociones y pérdidas de energía: h_A , h_R y h_L . La expresión del principio de conservación de la energía es: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 158)

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2$$

La energía poseída por el fluido por unidad de peso es:

$$E' = \frac{p}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g}$$

Entonces la ecuación se convierte en:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Ésta es la forma de la ecuación de la energía.

h_A = Energía añadida al fluido mediante un dispositivo mecánico como una bomba; con frecuencia, a esto se le denomina carga total de la bomba.

h_R = Energía removida del fluido mediante un dispositivo mecánico por ejemplo una turbina.

h_L = Pérdidas de energía del sistema debido a la fricción en tuberías o pérdidas menores debido a válvulas y accesorios. (MOTT & UNTENER, 2015, págs. 158-159)

Figura 1: Ecuación General de la Energía

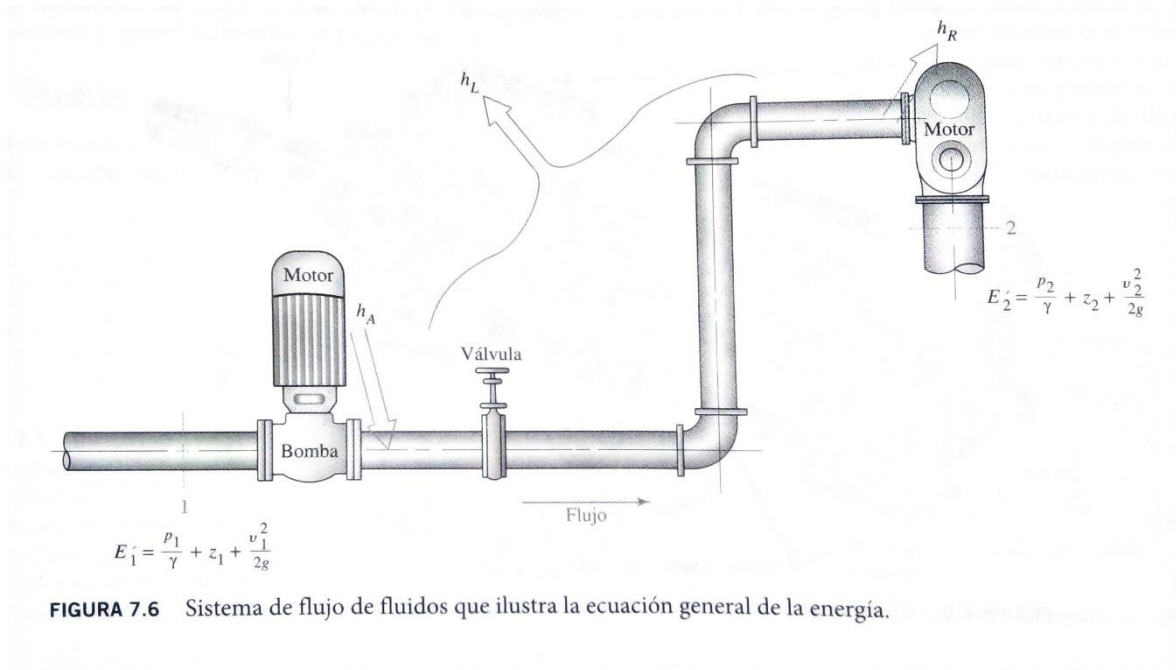


FIGURA 7.6 Sistema de flujo de fluidos que ilustra la ecuación general de la energía.

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 158

2.6.1 *Energía Cinética*

La energía que un sistema tiene como resultado de su movimiento en relación con algún marco de referencia se llama energía cinética. Cuando todas las partes de un sistema se mueven con la misma velocidad, la energía cinética por unidad de masa se expresa como: (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 41)

$$E_c = \frac{V^2}{2g}$$

En donde: V = Velocidad del sistema en relación con algún marco fijo de referencia (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

2.6.2 *Energía Potencial*

La energía que un sistema tiene como resultado de su elevación en un campo gravitacional se llama energía potencial y se expresa en términos de unidad de masa como: (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 41)

$$E_p = gz$$

En donde: g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

z = Elevación del centro de gravedad de un sistema en relación con algún plano de referencia.

2.7 **Número de Reynolds**

El comportamiento de un fluido, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, resulta ser bastante dependiente de si el flujo es laminar o turbulento. Por esta razón, se requiere un medio adecuado para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo. De hecho, la observación directa es imposible de realizar en fluidos que fluyen por tuberías opacas. Es posible demostrar de forma experimental y verificar de manera analítica que, en un tubo redondo, el carácter del flujo depende de cuatro variables: la densidad ρ del fluido, la viscosidad η del fluido, del diámetro D de la tubería y la velocidad promedio del flujo. Osborne Reynolds fue el primero en demostrar que es posible predecir si el flujo es laminar o turbulento siempre que se

conozca la magnitud de un número adimensional, éste se conoce ahora como el número de Reynolds (N_R o Re). (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 181)

Para secciones circulares:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = \frac{vD}{\nu}$$

$$N_R = \frac{vD\rho}{\eta} = v \times D \times \rho \times \frac{1}{\eta}$$

$$N_R = \frac{\text{m}}{\text{s}} \times \text{m} \times \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m} \cdot \text{s}}{\text{kg}}$$

El número de Reynolds es la relación de la fuerza de inercia presente en un elemento de fluido sobre la fuerza viscosa. Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, por lo general debido a su alta velocidad y/o baja viscosidad, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que tienen alta viscosidad y/o se mueven a bajas velocidades tendrán números de Reynolds bajos y tenderán a ser laminares. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 181)

Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar.

Si $N_R > 4000$, el flujo es turbulento.

2.7.1 Flujo laminar

Mientras el agua fluye desde un grifo a una velocidad muy baja, el flujo parece ser suave y constante. La corriente tiene un diámetro bastante uniforme y hay poca o ninguna evidencia de la mezcla entre las diversas partes de la corriente. A esto se le llama flujo laminar. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 179)

2.7.2 Flujo turbulento

“Cuando el grifo está abierto casi en su totalidad, el agua tiene una velocidad bastante alta. Entonces los elementos del fluido parecen estar mezclándose caóticamente dentro de la corriente. Ésta es una descripción general del flujo turbulento” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 179).

2.8 Pérdidas de Carga por Fricción

En el análisis de los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión comúnmente se expresan en términos de la altura de la columna de fluido equivalente, llamada pérdida de carga h_L . (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 330)

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g}$$

La pérdida de carga h_L representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. La pérdida de carga se produce por la viscosidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 330)

2.8.1 Ecuación de Darcy - Weisbach

En la ecuación general de la energía

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

el término h_L se define como la pérdida de energía en el sistema. Un componente de la pérdida de energía se debe a la fricción en el fluido que fluye. Para el caso del flujo en tuberías y tubos, la fricción es proporcional a la carga de velocidad del flujo y a la relación de la longitud sobre el diámetro de la corriente de flujo. Esto se expresa matemáticamente como la ecuación de Darcy-Weisbach: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 183)

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

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

L = longitud de la corriente de flujo (m o ft)

D = diámetro de la tubería (m o ft)

v = velocidad de flujo promedio (m/s o ft/s)

f = factor de fricción (adimensional)

La ecuación de Darcy-Weisbach puede utilizarse para calcular la pérdida de energía debida a la fricción en las secciones rectas y largas de tubería redonda, tanto para el flujo laminar como para el turbulento. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 183)

2.8.2 Pérdida por fricción en el flujo laminar

Cuando existe flujo laminar, el fluido parece fluir en varias capas, una sobre otra. Dada la viscosidad del fluido, se crea entonces un esfuerzo cortante entre las capas del fluido. Así, en el fluido se pierde energía debido a la acción de superar las fuerzas de fricción producidas por el esfuerzo cortante. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 183)

2.8.3 Pérdida por fricción en el flujo turbulento

Para el flujo turbulento de fluidos en tuberías circulares, se recomienda usar la ecuación de Darcy para calcular la pérdida de energía debida a la fricción. El flujo turbulento es bastante caótico y varía en forma constante. Por estas razones, resulta necesario confiar en datos experimentales para determinar el valor de f . Las pruebas han mostrado que el número adimensional f depende de otros dos números adimensionales, que son el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 184)

2.8.4 Factor de fricción (f)

La fórmula de Darcy-Weisbach puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción f , que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($Re < 2000$) es función solo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ($Re > 4000$) es también función del tipo de pared de la tubería. (CRANE, 1989, págs. 1-8)

La región que se conoce como la "zona crítica" aparece entre los números de Reynolds de 2000 a 4000. En esta región el flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de varios factores; éstos incluyen cambios de sección, de dirección del flujo y obstrucciones tales como válvulas corriente arriba de la zona considerada. El factor de fricción en esta región es indeterminado y tiene límites más bajos si el flujo es laminar y más altos si es turbulento. (CRANE, 1989, págs. 1-8)

Para números de Reynolds superiores a 4000, las condiciones de flujo se vuelven a ser más estables y pueden establecerse factores de rozamiento definitivos. Esto es

importante, ya que permite al ingeniero determinar las características del flujo de cualquier fluido que se mueva por una tubería, suponiendo conocidas la viscosidad y la densidad en las condiciones del flujo. (CRANE, 1989, págs. 1-8)

Si el flujo es laminar ($R_e < 2000$), el factor puede determinarse a partir de la ecuación:

$$f = \frac{64}{R_e}$$

Cuando el flujo es turbulento ($R_e > 4000$) el factor de fricción depende no solo del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería, ε/d , es decir, la rugosidad de las paredes de la tubería (ε) comparada con el diámetro de la tubería (d). Para tuberías muy lisas, como las de latón extruido o vidrio, el factor de fricción disminuye más rápidamente con el aumento del número de Reynolds, que para tuberías con paredes más rugosas. (CRANE, 1989, págs. 1-8)

Como el tipo de la superficie interna de la tubería comercial es prácticamente independiente del diámetro, la rugosidad de las paredes tiene mayor efecto en el factor de fricción para diámetros pequeños. En consecuencia las tuberías de pequeño diámetro se acercan a la condición de gran rugosidad y en general tienen mayores factores de fricción que tuberías del mismo material pero de mayores diámetros. (CRANE, 1989, págs. 1-8)

2.8.5 Factor de fricción para el flujo turbulento

La siguiente ecuación, que permite el cálculo directo del valor del factor de fricción para el flujo turbulento, fue desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(D/\varepsilon)} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{N_R^{0.9}} \right) \right]^2}$$

La ecuación produce valores para f que están dentro de ± 1.0 por ciento dentro del rango de rugosidad relativa D/ε a partir de 100 hasta 1×10^6 y para números de Reynolds desde 5×10^3 hasta 1×10^8 . Ésta es prácticamente la totalidad de la zona turbulenta del diagrama de Moody. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 195)

2.8.6 Diagrama de Moody

Uno de los métodos más utilizados para evaluar el factor de fricción emplea el diagrama de Moody. Este diagrama presenta el factor de fricción f graficado contra el número de Reynolds N_R , con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa D/ε . Estas curvas se generaron a partir de datos experimentales de L. F. Moody. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 185)

Tanto f como N_R se grafican sobre escalas logarítmicas debido al amplio rango de valores encontrados. En el extremo izquierdo de la gráfica, para los números de Reynolds menores a 2000, la línea recta muestra la relación $f = 64/N_R$ para el flujo laminar. Para $2000 < N_R < 4000$, no se trazan curvas porque ésta es la zona crítica existente entre el flujo laminar y el turbulento y no es posible predecir el tipo de flujo. El cambio de flujo de laminar a turbulento resulta en valores para los factores de fricción ubicados dentro de la banda sombreada. Más allá de $N_R = 4000$ se grafica la familia de curvas relacionadas con los diferentes valores de D/ε . Es posible hacer varias observaciones importantes a partir de estas curvas: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 185)

1. Para un número de Reynolds del flujo en particular, a medida que aumenta la rugosidad relativa D/ε , el factor de fricción f disminuye.
2. Para una rugosidad relativa D/ε dada, el factor de fricción f disminuye con el aumento del número de Reynolds hasta que se alcanza la zona de turbulencia completa.
3. Dentro de la zona de turbulencia completa, el número de Reynolds no tiene ningún efecto sobre el factor de fricción.
4. A medida que se incrementa la rugosidad relativa D/ε , también aumenta el valor del número de Reynolds en el que comienza la zona de turbulencia completa. (MOTT & UNTENER, 2015, págs. 185,187)

2.8.7 Rugosidad relativa

La rugosidad relativa es la relación que hay entre el diámetro de la tubería D y la rugosidad promedio ϵ de la pared de la tubería. La condición de la superficie de la tubería depende en gran medida del material de ésta y del método de fabricación. Debido a que la rugosidad es un tanto irregular, para medir su valor global se utilizan técnicas de promedio. (MOTT & UNTENER, 2015, págs. 184-185)

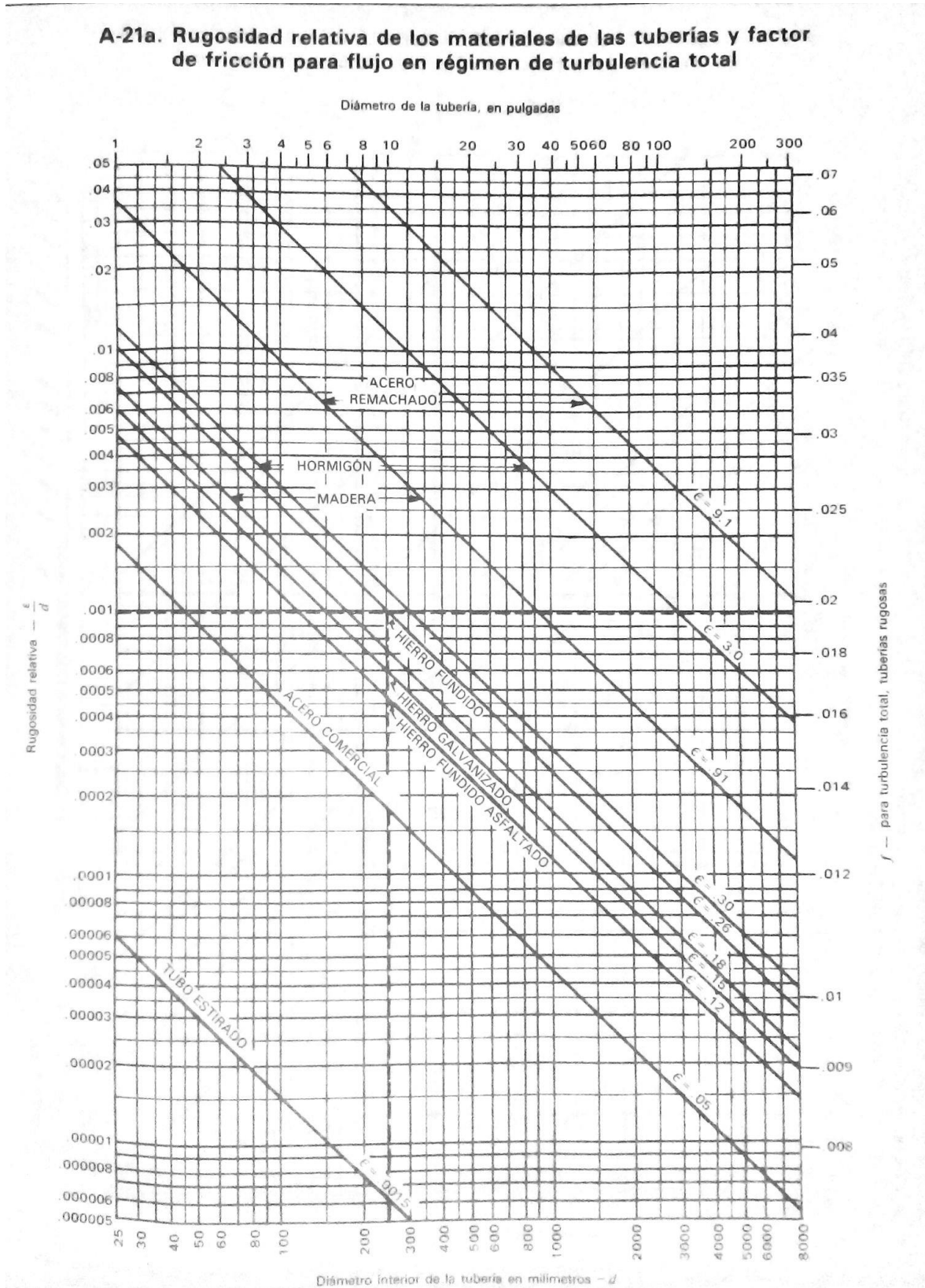
Para los tubos y las tuberías disponibles comercialmente, el valor de diseño de la rugosidad promedio ϵ de la pared de la tubería se ha determinado como indica la tabla 8.2. Estos son sólo valores promedio para tuberías nuevas y limpias. Se debe esperar alguna variación. Después de que una tubería ha estado en servicio durante cierto tiempo, la rugosidad puede cambiar debido a la formación de depósitos en la pared o a la corrosión. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 185)

Tabla 1: Rugosidad de Tuberías

TABLA 8.2 Rugosidad de la tubería —valores de diseño		
Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	3.0×10^{-7}	1.0×10^{-6}
Tubo estirado; cobre, latón, acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil —revestido	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil —sin revestir	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien hecho	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 185

Figura 2: Rugosidad Relativa de Materiales de Tuberías



Fuente: "Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías", CRANE, pág. A-41

Tabla 2: Rugosidad de Tuberías

ANEXO 1

Rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	k_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113

2.9 Pérdidas de Carga por Accesorios

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos (las pérdidas mayores) y se llaman pérdidas menores. Aunque por lo general esto es cierto, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores. El flujo a través de válvulas y uniones es muy complejo, y por lo general no es lógico un análisis teórico. En consecuencia, usualmente los fabricantes de los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 347-348)

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida K_L (también llamado coeficiente de resistencia). (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

Donde h_L es la pérdida de carga irreversible adicional en el sistema de tuberías provocado por la inserción de 1 accesorio, y se define como $h_L = \Delta P_L / \rho g$. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

Las pérdidas de presión en un sistema de tuberías se deben a varias características del sistema, que pueden clasificarse como:

1. Rozamiento en las paredes de la tubería, que es función de la rugosidad de la superficie interior de la misma, del diámetro interior de la tubería y de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido.
2. Cambios de dirección de flujo.
3. Obstrucciones en el paso del flujo.
4. Cambios repentinos o graduales en la superficie y contorno del paso del flujo. (CRANE, 1989, págs. 2-10)

La velocidad en una tubería se obtiene mediante la presión o altura estática, y el descenso de la altura estática o pérdida de presión debida a la velocidad es. (CRANE, 1989, págs. 2-10)

$$h_L = \frac{v^2}{2g_n}$$

Que se define como "altura de velocidad". El flujo por una válvula o accesorio en una línea de tubería causa también una reducción de altura estática, que puede expresarse en función de la altura de velocidad. El coeficiente de resistencia K en la ecuación, (CRANE, 1989, págs. 2-10)

$$h_L = K \frac{v^2}{2g_n}$$

Se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio. Está siempre asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad. En la mayor parte de las válvulas o accesorios las pérdidas por fricción, a lo largo de la longitud real de flujo, son mínimas comparadas con las debidas a uno o más de los otros tres puntos mencionados. (CRANE, 1989, págs. 2-10)

Por ello, el coeficiente de resistencia K se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds, que puede tratarse como constante para cualquier obstáculo dado (como válvula o accesorio) en un sistema de tuberías bajo cualquier condición de flujo, incluida la de régimen laminar. (CRANE, 1989, págs. 2-10)

La misma pérdida para una tubería recta se expresa por la ecuación de Darcy:

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n}$$

De donde resulta que:

$$K = \left(f \frac{L}{D}\right)$$

La relación L/D es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo. Ya que el coeficiente de resistencia K es constante para cualquier condición de flujo el valor de L/D para cualquier válvula o accesorio dados, debe variar de modo inverso al cambio del factor de fricción para las condiciones diferentes de flujo. (CRANE, 1989, págs. 2-11)

Tabla 3: Longitud Equivalente en Diámetros de Tubería

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doblez de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

Tabla 4: Factor de Fricción

TABLA 10.5 Factor de fricción en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, cédula 40, nueva y limpia

Tamaño nominal de la tubería			Tamaño nominal de la tubería		
Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	Factor de fricción, f_T	Estados Unidos (in)	Métrico (mm)	Factor de fricción, f_T
½	DN 15	0.026	3, 3½	DN 80, DN 90	0.017
¾	DN 20	0.024	4	DN 100	0.016
1	DN 25	0.022	5, 6	DN 125, DN 150	0.015
1¼	DN 32	0.021	8	DN 200	0.014
1½	DN 40	0.020	10-14	DN 250 a DN 350	0.013
2	DN 50	0.019	16-22	DN 400 a DN 550	0.012
2½	DN 65	0.018	24-36	DN 600 a DN 900	0.011

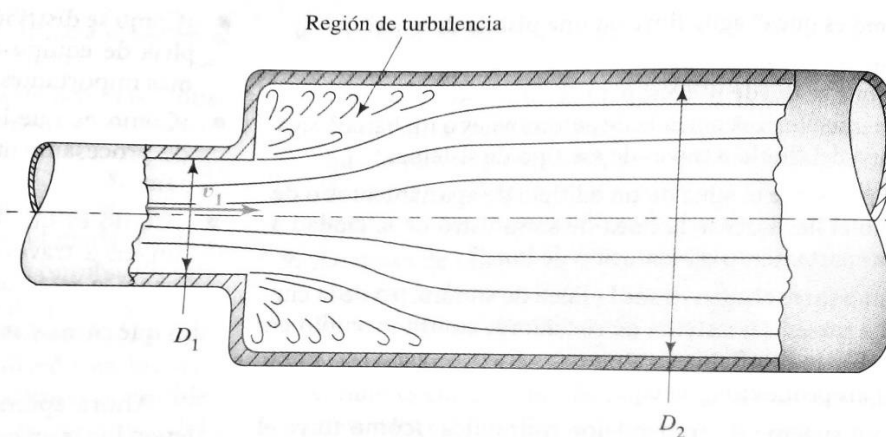
Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

2.9.1 Tipos de accesorios

2.9.1.1. Ampliación súbita

“A medida que un fluido fluye desde una tubería más pequeña hacia una más grande a través de una ampliación súbita, su velocidad disminuye bruscamente, causando turbulencia, lo cual genera una pérdida de energía, como se muestra en la figura” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 228).

Figura 3: Ampliación Súbita



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 228

Las pruebas han demostrado que la cantidad de turbulencia y, por lo tanto, la cantidad de energía perdida, depende de la relación de los tamaños de las dos

tuberías y de la magnitud de la velocidad de flujo presente en la tubería más pequeña. Para este tipo de pérdida menor existe la siguiente ecuación: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 228)

$$h_L = K(v_1^2/2g)$$

donde v_1 representa la velocidad de flujo promedio en la tubería más pequeña antes de la ampliación.

“Si se formulan algunos supuestos de simplificación sobre el carácter de la corriente de flujo a medida que se expande a través de la ampliación súbita, es posible predecir analíticamente el valor de K a partir de la siguiente ecuación:” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 229).

$$K = [1 - (A_1/A_2)]^2 = [1 - (D_1/D_2)]^2$$

“Los subíndices 1 y 2 se refieren a las secciones más pequeñas y más grandes, respectivamente” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 229).

Tabla 5: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Súbita

TABLA 10.1A Coeficiente de resistencia —ampliación súbita—. Datos para la figura 10.3							
D_2/D_1	Velocidad v_1						
	0.6 m/s 2 ft/s	1.2 m/s 4 ft/s	3 m/s 10 ft/s	4.5 m/s 15 ft/s	6 m/s 20 ft/s	9 m/s 30 ft/s	12 m/s 40 ft/s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.2	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08
1.4	0.26	0.25	0.23	0.22	0.22	0.21	0.20
1.6	0.40	0.38	0.35	0.34	0.33	0.32	0.32
1.8	0.51	0.48	0.45	0.43	0.42	0.41	0.40
2.0	0.60	0.56	0.52	0.51	0.50	0.48	0.47
2.5	0.74	0.70	0.65	0.63	0.62	0.60	0.58
3.0	0.83	0.78	0.73	0.70	0.69	0.67	0.65
4.0	0.92	0.87	0.80	0.78	0.76	0.74	0.72
5.0	0.96	0.91	0.84	0.82	0.80	0.77	0.75
10.0	1.00	0.96	0.89	0.86	0.84	0.82	0.80
∞	1.00	0.98	0.91	0.88	0.86	0.83	0.81

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 229

Tabla 6: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Súbita

TABLA 10.1B Coeficiente de resistencia —ampliación súbita—. Datos métricos											
D_2/D_1	Velocidad v_1 , m/s										
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1.2	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
1.4	0.26	0.26	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22	0.21	0.21	0.21
1.6	0.40	0.39	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32	0.32	0.32
1.8	0.51	0.49	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.42	0.41	0.41	0.41
2.0	0.60	0.58	0.54	0.52	0.52	0.51	0.50	0.50	0.49	0.48	0.48
2.5	0.74	0.72	0.67	0.65	0.64	0.63	0.62	0.62	0.61	0.60	0.59
3.0	0.84	0.80	0.75	0.73	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.67	0.66
4.0	0.93	0.89	0.83	0.80	0.79	0.77	0.76	0.75	0.74	0.74	0.73
5.0	0.97	0.93	0.87	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76
10.0	1.00	0.98	0.92	0.89	0.87	0.85	0.84	0.83	0.82	0.82	0.81
∞	1.00	1.00	0.94	0.91	0.89	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82

D_2/D_1 —relación entre el diámetro de la tubería más grande y el diámetro de la tubería más pequeña; v_1 —velocidad en la tubería más pequeña.

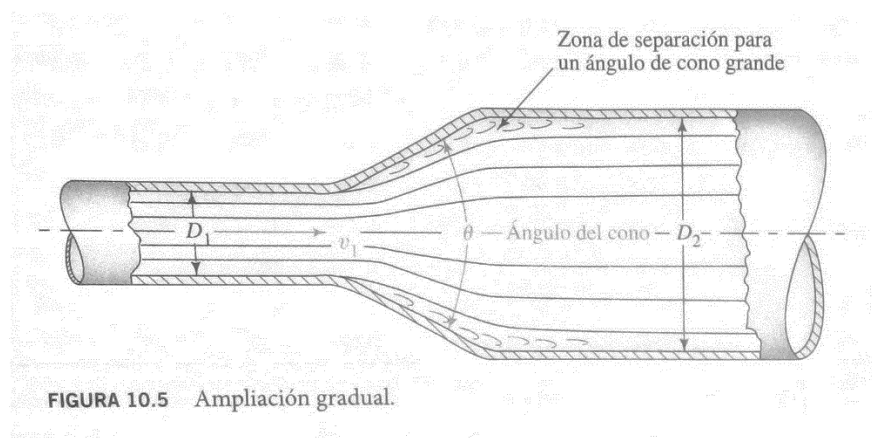
Fuente: Brater, Ernest F. et al. © 1996 *Handbook of Hydraulics*, 7a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, tabla 6-5.

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 229

2.9.1.2. Ampliación gradual

Si la transición de un tubo pequeño a uno más grande puede ser menos abrupta que la ampliación súbita de bordes cuadrados, se reduce la pérdida de energía. Por lo general esto se logra mediante la colocación de una sección cónica entre las dos tuberías, como indica la figura. Las paredes inclinadas del cono tienden a guiar el fluido durante desaceleración y la expansión de la corriente de flujo. Por lo tanto, el tamaño de la zona de separación y la cantidad de turbulencia se reducen a medida que disminuye el ángulo del cono. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 231)

Figura 4: Ampliación Gradual



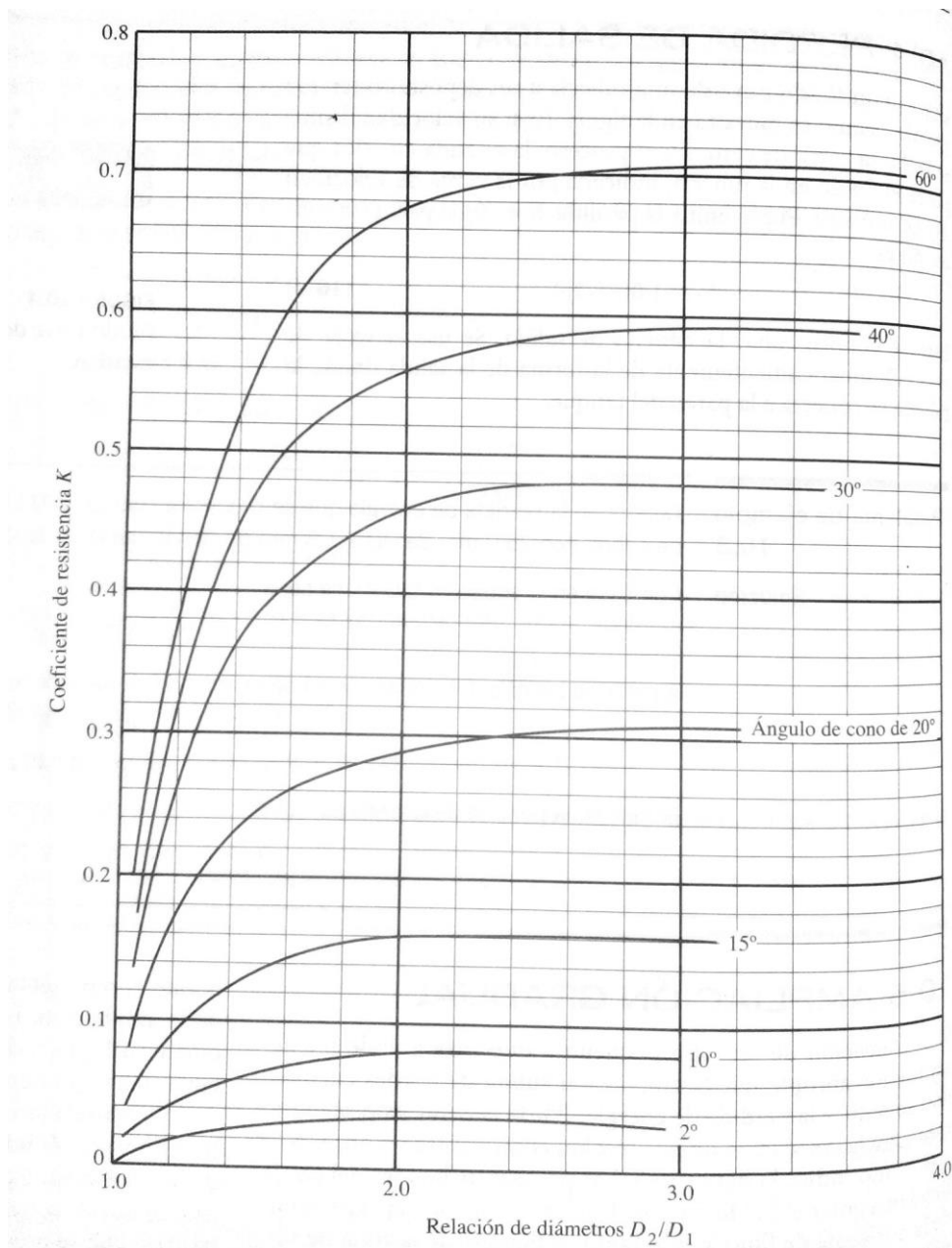
Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 231

La pérdida de energía para una ampliación gradual se calcula a partir de

$$h_L = K(v_1^2/2g)$$

donde v_1 representa la velocidad en la tubería más pequeña antes de la ampliación. La magnitud de K depende de la relación de diámetro D_2/D_1 y del ángulo θ del cono. En la siguiente figura y en la tabla se proporcionan datos para varios valores de θ y D_2/D_1 . (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 231)

Figura 5: Coeficiente de Resistencia - Ampliación Gradual



Fuente: "Mecánica de Fluidos", Robert L. Mott, pág. 232

Tabla 7: Coeficiente de Resistencia – Ampliación Gradual

D_2/D_1	Ángulo de cono θ											
	2°	6°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57	0.61
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63	0.68
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65	0.70
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
∞	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72

Fuente: Brater, Ernest F., Horace W. King, James E. Lindell y C. Y. Wei. 1996. *Handbook of Hydraulics*, 7a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, tabla 6-6.

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 232

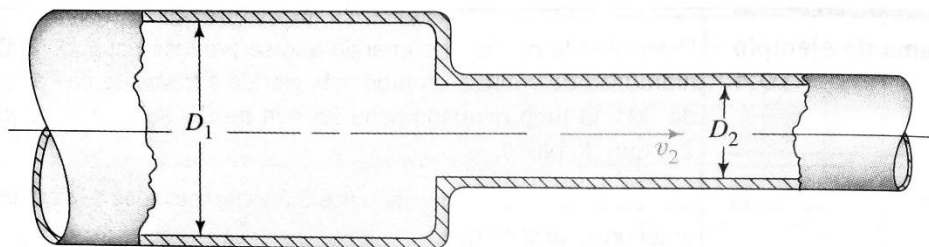
2.9.1.3. Contracción súbita

La pérdida de energía debida a una contracción súbita, como se muestra en la figura, se calcula a partir de la siguiente ecuación

$$h_L = K(v_2^2/2g)$$

donde v_2 representa la velocidad en la tubería pequeña aguas abajo de la contracción. El coeficiente de resistencia K depende de la relación de los tamaños de las dos tuberías y de la velocidad de flujo. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 233)

Figura 6: Contracción Súbita

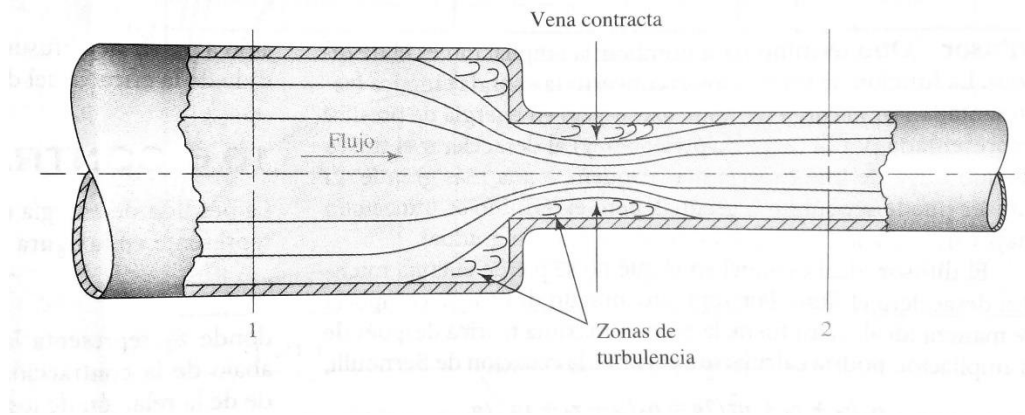


Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 234

El mecanismo por el cual se pierde energía debido a una contracción súbita es bastante complejo. La figura indica lo que sucede cuando la corriente de flujo

converge. En esta figura, las líneas representan las trayectorias de diversas partes de la corriente de flujo, llamadas líneas de corriente. Conforme las líneas de corriente se acercan a la contracción, adoptan una trayectoria curva y toda la corriente sigue contrayéndose por alguna distancia más allá de la contracción. Por lo tanto, la sección transversal mínima efectiva del flujo es menor que la de la tubería más pequeña. La sección en la que se produce esta área de flujo mínimo se llama vena contracta. Más allá de la vena contracta, la corriente de flujo debe desacelerar y expandirse de nuevo para llenar la tubería. La turbulencia causada por la contracción y la expansión posterior genera pérdida de energía. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 233)

Figura 7: Contracción Súbita



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 234

Tabla 8: Coeficiente de Resistencia – Contracción Súbita

TABLA 10.3A Coeficiente de resistencia —contracción súbita—. Datos para la figura 10.8									
D_2/D_1	Velocidad v_2								
	0.6 m/s 2 ft/s	1.2 m/s 4 ft/s	1.8 m/s 6 ft/s	2.4 m/s 8 ft/s	3 m/s 10 ft/s	4.5 m/s 15 ft/s	6 m/s 20 ft/s	9 m/s 30 ft/s	12 m/s 40 ft/s
1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06
1.2	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.10	0.11
1.4	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.19	0.20
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.29	0.27
2.0	0.38	0.37	0.37	0.36	0.36	0.34	0.33	0.31	0.29
2.2	0.40	0.40	0.39	0.39	0.38	0.37	0.35	0.33	0.30
2.5	0.42	0.42	0.41	0.40	0.40	0.38	0.37	0.34	0.31
3.0	0.44	0.44	0.43	0.42	0.42	0.40	0.39	0.36	0.33
4.0	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.37	0.34
5.0	0.48	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.42	0.38	0.35
10.0	0.49	0.48	0.48	0.47	0.46	0.45	0.43	0.40	0.36
∞	0.49	0.48	0.48	0.47	0.47	0.45	0.44	0.41	0.38

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 235

Tabla 9: Coeficiente de Resistencia – Contracción Súbita

TABLA 10.3B Coeficiente de resistencia —ampliación súbita—. Datos métricos											
D_2/D_1	Velocidad v_2 , m/s										
	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
1.1	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
1.2	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
1.4	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19	0.19	0.19
1.6	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.24
1.8	0.34	0.34	0.34	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.29	0.29	0.28
2.0	0.38	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33	0.33	0.32	0.31	0.30
2.2	0.40	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.35	0.34	0.33	0.32
2.5	0.42	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.33
3.0	0.44	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35
4.0	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.38	0.37	0.36
5.0	0.48	0.48	0.46	0.45	0.45	0.44	0.42	0.41	0.39	0.38	0.37
10.0	0.49	0.48	0.47	0.46	0.46	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39
∞	0.49	0.49	0.47	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40

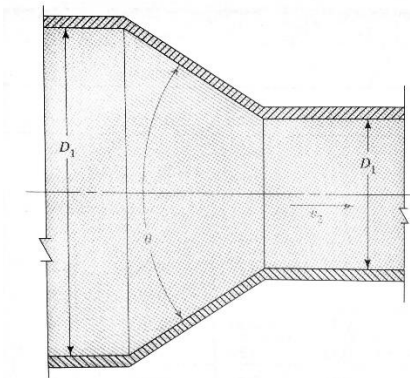
D_2/D_1 —relación del diámetro de la tubería más grande sobre el diámetro de la tubería más pequeña; v_2 —velocidad en la tubería más pequeña.
Fuente: Brater, Ernest F., Horace W. King, James E. Lindell y C. Y. Wei. 1996. *Handbook of Hydraulics*, 7a. ed. Nueva York: McGraw-Hill, tabla 6-7.

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 235

2.9.1.4. Contracción gradual

La pérdida de energía en una contracción puede reducirse de manera sustancial si la contracción se vuelve más gradual. La figura muestra una contracción gradual formada por una sección cónica entre los dos diámetros con cortes agudos en las uniones. El ángulo θ se llama ángulo de cono. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 236)

Figura 8: Contracción Gradual



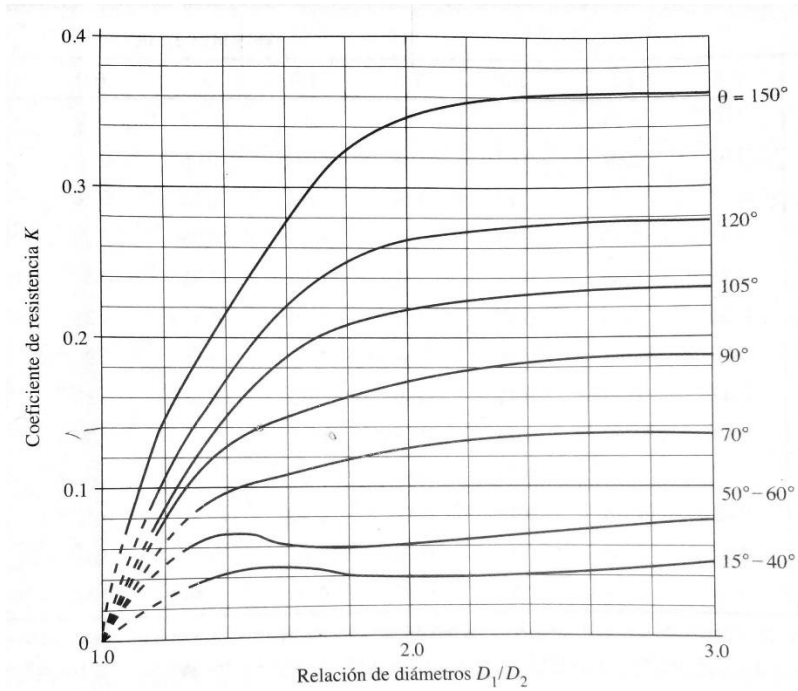
Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 236

La pérdida de energía se calcula a partir de la ecuación

$$h_L = K(v_2^2/2g)$$

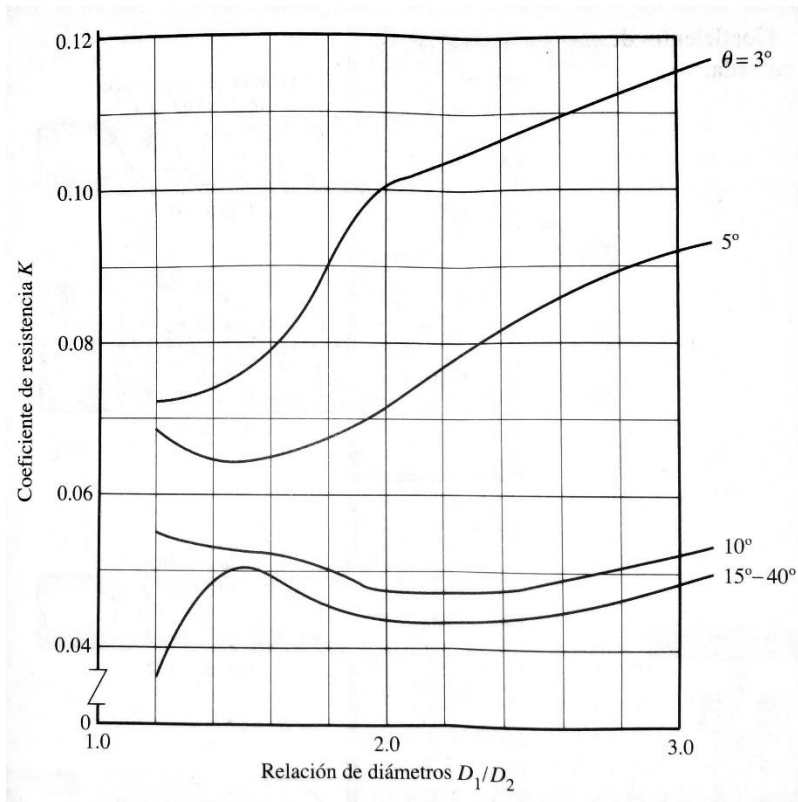
donde el coeficiente de resistencia se basa en la carga de velocidad presente en la tubería más pequeña después de la contracción. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 235)

Figura 9: Coeficiente de Resistencia - Contracción Gradual



Fuente: "Mecánica de Fluidos", Robert L. Mott, pág. 236

Figura 10: Coeficiente de Resistencia - Contracción Gradual



Fuente: "Mecánica de Fluidos", Robert L. Mott, pág. 237

2.9.2 Válvulas

La resistencia depende en gran medida de la trayectoria del fluido a medida que se desplaza hacia, a través de y desde la válvula. Una válvula con una trayectoria más restringida causará más pérdidas de energía. Por lo tanto, es necesario seleccionar cuidadosamente el tipo de válvula si se desea que el sistema esté diseñado de manera eficiente con pérdidas de energía relativamente bajas. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 244)

2.9.2.1. Válvula de Globo

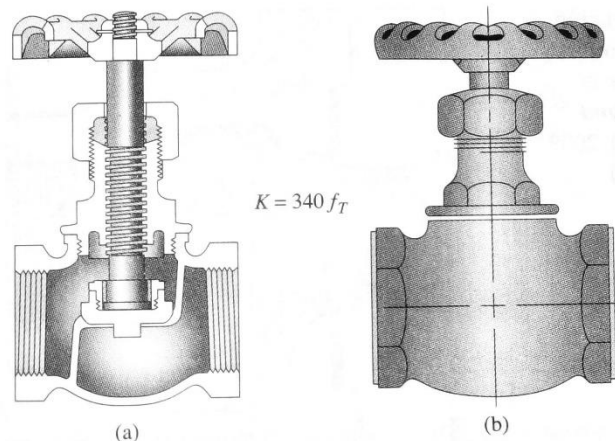
La figura muestra la construcción interna y la apariencia externa de la válvula de globo. Un giro de la manija hace que el dispositivo de sellado se eleve verticalmente hacia afuera del asiento. Es una de las válvulas más comunes y es relativamente barata. Sin embargo, es una de las válvulas de menor rendimiento en términos de pérdidas de energía. El factor de resistencia K es: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 244)

$$K = f_T(L_e/D) = 340f_T$$

La pérdida de energía se produce porque el fluido debe recorrer una trayectoria compleja desde la entrada hasta la salida, trasladándose primero hacia arriba y luego hacia abajo alrededor del asiento de la válvula; después, gira de nuevo para dirigirse a la salida. Se crea mucha turbulencia. Otro uso de la válvula de globo es para estrangular el flujo en un sistema. El término estrangular se refiere a agregar deliberadamente resistencia al flujo para controlar la cantidad de fluido suministrado. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 245)

Figura 11: Válvula de Globo

FIGURA 10.15 Válvula de globo.
(Reproducido con autorización
de Crane Co. *Flow of Fluids through
Valves, Fittings and Pipe*, artículo
técnico núm. 410, 2009. Todos los
derechos reservados)



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 239

2.9.2.2. Válvula de Compuerta

La válvula de compuerta de la figura se muestra en la posición cerrada. Al girar la manija, la compuerta se eleva verticalmente fuera de la trayectoria del flujo. Cuando la compuerta está completamente abierta, hay muy poca obstrucción en la trayectoria de flujo como para causar turbulencia en la corriente de flujo del fluido. Por lo tanto, éste es uno de los mejores tipos de válvula disponibles para limitar la pérdida de energía. El factor de resistencia K es: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 245)

$$K = f_T(L_e/D) = 8f_T$$

En una instalación dada, la válvula de compuerta completamente abierta tendría sólo 2.4% de la pérdida de energía causada por una válvula de globo. A menudo, el mayor costo de la válvula se justifica por el ahorro de energía obtenido durante la vida útil del sistema. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 245)

La válvula de compuerta se podría utilizar para generar un estrangulamiento al cerrar parcialmente la válvula, con lo cual se coloca de nuevo la compuerta de corriente de flujo en algún grado. En la tabla 10.4 se presentan datos maestres para las posiciones parcialmente cerradas. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 245)

Figura 12: Válvula de Compuerta

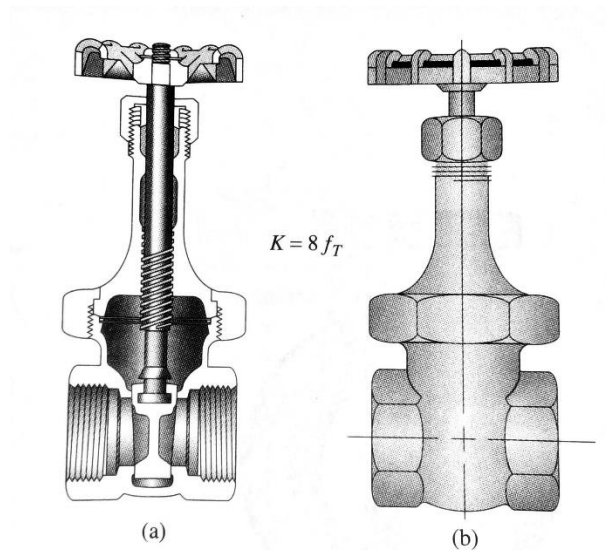


FIGURA 10.17 Válvula de compuerta.
(Reproducido con autorización de Crane Co.
Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe,
artículo técnico núm. 410, 2009. Todos los
derechos reservados)

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 239

2.9.2.3. Válvula de Bola

Es un tipo de válvula que posee una bola taladrada de lado a lado que abre, cierra u obstruye en forma parcial el flujo, pueden tener dos o tres vías.

Se abre mediante el giro del eje unido a la esfera o bola perforada, de tal forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. (EcuRed, s.f.)

Es un tipo de válvula muy versátil en el manejo de fluidos lo que le permite ser una de las válvulas más populares. Precisamente su cierre rápido de $\frac{1}{4}$ de vuelta ordinariamente con una palanca permite que su operación sea muy sencilla además de que su diseño es más pequeño que las válvulas de compuerta. (EcuRed, s.f.)

Las válvulas de bola se utilizan para dejar o no pasar un fluido (ON-OFF), de otra forma si se deja parcialmente abierta el fluido y la presión del mismo desgastaran partes de la válvula que con el tiempo averiaran los interiores de la válvula dando lugar a fugas. (EcuRed, s.f.)

Figura 13: Válvula de Bola



Ventajas

- Bajo costo.
- Alta capacidad.
- Corte bidireccional.
- Circulación en línea recta.
- Pocas fugas.
- Se limpia por si sola.
- Poco mantenimiento.
- No requiere lubricación.
- Tamaño compacto.
- Cierre hermético con baja torsión (par).

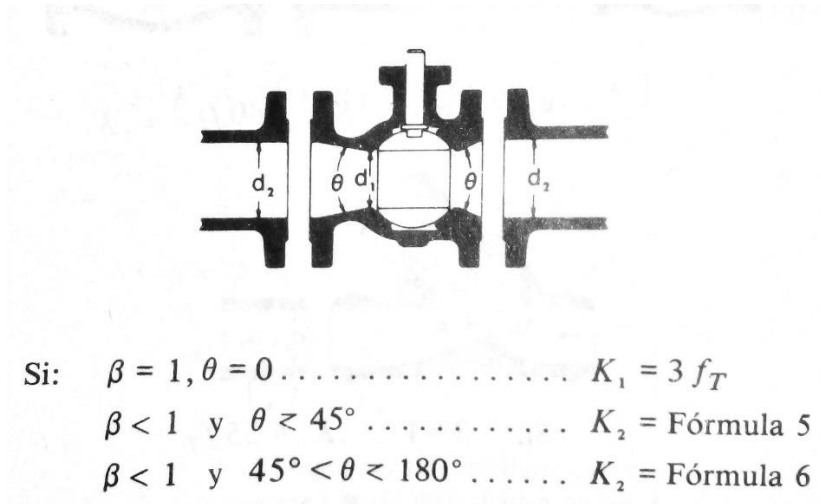
Desventajas

- Características deficientes para estrangulación.
- Alta torsión para accionarla.
- Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras.
- Propensa a la cavitación.

(EcuRed, s.f.)

El factor de resistencia K es: $K = 3f_T$

Figura 14: Válvula de Bola



Fuente: “Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías”, CRANE, pág. A-48

2.9.3 Bombas

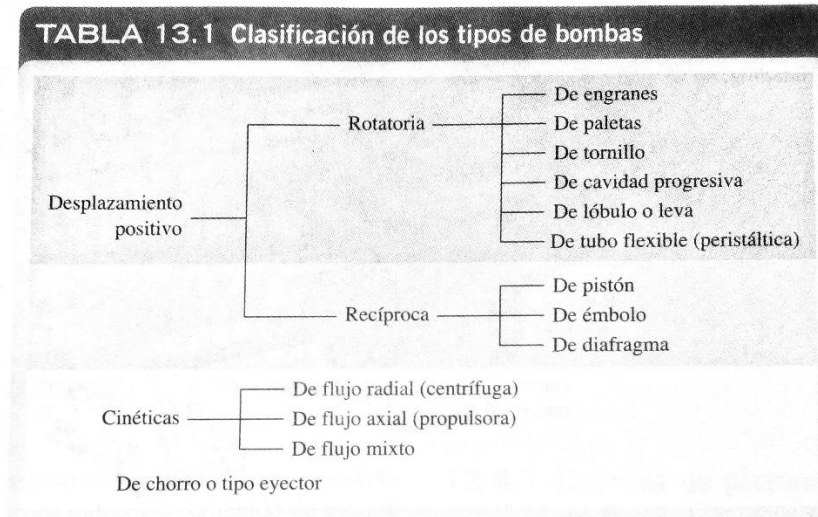
Una bomba es un ejemplo común de un dispositivo mecánico que añade energía a un fluido. Un motor eléctrico o algún otro dispositivo de potencia primaria impulsan un eje giratorio en la bomba. Entonces la bomba adquiere esta energía cinética y la suministra al fluido, lo que da como resultado el flujo del fluido y el incremento de su presión. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 156)

Las bombas se utilizan para impulsar líquidos que se transportan a través de sistemas de tuberías. Deben entregar el caudal deseado del fluido mientras transmite al mismo la energía cinética necesaria para vencer la carga dinámica total requerida h_a , equivalente a la suma de las cargas por cambios de elevación, cargas por diferencias de presión, cargas de velocidad y, por último, todas las pérdidas de energía ocurridas en el sistema. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 318)

Por lo general las bombas se clasifican como de desplazamiento positivo o bombas cinéticas. En la tabla se listan varios tipos de cada una. Las bombas de desplazamiento positivo entregan un volumen determinado de fluido por cada revolución del eje de la bomba o por cada ciclo de movimiento de los elementos de bombeo activos. Con frecuencia, producen presiones muy altas con caudales moderados. Las bombas cinéticas operan mediante la transferencia de energía cinética desde un elemento giratorio, llamado impulsor, hasta un fluido mientras éste

se desplaza hacia y a través de la bomba. Después, una parte de esta energía se convierte en energía de presión tanto estática como dinámica a la salida de la bomba. El tipo de bomba cinética más frecuentemente utilizado es la bomba centrífuga. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 320)

Tabla 10: Clasificación de Tipos de Bombas



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 321

2.9.3.1. Bombas cinéticas

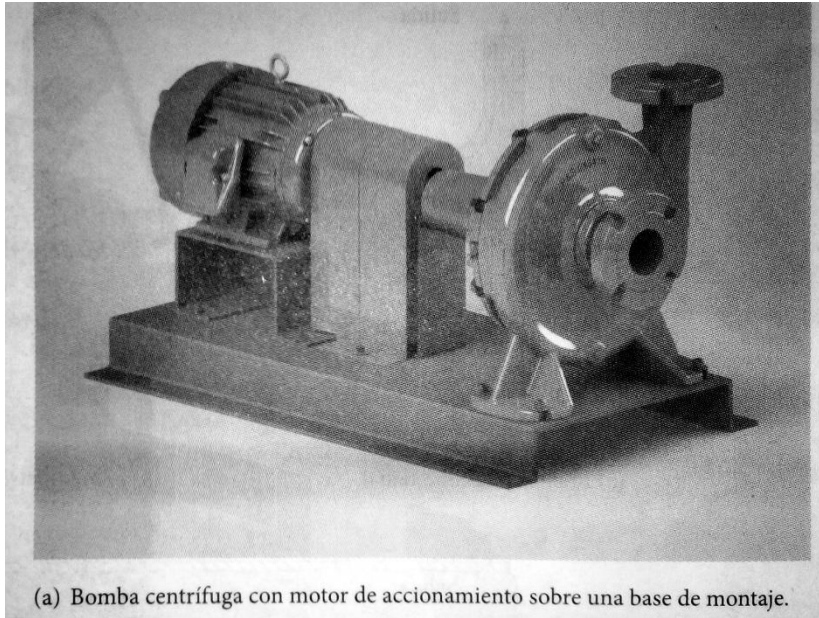
“Las bombas cinéticas añaden energía al fluido acelerándolo mediante la acción de un impulsor giratorio” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 326).

2.9.3.2. Bombas centrífugas

La figura muestra la configuración básica de una bomba centrífuga de flujo radial, el tipo más común de bomba cinética. La parte (a) muestra la unidad completa que consta de la bomba en la parte delantera, el motor de accionamiento en la parte posterior y la conexión entre el eje de la bomba y el eje del motor en la parte central bajo una armadura de protección. La parte (b) muestra una vista seccional de la bomba con la entrada de succión a la derecha y el puerto de descarga en la parte superior. El fluido se introduce en el centro del impulsor y luego se envía hacia fuera mediante las paletas. Al dejar el impulsor, el fluido pasa por una voluta en forma de espiral, donde se ralentiza gradualmente, y con esto una parte de la energía cinética se convierte en la presión del fluido. El eje de la bomba, los cojinetes, el sello y la armadura son fundamentales para el funcionamiento eficiente y confiable de la bomba, así como para darle una larga vida. La parte (c) muestra un impulsor abierto

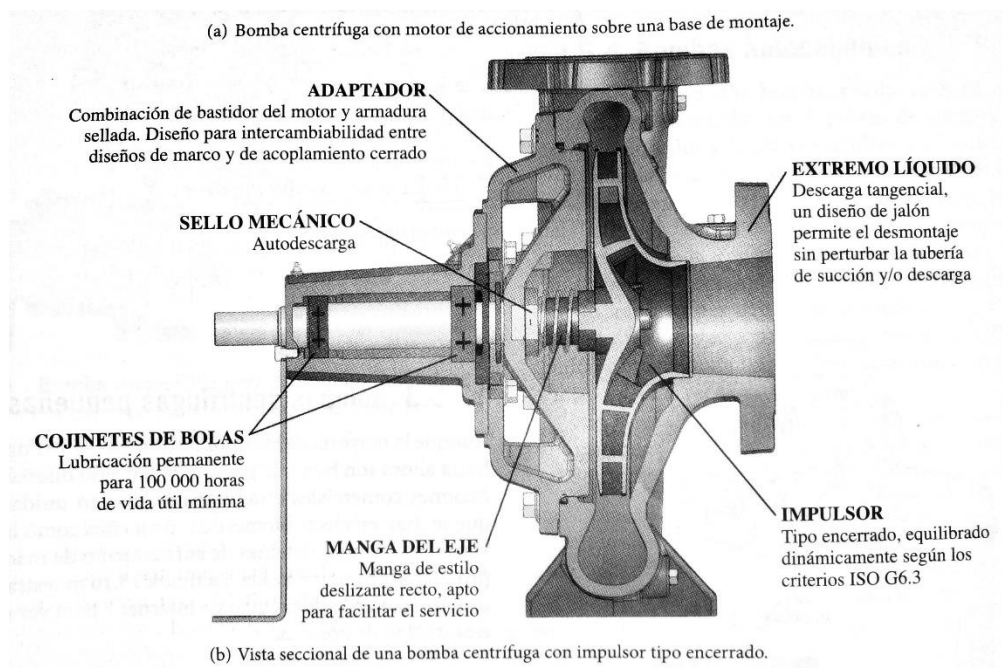
del tipo radial montado en la armadura de la bomba, la cual está orientada de modo que el puerto de descarga se encuentra a la izquierda. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 326)

Figura 15: Bomba Centrífuga



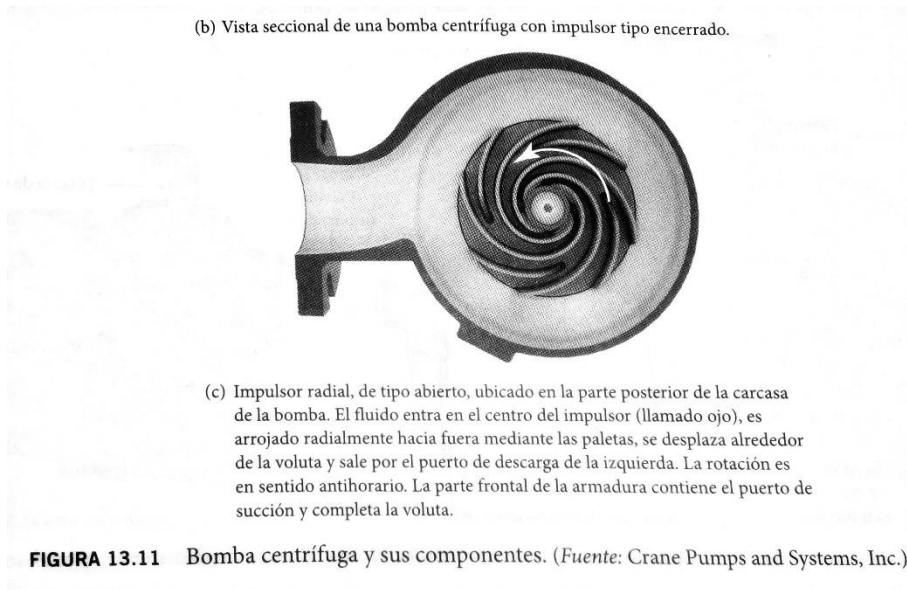
Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 327

Figura 16: Bomba Centrífuga



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 327

Figura 17: Bomba Centrífuga



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 327

2.9.3.3. Aplicación de bombas

“De la ecuación general de la energía, determinamos la energía añadida por una bomba al fluido, a la cual se llamó h_a ” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 318).

2.9.3.4. Carga total en una bomba

A este valor de h_a le llamaremos carga total en una bomba. Algunos fabricantes de bombas se refieren a este dato como la carga dinámica total (*TDH*, por Total Dynamic Head). Al despejar h_a de la ecuación general de la energía, se obtiene: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 318)

$$h_a = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + h_L$$

$$TDH = h_a$$

2.9.3.5. Leyes de afinidad para bombas centrífugas

La mayoría de las bombas centrífugas pueden operarse a diferentes velocidades para obtener diversas capacidades. Además, un tamaño dado para la armadura de la bomba puede integrar impulsores de distintos diámetros. Es importante entender la manera en que varían la capacidad, la carga y la potencia cuando se modifica la

rapidez rotacional o el diámetro del impulsor. Estas relaciones, denominadas leyes de afinidad, se listan aquí. El símbolo N se refiere al módulo de la velocidad angular o rapidez rotacional del impulsor, normalmente en revoluciones por minuto (r/min o rpm). (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 332)

1. *Cuando varía la velocidad angular:*

- a. La capacidad varía directamente con la velocidad angular:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

- b. La capacidad de carga total varía con el cuadrado del módulo de la velocidad angular:

$$\frac{h_{a_1}}{h_{a_2}} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

- c. La potencia requerida por la bomba varía con el cubo de la magnitud de la velocidad angular:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3$$

2. *Cuando varía el diámetro del impulsor*

- a. La capacidad varía directamente con el diámetro del impulsor:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

- b. La carga total varía con el cuadrado del diámetro del impulsor:

$$\frac{h_{a_1}}{h_{a_2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$$

- c. La potencia requerida por la bomba varía con el cubo del diámetro impulsor:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3$$

La eficiencia permanece casi constante cuando hay cambios en la rapidez rotacional y modificaciones pequeñas en el diámetro del impulsor. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 332)

2.9.3.6. *Potencia requerida por las bombas*

“La potencia se define como la rapidez con que se realiza el trabajo. En mecánica de fluidos se puede modificar este enunciado y considerar que la potencia es la rapidez a la que se transfiere energía” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 162).

En el sistema SI, la unidad de energía es el Joule (J) o $N \cdot m$. La unidad de potencia es el watt (W), que equivale $1.0 N \cdot m/s$ o $1.0 J/s$.

$$P_A = h_A W$$

Como $W = \gamma Q$, también se puede escribir

$$P_A = h_A \gamma Q$$

donde P_A indica la potencia añadida al fluido, γ representa el peso específico del fluido que fluye por la bomba y Q es la rapidez del flujo de volumen o gasto volumétrico. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 162)

2.9.3.7. *Eficiencia mecánica de las bombas*

El término eficiencia se utiliza para denotar la relación de la potencia suministrada por la bomba al fluido sobre la potencia suministrada a la bomba. Debido a las pérdidas de energía causadas por la fricción mecánica en los componentes de la bomba, la fricción del fluido en la bomba y la turbulencia excesiva del fluido en la bomba, no toda la potencia de entrada se suministra al fluido. Entonces, utilizando el símbolo e_M para indicar la eficiencia mecánica, se tiene: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 163)

$$e_M = \frac{\text{Potencia suministrada al fluido}}{\text{Potencia de entrada a la bomba}} = \frac{P_A}{P_I}$$

El valor de e_M siempre será menor que 1.0.

Para las bombas disponibles comercialmente, el valor de e_M se publica como parte de los datos de rendimiento.

El valor de la eficiencia mecánica de las bombas depende no sólo del diseño de la bomba, sino también de las condiciones bajo las cuales esté funcionando, particularmente la carga total y la rapidez del flujo. Para las bombas centrífugas utilizadas principalmente para transferir o hacer circular líquidos, las eficiencias varían entre 50 y 85 por ciento. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 163)

2.9.3.8. *Cavitación*

Cuando a la entrada de la bomba la presión de succión es demasiado baja, se forman burbujas de vapor en el fluido de una manera similar a la ebullición. Si la bomba debe extraer líquido desde abajo o si hay pérdidas de energía excesivas en la línea de succión, la presión en la bomba puede ser lo suficientemente baja como para causar la formación de burbujas de vapor en el fluido. El fluido entra en la bomba por el puerto de succión localizado en el ojo central del impulsor y es allí donde se produce la presión más baja. Enseguida, la rotación del impulsor acelera el fluido hacia el exterior a lo largo de las paletas y en dirección de la armadura, llamada voluta. La presión del fluido sigue aumentando en todo este proceso. De haberse formado burbujas de vapor en el puerto de succión debido a una presión excesivamente baja en ese punto, éstas colapsarán puesto que fluyen hacia zonas de mayor presión. El colapso de las burbujas libera grandes cantidades de energía, lo cual ejerce fuerzas de impacto efectivas sobre las paletas o álabes del impulsor y causa una erosión rápida de su superficie. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 341)

Cuando se produce la cavitación, el desempeño de la bomba resulta gravemente degradado conforme disminuye el caudal volumétrico entregado. La bomba vibra y hace ruido, emitiendo un fuerte sonido como si el fluido contuviera grava. Si se permite que esto continúe, la bomba se destruye en poco tiempo. la bomba debe apagarse de inmediato para identificar la causa de la cavitación y corregirla antes de reanudar la operación. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 341)

2.9.4 *Curva de resistencia del sistema*

“El punto de operación de una bomba se define como el caudal que entregará la bomba cuando se instale en un sistema dado y esté trabajando contra un carga total en particular. La bomba debe realizar las siguientes tareas:” (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 347).

1. Elevar el fluido desde un depósito u otra fuente inferior hasta un punto de destino tanque superior.
2. Aumentar la presión del fluido desde el punto de origen hasta el punto de destino.
3. Superar la resistencia causada por la fricción en la tubería, las válvulas y los accesorios.
4. Superar la resistencia causada por los elementos del proceso.
5. Suministrar la energía relacionada con la operación de las válvulas del control de flujo que causan cambios inherentes a la carga del sistema para lograr los caudales deseados.

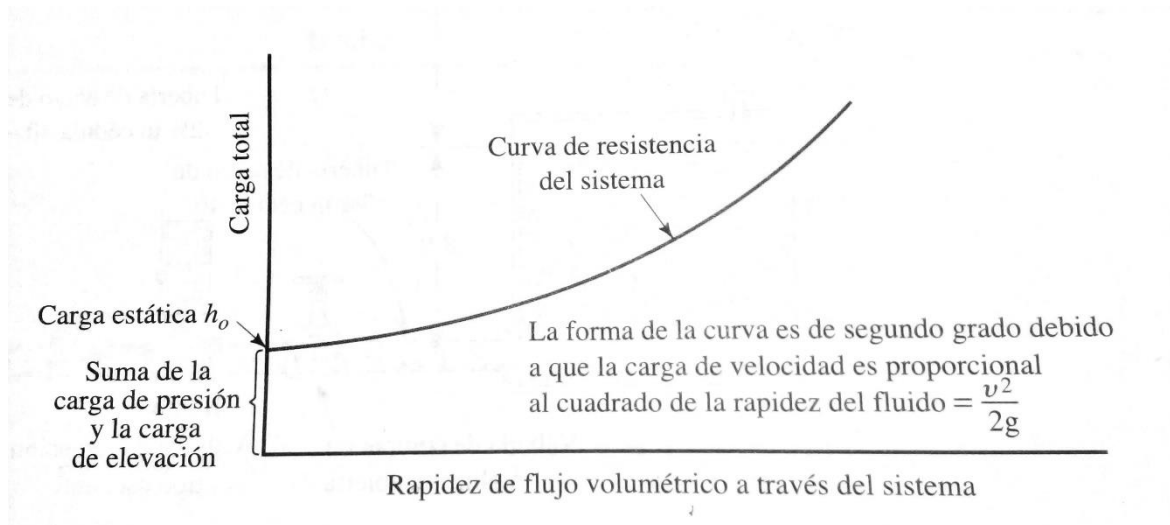
Los dos primeros elementos de esta lista son componentes de la carga estática, h_o , esperada para el sistema, donde el nombre se refiere al hecho de que la bomba debe superar estas resistencias antes de que cualquier fluido comience a desplazarse, es decir, cuando el fluido está estático. La carga estática, h_o , se define como: (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 347)

Carga Estática Total

$$h_o = (p_2 - p_1)/\gamma + (z_2 - z_1)$$

Pero se espera que la bomba trabaje contra una carga superior y, de hecho, que suministre fluido al sistema con una rapidez de flujo volumétrico especificada. Tan pronto como el fluido comienza a fluir por las tuberías, válvulas, los accesorios y elementos del proceso incluidos en el sistema, se desarrolla más carga debido a las pérdidas de energía que se producen. Recuerde que las pérdidas de energía son proporcionales a la carga de velocidad presente en las tuberías ($v^2/2g$) y, por lo tanto, aumentan de acuerdo con el cuadrado de la rapidez del fluido. Esto hace que la forma característica de una curva de resistencia del sistema sea parabólica (SRC), a veces llamada curva de segundo grado, como se muestra en la figura. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 347)

Figura 18: Curva de Resistencia del Sistema



Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 347

2.9.5 Selección de la bomba y punto de operación del sistema

Los datos básicos necesarios para especificar una bomba son el caudal de diseño y la carga total requerida en ese caudal. Esto requiere que el sistema donde funcionará la bomba haya sido diseñado y analizado para determinar su curva de resistencia. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 350)

Otro concepto introducido aquí es la identificación del punto de operación para la bomba seleccionada. Para encontrar el punto de operación se superpondrá la curva de desempeño de la bomba trazada para la carga contra el flujo registrado sobre la curva de resistencia del sistema. La intersección de las dos curvas es el punto de operación. (MOTT & UNTENER, 2015, pág. 350)

2.9.5.1 Directrices para la selección de la bomba

Dado el punto de operación deseado para el sistema, con el caudal recomendado y la carga total esperada sobre la bomba:

1. Busque una bomba con una alta eficiencia en el punto de diseño y para la cual el punto de operación se encuentre cerca del punto de máxima eficiencia (BEP) para la bomba.
2. Las normas establecidas en forma conjunta por el American National Standards Institute (ANSI) y el Hydraulic Institute (IH) exige una región de operación recomendada (POR) para las bombas centrífugas que se encuentre entre 70 y 120 por ciento del BEP.

3. Para la bomba seleccionada, especifique la designación del modelo, el módulo de la velocidad angular, el tamaño del impulsor y los tamaños de los puertos de succión y descarga.
4. En el punto de operación real, determine la potencia requerida, la rapidez del flujo volumétrico real entregado, la eficiencia y la $NPSH_R$. Además, verifique el tipo de la bomba, los requisitos de montaje y los tipos y tamaños de líneas de succión y descarga para asegurarse de que son compatibles con la instalación pretendida.
5. Calcule la $NPSH_A$ para el sistema.
6. Asegúrese de que habrá una $NPSH_A > 1.10 NPSH_R$ para todas las condiciones de operación esperadas.
7. Si es necesario, proporcione el medio adecuado para conectar los tamaños de tubería especificados a las conexiones de la bomba si éstas son de tamaños diferentes. Utilice un reductor gradual o un expansor gradual para minimizar las pérdidas de energía añadidas al sistema por estos elementos. (MOTT & UNTENER, 2015, págs. 350-351)

Figura 19: Punto de Operación del Sistema

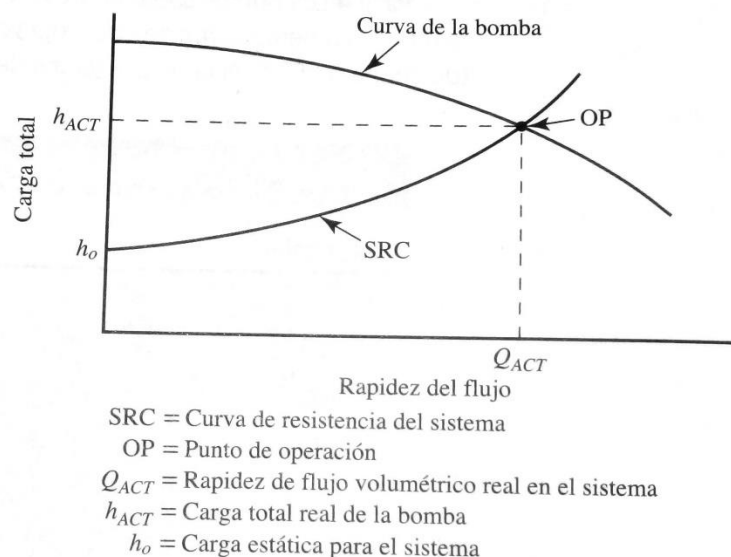


FIGURA 13.44 Ilustración genérica del punto de operación de una bomba en un sistema de flujo de fluidos.

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 350

2.10 Laboratorio de Hidráulica

2.10.1 Historia de fundación del primer Laboratorio de Hidráulica

La energía producida gracias al agua es esencial para nuestro día a día, eso es indiscutible. Esta rama de la ciencia existe prácticamente desde la historia de la humanidad, ya que la lucha del ser humano para sobrevivir lo llevó a controlar la fuerza del agua para canalizar ríos y basar la economía en la agricultura.

Unos de los grandes precursores que crearon numerosos sistemas de canalización del agua fueron los romanos.

No obstante fue en el año 1795 cuando se creó el primer modelo físico hidráulico gracias al ingeniero Luís Jerónimo en un tramo del río Garona. Años más adelante descubrieron la relación que existía entre la fuerza de la inercia y la fuerza de fricción interna, ya que estas premisas eran de gran importancia a la hora de elaborar el diseño de los modelos hidráulicos.

En el año 1891, se fundó el primer laboratorio hidráulico en Dresden (Alemania), uno de los principales motores en la investigación y formación de ingenieros en esta rama. (La historia de la ingeniería hidráulica en pocas palabras, s.f.)

2.10.2 Objetivo de un Laboratorio de Hidráulica

El objetivo de un Laboratorio de Hidráulica es apoyar las actividades académicas que se desarrollan en los diferentes programas que se imparten y realizan en la Facultad de Ingeniería, específicamente en el área de Hidráulica, apoyando las actividades de los usuarios, señalados en los respectivos planes de estudio, de acuerdo a las normas vigentes en las distintas áreas de Hidráulica. El laboratorio ofrece apoyo a la docencia y alumnos a través de la experimentación asociada a los diversos tópicos de las asignaturas de Hidráulica, Hidrología e Hidráulica de Canales principalmente. Además, apoya la experimentación para investigación, diseño, revisión, evaluación y aprendizaje de la Hidráulica. (Chávez, 2017)

Sirve para confirmar los conceptos teóricos desarrollados en clase, con el comportamiento real de los fenómenos físicos; para luego aplicar con confianza los conceptos teóricos en el estudio, diseño y construcción de sistemas hidráulicos y de manejo de fluidos en diferentes campos de la Ingeniería. (Mojica Gutiérrez & Arias Medina, 2014)

2.10.3 Laboratorios de Hidráulica en el mundo y en Ecuador

Alrededor del mundo se pueden encontrar Laboratorios de Hidráulica muy importantes y de gran tamaño, dedicados a la investigación de la Hidráulica en obras civiles.

Se tiene por ejemplo el laboratorio de AIN Active, una empresa de consultoría e ingeniería con capacidad de proveer soluciones técnicas multidisciplinarias en el campo de la ingeniería energética, civil, industrial y medioambiental. Su laboratorio se encuentra ubicado en España y cuenta con 1500 m² equipados, depósitos con capacidad de 80 m³ y varios canales y bombas para recirculación de fluido.

En general, se puede decir que las universidades que tienen Facultad de Ingeniería Civil, cuentan con un Laboratorio de Hidráulica.

Como ejemplos se puede citar la Universidad de San Simón en Bolivia, posee Laboratorio de Hidráulica desde el año de 1986 y proporciona una gran gama de servicios a empresas públicas y privadas. Las áreas de servicios ofertados son: hidráulica, hidrología, hidrometría, morfología de ríos, aguas subterráneas, manejo integral de recursos hídricos, saneamiento básico, planificación y evaluación de proyectos, entre otros. También brinda apoyo académico para la formación de recursos humanos calificados en temas relacionados con los recursos hídricos. Entre las actividades que destacan están: cursos de capacitación, asesoramiento de tesis, prácticas de laboratorio, apoyo académico en materias de hidráulica I, hidráulica II, puertos y vías navegables y modelos hidráulicos.

De igual manera en México, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua tiene un Laboratorio de Hidráulica, que sirve para prácticas de laboratorio estudiantil y además oferta servicios a la sociedad en hidráulica, hidrología superficial y subterránea; y en diseños hidráulicos.

La Universidad Católica de Colombia tiene su laboratorio que es utilizado para la realización de experimentos hidráulicos y comprobación de los fenómenos hidráulicos por parte de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil.

En Perú se tiene el Laboratorio Nacional de Hidráulica, que es el más grande del Perú con 17000 m². Según su actual director, el ingeniero Julio Kuroiwa, hoy funciona como una empresa universitaria que se autofinancia con estudios de consultoría especializada, medición de caudales y diseño de modelos hidráulicos. En este laboratorio se da apertura

para que estudiantes universitarios puedan acercarse y realizar prácticas con fines académicos. Pero también construyen grandes modelos físicos que traen consigo los fondos para financiar sus actividades.

En Ecuador se puede citar varias universidades que poseen Laboratorio de Hidráulica, tales como: la Escuela Politécnica Nacional (EPN), la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), la Universidad Politécnica Salesiana (UPS), entre otras.

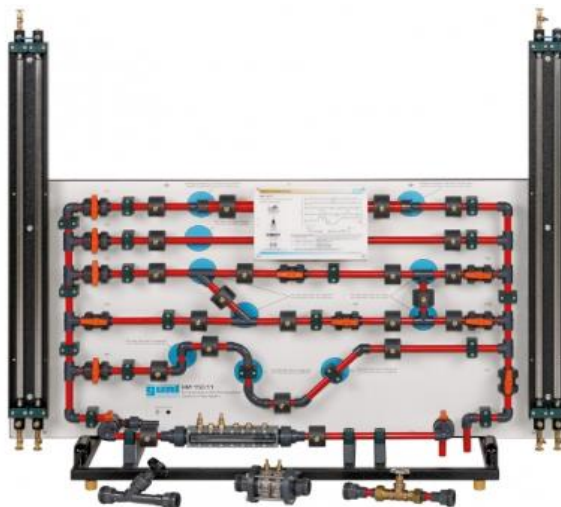
El Laboratorio de Hidráulica la EPN ofrece servicios de: ensayos en tuberías, mediciones y calibraciones y prácticas de Hidráulica I y II; posee varios equipos como un canal de transporte de sedimentos, un banco hidráulico para suministrar agua a los equipos, un equipo para hidrología, un canal hidrodinámico entre otros.

El Laboratorio de Hidráulica de la UPS tiene varios equipos para el uso de los estudiantes y del personal docente. Con sus equipos se pueden estudiar fenómenos como el resalto hidráulico, vertederos, pérdidas de energía por fricción, tomas de agua laterales en ríos, entre otros.

2.10.4 Ejemplos comerciales del equipo diseñado en esta tesis

En el mercado se puede encontrar ofertas de este tipo de equipos para medir pérdidas de energía por fricción en tuberías y pérdidas menores por accesorios. Como ejemplo se tiene el equipo “HM 150.11 Pérdidas de carga en el sistema de tuberías” de la marca alemana GUNT HAMBURG. En este equipo se puede medir pérdidas por fricción y pérdidas menores.

Fotografía 1: Equipo HM 150.11 GUNT



Fuente: Página oficial de GUNT HAMBURG

También se puede encontrar un modelo de la marca inglesa Armfield, el equipo sirve para la medición de pérdidas de energía en tuberías causadas por la fricción. El modelo es el “C6MKII Fluid Friction Measurements – Issue 3”.

Fotografía 2: C6MKII Fluid Friction Measurements – Issue 3



Fuente: Página oficial de Armfield

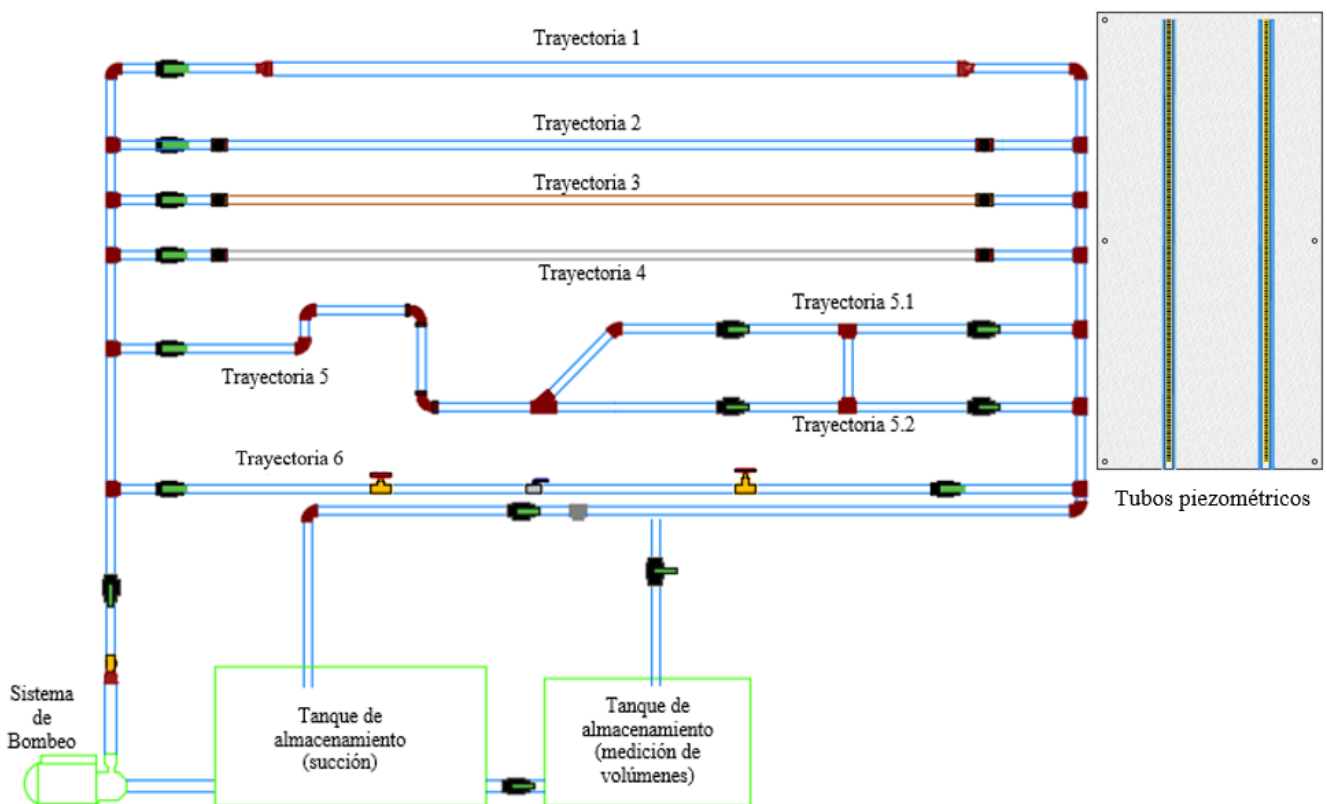
El costo de la compra e importación de uno de estos equipos es muy alto.

CAPÍTULO 3 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

Se diseñará un equipo en el cual se pueda investigar las pérdidas hidráulicas por fricción en tuberías de distinto material y pérdidas menores en distintos accesorios y válvulas comúnmente usadas en el mercado. Se medirán las pérdidas mediante lecturas de carga hidráulica en tubos piezométricos y mediante la utilización de manómetros. El equipo estará compuesto de siete trayectorias independientes, y cada trayectoria estará destinada para cada tipo de tubería o accesorios; las cuales contarán con acoples de fácil conexión para poder trasladar los piezómetros y los manómetros a cada punto de medición. Se utilizará una bomba centrífuga con un tanque de almacenamiento para succión, que proveerá de agua al sistema de tuberías. Para la medición del caudal se utilizará un tanque plástico graduado volumétricamente.

3.1 Partes del equipo

Ilustración 1: Trayectorias y Partes del Equipo



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El equipo está constituido por los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento (para succión).
- Sistema de bombeo.
- Ramales para medir pérdidas por fricción.
- Ramales para medir pérdidas menores por accesorios.
- Línea de descarga (incluye tanque para medición de volúmenes).
- Equipo de medición.
 - Tubos piezométricos.
 - Manómetros de glicerina.

3.2 Selección de tuberías para el sistema hidráulico

Para el equipo se seleccionaron las siguientes tuberías debido a que son las más utilizadas en instalaciones hidrosanitarias.

- Tubería de PVC de 1"
- Tubería de PVC de ½"
- Tubería de cobre de ½"
- Tubería de hierro galvanizado de ½"

3.3 Selección de accesorios para el sistema hidráulico

Para el equipo se seleccionaron los siguientes accesorios debido a que son las más utilizadas en instalaciones hidrosanitarias.

- Ampliación de PVC roscable de ½" a 1".
- Reducción de PVC roscable de 1" a ½".
- Codo recto 90° de PVC roscable de ½".
- Codo curvo 90° de PVC roscable de ½".
- Yee de PVC roscable de ½".
- Codo 45° de PVC roscable de ½".
- Tee de PVC roscable de ½".

- Válvula de globo metálica de ½”.
- Válvula de bola metálica de ½”.
- Válvula de compuerta metálica de ½”.
- Válvula de bola de PVC de ½”.

3.4 Diseño hidráulico del equipo

Se consideran los siguientes datos para el funcionamiento del equipo.

Temperatura del agua = 15 °C

Masa específica del agua (ρ) = 999.10 kg/m³.

Peso específico del agua (γ) = 9798 N/m³.

Viscosidad dinámica (μ) = 1.14 x 10⁻³ kg/(m.s).

Viscosidad cinemática (ν) = 1.14 x 10⁻⁶ m²/s.

Tabla 11: Viscosidad Cinemática

VISCOSIDAD CINEMÁTICA	
T (°C)	ν (m ² /s)
8	1,37956E-06
10	1,30307E-06
12	1,23309E-06
14	1,16889E-06
15	1,13874E-06
16	1,1098E-06
18	1,05529E-06
20	1,00488E-06
22	9,58145E-07
24	9,14727E-07
26	8,74311E-07
28	8,36615E-07
30	8,01394E-07

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1 Curva de operación del sistema

Se determina la curva de operación del sistema para cada trayectoria. Y el caso más crítico se utilizará para calcular la potencia de la bomba.

En la ecuación general de la energía:

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + h_A = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

$P_1 = 0$ (tanque de almacenamiento abierto a la atmósfera)

$P_2 = 0$ (tubería de descarga abierta a la atmósfera)

$v_1 = 0$ (velocidad despreciable en relación al área del tanque)

$$z_1 + 0 + 0 + h_A = z_2 + 0 + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

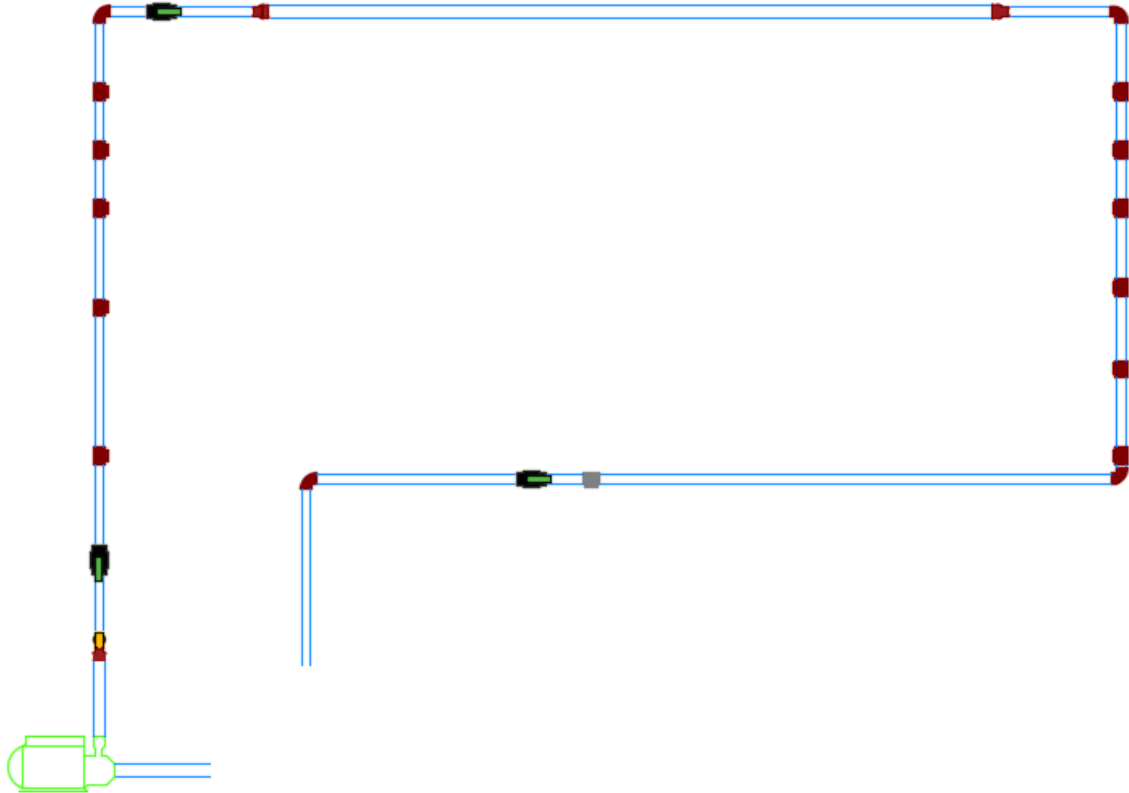
$$h_A = (z_2 - z_1) + \frac{v_2^2}{2g} + \sum (hf + hm)$$

La altura estática ($z_2 - z_1$) es:

Para la curva del sistema se utilizan caudales desde 0.1 lt/s hasta 0.8 lt/s con incrementos de 0.1 lt/s.

3.4.1.1. Trayectoria 1

Ilustración 2: Trayectoria 1 – Tubería de PVC 1”



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

En esta trayectoria se medirá pérdida por fricción en tubería de PVC de 1” y pérdidas menores en ampliación y reducción de diámetro entre ½” y 1”.

Pérdidas de energía por fricción (h_f)

1. Identificar los tramos según el material y el diámetro de la tubería.
2. Determinar la longitud y el diámetro interno de cada tramo.
3. Determinar la velocidad mediante el caudal impuesto y la fórmula $Q = v * A$.
4. Calcular el número de Reynolds con la viscosidad cinemática.
5. Encontrar el valor de la rugosidad absoluta ϵ , dependiendo del material de la tubería; y calcular la rugosidad relativa (ϵ/D_i).
6. Obtener el coeficiente de fricción f mediante cualquiera de los dos métodos, diagrama de Moody o ecuaciones empíricas.

- Calcular las pérdidas por fricción en cada tramo, utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach.
- Sumar las pérdidas por fricción de cada tramo para encontrar la pérdida total.

Tabla 12: Trayectoria 1 - Pérdida de Energía por Fricción

TRAYECTORIA 1										
TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi
Succión - Bomba	PVC 1"	0,25	24,17	0,1	0,2179	4747	0,0015	6,21E-05	0,03853	0,00097
Bomba - Ampliación	PVC 1/2"	2,1	13,78	0,1	0,6705	8326	0,0015	1,09E-04	0,03277	0,11448
Ampliación - Reducción	PVC 1"	1,8	24,17	0,1	0,2179	4747	0,0015	6,21E-05	0,03853	0,00695
Reducción - Descarga	PVC 1/2"	3,6	13,78	0,1	0,6705	8326	0,0015	1,09E-04	0,03277	0,19625
										hf= 0,319

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Pérdidas de energía por accesorios (hm)

- Identificar los tramos según el material y el diámetro de la tubería.
- Indicar la cantidad de cada tipo de accesorios que se encuentran en cada tramo.
- Determinar el diámetro interno de la tubería del tramo en el que se encuentra cada accesorio.
- Determinar la velocidad mediante el caudal impuesto y la fórmula $Q = v * A$.
- Encontrar en la tabla No. 3 la relación entre Longitud equivalente y diámetro interno de tubería (L_e/D_i) para cada accesorio.
- Calcular la rugosidad relativa (ϵ/D_i) del tubo en el que se encuentra conectado cada accesorio.
- Establecer f_T mediante el diagrama de Moody en turbulencia completa.
- Calcular el coeficiente de resistencia $K = f_T * \left(\frac{L_e}{D_i}\right)$
- Calcular la pérdida por accesorio $hm = K * \left(\frac{v^2}{2 * g}\right)$
- Sumar las pérdidas de cada accesorio para encontrar la pérdida total por accesorios.

Tabla 13: Trayectoria 1- Pérdida de Energía por Accesorios

TRAYECTORIA 1										
TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ε/Di	fT	K	hmi (m)
Bomba - Ampliación	Tee (flujo directo)	5	13,78	0,1	0,67052	20	1,09E-04	0,012	0,24	0,02751
	Reducción (1"-1/2") brusca	1	13,78	0,1	0,67052	-	-	-	0,32	0,00734
	Tee (flujo bilateral)	1	13,78	0,1	0,67052	60	1,09E-04	0,012	0,72	0,0165
	Válvula check	1	15,8	0,1	0,51003	100	9,49E-03	0,039	3,9	0,05172
	Codo estándar a 90°	2	13,78	0,1	0,67052	30	1,09E-04	0,012	0,36	0,0165
	Válvula de bola PVC	2	13,78	0,1	0,67052	3	1,09E-04	0,012	0,036	0,00165
	Ampliación (1/2"-1")	1	13,78	0,1	0,67052	-	-	-	0,45	0,01032
Reducción - Descarga	Reducción (1"-1/2")	1	13,78	0,1	0,67052	-	-	-	0,14	0,00321
	Codo estándar a 90°	3	13,78	0,1	0,67052	30	1,09E-04	0,012	0,36	0,02476
	Tee (flujo directo) HG	1	15,8	0,1	0,51003	20	9,49E-03	0,037	0,74	0,00981
	Tee (flujo directo)	6	13,78	0,1	0,67052	20	1,09E-04	0,012	0,24	0,03301
	Válvula de bola PVC	1	13,78	0,1	0,67052	3	1,09E-04	0,012	0,036	0,00083
										hm= 0,20315

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Cálculo de altura total de bombeo¹ ($h_a = TDH$)

Se utiliza la expresión:

$$TDH = h_a = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * g} + h_L$$

Si:

$$\frac{p_2 - p_1}{\gamma} = P$$

$$z_2 - z_1 = H_o$$

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 * g} = \left(\frac{v^2}{2 * g} \right)$$

$$h_L = \sum (hf + hm)$$

Entonces:

$$TDH = H_o + P + \left(\frac{v^2}{2 * g} \right) + \sum (hf + hm)$$

¹ TDH, por sus siglas en inglés para *Total Dynamic Head*

$P = 0$ porque no se necesita una presión de llegada mayor a cero.

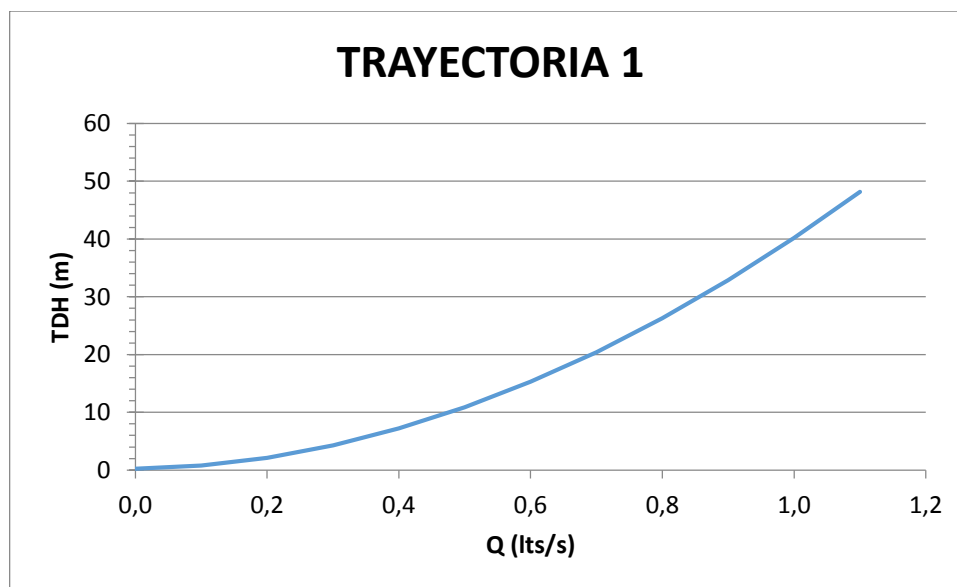
Tabla 14: Trayectoria 1 - Resumen

Q (lts/s)	Ho (m)	V(m/s)	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0		0	0,24
0,1		0,6705	0,0229	0,29698	0,20315	0,76306
0,2		1,341	0,0917	0,98881	0,81261	2,13311
0,3		2,0116	0,2063	2,01589	1,82837	4,29055
0,4		2,6821	0,3668	3,35401	3,25043	7,2112
0,5		3,3526	0,5731	4,98851	5,07879	10,8804
0,6		4,0231	0,8252	6,90915	7,31346	15,2878
0,7		4,6936	1,1232	9,10832	9,95443	20,4259
0,8		5,3642	1,467	11,58	13,0017	26,2888
0,9		6,0347	1,8567	14,3194	16,4553	32,8714
1		6,7052	2,2922	17,3225	20,3152	40,1699
1,1		7,3757	2,7736	20,5859	24,5814	48,1808

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Con los datos de esta tabla se grafica la curva del sistema.

Gráfica 1: Trayectoria 1 - Curva del Sistema

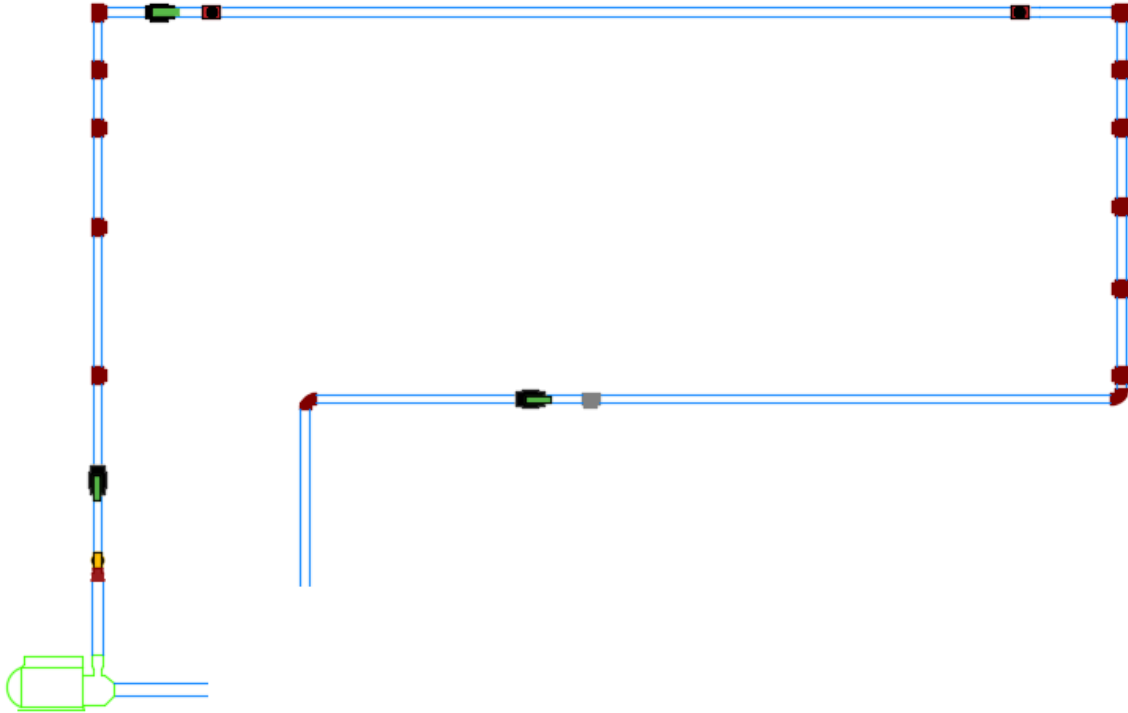


Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Para las demás trayectorias que son circuitos abiertos se sigue este mismo procedimiento, realizando los cambios necesarios de acuerdo a la geometría particular en cada caso.

3.4.1.2. Trayectoria 2

Ilustración 3: Trayectoria 2 – Tubería de PVC 1/2”



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

En esta trayectoria se medirá pérdida por fricción en tubería de PVC de 1/2”.

A continuación, se presenta los resultados de altura total de bombeo (TDH) para diferentes caudales y la respectiva curva del sistema.

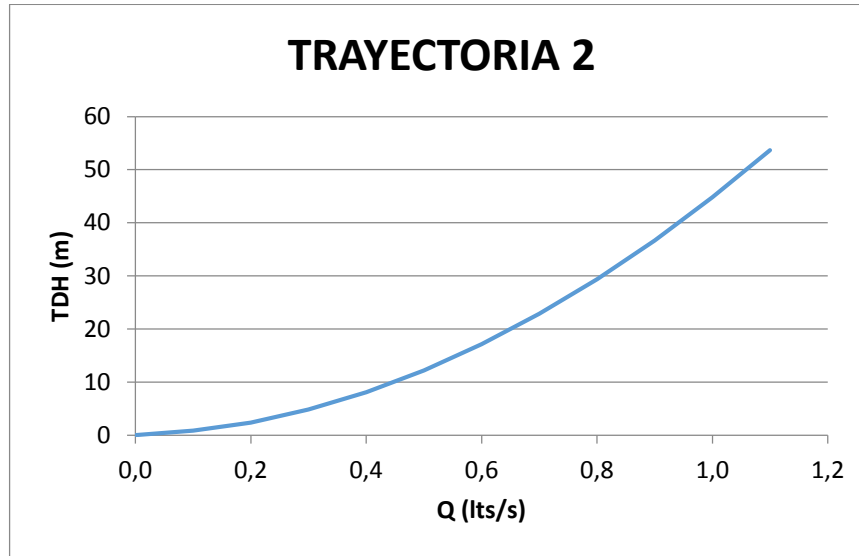
Tabla 15: Trayectoria 2 - Resumen

TRAYECTORIA 2						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0
0,1		0,67051992	0,02292225	0,37071065	0,20613158	0,839764475
0,2		1,34103984	0,09168899	1,234825	0,82452633	2,391040317
0,3		2,01155976	0,20630023	2,51802322	1,85518424	4,819507691
0,4		2,68207967	0,36675596	4,19015272	3,29810532	8,095014001
0,5		3,35259959	0,57305619	6,23291021	5,15328956	12,19925595
0,6		4,02311951	0,82520091	8,63358641	7,42073696	17,11952428
0,7		4,69363943	1,12319012	11,3826821	10,1004475	22,8463198

0,8	5,36415935	1,46702384	14,4727544	13,1924213	29,3721995
0,9	6,03467927	1,85670204	17,8977753	16,6966582	36,6911355
1	6,70519918	2,29222474	21,6527418	20,6131582	44,79812479
1,1	7,3757191	2,77359194	25,7334221	24,9419215	53,68893551

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

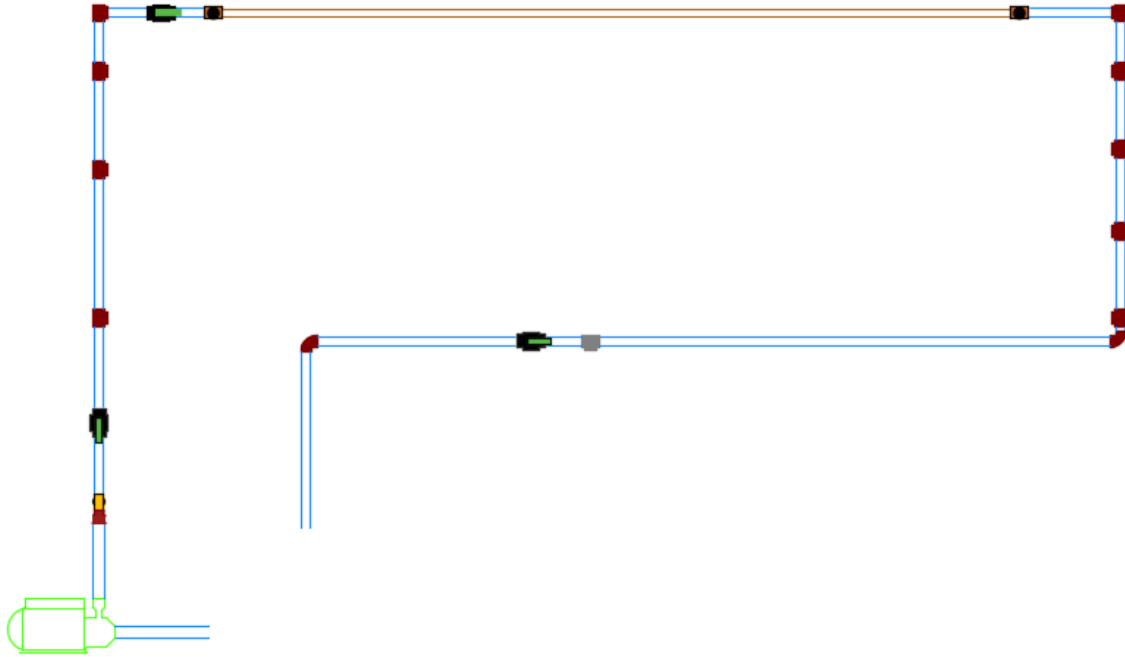
Gráfica 2: Trayectoria 2 - Curva del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.3. Trayectoria 3

Ilustración 4: Trayectoria 3 - Tubería de Cobre 1/2"



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

En esta trayectoria se medirá pérdida por fricción en tubería de Cobre de 1/2\".

A continuación, se presenta los resultados de altura total de bombeo (TDH) para diferentes caudales y la respectiva curva del sistema.

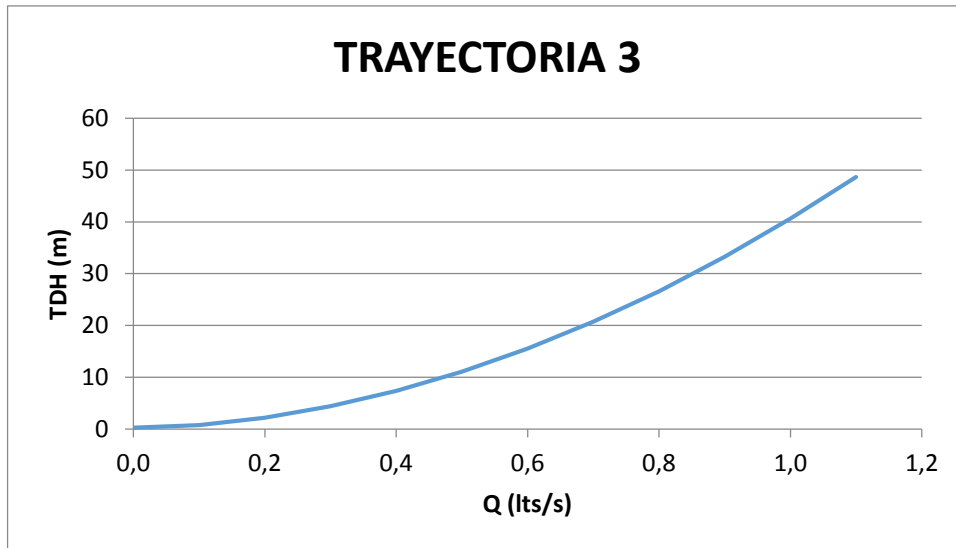
Tabla 16: Trayectoria 3 - Resumen

TRAYECTORIA 3						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,67051992	0,02292225	0,334564558	0,18550156	0,782988365
0,2		1,34103984	0,09168899	1,113872578	0,74200624	2,187567806
0,3		2,01155976	0,20630023	2,270730921	1,66951404	4,386545185
0,4		2,68207967	0,36675596	3,777855913	2,96802495	7,352636826
0,5		3,35259959	0,57305619	5,618672961	4,63753899	11,06926814
0,6		4,02311951	0,82520091	7,78166458	6,67805615	15,52492163
0,7		4,69363943	1,12319012	10,25821614	9,08957642	20,71098269
0,8		5,36415935	1,46702384	13,04157299	11,8720998	26,62069664
0,9		6,03467927	1,85670204	16,12626104	15,0256263	33,24858941

1		6,70519918	2,29222474	19,50773396	18,550156	40,59011466
1,1		7,3757191	2,77359194	23,18214371	22,4456887	48,64142437

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

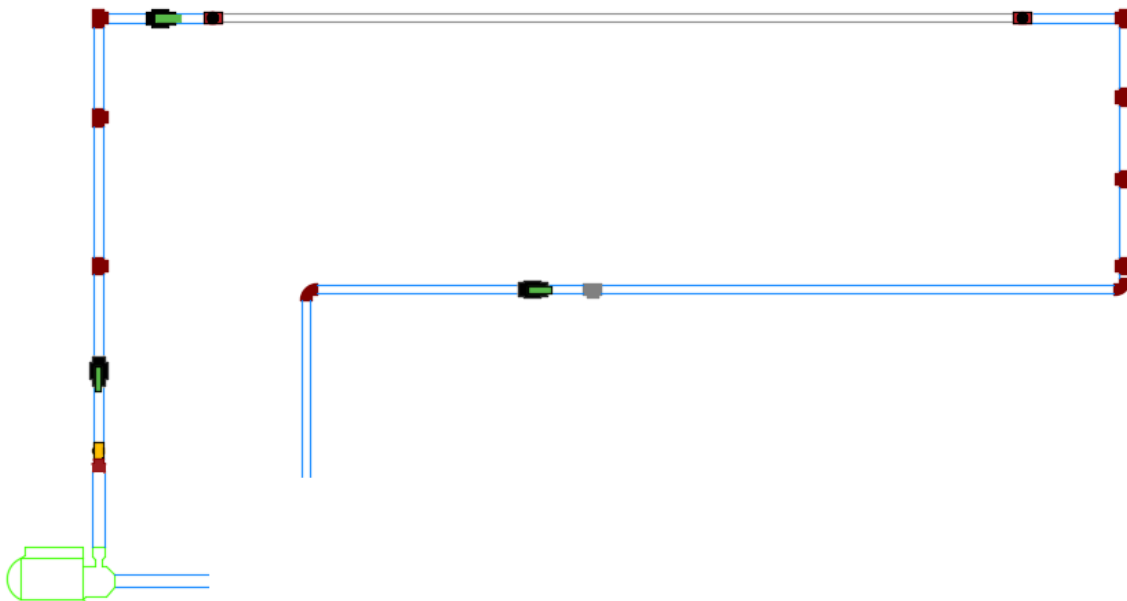
Gráfica 3: Trayectoria 3 - Curva del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.4. Trayectoria 4

Ilustración 5: Trayectoria 4 - Tubería de Hierro Galvanizado 1/2"



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

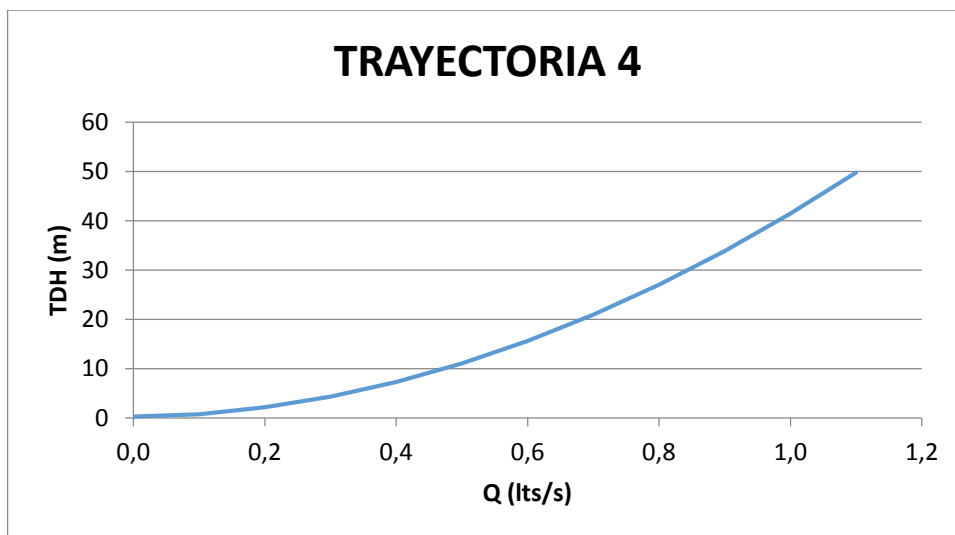
En esta trayectoria se medirá pérdida por fricción en tubería de hierro galvanizado de 1/2". A continuación, se presenta los resultados de altura total de bombeo (TDH) para diferentes caudales y la respectiva curva del sistema.

Tabla 17: Trayectoria 4 - Resumen

TRAYECTORIA 4						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	v ² /2g (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,67051992	0,02292225	0,30944893	0,18550156	0,75787274
0,2		1,34103984	0,09168899	1,06225633	0,74200624	2,135951554
0,3		2,01155976	0,20630023	2,21108994	1,66951404	4,326904207
0,4		2,68207967	0,36675596	3,73737021	2,96802495	7,312151125
0,5		3,35259959	0,57305619	5,62990572	4,63753899	11,0805009
0,6		4,02311951	0,82520091	7,88095461	6,67805615	15,62421167
0,7		4,69363943	1,12319012	10,4847434	9,08957642	20,93750991
0,8		5,36415935	1,46702384	13,4367548	11,8720998	27,0158785
0,9		6,03467927	1,85670204	16,7333346	15,0256263	33,85566299
1		6,70519918	2,29222474	20,3714519	18,550156	41,45383264
1,1		7,3757191	2,77359194	24,3485447	22,4456887	49,80782537

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Gráfica 4: Trayectoria 4 - Curva del Sistema

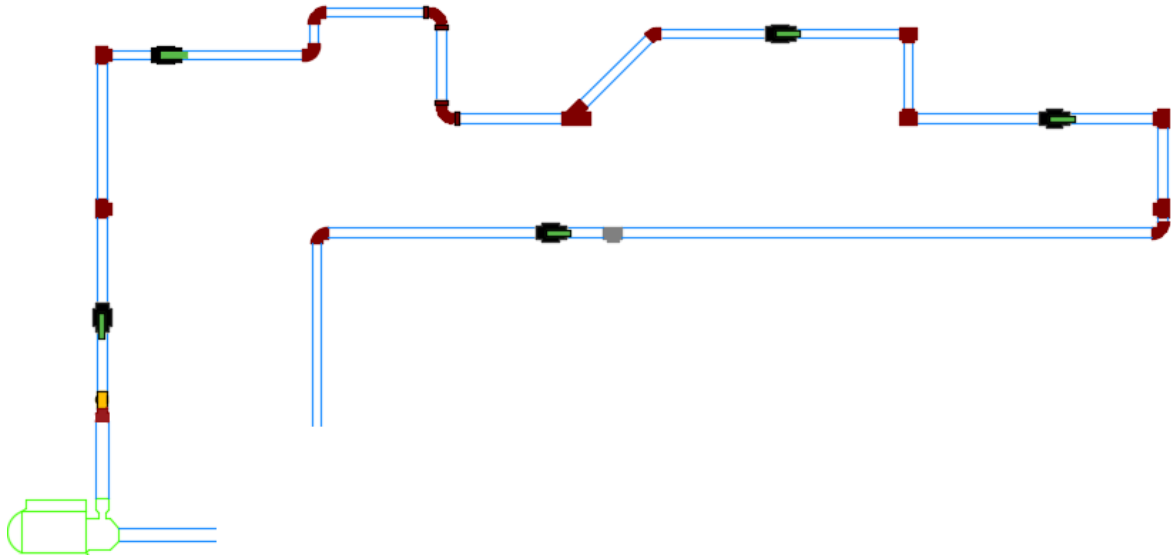


Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.5. Trayectoria 5

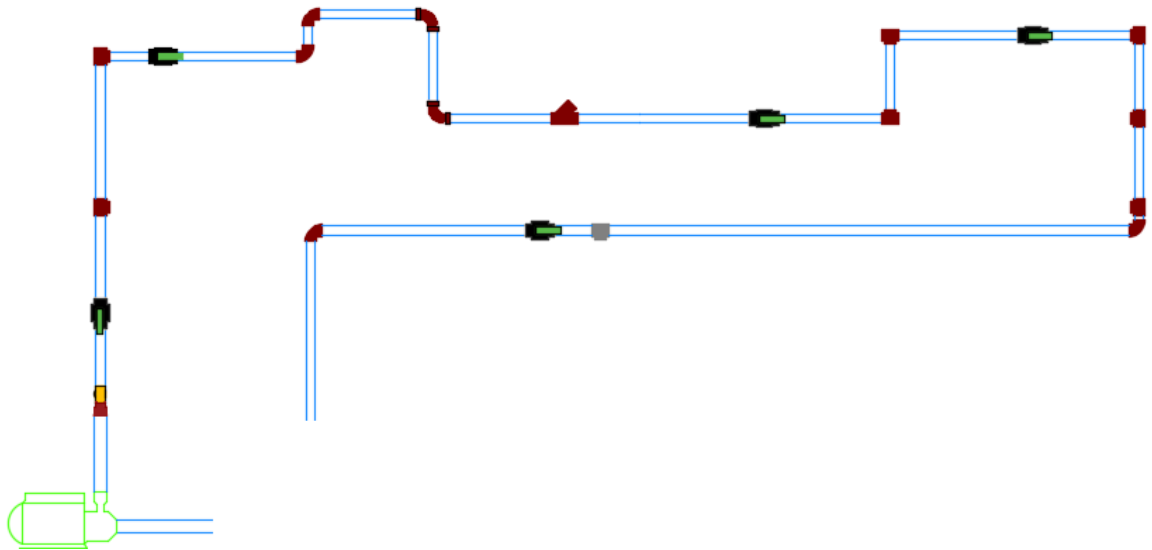
Esta trayectoria se divide en dos sub trayectorias (5.1 y 5.2) y se medirá pérdidas menores en varios accesorios (codos, tees y yees).

Ilustración 6: Trayectoria 5.1 - Accesorios



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Ilustración 7: Trayectoria 5.2 - Accesorios



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

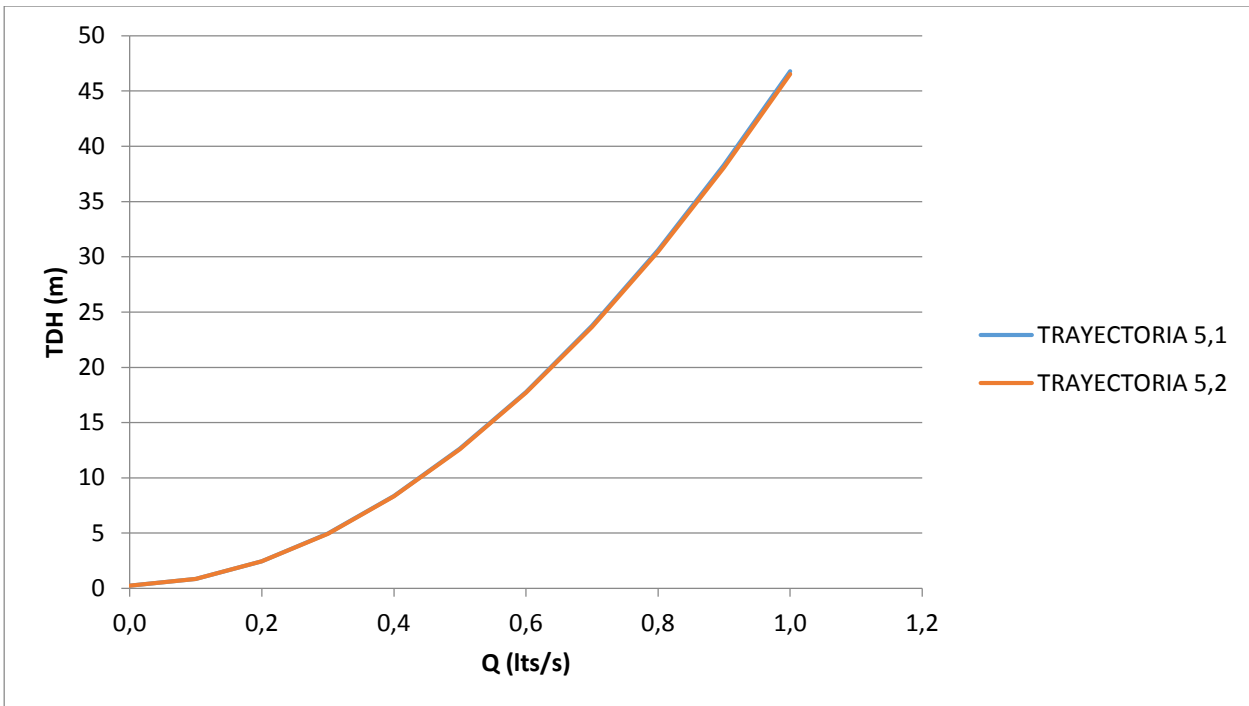
A continuación, se presenta los resultados de altura total de bombeo (TDH) para diferentes caudales y la respectiva curva del sistema.

Tabla 18: Trayectorias 5.1, 5.2 - Resumen

TRAYECTORIA 5,1						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	v ² /2g (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,67051992	0,02292225	0,34454458	0,24152353	0,84899036
0,2		1,34103984	0,09168899	1,14765987	0,96609413	2,44544299
0,3		2,01155976	0,20630023	2,34027076	2,17371179	4,96028278
0,4		2,68207967	0,36675596	3,89435234	3,86437652	8,36548482
0,5		3,35259959	0,57305619	5,79289277	6,03808831	12,6440373
0,6		4,02311951	0,82520091	8,02407946	8,69484716	17,7841275
0,7		4,69363943	1,12319012	10,5790834	11,8346531	23,7769266
0,8		5,36415935	1,46702384	13,4509865	15,4575061	30,6155164
0,9		6,03467927	1,85670204	16,6341862	19,5634061	38,2942944
1		6,70519918	2,29222474	20,1240323	24,1523532	46,8086103
1,1		7,3757191	2,77359194	23,9165914	29,2243474	56,1545308
TRAYECTORIA 5,2						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	v ² /2g (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,67051992	0,02292225	0,35054097	0,23528868	0,8487519
0,2		1,34103984	0,09168899	1,16763521	0,94115472	2,44047893
0,3		2,01155976	0,20630023	2,3810057	2,11759813	4,94490406
0,4		2,68207967	0,36675596	3,96213993	3,7646189	8,33351478
0,5		3,35259959	0,57305619	5,8937301	5,88221703	12,5890033
0,6		4,02311951	0,82520091	8,16375813	8,47039252	17,6993516
0,7		4,69363943	1,12319012	10,7632414	11,5291454	23,6555769
0,8		5,36415935	1,46702384	13,6851417	15,0584756	30,4506411
0,9		6,03467927	1,85670204	16,9237587	19,0583832	38,0788439
1		6,70519918	2,29222474	20,4743616	23,5288681	46,5354544
1,1		7,3757191	2,77359194	24,3329485	28,4699304	55,8164708

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

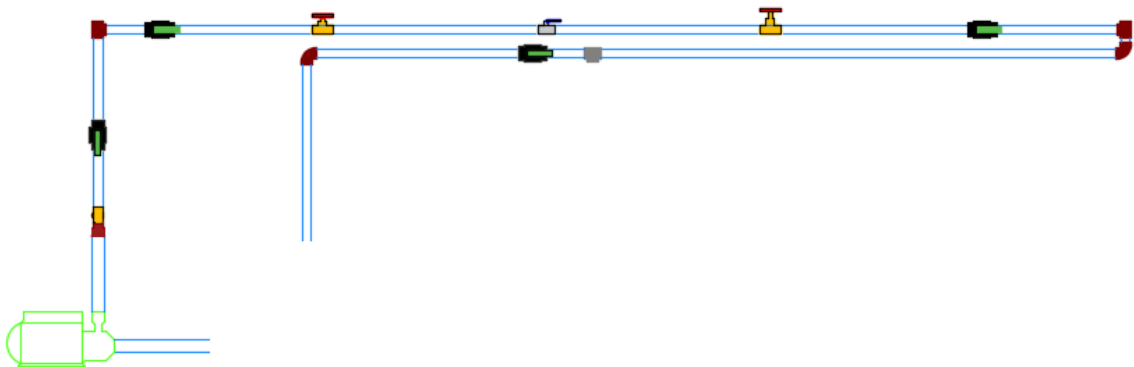
Gráfica 5: Trayectoria 5.1, 5.2 - Curva del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.6. Trayectoria 6

Ilustración 8: Trayectoria 6 - Válvulas



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

En esta trayectoria se medirá pérdidas menores en varias válvulas (de paso, de bola de acero, de compuerta y de bola de PVC).

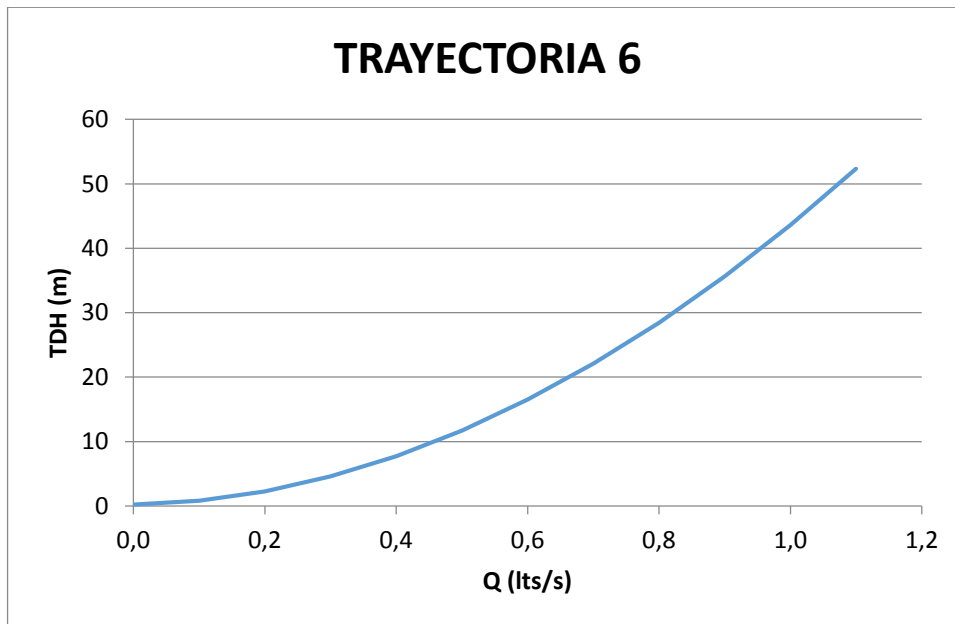
A continuación, se presenta los resultados de altura total de bombeo (TDH) para diferentes caudales y la respectiva curva del sistema.

Tabla 19: Trayectoria 6 - Resumen

TRAYECTORIA 6						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	v ² /2g (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,67051992	0,02292225	0,28676118	0,24299056	0,792673988
0,2		1,34103984	0,09168899	0,95517022	0,97196222	2,258821437
0,3		2,01155976	0,20630023	1,94773407	2,18691501	4,580949305
0,4		2,68207967	0,36675596	3,24112649	3,8878489	7,735731347
0,5		3,35259959	0,57305619	4,82118759	6,0747639	11,70900768
0,6		4,02311951	0,82520091	6,67808495	8,74766002	16,49094588
0,7		4,69363943	1,12319012	8,80446942	11,9065373	22,0741968
0,8		5,36415935	1,46702384	11,1945825	15,5513956	28,45300192
0,9		6,03467927	1,85670204	13,8437604	19,6822351	35,62269748
1		6,70519918	2,29222474	16,7481322	24,2990556	43,57941258
1,1		7,3757191	2,77359194	19,9044236	29,4018573	52,31987287

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

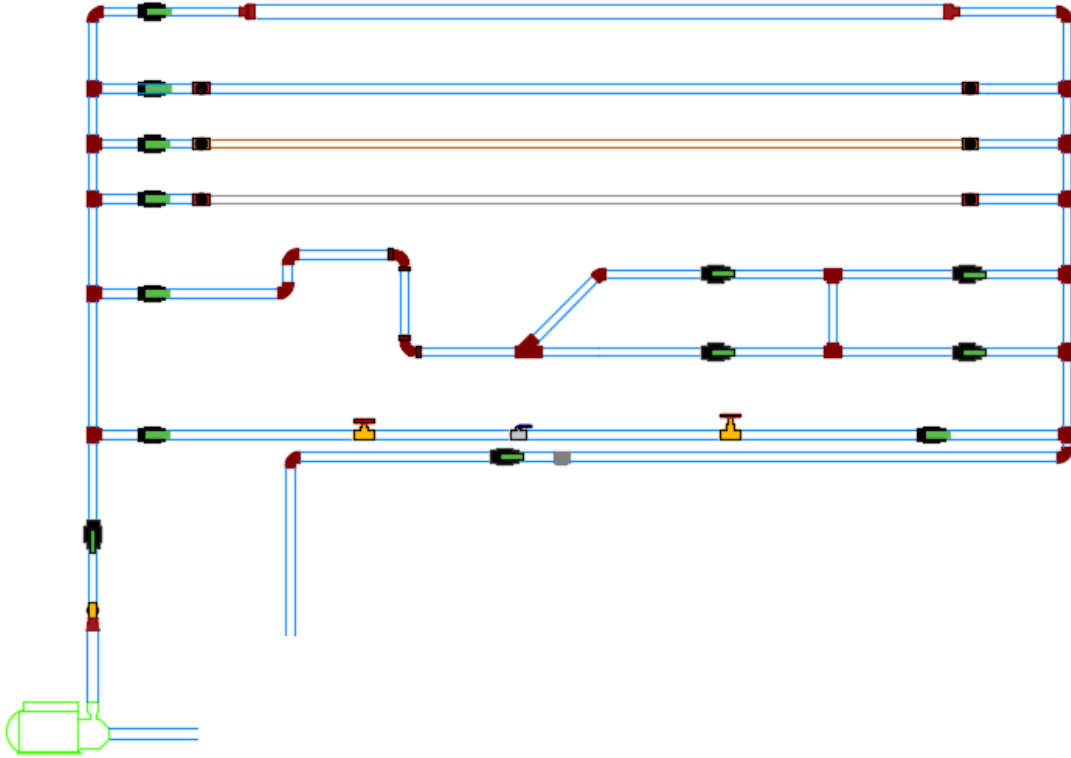
Gráfica 6: Trayectoria 6 - Curva del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.7. Trayectoria 7

Ilustración 9: Trayectoria 7 - Circuito Cerrado



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Se considera Trayectoria 7 al sistema de tuberías que se encuentran formando una red cerrada, es decir el agua fluirá por todas las tuberías del sistema.

El análisis de una red de distribución de agua según el método de Hardy-Cross con corrección de caudales en los circuitos propone los pasos siguientes:

1. Se define claramente la geometría de la red, identificando en forma coherente los nodos y los circuitos.
2. Si existe más de un nodo con cabeza constante (tanque en la red o embalse), es necesario conectarlos en pares por medio de tuberías hipotéticas que pueden ser representadas por líneas punteadas. En estas tuberías hipotéticas se deben suponer diámetros, longitudes y rugosidades absolutas, de tal manera que se pueda calcular el caudal correspondiente a las diferencias de nivel entre los diferentes pares de embalses o tanques. En las correcciones de caudales, los tubos hipotéticos no deben ser incluidos, lo cual sí debe hacerse en el

cálculo de las pérdidas de cabeza (por fricción y por accesorios). (SALDARRIAGA V., 1998, pág. 301)

3. Se suponen todos los diámetros de la tubería que conforman la red. Tal paso convierte este método en un proceso de comprobación de diseño.
4. Se supone que la red está compuesta por circuitos cerrados en cualquier orden. Con el fin de acelerar la convergencia se puede suponer que los tubos de diámetros grandes forman circuitos independientes. Se deben utilizar tantos circuitos como sea necesario para asegurar que todos los tubos queden incluidos en por lo menos un circuito. (SALDARRIAGA V., 1998, pág. 301)
5. Se supone el caudal a partir de cualquiera de las tuberías de la red. Luego se procede alrededor del circuito que contiene esta tubería para calcular los caudales en las demás tuberías que conforman el circuito teniendo en cuenta los caudales que salen de las uniones (caudales negativos) y los que entran a ellas (caudales positivos). Si los flujos hacia o desde otro circuito son desconocidos, se deben suponer los caudales correspondientes. Esto significa que se deben hacer tantas suposiciones de caudales como circuitos existan en la red que se está analizando. Cuanto mejores sean estas suposiciones más rápidamente convergerá el método. La experiencia ayuda mucho en este aspecto. (SALDARRIAGA V., 1998, pág. 301)
6. Se calcula la pérdida de cabeza en cada tubería de la red utilizando la siguiente ecuación (de Darcy-Weisbach), si bien podría emplearse cualquier ecuación de resistencia fluida, tal como la de Hazen-Williams:

$$h_{fij} + \Sigma h_{mij} = \frac{Q_{ij}^2}{2gA_{ij}^2} \left(\Sigma k_{mij} + f_{ij} \frac{l_{ij}}{d_{ij}} \right)$$

El factor de fricción se calcula utilizando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right)$$

Y con los diagramas de flujo.

7. Se calcula la pérdida neta de cabeza alrededor del circuito, es decir, se suman las pérdidas de cabeza y restando las "adiciones" de cabeza

siempre medidas en el sentido de las agujas del reloj. Si la pérdida neta de cabeza no es cero, se procede a corregir los caudales de cada una de las tuberías del circuito mediante la ecuación: (SALDARRIAGA V., 1998, pág. 302)

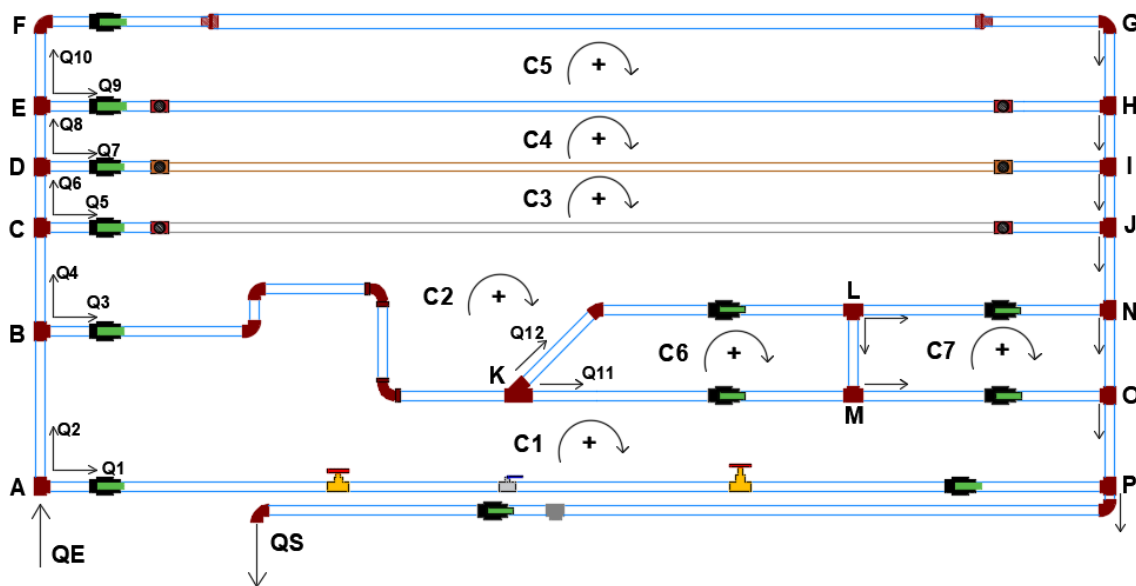
$$\Delta Q_i = - \frac{\sum (h_{fij} + \sum h_{mij})}{2 \sum \left(\frac{h_{fij} + \sum h_{mij}}{Q_{ij}} \right)}$$

8. Si en alguna de las tuberías del circuito existe una bomba centrífuga se debe restar la cabeza generada por ésta de las pérdidas en la tubería antes de hacer el cálculo de la corrección de caudales ΔQ :

$$h_{fij} + \sum h_{mij}$$

9. Los pasos 5 a 8 se repiten para todos los circuitos teniendo en cuenta los caudales corregidos en los circuitos calculados previamente.
10. Los pasos 5 a 9 se repiten hasta que el balance de cabezas alrededor de todos los circuitos (ecuación de conservación de la energía) llegue a valores razonablemente cercanos a cero. Este criterio de convergencia es fijado por el diseñador de acuerdo con las características de la red que esté analizando. (SALDARRIAGA V., 1998, pág. 302)

Ilustración 10: Trayectoria 7 - Sentido



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Se asume un caudal de entrada igual a 1l/s (QE=1l/s).

Tabla 20: Trayectoria 7 - Iteración 1

Iteración	Circuito	Tramo	Longitud (m)	Q (lts/s)	Diámetro		Velocidad (m/s)	Pérdidas por Fricción				ΣKm	hf+hm (m)	(hf+hm)/Q (m/(m³/s²))
					Nominal (in)	Interior (mm)		Re	ε(mm)	ε/Di	f			
1	C1	AB	0,35	0,7	0,50	13,78	4,6936	58279	0,0015	0,0001089	0,02053969	1,8	2,60769966	3725,28523
		BK	1,45	0,2	0,50	13,78	1,3410	16651	0,0015	0,0001089	0,02729189	3	0,53837828	2691,89142
		KM	0,8	0,13	0,50	13,78	0,8717	10823	0,0015	0,0001089	0,03050841	1,8	0,13834213	1064,17023
		MO	0,6	0,15	0,50	13,78	1,0058	12488	0,0015	0,0001089	0,02937596	1,8	0,15880317	1058,68782
		OP	0,4	0,7	0,50	13,78	4,6936	58279	0,0015	0,0001089	0,02053969	1,8	2,69140786	3844,86838
		AP	2,5	-0,3	0,50	13,78	2,0116	24977	0,0015	0,0001089	0,02473568	9,576	-2,90132505	9671,08349
												Σ	3,23330606	22055,9866
													ΔQ=	-0,0732977
	C2	BC	0,2	0,5	0,50	13,78	3,3526	41628	0,0015	0,0001089	0,02204351	0	0,1833406	366,681198
		CR	0,3	0,1	0,50	13,78	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,03277096	1,8	0,05761384	576,138364
		RS	2	0,1	0,50	15,80	0,5100	7261	0,1500	0,0094937	0,04535219	0	0,07613721	761,372054
		SJ	0,2	0,1	0,50	13,78	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,03277096	0	0,01090253	109,025274
		JN	0,15	0,5	0,50	13,78	3,3526	41628	0,0015	0,0001089	0,02204351	0	0,13750545	275,010899
		BK	1,45	-0,1267023	0,50	13,78	0,8496	10549	0,0015	0,0001089	0,03071902	3	-0,2293412	1810,07918
		KL	0,9	-0,07	0,50	13,78	0,4694	5828	0,0015	0,0001089	0,03629135	1,992	-0,0489965	699,949996
		LN	0,6	-0,05	0,50	13,78	0,3353	4163	0,0015	0,0001089	0,04017575	1,8	-0,02033952	406,790482
												Σ	0,23615842	3898,30697
													ΔQ=	-0,03028987
	C3	CD	0,1	0,4	0,50	13,78	2,6821	33302	0,0015	0,0001089	0,02315419	0	0,06162508	154,0627
		DT	0,3	0,1	0,50	13,78	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,03277096	1,8	0,05761384	576,138364
		TU	2	0,1	0,50	14,47	0,6081	7929	0,0015	0,0001037	0,03321301	0	0,08654653	865,465315
		UI	0,2	0,1	0,50	13,78	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,03277096	0	0,01090253	109,025274
		IJ	0,1	0,4	0,50	13,78	2,6821	33302	0,0015	0,0001089	0,02315419	0	0,06162508	154,0627
		CR	0,3	-0,06971013	0,50	13,78	0,4674	5804	0,0015	0,0001089	0,03633569	1,8	-0,02886192	414,027649
		RS	2	-0,06971013	0,50	15,80	0,3555	5062	0,150	0,0094937	0,04801748	0	-0,03917326	561,945068
		SJ	0,2	-0,06971013	0,50	13,78	0,4674	5804	0,0015	0,0001089	0,03633569	0	-0,0058744	84,2688896
												Σ	0,20440347	2918,99596
													ΔQ=	-0,03501263
	C4	DE	0,1	0,3	0,50	13,78	2,0116	24977	0,0015	0,0001089	0,02473568	0	0,03703176	123,43921
		EH	2,5	0,1	0,50	13,78	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,03277096	1,8	0,17754164	1775,41637
		HI	0,1	0,3	0,50	13,78	2,0116	24977	0,0015	0,0001089	0,02473568	0	0,03703176	123,43921
		DT	0,3	-0,06498737	0,50	13,78	0,4358	5411	0,0015	0,0001089	0,03709807	1,8	-0,02524436	388,450304
		TU	2	-0,06498737	0,50	14,47	0,3952	5153	0,0015	0,0001037	0,03763693	0	-0,04142032	637,359521
		UI	0,2	-0,06498737	0,50	13,78	0,4358	5411	0,0015	0,0001089	0,03709807	0	-0,00521251	80,2080913
												Σ	0,17972797	3128,31271
													ΔQ=	-0,02872602
	C5	EF	0,55	0,2	0,50	13,78	1,3410	16651	0,0015	0,0001089	0,02729189	2,16	0,29792492	1489,62462
		FG	1,8	0,2	0,50	24,17	0,4359	9493	0,0015	0,0000621	0,03152713	0	0,02274509	113,725465
		GH	0,45	0,2	0,50	13,78	1,3410	16651	0,0015	0,0001089	0,02729189	0	0,0817173	408,586523
		EH	2,5	-0,07127398	0,50	13,78	0,4779	5934	0,0015	0,0001089	0,0360996	1,8	-0,09722274	1364,07066
												Σ	0,30516458	3376,00726
													ΔQ=	-0,04519608
	C6	KL	0,9	0,07	0,50	13,78	0,4694	5828	0,0015	0,0001089	0,03629135	1,8	0,04683997	669,142495
		LM	0,2	0,02	0,50	13,78	0,1341	1665	0,0015	0,0001089	0,05466007	0	0,00072739	36,3695722
		KM	0,8	-0,0567023	0,50	13,78	0,3802	4721	0,0015	0,0001089	0,03865216	1,8	-0,02980335	525,610952
												Σ	0,01776401	1231,12302
													ΔQ=	-0,00721456
	C7	LN	0,6	0,08028987	0,50	13,78	0,5384	6685	0,0015	0,0001089	0,03487151	1,8	0,04903445	610,71772
		NO	0,2	0,55	0,50	13,78	3,6879	45791	0,0015	0,0001089	0,02159752	0	0,2173538	395,188733
		MO	0,6	-0,0767023	0,50	13,78	0,5143	6386	0,0015	0,0001089	0,03533508	1,8	-0,04502257	586,978096
		LM	0,2	-0,01278544	0,50	13,78	0,0857	1064	0,0015	0,0001089	0,06479069	0	-0,00035236	27,5591839
												Σ	0,22101332	1620,44373
													ΔQ=	-0,06819531

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Tabla 21: Trayectoria 7 - Iteración 2

Iteración	Circuito	Tramo	Longitud (m)	Q (lts/s)	Diámetro		Velocidad (m/s)	Pérdidas por Fricción				ΣKm	hf+hm (m)	(hf+hm)/Q (m/(m ² /s))
					Nominal (in)	Interior (mm)		Re	ε(mm)	ε/Di	f			
2	C1	AB	0,35	-0,6267023	0,50	13,78	4,2022	52177	0,0015	0,0001089	0,02101265	1,8	-2,10099661	3352,46353
		BK	1,45	0,15699217	0,50	13,78	1,0527	13071	0,0015	0,0001089	0,02902931	3	0,34205758	2178,81935
		KM	0,8	0,06391686	0,50	13,78	0,4286	5321	0,0015	0,0001089	0,03728217	1,8	0,03712513	580,834622
		MO	0,6	0,14489761	0,50	13,78	0,9716	12064	0,0015	0,0001089	0,02964368	1,8	0,14874424	1026,54725
		OP	0,4	-0,6267023	0,50	13,78	4,2022	52177	0,0015	0,0001089	0,02101265	1,8	-2,16963725	3461,99024
		AP	2,5	0,3732977	0,50	13,78	2,5030	31079	0,0015	0,0001089	0,02351799	9,576	4,42168967	11844,9423
												Σ	0,67898276	22445,5973
													ΔQ=	-0,01512508
	C2	BC	0,2	-0,46971013	0,50	13,78	3,1495	39106	0,0015	0,0001089	0,02234496	0	-0,16401268	349,178496
		CR	0,3	0,10472276	0,50	13,78	0,7022	8719	0,0015	0,0001089	0,03235439	1,8	0,06295629	601,171025
		RS	2	0,10472276	0,50	15,80	0,5341	7604	0,1500	0,0094937	0,04505864	0	0,08295812	792,168905
		SJ	0,2	0,10472276	0,50	13,78	0,7022	8719	0,0015	0,0001089	0,03235439	0	0,01180466	112,722949
		JN	0,15	-0,46971013	0,50	13,78	3,1495	39106	0,0015	0,0001089	0,02234496	0	-0,12300951	261,883872
		BK	1,45	-0,1418671	0,50	13,78	0,9512	11811	0,0015	0,0001089	0,02980909	3	-0,28310832	1995,5883
		KL	0,9	-0,06278544	0,50	13,78	0,4210	5227	0,0015	0,0001089	0,0374817	1,992	-0,04011979	638,99835
		LN	0,6	-0,01209456	0,50	13,78	0,0811	1007	0,0015	0,0001089	0,06624324	1,8	-0,00157067	129,86554
												Σ	-0,41214143	4112,71354
													ΔQ=	0,0501386
	C3	CD	0,1	-0,36498737	0,50	13,78	2,4473	30387	0,0015	0,0001089	0,02363866	0	-0,05238253	143,518757
		DT	0,3	0,09371339	0,50	13,78	0,6284	7802	0,0015	0,0001089	0,03337136	1,8	0,05086075	542,726621
		TU	2	0,09371339	0,50	14,47	0,5699	7430	0,0015	0,0001037	0,03382657	0	0,07741099	826,039827
		UI	0,2	0,09371339	0,50	13,78	0,6284	7802	0,0015	0,0001089	0,03337136	0	0,00975024	104,043166
		IJ	0,1	-0,36498737	0,50	13,78	2,4473	30387	0,0015	0,0001089	0,02363866	0	-0,05238253	143,518757
		CR	0,3	-0,15486137	0,50	13,78	1,0384	12893	0,0015	0,0001089	0,0291326	1,8	-0,13381542	864,098146
		RS	2	-0,15486137	0,50	15,80	0,7898	11245	0,150	0,0094937	0,04293453	0	-0,17285879	1116,21636
		SJ	0,2	-0,15486137	0,50	13,78	1,0384	12893	0,0015	0,0001089	0,0291326	0	-0,0232436	150,092958
												Σ	-0,2966609	3890,25459
													ΔQ=	0,03812873
	C4	DE	0,1	-0,27127398	0,50	13,78	1,8189	22585	0,0015	0,0001089	0,02533242	0	-0,03100994	114,312237
		EH	2,5	0,11647005	0,50	13,78	0,7810	9697	0,0015	0,0001089	0,03142549	1,8	0,2332499	2002,65981
		HI	0,1	-0,27127398	0,50	13,78	1,8189	22585	0,0015	0,0001089	0,02533242	0	-0,03100994	114,312237
		DT	0,3	-0,13184212	0,50	13,78	0,8840	10977	0,0015	0,0001089	0,03039403	1,8	-0,09808451	743,954325
		TU	2	-0,13184212	0,50	14,47	0,8017	10453	0,0015	0,0001037	0,0307848	0	-0,1394396	1057,62565
		UI	0,2	-0,13184212	0,50	13,78	0,8840	10977	0,0015	0,0001089	0,03039403	0	-0,01757659	133,315439
												Σ	-0,08387068	4166,1797
													ΔQ=	0,01006566
	C5	EF	0,55	-0,15480392	0,50	13,78	1,0380	12888	0,0015	0,0001089	0,02913541	2,16	-0,1825306	1179,10837
		FG	1,8	-0,15480392	0,50	24,17	0,3374	7348	0,0015	0,0000621	0,03387004	0	-0,01463939	94,5672858
		GH	0,45	-0,15480392	0,50	13,78	1,0380	12888	0,0015	0,0001089	0,02913541	0	-0,05226435	337,61647
		EH	2,5	-0,12653571	0,50	13,78	0,8484	10535	0,0015	0,0001089	0,03072987	1,8	-0,27067643	2139,13074
												Σ	-0,52011077	3750,42286
													ΔQ=	0,06934028
	C6	KL	0,9	0,01264684	0,50	13,78	0,0848	1053	0,0015	0,0001089	0,06507189	1,8	0,00221807	175,385226
		LM	0,2	0,08098075	0,50	13,78	0,5430	6742	0,0015	0,0001089	0,03478566	0	0,0075893	93,7173517
		KM	0,8	-0,04879178	0,50	13,78	0,3272	4062	0,0015	0,0001089	0,04048267	1,8	-0,02264762	464,168661
												Σ	-0,01284025	733,271239
													ΔQ=	0,00875545
	C7	LN	0,6	-0,03804404	0,50	13,78	0,2551	3167	0,0015	0,0001089	0,04381874	1,8	-0,01230161	323,351676
		NO	0,2	-0,48180469	0,50	13,78	3,2306	40113	0,0015	0,0001089	0,02222144	0	-0,17161384	356,18964
		MO	0,6	-0,12977253	0,50	13,78	0,8702	10804	0,0015	0,0001089	0,03052269	1,8	-0,12078925	930,776669
		LM	0,2	-0,08973621	0,50	13,78	0,6017	7471	0,0015	0,0001089	0,03378194	0	-0,0090502	100,853331
												Σ	-0,31375489	1711,17132
													ΔQ=	0,0916784

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Tabla 22: Trayectoria 7 - Iteración 57

Iteración	Circuito	Tramo	Longitud (m)	Q (lts/s)	Diámetro		Velocidad (m/s)	Pérdidas por Fricción				ΣKm	hf+hm (m)	(hf+hm)/Q (m/(m ² /s))	
					Nominal (in)	Interior (mm)		Re	ε(mm)	ε/Di	f				
57	C1	AB	0,35	0,63084899	0,50	13,78	4,2300	52522	0,0015	0,0001089	0,02098388	1,8	2,12822525	3373,58905	
		BK	1,45	0,00349726	0,50	13,78	0,0234	291	0,0015	0,0001089	0,11753249	3	0,00043084	123,192329	
		KM	0,8	-0,01311163	0,50	13,78	0,0879	1092	0,0015	0,0001089	0,06414773	1,8	-0,00217687	166,025905	
		MO	0,6	-0,0007375	0,50	13,78	0,0049	61	0,0015	0,0001089	0,34573241	1,8	-2,1012E-05	28,4912444	
		OP	0,4	0,63084899	0,50	13,78	4,2300	52522	0,0015	0,0001089	0,02098388	1,8	2,19768201	3483,68951	
		AP	2,5	-0,36915101	0,50	13,78	2,4752	30734	0,0015	0,0001089	0,02357773	9,576	-4,32738631	11722,5369	
												Σ	-0,0032461	18897,5249	
													ΔQ=	8,5887E-05	
	C2	BC	0,2	0,00448597	0,50	13,78	0,0301	373	0,0015	0,0001089	0,10330083	0	6,916E-05	15,416943	
		CR	0,3	0,00309854	0,50	13,78	0,0208	258	0,0015	0,0001089	0,12553923	1,8	9,9762E-05	32,1964005	
		RS	2	0,00309854	0,50	15,80	0,0158	225	0,1500	0,0094937	0,14062394	0	0,00022666	73,1501381	
		SJ	0,2	0,00309854	0,50	13,78	0,0208	258	0,0015	0,0001089	0,12553923	0	4,0099E-05	12,9412041	
		JN	0,15	0,00448597	0,50	13,78	0,0301	373	0,0015	0,0001089	0,10330083	0	5,187E-05	11,5627072	
		BK	1,45	-0,00358314	0,50	13,78	0,0240	298	0,0015	0,0001089	0,11602012	3	-0,00044757	124,910669	
		KL	0,9	0,01368098	0,50	13,78	0,0917	1139	0,0015	0,0001089	0,06308444	1,992	0,00262233	191,677101	
		LN	0,6	-0,00423475	0,50	13,78	0,0284	353	0,0015	0,0001089	0,10635538	1,8	-0,00026435	62,4243726	
												Σ	3,9977E-05	270,178062	
													ΔQ=	-7,3982E-05	
	C3	CD	0,1	0,00489428	0,50	13,78	0,0328	407	0,0015	0,0001089	0,09892785	0	3,9419E-05	8,05406528	
		DT	0,3	0,00209114	0,50	13,78	0,0140	174	0,0015	0,0001089	0,1580784	1,8	5,2538E-05	25,1242944	
		TU	2	0,00209114	0,50	14,47	0,0127	166	0,0015	0,0001037	0,16298574	0	0,00018572	88,8125257	
		UI	0,2	0,00209114	0,50	13,78	0,0140	174	0,0015	0,0001089	0,1580784	0	2,2997E-05	10,997493	
		IJ	0,1	0,00489428	0,50	13,78	0,0328	407	0,0015	0,0001089	0,09892785	0	3,9419E-05	8,05406528	
		CR	0,3	-0,00302456	0,50	13,78	0,0203	252	0,0015	0,0001089	0,12723556	1,8	-9,5829E-05	31,6837036	
		RS	2	-0,00302456	0,50	15,80	0,0154	220	0,150	0,0094937	0,14252643	0	-0,00021889	72,3695932	
		SJ	0,2	-0,00302456	0,50	13,78	0,0203	252	0,0015	0,0001089	0,12723556	0	-3,8723E-05	12,8029059	
												Σ	-1,3346E-05	257,898646	
													ΔQ=	2,5874E-05	
	C4	DE	0,1	-0,00012885	0,50	13,78	0,0009	11	0,0015	0,0001089	8,80408017	0	-2,4313E-06	18,8698479	
		EH	2,5	0,00100953	0,50	13,78	0,0068	84	0,0015	0,0001089	0,26404062	1,8	0,00011611	115,016099	
		HI	0,1	-0,00012885	0,50	13,78	0,0009	11	0,0015	0,0001089	8,80408017	0	-2,4313E-06	18,8698479	
		DT	0,3	-0,00211701	0,50	13,78	0,0142	176	0,0015	0,0001089	0,15687756	1,8	-5,3578E-05	25,3082952	
		TU	2	-0,00211701	0,50	14,47	0,0129	168	0,0015	0,0001037	0,16172861	0	-0,00018888	89,2179072	
		UI	0,2	-0,00211701	0,50	13,78	0,0142	176	0,0015	0,0001089	0,15687756	0	-2,3391E-05	11,0489899	
												Σ	-0,00015459	278,330987	
													ΔQ=	0,00027772	
	C5	EF	0,55	-0,00017765	0,50	13,78	0,0012	15	0,0015	0,0001089	2,89136015	2,16	-8,5048E-06	47,8735977	
		FG	1,8	-0,00017765	0,50	24,17	0,0004	8	0,0015	0,0000621	45,1153285	0	-2,5681E-05	144,556313	
		GH	0,45	-0,00017765	0,50	13,78	0,0012	15	0,0015	0,0001089	2,89136015	0	-6,8306E-06	38,4496422	
		EH	2,5	-0,00128725	0,50	13,78	0,0086	107	0,0015	0,0001089	0,21917505	1,8	-0,00015787	122,639211	
												Σ	-0,00019888	353,518763	
													ΔQ=	0,00028129	
	C6	KL	0,9	-0,013607	0,50	13,78	0,0912	1133	0,0015	0,0001089	0,06321859	1,8	-0,00251628	184,925322	
		LM	0,2	0,01237413	0,50	13,78	0,0830	1030	0,0015	0,0001089	0,06563982	0	0,00033438	27,0221618	
		KM	0,8	0,01302574	0,50	13,78	0,0873	1084	0,0015	0,0001089	0,06431453	1,8	0,00215221	165,227497	
												Σ	-2,9693E-05	377,174981	
													ΔQ=	3,9362E-05	
	C7	LN	0,6	0,00430873	0,50	13,78	0,0289	359	0,0015	0,0001089	0,1054233	1,8	0,00027194	63,1141074	
		NO	0,2	-0,00357644	0,50	13,78	0,0240	298	0,0015	0,0001089	0,11613588	0	-4,942E-05	13,8183045	
		MO	0,6	0,00065161	0,50	13,78	0,0044	54	0,0015	0,0001089	0,38870956	1,8	1,8224E-05	27,9682424	
		LM	0,2	-0,01241349	0,50	13,78	0,0832	1033	0,0015	0,0001089	0,06555661	0	-0,00033608	27,0737569	
												Σ	-9,5334E-05	131,974411	
													ΔQ=	0,00036118	

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

En la iteración 57 la variación de caudal es muy pequeña y tiende a cero. De tal manera que se ha obtenido una pérdida para todo el circuito cerrado de 8.66 metros de columna de agua (mca) para un caudal de entrada de 1 l/s. A partir de este valor se encuentra la pérdida para el circuito cerrado para diferentes caudales.

Tabla 23: Trayectoria 7 - Pérdidas de Energía por Fricción

TRAYECTORIA 7										
TRAMO	TUBERÍA	L(m)	Di(mm)	Q (l/s)	v(m/s)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f	hfi (m)
Succión - Bomba	PVC 1"	0,23	24,17	0,1	0,2179	4747	0,0015	0,0000621	0,038529	0,001
Bomba - Válvula check	PVC 1"	0,2	24,17	0,1	0,2179	4747	0,0015	0,0000621	0,038529	0,001
Válvula check - A	PVC 1/2"	0,37	13,78	0,1	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,032771	0,020
Redes de Tubería	-	-	-	0,1	-	-	-	-		0,866
P - Descarga	PVC 1/2"	2,28	13,78	0,1	0,6705	8326	0,0015	0,0001089	0,032771	0,124
hf=										1,012

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Tabla 24: Trayectoria 7 - Pérdidas de Energía por Accesorios

TRAYECTORIA 7											
TRAMO	ACCESORIOS	CANTIDAD	Di (mm)	Q (l/s)	v (m/s)	Le/Di	ϵ/Di	fT	K	hmi (m)	
Bomba - A	Codo estándar a 90°	1	24,17	0,1	0,21795	30	6E-05	0,011	0,33	0,0008	
	Reducción (1"-1/2") brusca	1	13,78	0,1	0,67052	-	-	-	0,32	0,0073	
	Válvula check	1	15,8	0,1	0,51003	100	0,0095	0,039	3,9	0,0517	
	Válvula de bola PVC	2	13,78	0,1	0,67052	3	0,0001	0,012	0,036	0,0017	
	Tee (flujo bilateral)	1	13,78	0,1	0,67052	60	0,0001	0,012	0,72	0,0165	
P - Descarga	Codo estándar a 90°	2	13,78	0,1	0,67052	30	0,0001	0,012	0,36	0,0165	
	Tee (flujo directo) HG	1	15,8	0,1	0,51003	20	0,0095	0,037	0,74	0,0098	
hm=										0,0945	

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

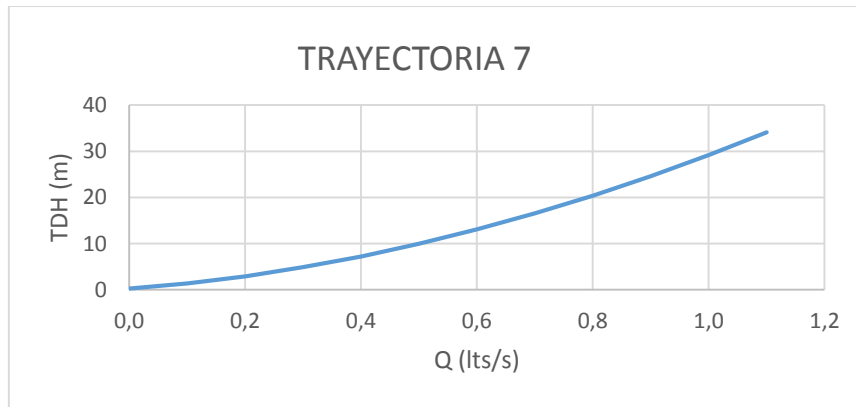
Tabla 25: Trayectoria 7 - Resumen

TRAYECTORIA 7						
Q (lts/s)	Ho (m)	v	$v^2/2g$ (m)	hf (m)	hm (m)	TDH (m)
0,0	0,24	0	0	0	0	0,24
0,1		0,6705	0,0229	1,01212	0,0945	1,3696

0,2		1,341	0,0917	2,21866	0,3781	2,9284
0,3		2,0116	0,2063	3,59031	0,8506	4,8873
0,4		2,6821	0,3668	5,1152	1,5123	7,2342
0,5		3,3526	0,5731	6,78609	2,3629	9,9621
0,6		4,0231	0,8252	8,59799	3,4026	13,066
0,7		4,6936	1,1232	10,5471	4,6313	16,542
0,8		5,3642	1,467	12,6306	6,0491	20,387
0,9		6,0347	1,8567	14,846	7,6558	24,599
1		6,7052	2,2922	17,1913	9,4517	29,175
1,1		7,3757	2,7736	19,665	11,437	34,115

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Gráfica 7: Trayectoria 7 - Curva del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.4.1.8. Tabla resumen y curvas de operación del sistema

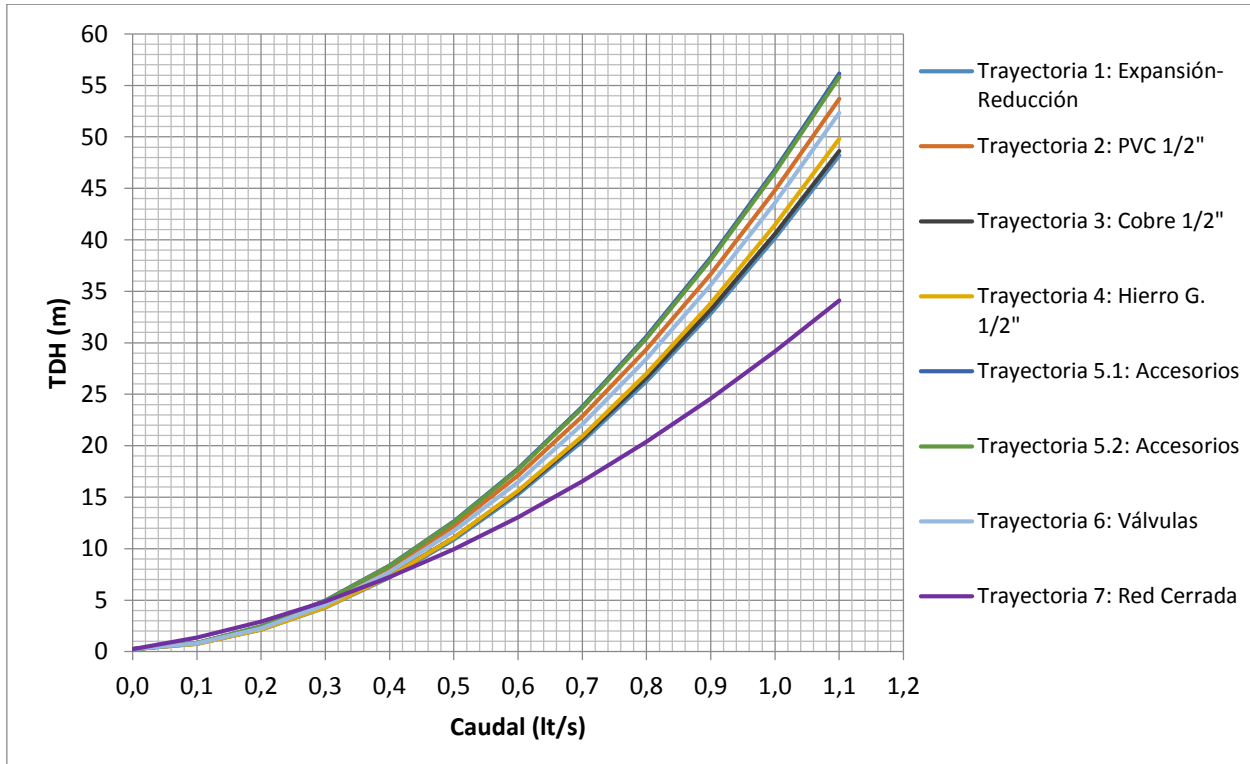
Tabla 26: Resumen

	TDH 1 (m)	TDH 2 (m)	TDH 3 (m)	TDH 4 (m)	TDH 5.1 (m)	TDH 5.2 (m)	TDH 6 (m)	TDH 7 (m)
Q (lts/s)	Expansión-Reducción	PVC 1/2"	Cobre 1/2"	Hierro G. 1/2"	TDH 5.1 (m)	TDH 5.2 (m)	Válvulas	Red Cerrada
0,0	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,1	0,76305511	0,83976447	0,78298836	0,75787274	0,84899036	0,8487519	0,79267399	1,369557385
0,2	2,133106706	2,39104032	2,18756781	2,135951554	2,44544299	2,44047893	2,25882144	2,928412892
0,3	4,290551509	4,81950769	4,38654518	4,326904207	4,96028278	4,94490406	4,58094931	4,887263823
0,4	7,211197639	8,095014	7,35263683	7,312151125	8,36548482	8,33351478	7,73573135	7,234220284
0,5	10,88035372	12,1992559	11,0692681	11,0805009	12,6440373	12,5890033	11,7090077	9,962063962
0,6	15,28781399	17,1195243	15,5249216	15,62421167	17,7841275	17,6993516	16,4909459	13,06578206
0,7	20,42594704	22,8463198	20,7109827	20,93750991	23,7769266	23,6555769	22,0741968	16,54162742

0,8	26,2887707	29,3721995	26,6206966	27,0158785	30,6155164	30,4506411	28,4530019	20,38666364
0,9	32,87143802	36,6911355	33,2485894	33,85566299	38,2942944	38,0788439	35,6226975	24,5985123
1	40,16992439	44,7981248	40,5901147	41,45383264	46,8086103	46,5354544	43,5794126	29,17519912
1,1	48,18082404	53,6889355	48,6414244	49,80782537	56,1545308	55,8164708	52,3198729	34,11505393

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Gráfica 8: Resumen



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.5 Selección de bomba para el sistema hidráulico

Para seleccionar la bomba se comparan las curvas de operación del sistema para las diferentes trayectorias con la curva de operación de la bomba. La curva de operación de la bomba generalmente viene provista por el fabricante de la bomba. Se considera el caudal y la altura total de bombeo necesaria para cumplir con los requerimientos.

3.5.1 Potencia de la bomba

La potencia de la bomba se utiliza la fórmula siguiente:

$$P_A = h_A \gamma Q$$

Para nuestro caso utilizaremos un caudal de 0.4 l/s y la mayor h_A para este caudal se ha obtenido en la trayectoria 5.1 $h_A = 8,365 \text{ m}$. Y el peso específico del agua es $\gamma = 9807 \text{ N/m}^3$.

$$P_A = (8.365 \text{ m}) * (9807 \text{ N/m}^3) * (0.0004 \text{ m}^3/\text{s})$$

$$P_A = 32.814222 \text{ N} * \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P_A = 32.814222 \text{ W}$$

Como $1 \text{ hp} = 745.7 \text{ W}$
Entonces:

$$P_A = \frac{32.814222 \text{ W}}{745.7 \text{ W}} * \text{hp}$$

$$P_A = 0.044 \text{ hp}$$

Introduciendo la eficiencia de la bomba se tiene:

$$\text{Potencia de entrada a la bomba} = \frac{\text{Potencia transmitida al fluido}}{\text{Eficiencia de la bomba}}$$

$$P_l = \frac{P_A}{e_M} = \frac{0.044 \text{ hp}}{0.5} = 0.088 \text{ hp}$$

La bomba de menor potencia disponible en el mercado es de 1/2hp.

3.5.2 Curva de operación de la bomba

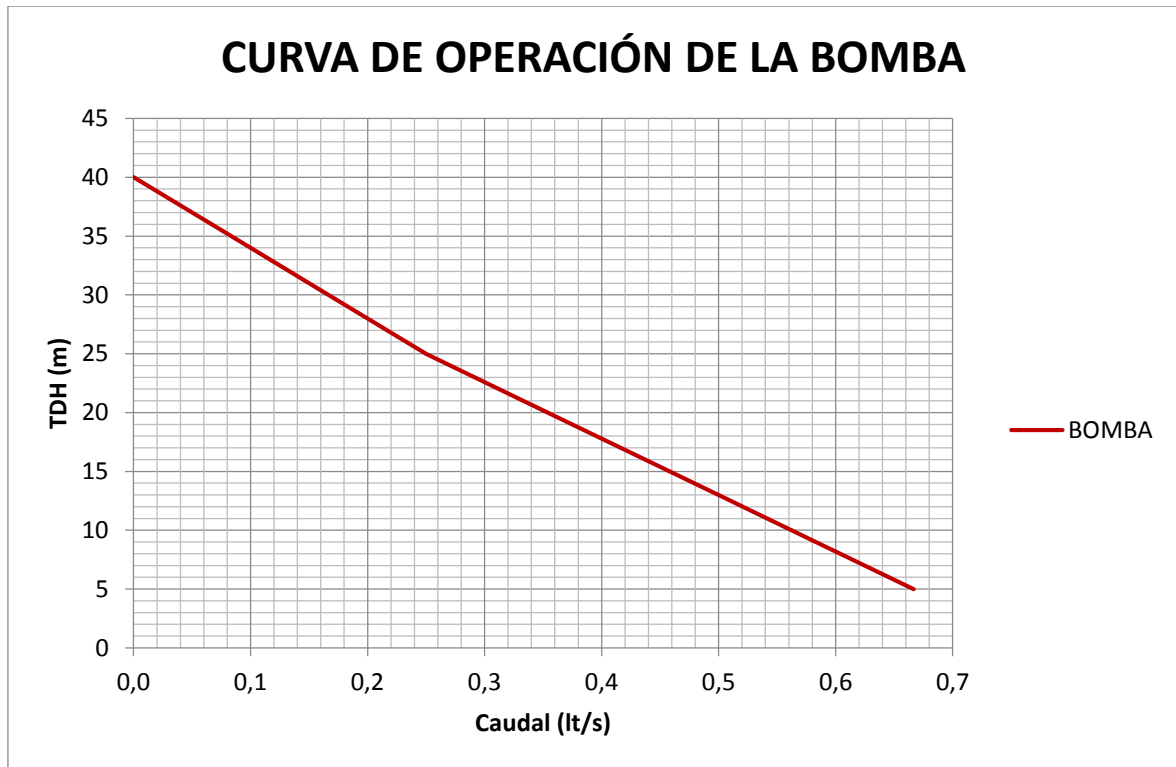
La curva de operación de la bomba suministrada por el fabricante es la siguiente y pertenece a una bomba centrífuga de 1/2hp de marca Foras.

Tabla 27: Curva de operación de la Bomba

Q (lts/s)	TDH (m)
0,0	40
0,083333333	35
0,166666667	30
0,25	25
0,333333333	21
0,416666667	17
0,5	13
0,583333333	9
0,666666667	5

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Gráfica 9: Curva de Operación de la Bomba



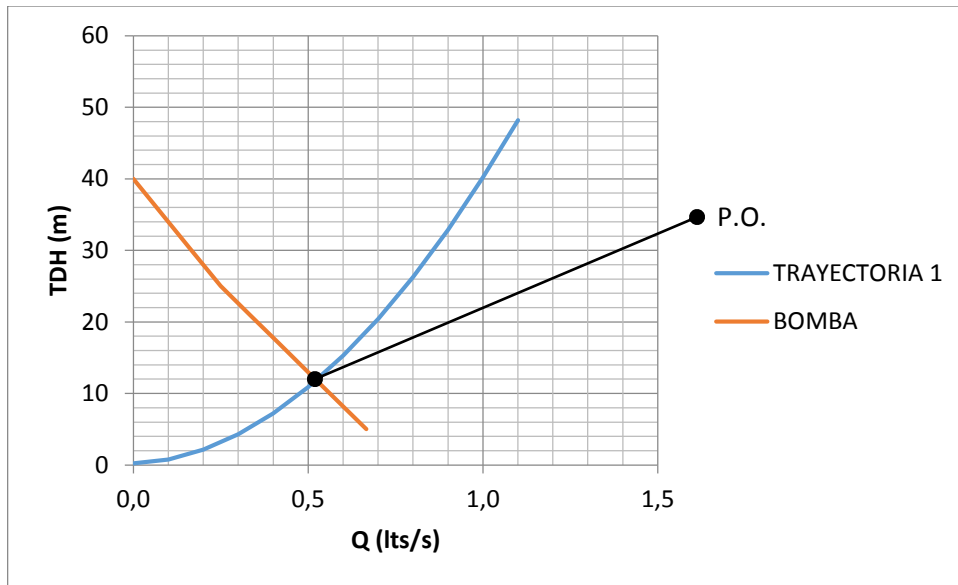
Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.5.3 Punto de operación

El punto de operación de la bomba se encuentra en la intersección entre la curva de operación de la bomba y la curva de operación del sistema.

A continuación se presenta el punto de operación de la bomba para las diferentes trayectorias.

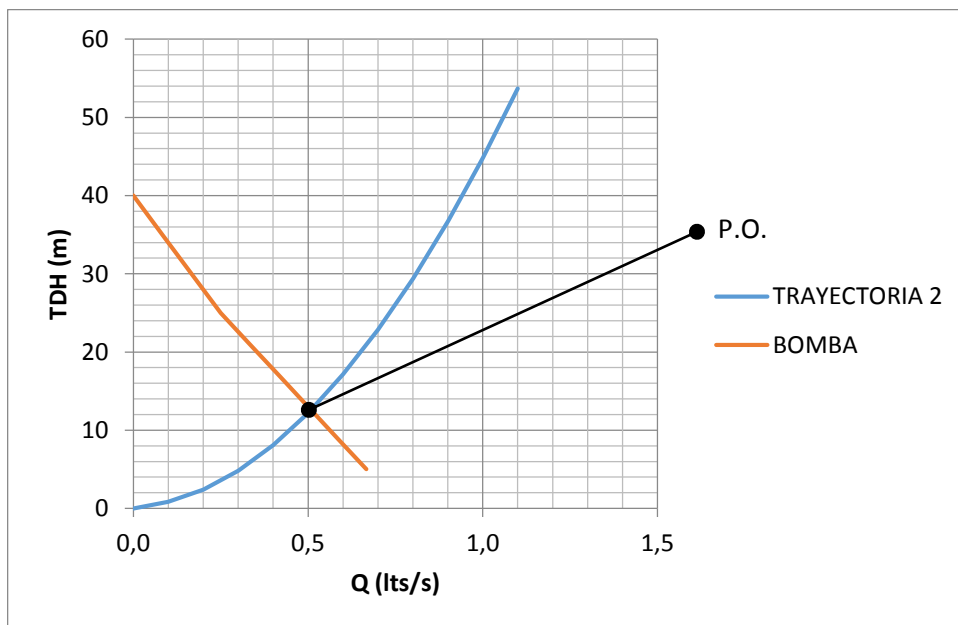
Gráfica 10: Trayectoria 1 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 1 es $Q=0.52$ l/s y $TDH=12$ m.

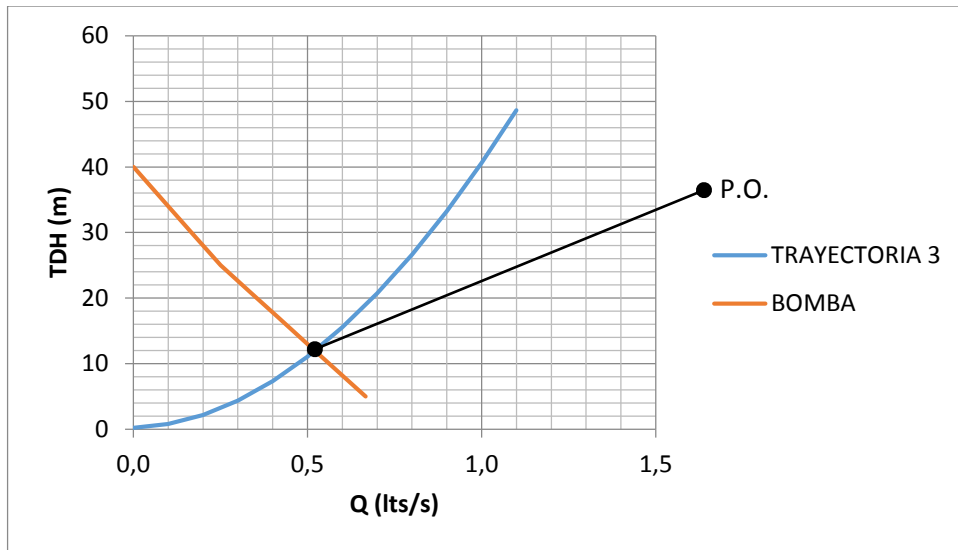
Gráfica 11: Trayectoria 2 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 2 es $Q=0.51$ l/s y $TDH=12.5$ m.

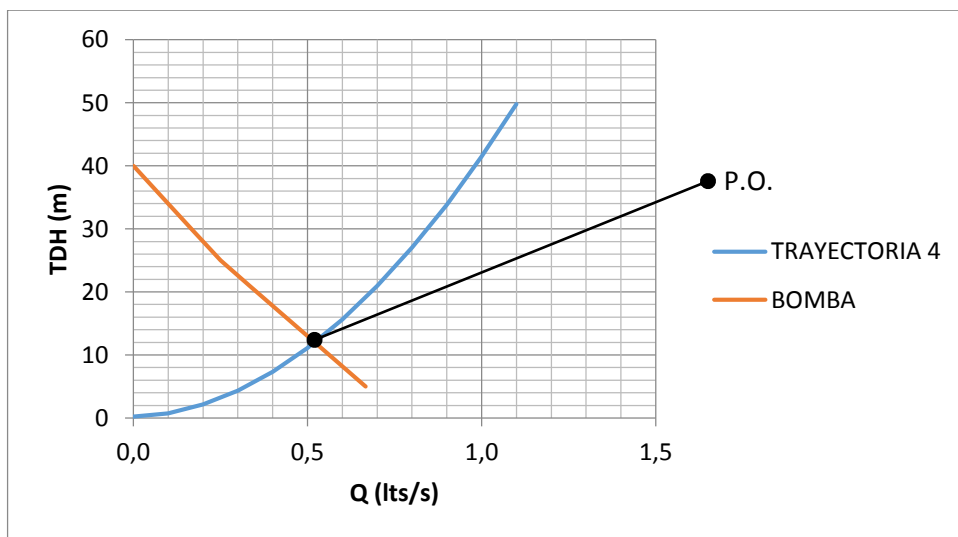
Gráfica 12: Trayectoria 3 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 3 es $Q=0.52$ l/s y $TDH=12$ m.

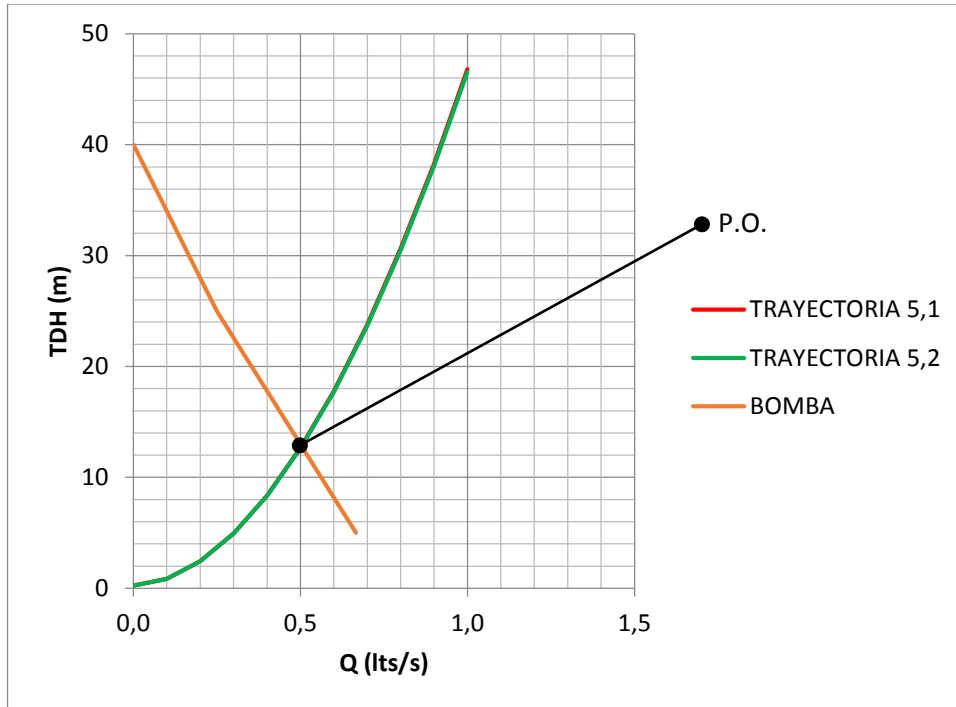
Gráfica 13: Trayectoria 4 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 4 es $Q=0.52$ l/s y $TDH=12$ m.

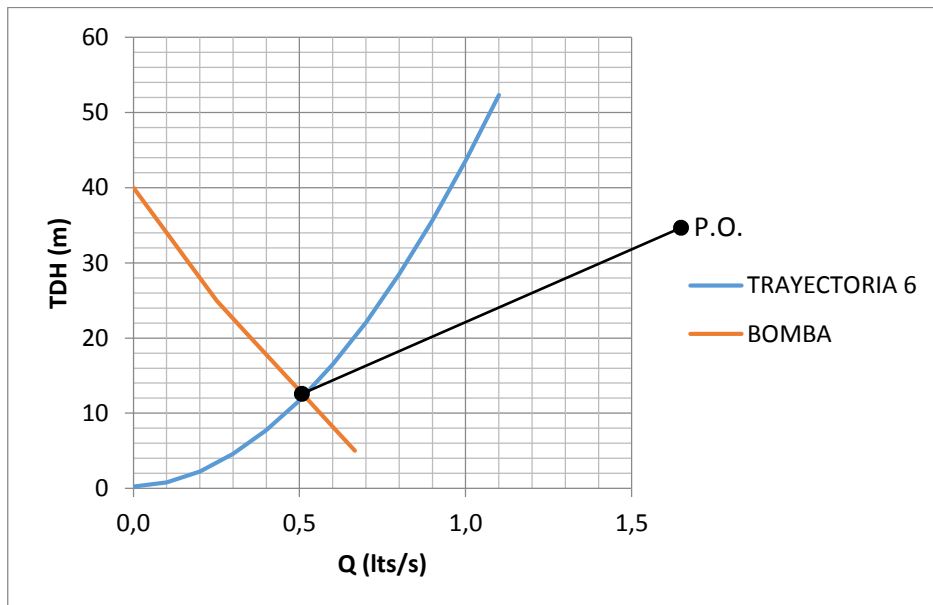
Gráfica 14: Trayectoria 5 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 5.1 y 5.2 es $Q=0.50$ l/s y $TDH=13$ m.

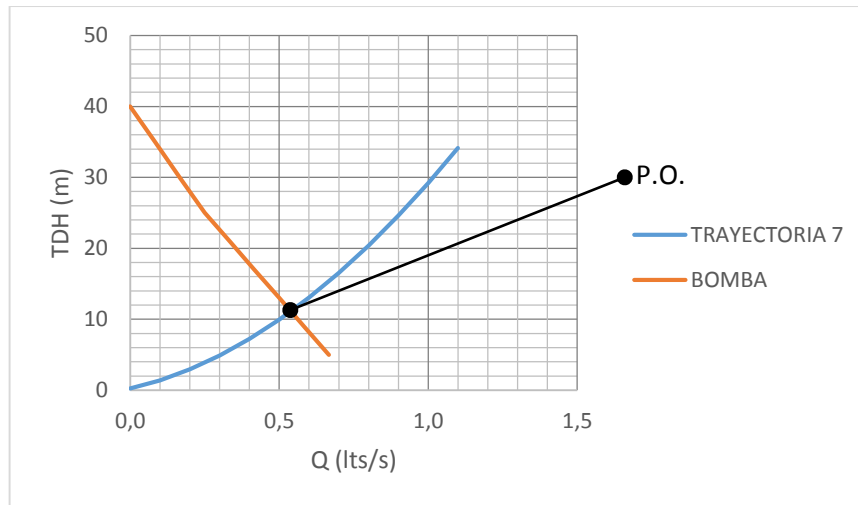
Gráfica 15: Trayectoria 6 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 6 es $Q=0.51$ l/s y $TDH=12$ m.

Gráfica 16: Trayectoria 7 - Punto de Operación de la Bomba



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El punto de operación para la trayectoria 7 es $Q=0.54$ l/s y $TDH=11$ m.

3.5.4 Aparatos de medición

Para medir la presión de agua a lo largo de las trayectorias del sistema se tienen dos sistemas de medición. Mediante manómetros de glicerina y mediante piezómetros de columna de agua.

Se seleccionará la escala del manómetro mediante el siguiente análisis:

Se vuelve a realizar un análisis similar a los realizados para las trayectorias del sistema pero el punto de finalización será el más crítico, es decir el punto de toma de presión en el cual la presión sea la más grande. En nuestro sistema el punto en el cual la presión será mayor será en la trayectoria 6 (válvulas) en el punto de medición antes de la primera válvula (válvula de globo o de paso).

Se debe aplicar la ecuación general de la energía:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

Considerando que: $z_1=0$ por estar a la altura de la referencia, $V_1=V_2$ porque el diámetro de tubería se mantiene constante y realizando las simplificaciones correspondientes se obtiene la presión que ejerce en el punto de finalización.

$$\frac{p_1}{\gamma} - z_2 - \sum (h_f + h_m) = \frac{p_2}{\gamma}$$

Donde el valor de $\frac{p_1}{\gamma}$ es igual a 13 mca, correspondiente a la mayor descarga de la bomba (trayectoria 5) y el valor de $\sum(h_f + h_m)$ será calculado desde la descarga de la bomba hasta el punto de prueba más próximo que es de 2.3 mca para un caudal de (0.40lt/s).

$$\text{Entonces: } P = (13-0.8-2.3) \text{ mca} = 9.9 \text{ mca}$$

$$P = (9.9/0.704)\text{PSI}$$

$$P = 14.062 \text{ PSI}$$

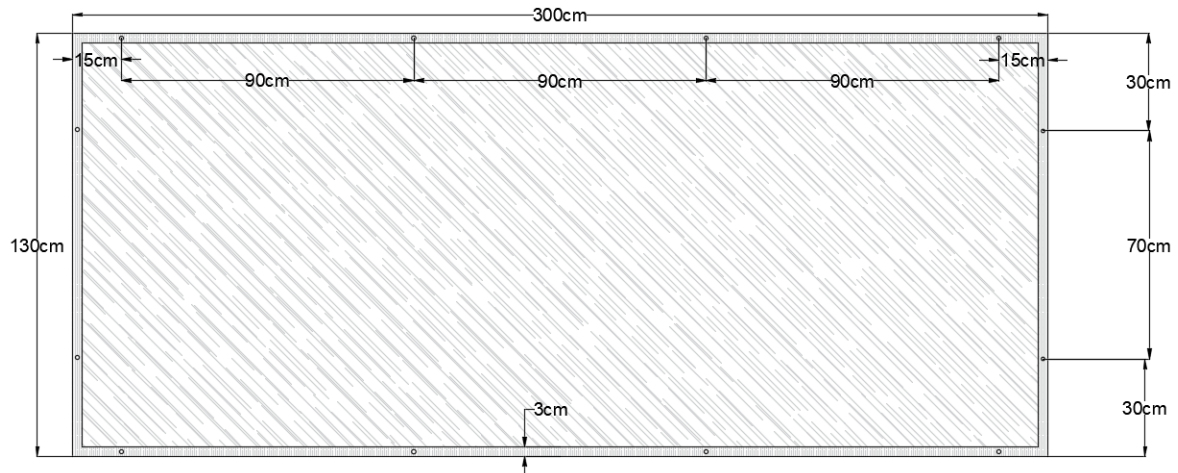
En el mercado se encuentran manómetros con escala de 0 a 30 PSI (0 a 206843 Pa), que resultarán muy útiles para las mediciones de presión en éste sistema hidráulico.

Al presentarse variaciones de presión pequeñas en ciertos puntos de medición del sistema, se necesita un sistema de medición más preciso que los manómetros; sobre todo para experimentación con caudales pequeños, Por este motivo se construirán piezómetros de columna de agua con una longitud de 1.2m. Se encontrarán sobre el nivel de los puntos de medición más altos y se reducirá el caudal de tal manera que el fluido no exceda el límite superior de los tubos piezométricos.

3.6 Planos de diseño

3.6.1 Dimensiones del tablero y posiciones de tirafondos.

Ilustración 11: Tablero

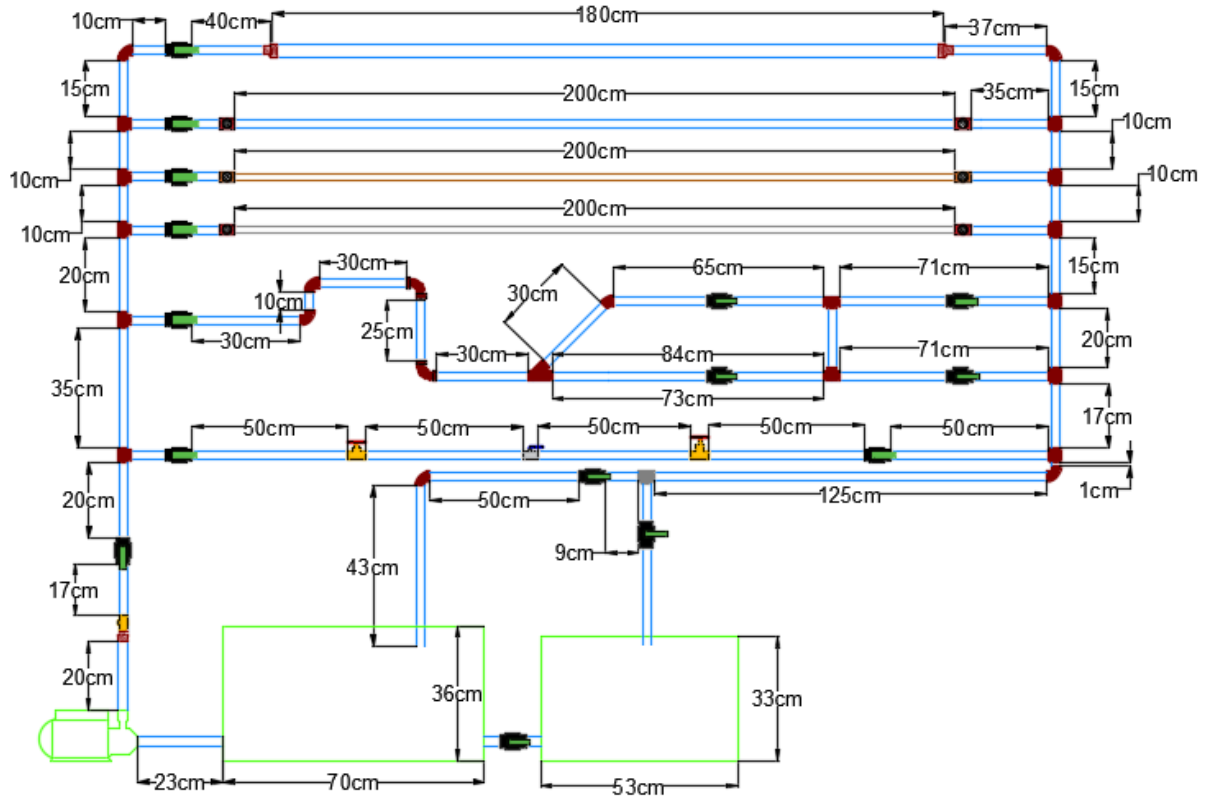


Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

El tablero tendrá 300 cm de ancho y 130cm de alto, con un margen de 3cm en cada lado. Se sujetará a la pared mediante 12 tirafondos de 12cm de longitud cada uno; ubicados, 4 en el margen superior, 4 en el margen inferior y dos en cada margen lateral.

3.6.2 Dimensiones del sistema de tuberías y accesorios

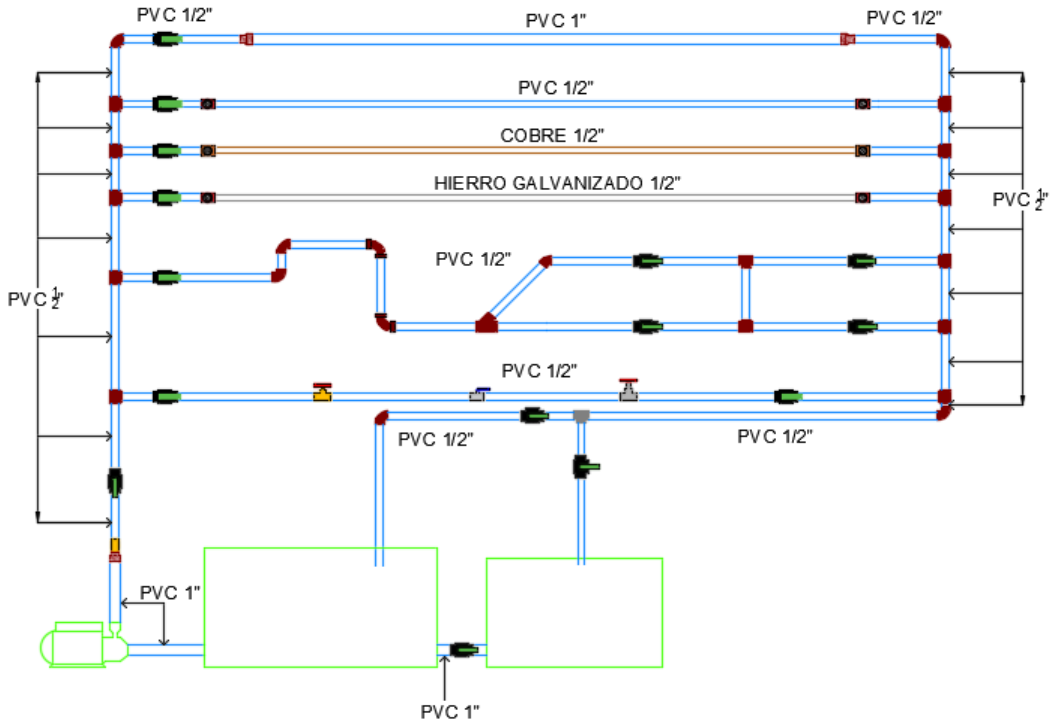
Ilustración 12: Dimensiones del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.6.3 Materiales y diámetros de las tuberías

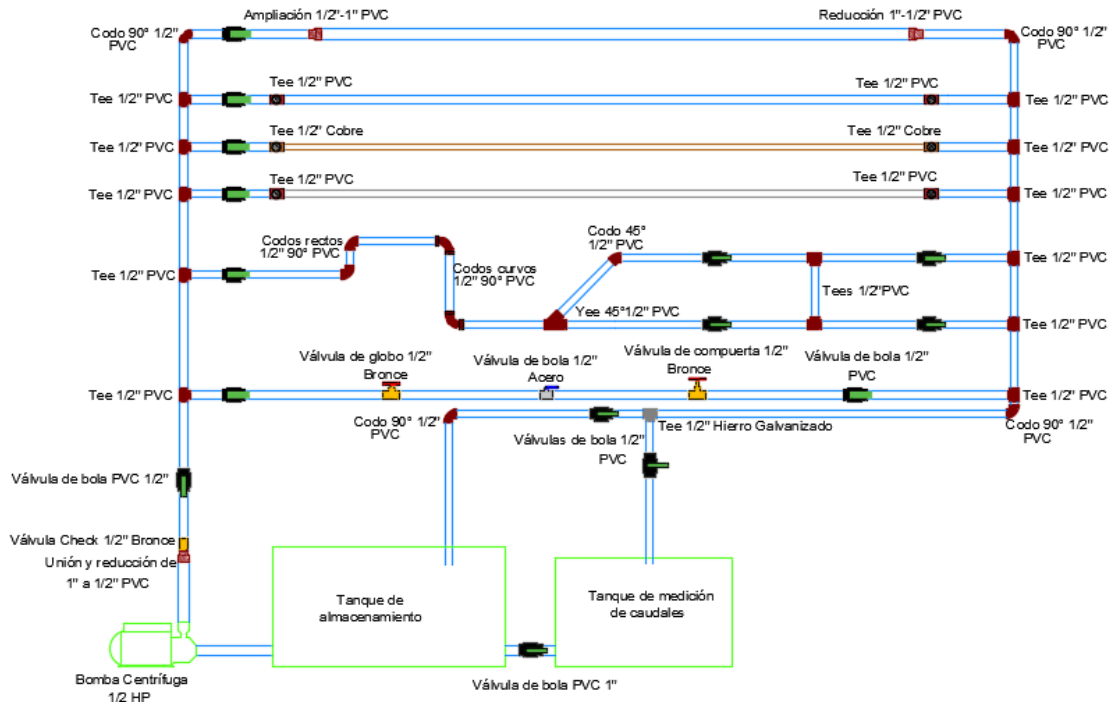
Ilustración 13: Características del Sistema



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.6.4 Accesorios

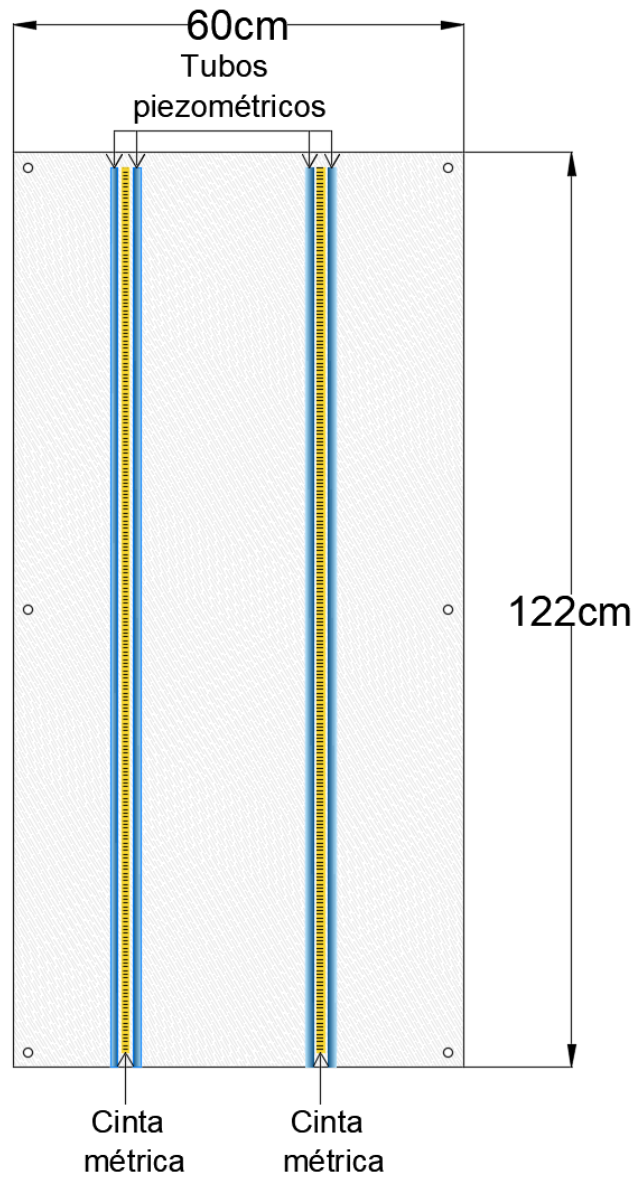
Ilustración 14: Tipos de Accesorios



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.6.5 Tablero de piezómetros de columna de agua

Ilustración 15: Piezómetros de Columna de Agua



Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7 Proceso constructivo del equipo

3.7.1 Unión de tuberías con accesorios.

Fotografía 3: Tuberías y Accesorios



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 4: Tuberías y Accesorios



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

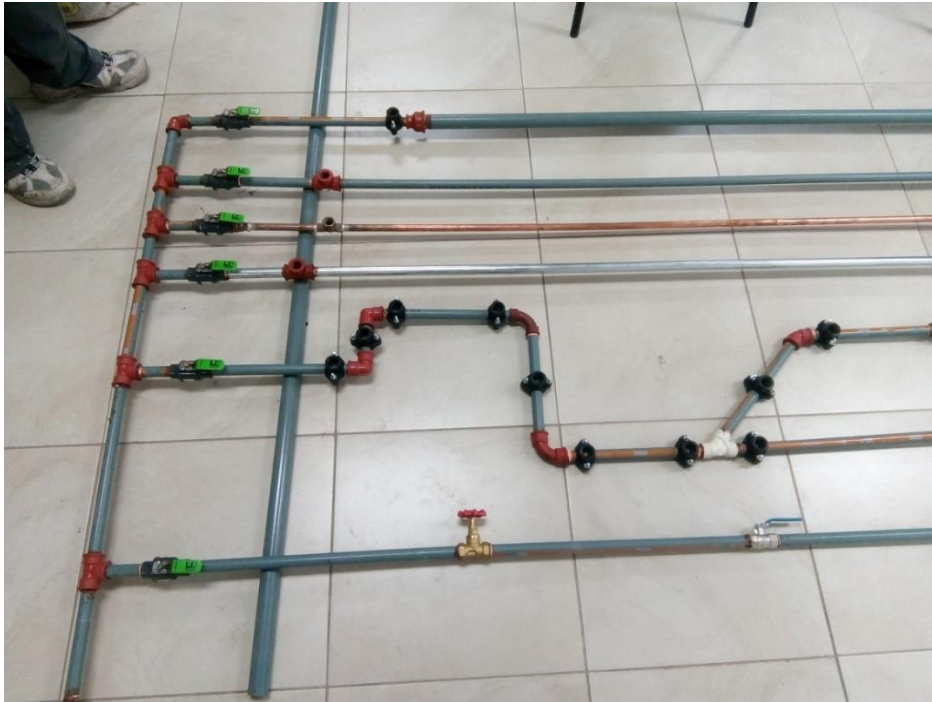
Fotografía 5: Tuberías y Accesorios



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.2 Instalación de collarines de derivación.

Fotografía 6: Collarines



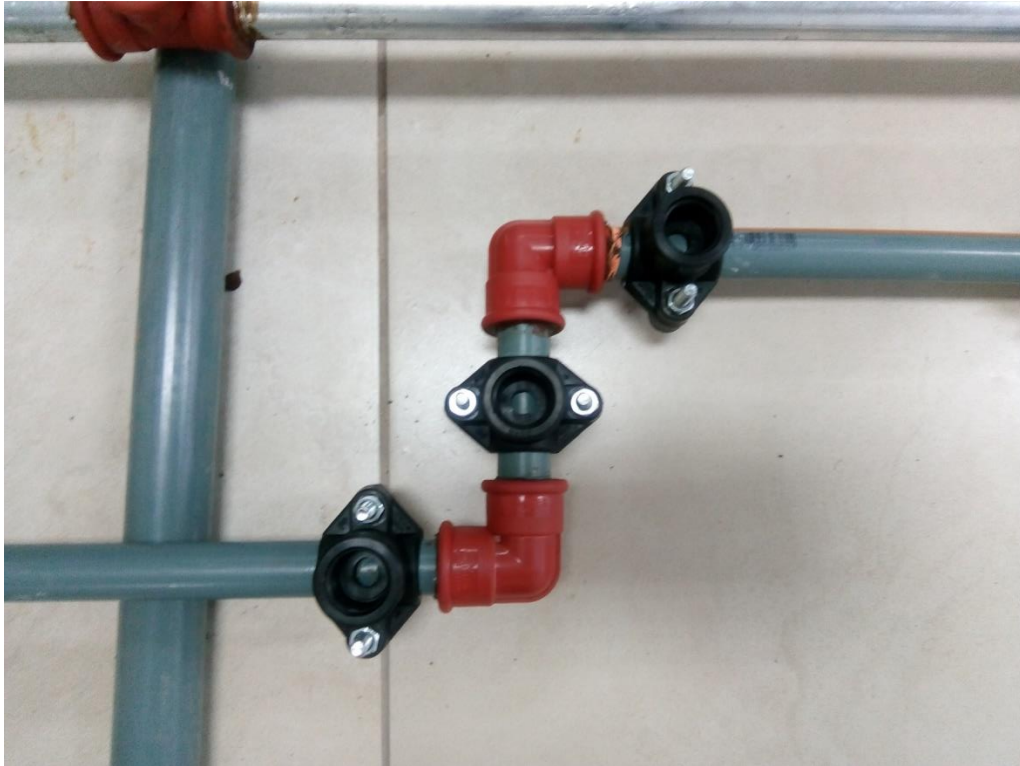
Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 7: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 8: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 9: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 10: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 11: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 12: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 13: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 14: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 15: Collarines



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.3 Colocación del sistema de tuberías sobre el tablero.

Fotografía 16: Sistema de Tuberías en Tablero



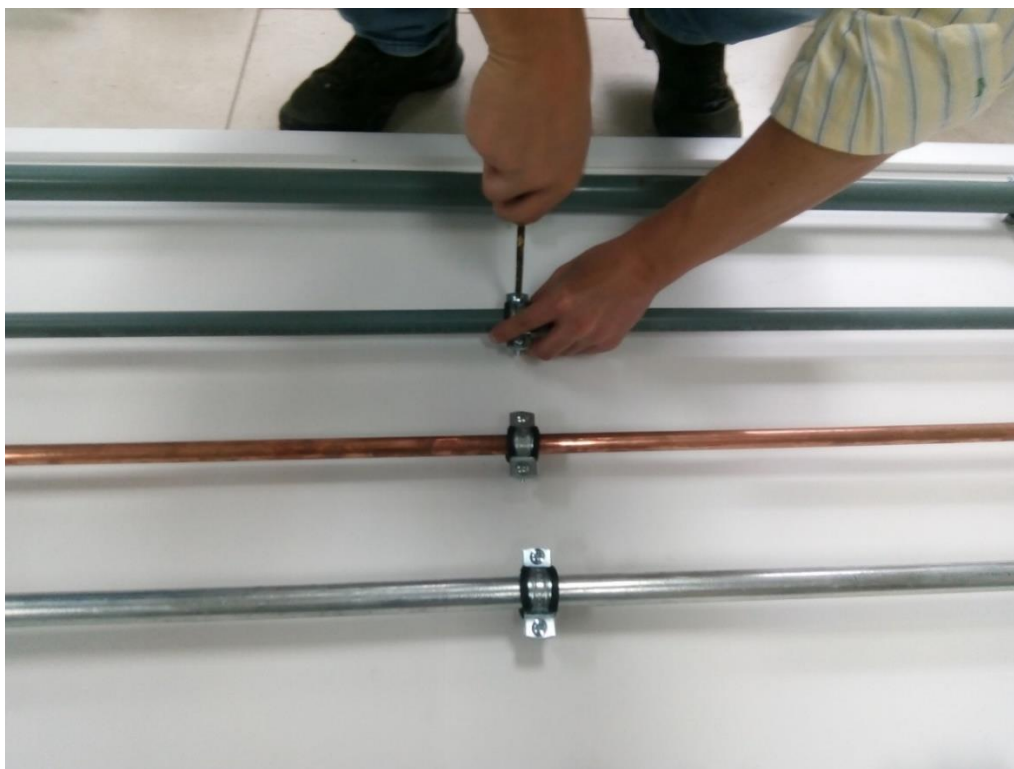
Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 17: Sistema de Tuberías en Tablero



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 18: Sistema de Tuberías en Tablero



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 19: Sistema de Tuberías en Tablero



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

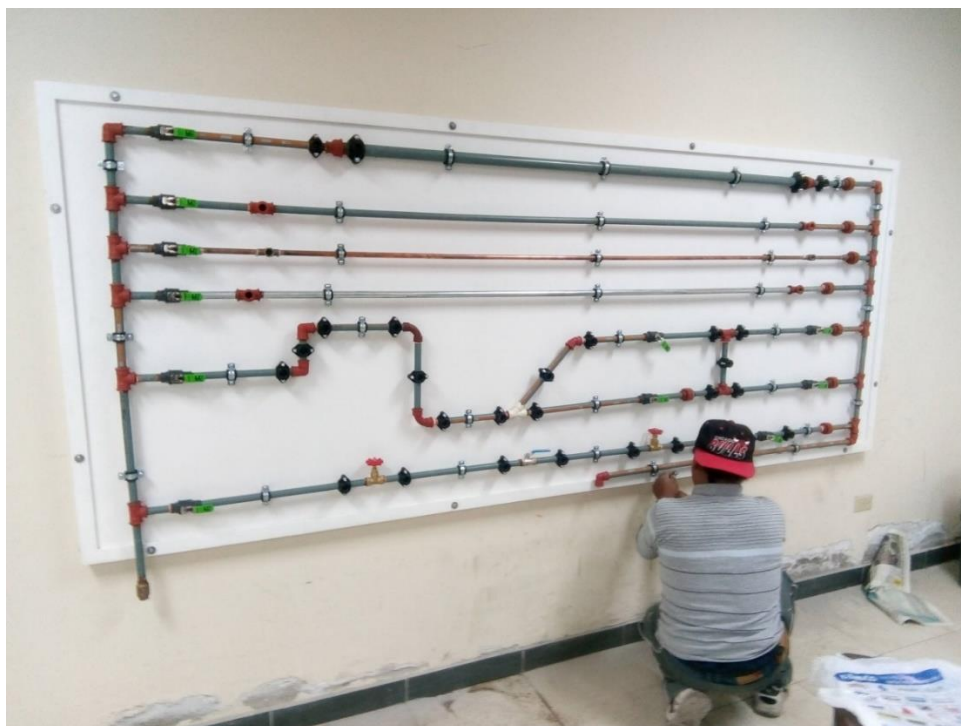
3.7.4 Empotramiento en pared.

Fotografía 20: Empotramiento de Tablero



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 21: Empotramiento de Tablero



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.5 Conexión de bomba al sistema de tuberías y a tanques de almacenamiento.

Fotografía 22: Bomba y Tanques de Almacenamiento



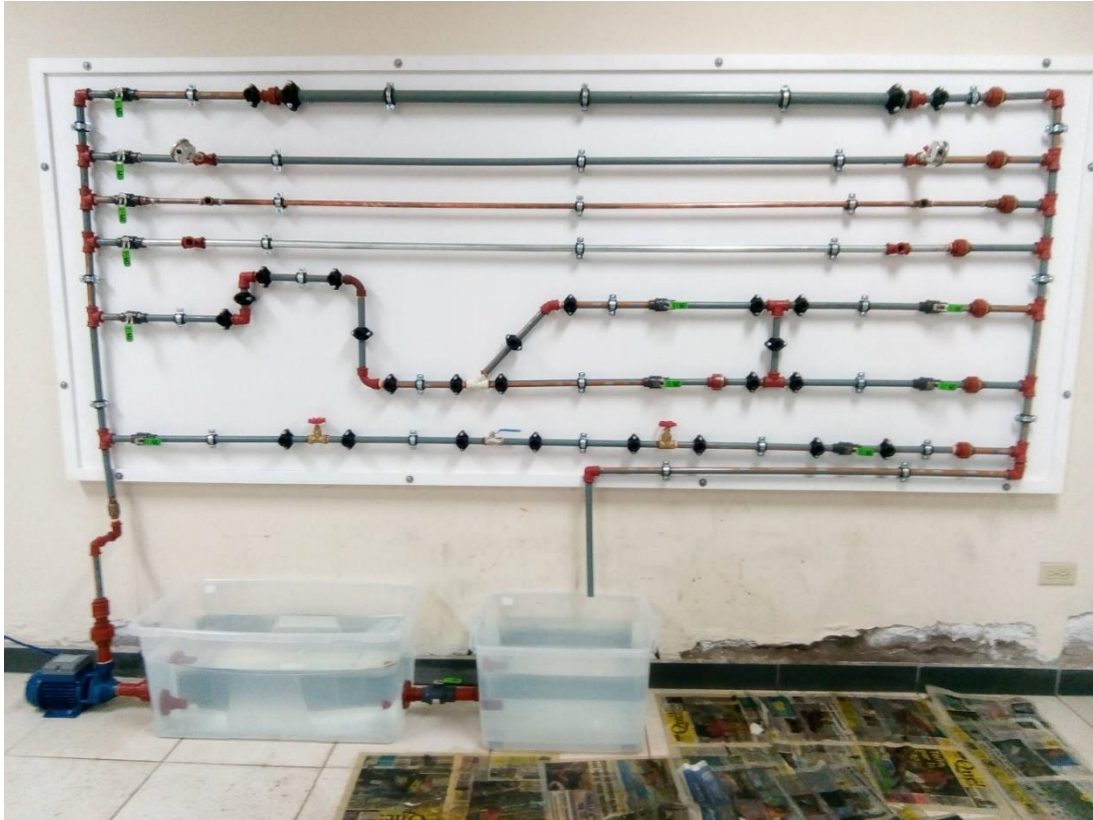
Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 23: Bomba y Tanques de Almacenamiento



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 24: Bomba y Tanque de Almacenamiento



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.6 *Instalación de tubería para medición de caudal*

Fotografía 25: Medición de Caudal



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 26: Medición de Caudal



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.7 Instalación de válvula de liberación de presión

Fotografía 27: Válvula de Liberación de Presión



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.7.8 Instalación de piezómetros de columna de agua

Fotografía 28: Empotramiento de Piezómetros de Columna de Agua



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8 Partes del equipo construido.

3.8.1 Bomba Centrífuga, tubería de succión y tubería de bombeo.

Fotografía 29: Bomba



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.2 Válvula Check (para flujo vertical).

Fotografía 30: Válvula Check



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.3 *Válvula de regulación de caudal (verde) y válvula de liberación de presión (roja).*

Fotografía 31: Válvulas de Regulación y Liberación



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 32: Válvulas de Regulación y Liberación



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.4 *Válvulas para seleccionar trayectoria*

Fotografía 33: Válvulas de Trayectorias



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.5 *Tubería de PVC de 1" de 1.8m*

Fotografía 34: Tuberías



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.6 Tuberías de 2m de longitud de PVC, cobre y hierro galvanizado.

Fotografía 35: Tuberías



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.7 Ampliación gradual de ½” a 1”

Fotografía 36: Ampliación



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.8 Reducción gradual de ½” a 1”

Fotografía 37: Reducción



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.9 Codos de PVC de 90° rectos.

Fotografía 38: Codo Recto 90°



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.10 Codos de PVC de 90° curvos.

Fotografía 39: Codo Curvo 90°



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.11 Yee de derivación a 45° de PVC

Fotografía 40: Yee



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.12 Codo de PVC a 45°

Fotografía 41: Codo 45°



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.13 Tee de PVC

Fotografía 42: Tee



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.14 Válvula de globo de bronce de ½”.

Fotografía 43: Válvula de Globo



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.15 Válvula de bola de acero de ½”.

Fotografía 44: Válvula de Bola



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.16 *Válvula de compuerta de bronce de ½”.*

Fotografía 45: Válvula de Compuerta



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.17 *Válvula de bola de PVC ½”*

Fotografía 46: Válvula de Bola de PVC



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.18 Válvulas reguladoras de descarga a tanque de almacenamiento o a tanque de medición de caudal.

Fotografía 47: Válvulas de Tanques de Almacenamiento



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.19 Tanque de almacenamiento.

Fotografía 48: Tanque de Almacenamiento



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.20 *Tanque para medición de caudal.*

Fotografía 49: Tanque de Medición de Caudal



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.21 *Válvula de comunicación entre tanques.*

Fotografía 50: Válvula entre Tanques



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.22 *Piezómetros de columna de agua*

Fotografía 51: Piezómetros de Columna de Agua



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.23 *Acoples para piezómetros*

Este tipo de acople brinda un sistema de conexión fácil y rápido de una manera eficiente entre los piezómetros o manómetros con los distintos puntos de medición.

Fotografía 52: Acople de Manguera



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 53: Acople de Válvula



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

3.8.24 Manómetros de 0 a 30 PSI con glicerina

Fotografía 54: Manómetros de Glicerina



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

Fotografía 55: Manómetros de Glicerina



Fuente: Fotografía de Alexis Hidalgo y Darío Morales

CAPÍTULO 4 FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

4.1. Definición de Prácticas a Desarrollarse

4.1.1. *Ensayo de pérdidas de energía por fricción en tuberías*

Este ensayo tiene como objetivos encontrar la pérdida que existe en las tuberías debido a la fricción del agua con el material de la tubería y determinar un coeficiente de fricción experimental de cada tipo de tubería para compararlos con los teóricos.

4.1.2. *Ensayo de pérdidas de energía por accesorios*

La finalidad de realizar este ensayo es determinar la pérdida que existe en las tuberías cuando el fluido pasa a través de un accesorio (codos, tees) y determinar una longitud equivalente experimental de cada tipo de accesorio para compararlos con los teóricos.

4.1.3. *Ensayo de pérdidas de energía por válvulas*

La finalidad de realizar este ensayo es determinar la pérdida que existe en las tuberías cuando el fluido pasa a través de una válvula y determinar una longitud equivalente experimental de cada tipo de válvula para compararlos con los teóricos.

4.2. Pruebas de Funcionamiento del Equipo

4.2.1. *Ensayo de pérdidas de energía por fricción en tuberías*

Objetivos

- Determinar la pérdida de energía por fricción en las cuatro trayectorias de tuberías utilizando cualquiera de los dos aparatos de medición.
- Calcular el coeficiente de fricción para cada tubería utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach.
- Comparar el coeficiente de fricción experimental con el teórico.

Cálculo de Resultados

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

$$Q = \text{Caudal (lt/s)}$$

$$V = \text{Volumen (lt)}$$

$$t = \text{Tiempo (s)}$$

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

$$v = \text{Velocidad del flujo (m/s)}$$

$$Q = \text{Caudal (m}^3\text{/s)}$$

$$A = \text{Área interna de la tubería (m}^2\text{)}$$

4. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática igual a 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C .

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

$$Re = \text{Número de Reynolds}$$

$$v = \text{Velocidad del fluido (m/s)}$$

$$Di = \text{Diámetro de la tubería (m)}$$

$$V_{cinemática} = \text{Viscosidad cinemática del fluido (m}^2\text{/s}^2\text{)}$$

5. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di .

donde Di es el diámetro interno de la tubería (m)

6. Determinar el coeficiente de fricción con la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$f = h_L \times \frac{Di}{L} \times \frac{2g}{v^2}$$

donde

$$h_L = \text{pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)}$$

L = longitud de la corriente de flujo (m o ft)

D_i = diámetro de la tubería (m o ft)

v = velocidad de flujo promedio (m/s o ft/s)

f = factor de fricción (adimensional)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

7. Comparar el coeficiente de fricción calculado con el coeficiente de fricción obtenido con el diagrama de Moody.

4.2.2. *Ensayo de pérdidas de energía por accesorios*

Objetivos

- Determinar la pérdida de energía que existe cuando el flujo pasa a través de un accesorio.
- Calcular el coeficiente de resistencia K_L y la longitud equivalente L/D para los diferentes accesorios que existen en el sistema.
- Comparar la longitud equivalente experimental con la teórica.

Cálculo de Resultados

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

Q = Caudal (lt/s)

V = Volumen (lt)

t = Tiempo (s)

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

v = Velocidad del flujo (m/s)

Q = Caudal (m³/s)

A = Área interna de la tubería (m²)

4. Calcular el coeficiente de resistencia K_L con la ecuación de pérdidas de carga por accesorios

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

donde

K_L = Coeficiente de resistencia

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

v = Velocidad del flujo (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

5. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C.

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

Re = Número de Reynolds

v = Velocidad del fluido (m/s)

Di = Diámetro de la tubería (m)

$V_{cinemática}$ = Viscosidad cinemática del fluido (m/s²)

6. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di . donde Di es el diámetro interno de la tubería (m).

7. Obtener el coeficiente de fricción f con el diagrama de Moody (Anexo)

8. Para determinar la longitud equivalente L/D utilizamos la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n} = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$K = \left(f \frac{L}{D}\right)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{K}{f}$$

donde

$\frac{L}{D}$ = Longitud equivalente

K = Coeficiente de resistencia

f = Coeficiente de fricción.

9. Comparar la longitud equivalente L/D calculada con la longitud equivalente teórica de la tabla 10.4 Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

4.2.3. *Ensayo de pérdidas de energía por válvulas*

Objetivos

- Determinar la pérdida de energía que existe cuando el flujo pasa a través de una válvula.
- Calcular el coeficiente de resistencia K_L y la longitud equivalente L/D para las diferentes válvulas que existen en el sistema.
- Comparar la longitud equivalente experimental con la teórica.

Cálculo de Resultados

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

Q = Caudal (lt/s)

V = Volumen (lt)

t = Tiempo (s)

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

v = Velocidad del flujo (m/s)

Q = Caudal (m³/s)

A = Área interna de la tubería (m²)

4. Calcular el coeficiente de resistencia K_L con la ecuación de pérdidas de carga por accesorios

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

donde

K_L = Coeficiente de resistencia

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

v = Velocidad del flujo (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

5. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C.

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

Re = Número de Reynolds

v = Velocidad del fluido (m/s)

Di = Diámetro de la tubería (m)

$V_{cinemática}$ = Viscosidad cinemática del fluido (m/s²)

6. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di . donde Di es el diámetro interno de la tubería (m).

7. Obtener el coeficiente de fricción f con el diagrama de Moody (Anexo)

8. Para determinar la longitud equivalente L/D utilizamos la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n} = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$K = \left(f \frac{L}{D}\right)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{K}{f}$$

donde

$\frac{L}{D}$ = Longitud equivalente

K = Coeficiente de resistencia

f = Coeficiente de fricción

9. Comparar la longitud equivalente L/D calculada con la longitud equivalente teórica de la tabla 10.4 Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 24

4.3. Tabla de Resultados

Tabla 28: Ensayo de Pérdidas de Energía por Fricción

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS															
TRAYECTORIA	TUBERÍA	L (m)	Di (mm)	Vol (lt)	ΔT (s)	Q (lt/s)	v (m/s)	ALTURA		$\Delta h = hL$ (cm)	f (experimental)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f (teórico)
								h1	h2						
1	PVC 1"	1,80	24,17	17,64	72,48	0,243	0,53	12,00	13,00	1,00	0,0094	11552,27	0,0015	0,0000621	0,03
2	PVC 1/2"	2,00	13,78	17,64	89,77	0,197	1,32	33,00	79,00	46,00	0,0358	16359,94	0,0015	0,0001089	0,0275
3	Cobre 1/2"	2,00	14,47	17,64	87,58	0,201	1,22	55,00	85,00	30,00	0,0284	15969,40	0,0015	0,0001037	0,0275
4	HG 1/2"	2,00	15,80	17,64	85,16	0,207	1,06	45,00	81,00	36,00	0,0500	15040,74	0,15	0,0094937	0,046

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

Tabla 29: Ensayo de Pérdidas de Energía por Accesorios

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR ACCESORIOS Y VÁLVULAS																
TRAYECTORIA	ACCESORIO	Di (mm)	Vol (lt)	ΔT (s)	Q (lt/s)	v (m/s)	ALTURA		$\Delta h = hL$ (cm)	K (experimental)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f (teórico)	L/D (experimental)	L/D (Teórico)
							h1	h2								
1	Ampliación PVC Roscable 1/2" - 1"	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	36,00	53,50	17,50	1,47	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	53,50	-
	Reducción PVC Roscable 1" - 1/2"	24,17	17,64	113,26	0,16	0,34	36,00	53,50	17,50	1,47	7392,80	0,0015	0,0000621	0,03	49,04	-
5	Codo recto 90° PVC roscable 1/2" H-V	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	36,00	53,50	17,50	1,47	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	53,50	30,00
	Codo recto 90° PVC roscable 1/2" V-H	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	54,00	78,00	24,00	2,02	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	73,37	30,00
	Codo curvo 90° PVC roscable 1/2" H-V	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	81,00	82,50	1,50	0,13	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	4,59	20,00

	Codo curvo 90° PVC roscable ½" V-H	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	81,00	97,00	16,00	1,35	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	48,91	20,00
5,1	Yee 45° PVC roscable ½" Flujo en el ramal	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	73,50	88,50	15,00	1,26	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	45,86	-
	Codo 45° PVC roscable ½"	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	88,00	92,00	4,00	0,34	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	12,23	16,00
	Tee PVC roscable ½" Flujo en el ramal	13,78	17,64	113,26	0,16	1,04	109,00	113,00	4,00	0,34	12966,90	0,0015	0,0001089	0,0275	12,23	60,00
	Tee PVC roscable ½" Flujo directo	13,78	17,64	87,74	0,20	1,35	62,00	84,00	22,00	1,11	16738,45	0,0015	0,0001089	0,0275	40,36	20,00
5,2	Yee 45° PVC roscable ½" Flujo directo	13,78	17,64	87,74	0,20	1,35	14,50	12,50	-2,00	0,10	16738,45	0,0015	0,0001089	0,0275	3,67	-
	Tee PVC roscable ½" Flujo en el ramal	13,78	17,64	87,74	0,20	1,35	52,00	70,00	18,00	0,91	16738,45	0,0015	0,0001089	0,0275	33,02	60,00
	Tee PVC roscable ½" Flujo directo	13,78	17,64	87,74	0,20	1,35	69,50	77,00	7,50	0,38	16738,45	0,0015	0,0001089	0,0275	13,76	20,00
6	Válvula de Globo ½"	13,78	17,64	124,50	0,14	0,95	36,00	116,00	80,00	8,13	11796,24	0,0015	0,0001089	0,0275	295,52	340,00
	Válvula de Bola Metálica ½"	13,78	17,64	85,80	0,21	1,38	32,00	36,00	4,00	0,19	17116,92	0,0015	0,0001089	0,0275	7,02	3,00
	Válvula de Compuerta ½"	13,78	17,64	85,80	0,21	1,38	41,00	75,00	34,00	1,64	17116,92	0,0015	0,0001089	0,0275	59,65	8,00
	Válvula de Bola PVC ½"	13,78	17,64	85,80	0,21	1,38	84,50	96,50	12,00	0,58	17116,92	0,0015	0,0001089	0,0275	21,05	3,00

Fuente: Elaborado por Alexis Hidalgo y Darío Morales

4.4. Análisis de Resultados

- Para el ensayo de pérdidas por fricción se analizaron tuberías de PVC, Cobre y hierro Galvanizado.
- La pérdida en la reducción es mayor que en la ampliación debido a que cuando reduce el diámetro el fluido choca con las paredes y produce mayor pérdida.
- La variación de los datos experimentales con los teóricos puede ser por la sensibilidad y la calibración de los manómetros de glicerina y la exactitud de los piezómetros de agua, también por el material de la tubería.
- La pérdida en la tubería de PVC de ½" es mayor que en a tubería de cobre y de hierro galvanizado.
- La tubería de cobre tiene menor pérdida que las otras tuberías.
- La pérdida de energía producida por la Tee es casi nula en cualquiera de los dos sentidos.
- Las pérdidas en los codos varían dependiendo el sentido, la pérdida es mayor si el codo va de orientación horizontal a vertical que de vertical a horizontal.
- Existe una mayor pérdida en el codo recto de 90° que en el codo curvo de 90°.
- La válvula de bola tiene menor pérdida que las válvulas de globo y de compuerta.
- La válvula de globo tiene la mayor pérdida.
- La tubería de hierro galvanizado tiene mayor pérdida que la tubería de PVC y de cobre.
- La tubería de cobre tiene menor pérdida.

4.5. Guía de Prácticas de Laboratorio



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

FACULTAD DE
INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

LABORATORIO DE
HIDRÁULICA

GUÍA DE
PRÁCTICAS DE
LABORATORIO

1. PRINCIPALES ASPECTOS DE LA NORMATIVA Y REGLAMENTO DE LOS USUARIOS DEL LABORATORIO

1.1. Aspectos normativos generales de seguridad en el laboratorio

a. Prácticas de estudiantes.

Objetivo: Poner en conocimiento de estudiantes, el uso del laboratorio para el desarrollo de sus prácticas.

- Para el ingreso y salida de los estudiantes, ingresarán y saldrán por el acceso determinado por el laboratorio, en el horario establecido por el señor profesor, de tal forma que ocupen únicamente el tiempo destinado para la práctica.
- Antes de ingresar al Laboratorio, los estudiantes deberán tener puesto el overol o mandil, así como todos los implementos necesarios como guantes y mascarillas, según sea el caso.
- El responsable de área entregará: el área, los equipos y herramientas al profesor o un estudiante designado por él, quién recibirá los equipos y verificará su estado, limpieza y que estén de acuerdo con el registro de práctica, después los estudiantes y el docente firmarán el registro de práctica.
- Al finalizar la práctica, el estudiante colocará todos los equipos en un solo lugar, para que el responsable de área verifique el estado de limpieza.
- Si el responsable de área o su delegado, verifica que existe daño en algún equipo o el área de trabajo está sucia, notificará inmediatamente al profesor que dicta la materia.

1.2. Principales aspectos de seguridad personal

1.2.1. Vestimenta de los usuarios del laboratorio.

- Overol de color azul (con el nombre bordado de color blanco).



- Botas punta de acero.



- Guantes de caucho.



- Franela



1.2.2. Reglas de comportamiento dentro del laboratorio.

- El estudiante deberá portar toda la vestimenta obligatoria previa al ingreso al laboratorio.
- Ingresar al laboratorio con el docente de manera ordenada y puntual.
- No se permite el uso de artefactos electrónicos durante la realización de la práctica.
- Prohibido los alimentos dentro del laboratorio.

1.2.3. Si fuere del caso, procedimientos de uso de sustancias peligrosas.

- Para la manipulación de todos los materiales y sustancias dentro del laboratorio es necesario el uso de toda la vestimenta ya mencionada para la protección de los estudiantes.

1.2.4. Procedimiento de disposición de desechos.

- Los desechos serán dispuestos en los lugares establecidos por el personal del laboratorio.

2. FORMATO PARA LA ELABORACIÓN DE INFORMES DE LAS PRÁCTICAS.

NOTA:

Los informes se realizarán a mano con buena ortografía y caligrafía. En hojas a cuadros dentro de una carpeta, a una sola carilla y no a espacio seguido. Todo el informe se realizará con tinta de color negro.

1. CARÁTULA

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Facultad de Ingeniería

Escuela de Civil

Laboratorio de Hidráulica

Práctica N.º _____

Grupo N.º _____

Alumnos: (Se registrará los nombres de todos los alumnos pertenecientes al grupo en orden alfabético, y se subrayará o resaltará el nombre del alumno a quien pertenezca dicho informe).

Ensayos: (Nombres de los ensayos realizados).

Fecha de preparación: _____

Fecha de realización: _____

Fecha de entrega: _____

2. INTRODUCCIÓN

Para la parte de introducción se debe dar la idea general de todos los temas a tratar en el informe, y se dividirá para cada ensayo que se haya realizado.

3. GLOSARIO

Se especificarán las palabras que no sean familiares para los estudiantes, y se escribirá la definición de dicha palabra.

4. MARCO TEÓRICO

Se incluirá teoría de los temas a tratar.

5. MATERIALES

Los materiales y equipos usados para la realización de los ensayos.

6. PROCEDIMIENTO

Se especificará un resumen del procedimiento realizado para la elaboración del o los ensayos, poniendo énfasis en lo más importante.

7. RESULTADOS

7.1. Procedimiento de cálculo, fórmulas y cálculos matemáticos

En forma concisa y articulada lógicamente, se explican los fundamentos de cálculo y se realiza la aplicación de las fórmulas a los datos tomados en el laboratorio.

Los datos que se utilice para los cálculos deben ser los registrados en el laboratorio bajo ningún concepto estos deben ser modificados.

7.2. Resultados

Los resultados obtenidos deben presentarse mediante tablas en forma ordenada que sea adecuada para la presentación del informe.

8. CONCLUSIONES

Deben ser conclusiones técnicas que contrasten los datos que se tienen en el informe con trabajos similares o con normas a nivel nacional o internacional.

9. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones deben ser aspectos técnicos que se deben mejorar para un buen desarrollo de las prácticas a futuro. El nivel de recomendaciones se debe basar en trabajos similares y que aporten técnicamente a las mismas.

10. REFERENCIAS CONSULTADAS

Tomar en cuenta la referenciación según las normas APA.

Se debe indicar las fuentes bibliográficas y las normas utilizadas para la elaboración del informe.

11. ANEXO

Se colocarán las normas usadas para la realización de los ensayos.

Las hojas en donde se registraron los datos tomados en el laboratorio.

Y lo que el estudiante considere respaldo para algo asumido dentro de su informe y sirva como ayuda para la revisión y calificación de su informe.

3. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

3.1. Encendido del Equipo

- Para encender el equipo se procede a verificar que las dos válvulas que están ubicadas inmediatamente después de la bomba se encuentren totalmente abiertas. (Válvula de Bola PVC Verde: Abierto = Paralelo a la tubería; Cerrado = Perpendicular a la tubería)

Válvula de Bola PVC
(Abierta completamente)

Válvula de Globo
(Abierta completamente)

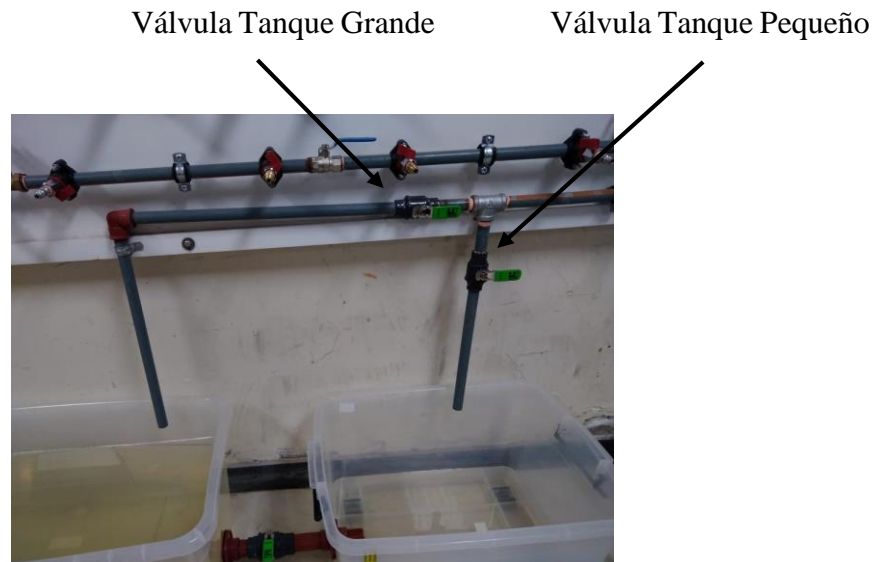


- De igual manera se verifica que al menos una de las válvulas de las trayectorias se encuentre totalmente abierta. (Válvula de Bola PVC Verde: Abierto = Paralelo a la tubería; Cerrado = Perpendicular a la tubería)

Válvulas de las Trayectorias



- A continuación, se verifica que la válvula de evacuación del tanque grande se encuentre totalmente abierta. (Válvula de Bola PVC Verde: Abierto = Paralelo a la tubería; Cerrado = Perpendicular a la tubería)



Nota: Estos procedimientos se los realiza debido a que a que el agua siempre debe circular por el sistema de forma constante y sin interrupciones ya sea por la válvula de liberación de presión (Válvula de Globo Roja después de la bomba) o por alguna trayectoria con el fin de que el agua pueda evacuar el sistema y no reventar la bomba y de igual manera para que el tanque de almacenamiento grande nunca se quede vacío ya que la bomba siempre debe tener agua.

- Llenar de agua el tanque de almacenamiento grande hasta que el nivel se encuentre por encima de la marca.
- Una vez realizado los pasos anteriores se enciende la bomba conectando el cable azul en el tomacorriente.

3.2. Selección de Trayectoria

- Al momento de encender la bomba todas las válvulas de las trayectorias de bola de PVC verdes van a estar abiertas, entonces se decide que trayectoria se va a usar y se cierra las válvulas de las demás trayectorias.
- Para cambiar de trayectoria siempre se debe abrir primero la válvula de la nueva trayectoria y después cerrar la válvula de la trayectoria anterior.

Válvulas de las Trayectorias



3.3. Medición de Presiones

Dependiendo de la trayectoria requerida y del equipo de medición que se va a utilizar para medir las pérdidas se siguen las siguientes indicaciones para el uso de las válvulas que se encuentran inmediatamente después de la bomba:

- Para utilizar los piezómetros de agua se debe abrir completamente la válvula de globo (válvula roja) para liberar presión en el sistema y dependiendo de la trayectoria se va regulando el caudal con la válvula de bola de PVC (válvula verde) de tal manera que el agua no rebase las mangueras y quede en el rango de medición de los piezómetros.



Válvula de Bola PVC
(Se regula según la trayectoria)

Válvula de Globo
(Abierta completamente)



- Para retirar el aire de las mangueras de los piezómetros de agua se debe conectar las mangueras antes y después de cualquier accesorio, se abre las válvulas pequeñas para que pase agua al piezómetro y con la válvula de globo totalmente abierta se cierra por completo la válvula de bola de PVC por un instante para que salga el aire de las mangueras.



Válvula de Bola PVC
(Se cierra por un instante)

Válvula de Globo
(Abierta completamente)



- Para la utilización de los manómetros de glicerina la válvula de globo debe estar completamente cerrada y la válvula de bola de PVC debe estar completamente abierta ya que no se necesita liberación de presión en el sistema y este puede funcionar con el caudal máximo posible.



Válvula de Bola PVC
(Abierta completamente)

Válvula de Globo
(Cerrada completamente)



- Conectar los piezómetros de agua o los manómetros de glicerina en las tuberías según la trayectoria deseada para medir las pérdidas. Tener en cuenta que el nivel del agua de los piezómetros debe estar por encima de la línea de la trayectoria estudiada.
- En la utilización de piezómetros de agua se debe tomar la diferencia de altura Δh de las mangueras, mientras que cuando se usan los manómetros de glicerina se toma la diferencia de presión en PSI y realizamos la transformación a metros de columna de agua con (1PSI = 0.704 mca.).

3.4. Medición de Caudal

Se Procede a determinar el caudal que está circulando en el sistema con el tanque de almacenamiento pequeño que tiene una escala en lt.

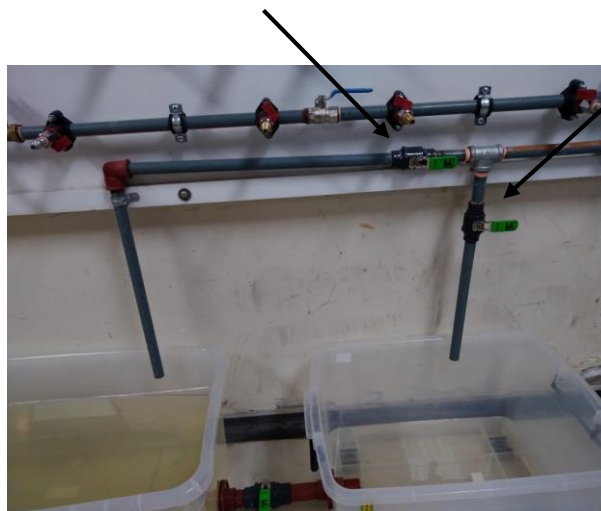
- Verificar que la válvula de bola de PVC entre los dos tanques esté cerrada, y también que el tanque de almacenamiento pequeño este vacío.



- Abrir la válvula del tanque pequeño y se cierra la válvula del tanque grande.

Válvula Tanque Grande

Válvula Tanque Pequeño



- Tomar el tiempo de llenado de un volumen de 10 lt.
- Después de tomar el tiempo abrir inmediatamente la válvula del tanque grande, también abrir la válvula entre los dos tanques y cerrar la válvula de tanque pequeño, todo esto para que el tanque grande nunca se quede vacío.
- Una vez que se iguale el nivel del agua de los dos tanques se cierra la válvula que se encuentra entre ellos, y se vacía manualmente el tanque pequeño llenando el tanque de almacenamiento grande.
- Se sabe que $Q = V/t$, entonces dividir el volumen de 10 lt para el tiempo de llenado medido anteriormente para obtener el caudal, se trabaja el caudal en lt/s .

3.5. Apagado del Equipo

2..5.1. Para apagar el equipo se abren todas las válvulas de las trayectorias y la válvula de liberación de presión para que el agua circule por todo el sistema, la válvula del tanque de almacenamiento pequeño y la que se encuentra entre los tanques deben estar cerradas.

2..5.2. Se desconecta el cable del tomacorriente

3.6. Limpieza del Equipo

- Para limpiar el equipo la bomba debe estar apagada, se procede a retirar el agua manualmente de los tanques para limpiarlo y cambiar de agua.

3.7. Solución de Problemas

- En caso de que la bomba no encienda: se debe desconectar inmediatamente el cable azul, se verifica que la bomba esté con agua, si el problema persiste la solución es desarmar la bomba y hacer girar manualmente el tubo gris hasta que gire normalmente, esto se hace con los tanques vacíos, si después de esto sigue sin funcionar se debe acudir a un técnico.
- Si los acoples de los piezómetros de agua y de los manómetros de glicerina están trabados, se los debe manipular hasta que se vayan aflojando, para poder usarlos normalmente.
- En caso de existir fugas en el equipo se debe apagar el equipo y no usarlo hasta que sean reparadas.

3.8. Recomendaciones

- Para el correcto funcionamiento del equipo se debe realizar un cambio periódico del agua de los tanques para eliminar cualquier tipo de basura acumulada en el tanque o en las tuberías que pueda dañar la bomba y también para evitar la corrosión en válvulas y accesorios.
- De igual manera prender regularmente la bomba, esto para evitar que los empaques que están dentro de la misma se queden pegados y le impida girar para succionar el agua del tanque.
- Se recomienda sacar el aire de los piezómetros de agua como se indicó anteriormente antes de realizar cualquier medición.
- Al momento de conectar y desconectar los manómetros o piezómetros al equipo se recomienda hacerlo con sumo cuidado para evitar el daño de los acoples.
- Para evitar que los acoples de los manómetros y piezómetros se traben se recomienda que se los manipule regularmente antes de conectarlo al equipo hasta que se aflojen.

4. PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA

PRÁCTICA 1

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS

RESUMEN

Se determina la pérdida que existe en las tuberías debido a la fricción del agua con el material de la tubería.

1.1. TEMA: PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

1.1.1. OBJETIVOS

1.1.1.1. Objetivo General:

- Determinar la pérdida de energía por fricción en las cuatro trayectorias de tuberías, utilizando cualquiera de los dos aparatos de medición.

1.1.1.2. Objetivos Específicos:

- Calcular el coeficiente de fricción para cada tubería utilizando la fórmula de Darcy-Weisbach para compararlo con el teórico.

1.1.2. MARCO TEÓRICO

Pérdidas de carga por fricción

En el análisis de los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión comúnmente se expresan en términos de la altura de la columna de fluido equivalente, llamada pérdida de carga h_L . (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 330)

$$h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g}$$

La pérdida de carga h_L representa la altura adicional que el fluido necesita para elevarse por medio de una bomba con la finalidad de superar las pérdidas por fricción en la tubería. La pérdida de carga se produce por la viscosidad y se relaciona directamente con el esfuerzo de corte de la pared del tubo. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 330)

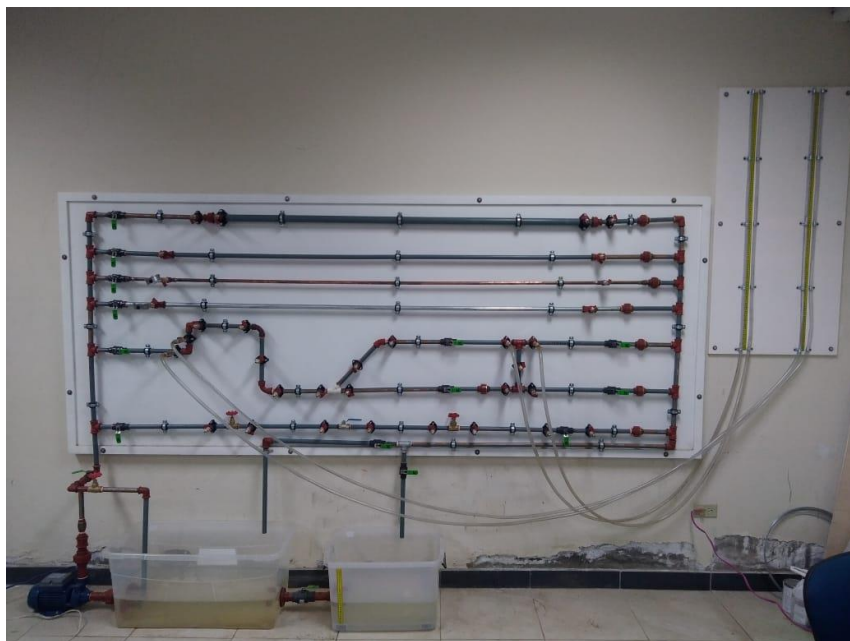
Rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	k_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: "Hidráulica de Tuberías", Juan G. Saldarriaga V., pág. 113

1.1.3. MATERIALES Y EQUIPOS

- Sistema de Medición de Pérdidas de Energía



- Manómetros de Glicerina



- Piezómetros de Columna de Agua



1.1.6. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

Q = Caudal (lt/s)

V = Volumen (lt)

$t =$ Tiempo (s)

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

$v =$ Velocidad del flujo (m/s)

$Q =$ Caudal (m³/s)

$A =$ Área interna de la tubería (m²)

4. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática igual a 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C.

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

$Re =$ Número de Reynolds

$v =$ Velocidad del fluido (m/s)

$Di =$ Diámetro de la tubería (m)

$V_{cinemática} =$ Viscosidad cinemática del fluido (m/s²)

5. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di .

donde Di es el diámetro interno de la tubería (m)

6. Determinar el coeficiente de fricción con la fórmula de Darcy-Weisbach.

$$f = h_L \times \frac{Di}{L} \times \frac{2g}{v^2}$$

donde

$h_L =$ pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

$L =$ longitud de la corriente de flujo (m o ft)

$Di =$ diámetro de la tubería (m o ft)

$v =$ velocidad de flujo promedio (m/s o ft/s)

$f =$ factor de fricción (adimensional)

$g =$ Aceleración de la gravedad (m/s²)

7. Comparar el coeficiente de fricción calculado con el coeficiente de fricción obtenido con el diagrama de Moody.

1.1.7. TABLA DE RESULTADOS

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS															
TRAYECTORIA	TUBERÍA	L (m)	Di (mm)	Vol (lt)	ΔT (s)	Q (lt/s)	v (m/s)	ALTURA		$\Delta h = hL$ (cm)	f (experimental)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f (teórico)
								h1	h2						
1	PVC 1"	1,80	24,17	10,00											
2	PVC 1/2"	2,00	13,78	10,00											
3	Cobre 1/2"	2,00	14,47	10,00											
4	HG 1/2"	2,00	15,80	10,00											

1.1.8. CONCLUSIONES

Se deberá poner conclusiones: indicando los resultados obtenidos, comparando entre los materiales de tubería y comparando con los valores teóricos.

1.1.9. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para el uso de cada tipo de tubería.

1.1.10. BIBLIOGRAFÍA

- MOTT, R. L., & UNTENER, J. A. (2015). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. MÉXICO: PEARSON EDUCACIÓN.
- SALDARRIAGA V., J. G. (1998). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS*. SANTA FÉ DE BOGOTÁ, COLOMBIA: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.

PRÁCTICA 2

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR ACCESORIOS

RESUMEN

Se determina la pérdida que existe en las tuberías cuando el fluido pasa a través de un accesorio (codo, tee, yee).

2.1. TEMA: PÉRDIDAS POR ACCESORIOS

2.1.1. OBJETIVOS

2.1.1.1. Objetivo General:

- Determinar la pérdida de energía que existe cuando el fluido pasa a través de un accesorio, utilizando cualquiera de los dos aparatos de medición.

2.1.1.2. Objetivos Específicos:

- Calcular el coeficiente de resistencia K_L y la longitud equivalente L/D para los diferentes accesorios que existen en el sistema y compáralo con la teórica.

2.1.2. MARCO TEÓRICO

Pérdidas de carga por accesorios

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos (las pérdidas mayores) y se llaman pérdidas menores. Aunque por lo general esto es cierto, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores. El flujo a través de válvulas y uniones es muy complejo, y por lo general no es lógico un análisis teórico. En consecuencia, usualmente los fabricantes de

los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 347-348)

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida K_L (también llamado coeficiente de resistencia). (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

Donde h_L es la pérdida de carga irreversible adicional en el sistema de tuberías provocado por la inserción de l accesorio, y se define como $h_L = \Delta P_L/\rho g$. (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

Rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	k_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

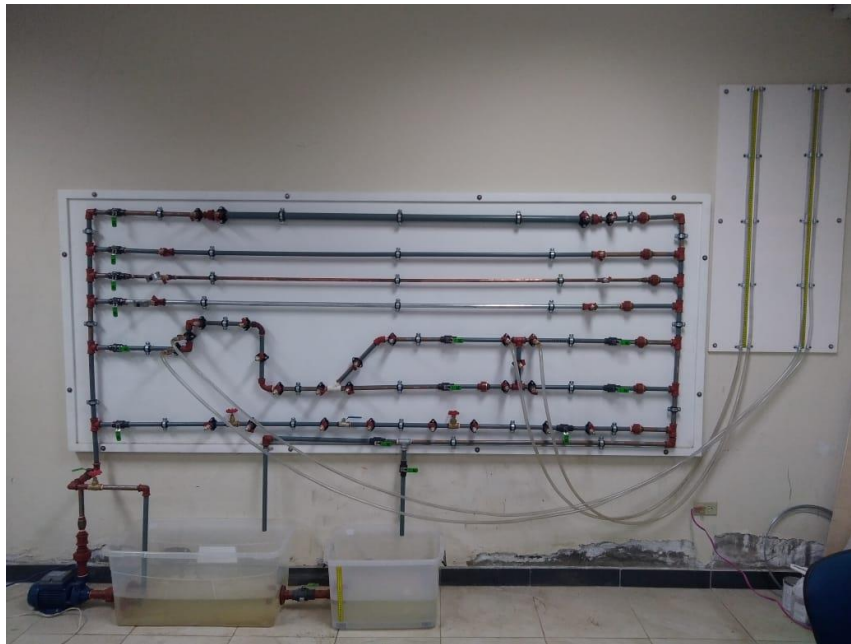
Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

2.1.3. MATERIALES Y EQUIPOS

- Sistema de Medición de Pérdidas de Energía



- Manómetros de Glicerina



- Piezómetros de Columna de Agua



2.1.4. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

Q = Caudal (lt/s)

V = Volumen (lt)

t = Tiempo (s)

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

v = Velocidad del flujo (m/s)

Q = Caudal (m³/s)

A = Área interna de la tubería (m²)

4. Calcular el coeficiente de resistencia K_L con la ecuación de pérdidas de carga por accesorios

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

donde

K_L = Coeficiente de resistencia

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

v = Velocidad del flujo (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

5. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C.

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

Re = Número de Reynolds

v = Velocidad del fluido (m/s)

Di = Diámetro de la tubería (m)

$V_{cinemática}$ = Viscosidad cinemática del fluido (m/s²)

6. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di . donde Di es el diámetro interno de la tubería (m).
7. Obtener el coeficiente de fricción f con el diagrama de Moody (Anexo)
8. Para determinar la longitud equivalente L/D utilizamos la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n} = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$K = \left(f \frac{L}{D}\right)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{K}{f}$$

donde

$\frac{L}{D}$ = Longitud equivalente

K = Coeficiente de resistencia

f = Coeficiente de fricción.

9. Comparar la longitud equivalente L/D calculada con la longitud equivalente teórica de la tabla 10.4 Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

2.1.7. TABLA DE RESULTADOS

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR ACCESORIOS																
TRAYECTORIA	ACCESORIO	Di (mm)	Vol (lt)	ΔT (s)	Q (lt/s)	v (m/s)	ALTURA		$\Delta h = hL$ (cm)	K (experimental)	Re	ε (mm)	ε/Di	f (teórico)	L/D (experimental)	L/D (Teórico)
							h1	h2								
1	Ampliación PVC Roscable 1/2" – 1"	13,78	10,00													
	Reducción PVC Roscable 1" – 1/2"	24,17	10,00													
5	Codo recto 90° PVC roscable 1/2" H-V	13,78	10,00													
	Codo recto 90° PVC roscable 1/2" V-H	13,78	10,00													
	Codo curvo 90° PVC roscable 1/2" H-V	13,78	10,00													
	Codo curvo 90° PVC roscable 1/2" V-H	13,78	10,00													
5,1	Yee 45° PVC roscable 1/2" Flujo en el ramal	13,78	10,00													
	Codo 45° PVC roscable 1/2"	13,78	10,00													
	Tee PVC roscable 1/2" Flujo en el ramal	13,78	10,00													
	Tee PVC roscable 1/2" Flujo directo	13,78	10,00													
5,2	Yee 45° PVC roscable 1/2" Flujo directo	13,78	10,00													
	Tee PVC roscable 1/2" Flujo en el ramal	13,78	10,00													
	Tee PVC roscable 1/2" Flujo directo	13,78	10,00													

2.1.8. CONCLUSIONES

Se deberá poner conclusiones: indicando los resultados obtenidos, comparando entre los tipos de accesorios y comparando con los valores teóricos.

2.1.9. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para el uso de cada tipo de accesorio.

2.1.10. BIBLIOGRAFÍA

- MOTT, R. L., & UNTENER, J. A. (2015). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. MÉXICO: PEARSON EDUCACIÓN.
- SALDARRIAGA V., J. G. (1998). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS*. SANTA FÉ DE BOGOTÁ, COLOMBIA: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.

PRÁCTICA 3

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR VÁLVULAS

RESUMEN

Se determina la pérdida que existe en las tuberías cuando el fluido pasa a través de una válvula.

3.1. TEMA: PÉRDIDAS POR VÁLVULAS

3.1.1. OBJETIVOS

3.1.1.1. Objetivo General:

- Determinar la pérdida de energía que existe cuando el fluido pasa a través de una válvula, utilizando cualquiera de los dos aparatos de medición.

3.1.1.2. Objetivos Específicos:

- Calcular el coeficiente de resistencia K_L y la longitud equivalente L/D para los diferentes accesorios que existen en el sistema y compáralo con la teórica.

3.1.2. MARCO TEÓRICO

Pérdidas de carga por válvulas

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos (las pérdidas mayores) y se llaman pérdidas menores. Aunque por lo general esto es cierto, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores. El flujo a través de válvulas y uniones es muy complejo, y por lo general no es lógico un análisis teórico. En consecuencia, usualmente los fabricantes de

los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental. (CENGEL & CIMBALA, 2006, págs. 347-348)

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida K_L (también llamado coeficiente de resistencia). (CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

Donde h_L es la pérdida de carga irreversible adicional en el sistema de tuberías provocado por la inserción de l accesorio, y se define como $h_L = \Delta P_L/\rho g$.

(CENGEL & CIMBALA, 2006, pág. 348)

Rugosidad absoluta (k_s) para diferentes materiales utilizados en la fabricación de tuberías

Material	k_s (mm)
Vidrio	0.0003
PVC, CPVC	0.0015
Asbesto cemento	0.03
GRP	0.03
Acero	0.046
Hierro forjado	0.06
CCP	0.12
Hierro fundido asfaltado	0.12
Hierro galvanizado	0.15
Arcilla vitrificada	0.15
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Madera cepillada	0.18-0.9
Concreto	0.3-3.0
Acero bridado	0.9-9

Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113

TABLA 10.4 Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, L_e/D

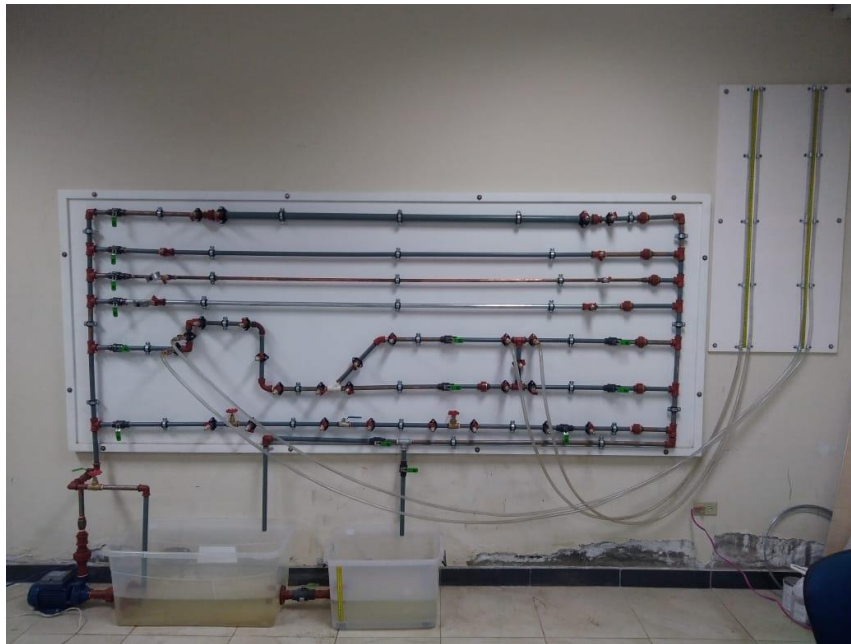
Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
Válvula de globo —totalmente abierta	340
Válvula de ángulo —totalmente abierta	150
Válvula de compuerta —totalmente abierta	8
—abierta $\frac{3}{4}$	35
—abierta $\frac{1}{2}$	160
—abierta $\frac{1}{4}$	900
Válvula de retención —tipo oscilante	100
Válvula de retención —tipo bola	150
Válvula de mariposa —totalmente abierta, 2-8 in	45
—10-14 in	35
—16-24 in	25
Válvula de pie —tipo disco de vástago	420
Válvula de pie —tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doble de retorno cerrado	50
Te estándar —con flujo por la línea principal	20
—con flujo por la ramificación	60

(Reproducido con autorización de Crane Co. *Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe*, artículo técnico núm. 410, 2011. Todos los derechos reservados).

Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 242

3.1.3. MATERIALES Y EQUIPOS

- Sistema de Medición de Pérdidas de Energía



- Manómetros de Glicerina



- Piezómetros de Columna de Agua



3.1.4. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar la pérdida de energía en la tubería con los piezómetros de agua o con los manómetros de glicerina: $\Delta h = h_L = h_2 - h_1$ (cm).

donde

h_L = pérdida de energía debida a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

h_2 = Altura final (cm)

h_1 = Altura inicial (cm)

2. Determinar el tiempo de llenado del volumen indicado (10 lt) en el tanque pequeño para calcular el caudal con $Q = V/t$ (lt/s).

donde

Q = Caudal (lt/s)

V = Volumen (lt)

t = Tiempo (s)

3. Obtener la velocidad del flujo que circula en el sistema con $v = Q/A$ (m/s).

donde

v = Velocidad del flujo (m/s)

Q = Caudal (m³/s)

A = Área interna de la tubería (m²)

4. Calcular el coeficiente de resistencia K_L con la ecuación de pérdidas de carga por accesorios

$$K_L = \frac{h_L}{v^2/(2g)}$$

donde

K_L = Coeficiente de resistencia

h_L = Pérdida de energía debido a la fricción (Nm/N, m, lb-ft o ft)

v = Velocidad del flujo (m/s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

5. Calcular el número de Reynolds utilizando una viscosidad cinemática 1.1098×10^{-6} a una temperatura de 16°C.

$$Re = \frac{v * Di}{V_{cinemática}}$$

donde

Re = Número de Reynolds

v = Velocidad del fluido (m/s)

Di = Diámetro de la tubería (m)

$V_{cinemática}$ = Viscosidad cinemática del fluido (m/s²)

6. Determinar la rugosidad absoluta ε con el Anexo 1. (Fuente: “Hidráulica de Tuberías”, Juan G. Saldarriaga V., pág. 113) para obtener la rugosidad relativa ε/Di . donde Di es el diámetro interno de la tubería (m).

7. Obtener el coeficiente de fricción f con el diagrama de Moody (Anexo)

8. Para determinar la longitud equivalente L/D utilizamos la fórmula de Darcy-Weisbach

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$h_L = \left(f \frac{L}{D}\right) \frac{v^2}{2g_n} = K \frac{v^2}{2g_n}$$

$$K = \left(f \frac{L}{D}\right)$$

$$\frac{L}{D} = \frac{K}{f}$$

donde

$\frac{L}{D}$ = Longitud equivalente

K = Coeficiente de resistencia

f = Coeficiente de fricción

9. Comparar la longitud equivalente L/D calculada con la longitud equivalente teórica de la tabla 10.4 Fuente: “Mecánica de Fluidos”, Robert L. Mott, pág. 24

3.1.7. TABLA DE RESULTADOS

PÉRDIDAS DE ENERGÍA POR ACCESORIOS																
TRAYECTORIA	ACCESORIO	Di (mm)	Vol (lt)	ΔT (s)	Q (lt/s)	v (m/s)	ALTURA		$\Delta h = hL$ (cm)	K (experimental)	Re	ϵ (mm)	ϵ/Di	f (teórico)	L/D (experimental)	L/D (Teórico)
							h1	h2								
6	Válvula de Globo 1/2"	13,78	10,00													
	Válvula de Bola Metálica 1/2"	13,78	10,00													
	Válvula de Compuerta 1/2"	13,78	10,00													
	Válvula de Bola PVC 1/2"	13,78	10,00													

3.1.8. CONCLUSIONES

Se deberá poner conclusiones: indicando los resultados obtenidos, comparando entre los tipos de válvulas y comparando con los valores teóricos.

3.1.9. RECOMENDACIONES

Recomendaciones para el uso de cada tipo de válvula.

3.1.10. BIBLIOGRAFÍA

- MOTT, R. L., & UNTENER, J. A. (2015). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. MÉXICO: PEARSON EDUCACIÓN.
- SALDARRIAGA V., J. G. (1998). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS*. SANTA FÉ DE BOGOTÁ, COLOMBIA: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.

5. ANEXOS

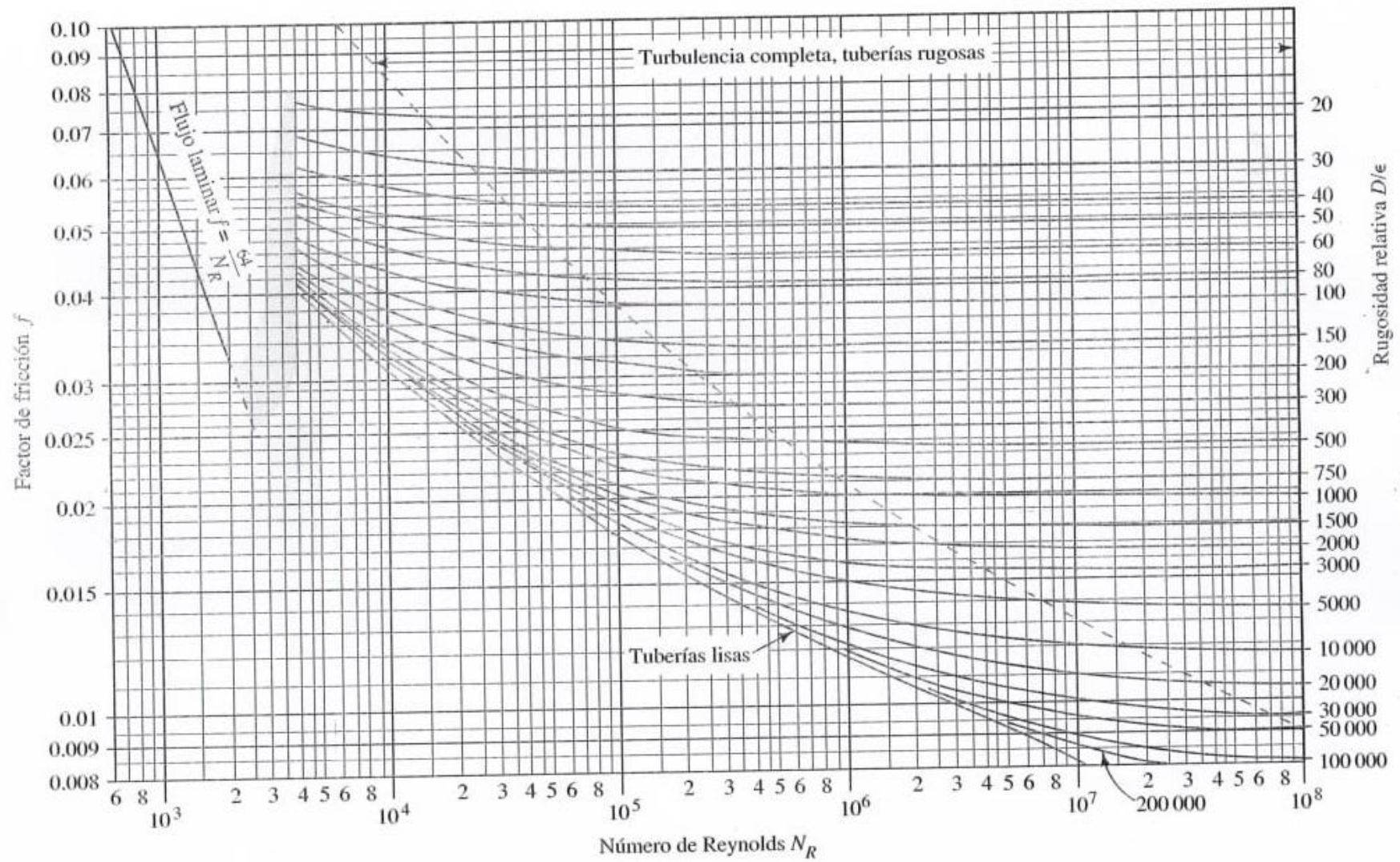
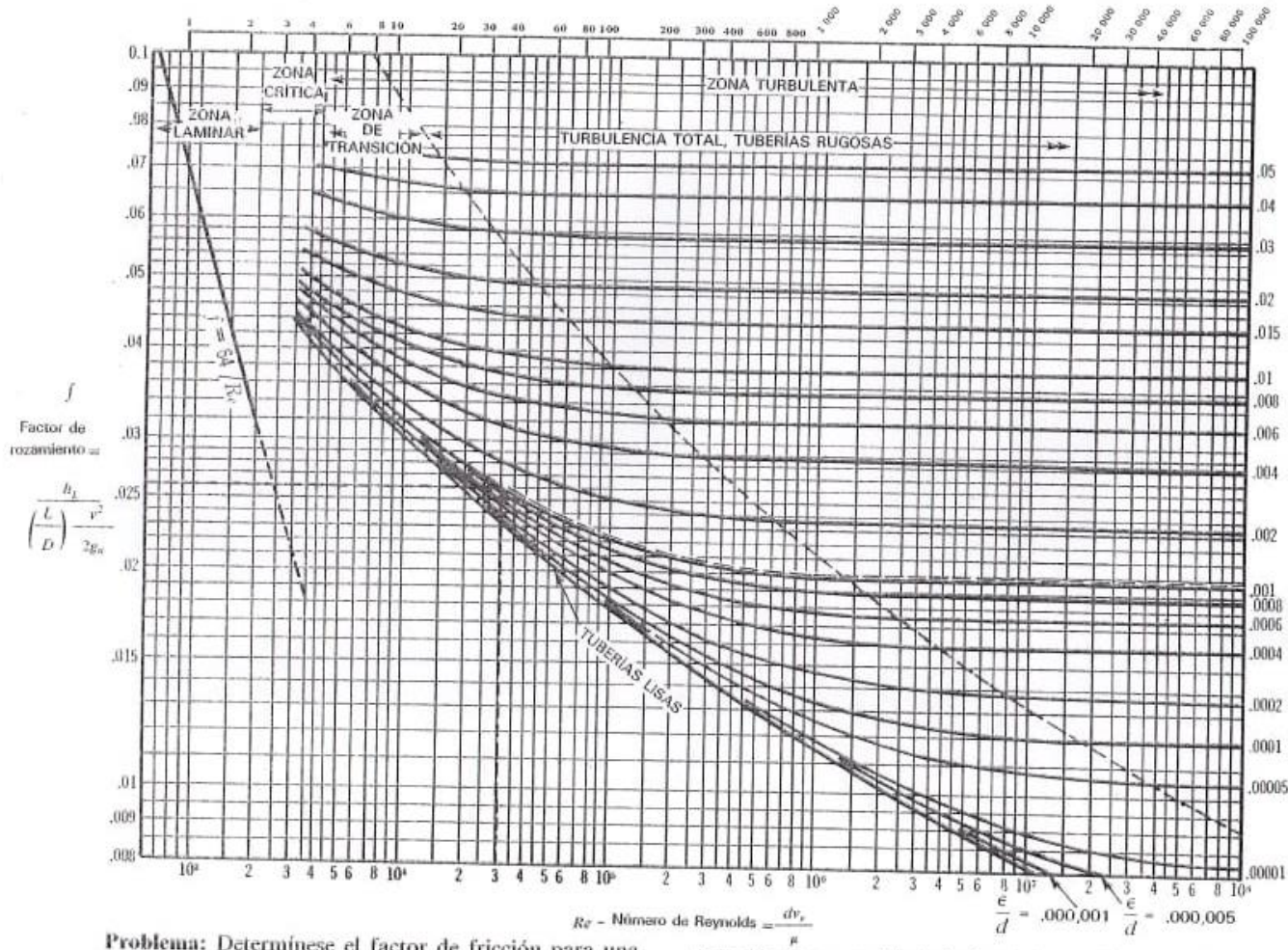


FIGURA 8.7 Diagrama de Moody. (Fuente: Pao, R. H. E. *Fluid Mechanics*, p. 284. Derechos reservados 9c. 1961. Reproducido con autorización del autor).

Valores de (f/v) para agua a 15°C (velocidad en m/s × diámetro en mm)



Problema: Determínese el factor de fricción para una tubería de hierro fundido de 250 mm (10 pulg) de diámetro interno, para un número de Reynolds = 30 000.

Solución: La rugosidad relativa (véase gráfica A-21) es 0.001. Entonces, el factor de fricción (f) es igual a 0.026.

Adaptación de datos extraídos de la referencia 18 de la Bibliografía.

CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Como primera conclusión logramos diseñar y construir un equipo funcional para la determinación de pérdidas de energía ya sean por fricción en tuberías o por accesorios.
- El equipo cumple con las características deseadas, con tuberías de diferentes rugosidades y varios accesorios para medir pérdidas en cada uno.
- Se elaboró la guía de laboratorio para las prácticas que se pueden realizar con este equipo, de forma clara. Indicando paso a paso y cumpliendo con los lineamientos de unificación de manuales de laboratorio establecidos por la Facultad de Ingeniería.
- En relación a las pérdidas por fricción en tuberías podemos concluir que dependen de varios factores como el material de la tubería debido a su rugosidad, el estado en el que se encuentra la misma ya sea nueva o usada ya que al transcurrir el tiempo aumenta su rugosidad y también depende de la longitud, el diámetro y la velocidad del fluido.
- Para el cálculo del coeficiente de fricción f existen varias formas de hacerlo, se puede utilizar las fórmulas o también el diagrama de Moody, nosotros lo hicimos con fórmulas para obtener un valor más exacto.
- Podemos decir que las dos formas de medición son válidas para determinar las pérdidas ya sea usando los piezómetros de agua o los manómetros de glicerina.
- En cuanto a las pérdidas de energía por accesorios podemos decir que dependen del tipo de accesorio ya que cada uno posee distintas características, debido a su coeficiente de resistencia K .

- Las pérdidas de energía ya sean por fricción o por accesorios son directamente proporcionales al caudal ya que si hay un mayor caudal el fluido tendría mayor contacto con la superficie de la tubería y por ende existiría una mayor pérdida.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda a las autoridades de la Facultad de Ingeniería que se modifiquen las mallas microcurriculares de modo que se incluyan las prácticas de laboratorio dentro de las materias afines.
- Del mismo modo se recomienda a las autoridades que se le dé la importancia necesaria al Laboratorio de Hidráulica de modo que sirva como un aporte dentro de la acreditación de la carrera y aumente la competitividad de la carrera de Ingeniería Civil con respecto a las ofertadas en otras universidades.
- Seguir al pie de la letra las indicaciones de la guía para el correcto uso del equipo y así evitar que este se dañe.
- Para el cálculo del coeficiente de fricción f se recomienda usar las fórmulas para obtener un dato más exacto.
- Para un mejor diseño de un sistema con accesorios se recomienda pedir las especificaciones técnicas de cada accesorio al fabricante.
- De igual manera para la selección de una bomba se recomienda darle un factor de seguridad para que esta no trabaje al límite y así evitar su daño.

Bibliografía

- CENGEL, Y. A., & CIMBALA, J. M. (2006). *MECÁNICA DE FLUIDOS: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES*. México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.
- Chávez, H. (02 de 06 de 2017). *Universidad Autónoma de Chihuahua*. Recuperado el 06 de 10 de 2019, de http://fing.uach.mx/facultad/laboratorios/2011/09/20/lab_hidraulica/
- CRANE. (1989). *FLUJO DE FLUIDOS EN VÁLVULAS, ACCESORIOS Y TUBERÍAS*. México: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.
- EcuRed. (s.f.). *Ecu Red*. Obtenido de https://www.ecured.cu/V%C3%A1lvula_de_bola
- enier elevadores*. (s.f.). Recuperado el 06 de 10 de 2019, de <http://www.enier.com/la-historia-de-la-ingenieria-hidraulica-en-pocas-palabras/>
- FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA*. (s.f.). Obtenido de <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/caudal-definicion-y-metodos-de-medicion/>
- Mojica Gutiérrez, C. E., & Arias Medina, G. S. (2014). *MANUAL PRACTICO DE LABORATORIO MECÁNICA DE FLUIDOS E HIDRÁULICA*. Bogotá D.C.
- MOTT, R. L., & UNTENER, J. A. (2015). *MECÁNICA DE FLUIDOS*. MÉXICO: PEARSON EDUCACIÓN.
- SALDARRIAGA V., J. G. (1998). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS*. SANTA FÉ DE BOGOTÁ, COLOMBIA: McGRAW-HILL INTERAMERICANA, S.A.