

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

**PROYECTO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

RICARDO ANDRÉS MEJÍA LUNA
richyamejia@hotmail.com

DIRECTOR: ING. MARIO ANÍBAL ALDÁS LARA
marioanibalaldas@hotmail.com

Quito, agosto 2014

© Escuela Politécnica Nacional (2014)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Ricardo Andrés Mejía Luna, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ricardo Andrés Mejía Luna

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Ricardo Andrés Mejía Luna, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Aldás L.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto PII - DIQ - 002 – 2011 “Diseño y construcción de un equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas para el laboratorio de mecánica de fluidos”, que se ejecuta en el Departamento de Ingeniería Química.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la Lolita, por darme la vida y muchas bendiciones, sobre todo la salud para poder lograrlo.

A las dos mujeres más importantes de mi existencia: M&M, el amor de mi vida, quien me ha dado su amor y su energía y me incita a ser el mejor Ricardinho que puedo ser, no siempre lo logro pero lo intento; y a mi Madre que le ha tocado aguantarme toda la vida y que ha sido mi ejemplo para afrontar los momentos más duros y saberlos sacar adelante, ella es quién me ha hecho el que soy ahora.

A mis hermanos: Leguras, Carito y Chaparrín, que a pesar de cómo soy, han estado conmigo siendo quienes me motivan a reír y me enseñan que la vida vale la pena vivirla.

A mis Abues Chelitos y la Nanita, su ejemplo y su forma de ser me han enseñado que, aunque la familia no se elige a mí me tocó la mejor.

A mi Padre, que me enseñó el valor de la sonrisa.

A Selvi y Santiago, primero porque de ellos llegaron Caro y Julián y segundo porque a pesar de que no soy su hijo me hacen sentir como uno.

A mis Abues Pachoface, con quienes fortalecí un vínculo que por mucho tiempo estuvo distante.

A mis otros hermanos: Los Gabrielinos, Los Mangajos, mis hermanos en armas: Panela, Beto, Burro, Miguicho, Luigi, Sazu, Max, Nuevo, Picheco, Nando, Sr. Darío, Morras, Sancho y el resto; gracias por hacer de la vida una sola carcajada.

A mis mejores amigas: Cata, Chulita, Tamy, May, Shini Wini, Andreita, Catiron, Negrita, Gaby B, Eli, Monita, Maite, Geovi, Chabeli, Meche, Susy, Cris A, Lore A, Lore L, Mu. A mis mejores amigos: Rodri, Manu, Naniko, David, ACVD, Ivancho, Lois, Ricky, Renatinho, Toby, Esteban, Alexis, Don Calitos, Kleberín, Novelero y Don Camilo, porque el camino está lleno de gente que vale la pena.

A mis tíos: Rogo, Manuelito y Pato, simplemente gracias, cada uno sabe lo que significa para mí.

A mis tíos, primos y familia, los Hinojosa-López, los Muñoz-Miño, los Pelagatos, los Techeros, los OG, por su apoyo y energía.

A Diego, Mario y toda la gente de LIFE, por permitirme formar mi futuro profesional mientras termino el académico.

A mis profes de verdad y a los otros, porque como sea que fuere, me ayudaron a superar los obstáculos que se me presentaron.

Y a todos los que me faltan en este pequeño escrito.

DEDICATORIA

A todos los que me preguntaron “¿qué fue la tesis?” y a los hicieron que esta tortura sea llevadera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xxii
INTRODUCCIÓN	xxiii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 Reología de fluidos	1
1.1.1 Reología	1
1.1.2 Parámetros reológicos	1
1.1.3 Clasificación de los fluidos	2
1.1.4 Propiedades de los fluidos	3
1.1.4.1 Densidad	3
1.1.4.2 Tensión Superficial	4
1.1.4.3 Compresibilidad	4
1.1.4.4 Presión de vapor	4
1.1.5 Presión dentro de un fluido	4
1.1.5.1 Ley de Presión de Pascal en un punto	5
1.1.5.2 Variación vertical de la presión en un fluido	7
1.2 Líneas de transporte y accesorios	9
1.2.1 Patrones de flujo	9
1.2.2 Número de Reynolds	10
1.2.3 Ecuación de continuidad	11
1.2.4 Ecuación de Bernoulli	14
1.2.5 Pérdidas friccionales en tuberías	16
1.2.6 Pérdidas friccionales en accesorios	17
1.2.6.1 Pérdidas por expansión súbita de área en la tubería	18
1.2.6.2 Pérdidas por contracción súbita de área en la tubería	20
1.2.6.3 Pérdidas a través de válvulas	21
1.2.6.4 Método de las 2K	21
1.2.6.5 Longitud equivalente	22
1.3 Aparatos de impulsión y sistemas de medición	22
1.3.1 Aparatos de impulsión	22
1.3.2 Sistemas de medición	25
1.3.2.1 Manómetros	25
1.3.2.2 Vertederos	28
1.3.2.3 Venturímetro	31

2. METODOLOGÍA	34
2.1 Diseño de un equipo de prácticas de medidas de pérdidas friccionales y localizadas a nivel de laboratorio	35
2.1.1 Grupos de tuberías	36
2.1.2 Grupos de accesorios	37
2.1.3 Sistema de bombeo	37
2.1.4 Tanque de alimentación y descarga	38
2.1.5 Medidor de flujo	37
2.1.6 Medidor de presión	37
2.2 Construcción e instalación del equipo de prácticas de medidas de pérdidas friccionales y localizadas	38
2.3 Ensayos experimentales y elaboración de diagramas correspondientes al equipo construido	46
2.4 Diseño y elaboración del manual de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas en el equipo construido	48
2.4.1 Esquema del manual de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas en el equipo construido	49
2.4.1.1 Carátula	49
2.4.1.2 Encabezado y pie de página	49
2.4.1.3 Número de Práctica	50
2.4.1.4 Título	50
2.4.1.5 Introducción	50
2.4.1.6 Objetivos	50
2.4.1.7 Circuito empleado	50
2.4.1.8 Procedimiento	50
2.4.1.9 Cálculos	51
2.4.1.10 Referencias	51
2.4.1.11 Anexos	51
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	52
3.1 Diseño del equipo de prácticas de medidas de pérdidas friccionales y localizadas a nivel de laboratorio	52
3.2 Construcción e instalación del equipo de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas	52
3.3 Ensayos experimentales y elaboración de diagramas correspondientes al equipo construido	52
3.3.1 Determinación del coeficiente de descarga del Vertedero en “V”	58

3.3.2	Determinación del coeficiente de fricción, rugosidad relativa y absoluta para las tuberías	61
3.3.3	Determinación del efecto de la velocidad sobre las pérdidas de carga para las tuberías	67
3.3.4	Determinación del coeficiente de resistencia de cada accesorio	73
3.3.5	Determinación del efecto de la velocidad sobre las pérdidas de carga para los accesorios	74
3.3.6	Determinación de la longitud equivalente en cada accesorio	86
3.3.7	Determinación del coeficiente de velocidad del venturímetro	87
3.3.8	Determinación de la variación del coeficiente de velocidad con el número de Reynolds	88
3.3.9	Determinación de la pérdida de carga total en configuración de tuberías en paralelo	88
3.3.10	Determinación del efecto de la velocidad sobre las pérdidas de carga en configuración de tuberías en paralelo	90
3.3.11	Diagramas obtenidos una vez calibrado el vertedero en “V”	91
3.3.12	Discusión de resultados	91
3.4	Manual de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas en el equipo construido	93
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
4.1	Conclusiones	126
4.2	Recomendaciones	126
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
	ANEXOS	132

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 3.1.	Densidad del agua entre 5 °C y 30 °C	54
Tabla 3.2.	Viscosidad del agua entre 5 °C y 30 °C	54
Tabla 3.3.	Parámetros promedios del agua	54
Tabla 3.4.	Coefficientes del vertedero en “V”	59
Tabla 3.5.	Caudales para medidos en el vertedero en “V”	60
Tabla 3.6.	Rugosidades absolutas teóricas de cada tubería	61
Tabla 3.7.	Rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería	66
Tabla 3.8.	Coefficientes de Resistencia para cada accesorio	74
Tabla 3.9.	Longitud equivalente para cada accesorio	86
Tabla 3.10.	Coefficientes del venturímetro	87
Tabla 3.11.	Coefficientes de resistencia de los accesorios	89
Tabla AIII.1.	Mediciones en la tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro	174
Tabla AIII.2.	Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro	175
Tabla AIII.3.	Mediciones en la tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro	177
Tabla AIII.4.	Mediciones en la tubería de Cobre de 1 " de diámetro	178

Tabla AIII.5.	Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado 1 " de diámetro	179
Tabla AIII.6.	Mediciones en la tubería de PVC 1 " de diámetro	179
Tabla AIII.7.	Mediciones en la tubería de Cobre ¾ " de diámetro	180
Tabla AIII.8.	Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado ¾ " de diámetro	181
Tabla AIII.9.	Mediciones en la tubería de PVC ¾ " de diámetro	181
Tabla AIII.10.	Mediciones en la tubería de Cobre ½ " de diámetro	182
Tabla AIII.11.	Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado ½ " de diámetro	182
Tabla AIII.12.	Mediciones en la tubería de PVC ½ " de diámetro	183
Tabla AIII.13.	Mediciones en el codo de 90 ° superior	183
Tabla AIII.14.	Mediciones en el codo de 90 ° inferior	184
Tabla AIII.15.	Mediciones en el codo de 45 °	185
Tabla AIII.16.	Mediciones en la válvula de globo totalmente abierta	186
Tabla AIII.17.	Mediciones en la válvula de globo cerrada ½ vuelta	187
Tabla AIII.18.	Mediciones en la válvula de globo cerrada 1 vuelta	187
Tabla AIII.19.	Mediciones en la válvula de globo cerrada 1 ½ vueltas	188
Tabla AIII.20.	Mediciones en la válvula de globo cerrada 2 vueltas	188
Tabla AIII.21.	Mediciones en válvula de compuerta totalmente abierta	188
Tabla AIII.22.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 1 vuelta	189
Tabla AIII.23.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 2 vueltas	189
Tabla AIII.24.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 3 vueltas	190
Tabla AIII.25.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 4 vueltas	190
Tabla AIII.26.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 5 vueltas	191
Tabla AIII.27.	Mediciones en válvula de compuerta cerrada 6 vueltas	191

Tabla AIII.28.	Mediciones en válvula de bola totalmente abierta	191
Tabla AIII.29.	Mediciones en válvula de bola abierta $\frac{3}{4}$	192
Tabla AIII.30.	Mediciones en válvula de bola abierta $\frac{1}{2}$	192
Tabla AIII.31.	Mediciones en válvula de bola $\frac{1}{4}$ abierta	193
Tabla AIII.32.	Mediciones en la expansión súbita de vidrio con separación de 4 cm	193
Tabla AIII.33.	Mediciones en la expansión súbita de vidrio con separación de 14,5 cm	194
Tabla AIII.34.	Mediciones en la contracción súbita de vidrio con separación de 4 cm	194
Tabla AIII.35.	Mediciones en la contracción súbita de vidrio con separación de 14,5 cm	195
Tabla AIII.36.	Mediciones en las tuberías en paralelo	195
Tabla AIII.37.	Mediciones en el venturímetro	196
Tabla AIV.1.	Rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería	200
Tabla AIV.2.	Coefficientes de Resistencia para cada accesorio	207
Tabla AIV.3.	Longitudes equivalentes para cada accesorio	218
Tabla AIV.4.	Coefficientes del venturímetro	219

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Experimento de la Viscosidad de Newton	1
Figura 1.2.	Clasificación de Fluidos	3
Figura 1.3.	Elemento infinitesimal de fluido	5
Figura 1.4.	Elemento cilíndrico de fluido	8
Figura 1.5.	Determinación de Flujos: a) Flujo laminar, b) Flujo turbulento y c) Flujo de transición	10
Figura 1.6.	Porción de un sistema de distribución de fluido donde existen variaciones de velocidad, presión y elevación	13
Figura 1.7.	Tomas de presión en dos puntos de una misma tubería	16
Figura 1.8.	Diagrama de pérdidas localizadas por expansión súbita: a) Expansión súbita y b) Volumen de control	18
Figura 1.9.	Pérdidas localizadas en una contracción súbita	20
Figura 1.10.	Bomba centrífuga simple	23
Figura 1.11.	Comparación entre curvas de rendimiento: a) Teórica y b) Real	24
Figura 1.12.	Piezómetro	26
Figura 1.13.	Manómetro de tubo en “U”	26
Figura 1.14.	Manómetro de tubo en “U” de presión diferencial	27
Figura 1.15.	Vertederos: a) Rectangular y b) Triangular	29
Figura 1.16.	Vertederos: a) Chorro libre con contracción y b) Chorro libre sin contracción	29
Figura 1.17.	Venturímetro	32
Figura 2.1.	Sección de accesorios que cambian la dirección del flujo	36
Figura 2.2.	Perfiles de soporte	39

Figura 2.3.	Grupo de tuberías de Cu	39
Figura 2.4.	Perforación de tuberías y ubicación de pitones para tomas de presión	40
Figura 2.5.	Tanque de alimentación y descarga	40
Figura 3.1.	Equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas localizadas para el laboratorio de Mecánica de Fluidos	53
Figura 3.2.	Grupos de tuberías de cobre y hierro galvanizado, tanque de alimentación y descarga con vertedero en “V” y vaso de medición	55
Figura 3.3.	Grupo de tuberías de PVC, grupo de accesorios: válvulas, codos, expansión y contracción súbita, Venturi y tuberías en paralelo.	56
Figura 3.4.	Manómetros de 16 válvulas, 8 válvulas y 2 válvulas	56
Figura 3.5.	Equipo de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas	57
Figura 3.6.	Caudal vs. $Altura^{5/2}$ del vertedero en “V” para la determinación del coeficiente de descarga	59
Figura 3.7.	Diagrama de Moody, Tuberías de 1 ¼ " de diámetro	62
Figura 3.8.	Diagrama de Moody, Tuberías de 1 " de diámetro	63
Figura 3.9.	Diagrama de Moody, Tuberías de ¾ " de diámetro	63
Figura 3.10.	Diagrama de Moody, Tubería de ½ " de diámetro	64
Figura 3.11.	Diagrama de Moody, Tuberías de Cobre	65
Figura 3.12.	Diagrama de Moody, Tuberías de Hierro Galvanizado	65
Figura 3.13.	Diagrama de Moody, Tuberías de PVC	66
Figura 3.14.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro	67
Figura 3.15.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro	68
Figura 3.16.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro	68

Figura 3.17.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 " de diámetro	69
Figura 3.18.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 " de diámetro	69
Figura 3.19.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 " de diámetro	70
Figura 3.20.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	70
Figura 3.21.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	71
Figura 3.22.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	71
Figura 3.23.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	72
Figura 3.24.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	72
Figura 3.25.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	73
Figura 3.26.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90 ° superior	75
Figura 3.27.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90 ° inferior	75
Figura 3.28.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 45 °	76
Figura 3.29.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo totalmente abierta	76
Figura 3.30.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta	77
Figura 3.31.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 $\frac{1}{2}$ vueltas	77

Figura 3.32.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 ½ vueltas	78
Figura 3.33.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo 2 vueltas	78
Figura 3.34.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta totalmente abierta	79
Figura 3.35.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 1 vuelta	79
Figura 3.36.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 2 vueltas	80
Figura 3.37.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 3 vueltas	80
Figura 3.38.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 4 vueltas	81
Figura 3.39.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 5 vueltas	81
Figura 3.40.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola totalmente abierta	82
Figura 3.41.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola cerrada ¼ vuelta	82
Figura 3.42.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada ½ vuelta	83
Figura 3.43.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada ¾ vuelta	83
Figura 3.44.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 4 cm	84
Figura 3.45.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 14,5 cm	84

Figura 3.46.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 4 cm	85
Figura 3.47.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 14,5 cm	85
Figura 3.48.	Caudal vs. Altura ^{1/2} en el venturímetro para el cálculo del coeficiente de velocidad	87
Figura 3.49.	Coefficiente de velocidad vs. Número de Reynolds para venturímetro	88
Figura 3.50.	Pérdidas de carga reales vs. Caudal para tuberías en paralelo	89
Figura 3.51.	Pérdidas de carga calculadas vs. Caudal para tuberías en paralelo	89
Figura 3.52.	Pérdidas de carga reales vs cuadrado de la velocidad del fluido para tuberías en paralelo	90
Figura 3.53.	Pérdidas de carga calculadas vs cuadrado de la velocidad del fluido para tuberías en paralelo	91
Figura AII.1.	Diagrama de Moody	133
Figura AII.1.	Componentes del manómetro de 2 válvulas	135
Figura AII.2.	Dimensiones del manómetro de 2 válvulas	136
Figura AII.3.	Vistas del manómetro de 2 válvulas	137
Figura AII.4.	Componentes del manómetro de 8 válvulas	138
Figura AII.5.	Dimensiones del manómetro de 8 válvulas	139
Figura AII.6.	Vistas del manómetro de 8 válvulas	140
Figura AII.7.	Componentes del manómetro de 16 válvulas	141
Figura AII.8.	Dimensiones del manómetro de 16 válvulas	142
Figura AII.9.	Vistas del manómetro de 16 válvulas	143
Figura AII.10.	Dimensiones bomba de alimentación	144
Figura AII.11.	Vistas bomba de alimentación	145

Figura AII.12.	Dimensiones perfil de soporte	146
Figura AII.13.	Vistas perfil de soporte	147
Figura AII.14.	Dimensiones tanque de almacenamiento y descarga	148
Figura AII.15.	Vistas tanque de almacenamiento y descarga	149
Figura AII.16.	Componentes grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo	150
Figura AII.17.	Dimensiones grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo	151
Figura AII.18.	Vistas grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo	152
Figura AII.19.	Dimensiones tubo Venturi	153
Figura AII.20.	Vistas tubo Venturi	154
Figura AII.21.	Dimensiones expansión y contracción súbitas	155
Figura AII.22.	Vistas expansión y contracción súbitas	156
Figura AII.23.	Dimensiones vaso de medición de altura del vertedero	157
Figura AII.24.	Vistas vaso de medición de altura del vertedero	158
Figura AII.25.	Componentes del grupo de válvulas, Venturi, expansión, y contracción súbitas y tuberías en serie	159
Figura AII.26.	Dimensiones del grupo de válvulas, Venturi, expansión, y contracción súbitas y tuberías en serie	160
Figura AII.27.	Vistas del grupo de válvulas, Venturi, expansión y tuberías en serie	161
Figura AII.28.	Componentes del grupo de tuberías de Cu	162
Figura AII.29.	Dimensiones del grupo de tuberías de Cu	163
Figura AII.30.	Vistas del grupo de tuberías de Cu	164
Figura AII.31.	Componentes del grupo de tuberías de HG	165
Figura AII.32.	Dimensiones del grupo de tuberías de HG	166

Figura AII.33.	Vistas del grupo de tuberías de HG	167
Figura AII.34.	Componentes del grupo de tuberías de PVC	168
Figura AII.35.	Dimensiones del grupo de tuberías de PVC	169
Figura AII.36.	Vistas del grupo de tuberías de PVC	170
Figura AII.37.	Componentes equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas	171
Figura AII.38.	Dimensiones equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas	172
Figura AII.39.	Vistas equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas	173
Figura AIV.1.	Diagrama de Moody, Tuberías de 1 ¼ " de diámetro	197
Figura AIV.2.	Diagrama de Moody, Tuberías de 1 " de diámetro	197
Figura AIV.3.	Diagrama de Moody, Tuberías de ¾ " de diámetro	198
Figura AIV.4.	Diagrama de Moody, Tubería de ½ " de diámetro	198
Figura AIV.5.	Diagrama de Moody, Tuberías de Cobre	199
Figura AIV.6.	Diagrama de Moody, Tubería de Hierro Galvanizado	199
Figura AIV.7.	Diagrama de Moody, Tubería de PVC	200
Figura AIV.8.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro	201
Figura AIV.9.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro	201
Figura AIV.10.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro	202
Figura AIV.11.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido tubería para de Cobre de 1 " de diámetro	202
Figura AIV.12.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 " de diámetro	203
Figura AIV.13.	Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 " de diámetro	203

Figura AIV.14. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	204
Figura AIV.15. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	204
Figura AIV.16. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro	205
Figura AIV.17. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	205
Figura AIV.18. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	206
Figura AIV.19. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro	206
Figura AIV.20. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90° superior	207
Figura AIV.21. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90° inferior	208
Figura AIV.22. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 45°	208
Figura AIV.23. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo totalmente abierta	209
Figura AIV.24. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta	209
Figura AIV.25. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 vuelta	210
Figura AIV.26. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada $1\frac{1}{2}$ vueltas	210
Figura AIV.27. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo 2 vueltas	211

Figura AIV.28. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta totalmente abierta	211
Figura AIV.29. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 1 vuelta	212
Figura AIV.30. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 2 vueltas	212
Figura AIV.31. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 3 vueltas	213
Figura AIV.32. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 4 vueltas	213
Figura AIV.33. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 5 vueltas	214
Figura AIV.34. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola totalmente abierta	214
Figura AIV.35. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola cerrada $\frac{1}{4}$ vuelta	215
Figura AIV.36. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta	215
Figura AIV.37. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada $\frac{3}{4}$ vuelta	216
Figura AIV.38. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 4 cm	216
Figura AIV.39. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 14,5 cm	217
Figura AIV.40. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 4 cm	217
Figura AIV.41. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 14,5 cm	218

Figura AIV.42. Caudal vs. Altura ^{1/2} en el venturímetro para el cálculo del coeficiente de descarga	219
Figura AIV.43. Coeficiente de velocidad vs. Número de Reynolds para venturímetro	220
Figura AIV.44. Pérdidas de carga calculadas vs. caudal para tuberías en paralelo	220
Figura AIV.45. Pérdidas de carga reales vs. caudal para tuberías en paralelo	221
Figura AIV.46. Pérdidas de carga reales vs. cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías en paralelo	221
Figura AIV.47. Pérdidas de carga calculadas vs. cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías en paralelo	222

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Diagrama de Moody	133
ANEXO II	
Diagramas del equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas para el laboratorio de mecánica de fluidos	134
ANEXO III	
Datos obtenidos en las pruebas experimentales	174
ANEXO IV	
Diagramas experimentales de tuberías y accesorios utilizando el vertedero en "V" calibrado	197

RESUMEN

Este proyecto tuvo como objetivo diseñar y construir un equipo de laboratorio para determinar pérdidas friccionales y localizadas y elaborar su manual de prácticas con el fin de complementar los conocimientos teóricos impartidos en la cátedra de Mecánica de Fluidos con la parte experimental.

Se diseñó el equipo utilizando tres tipos de materiales para tuberías (cobre, hierro galvanizado y PVC), cuatro dimensiones de tuberías ($\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ", 1 " y 1 $\frac{1}{4}$ " de diámetro), y pérdidas localizadas usando los siguientes accesorios: codos de 90 ° y 45 °, expansión y contracción súbitas, venturímetro, válvula de globo, válvula de compuerta, válvula de bola, una configuración de tuberías en paralelo, un sistema de bombeo (bomba centrífuga de 15 HP) y un tanque de alimentación y descarga (1 m³ de acero pintado con esmalte anticorrosivo) con un vertedero en "V" como su medidor de flujo. Para la obtención de datos se dispondrá de manómetros de vidrio de "U" invertida con válvulas de tapón cónico que permitirán la entrada sincronizada del fluido al interior del manómetro para mayor precisión y comodidad de la experimentación.

Una vez seleccionados los materiales para la construcción del equipo, se destinó el área para su instalación en la planta baja del edificio de Química-Electrónica, se cimentaron los perfiles que soportarán el equipo y el sistema de bombeo, con la ayuda del personal que se encarga de los proyectos de construcción en la Escuela Politécnica Nacional y se provisionó de los suministros de agua y electricidad.

Se acoplaron los diferentes conjuntos de piezas de acuerdo con el diseño previamente concebido, se realizaron pruebas preliminares de ajuste físico y rango de funcionamiento, a cada tubería y accesorio se les ensamblaron tomas de presión donde se acoplaron mangueras de plástico que desembocaron en manómetros de medición que determinaron las caídas de presión mientras se variaron los flujos.

Se realizaron los diagramas de Moody y se determinaron los coeficientes de resistencia a través de accesorios correspondientes al equipo construido, se calibró el vertedero en "V" que reemplazó las mediciones de caudal tradicionales, es decir, sustituyó el uso de un balde con graduaciones volumétricas y el cronómetro.

Finalmente, se redactó el manual de prácticas de laboratorio donde se exponen las pruebas a realizarse en el equipo y los resultados que deben ser obtenidos.

INTRODUCCIÓN

El entendimiento de las propiedades de los fluidos aplicado a termodinámica y mecánica y su debida experimentación ha desarrollado la ingeniería de mecánica de fluidos (Streeter, 2000).

Entre las principales aplicaciones de la mecánica de fluidos se encuentran los sistemas de almacenamiento y distribución de fluidos en canales abiertos y cerrados (Mott, 2006), esto abarca un sin fin de procesos. Dependiendo de la cantidad de flujo a ser transportado, de las propiedades físico-químicas del fluido y las condiciones de flujo depende el sistema de transporte más adecuado.

El objetivo de este proyecto de titulación es implementar un equipo para realizar prácticas de laboratorio de Mecánica de Fluidos y dar paso al diseño y construcción de todos los equipos necesarios para la implementación de un laboratorio donde se lleven a cabo proyectos de investigación y la obtención de datos permitirán el diseño y evaluación de otros sistemas de conducción de fluidos en la industria.

El estudio previo de las propiedades de un fluido y sus condiciones de flujo ayuda al diseño, implementación y optimización de su sistema de transporte.

La construcción de un equipo de pérdidas friccionales y localizadas permitirá:

- Coadyuvar a la asimilación de los conocimientos y conceptos desarrollados en la clase de teoría.
- Complementar y contrastar la experiencia teórica con la experimental.
- Desarrollar las habilidades de planeación, diseño, ejecución y análisis de experimentos para la resolución de problemas.
- Reforzar las habilidades de comunicación escrita (Soria, 2003).

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 REOLOGÍA DE FLUIDOS

1.1.1 REOLOGÍA

La reología estudia la relación entre los esfuerzos externos aplicados en un fluido y su deformación continua debida a una fuerza cortante, entendiéndose por fluido un material deformable que se desliza en capas una sobre otra y que seguirá deformándose hasta que se retire la fuerza cortante, siendo líquidos y gases los principales fluidos (Méndez, 2009).

1.1.2 PARÁMETROS REOLÓGICOS

Se considera un fluido en reposo confinado entre dos planos paralelos de área A , separados por una distancia y . Si se mantiene estática la placa inferior y se aplica una fuerza constante sobre la placa superior, ésta alcanza una velocidad v , después de cierto tiempo el perfil de velocidades alcanza el estado estacionario, descrita en la Figura 1.1. (Méndez, 2009).

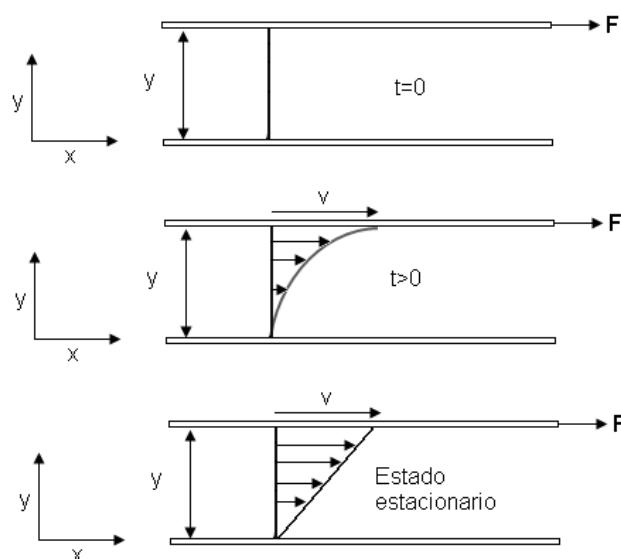


Figura 1.1. Perfil de velocidades en el experimento de viscosidad de Newton

De aquí se obtiene la Ley de Viscosidad de Newton como se indica en la ecuación [1.1], ésta relaciona el esfuerzo de corte con el gradiente de velocidad impuesto sobre un fluido y el factor de proporcionalidad que indica la resistencia a la deformación es la viscosidad (Streeter, 2000).

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad [1.1]$$

Dónde:

τ : Esfuerzo de corte

μ : Viscosidad

$\frac{dv}{dy}$: Gradiente de velocidad de corte

1.1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS

Los fluidos se clasifican en dos grupos newtonianos y no newtonianos. Los fluidos newtonianos cumplen con la ley de Viscosidad de Newton, es decir poseen resistencia a la deformación constante mientras que la viscosidad en los fluidos no newtonianos no es constante, se visualizan en la Figura 1.2.

Los fluidos no newtonianos se dividen a su vez en:

- **Pseudoplásticos:** Su viscosidad disminuye cuando aumenta la velocidad de corte. Ejemplos: tinta de impresión, mermelada, etc.
- **Plásticos:** Comportamiento similar a los pseudoplásticos, pero es necesario aplicar un esfuerzo de corte mínimo para que empiece su deformación. Ejemplos: Pasta dental, pomadas, etc.
- **Tixotrópicos:** La viscosidad disminuye dependiendo de la velocidad de corte y el tiempo, tiende a solidificarse cuando se encuentra en reposo. Ejemplos: Pintura, mayonesa, salsa de tomate.

- **Dilatantes:** Aumento de la viscosidad con el esfuerzo de corte. Ejemplos: Arena húmeda, almidón en agua, etc.
- **Reopécticos:** La viscosidad aumenta dependiendo del tiempo que se aplique el esfuerzo de corte. Ejemplos: Lubricantes (Blasco, 2006).

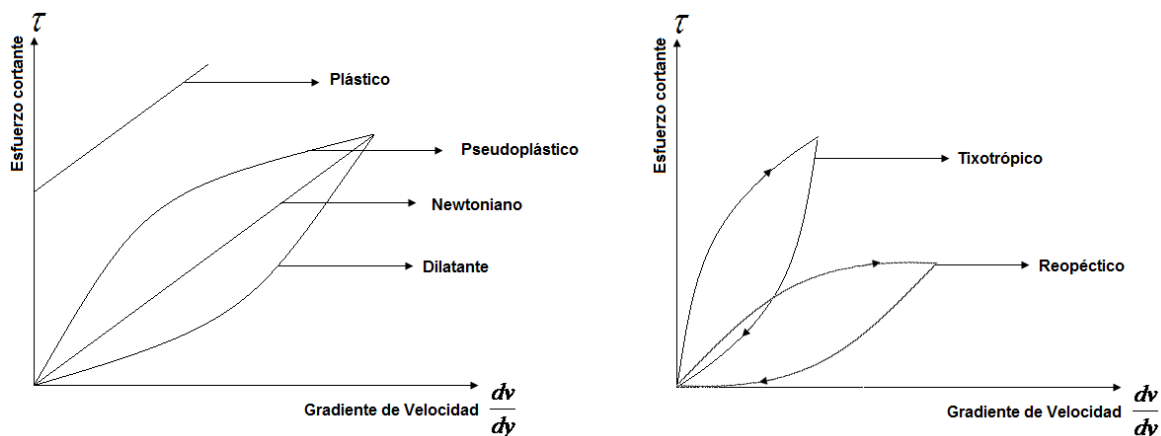


Figura 1.2. Clasificación de fluidos Newtonianos y no Newtonianos

1.1.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

1.1.4.1 Densidad

Definida como la cantidad de materia contenida en un volumen, expresada de tres diferentes maneras:

- **Densidad Másica (ρ):** Masa de sustancia por unidad de volumen
- **Peso Específico (γ):** Peso por unidad de volumen o la fuerza que ejerce la gravedad sobre una unidad de volumen de sustancia.
- **Densidad relativa (σ):** Relación entre la masa densidad másica de una sustancia sobre la densidad másica de una sustancia estándar, para sólidos y líquidos normalmente es el agua a 4 °C a presión atmosférica (Sleight, 2001).

1.1.4.2 Tensión Superficial

Propiedad originada por las fuerzas de atracción entre las moléculas, manifestándose en la interfase líquido-gas. Es la fuerza de tensión por unidad de longitud en la superficie libre del líquido que se encuentra en un estado donde cada sección hala de otra como si una película elástica estuviera estirada (Nakayama, 2000; Potter, 2002).

1.1.4.3 Compresibilidad

Aumento de densidad debido a un incremento de presión a temperatura constante. Debido a que es necesaria una presión extremadamente grande para lograr un incremento en la densidad del agua en 1 % (aproximadamente 210 atm), se asume frecuentemente que los líquidos son incompresibles (Nakayama, 2000; Potter, 2002).

1.1.4.4 Presión de vapor

Cuando los líquidos se evaporan las moléculas de vapor ejercen una presión parcial sobre la superficie. Si el líquido está contenido en un recipiente, la evaporación termina cuando se alcanza el equilibrio entre el estado líquido y el gaseoso de la misma sustancia. La presión producida por las moléculas de vapor sobre la superficie del líquido es lo que se conoce como presión de vapor (Potter, 2002; Streeter, 2000).

1.1.5 PRESIÓN DENTRO DE UN FLUIDO

El fluido ejerce una fuerza normal a cualquier límite físico que se encuentre en contacto con él, esto significa una fuerza aplicada sobre un área donde sea aplicada llamada presión y es el único esfuerzo que existe cuando un fluido se encuentra en reposo (Potter, 2002; Sleigh, 2001).

1.1.5.1 Ley de Presión de Pascal en un punto

Es la prueba de que la presión actúa igual en todas las direcciones en un punto; para esto se considera un elemento infinitesimal de fluido en forma de cuña, mostrado en la Figura 1.3., se aplican tres diferentes presiones: P_y en la dirección y , P_x en la dirección x y P_s en la dirección normal a la superficie inclinada.

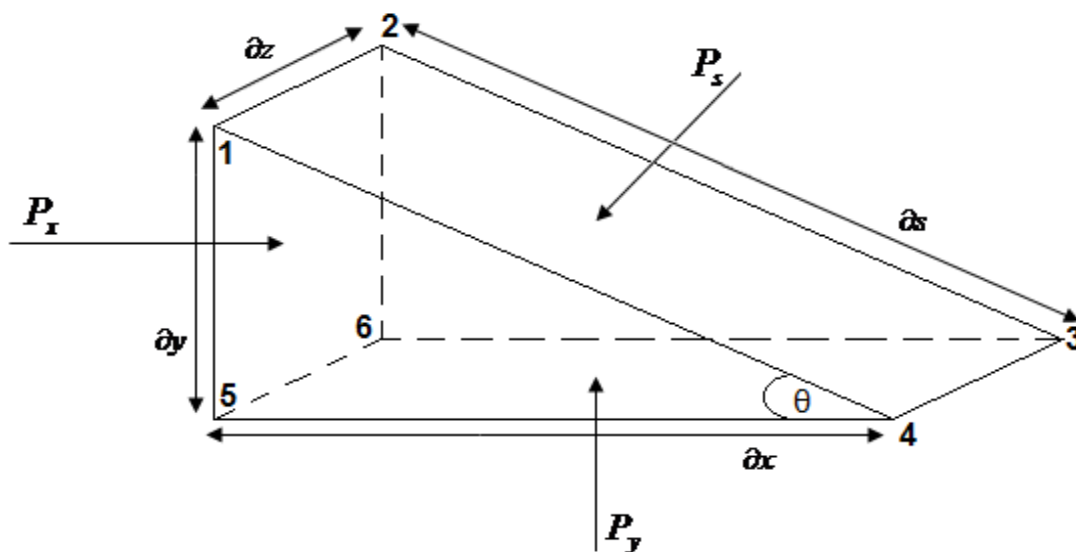


Figura 1.3. Elemento infinitesimal de un fluido

El fluido se encuentra en reposo, por ende en equilibrio, la suma de las fuerzas en cualquier dirección es cero, es por esto que no se consideran las fuerzas aplicadas en las caras externas en la dirección z .

Se realiza la sumatoria de las fuerzas en la dirección x , la fuerza ejercida por P_x se expresa en la ecuación [1.2],

$$F_x = P_x \times A_{1256} = P_x \partial x \partial y \quad [1.2]$$

Se determina el componente de la fuerza P_s en la dirección x , indicado en la ecuación [1.3], y luego de ser desarrollada se obtiene la ecuación [1.4]

$$F_{sx} = -P_s \times A_{1234} \times \sin(\theta) \quad [1.3]$$

$$F_{sx} = -P_s \partial s \partial z \frac{\partial y}{\partial s}$$

$$F_x = -P_s \partial y \partial z \quad [1.4]$$

Se determina el equilibrio de las fuerzas en la dirección x, y se obtiene la ecuación [1.6]:

$$F_x + F_{sx} = 0 \quad [1.5]$$

$$P_x \partial x \partial y + (-P_s \partial y \partial z) = 0 \quad [1.6]$$

Debido a que se trata de un elemento infinitesimal, las componentes dimensionales en cualquier dirección son despreciables y se obtiene que la presión en la dirección x es igual a la presión en la dirección s, como se indica en la ecuación [1.7]:

$$P_x = P_s \quad [1.7]$$

Igualmente se realiza la sumatoria de las fuerzas en la dirección y, la fuerza ejercida por P_y se expresa en la ecuación [1.8]:

$$F_y = P_y \times A_{3456} = P_y \partial x \partial z \quad [1.8]$$

Se determina el componente de la fuerza P_s en la dirección y, indicado en la ecuación [1.9], y luego de ser desarrollada se obtiene la ecuación [1.10]

$$F_{sy} = -P_s \times A_{1234} \times \cos(\theta) \quad [1.9]$$

$$F_{sy} = -P_s \partial s \partial z \frac{\partial x}{\partial s}$$

$$F_{sy} = -P_s \partial x \partial z \quad [1.10]$$

Adicionalmente se determina la fuerza debida a la gravedad, expresada en la ecuación [1.11] y luego de desarrollarla se obtiene la ecuación [1.12]

$$W = -\delta g \times V_{123456} \quad [1.11]$$

$$W = -\delta g \times \frac{1}{2} \partial x \partial y \partial z \quad [1.12]$$

Se determina el equilibrio de las fuerzas en la dirección x, y se obtiene la ecuación [1.14] luego de asumir el elemento infinitesimal:

$$F_y + F_{sy} + W = 0 \quad [1.13]$$

$$P_y \partial x \partial y + (-P_s \partial x \partial z) + \left(\frac{1}{2} \partial x \partial y \partial z \right) = 0$$

$$P_y = P_s \quad [1.14]$$

Si se igualan las ecuaciones [1.7] y [1.14], se obtiene la ecuación [1.15]:

$$P_x = P_y = P_s \quad [1.15]$$

Donde queda demostrado que la presión en cualquier punto es igual en todas sus direcciones (Potter, 2002; Sleigh, 2001).

1.1.5.2 Variación vertical de la presión en un fluido

En la Figura 1.4. se observa un elemento cilíndrico de fluido de área de sección transversal constante, A, rodeado del mismo fluido de densidad másica, ρ . El fluido se encuentra en equilibrio y por tanto la sumatoria de fuerzas en y es cero. En el tope del cilindro se tiene una presión P_1 a nivel z_1 y en la base se tiene una presión P_2 a nivel z_2 .

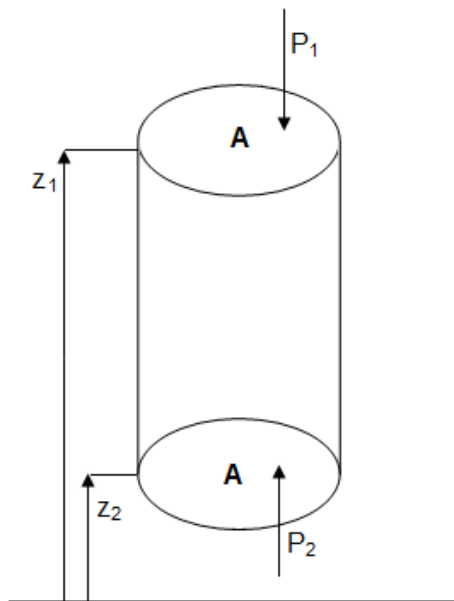


Figura 1.4. Elemento cilíndrico de fluido de área de sección trasversal constante, A

Se determina la fuerza ejercida por P_1 , expresada en la ecuación [1.16]

$$F_1 = -P_1 A \quad [1.16]$$

Así mismo, se determina la fuerza ejercida por P_2 , expresada en la ecuación [1.17]

$$F_2 = P_2 A \quad [1.17]$$

La fuerza debida a la gravedad se expresa en la ecuación [1.18], una vez desarrollada se obtiene la ecuación [1.19] que representa la fuerza debida a la gravedad en función la altura, z.

$$W = -mg \quad [1.18]$$

$$W = -\delta V g$$

$$W = -\delta A \int_{z_1}^{z_2} \rho g \, dz \quad [1.19]$$

Se determina el equilibrio en la dirección z , como se indica en la ecuación [1.20]:

$$F_1 + F_2 + W = 0 \quad [1.20]$$

$$-P_1A + P_2A - \delta A(z_1 - z_2)g = 0$$

$$P_2 - P_1 = \delta g(z_1 - z_2)$$

$$P_2 - P_1 = \gamma(z_1 - z_2) \quad [1.21]$$

Luego de desarrollarla, se obtiene la ecuación [1.21], que expresa la diferencia de presión en función del peso específico y la diferencia de altura, entonces se dice que la presión disminuye al subir la posición en un fluido y aumenta al bajar (Potter, 2002; Sleigh, 2001).

1.2 LÍNEAS DE TRANSPORTE Y ACCESORIOS

Impulsar un fluido a través de un sistema de tuberías es la forma más usual para trasladarlo de un lugar a otro, siendo las más utilizadas las tuberías de sección circular, puesto que ofrecen mayor sección transversal que el resto de formas geométricas del mismo perímetro exterior además de mayor resistencia estructural. (Crane, 1992).

1.2.1 PATRONES DE FLUJO

Osborne Reynolds estudió los patrones de flujo utilizando un dispositivo que conducía colorante en una tubería de vidrio por la que circulaba agua y observó que cuando la velocidad de flujo del agua alcanzaba cierto valor, la línea coloreada de repente se volvía turbulenta, descrita en la Figura 1.5. y así los llamó: a) flujo laminar y b) turbulento respectivamente y velocidad crítica a la velocidad donde el flujo laminar se transformaba en turbulento: c) flujo de transición (Nakayama, 2000).

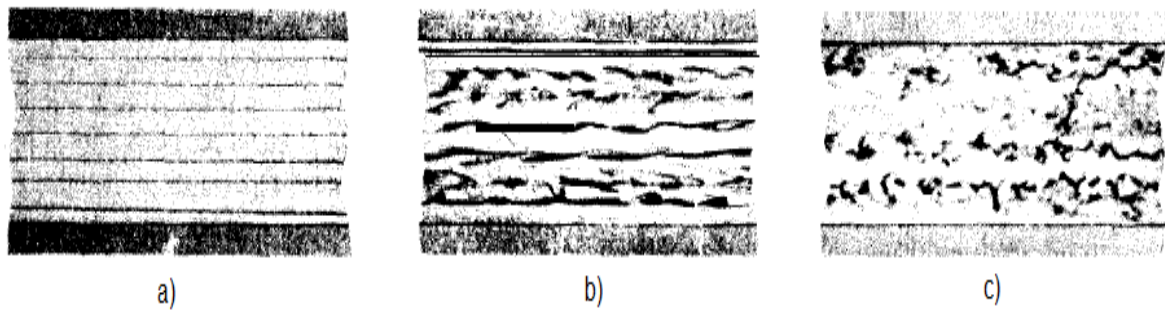


Figura 1.5. Determinación de patrones de flujos: a) Flujo laminar, b) Flujo turbulento y c) Flujo de transición (Crane 1992)

1.2.2 NÚMERO DE REYNOLDS

Reynolds realizó sus experimentos usando tubos de vidrio de diámetros diferentes y variando la temperatura del agua y descubrió que un flujo laminar se tornaba turbulento cuando el valor de una cantidad adimensional formada por densidad, velocidad lineal del fluido, viscosidad y diámetro interno de la tubería alcanzaba un valor definido sin importar el valor individual de cada propiedad, expresada en la ecuación [1.22]; a esta cantidad adimensional se la conoce como el Número de Reynolds (Nakayama, 2000).

$$R = \frac{\delta D v}{\mu} \quad [1.22]$$

Dónde:

- δ : Densidad
- D : Diámetro interno de la tubería
- v : Velocidad lineal del fluido
- μ : Viscosidad

Se demostraba un flujo laminar para pequeños caudales donde la corriente de tinta se movilizaba en línea recta a lo largo de la tubería, pero a medida que el caudal aumentaba, la corriente empezaba a difundirse en el tubo demostrándose

que el número de Reynolds aumentaba debido al aumento proporcional de la velocidad con el caudal y manteniéndose constantes el diámetro, la densidad y la viscosidad (Streeter, 2000).

Reynolds encontró que un flujo turbulento se tornaba nuevamente en laminar al disminuir la velocidad hasta alcanzar un $R=2\ 000$, éste se conoce como el número crítico inferior de Reynolds. El flujo cambiará de laminar a turbulento en el rango de número de Reynolds de 2 000 a 4 000 (siendo éste el número crítico superior de Reynolds) a este rango se lo conoce como *zona de transición o zona crítica* donde coexisten ambos tipos de flujos, debido a que las instalaciones de tuberías normalmente presentan irregularidades y no se toman las precauciones adecuadas para evitar vibraciones y reposo del fluido (McCabe, 1991; Pardo, 2000).

Las situaciones de flujo turbulento son las más comunes en la práctica de la ingeniería. En el flujo turbulento las partículas de fluido (pequeñas masas molares) se mueven en trayectorias arremolinadas muy irregulares, causando intercambios de momentum desde una porción de fluido a otra, pero en una escala mucho más grande y las deducciones matemáticas son complejas, de ahí que se realicen pruebas experimentales que permitan determinar las relaciones entre variables (Streeter, 2000).

1.2.3 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

La cantidad de fluido que atraviesa un sistema por unidad de tiempo puede ser expresada de dos maneras:

- **Flujo volumétrico o caudal (Q):** Volumen de fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo, expresado en la ecuación [1.23]:

$$Q = \frac{V}{t} \quad [1.23]$$

Donde:

V : Volumen de fluido que atraviesa una sección

t : Unidad de tiempo

- **Flujo másico (\dot{m}):** Masa de fluido que atraviesa una sección por unidad de tiempo, expresado en la ecuación [1.24]:

$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad [1.24]$$

Donde:

m : Masa de fluido que atraviesa una sección

t : Unidad de tiempo

Siendo el caudal el más importante y utilizado en fluidos incompresibles el flujo volumétrico o caudal mostrada en la ecuación [1.23] pero presentada en de forma que en las variables sean incluya la geometría de la tubería, expresado en la ecuación [1.26]:

$$Q = \frac{V}{t} \quad [1.25]$$

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

$$Q = Av \quad [1.26]$$

Donde:

A : Área de la sección transversal de la tubería

v : Velocidad lineal del fluido

Si considera la Figura 1.6. como un conducto cerrado, donde el fluido circula con un caudal constante entre dos puntos de secciones diferentes, esto es un flujo estable.

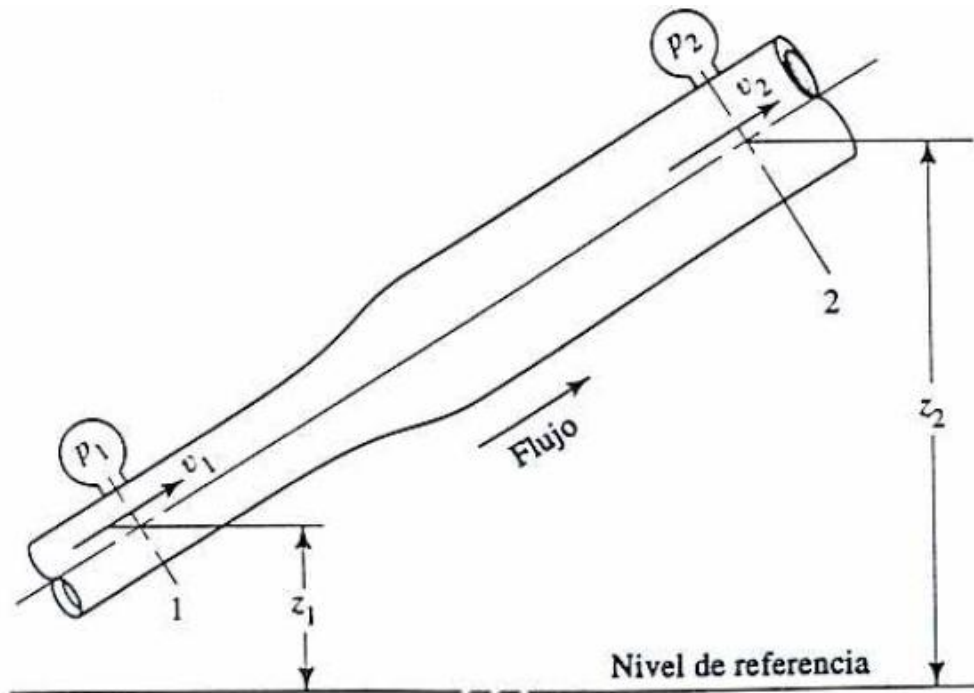


Figura 1.6. Porción de un sistema de distribución de fluido donde existen variaciones de velocidad, presión y elevación
(Mott, 2006)

Si se expresa el flujo que circula en términos de flujo másico, como se indica en la ecuación [1.27] y se desarrolla para expresarse en función de su densidad, velocidad y área de sección transversal, como se indica en la ecuación [1.28]:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad [1.27]$$

$$\delta_1 A_1 v_1 = \delta_2 A_2 v_2 \quad [1.28]$$

Si el fluido que circula por la tubería es incompresible quiere decir que la densidad en ambos puntos es la misma, por ende:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad [1.29]$$

$$Q_1 = Q_2 \quad [1.30]$$

La ecuación de continuidad [1.30] dice que para un flujo estable, el caudal es el mismo en cualquier sección (Mott, 2006).

1.2.4 ECUACIÓN DE BERNOULLI

Existen formas de energía que se deben tomar en cuenta en un flujo en tuberías, como se ilustra en la Figura 1.6., el punto 1 posee cierta velocidad, presión y elevación, diferentes a las del punto 2; estas formas de energía son las siguientes:

- **Energía cinética (EC):** Forma de energía debido a la velocidad del fluido, y se expresa mediante la ecuación [1.31]:

$$EC = \frac{wv^2}{2g} \quad [1.31]$$

- **Energía Potencial (EP):** Forma de energía debido a la elevación del fluido en un punto del sistema, expresada por la ecuación [1.32]:

$$EP = wz \quad [1.32]$$

- **Energía de flujo (EF):** Cantidad de trabajo que se necesita para mover un elemento de fluido a través de una sección contra la presión, indicada por la ecuación [1.33] y desarrollada hasta expresarse en términos de presión, peso del fluido y su peso específico como indica la ecuación [1.34]

$$EF = PAd \quad [1.33]$$

$$EF = PV$$

$$EF = \frac{wP}{\gamma} \quad [1.34]$$

Entonces la energía total del fluido es la suma de todas las energías individuales.

$$E = EC + EP + EF \quad [1.35]$$

$$E = \frac{wv^2}{2g} + wz + \frac{wP}{\gamma} \quad [1.36]$$

Si se supone que el fluido se mueve del punto 1 al punto 2 y si no se añade o se extrae energía, de acuerdo con el principio de conservación de energía, la energía en ambos puntos es la misma, como se indica en la ecuación [1.37]:

$$E_1 = E_2 \quad [1.37]$$

$$\frac{wv_1^2}{2g} + wz_1 + \frac{wP_1}{\gamma} = \frac{wv_2^2}{2g} + wz_2 + \frac{wP_2}{\gamma}$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \quad [1.38]$$

Obteniéndose así la ecuación de Bernoulli, válida únicamente para flujos incompresibles, como se muestra en la ecuación [1.38] (Mott, 2006).

Si al sistema se añade o se extrae energía se expresa en términos de carga, es decir energía por unidad de peso:

- h_B : Energía que entrega un dispositivo mecánico al fluido, generalmente una bomba y se denomina carga total sobre la bomba.
- h_R : Energía que extrae un dispositivo mecánico del fluido, generalmente una turbina.
- h_f : Pérdidas de energía del sistema debido a fricción en tuberías y/o accesorios (Mott, 2006).

Entonces la ecuación de Bernoulli, expresada en la ecuación [1.39], se transforma en la ecuación general de la energía, al agregar estas expresiones:

$$\frac{v_1^2}{2g} + z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + h_B - h_R - h_f = \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + \frac{P_2}{\gamma} \quad [1.39]$$

1.2.5 PÉRDIDAS FRICCIONALES EN TUBERÍAS

En una línea de tuberías existen pérdidas energéticas debido al rozamiento que existe entre las partículas del fluido traducidas en una pérdida de presión en el sentido del flujo. Considerando la Figura 1.7. donde se toma la presión en dos puntos de una tubería la presión estática en el punto 1 sería mayor que en el punto 2.

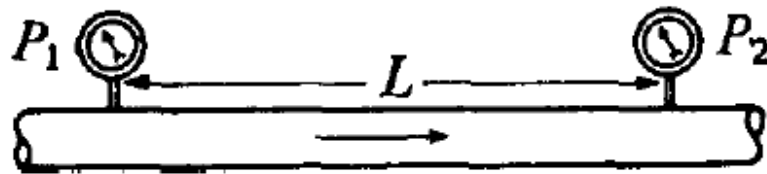


Figura 1.7. Tomas de presión en dos puntos de una misma tubería
(Crane, 1992)

La ecuación general de la pérdida de presión, conocida ecuación de Darcy que se muestra en la ecuación [1.40] tiene aplicación para flujos laminares y turbulentos de cualquier fluido en una tubería.

$$h_f = f \frac{v_2^2}{2g} \frac{L}{D} \quad [1.40]$$

Dónde:

f : Factor de fricción

Con esta ecuación se obtiene las pérdidas de presión debidas al rozamiento y se aplica a una tubería de diámetro constante por la que pasa un fluido cuya

densidad permanece constante, a través de una tubería recta, ya sea horizontal, vertical o inclinada. La ecuación de Darcy puede deducirse por análisis adimensional con la excepción del factor de fricción, que debe ser determinado experimentalmente.

El factor de fricción para condiciones de flujo laminar es función del número de Reynolds, expresada en la ecuación [1.41]:

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad [1.41]$$

$$f = \frac{64\mu}{Dv\delta} \quad [1.42]$$

Para el flujo turbulento, el factor de fricción es también función de la rugosidad de las paredes y el diámetro de la tubería. La rugosidad es independiente del diámetro de la tubería y por ende tiene más efecto en las tuberías de diámetros pequeños y en consecuencia mayor coeficiente de fricción (Crane, 1992).

Los tubos de vidrio, cobre, aluminio, plástico o latón son consideradas tuberías lisas.

Existe un diagrama conocido como el diagrama de Moody, mostrado en el ANEXO I, donde se presentan datos experimentales que relacionan el factor de fricción con el número de Reynolds para una amplia gama de materiales, diámetros y espesores de pared con un flujo desarrollado (Potter, 2002).

1.2.6 PÉRDIDAS FRICCIONALES EN ACCESORIOS

En una línea de tuberías en adición a las pérdidas friccionales que surgen por la rugosidad de la tubería, la longitud que se desplaza el fluido, el diámetro, la velocidad de circulación y que dependen del material de que está construida la tubería, hay pérdidas friccionales, también llamadas pérdidas localizadas o secundarias, producidas por (Nakayama, 2000):

- Súbito cambio de área en la tubería.
- Obstrucciones en el tubo (válvulas, etc.).
- Cambio de dirección en la circulación.
- Ramificaciones y uniones de tuberías.

Para válvulas y accesorios, se emplea la ecuación de Darcy y en lugar del factor de fricción se emplea el coeficiente de resistencia [1.43], que en teoría es constante para todas las medidas de cierto diseño o línea de válvulas o accesorios, si todas las medidas fueran geoméricamente similares; y la longitud equivalente de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que el obstáculo, en las mismas condiciones de flujo (Crane, 1992).

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} \quad [1.43]$$

1.2.6.1 Pérdidas por expansión súbita de área en la tubería

Cuando un fluido pasa de una tubería de área pequeña a otra de mayores dimensiones, su velocidad disminuye de manera violenta y esto genera turbulencia y por ende pérdidas energéticas, ilustrado en la Figura 1.8.

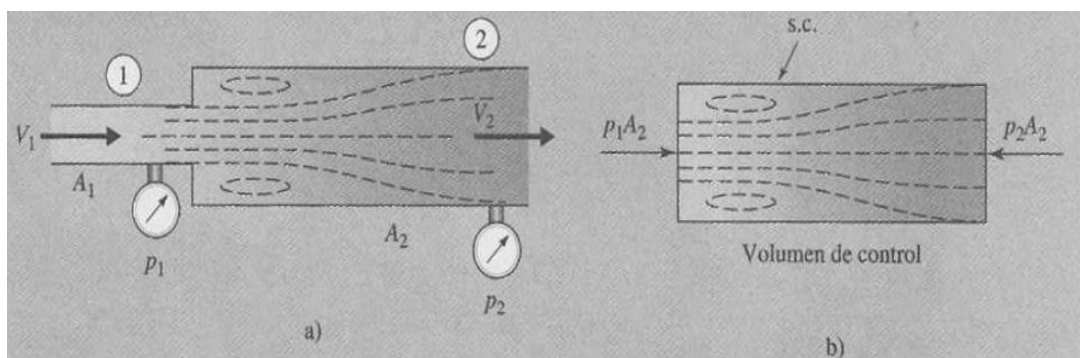


Figura 1.8. Diagrama de pérdidas localizadas por expansión súbita: a) Expansión súbita y b) Volumen de control (Potter 2002)

Se aplica la ecuación [1.38], la ecuación general de energía para los puntos 1 y 2:

$$E_1 - h_f = E_2 \quad [1.44]$$

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} - h_f = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma}$$

$$h_f = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} + \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad [1.45]$$

Aplicando la segunda ley de Newton en el volumen de control:

$$\sum F_x = \dot{m} (v_2 - v_1) \quad [1.46]$$

$$(P_1 - P_2) A_2 = \delta A_2 v_2 (v_2 - v_1)$$

$$\frac{P_1 - P_2}{\delta} = v_2 (v_2 - v_1) \quad [1.47]$$

Se reemplaza la ecuación [1.47] en la ecuación [1.45] y aplicando la ecuación de continuidad [1.29]:

$$h_f = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} - \frac{v_2 (v_1 - v_2)}{g} \quad [1.48]$$

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)}{2g} - \frac{v_2 (v_1 - v_2)}{g}$$

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)}{g} \left(\frac{v_1}{2} + \frac{v_2}{2} - v_2 \right)$$

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)}{g} \left(\frac{v_1}{2} - \frac{v_2}{2} \right)$$

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g} \quad [1.49]$$

La ecuación [1.49] expresa las pérdidas localizadas para cambios de sección en un sistema de tuberías.

Si se aplica para expansiones súbitas se obtiene la ecuación [1.49]

$$h_f = \frac{\left(v_1 - \frac{A_1}{A_2} v_1\right)^2}{2g}$$

$$h_f = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g} \quad [1.50]$$

1.2.6.2 Pérdidas por contracción súbita de área en la tubería

Cuando existe un cambio de área a una de menor tamaño en una tubería, el fluido experimenta dos fenómenos: contracción y expansión, ilustrado en la Figura 1.9. y las pérdidas son similares en ambos casos.

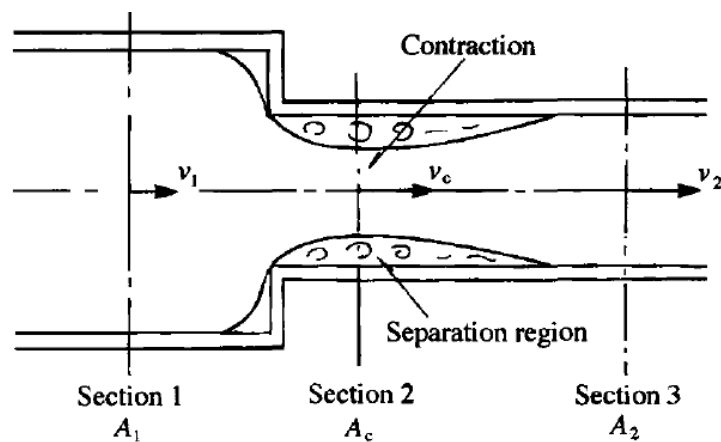


Figura 1.9. Pérdidas localizadas en una contracción súbita (Nakayama, 2000)

Se aplica la ecuación [1.49] para contracción súbita:

$$h_f = \frac{v_c - v_2}{2g} \quad [1.51]$$

$$h_f = \left(\frac{A_2}{A_c} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g}$$

$$h_f = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g} \quad [1.52]$$

Dónde:

C_c : Coeficiente de contracción que depende de la relación de $\frac{A_2}{A_1}$

1.2.6.3 Pérdidas a través de válvulas

Las válvulas son accesorios utilizados para controlar el flujo del fluido, existen diferentes tipos de válvulas de distintos fabricantes por lo que se tienen diferentes diagramas que indican la magnitud de las pérdidas directamente o el coeficiente de resistencia, fruto del trabajo de investigadores que obtuvieron estos datos a partir de experimentos con variedad de válvulas y accesorios.

1.2.6.4 Método de las 2K

Este método sirve para calcular las pérdidas friccionales en accesorios tomando en cuenta el número de Reynolds y la geometría de la tubería en lugar de su rugosidad como se indica en la ecuación [1.53]; el coeficiente de resistencia del accesorio se obtiene a partir de dos constantes K , de ahí su nombre:

$$K = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \left(1 + \frac{1}{D} \right) \quad [1.53]$$

Dónde:

K_1 : Constante cuando el accesorio opera con $Re = 1$

K_∞ : Constante cuando el accesorio opera con $Re = \infty$

D : Diámetro interno de la tubería al cual se conecta

Reemplazando la ecuación [1.53] en la ecuación [1.43], se obtiene:

$$h_f = \left[\frac{K_1}{\text{Re}} + K_\infty \left(1 + \frac{1}{D} \right) \right] \frac{v^2}{2g} \quad [1.54]$$

Esto no se aplica cuando se utiliza el método de longitud equivalente o de una sola constante (Barrera, 1999; McKetta, 1991)

1.2.6.5 Longitud equivalente

Muchas veces se expresan las pérdidas a través de accesorios comparándolo con un tramo de tubería recta del mismo diámetro nominal del accesorio en lugar de su coeficiente de resistencia aplicándose a válvulas, accesorios que cambian la dirección del flujo y ramificaciones en el sistema, esto se obtiene al reemplazar la ecuación [1.30] en [1.28]:

$$h_f = K \frac{v^2}{2g} = f \frac{v^2}{2g} \frac{L}{D} \quad [1.55]$$

$$Le = K \frac{D}{f} \quad [1.56]$$

1.3 APARATOS DE IMPULSIÓN Y SISTEMAS DE MEDICIÓN

1.3.1 APARATOS DE IMPULSIÓN

Existen dos tipos de aparatos de impulsión: los ventiladores y las bombas, siendo los primeros equipos que aumentan la velocidad de un gas y los segundos equipos que suministran energía a un líquido, traducido en ambos casos en un aumento de presión del fluido, debido a que este documento se centra en fluidos incompresibles serán descritas únicamente las bombas (Kreith, 1999; Potter, 2002).

Las bombas son equipos esenciales en la conducción de fluidos a través de tuberías y pueden ser clasificadas en: Centrífugas, donde se incrementa la

presión del líquido entregándole movimiento y, de desplazamiento positivo, donde se intenta comprimir el líquido; siendo las bombas centrífugas las más utilizadas debido a su bajo costo inicial y de mantenimiento (Kreith, 1999).

La bomba centrífuga, ilustrada en la Figura 1.11., consta de:

- *Tubería de aspiración*: Tubería por donde el líquido ingresa a la bomba.
- *Impulsor*: Conjunto de álabes, de diferentes formas y posiciones de acuerdo con el propósito de la bomba, que giran accionado por un motor y que someten un líquido a un movimiento de rotación sumamente rápido que hace que abandone el impulsor a una gran velocidad gracias a las fuerzas centrífugas.
- *Voluta*: Carcasa en forma de caracol que rodea el impulsor y que cambia la dirección del fluido una vez que éste haya adquirido gran velocidad y lo envía hacia la tubería de impulsión.
- *Tubería de impulsión*: Tubería instalada a la salida de la voluta por donde el líquido sale con la presión y velocidad creadas por la bomba (Fernández).

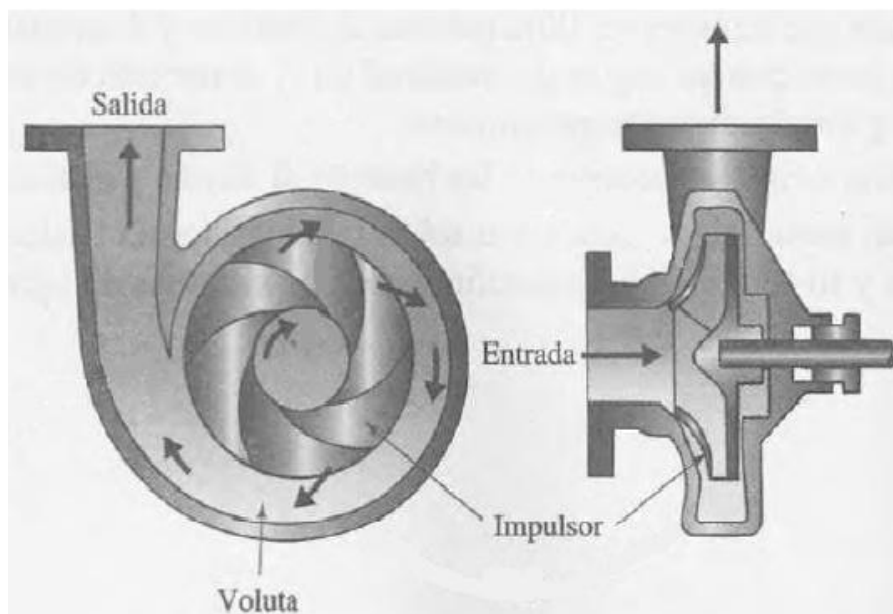


Figura 1.10. Bomba centrífuga simple
(Potter 2002)

Las bombas de desplazamiento positivo son aquellas que poseen un dispositivo de pulsos, generalmente un pistón, y son utilizadas cuando se necesitan altas

presiones de descarga y caudales pequeños, los costos de estos tipos de bombas son elevados tanto el inicial como el de mantenimiento y son propensas a dañarse si hay una obstrucción aguas abajo del sistema pero tienen una alta eficiencia y son más apropiadas para transportar fluidos abrasivos (Kreith, 1999).

Anteriormente se determinó, en la ecuación general de la energía, que la energía que entrega la bomba a un fluido por unidad de peso (h_B), llamado también carga dinámica total. Existe una fuerte relación de dependencia entre la presión que debe desarrollar la bomba y su descarga, esto hace que el rendimiento sea deducido del gráfico carga total de la bomba h_B vs el caudal Q , ilustrado en la Figura 1.12. (Mott, 2006; Potter, 2002).

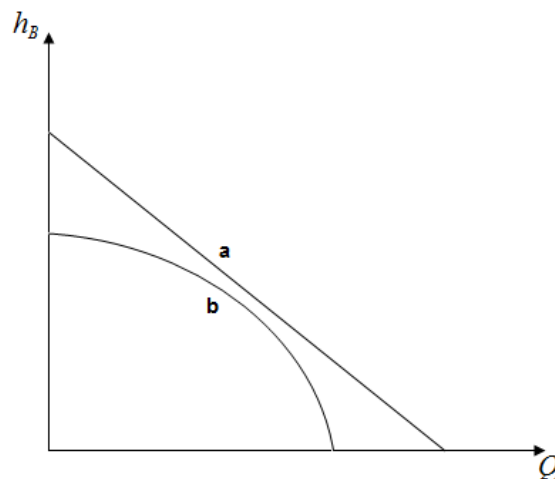


Figura 1.11. Comparación entre curvas de rendimiento: a) Teórica y b) Real

La potencia expresa la velocidad con que se entrega energía al fluido pero es mejor enunciarla en términos de carga dinámica y el peso del fluido, como muestra la ecuación [1.57] y en términos de carga dinámica y peso específico del fluido como muestra la ecuación [1.58]:

$$P_B = h_B W \quad [1.57]$$

$$P_B = h_B \gamma Q \quad [1.58]$$

La eficiencia expresa la razón entre la potencia real transmitida por la bomba al fluido y la potencia abastecida a la bomba, esto se debe a las pérdidas

energéticas por fricción mecánica entre las partes de la bomba, pérdidas de fricción entre la bomba y el fluido, turbulencia, etc. de donde se obtiene la ecuación [1.59]:

$$e_M = \frac{P_B}{P_M} \quad [1.59]$$

Dónde:

- e_M : Eficiencia de la bomba
- P_B : Potencia transmitida al fluido
- P_M : Potencia de la bomba

El valor de la eficiencia siempre será menor a 1. Para bombas centrífugas que son utilizadas para hacer circular líquidos tienen una eficiencia entre 50 - 85 % (Mott, 2006).

1.3.2 SISTEMAS DE MEDICIÓN

Para realizar mediciones de caudales, velocidades, presiones de flujos se emplean diferentes dispositivos, estas medidas se toman a través de tubos, ventirímetros, orificios, vertederos, etc. donde es indispensable aplicar la ecuación de Bernoulli y conocer a fondo cada instrumento, sus coeficientes y características (Giles, 1998).

1.3.2.1 Manómetros

Son instrumentos que miden la diferencia de presión en términos de altura de columnas líquidas, como se muestra en la ecuación Ecuación [1.21]. El manómetro más sencillo es el piezómetro, consiste en un tubo incrustado en un extremo de un tanque que contiene la sustancia presurizada tomando en cuenta

si ésta se encuentra en reposo o en movimiento, ilustrado en la Figura 1.12. (Sleigh, 2001).

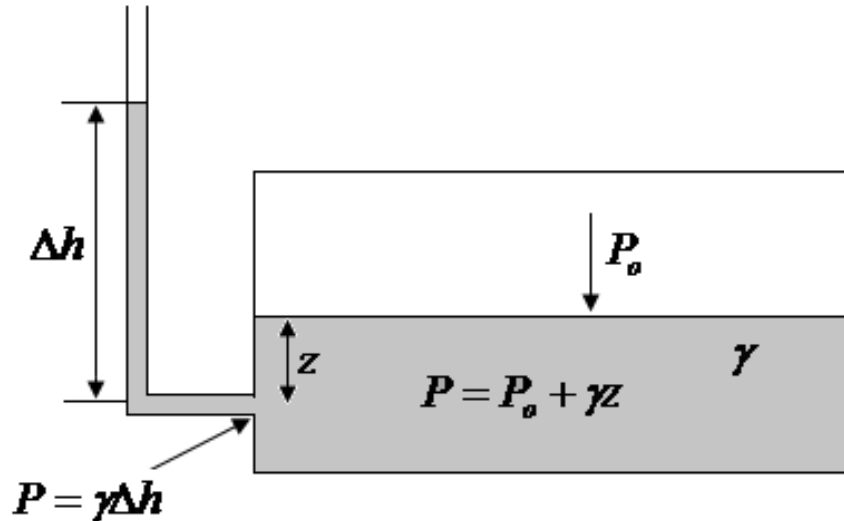


Figura 1.12. Esquema de un piezómetro

El manómetro de tubo en “U” consta de 3 partes: la zona donde se encuentra la sustancia de la cual se va a medir la presión, la zona del fluido manométrico que no es miscible ni reactivo con la sustancia de la que se va a determinar la presión y la zona abierta a la atmósfera, como se ilustra en la Figura 1.13. La sustancia desplaza el fluido manométrico de su posición normal, utilizando la Ecuación [1.21] aplicable para todos los fluidos, se pueden obtener expresiones para los cambios de presión que se encuentran en todo el manómetro (Mott, 2006; Potter, 2002).

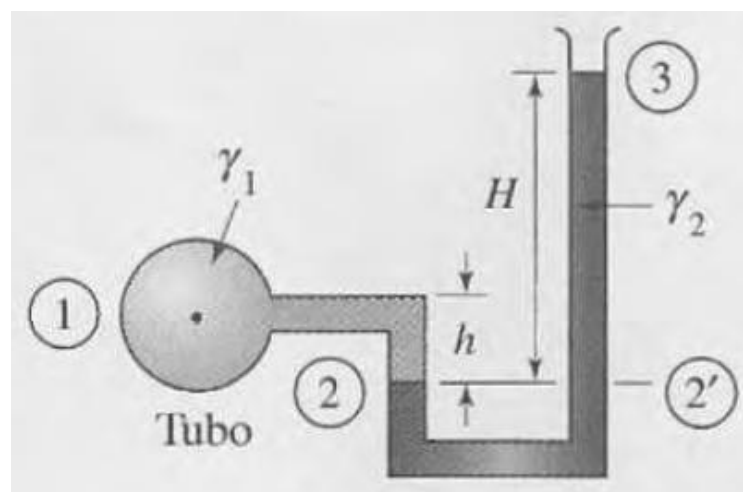


Figura 1.13. Esquema de un manómetro de tubo en “U”

La presión en el punto 2 y en el punto 2' es la misma ya que se encuentran a la misma altura dentro del mismo fluido, pero el valor γ varía de un punto a otro.

$$P_2 = P_{2'} \quad [1.60]$$

$$P_1 + \gamma_1 h = P_3 + \gamma_2 H \quad [1.61]$$

Cuando se utiliza la presión manométrica $P_3=0$, se obtiene la ecuación [1.62]:

$$P_1 = \gamma_2 H - \gamma_1 h \quad [1.62]$$

Este tipo de manómetro puede ser utilizado para realizar mediciones de presión diferencial dentro de un mismo contenedor en dos puntos distintos, esto puede ser por tener diferentes alturas o fluidos en movimiento, ilustrado en la Figura 1.14.

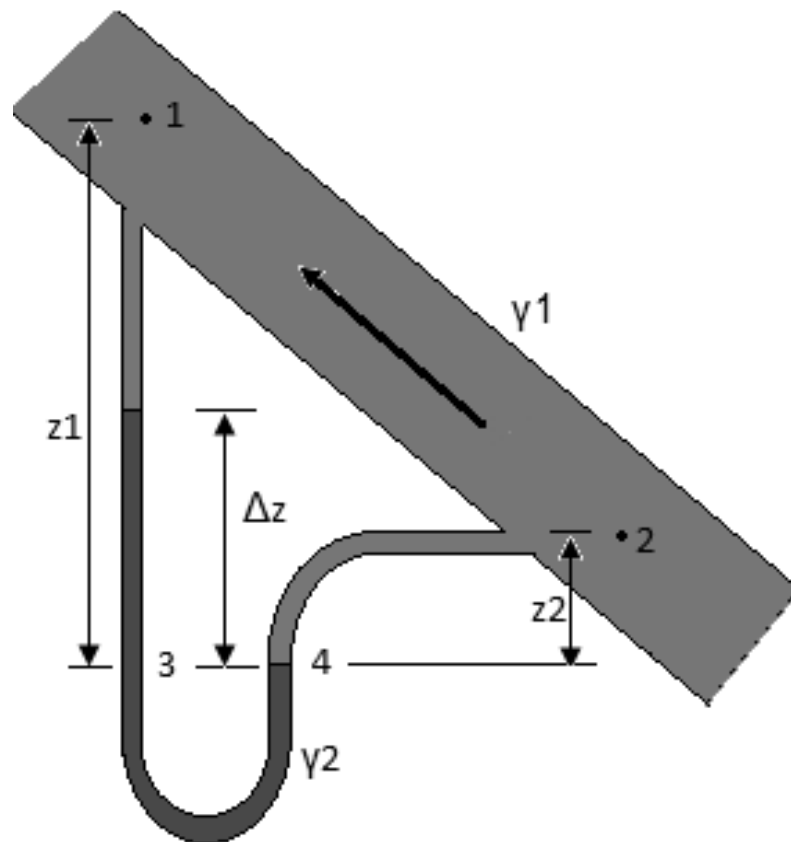


Figura 1.14. Esquema de un manómetro de tubo en “U” de presión diferencial

$$P_3 = P_4 \quad [1.63]$$

$$P_1 + \gamma_1(z_1 - \Delta z) + \gamma_2 \Delta z = P_2 + \gamma_1 z_2 \quad [1.64]$$

Poniendo la diferencia de presión,

$$P_2 - P_1 = \gamma_1(z_1 - \Delta z) + \gamma_2 \Delta z - \gamma_1 z_2 \quad [1.65]$$

$$P_2 - P_1 = (\gamma_1 + \gamma_2) \Delta z + \gamma_1(z_1 - z_2) \quad [1.66]$$

Si se está determinando la presión diferencial de un fluido que circula por una tubería horizontal $z_1 = z_2$,

$$P_2 - P_1 = (\gamma_1 + \gamma_2) \Delta z \quad [1.67]$$

Las principales ventajas de estos manómetros: son simples y no requieren calibración porque las mediciones de presión son deducidas de los principios básicos de hidrostática; sin embargo poseen varias desventajas: las medidas deben ser simultáneas para ambos puntos para obtener la diferencia de altura; dependiendo del fluido manométrico se pueden medir altas o bajas presiones (Sleigh, 2001).

1.3.2.2 Vertederos

Aplicados únicamente en líquidos en canales abiertos, un vertedero consiste en una represa donde se acumula el líquido y luego fluye por encima de éste; se determina el gasto midiendo la altura de la superficie libre en el filo del vertedero; dependiendo en la forma se los clasifica en: Rectangular, triangular y de ancho completo que terminan siendo rectangulares de mayor dimensión, ilustrados en la Figura 1.15. (Nakayama, 2000; Streeter, 2000).

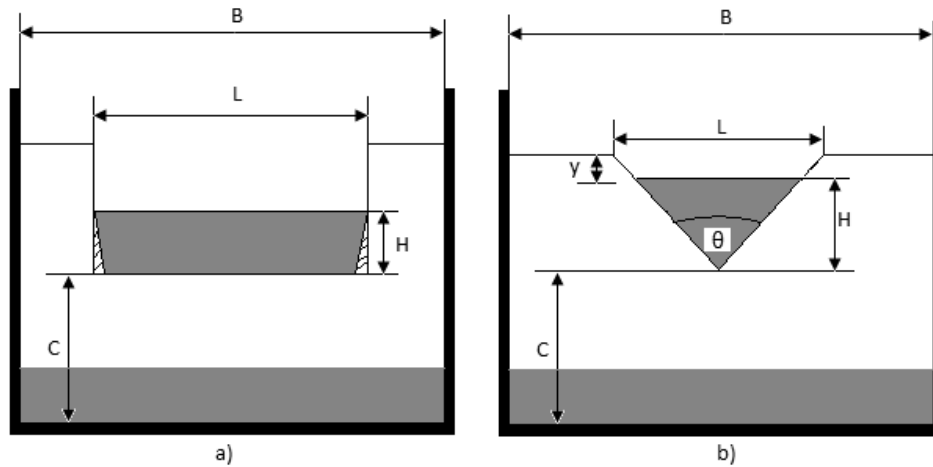


Figura 1.15. Vertederos: a) Rectangular y b) Triangular

En los vertederos rectangulares el chorro se contrae arriba y abajo, como se ilustra en la Figura 1.16a, si las contracciones son despreciadas, como en la Figura 1.16b, es posible deducir una ecuación para el cálculo del caudal, asumiendo que el chorro libre tiene líneas de flujo paralelas y que la presión atmosférica actúa a través de él (Sleigh, 2001; Streeter, 2000).

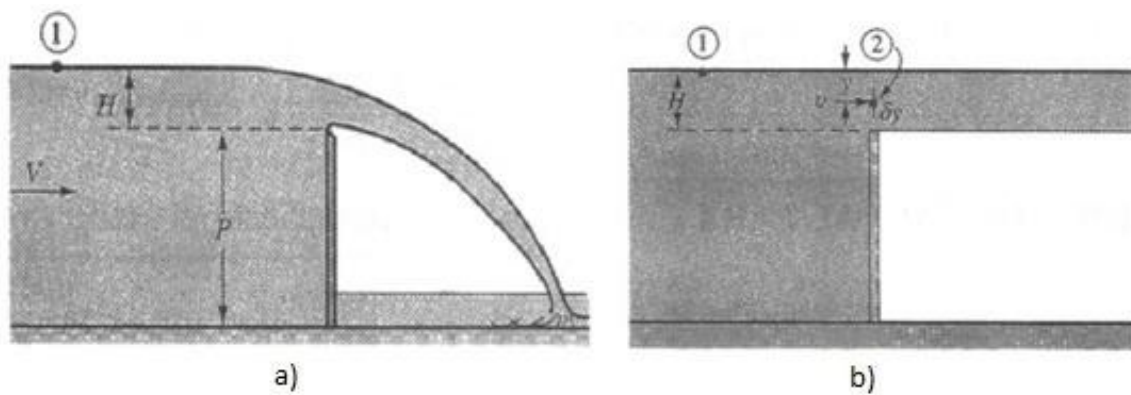


Figura 1.16. Vertederos: a) Chorro libre con contracción y b) Chorro libre sin contracción (Streeter, 2000)

Se aplica la ecuación de Bernoulli [Ecuación 1.38] entre los puntos 1 y 2 (Figura 1.16b) donde el punto 1 se encuentra en estado estacionario

$$H = \frac{v^2}{2g} + H - y \quad [1.68]$$

$$v = \sqrt{2gy} \quad [1.69]$$

El caudal teórico es:

$$Q = \int v dA \quad [1.70]$$

$$Q = \int_0^H v L dy$$

$$Q = \int_0^H \sqrt{2gy} L dy$$

$$Q = \sqrt{2g} L \int_0^H \sqrt{y} dy$$

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} \quad [1.71]$$

Donde:

L : Ancho del Vertedero (Figura 1.16a)

Se introduce un coeficiente de descarga, C_d , que permite calcular el verdadero caudal a través del vertedero tomando en cuenta las contracciones, debido a que las partículas líquidas cambien de dirección al llegar a los filos del vertedero, ni tiene en cuenta los efectos de la tensión superficial (García, 2010)

$$Q = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} L H^{\frac{3}{2}} \quad [1.72]$$

La ecuación [1.72] es la expresión utilizada para el cálculo de caudales en vertederos de sección rectangular.

Para los vertederos triangulares, conocidos como vertederos en "V", se define L en función de H (Figura 1.16b), expresado en la ecuación [1.73]:

$$L = 2(H - y) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad [1.73]$$

El caudal teórico es:

$$Q = \int v dA \quad [1.74]$$

$$Q = \int_0^H v L dy$$

$$Q = \int_0^H \sqrt{2gy} \times 2(H - y) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dy$$

$$Q = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \int_0^H (H - y) \sqrt{y} dy$$

$$Q = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \left[\frac{2}{5} \left(Hy^{\frac{3}{2}} - y^{\frac{5}{2}} \right) \right]_0^H$$

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad [1.75]$$

La ecuación [1.75] es la expresión utilizada para el cálculo de caudales en vertederos de sección triangular.

Para determinar el verdadero caudal a través del vertedero se introduce nuevamente un coeficiente de descarga, C_d , obteniéndose la ecuación [1.76].

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}} \quad [1.76]$$

1.3.2.3 Venturímetro

Medidor de caudal dispuesto en una tubería cónica donde se mide la diferencia de presiones entre el punto más ancho y en más angosto del medidor, donde la velocidad aumenta y la presión disminuye, como se muestra en la Figura 1.17 (Fernández, 2003; Nakayama, 2000).

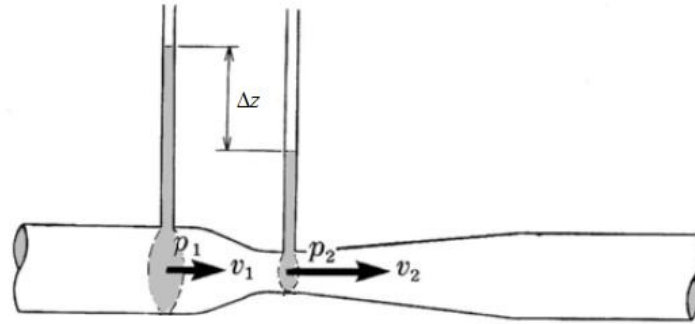


Figura 1.17. Esquema de un venturímetro

Aplicando Bernoulli [Ecuación 1.39] en los puntos 1 y 2 y asumiendo que la tubería se encuentra en posición horizontal:

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \quad [1.77]$$

Aplicando ecuación de la continuidad [1.29]:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{\gamma}} \quad [1.78]$$

Aplicando ecuación de la presión manométrica [1.21]:

$$v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta z} \quad [1.79]$$

Obteniéndose así la ecuación de caudal:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta z} \quad [1.80]$$

Pero como existe pérdidas energéticas entre estos dos puntos, es necesario añadir un coeficiente de velocidad, que generalmente presenta un valor entre 0,95 – 1 (Fernández, 2003).

$$Q = C_v \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta z} \quad [1.81]$$

2. METODOLOGÍA

En el presente trabajo se busca diseñar y construir un equipo donde se puedan realizar prácticas de laboratorio para determinación de pérdidas friccionales y localizadas para complementar la teoría impartida en la cátedra de Mecánica de Fluidos.

Para esto es necesario definir los elementos que lo componen, los materiales de los que están hechos y determinar cómo son distribuidos en el sistema.

Se deben ubicar las tomas de presión en cada tubería y accesorio que se conectan a los manómetros de "U" invertida para realizar las mediciones durante las pruebas experimentales, con estos resultados se obtienen los factores de fricción de cada tubería y coeficientes de resistencia de cada accesorio, que son la base del diseño para sistemas de transporte de fluidos a escala industrial.

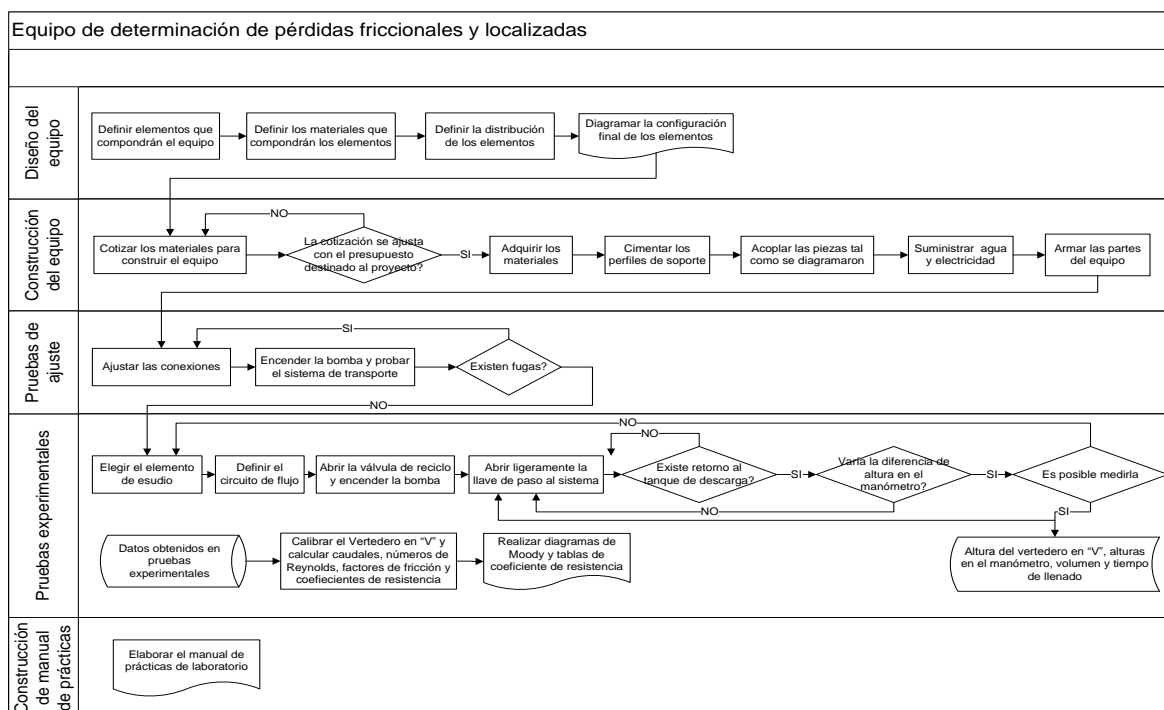


Figura 2.1. Diagrama de flujo de metodología para la construcción, diseño y elaboración del manual de prácticas para el equipo de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

En la Figura 2.1. se muestra el diagrama de flujo simplificado de lo que se lleva a cabo para implementar este proyecto.

2.1 DISEÑO DE UN EQUIPO DE PRÁCTICAS DE MEDIDAS DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS A NIVEL DE LABORATORIO

Debido a que las pérdidas de presión abarcan una amplia gama de sistemas de almacenamiento y distribución, se realizó un diseño donde se incluyera la mayor cantidad de dispositivos donde existan pérdidas friccionales en tuberías y pérdidas localizadas en accesorios.

El diseño se basó en el equipo donde actualmente se realizan las prácticas de laboratorio de Mecánica de Fluidos, este equipo se encuentra en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Mecánica y los elementos que lo conforman son los siguientes:

- Tanque de alimentación y descarga.
- Bomba de alimentación.
- Tuberías de cobre de 1 ¼ " de diámetro.
- Tuberías de cobre de 1 " de diámetro.
- Tuberías de cobre de ¾ " de diámetro.
- Tuberías de cobre de ½ " de diámetro.
- Tubería de hierro galvanizado de ½ " de diámetro.
- Accesorios
- Manómetros de "U" invertida.

En la Figura 2.2 se muestran una de las secciones del equipo que pertenece a la Facultad de Ingeniería Mecánica, ésta corresponde al grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo, las tuberías que lo componen y las válvulas de paso.

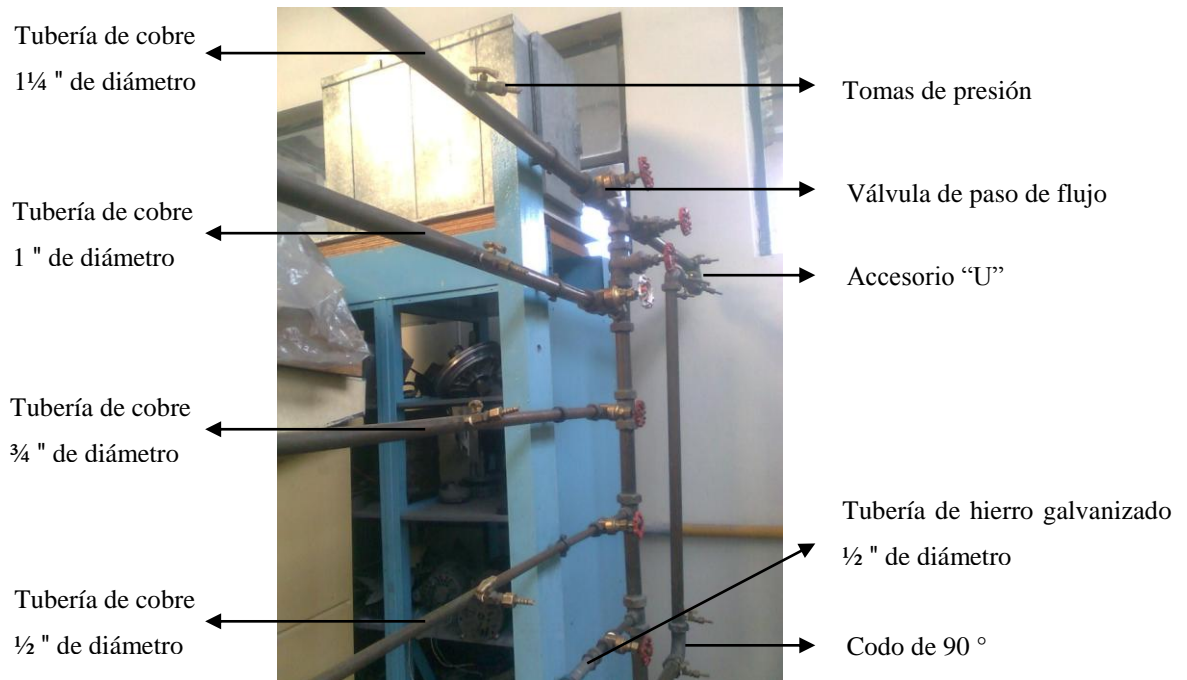


Figura 2.2. Sección de accesorios que cambian la dirección del flujo

Para ampliar la gama de experimentos, el equipo diseñado para Facultad de Ingeniería Química consta de tres grupos de tuberías de distinto material de distintos diámetros, un grupo conformado únicamente de accesorios y una configuración de tuberías en paralelo, se mantuvo el sistema de bombeo para el fluido que se consta de un tanque de alimentación y descarga con su respectivo medidor de flujo. Para la obtención de datos de manera fácil y rápida, se dispuso de manómetros diferenciales con una precisión de 1 mmH₂O.

2.1.1 GRUPOS DE TUBERÍAS

Los materiales más utilizados para transporte de agua, de mayor disponibilidad en el mercado y de menor costo fueron elegidos como las mejores opciones para el diseño del equipo: PVC, cobre y hierro galvanizado. Se decidieron diseñar tres grupos de tuberías de diferentes materiales para verificar que el elemento que compone un sistema de transporte afecta el comportamiento del fluido transportado.

Además del material, el diámetro influye considerablemente en cuanto a pérdidas friccionales se refiere; nuevamente se eligieron los diámetros en función de uso, disponibilidad y costo, éstos fueron: $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ", 1" y $1\frac{1}{4}$ ".

2.1.2 GRUPOS DE ACCESORIOS

El diseño incluyó la mayor cantidad de accesorios posibles para estudio de pérdidas localizadas y determinación de los coeficientes de resistencia de cada uno de ellos:

- Válvulas de compuerta, globo y mariposa de $1\frac{1}{4}$ " de diámetro.
- Codos de 90° y 45° de $1\frac{1}{4}$ " de diámetro.
- Tubo Venturi de vidrio de diámetro mayor de 3,5 cm y diámetro menor de 1,6 cm.
- Expansión y contracción súbitas de vidrio de diámetro mayor de 6,4 cm y diámetro menor de 3,4 cm.

2.1.3 MEDIDOR DE FLUJO

Aprovechando el tanque de alimentación y descarga, se instaló un vertedero en "V" su interior con un medidor de altura externo para determinar el caudal que atraviesa el sistema de transporte y que podrá ser utilizado para reemplazar los medidores convencionales (balde con graduaciones volumétricas y cronómetro).

2.1.4 MEDIDOR DE PRESIÓN

Se diseñaron manómetros de "U" invertida de vidrio con válvulas de tapón cónico que permitirán la entrada sincronizada del fluido al interior del manómetro con sensibilidad de $1\text{ mmH}_2\text{O}$ para mayor precisión y comodidad del experimento con un rango de medición de 1 m de diferencia de alturas, además de una válvula de entrada de aire que sirve de fluido manométrico y dos tapas de evacuación para vaciar el manómetro cada vez que se termine el registro de mediciones del elemento de estudio.

2.1.5 SISTEMA DE BOMBEO

El Departamento de Ingeniería Química exigió que el momento en que se realice la compra de los materiales para la construcción del equipo de diseñado se incluya una bomba centrífuga que también se la pueda utilizar en otro equipo existente en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, ésta bomba debía tener una potencia de 15 HP, debido a que es un dispositivo sobredimensionado para el diseño del equipo, requiere de una ramificación adicional que disminuya el flujo que ingresa al sistema y recircule parte del fluido al tanque de alimentación y descarga.

2.1.6 TANQUE DE ALIMENTACIÓN Y DESCARGA

Se diseñó un tanque que no solo alimente el equipo a través de la bomba sino que para evitar gasto innecesario de agua es también el tanque donde descarga el agua que recorre el sistema. El tanque fue construido de acero pintado con esmalte anticorrosivo que preservará las láminas de la oxidación.

Todo esto se puede observar en la sección de ANEXO II, donde se encuentran los diagramas de los componentes, dimensiones y vistas de cada sección del equipo diseñado.

2.2 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRÁCTICAS DE MEDIDAS DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS

Se realizó el estudio de insumos disponibles en el mercado con su respectiva cotización para su análisis y selección de la mejor alternativa.

Se destinó como área de instalación del equipo la planta baja del edificio de Química-Electrónica donde se encuentra el actual Laboratorio de Transferencia de Calor y se proveyó de los suministros de agua y electricidad, a la vez se inició

la cimentación de los perfiles que soportaron el sistema de transporte, con la ayuda del personal politécnico que se encarga de los proyectos de construcción en la Escuela Politécnica Nacional tal como se muestra en la Figura 2.3.



Figura 2.3. Cimentación de perfiles de soporte del equipo de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

Se acoplaron los diferentes conjuntos de piezas de acuerdo con el diseño concebido. A manera de ejemplo, la Figura 2.4. muestra el grupo de tuberías de cobre soldadas entre sí con sus respectivas válvulas de paso, universales y conexiones, esto se realiza con cada grupo de tuberías y accesorios.

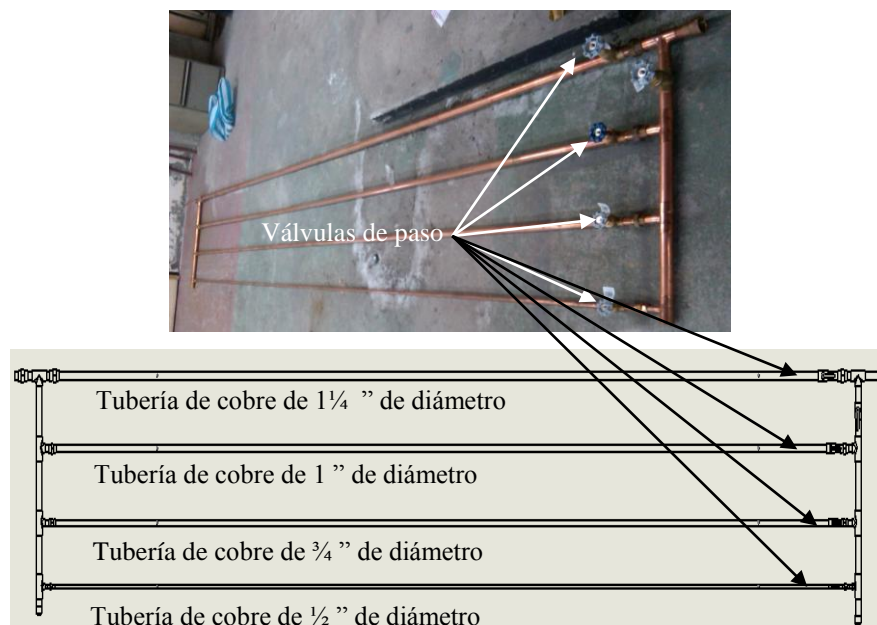


Figura 2.4. Grupo de tuberías de Cu del equipo de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

Se perforaron las tuberías para ubicar los pitones que servirán para realizar las tomas de presión, tal como se muestran en la Figura 2.4., vale mencionar que los grupos de PVC, hierro galvanizado, accesorios y válvulas atravesaron el mismo proceso.

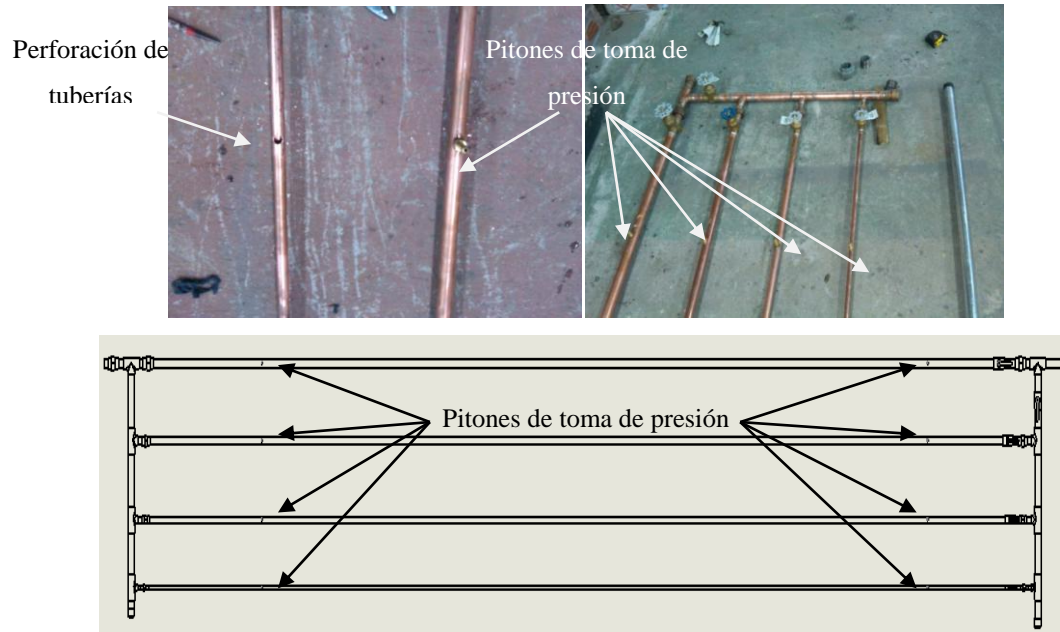


Figura 2.5. Perforación de tuberías y ubicación de pitones para tomas de presión

En la Figura 2.6. se muestra el tanque de alimentación y descarga, aquí las planchas de acero naval se cortaron y se soldaron entre sí para dar la forma preliminar al tanque, se puede observar el corte que supondrá el vertedero en "V".



Figura 2.6. Tanque de alimentación y descarga

Se realizaron pruebas preliminares de ajuste físico y rango de funcionamiento que servirán para realizar las pruebas experimentales a diferentes condiciones de flujo.

A continuación se detallan los materiales que componen el equipo construido junto con su ubicación y/o función:

- Abrazaderas 5/8 " : Sujetan las mangueras en las válvulas de los manómetros y pitones de toma de presión acoplados en cada tubería.
- Ángulos de acero 2 " x 2 " x ¼ " : Utilizados como refuerzos en la construcción del tanque de alimentación y descarga.
- Bomba centrífuga GOULDS, 3656-S 5BF1M2B0, 15 HP, 150 GPM: Bomba de alimentación de fluido al sistema.
- Botonera: Botonera de encendido y apagado
- Codo de Hierro Galvanizado 1 ½ " x 90 °: Accesorio de redireccionamiento del flujo a la entrada del sistema.
- Codos de Hierro Galvanizado 1 ¼ " x 45 °: Accesorios para estudio de pérdidas friccionales localizadas ubicados en el grupo de accesorios.
- Codos de Hierro Galvanizado 1 ¼ " x 90 °: Accesorios de redireccionamiento del flujo en cada grupo de tuberías y ubicados también en el grupo de accesorios para estudio de pérdidas friccionales localizadas.
- Cruces de Hierro Galvanizado 1 ¼ " : Acoples para unión de grupos de tuberías y grupo de accesorios.
- Disco de corte SIEA de metal de 7 " : Cortador de perfiles.
- Disco de desbaste SIEA de metal 7 " : Desbastador de los perfiles cortados.
- Electrodo AGA 1/8, 60-11: Utilizados para soldar las piezas los perfiles entre sí.
- Expansión y contracción súbitas de vidrio: Accesorio de vidrio para estudio de pérdidas friccionales localizadas ubicado en el grupo de accesorios.
- Juego de brocas de acero (1/4 " , 1/8 " , 3/16 " , 3/8 " , 5/16 "): Utilizados para perforación de placas perfiles para colocar los pernos de concreto para anclar

los perfiles y perforación de tuberías para ubicación de pitones de toma de presión.

- Manguera de $\frac{1}{4}$ " de plástico: Conecta las tomas de presión ubicadas en las tuberías y accesorios a los manómetros de "U" invertida.
- Manómetro de vidrio de "U" invertida de 2 válvulas: Manómetro móvil para elegir el accesorio de estudio.
- Manómetro de vidrio de "U" invertida de 8 válvulas: Manómetro conectado al grupo de tuberías de PVC.
- Manómetro de vidrio de "U" invertida de 16 válvulas: Manómetro conectado a los grupos de tuberías de cobre y hierro galvanizado.
- Perfiles en C 10x5x4cm: Soldados de dos en dos para formar los soportes verticales del equipo.
- Pernos $\frac{1}{4}$ " x 1 " : Utilizados para anclar los soportes al suelo de concreto.
- Planchas de acero 120 cm x 240 cm x $\frac{1}{4}$ " : Conforman las paredes y fondo del tanque de alimentación y descarga del equipo, la una placa central tiene un corte triangular que será utilizado como medidor de flujo (Vertedero en "V").
- Reducciones de Cobre SO-SO de $1 \frac{1}{2}$ " a $1 \frac{1}{4}$ " : Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de cobre.
- Reducciones de Cobre SO-SO de $1 \frac{1}{4}$ " a 1 " : Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de cobre.
- Reducciones de Cobre SO-SO de $1 \frac{1}{4}$ " a $\frac{1}{2}$ " : Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de cobre.
- Reducciones de Cobre SO-SO de $1 \frac{1}{4}$ " a $\frac{3}{4}$ " : Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de cobre.
- Reducciones de Hierro Galvanizado de $1 \frac{1}{4}$ " a 1 " : Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de hierro galvanizado.

- Reducciones de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " a ½ ": Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de hierro galvanizado.
- Reducciones de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " a ¾ ": Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de hierro galvanizado.
- Reducciones de PVC PLASTIGAMA de 1 ¼ " a 1 ": Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de PVC.
- Reducciones de PVC PLASTIGAMA de 1 ¼ " a ½ ": Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de PVC.
- Reducciones de PVC PLASTIGAMA de 1 ¼ " a ¾ ": Accesorio utilizado para disminuir la sección de paso del flujo ubicado en el grupo de tuberías de PVC.
- Pitones de bronce de ¼ " de ½ vuelta: Válvulas ubicadas en las tomas de presión de los accesorios, solo serán abiertas si su respectivo accesorio es elegido para el estudio de pérdidas friccionales localizadas.
- Soplete para soldar estaño: Equipo utilizado para soldar las piezas de cobre
- Sueda de plata: Soldadura para las piezas de cobre.
- Tees de Hierro Galvanizado de 1 ¼ ": Unión y bifurcación de flujo en los diferentes tramos del sistema.
- Teflón industrial: Recubrimiento utilizado en las uniones entre tuberías y accesorios para evitar fugas.
- Tubo de Cobre de 1 ¼ " x 6 m Tipo I.
- Tubo de Cobre de 1 " x 6 m Tipo I.
- Tubo de Cobre de ¾ " x 6 m Tipo I.
- Tubo de Cobre de ½ " x 6 m Tipo I.
- Tubo de Hierro Galvanizado 1 ½ " x 6 m ASTM.
- Tubos de Hierro Galvanizado 1 ¼ " x 6 m ASTM.
- Tubo de Hierro Galvanizado 1 " x 6 m ASTM.
- Tubo de Hierro Galvanizado ¾ " x 6 m ASTM.
- Tubo de Hierro Galvanizado ½ " x 6 m ASTM.
- Tubo de PVC PLASTIGAMA, 1 ¼ " x 6 m.
- Tubo de PVC PLASTIGAMA, 1 " x 6 m.

- Tubo de PVC PLASTIGAMA, $\frac{3}{4}$ " x 6 m.
- Tubo de PVC PLASTIGAMA, $\frac{1}{2}$ " x 6 m.
- Universales SO-SO de bronce de 1 $\frac{1}{4}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de Cobre de 1 $\frac{1}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales SO-SO de bronce de 1 ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de Cobre de 1 " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales SO-SO de bronce de $\frac{3}{4}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de Cobre de $\frac{3}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales SO-SO de bronce de $\frac{1}{2}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de Cobre de $\frac{1}{2}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de Hierro Galvanizado de 1 $\frac{1}{2}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de hierro galvanizado de 1 $\frac{1}{2}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de Hierro Galvanizado de 1 $\frac{1}{4}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de hierro galvanizado de 1 $\frac{1}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de Hierro Galvanizado de 1 ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de hierro galvanizado de 1 " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de Hierro Galvanizado de $\frac{3}{4}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de hierro galvanizado de $\frac{3}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de Hierro Galvanizado de $\frac{1}{2}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de hierro galvanizado de $\frac{1}{2}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de PVC PLASTIGAMA de 1 $\frac{1}{4}$ ": Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de PVC de 1 $\frac{1}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.

- Universales de PVC PLASTIGAMA de 1 " : Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de PVC de 1 " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de PVC PLASTIGAMA de $\frac{3}{4}$ " : Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Universales de PVC PLASTIGAMA de $\frac{1}{2}$ " : Accesorio ubicado aguas arriba y aguas abajo de la tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ " para desmontarla fácilmente en el caso de cambio o mantenimiento.
- Válvulas de bronce ITALY de 1 $\frac{1}{4}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce SO-SO ITALY de 1 $\frac{1}{4}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce ITALY de 1 " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce SO-SO ITALY de 1 " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce ITALY de $\frac{3}{4}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce SO-SO ITALY de $\frac{3}{4}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce ITALY de $\frac{1}{2}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvulas de bronce SO-SO ITALY de $\frac{1}{2}$ " de $\frac{1}{2}$ vuelta: Válvula de corte de paso del flujo.
- Válvula de bronce de 2 " de compuerta: Válvula para vaciar el tanque alimentación y descarga.
- Válvula de bronce de 1 $\frac{1}{4}$ " Tipo Bola: Válvula para estudio de pérdidas friccionales localizadas ubicado en el grupo de accesorios.
- Válvula de bronce de 1 $\frac{1}{4}$ " Tipo Compuerta: Válvula para estudio de pérdidas friccionales localizadas ubicado en el grupo de accesorios.

- Válvula de bronce de 1 ¼ " Tipo Globo: Válvula para estudio de pérdidas friccionales localizadas ubicado en el grupo de accesorios.
- Válvula de gas industrial: Regula el paso de gas al soldador.
- Venturímetro de vidrio: Accesorio de vidrio utilizado para medición de caudal, ubicado en el grupo de accesorios.

Las sustancias que se utilizaron en la construcción del equipo se detallan a continuación con su respectiva función:

- Anticorrosivo antioxidante, CONDOR, AntiOX: Pintura para el tanque de alimentación y descarga.
- Esmalte CONDOR, TAN: Pintura del exterior del tanque de alimentación y descarga y perfiles de soporte del equipo.
- THINNER: Solvente para pintura.

2.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES Y ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS CORRESPONDIENTES AL EQUIPO CONSTRUIDO

Cada tubería y accesorio cuenta con su respectiva toma de presión que se conectan a los manómetros de presión diferencial de "U" invertida mediante mangueras de plástico. Los ensayos experimentales se realizaron de la siguiente manera:

Antes de encender la bomba de alimentación, se eligió el circuito que recorrerá el fluido dentro del sistema, esto se logra al abrir y cerrar las llaves de paso mientras se realiza un recorrido de la dirección de flujo. Se revisó previamente que el tanque de alimentación y descarga se encuentre lleno de fluido y que la ramificación de recirculación se encuentre abierta.

Se encendió la bomba de alimentación, se abrió ligeramente la válvula de paso instalada aguas abajo del sistema de conducción hasta que el fluido retorne al

tanque de alimentación. De acuerdo a la toma de presión elegida para el estudio, se abrieron simultáneamente las válvulas de tapón cónico de las entradas correspondientes al manómetro de “U” invertida al que se encuentra conectadas, si la altura a ambos lados del manómetro fue la misma, se aumentó ligeramente el caudal alimentado al sistema; si la altura varió, se tomaron las respectivas mediciones de: altura en el vaso de medición del vertedero en “V” instalado en el tanque de alimentación y descarga, alturas de los meniscos en el manómetro de “U” invertida, el volumen en un balde con graduaciones volumétricas y el tiempo con el que se alcanzó este volumen. Si el manómetro todavía puede realizar mediciones pero los meniscos salen de la escala, se bombeó aire para desplazar el agua y lograr medir la diferencia de alturas. Se aumentó el caudal hasta que ya no fue posible realizar más mediciones en el manómetro.

Se realizó el mismo procedimiento con cada una de las tuberías y accesorios que componen el equipo para determinar pérdidas friccionales y localizadas.

Con todos los datos obtenidos, se calibró el vertedero en “V”, esto consistió en determinar el caudal de cada grupo de datos de volumen y tiempo de llenado y relacionarlo con la altura que marca el vaso de medición del vertedero, así se obtuvo su coeficiente de descarga que será utilizado posteriormente para el cálculo directo del caudal que circula por el equipo.

Para la construcción de los diagramas de Moody de las tuberías, se calculó el número de Reynolds para cada caudal medido y luego su respectivo factor de fricción, de ésta relación se obtuvieron las rugosidades relativas y puesto que se conocen los diámetros de cada una, se obtuvieron también sus rugosidades absolutas, además de los coeficientes de resistencia de cada uno de los accesorios.

A partir de la diferencia de alturas para cada caudal, se obtuvieron los diagramas del efecto de la velocidad de flujo sobre las pérdidas de carga en tuberías y accesorios.

Cabe resaltar que el fluido utilizado en el desarrollo de las pruebas experimentales fue agua potable, un suministro de bajo costo, de fácil transporte y que puede ser visualizado sin mayor inconveniente en los manómetros de vidrio.

2.4 DISEÑO Y ELABORACIÓN DEL MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL ESTUDIO DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS EN EL EQUIPO CONSTRUIDO

De todos los ensayos realizados en el equipo construido se seleccionaron los que mejor se adaptan al proceso experimental impartido a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Química en la asignatura de Mecánica de Fluidos y fueron recopilados en un manual de prácticas de laboratorio abarcando la mayor cantidad de pruebas experimentales.

- Medición de flujo en vertedero.
- Medición de flujo en venturímetro.
- Pérdidas friccionales en tuberías de diferentes materiales.
- Pérdidas friccionales en tuberías de diferentes diámetros de un mismo material.
- Pérdidas friccionales por súbito cambio de área del tubo.
- Pérdidas friccionales en diferentes tipos de válvulas.
- Pérdidas friccionales por cambio de dirección.
- Pérdidas friccionales en una configuración de tuberías en paralelo.

Durante el desarrollo de éstas prácticas de laboratorio los estudiantes pueden visualizar de manera didáctica los fenómenos de transporte, obtener datos reales y prácticos que permitan concebir sistemas de transferencia de fluidos a nivel piloto y que puedan escalonarse a nivel industrial.

2.4.1 ESQUEMA DEL MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL ESTUDIO DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS EN EL EQUIPO CONSTRUIDO

En el manual debe tener la siguiente estructura:

Carátula

Encabezado y pie de página

Número de Práctica

Título

Introducción

Objetivos

1. Circuito empleado
2. Procedimiento
3. Cálculos
4. Referencias
5. Anexos

Presentados en ese orden y con la numeración descrita (División de recursos hídricos y medio ambiente, 2003; Soria, 2003; TECNUN, 2007)

2.4.1.1 Carátula

Primera página del manual donde se presentan los datos más significativos del documento, en ella consta el sello y nombre de la institución, facultad, carrera, asignatura a la que pertenece el manual, el concepto del documento, el nombre del docente que imparte la cátedra y el semestre vigente.

2.4.1.2 Encabezado y pie de página

El encabezado ubicado en la parte superior de cada página indica el documento al cual pertenece esa página y en el pie de página se muestra el número de página secuencial correspondiente al documento.

2.4.1.3 Número de Práctica

El número de práctica es simplemente el número correspondiente al experimento de acuerdo a su posición dentro del manual de prácticas.

2.4.1.4 Título

El título indica de manera general la práctica que se va a desarrollar.

2.4.1.5 Introducción

La introducción contiene la justificación de la práctica, corresponde a una breve explicación del/los fenómeno/s físicos que se van a presentar.

2.4.1.6 Objetivos

Los objetivos determinan los resultados a obtener luego de realizar las mediciones descritas en cada una de las prácticas y que serán la base para realizar el respectivo informe de laboratorio.

2.4.1.7 Circuito empleado

El circuito empleado indica qué válvulas abrir o cerrar para el paso del fluido y qué elementos serán utilizados para desarrollar cada una de las prácticas.

2.4.1.8 Procedimiento

El procedimiento es una serie de algoritmos secuenciales que permiten que la práctica se desarrolle de una manera adecuada; minimizando riesgos, optimizando tiempo y asegurando en lo posible que se obtengan los resultados más precisos.

2.4.1.9 Cálculos

En los cálculos se exponen las ecuaciones que serán utilizadas con el fin de ayudar a los estudiantes a obtener los resultados que satisfagan los objetivos previamente definidos.

2.4.1.10 Referencias

En las referencias se expone la bibliografía que puede servir de apoyo para realizar tanto las prácticas como el informe de laboratorio.

2.4.1.11 Anexos

En los anexos se exponen los diagramas del equipo para indicar los componentes que constan en la práctica a realizarse y que serán ubicados al final del manual de prácticas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DISEÑO DEL EQUIPO DE PRÁCTICAS DE MEDIDAS DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS A NIVEL DE LABORATORIO

El equipo de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas se concibe tal como muestra en la Figura 3.1., y consta de las siguientes partes:

- Tanque de almacenamiento y descarga con su respectivo vertedero en “V” y bomba de alimentación, además de la ramificación de reciclo a la entrada del sistema de transporte para disminuir la presión en las tuberías y accesorios. Para la puesta en marcha de la bomba fue necesario implementar una botonera (ENCENDIDO / APAGADO) y su respectivo breaker para evitar daños en el sistema eléctrico del equipo.
- Grupo de tuberías de cobre de 1 ¼”, 1”, ¾” y ½” de diámetro.
- Grupo de tuberías de hierro galvanizado de 1 ¼”, 1”, ¾” y ½” de diámetro.
- Grupo de tuberías de PVC de 1 ¼”, 1”, ¾” y ½” de diámetro.
- Codos de 90 ° y 45 °.
- Grupo de accesorios y tuberías en paralelo.
- Perfiles de soporte.
- Válvula de paso de flujo hacia el sistema de transporte.
- Vaso de medición de altura en el vertedero en “V”.

Todas las tuberías y accesorios destinados al estudio de pérdidas friccionales cuentan con sus respectivos tomas de presión que se conectan a los manómetros de “U” invertida destinados a realizar las mediciones.

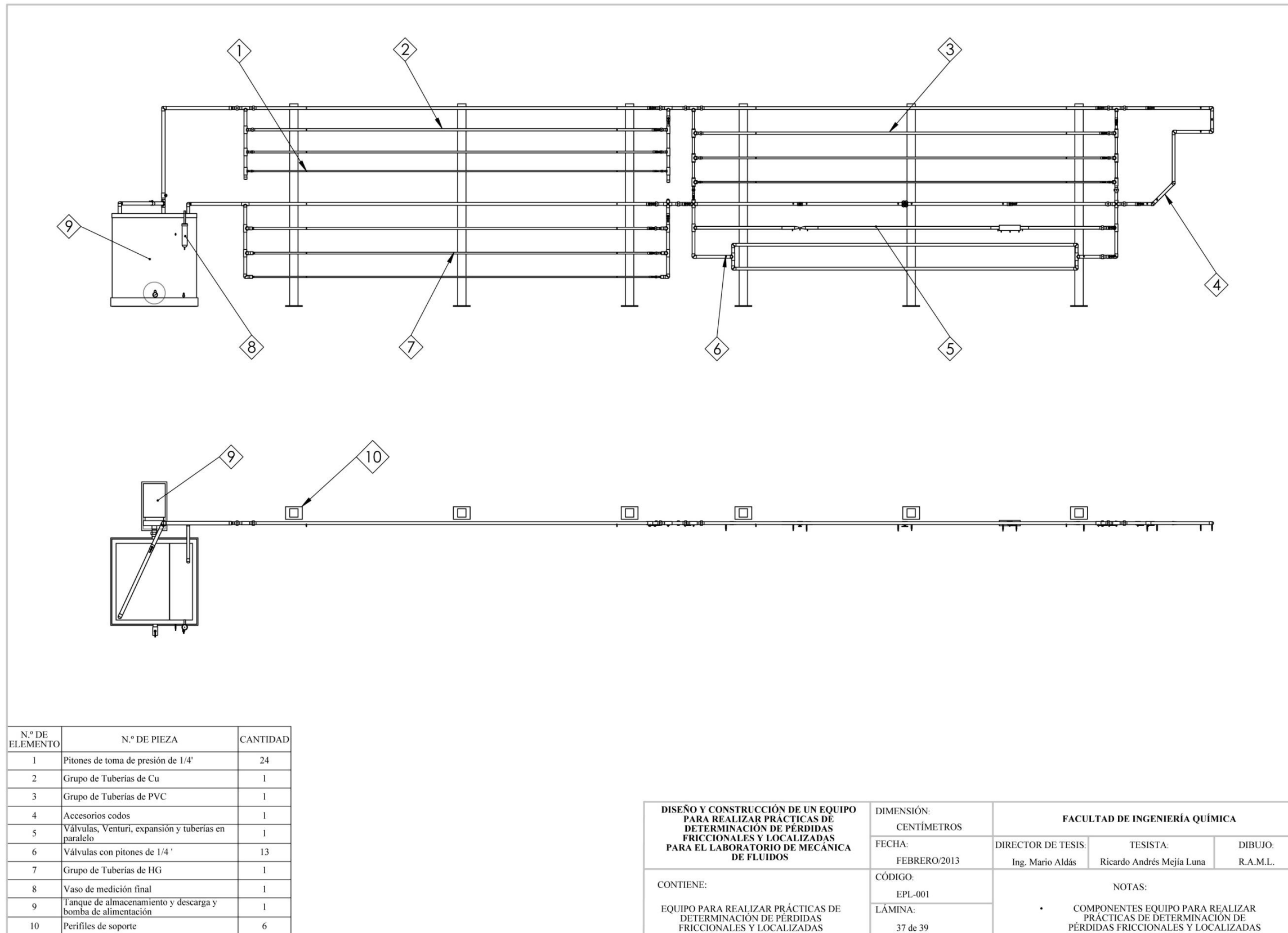


Figura 3.1. Equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas localizadas para el laboratorio de Mecánica de Fluidos

Antes de poner el equipo en funcionamiento se determinaron los parámetros del fluido que se utilizaron como base para el cálculo de pérdidas friccionales y localizadas en el equipo construido detalladas en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Densidad del agua entre 5 °C y 30 °C

TEMPERATURA (°C)	TEMPERATURA (°K)	DENSIDAD (g/cm ³)
15	288	1,003
20	293	1,002
25	298	1,001

(Perry, 2008)

Tabla 3.2. Viscosidad del agua entre 5 °C y 30 °C

TEMPERATURA (°C)	VISCOSIDAD (N.s/m ²)	VISCOSIDAD (g/cm.s)
10	1,31E-03	1,31E-02
15	1,14E-03	1,14E-02
20	1,01E-03	1,01E-02
30	8,01E-04	8,01E-03

(Shames, 1995)

Tomando en cuenta que la temperatura del fluido que proviene de la red pública es de 15 °C y que luego de un período estimado de 3 horas de uso de la bomba centrífuga, el fluido alcanza 20 °C aproximadamente debido a la energía mecánica que se le entrega y la fricción con los componentes del sistema, la Tabla 3.3. detalla los parámetros promedio del agua para estas condiciones del sistema.

Tabla 3.3. Parámetros promedios del agua

TEMPERATURA PROMEDIO (°C)	17,5
DENSIDAD PROMEDIO (g/cm ³)	1,002
VISCOSIDAD PROMEDIO (g/cm.s)	1,07E-02

3.2 CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO DE PRÁCTICAS PARA EL ESTUDIO DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS

El equipo fue construido de acuerdo con el diseño concebido anteriormente y que se muestra en la Figura 3.1., cada uno de los grupos de tuberías, accesorios y válvulas fue ensamblada con sumo cuidado para evitar fugas y daño en los accesorios de vidrio, en la Figura 3.2 se muestran los grupos de tuberías de cobre y hierro galvanizado, el tanque de alimentación y descarga con su respectivo medidor de caudal y el vaso de medición de altura para el vertedero en “V”.



Figura 3.2. Grupos de tuberías de cobre y hierro galvanizado, tanque de alimentación y descarga con vertedero en “V” y vaso de medición

En la Figura 3.3. se muestran los grupos de tuberías de PVC y los accesorios: codos, válvulas, expansión y contracción súbita, Venturi y tuberías en paralelo.



Figura 3.3. Grupo de tuberías de PVC, grupo de accesorios: válvulas, codos, expansión y contracción súbita, Venturi y tuberías en paralelo.

Adicionalmente, la Figura 3.4. muestra los manómetros que serán utilizados para determinar la diferencia de alturas a medida que cambia el flujo de agua en el sistema.



Figura 3.4. Manómetros de 16 válvulas, 8 válvulas y 2 válvulas

Finalmente, la Figura 3.5 muestra el equipo de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas completo tal como se encuentra construido en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial.



Figura 3.5. Equipo de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas

3.3 ENSAYOS EXPERIMENTALES Y ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS CORRESPONDIENTES AL EQUIPO CONSTRUIDO

Se realizaron pruebas de ajuste físico para revisar que el sistema no presente fugas en las conexiones y acoples, se procedió con los ensayos experimentales en cada una de las tuberías y accesorios, controlando el flujo con la válvula que se encuentra en la entrada del fluido al sistema y registrando las alturas en los manómetros y en el vertedero en “V” y el volumen recuperado en el balde con graduaciones volumétricas y su tiempo de llenado.

Las tablas de datos obtenidos se exponen en la sección ANEXO III.

Se puede observar que el número de mediciones disminuye proporcionalmente con el diámetro de las tuberías, pero que el número de mediciones entre tuberías del mismo diámetro es similar, independientemente del material de la tubería.

Se pueden tomar una gran cantidad de datos para los codos sin importar su grado de desviación y su posición, todo depende de que el diámetro interno sea el mismo.

A medida que las válvulas se cierran, el número de mediciones disminuye puesto que la sección de paso es menor y las pérdidas de presión aumentan y esto se demuestra en el aumento de la diferencia de alturas en el manómetro. Puesto que las válvulas son diferentes no es posible realizar una comparación más profunda con las mediciones realizadas.

Los elementos de vidrio presentan una menor cantidad de mediciones respecto al resto de elementos, por ser elementos frágiles y por el tipo de accesorio que representan.

La cantidad de mediciones que es posible realizar en las tuberías en paralelo se debe a que el caudal máximo del sistema puede recorrer a través de ellas.

Al igual que la expansión y contracción súbitas, el venturímetro presenta una menor cantidad de mediciones ser frágil y por ser un accesorio que tiene como característica producir pérdidas de carga.

3.3.1 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DEL VERTEDERO EN “V”

Juntando todos los datos de los volúmenes medidos con ayuda del balde y el tiempo de llenado medidos con el cronómetro se determina el caudal correspondiente gracias a la ecuación [1.26] y utilizando la relación Caudal vs. Altura para vertederos triangulares como se muestra en la ecuación [1.76] y graficándolos en la Figura 3.6., se obtiene el coeficiente de descarga (C_d) del

vertedero en “V” que será utilizado posteriormente para el cálculo directo del caudal en el equipo de prácticas de mediciones de pérdidas friccionales y localizadas, detallado en la Tabla 3.4.

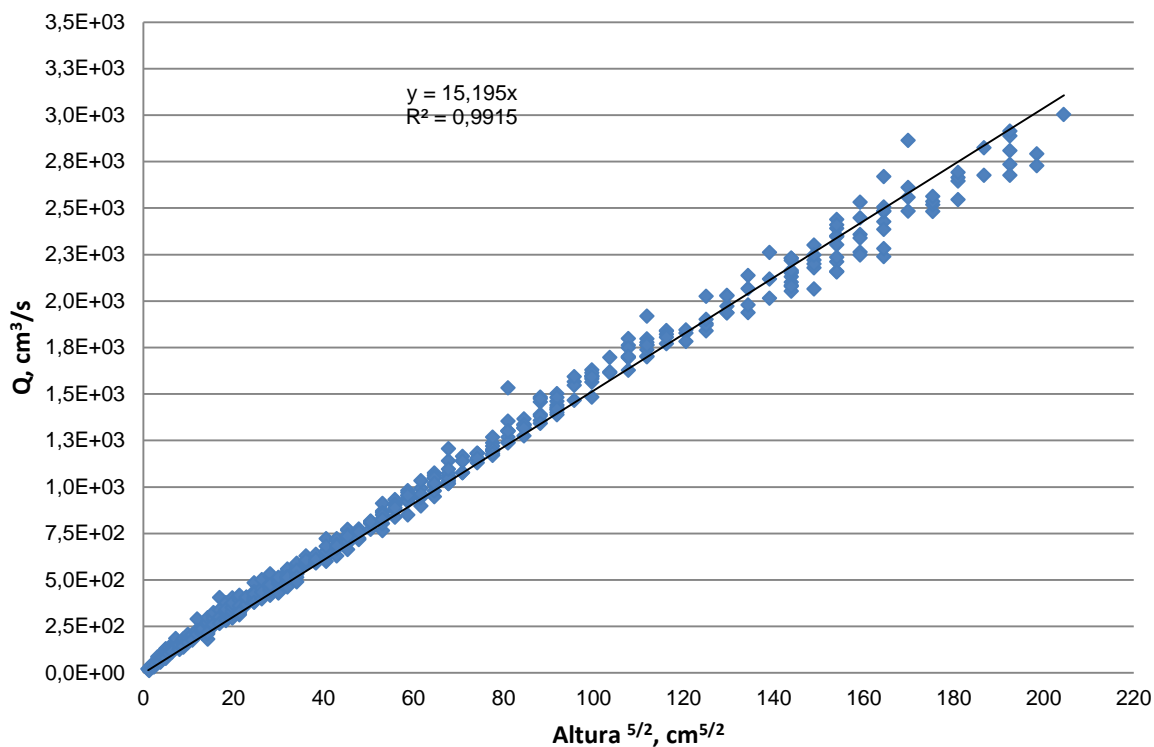


Figura 3.6. Caudal vs. $Altura^{5/2}$ del vertedero en “V” para la determinación del coeficiente de descarga

Tabla 3.4. Coeficientes del vertedero en “V”

$K_{real} (cm^{1/2}/s)$	15,195
$C_{d real}$	0,644
$C_{d promedio}$	0,691
ERROR (%)	7,44 %

Se obtiene también los caudales aproximados por cada 0,1 de altura desde los 0,7 cm que se marca en el vaso de vidrio comunicante del vertedero en “V” siendo ésta marca la altura mínima de medición, todos estos datos se exponen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Caudales para medidos en el vertedero en “V”

ALTURA (cm)	CAUDAL (cm³/s)	ALTURA (cm)	CAUDAL (cm³/s)
0,7	6,23	2,6	165,63
0,8	8,70	2,7	182,02
0,9	11,68	2,8	199,34
1,0	15,20	2,9	217,62
1,1	19,28	3,0	236,87
1,2	23,97	3,1	257,10
1,3	29,28	3,2	278,34
1,4	35,24	3,3	300,60
1,5	41,87	3,4	323,89
1,6	49,20	3,5	348,23
1,7	57,26	3,6	373,64
1,8	66,05	3,7	400,13
1,9	75,61	3,8	427,72
2,0	85,96	3,9	456,42
2,1	97,11	4,0	486,24
2,2	109,08	4,1	517,20
2,3	121,90	4,2	549,32
2,4	135,59	4,3	582,60
2,5	150,16	4,4	617,07
4,5	652,73	6,3	1 513,74
4,6	689,60	6,4	1 574,53
4,7	727,69	6,5	1 636,76
4,8	767,01	6,6	1 700,44
4,9	807,59	6,7	1 765,58
5,0	849,43	6,8	1 832,20
5,1	892,54	6,9	1 900,31
5,2	936,93	7,0	1 969,91
5,3	982,63	7,1	2 041,02
5,4	1 029,64	7,2	2 113,64

Tabla 3.5. Caudales para medidos en el vertedero en “V” (continuación...)

ALTURA (cm)	CAUDAL (cm ³ /s)	ALTURA (cm)	CAUDAL (cm ³ /s)
5,5	1 077,97	7,3	2 187,80
5,6	1 127,64	7,6	2 419,55
5,7	1 178,66	7,7	2 499,93
5,8	1 231,04	7,8	2 581,89
5,9	1 284,79	7,9	2 665,44
6,0	1 339,92	8,0	2 750,59
6,1	1 396,45	8,1	2 837,35
6,2	1 454,39	8,2	2 925,74

3.3.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN, RUGOSIDAD RELATIVA Y ABSOLUTA PARA LAS TUBERÍAS

Se realizó el cálculo del caudal individual para cada volumen y su respectivo tiempo de llenado, a partir de este dato se obtiene la velocidad de flujo aplicando la Ecuación [1.26] y el número de Reynolds utilizando la Ecuación [1.22], luego se determina el factor de fricción con la Ecuación [1.40] y se grafica el diagrama de Moody de donde se obtiene la rugosidad relativa y luego la rugosidad absoluta que será comparada con datos de bibliografía que se presentan en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Rugosidades absolutas teóricas de cada tubería

Tubería	Propiedad	Valor
Tubería de Cobre	ϵ/D	1E-06
Tubería de Hierro Galvanizado	ϵ (cm)	0,015
Tubería de PVC	ϵ/D	1E-06

ϵ : rugosidad absoluta

ϵ/D : rugosidad relativa

(Potter, 2002)

Se realizaron los diagramas de Moody para cada una de las tuberías que comprenden el equipo de prácticas de mediciones de pérdidas friccionales y

localizadas, a continuación se reúnen todas las tuberías del mismo diámetro y diferente material:

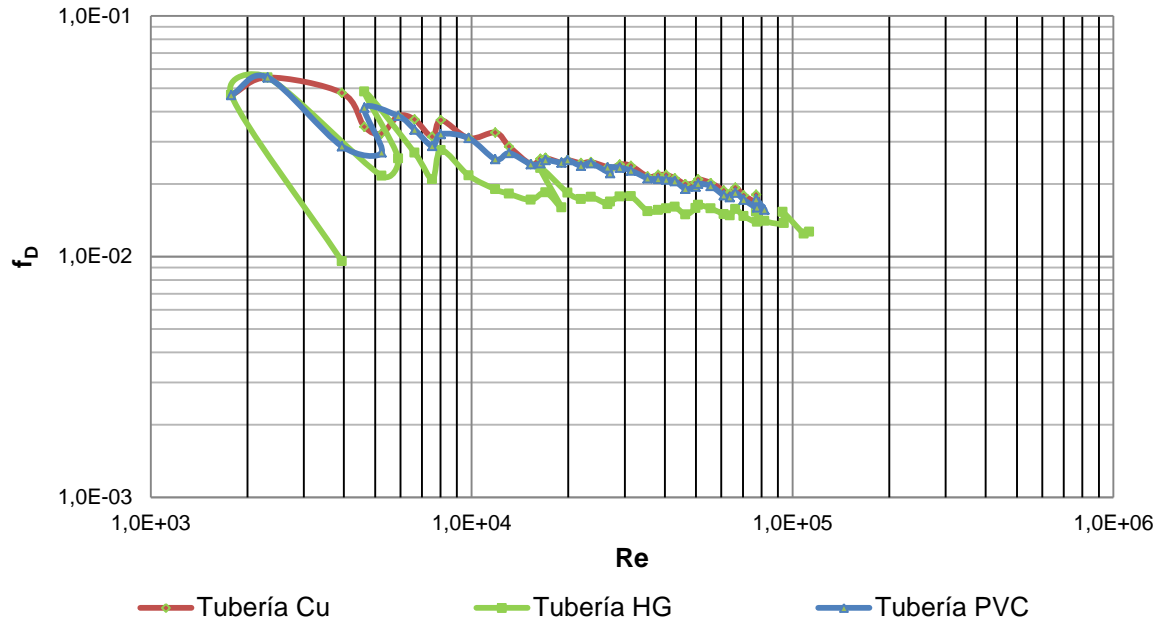


Figura 3.7. Diagrama de Moody, Tuberías de 1 1/4 " de diámetro

Las curvas de las tuberías de 1 1/4 " de diámetro presentan la misma tendencia, como se muestran en la Figura 3.7, en el caso de las tuberías de PVC y cobre se superponen la una a la otra puesto que en teoría poseen la misma rugosidad relativa al ser tuberías lisas. La curva de hierro galvanizado presenta una rugosidad relativa menor al de una tubería lisa.

Las curvas de las tuberías de 1 " de diámetro presentan la misma tendencia, como se muestran en la Figura 3.8., en este caso las tuberías de hierro galvanizado y cobre se superponen la una a la otra a pesar de que no poseen la misma rugosidad relativa, esto hace pensar que para este diámetro el hierro galvanizado se comporta como tubería lisa.

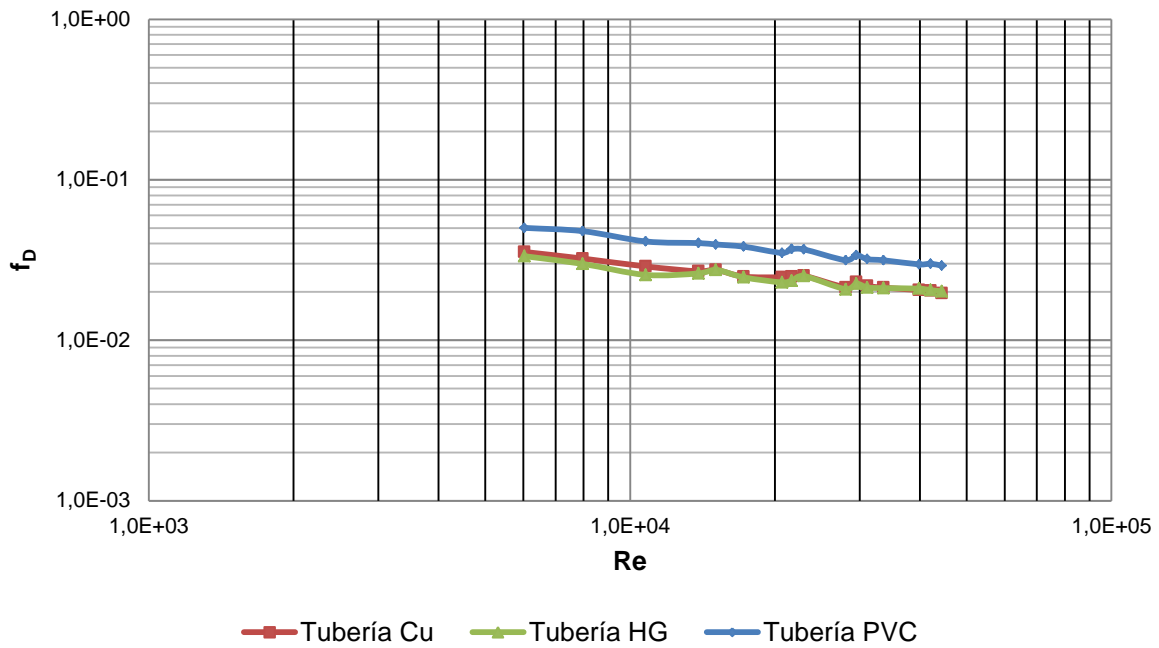


Figura 3.8. Diagrama de Moody, Tuberías de 1 " de diámetro

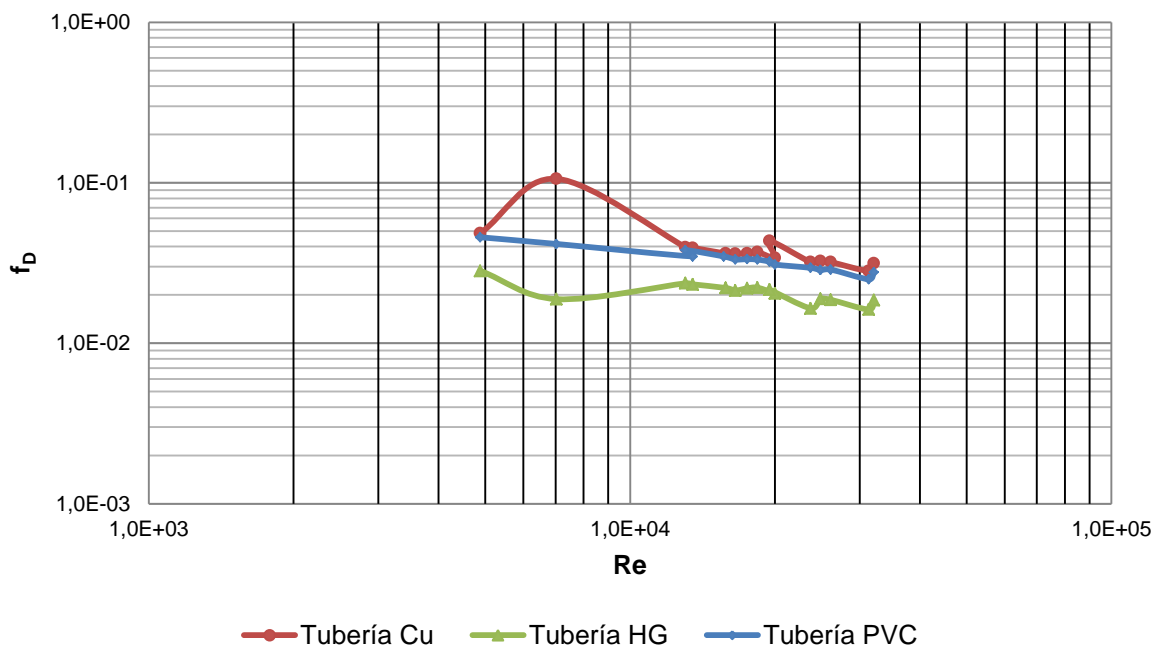


Figura 3.9. Diagrama de Moody, Tuberías de $\frac{3}{4}$ " de diámetro

Las curvas de las tuberías de $\frac{3}{4}$ " de diámetro presentan la misma tendencia, como se muestran en la Figura 3.9. y nuevamente las curvas de PVC y cobre se superponen la una a la otra comportándose como tuberías lisas.

El hierro galvanizado demuestra que a las condiciones en que fueron realizadas las pruebas experimentales tiene un comportamiento similar a una tubería lisa, a pesar de tener una rugosidad absoluta teórica mucho mayor.

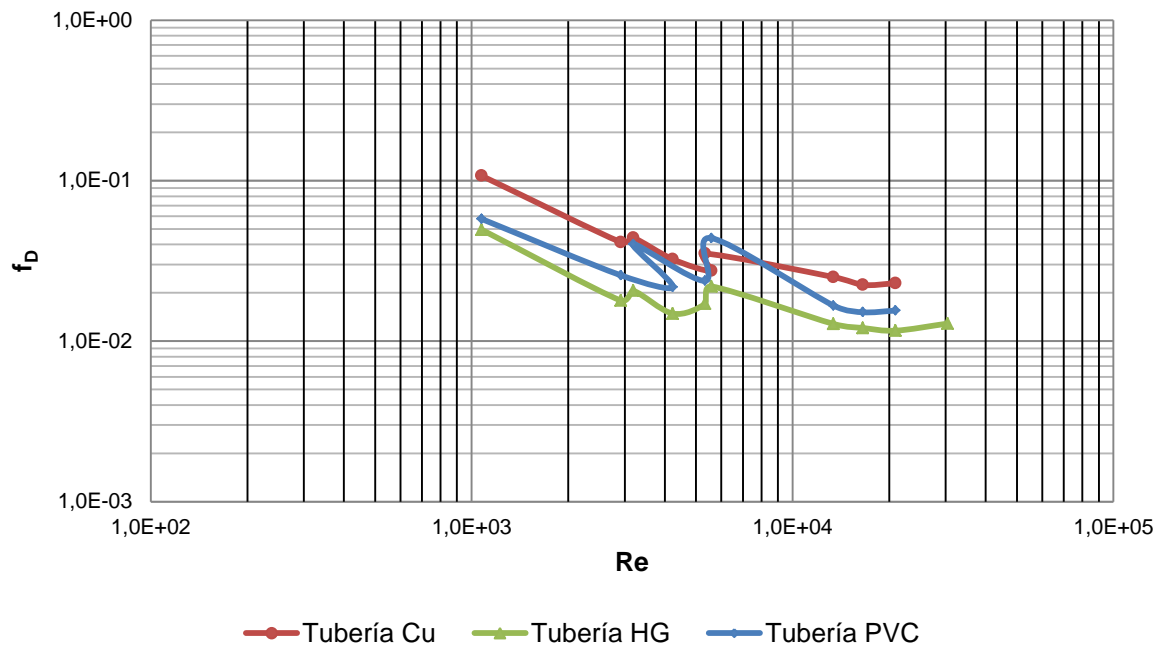


Figura 3.10. Diagrama de Moody, Tubería de ½ " de diámetro

Las curvas de las tuberías de ½ " de diámetro presentan la misma tendencia como se muestran en la Figura 3.10., pero al ser un diámetro de menor tamaño que en las pruebas anteriores, se puede apreciar el comportamiento de cada material.

Cabe destacar que todos los resultados se encuentran en la zona de flujo turbulento y que a medida que aumenta el caudal las curvas se estabilizan, si se lograra obtener más datos experimentales se podría apreciar de mejor manera, pero esto no es posible puesto que los manómetros tienen un rango de medición limitado.

A continuación se reúnen todas las tuberías del mismo material y diferente diámetro, como se muestran en la Figura 3.11., la Figura 3.12. y la Figura 3.13.:

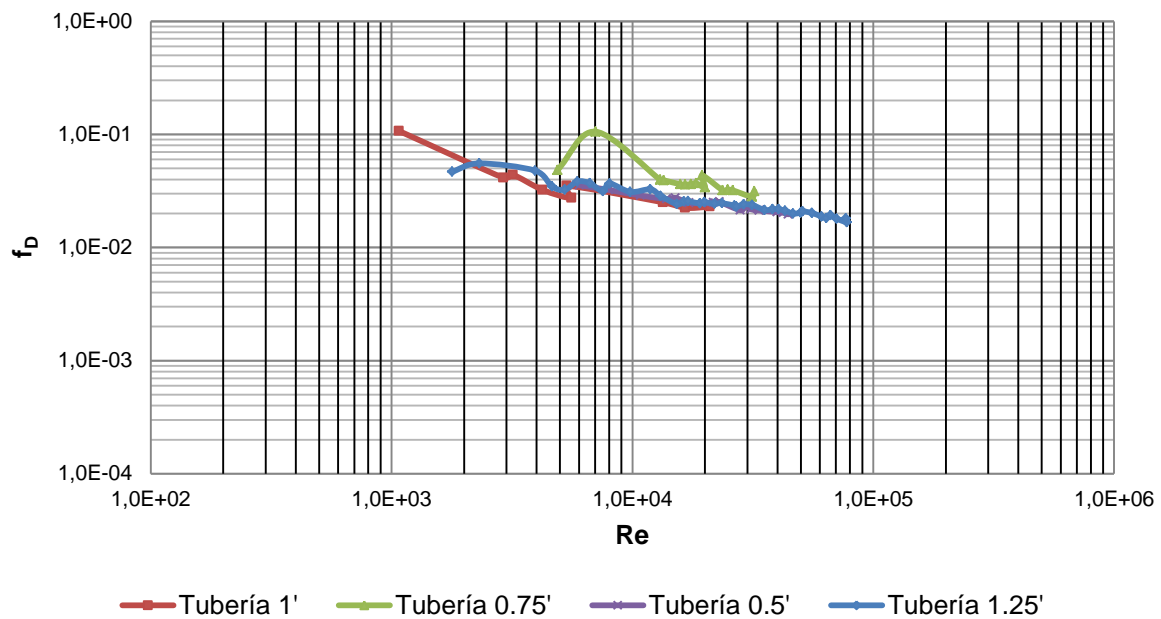


Figura 3.11. Diagrama de Moody, Tuberías de Cobre

Las curvas de las tuberías de cobre prácticamente confluyen en la misma curva, al ser un material liso su rugosidad relativa no depende del diámetro.

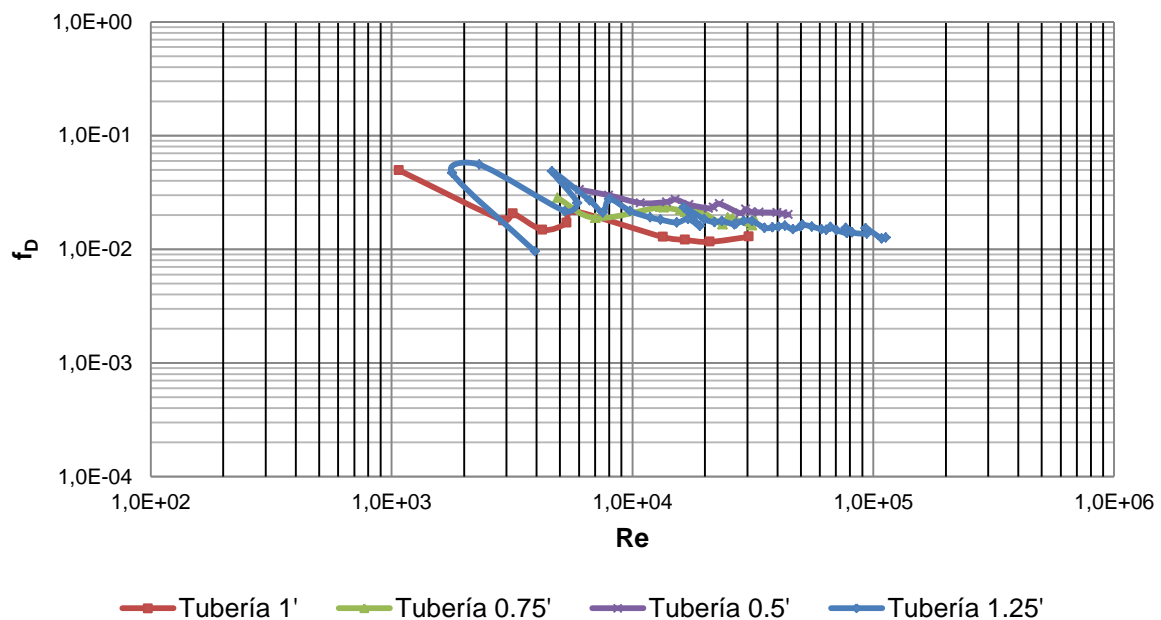


Figura 3.12. Diagrama de Moody, Tuberías de Hierro Galvanizado

Las curvas de las tuberías de hierro galvanizado difieren entre sí puesto que la rugosidad relativa depende del diámetro de la tubería.

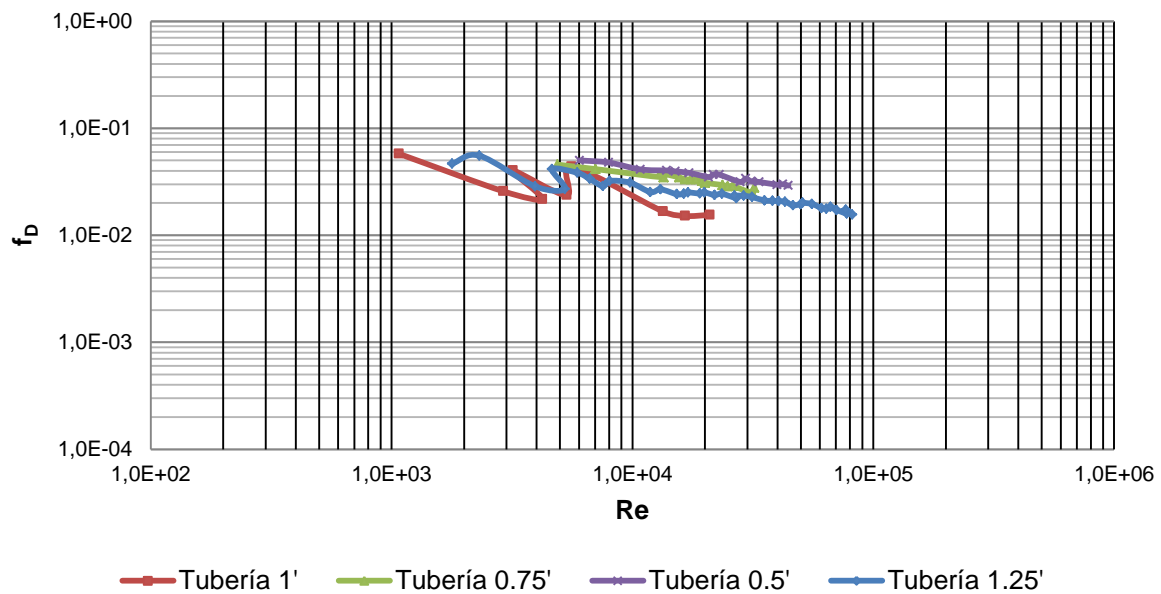


Figura 3.13. Diagrama de Moody, Tuberías de PVC

Las curvas de las tuberías de PVC deberían tener un comportamiento similar a las tuberías de PVC por ser tuberías lisas.

El resumen de las rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería analizada, se presenta en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería

Tubería	ϵ/D	ϵ (cm)
Tubería de Cobre de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de PVC de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Cobre de 1 "	1E-06	2,54E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de 1 "	1E-06	2,54E-06
Tubería de PVC de 1 "	5E-06	1,27 E-05
Tubería de Cobre de ¾ "	5E-05	1,27 E-04
Tubería de Hierro Galvanizado de ¾ "	< 1E-06	< 7,50E-07

Tabla 3.7. Rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería
(continuación...)

Tubería	ϵ/D	ϵ (cm)
Tubería de PVC de ¾ "	1E-05	7,50E-06
Tubería de Cobre de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de PVC de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06

ϵ : rugosidad absoluta

ϵ/D : rugosidad relativa

3.3.3 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD SOBRE LAS PÉRDIDAS DE CARGA PARA LAS TUBERÍAS

Para flujos turbulentos las pérdidas de carga aumentan proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad. Siendo las pérdidas de carga la diferencia entre las mediciones de ambos lados del manómetro en "U" invertida que fue utilizado en las tomas de presión de cada tubería.

A continuación se presentan todos los gráficos donde se visualiza el efecto de la velocidad en la pérdida de carga para cada tubería:

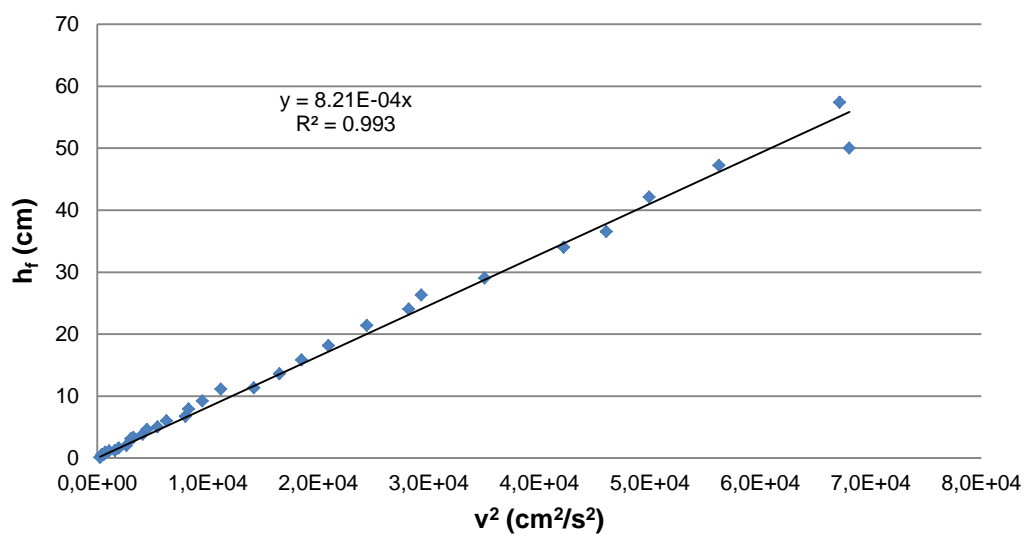


Figura 3.14. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro

Se puede observar que las pérdidas de carga son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías de cobre de 1 ¼ " de diámetro, tal como se muestra en la Figura 3.15.

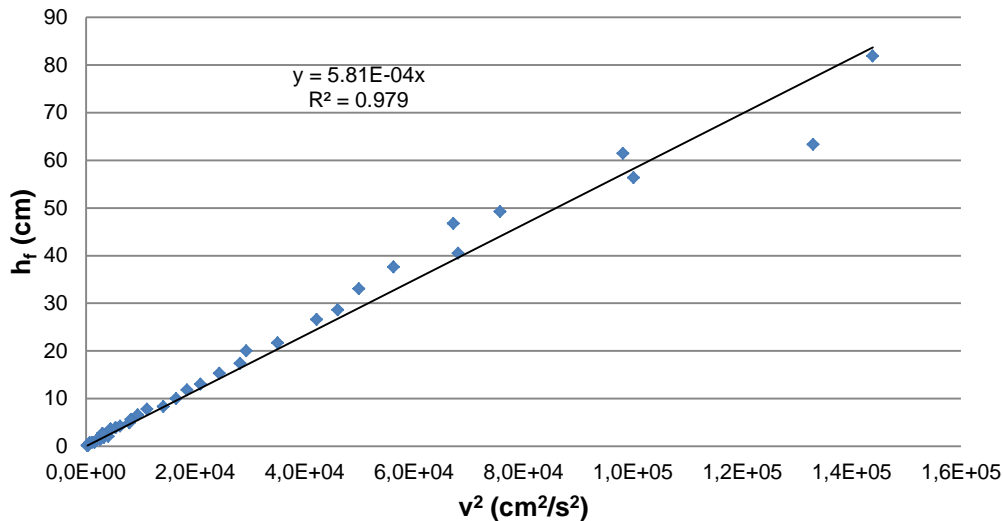


Figura 3.15. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro

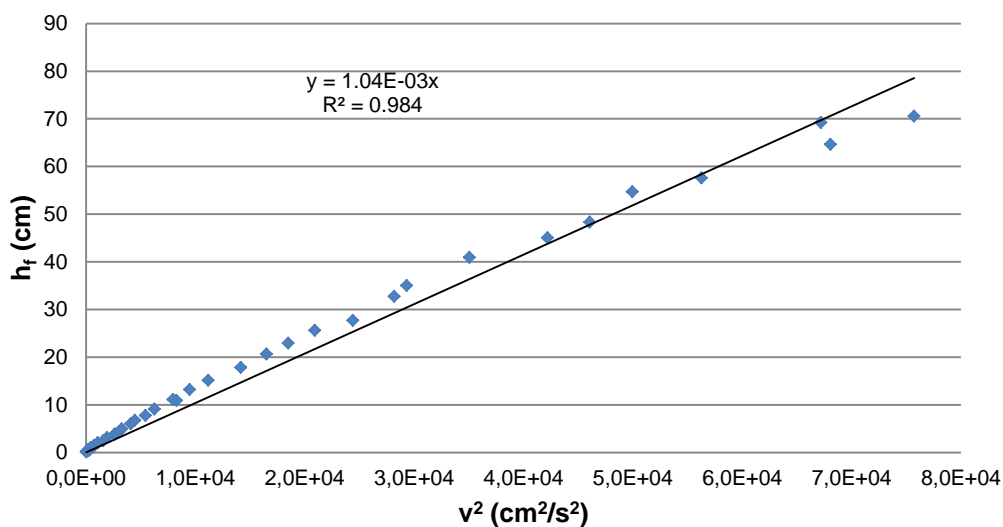


Figura 3.16. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro

De igual manera se observa que las pérdidas de carga son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías de hierro

galvanizado y PVC de 1 ¼ " de diámetro, de esta manera podría decirse que el material no influye en el comportamiento de las pérdidas friccionales, tal como se muestran en la Figura 3.15. y Figura 3.16.

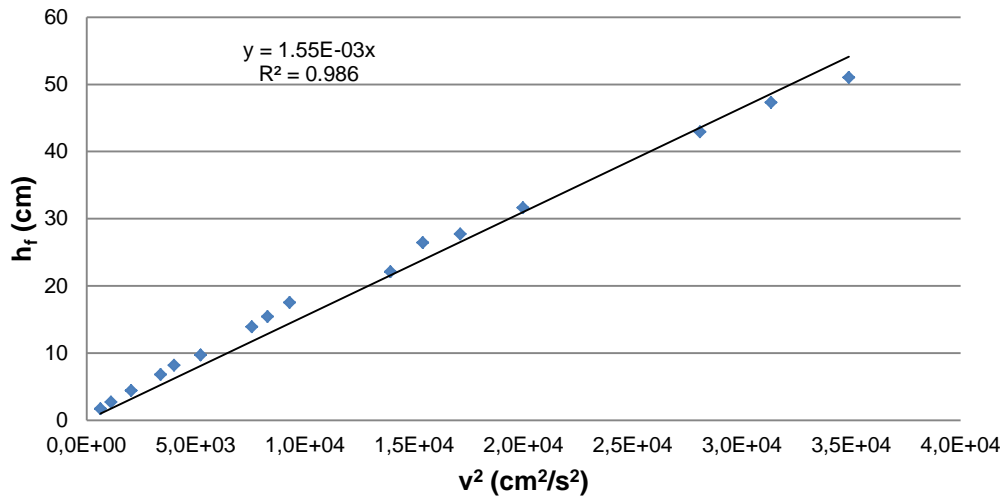


Figura 3.17. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 " de diámetro

Si se comparan las Figuras 3.14. con la Figura 3.17. se observa que la influencia del cuadrado de la velocidad de flujo afecta de la misma manera a tuberías del mismo material.

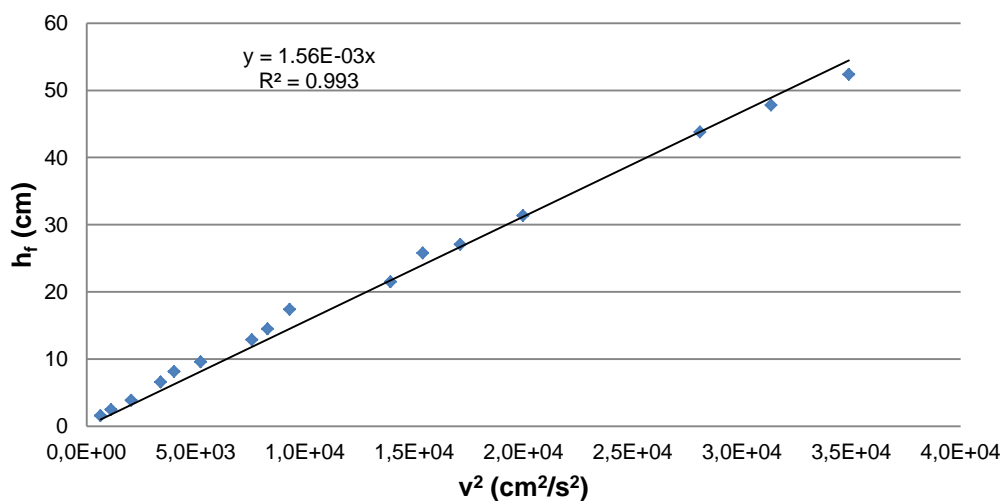


Figura 3.18. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 " de diámetro

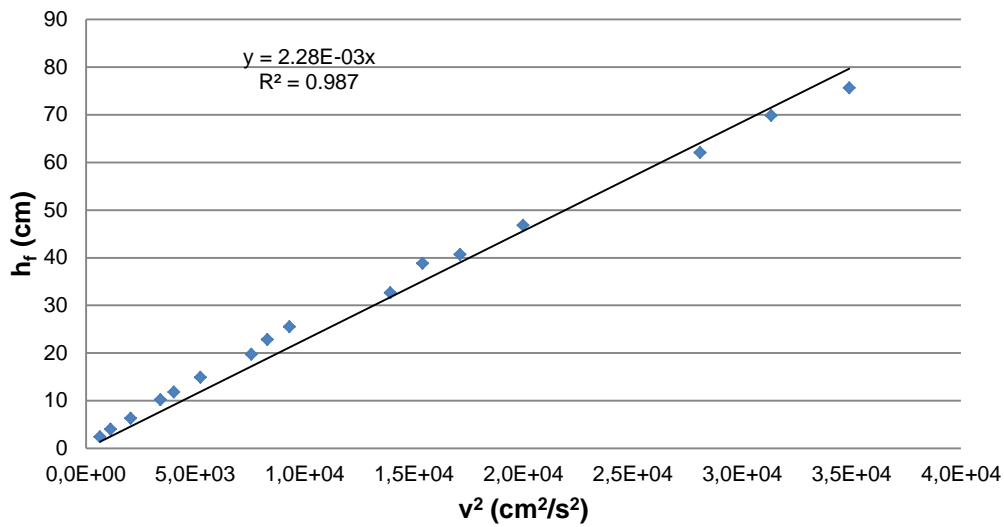


Figura 3.19. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 " de diámetro

Se comparan las Figuras 3.15. con la Figura 3.19. y la Figura 3.16. con la Figura 3.19, se observa que la influencia del cuadrado de la velocidad de flujo afecta de la misma manera a tuberías de hierro galvanizado y PVC incluso si se varía el diámetro de la sección de paso del fluido.

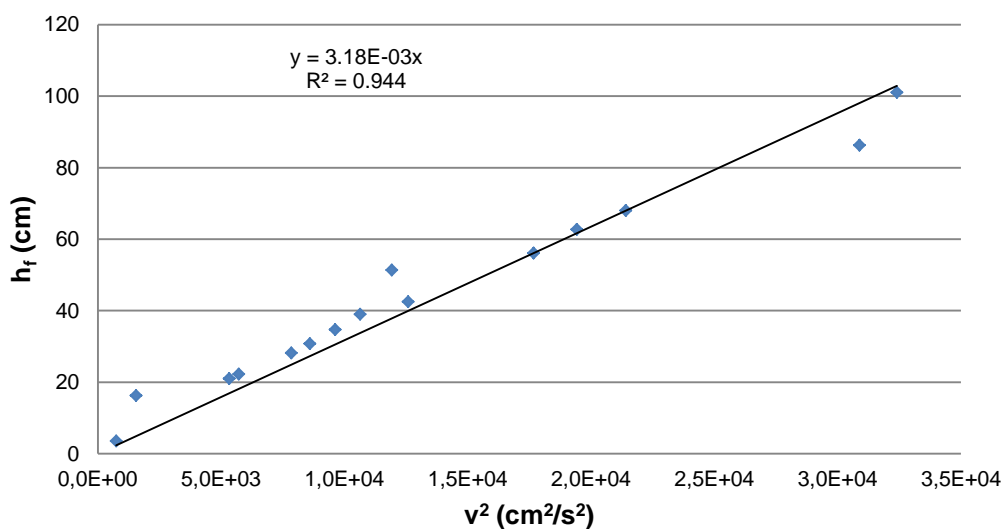


Figura 3.20. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de ¾ " de diámetro

A medida que disminuye el diámetro de la sección de paso del fluido por las tuberías la cantidad de datos disminuye y las pérdidas de carga aumentan, independientemente del tipo de material que componen las tuberías.

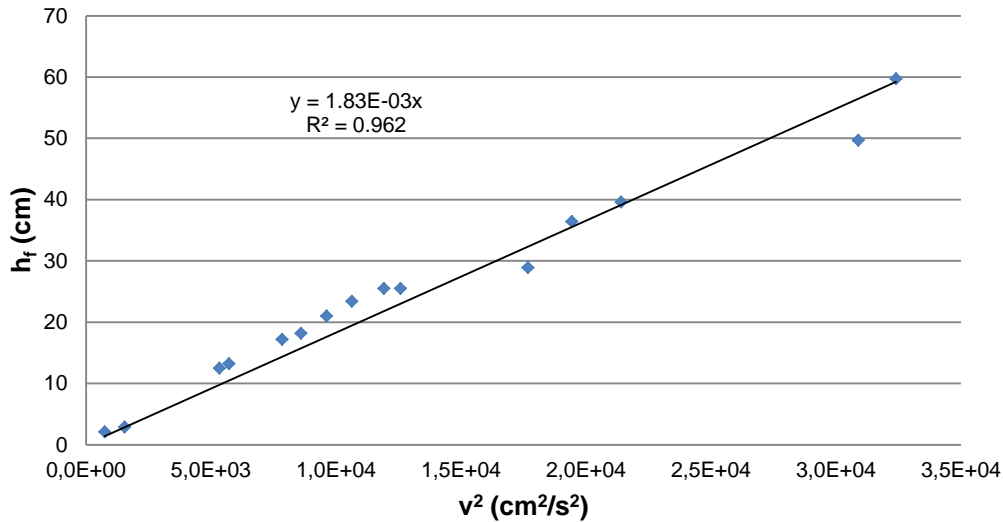


Figura 3.21. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{3}{4}$ " de diámetro

A medida que disminuye el diámetro de las tuberías, los datos de pérdidas de carga vs. el cuadrado de la velocidad se desplazan ligeramente de la línea de tendencia.

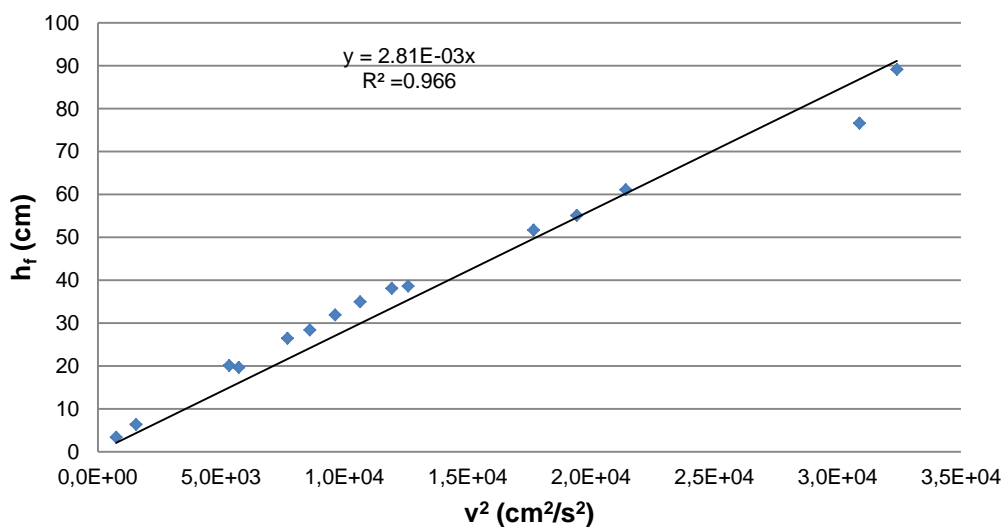


Figura 3.22. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro

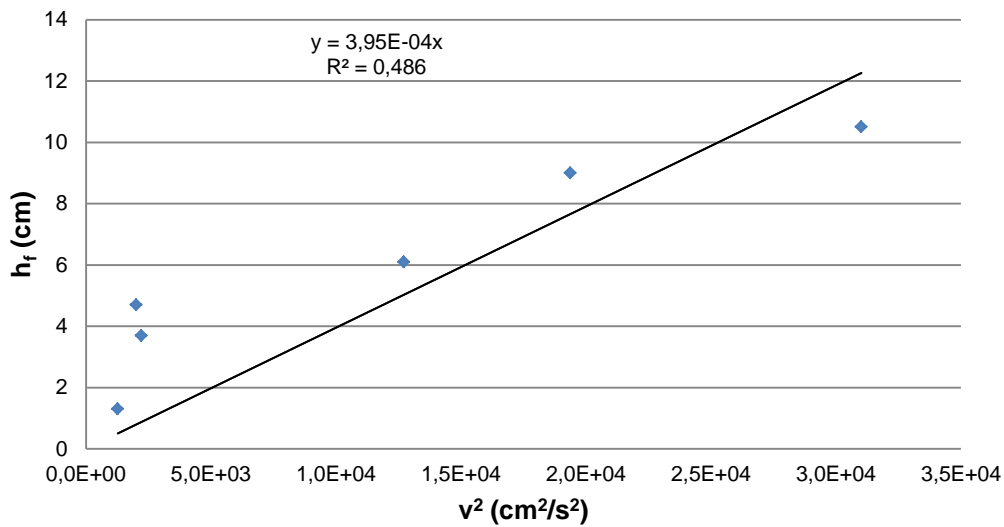


Figura 3.23. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de ½ " de diámetro

En la Figura 3.23. se muestra que el error humano es parte de la experimentación puesto que la línea de tendencia no tenga un R^2 cercano a 1 para determinar que el comportamiento es directamente proporcional entre las pérdidas de carga y el cuadrado de la velocidad de flujo.

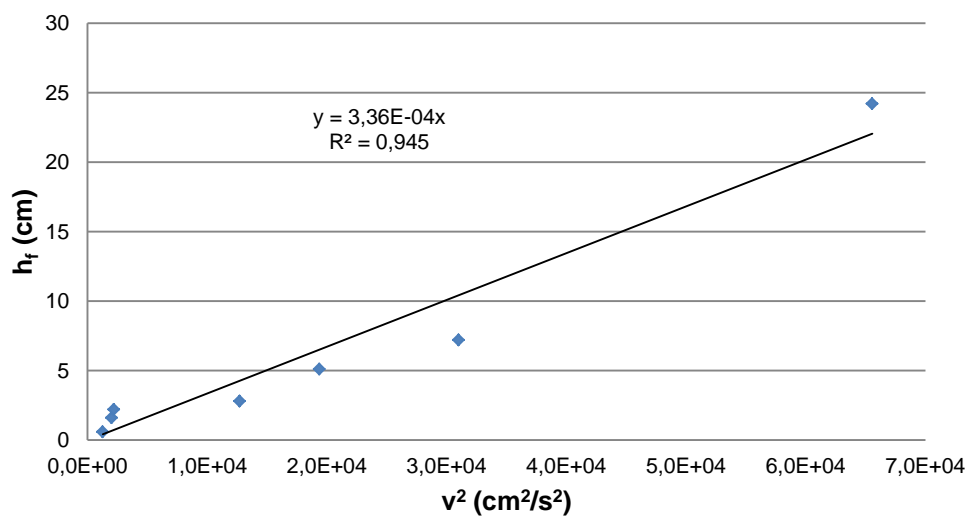


Figura 3.24. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de ½ " de diámetro

Incluso con una cantidad tan pequeña de datos como se muestran en la Figura 3.24. y la Figuras 3.25. se demuestra la misma tendencia que en diagramas que presentan mayor cantidad de datos.

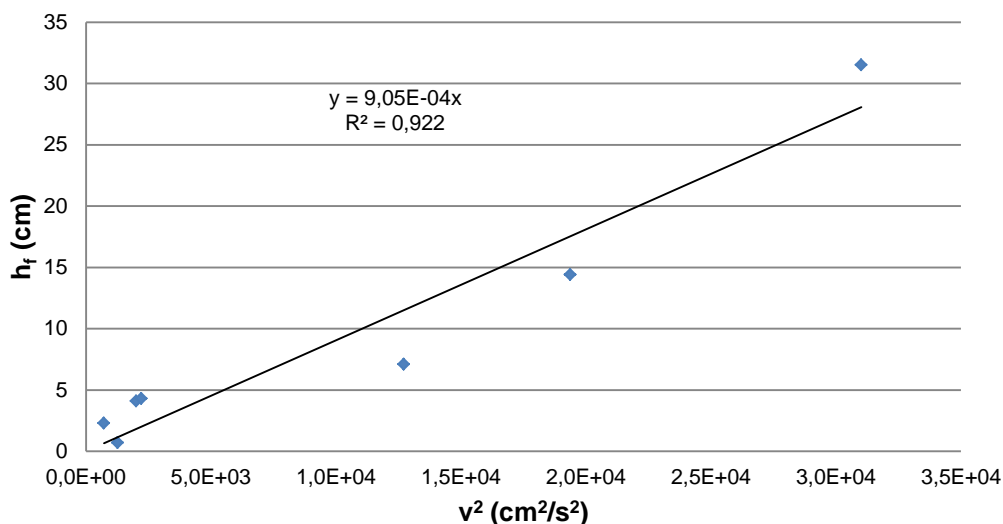


Figura 3.25. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de ½ " de diámetro

Queda demostrado que la pérdida de carga es directamente proporcional con el cuadrado de la velocidad del flujo turbulento para todas las tuberías independientemente del material y diámetro de las mismas.

3.3.4 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RESISTENCIA DE CADA ACCESORIO

Se realizó el cálculo del caudal individual para cada volumen y su respectivo tiempo de llenado, a partir de este dato se obtiene la velocidad de flujo aplicando la Ecuación [1.26] y el número de Reynolds aplicando la Ecuación [1.22], luego se determina el factor de fricción con el diagrama de Moody y se obtiene el coeficiente de resistencia a partir de la Ecuación [1.43].

A continuación la Tabla 3.8. presenta el resumen de los coeficientes de resistencia para cada accesorio que comprenden el equipo de prácticas de mediciones de pérdidas friccionales y localizas:

Tabla 3.8. Coeficientes de Resistencia para cada accesorio

ACCESORIO	$K_{resistencia}$	ACCESORIO	$K_{resistencia}$
Codo 90° superior	1,168	Válvula de compuerta 3 vueltas cerrada	2,040
Codo 90° inferior	1,044	Válvula de compuerta 4 vueltas cerrada	5,852
Codo 45°	0,448	Válvula de compuerta 5 vueltas cerrada	21,145
Válvula de globo Abierta totalmente	6,101	Válvula de bola Abierta totalmente	0,348
Válvula de globo ½ vuelta cerrada	7,475	Válvula de bola ¼ vuelta cerrada	0,513
Válvula de globo 1 vuelta cerrada	8,052	Válvula de bola ½ vuelta cerrada	1,915
Válvula de globo 1 ½ vueltas cerrada	11,717	Válvula de bola ¾ vuelta cerrada	4,343
Válvula de globo 2 vueltas cerrada	30,247	Expansión súbita 4 cm de separación	0,208
Válvula de compuerta Totalmente abierta	0,228	Expansión súbita 14,5 cm de separación	0,194
Válvula de compuerta 1 vuelta cerrada	0,306	Contracción súbita 4 cm de separación	0,868
Válvula de compuerta 2 vueltas cerrada	0,972	Contracción súbita 14,5 cm de separación	0,967

3.3.5 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD SOBRE LAS PÉRDIDAS DE CARGA PARA LOS ACCESORIOS

Para flujos turbulentos las pérdidas de carga aumentan proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad. Siendo las pérdidas de carga la diferencia entre las mediciones de ambos lados del manómetro en “U” invertida que fue utilizado en las tomas de presión de cada accesorio.

A continuación se presentan todos los gráficos donde se visualiza el efecto de la velocidad en la pérdida de carga para cada accesorio:

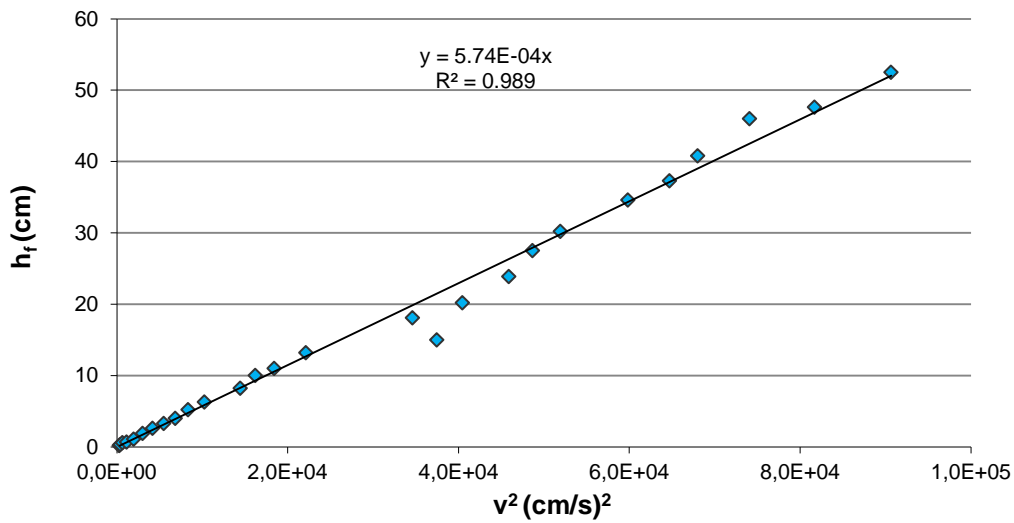


Figura 3.26. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90 ° superior

Para los codos de 90 ° se demuestra que las pérdidas de carga varían de manera directamente proporcional con el cuadrado de la velocidad de flujo independientemente de su posicionamiento dentro de un sistema de transporte de un fluido, tal como se muestran en las Figuras 3.26. y 3.27.

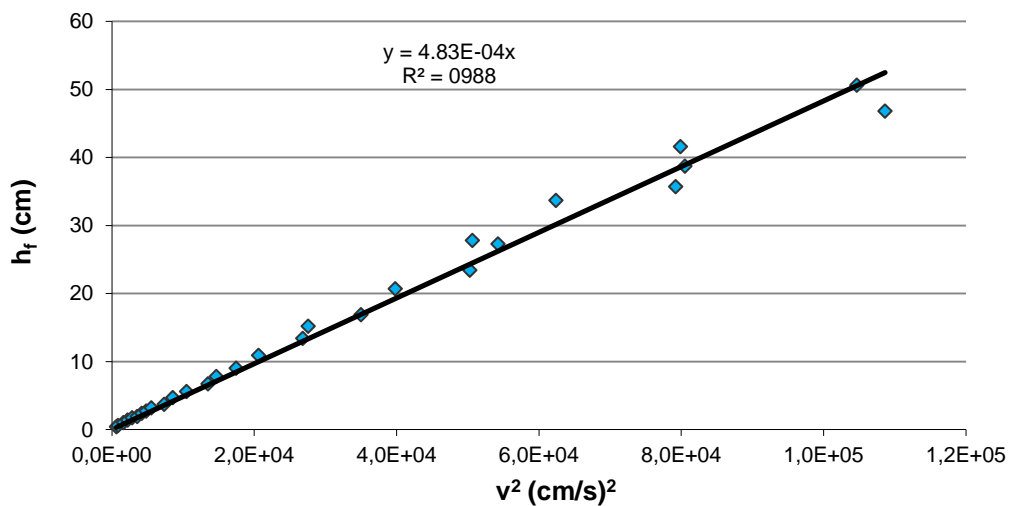


Figura 3.27. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90 ° inferior

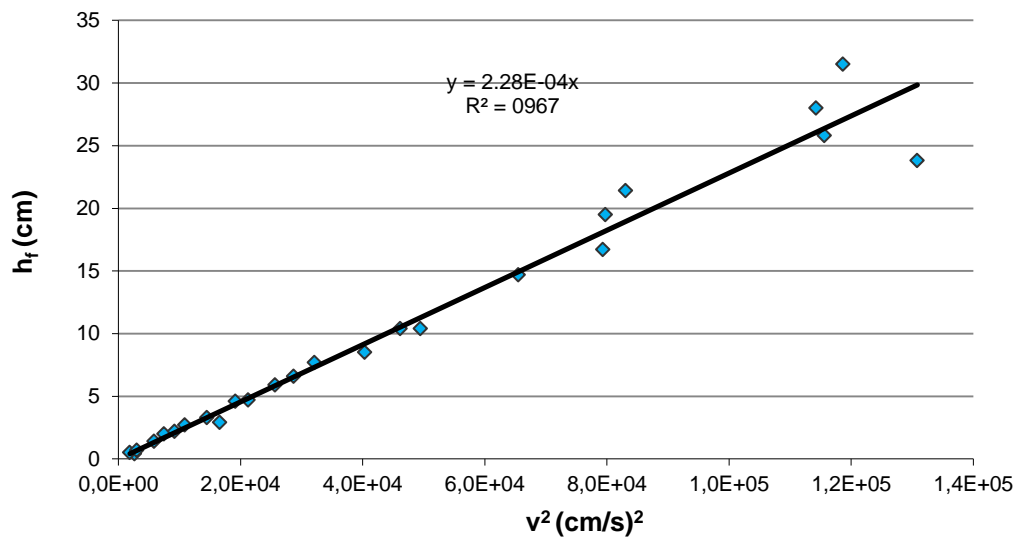


Figura 3.28. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 45°

De igual forma para los codos de 45° , la tendencia es la misma y se concluye que presenta el mismo comportamiento que sus similares de 90° .

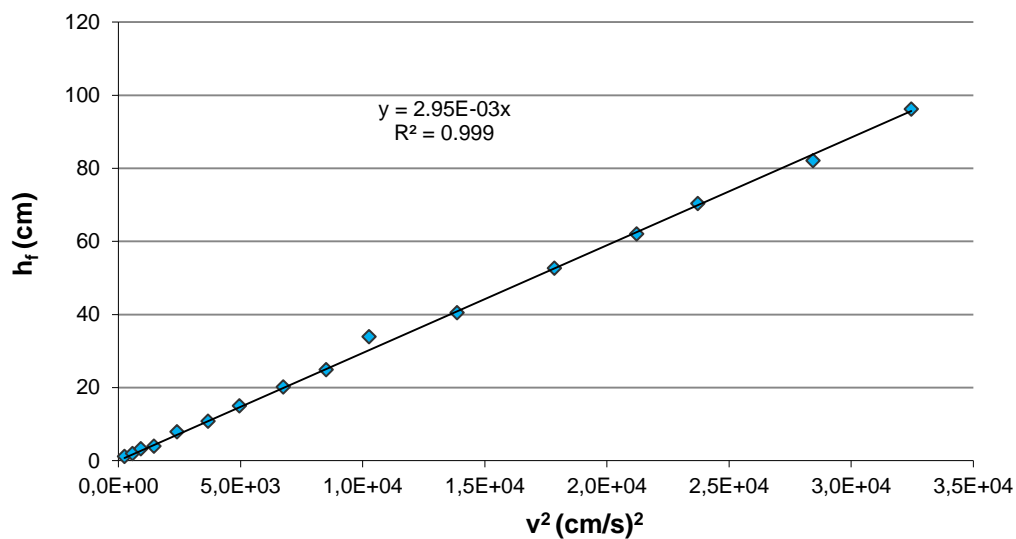


Figura 3.29. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo totalmente abierta

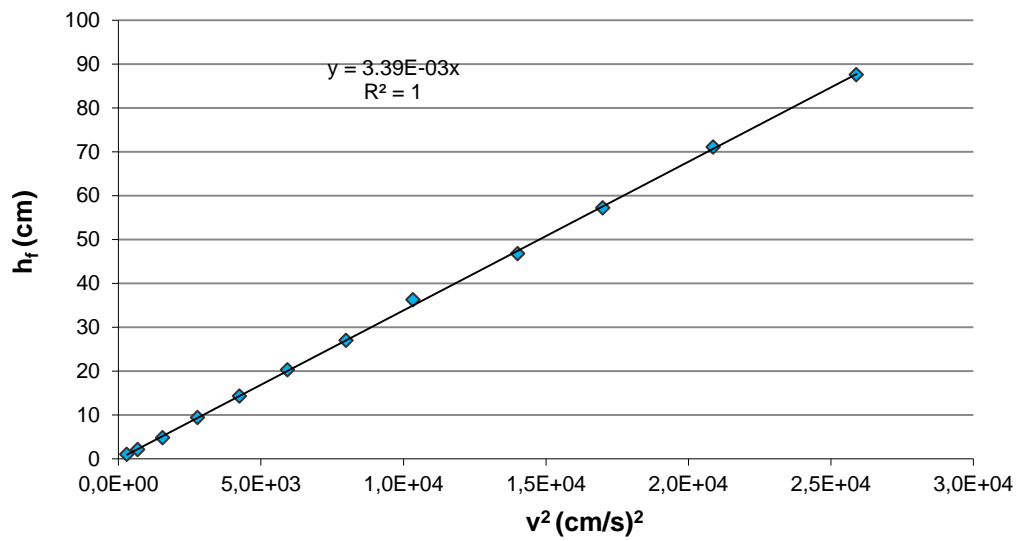


Figura 3.30. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1/2 vuelta

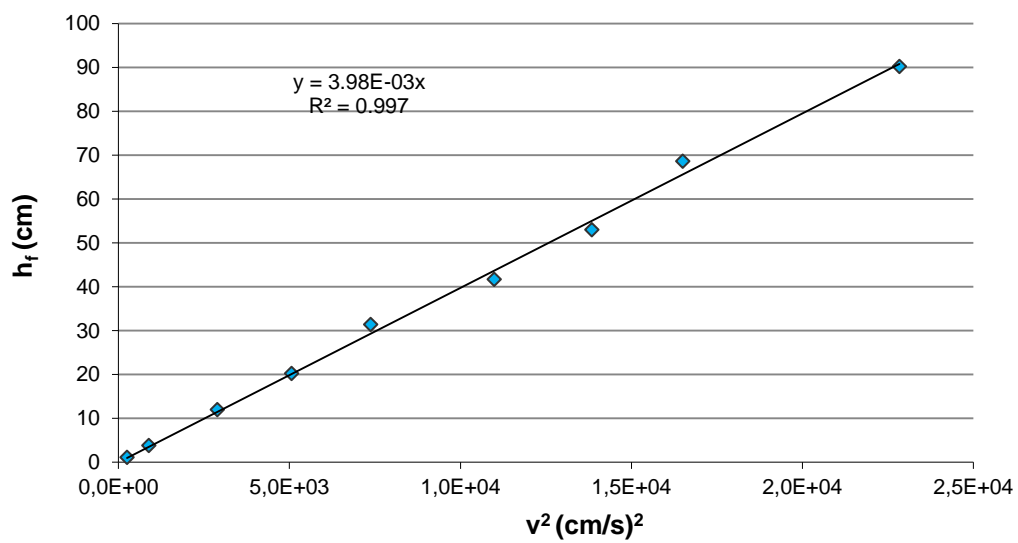


Figura 3.31. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 1/2 vueltas

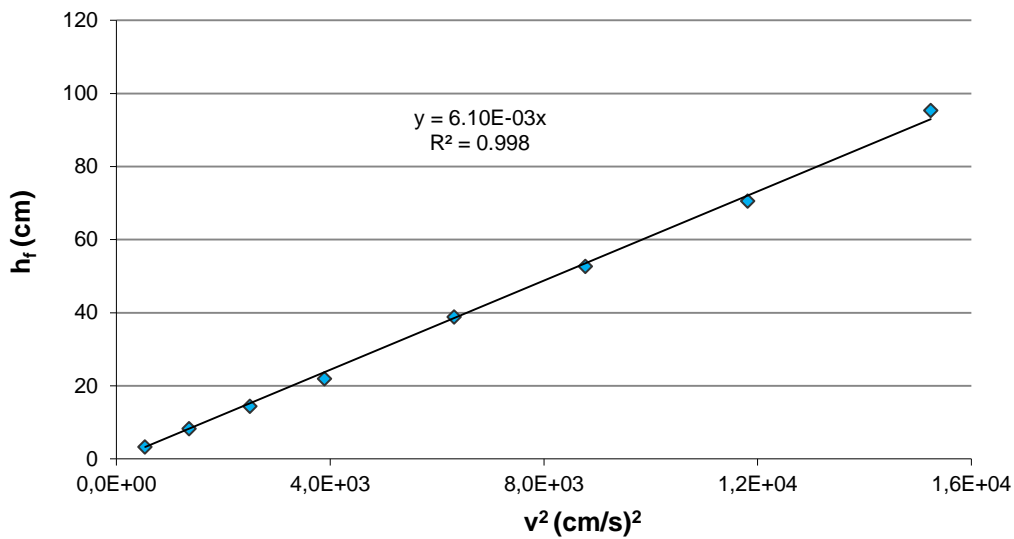


Figura 3.32. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 ½ vueltas

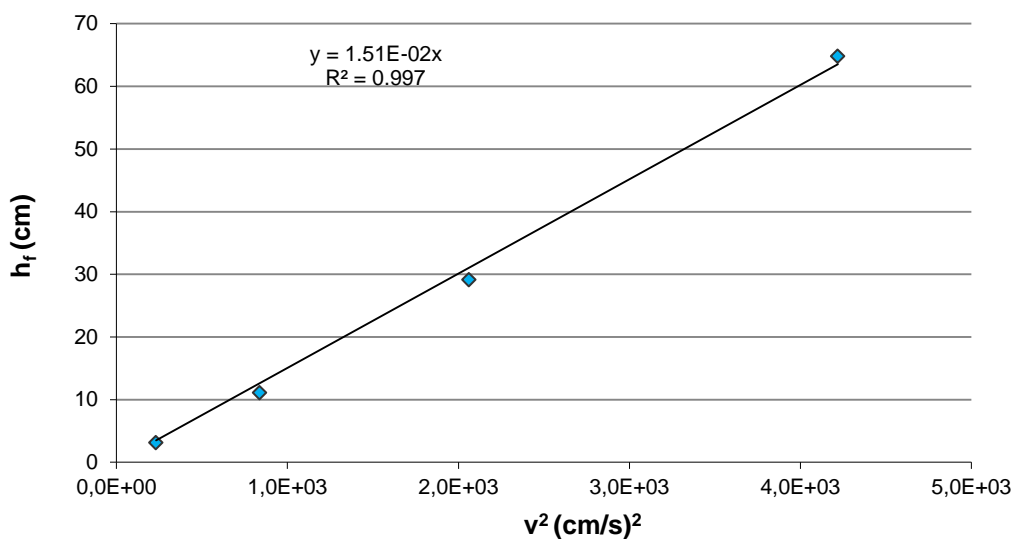


Figura 3.33. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo 2 vueltas

Para la válvula de globo se obtiene que las pérdidas localizadas aumentan a medida que el paso del fluido se cierra, como se muestran desde la Figura 3.29. a la Figura 3.33., de esta manera se obtienen menos cantidad de datos pero el comportamiento entre las pérdidas de carga y el cuadrado de la velocidad varían de forma proporcional.

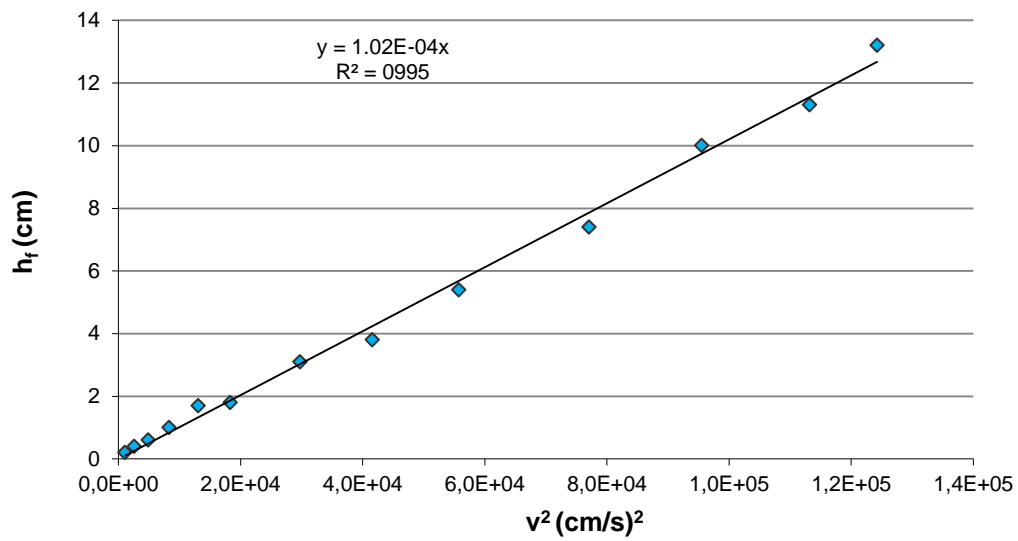


Figura 3.34. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta totalmente abierta

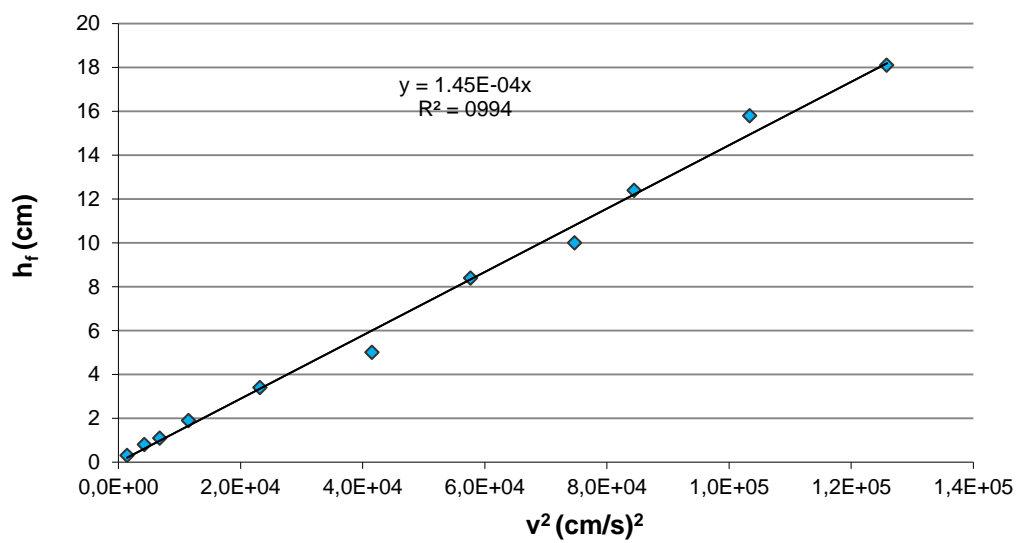


Figura 3.35. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 1 vuelta

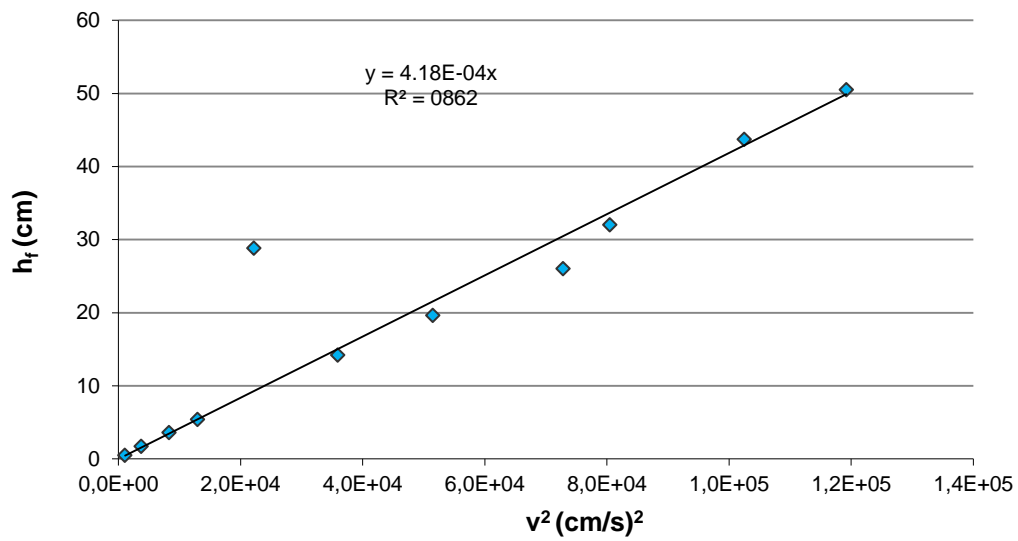


Figura 3.36. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 2 vueltas

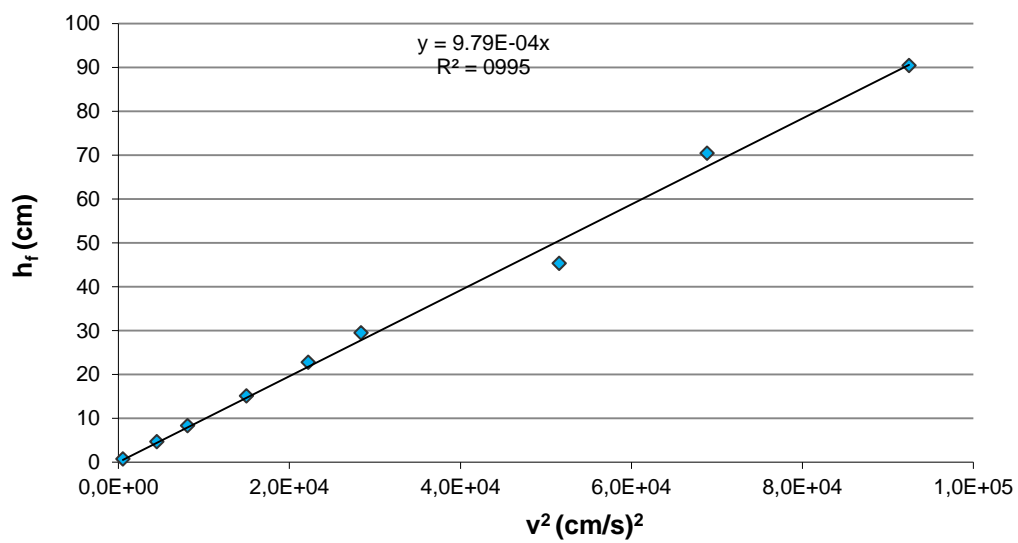


Figura 3.37. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 3 vueltas

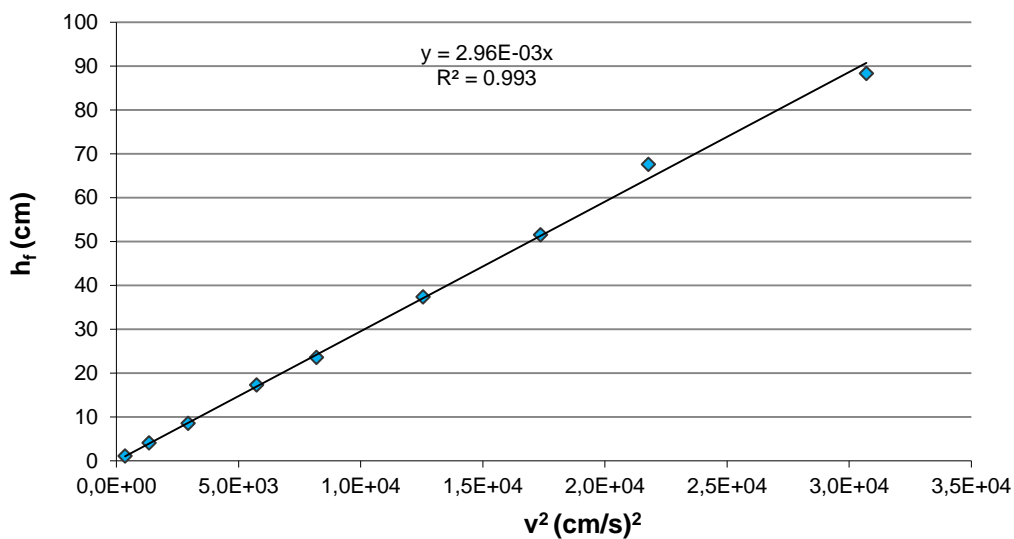


Figura 3.38. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 4 vueltas

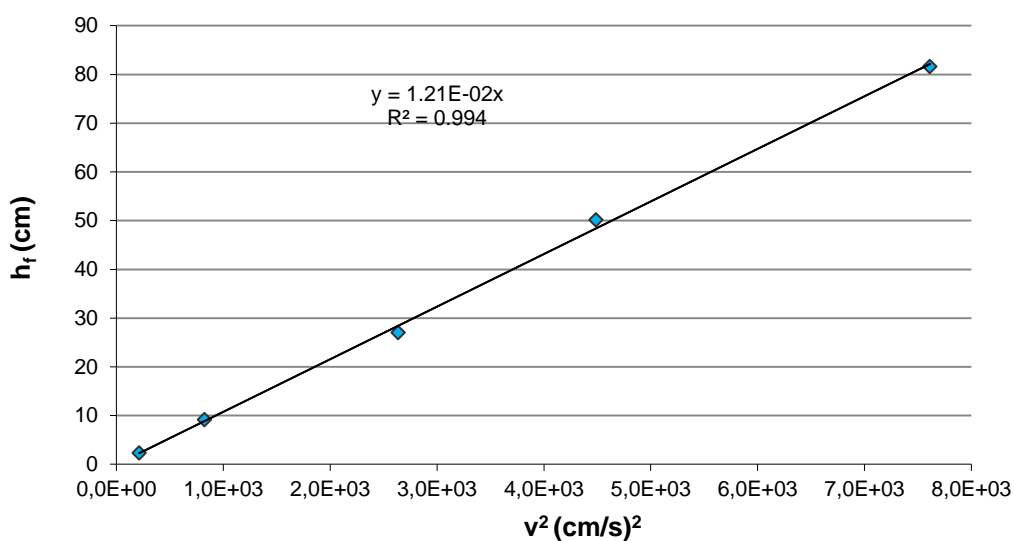


Figura 3.39. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 5 vueltas

Para la válvula de compuerta igualmente, se obtiene que las pérdidas localizadas aumentan a medida que el paso del fluido se cierra, como se muestran desde la Figura 3.33. a la Figura 3.39., de esta manera se obtienen menos cantidad de datos pero el comportamiento entre las pérdidas de carga y el cuadrado de la velocidad varían de forma proporcional.

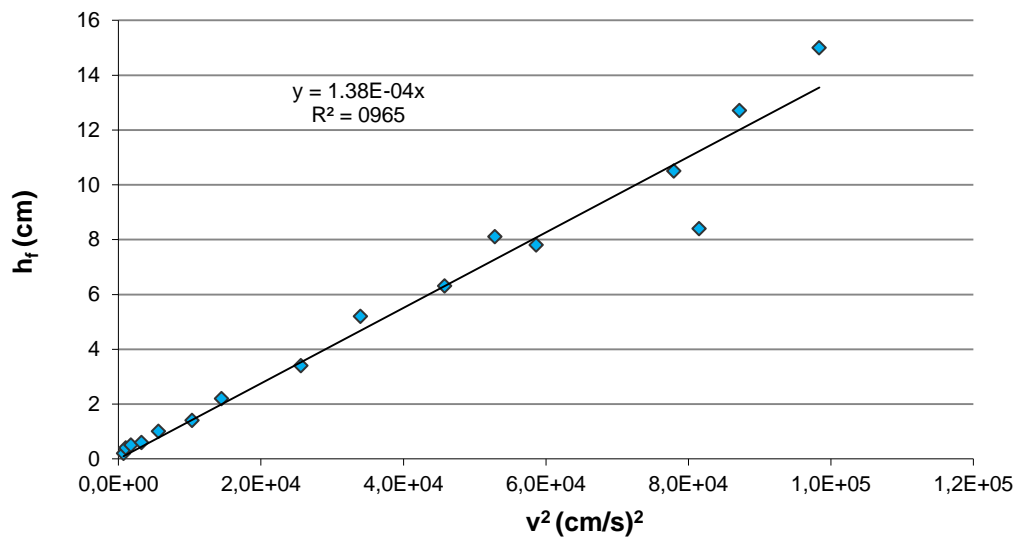


Figura 3.40. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola totalmente abierta

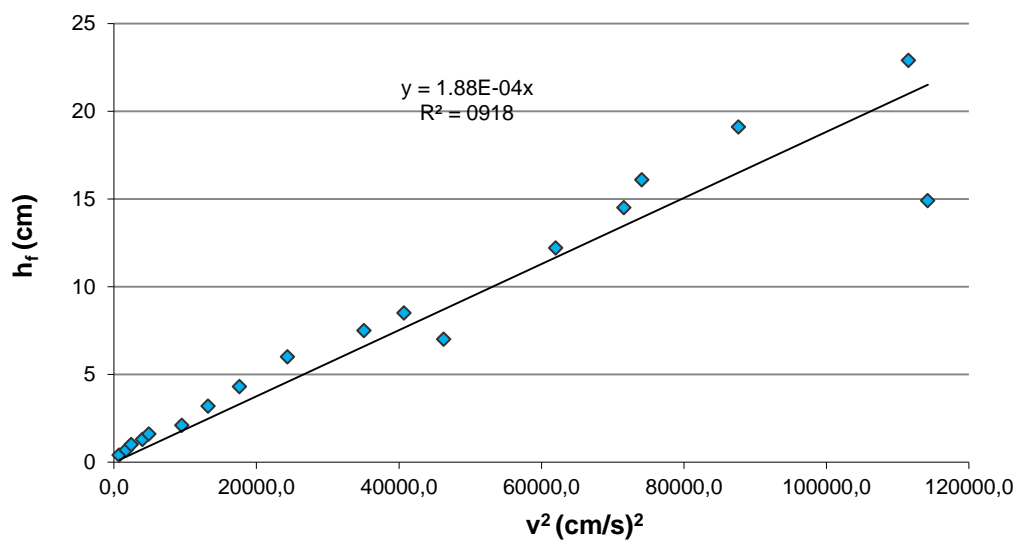


Figura 3.41. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola cerrada $\frac{1}{4}$ vuelta

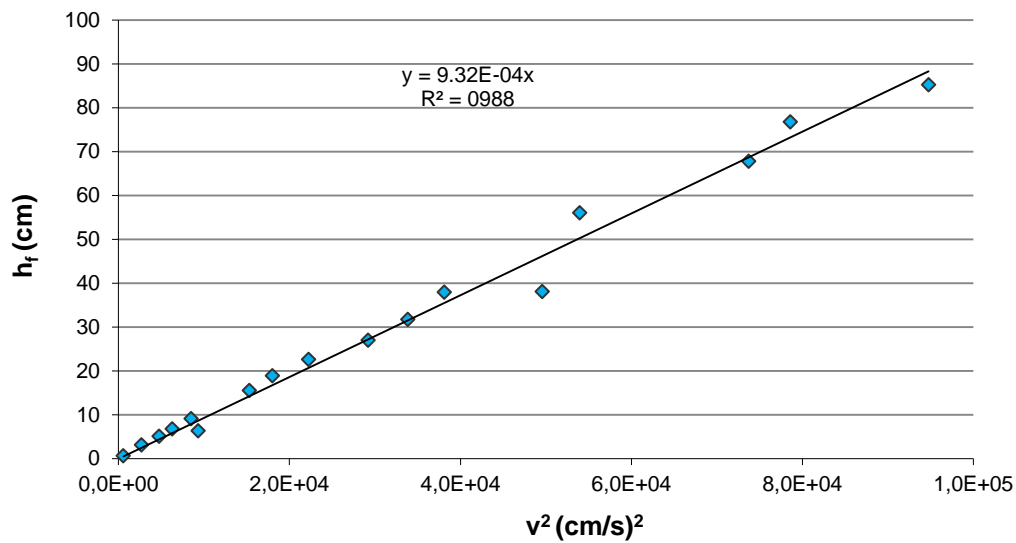


Figura 3.42. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta

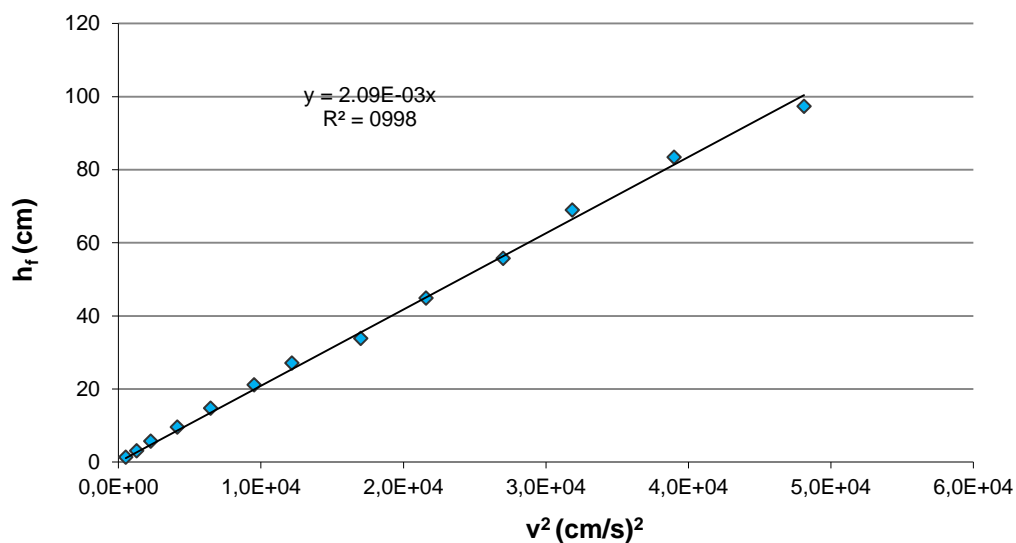


Figura 3.43. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada $\frac{3}{4}$ vuelta

En la válvula de bola al igual que las válvulas anteriores, se obtiene que las pérdidas localizadas aumentan a medida que el paso del fluido se cierra, como se muestran desde la Figura 3.40. a la Figura 3.43., de esta manera se obtienen menos cantidad de datos pero el comportamiento entre las pérdidas de carga y el cuadrado de la velocidad varían de forma proporcional.

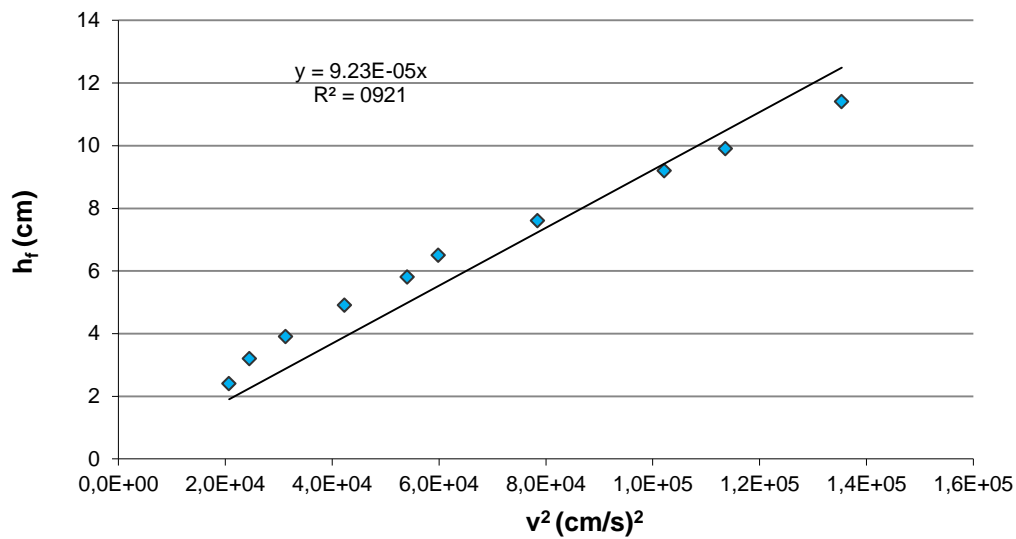


Figura 3.44. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 4 cm

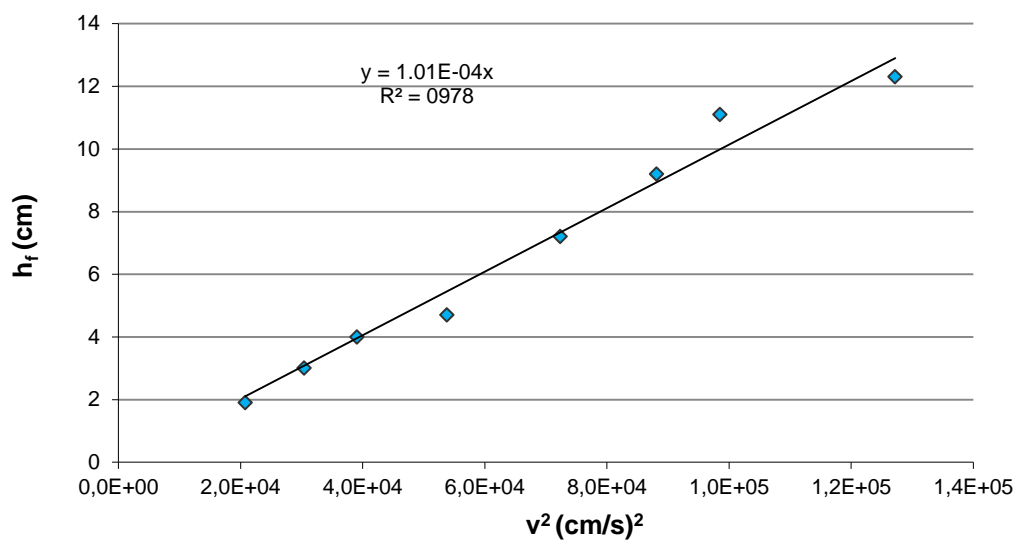


Figura 3.45. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 14,5 cm

Independientemente de la separación entre las tomas de presión para las expansiones súbitas, las pérdidas de carga son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad, tal y como se muestran en las Figuras 3.44. y Figura 3.45.

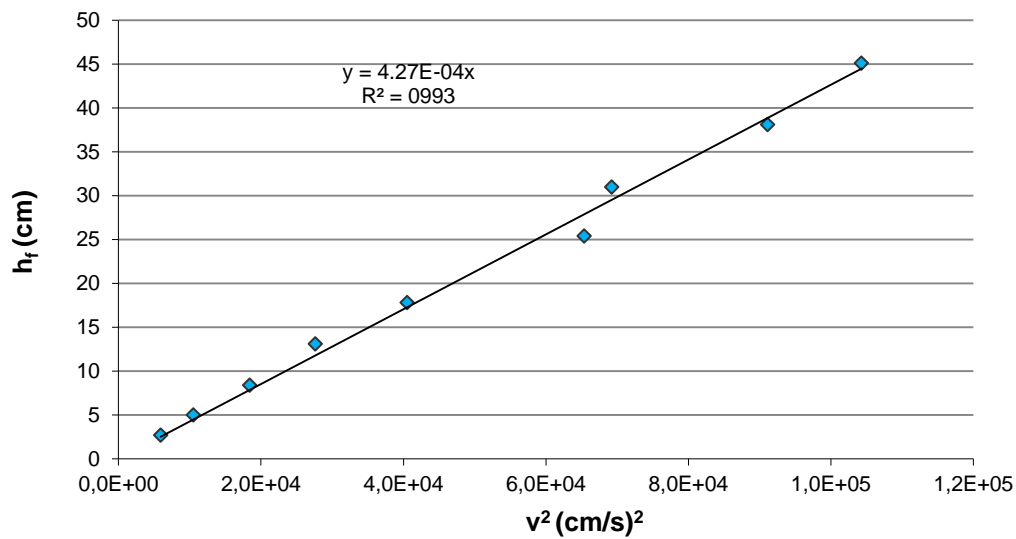


Figura 3.46. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 4 cm

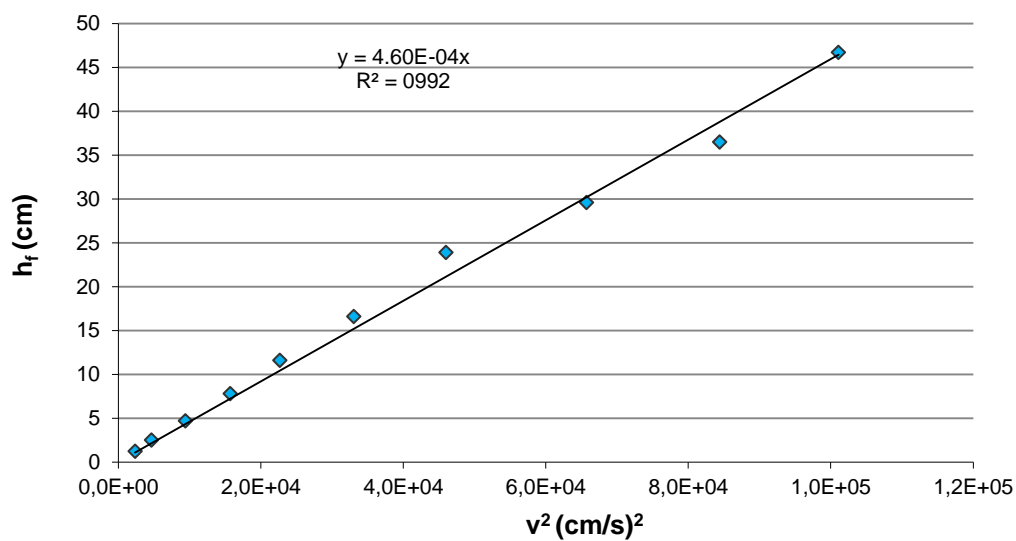


Figura 3.47. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 14,5 cm

El cambio de sección súbito en un sistema de transporte no influye en el comportamiento de las pérdidas de carga y el cuadrado de la velocidad de flujo como se muestran en la Figura 3.29. a la Figura 3.33.,

Queda demostrado que la pérdida de carga es directamente proporcional con el cuadrado de la velocidad del flujo turbulento para todas las tuberías y accesorios del sistema de transporte de fluido.

3.3.6 DETERMINACIÓN DE LA LONGITUD EQUIVALENTE EN CADA ACCESORIO

Se determinó la longitud equivalente para cada accesorio a partir de la ecuación [1.55], el coeficiente de fricción individual se obtiene del diagrama de Moody para cada número de Reynolds.

A continuación se presentan la tabla de resumen de las longitudes equivalentes para cada accesorio:

Tabla 3.9. Longitud equivalente para cada accesorio

ACCESORIO	Le (cm)	ACCESORIO	Le (cm)
Codo 90 ° superior	107,90	Válvula de compuerta 3 vueltas cerrada	190,29
Codo 90 ° inferior	97,28	Válvula de compuerta 4 vueltas cerrada	524,49
Codo 45 °	43,02	Válvula de compuerta 5 vueltas cerrada	1 807,17
Válvula de globo Abierta totalmente	540,65	Válvula de bola Abierta totalmente	30,52
Válvula de globo ½ vuelta cerrada	582,91	Válvula de bola ¼ vuelta cerrada	47,27
Válvula de globo 1 vuelta cerrada	713,30	Válvula de bola ½ vuelta cerrada	180,71
Válvula de globo 1 ½ vueltas cerrada	1 030,66	Válvula de bola ¾ vuelta cerrada	397,04
Válvula de globo 2 vueltas cerrada	1 710,76	Expansión súbita 4 cm de separación	21,31
Válvula de compuerta Totalmente abierta	21,46	Expansión súbita 14,5 cm de separación	20,02
Válvula de compuerta 1 vuelta cerrada	29,07	Contracción súbita 4 cm de separación	87,67
Válvula de compuerta 2 vueltas cerrada	92,97	Contracción súbita 14,5 cm de separación	95,66

Le: Longitud equivalente

3.3.7 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE VELOCIDAD DEL VENTURÍMETRO

Una vez obtenidos los caudales individuales para cada volumen y su tiempo de llenado se determinó el coeficiente de velocidad promedio del venturímetro a partir de la ecuación [1.81], además de obtenerse el coeficiente de velocidad real a partir del coeficiente K que resulta de la curva de calibración del venturímetro

$$Q = KH^{1/2}$$

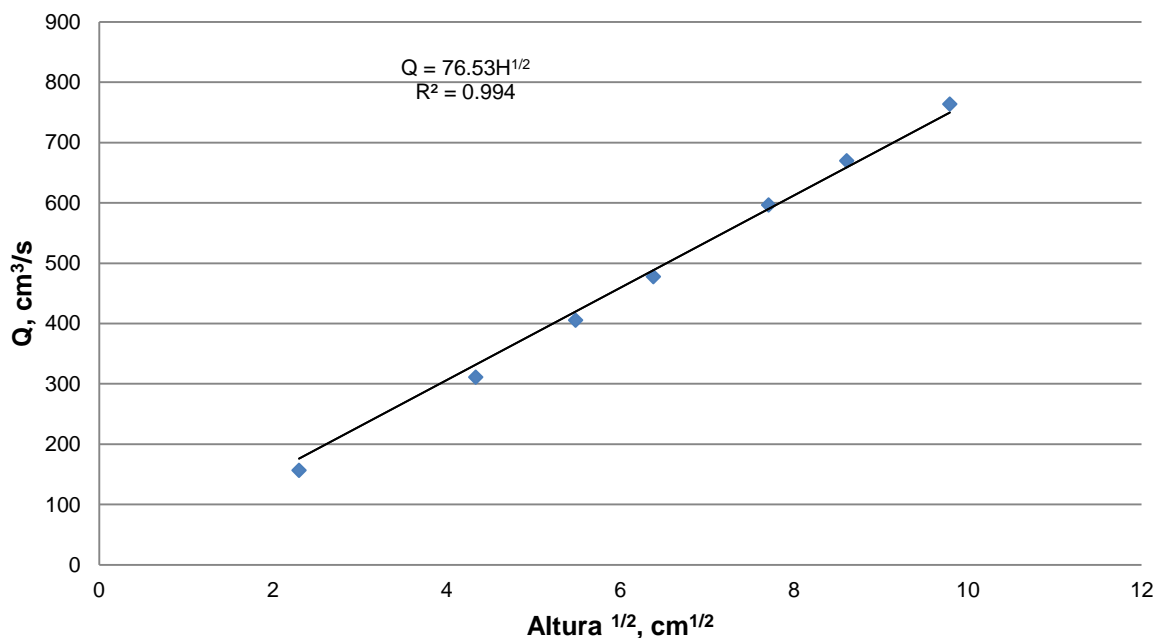


Figura 3.48. Caudal vs. Altura^{1/2} en el venturímetro para el cálculo del coeficiente de velocidad

Tabla 3.10. Coeficientes del venturímetro

K_{real} (cm^{5/2}/s)	76,53
C_{v real}	0,821
C_{v promedio}	0,843
ERROR (%)	2,61 %

3.3.8 DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE VELOCIDAD CON EL NÚMERO DE REYNOLDS

Una vez obtenidos los coeficientes de velocidad individuales para cada caudal se obtiene la curva de variación del coeficiente de velocidad del venturímetro con el número de Reynolds.

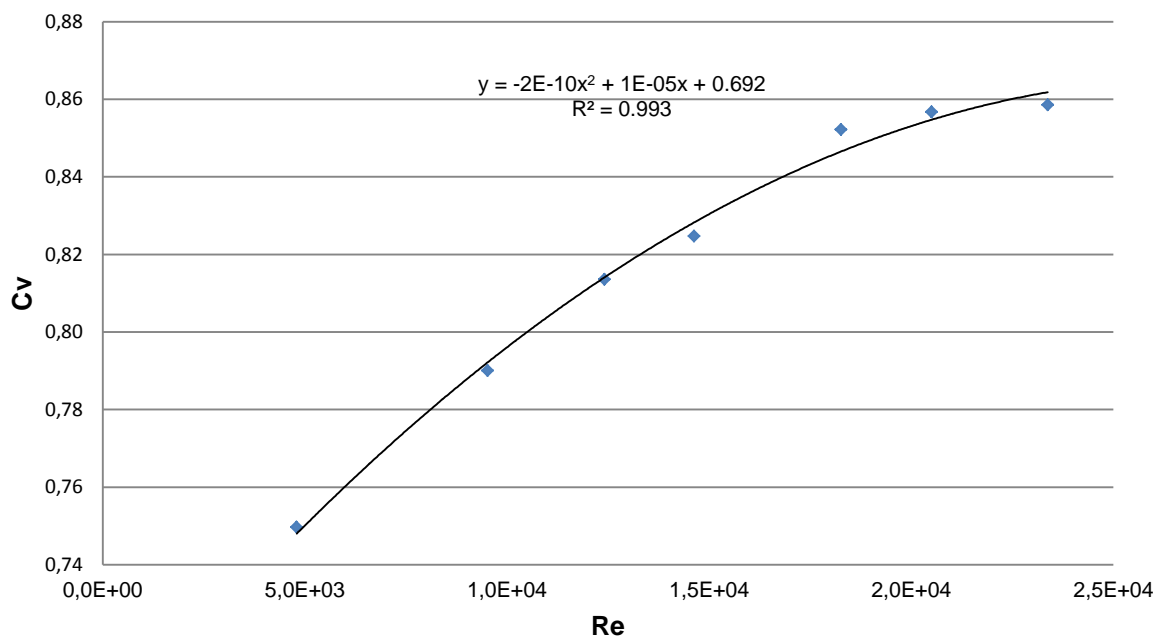


Figura 3.49. Coeficiente de velocidad vs. Número de Reynolds para venturímetro

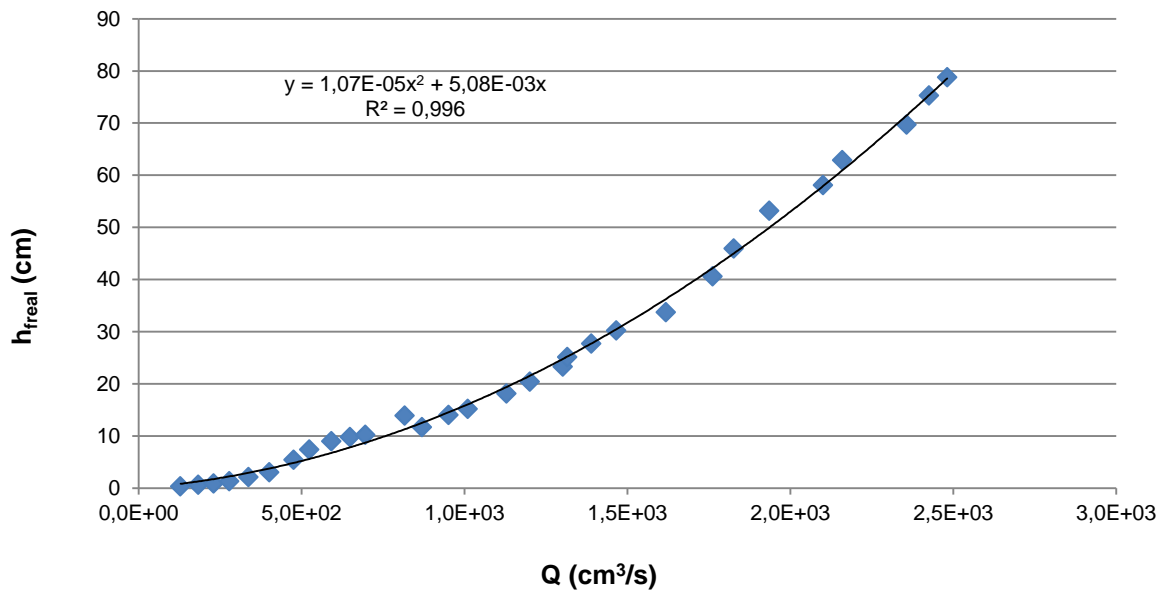
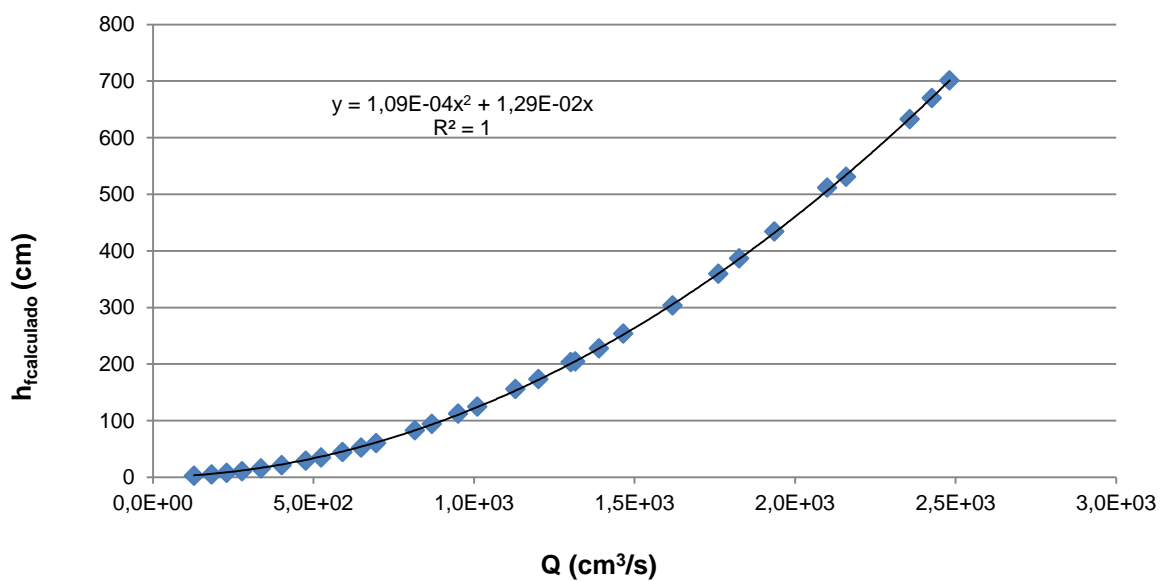
3.3.9 DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA TOTAL EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍAS EN PARALELO

Para obtener las pérdidas de carga totales se recurre a la ecuación Bernoulli, ecuación [1.39], que representa la sumatoria de las pérdidas de carga en el tramo de un sistema, que en este caso incluye: las pérdidas localizadas en 2 Tees de hierro galvanizado de 1 ¼ " de diámetro, las pérdidas localizadas en 4 codos de 90° de hierro galvanizado de 1 ¼ " de diámetro y las pérdidas friccionales en 2 tuberías de hierro galvanizado de 1 ¼ " de diámetro y 402,5 cm de largo.

Tabla 3.11. Coeficientes de resistencia de los accesorios

ACCESORIO	$K_{resistencia}$
Codo 90 °	1,265
Tee	1,800

(Nakayama, 2000; Streeter, 2000)

**Figura 3.50.** Pérdidas de carga reales vs. Caudal para tuberías en paralelo**Figura 3.51.** Pérdidas de carga calculadas vs. Caudal para tuberías en paralelo

3.3.10 DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD SOBRE LAS PÉRDIDAS DE CARGA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍAS EN PARALELO

Para flujos turbulentos las pérdidas de carga aumentan proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad. Siendo las pérdidas de carga la diferencia entre las mediciones de ambos lados del manómetro en “U” invertida que fue utilizado en las tomas de presión de en la configuración de tuberías en paralelo y también en las pérdidas de carga calculadas.

A continuación se presentan todos los gráficos donde se visualiza el efecto de la velocidad en la pérdida de carga para la configuración de tuberías en paralelo:

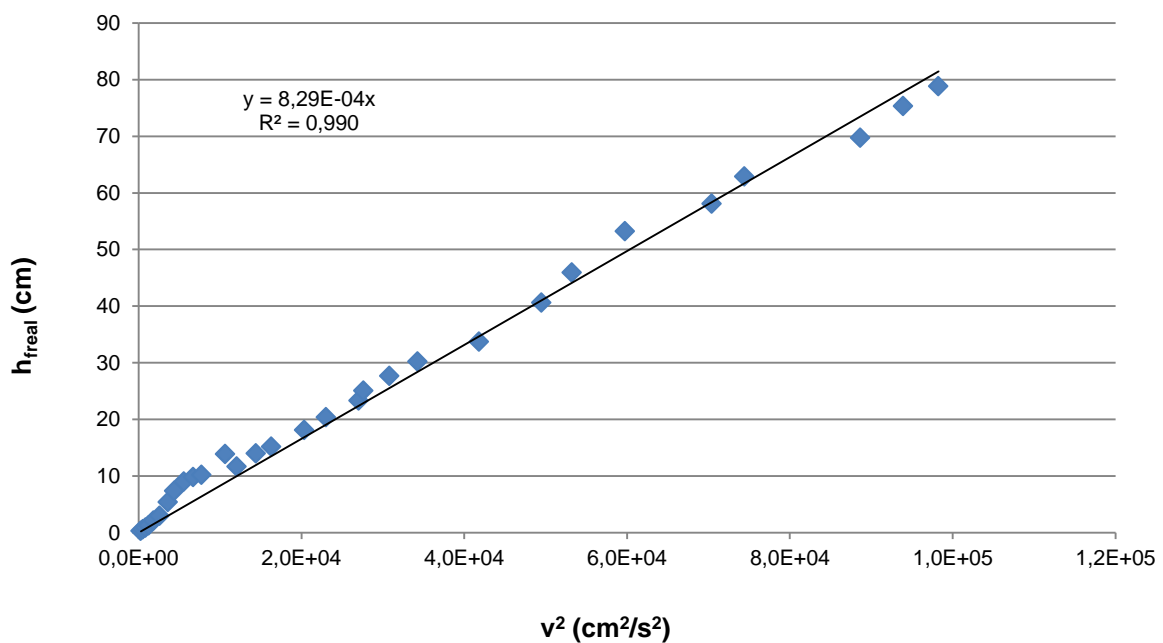


Figura 3.52. Pérdidas de carga reales vs cuadrado de la velocidad del fluido para tuberías en paralelo

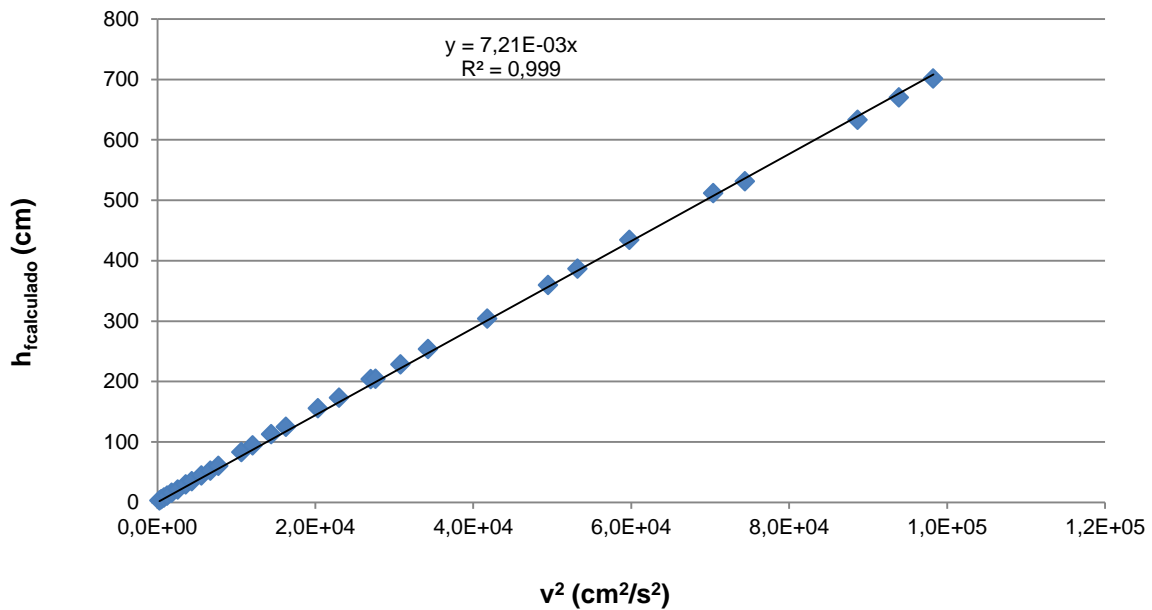


Figura 3.53. Pérdidas de carga calculadas vs cuadrado de la velocidad del fluido para tuberías en paralelo

3.3.11 DIAGRAMAS OBTENIDOS UNA VEZ CALIBRADO EL VERTEDERO EN “V”

Todos los diagramas resultantes, una vez calibrado el vertedero en “V”, son expuestos en la sección de ANEXO IV.

3.3.12 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

- Mientras el diámetro de las tuberías disminuye, la cantidad de datos tomados en los manómetros diferenciales es menor y la diferencia entre alturas aumenta rápidamente aunque no se alcancen los caudales máximos para el sistema, expuestos en las tablas de datos obtenidos en las pruebas experimentales de la sección ANEXO III: AIII.1 - AIII.12.
- Lo mismo sucede con las válvulas, mientras menor sea el paso del flujo, es decir mientras más cerrada se encuentre la válvula, la cantidad de datos tomados en los manómetros diferenciales es menor y la diferencia entre alturas aumenta rápidamente aunque no se alcancen los caudales

máximos para el sistema, expuestos en las tablas de datos obtenidos en las pruebas experimentales de la sección ANEXO III: AIII.16. – AIII.31.

- En cuanto a los codos, es posible tomar un amplio rango de datos sin importar la posición, expuestos en las tablas de datos obtenidos en las pruebas experimentales de la sección ANEXO III: AIII.13. – AIII.15.
- Los elementos de vidrio tienen una menor cantidad de datos respecto al resto de elementos, esto se debe al tipo de accesorios que representan y la fragilidad del material que los compone, expuestos en las tablas de datos obtenidos en las pruebas experimentales de la sección ANEXO III: AIII.32. – AIII.35.
- En las tuberías en paralelo, al igual que los codos, es posible tomar un amplio rango de datos, expuestos en la tabla de datos obtenidos en las pruebas experimentales de la sección ANEXO III: AIII.36., tomando en cuenta que el flujo se divide y que en ambos ramales se presenta la misma pérdida de carga.
- Para la determinación del coeficiente de descarga del vertedero en “V” se utilizaron todos los datos de caudal de todas las tuberías y accesorios, en la Tabla 3.4. se demuestra que el coeficiente es prácticamente constante, tiene una variación de 7,44 % entre el coeficiente de descarga real y el promedio; ésta variación es visible en la zona de caudales altos, indicada en la Figura 3.1.
- En la Tabla 3.5. se exponen el resumen de los caudales a las diferentes alturas del vaso de medición para la el vertedero en “V”, esto servirá en el caso de que se utilice el vertedero en “V” en lugar de lecturas con medidores directos.
- Las tendencias en los diagramas de Moody son muy similares, tanto en los figuras de resumen de tuberías de diámetros iguales, Figuras 3.7. – 3.10. y tuberías del mismo material, Figuras 3.11. – 3.13.
- En la Figura 3.7. se demuestra que el error humano y aleatorio se encuentra presenta en cualquier tipo de medición.
- En la Tabla 3.7. se resumen las rugosidades relativas de cada tubería, en cualquiera de los casos es menor que la rugosidad relativa de las tuberías lisas expuestas en bibliografía.

- En cuanto al efecto de la velocidad sobre las pérdidas de carga, es lineal y directamente proporcional al cuadrado de la velocidad para flujos turbulentos tanto en tuberías como en accesorios, expuestos en las Figuras: 3.14. – 3.47.
- Tanto en los coeficientes de resistencia de los accesorios como en las longitudes equivalentes, los valores varían entre sí y en el caso de las válvulas aumenta mientras menor sea la sección de paso del flujo, expuestos en las tablas: 3.8. y 3.9.
- El coeficiente de velocidad del venturímetro tiene una variación de 2,61 % entre el coeficiente de velocidad real y el promedio como se muestra en la Tabla 3.10.; ésta variación es visible en las Figura 3.48.
- A pesar de que las tendencias entre las pérdidas de carga reales y calculadas sean similares para una configuración de tuberías en paralelo, las pérdidas calculadas son diez veces superiores a las reales, expuestos en las Figuras: 3.50. y 3.51. y las pérdidas de carga en una configuración de tuberías en paralelo son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad en flujos turbulentos, expuestos en las Figuras: 3.52. y 3.53.
- Todos los diagramas con los datos calculados a partir de los caudales obtenidos en el vertedero en “V”, presentan la misma tendencia que los medidos con los medidores directos y se exponen en la sección ANEXO IV.
- Los coeficientes de resistencia y las longitudes equivalentes para los accesorios varían ligeramente para datos calculados a partir de los caudales obtenidos en el vertedero en “V”.

3.4 MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL ESTUDIO DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS EN EL EQUIPO CONSTRUIDO

Una vez que se obtuvieron los diagramas y resultados que serán utilizados como base por el profesor y/o ayudante de laboratorio, se detallan los ensayos experimentales en el manual de prácticas para el estudio de pérdidas friccionales y localizadas que se muestra a continuación:



Escuela Politécnica Nacional

Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria

Carrera de Ingeniería Química

Laboratorio de Mecánica de Fluidos II

Manual de Prácticas de Laboratorio

Profesor: -----

Semestre

PRÁCTICA N°1

MEDIDORES DE FLUJO

Introducción

Dispositivos tales como tubos, venturímetros, orificios, vertederos, etc. son aparatos que se utilizan para medir caudales de flujos, donde se aplica la ecuación de Bernoulli para determinación de y conocer a fondo cada instrumento, sus coeficientes y características.

Práctica 1.1.- VERTEDERO EN “V”

Objetivos

- Determinar el coeficiente de descarga del vertedero
- Determinar la curva de calibración del vertedero $Q=K.H^n$
- Determinar la constante K promedio

Circuito Empleado

Para esta prueba se emplea el vertedero en “V” (Figura 1) que consiste en un corte triangular de 20 cm de ancho y un ángulo de 90 ° ubicado dentro del tanque de alimentación y descarga (Parte #9), construido en acero y equipado con un visor de nivel externo con su respectiva escala para medir el nivel de agua del vertedero en “V”.

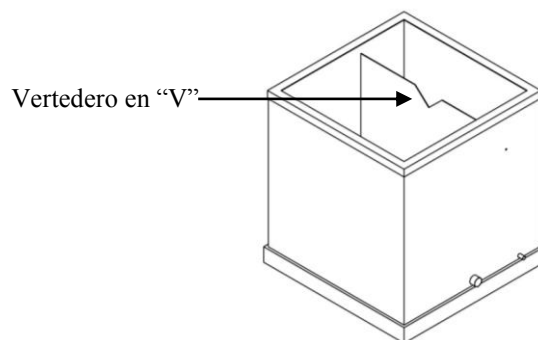
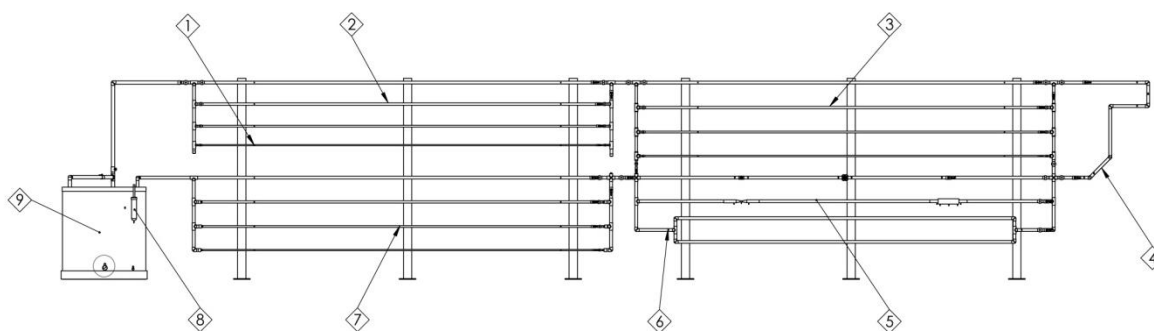


Figura 1. Tanque de alimentación y descarga

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abiertas únicamente las siguientes válvulas:

- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de ¾ “ que conecta el grupo de tuberías de PVC con el grupo de accesorios
- Válvula de paso de 1 ¼ “ que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Pitones de toma de presión de 1/4"	24
2	Grupo de Tuberías de Cu	1
3	Grupo de Tuberías de PVC	1
4	Accesorios codos	1
5	Válvulas, Venturi, expansión y tuberías en paralelo	1
6	Válvulas con pitones de 1/4"	13
7	Grupo de Tuberías de HG	1
8	Vaso de medición final	1
9	Tanque de almacenamiento y descarga y bomba de alimentación	1

Figura 2. Esquema general del equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías. Abrirla levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Registrar la altura en el medidor de nivel.
3. Con ayuda de un recipiente calibrado de aproximadamente 10 litros y de ser posible con marcas divisorias de 100 mL, medir un volumen de agua y registrar el tiempo que demora en llenarse.

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

4. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Cálculos

- Medición del caudal

Para obtener el valor del caudal, simplemente dividir el volumen de agua para el tiempo que tomó llenarlo.

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

- Coeficiente de descarga

Para obtener el coeficiente de descarga es necesario despejarlo de la siguiente ecuación aplicada para vertederos de corte triangular:

$$Q = \frac{8}{15} C_d \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) H^{\frac{5}{2}}$$

Dónde:

θ : Ángulo de corte (del vértice)

H : Altura de agua obtenida en el medidor de nivel

- Constante K promedio

Para obtener la constante K promedio es necesario despejarla de la siguiente ecuación aplicada para vertederos de corte triangular:

$$Q = K.H^{\frac{5}{2}}$$

Práctica 1.2.- VENTURÍMETRO

Objetivos

- Determinar el coeficiente de velocidad del venturímetro
- Determinar la curva de calibración del venturímetro $Q=K.H^n$
- Determinar la constante K promedio
- La variación del coeficiente de velocidad con el número de Reynolds.

Circuito Empleado

Para esta prueba se emplea el venturímetro, que consiste en un tubo de vidrio cónico de 43 cm de largo, con un diámetro de 3,6 cm en su punto más ancho y 1,6 cm de diámetro en su punto más angosto ubicado en el grupo de accesorios (Figura 3), y que se encuentra conectado al manómetro de vidrio de 2 válvulas (Figura 4), donde se medirá la diferencia de altura entre ambos puntos.



Figura 3. Venturímetro de vidrio

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abiertas únicamente las siguientes válvulas (Figura 2):

- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de PVC
- Válvula de paso entre las tuberías de 1 ¼ " y 1 " de PVC
- Válvula de paso para la expansión y contracción súbitas y el venturímetro.
- Válvulas de paso de 1 ¼ " que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de HG

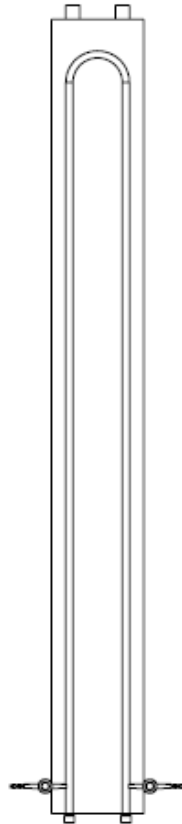


Figura 4. Manómetro de 2 válvulas

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías, abrir levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Conectar el manómetro de tal manera que el primer punto sea el más ancho y el segundo punto el más angosto con respecto a la dirección del flujo.
3. Registrar las alturas del fluido en ambos lados del manómetro, abriendo las dos válvulas simultáneamente.
4. Con ayuda del vertedero calibrado registrar la altura que marca el vaso de medición colocarse en el exterior del tanque.
5. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

- Coeficiente de velocidad

Para obtener el coeficiente de descarga es necesario despejarlo de la siguiente ecuación aplicada para vertederos de corte triangular:

$$Q = C_v \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g\Delta z}$$

Dónde:

$\Delta z = H$: Diferencia de alturas entre ambos lados del manómetro

A_1 : Área de la sección más ancha

A_2 : Área de la sección más angosta

- Constante K promedio

Para obtener la constante K promedio es necesario despejarla de la siguiente ecuación aplicada para venturímetro:

$$Q = K.H^{\frac{1}{2}}$$

PRÁCTICA N°2

PÉRDIDAS DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Introducción

En una línea de tuberías existen pérdidas energéticas que surgen por la rugosidad de la tubería, la longitud que se desplaza el fluido, el diámetro, la velocidad de circulación y que dependen del material de que está construida la tubería adicionalmente hay pérdidas friccionales en accesorios, también llamadas pérdidas localizadas o secundarias, producidas por:

- Súbito cambio de área en la tubería.
- Obstrucciones en el tubo (válvulas, etc.).
- Cambio de dirección en la circulación.
- Ramificaciones y uniones de tuberías

Aquí se pueden distinguir los dos tipos de flujos:

- A bajas velocidades, se dan los flujos laminares y las pérdidas son proporcionales a la velocidad del fluido
- Los flujos turbulentos se dan a altas velocidades, estos flujos son los más comunes en vida cotidiana y presentan pérdidas proporcionales al cuadrado de su velocidad.

Práctica 2.1.- PÉRDIDAS FRICCIONALES EN TUBERÍAS DEL MISMO MATERIAL Y DIFERENTES DIÁMETROS

Objetivos

- Determinar el factor de fricción para cada diámetro con el número de Reynolds.
- Determinar la rugosidad relativa y absoluta del material de la tubería y comparar los valores con la literatura.
- Graficar el efecto de la velocidad sobre la pérdida de carga. (Gráfico h_f vs. v^2 para flujos turbulentos)

Circuito Empleado

Para esta prueba se debe elegir el material del grupo de tuberías de diferentes diámetros ya sea Cu, PVC o Hierro Galvanizado (Figura 2) y que posee una distancia de 3,70 m entre tomas de presión de los manómetros de 16 válvulas (Figura 5) y 8 válvulas (Figura 6) respectivamente.

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abiertas únicamente las siguientes válvulas dependiendo del grupo en el cual se realizarán los experimentos (Figura 2):

Grupo de Cu

- Válvula de paso de $\frac{3}{4}$ " que conecta el grupo de tuberías de PVC con el grupo de accesorios
- Válvula de paso de $1 \frac{1}{4}$ " que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de $1 \frac{1}{4}$ " del grupo de tuberías de HG

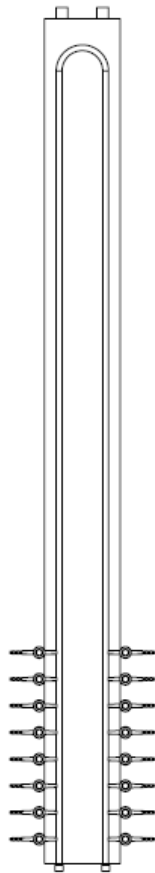


Figura 5. Manómetro de 16 válvulas

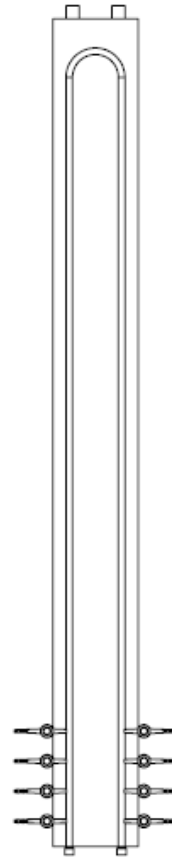


Figura 6. Manómetro de 8 válvulas

Grupo de PVC

- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de Cu
- Las válvulas de globo, compuesta y bola que se encuentran en la sección de accesorios
- Válvula de paso de 1 ¼ " que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de HG

Grupo de Hierro Galvanizado

- Válvula de paso de 1 ¼ " del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de ¾ " que conecta el grupo de tuberías de PVC con el grupo de accesorios
- Válvula de paso de 1 ¼ " que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías, abrir levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Una vez seleccionado el material, dirigir el circuito para que únicamente exista flujo en la tubería de estudio, empezando por la de menor diámetro.
3. Para cada tubería existe una conexión manométrica, registrar las alturas del fluido en ambos lados del manómetro, abriendo las dos válvulas simultáneamente.
4. Con ayuda del vertedero calibrado registrar la altura que marca el vaso de medición colocarse en el exterior del tanque.
5. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Cálculos

- Velocidad de flujo

Para obtener la velocidad de flujo es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$Q = Av$$

A: Área de la sección transversal de la tubería

- Número de Reynolds

Para obtener el número de Reynolds es necesario obtener datos de densidad y viscosidad y aplicar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\delta Dv}{\mu}$$

Dónde:

δ : Densidad

D : Diámetro interno de la tubería

v : Velocidad lineal del fluido

μ : Viscosidad

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

- Factor de fricción f

Para obtener el factor de fricción es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$h_f = f \frac{v_2^2}{2g} \frac{L}{D}$$

L : Longitud de tubería donde se producen las pérdidas de carga

- Rugosidad absoluta ϵ y relativa ϵ/D

Para obtener el valor de rugosidad relativa y absoluta es necesario trazar la curva Re vs. f para cada tubería en el diagrama de Moody, compararlas entre sí y compararlas también con datos de literatura.

Práctica 2.2.- PÉRDIDAS FRICCIONALES EN TUBERÍAS DE DIFERENTE MATERIAL Y DIÁMETROS IGUALES

Objetivos

- Determinar el factor de fricción para cada material con el número de Reynolds.
- Determinar la rugosidad relativa y absoluta del material de la tubería y comparar los valores con la literatura.
- Graficar el efecto de la velocidad sobre la pérdida de carga. (Gráfico h_f vs. v^2 para flujos turbulentos)

Circuito Empleado

Para esta prueba se debe elegir el diámetro con el que se trabaja en cada grupo de tuberías de Cu, PVC y Hierro Galvanizado (Figura 2) y que posee una distancia de 3,70 m entre tomas de presión.

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abierta únicamente la siguiente válvula independientemente de las tuberías elegidas para el estudio:

- Válvula de paso de 1 ¼ “ que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías, abrir levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Una vez seleccionado el diámetro, dirigir el circuito para que únicamente exista flujo en las tuberías que presenten el diámetro de estudio.
3. Para cada tubería existe una conexión manométrica, registrar las alturas del fluido en ambos lados del manómetro, abriendo las dos válvulas simultáneamente.
4. Con ayuda del vertedero calibrado registrar la altura que marca el vaso de medición colocarse en el exterior del tanque.
5. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Cálculos

- Velocidad de flujo

Para obtener la velocidad de flujo es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$Q = Av$$

A: Área de la sección transversal de la tubería

Laboratorio de Mecánica de Fluidos – Manual de Prácticas

- Número de Reynolds

Para obtener el número de Reynolds es necesario obtener datos de densidad y viscosidad y aplicar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\delta D v}{\mu}$$

Dónde:

- δ : Densidad
- D : Diámetro interno de la tubería
- v : Velocidad lineal del fluido
- μ : Viscosidad

- Factor de fricción f

Para obtener el factor de fricción es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$h_f = f \frac{v_2^2}{2g} \frac{L}{D}$$

Dónde:

- L : Longitud de tubería donde se producen las pérdidas de carga

- Rugosidad absoluta ϵ y relativa ϵ/D

Para obtener el valor de rugosidad relativa y absoluta es necesario trazar la curva Re vs. f en el diagrama de Moody y compararlo con datos de literatura.

Práctica 2.3.- PÉRDIDAS FRICCIONALES EN ACCESORIOS

Objetivos

- Determinar el coeficiente de resistencia para el/los accesorio/s de estudio
- Determinar la longitud equivalente del/los accesorio/s de estudio
- Graficar el efecto de la velocidad sobre la pérdida de carga.(Gráfico h_f vs. v^2 para flujos turbulentos)

Circuito Empleado

Para esta prueba se debe elegir el accesorio con el que se trabaja en el grupo de accesorios o grupo de codos (Figura 2)

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abiertas únicamente las siguientes válvulas dependiendo del accesorio que donde se estudiará:

Grupo de Codos

- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de PVC
- Las válvulas de globo, compuesta y bola que se encuentran en la sección de accesorios
- Válvula de paso de 1 ¼ “ que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG

Grupo de Accesorios

- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de PVC
- Válvula de paso entre las tuberías de 1 ¼ “ y 1 “ de PVC
- Válvula de paso de 1 ¼ “ que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías, abrir levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Una vez seleccionado el accesorio, conectar el manómetro de 2 válvulas a las tomas de presión de dicho accesorio y direccionar el circuito para que únicamente exista flujo en las tuberías necesarios para ayudar al estudio del accesorio.
3. Registrar las alturas del fluido en ambos lados del manómetro, abriendo las dos válvulas simultáneamente.
4. Con ayuda del vertedero calibrado registrar la altura que marca el vaso de medición colocarse en el exterior del tanque.
5. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Cálculos

- Velocidad de flujo

Para obtener la velocidad de flujo es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$Q = Av$$

Dónde:

A: Área de la sección transversal de la tubería

- Número de Reynolds

Para obtener el número de Reynolds es necesario obtener datos de densidad y viscosidad y aplicar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\rho Dv}{\mu}$$

Dónde:

- δ : Densidad
- D : Diámetro interno de la tubería
- v : Velocidad lineal del fluido
- μ : Viscosidad

- Coeficiente de resistencia K

Para obtener el coeficiente de resistencia es necesario despejarla de la siguiente ecuación de pérdidas de carga:

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

- Longitud equivalente Le

Para obtener la longitud equivalente es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de pérdidas de carga:

$$h_f = f \frac{v^2}{2g} \frac{Le}{D} = K \frac{v^2}{2g}$$

L : Longitud de tubería donde se producen las pérdidas de carga

Práctica 2.3.- PÉRDIDAS FRICCIONALES EN TUBERÍAS EN PARALELO

Objetivos

- Determinar el caudal mínimo para que exista flujo en paralelo
- Determinar la pérdida de carga total teórica en el sistema de tuberías en paralelo (incluir los codos y las T "s)
- Graficar el efecto de la velocidad sobre la pérdida de carga. (Gráfico h_f vs. v^2 para flujos turbulentos)

Circuito Empleado

Para esta prueba se trabaja en el grupo de accesorios donde se encuentran conectadas las tuberías de Hierro Galvanizado en paralelo (Figura 2).

Es necesario que se defina el circuito por el que circula el fluido, para esto es necesario dejar abiertas las siguientes válvulas para el estudio de este sistema:

- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de Cu
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de HG
- Válvula de paso de 1 ¼ “ del grupo de tuberías de PVC
- Válvula de paso entre las tuberías de 1 ¼ “ y 1 “ de PVC
- Válvula de paso de 1 ¼ “ que conecta el grupo de accesorios con el grupo de tuberías de HG

Procedimiento

1. La válvula colocada en el ingreso del sistema regula el caudal de agua que circula a través de las tuberías, abrir levemente hasta que se vea que el fluido llega al tanque de descarga.
2. Conectar el manómetro de 2 válvulas a las tomas de presión del sistema de tuberías en paralelo y dirigir el circuito para que únicamente exista flujo en las tuberías necesarios para ayudar al estudio del accesorio.
3. Registrar las alturas del fluido en ambos lados del manómetro, abriendo las dos válvulas simultáneamente.
4. Con ayuda del vertedero calibrado registrar la altura que marca el vaso de medición colocarse en el exterior del tanque.
5. Repetir este procedimiento cada vez que se regula el caudal de agua de entrada al sistema.

Cálculos

- Velocidad de flujo

Para obtener la velocidad de flujo es necesario despejarla de la siguiente ecuación general de caudal:

$$Q = Av$$

A : Área de la sección transversal de la tubería

- Número de Reynolds

Para obtener el número de Reynolds es necesario obtener datos de densidad y viscosidad y aplicar la siguiente ecuación:

$$R = \frac{\delta D v}{\mu}$$

Dónde:

δ : Densidad

D : Diámetro interno de la tubería

v : Velocidad lineal del fluido

μ : Viscosidad

- Pérdida de presión total teórica h_f

Para obtener la pérdida de presión total teórica es necesario utilizar la ecuación de pérdidas de carga:

$$h_f = h_{\text{primarias}} + h_{\text{secundarias}}$$

Dónde:

$h_{\text{primarias}}$: Pérdidas friccionales en tuberías

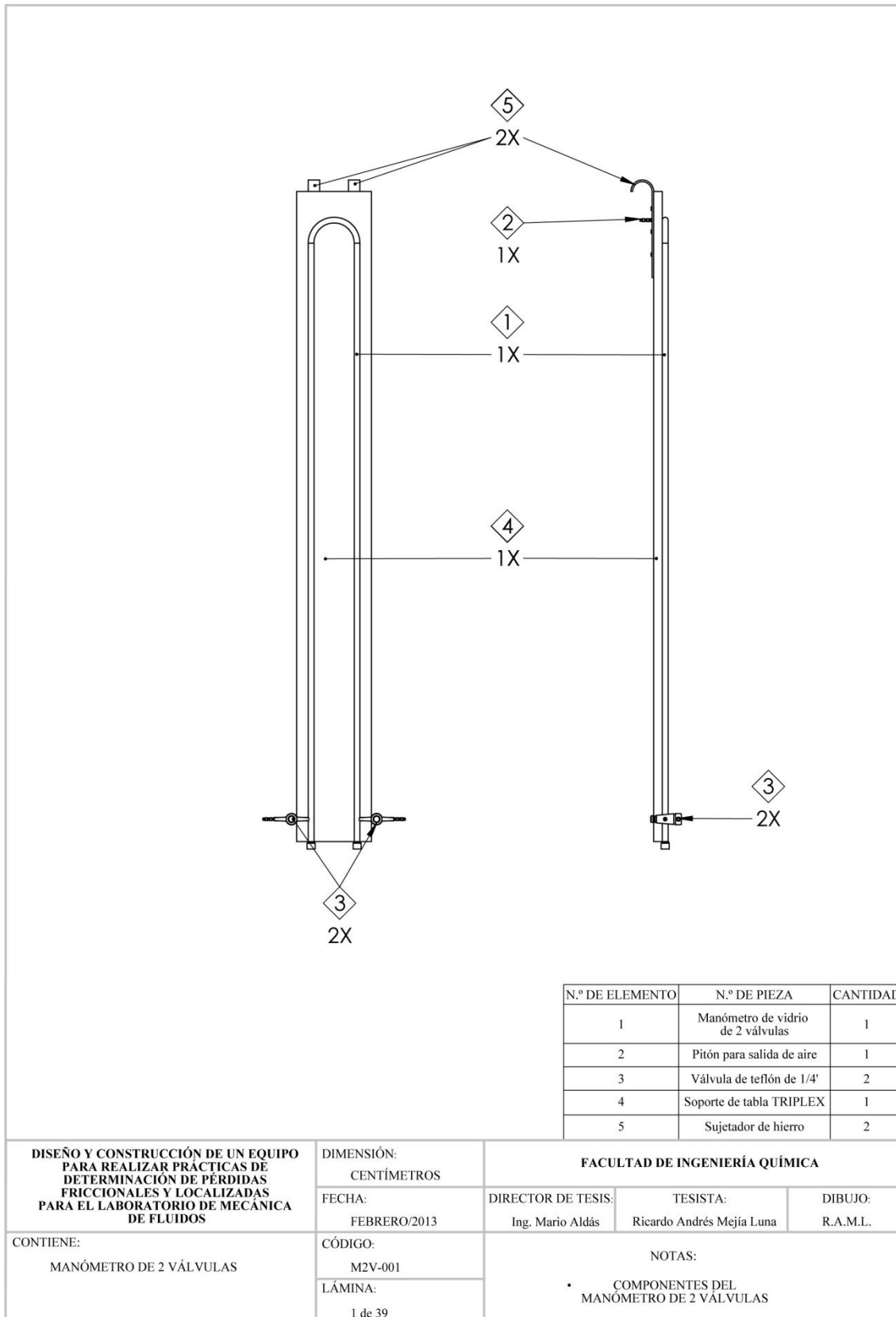
$h_{\text{secundarias}}$: Pérdidas friccionales en accesorios.

Referencias

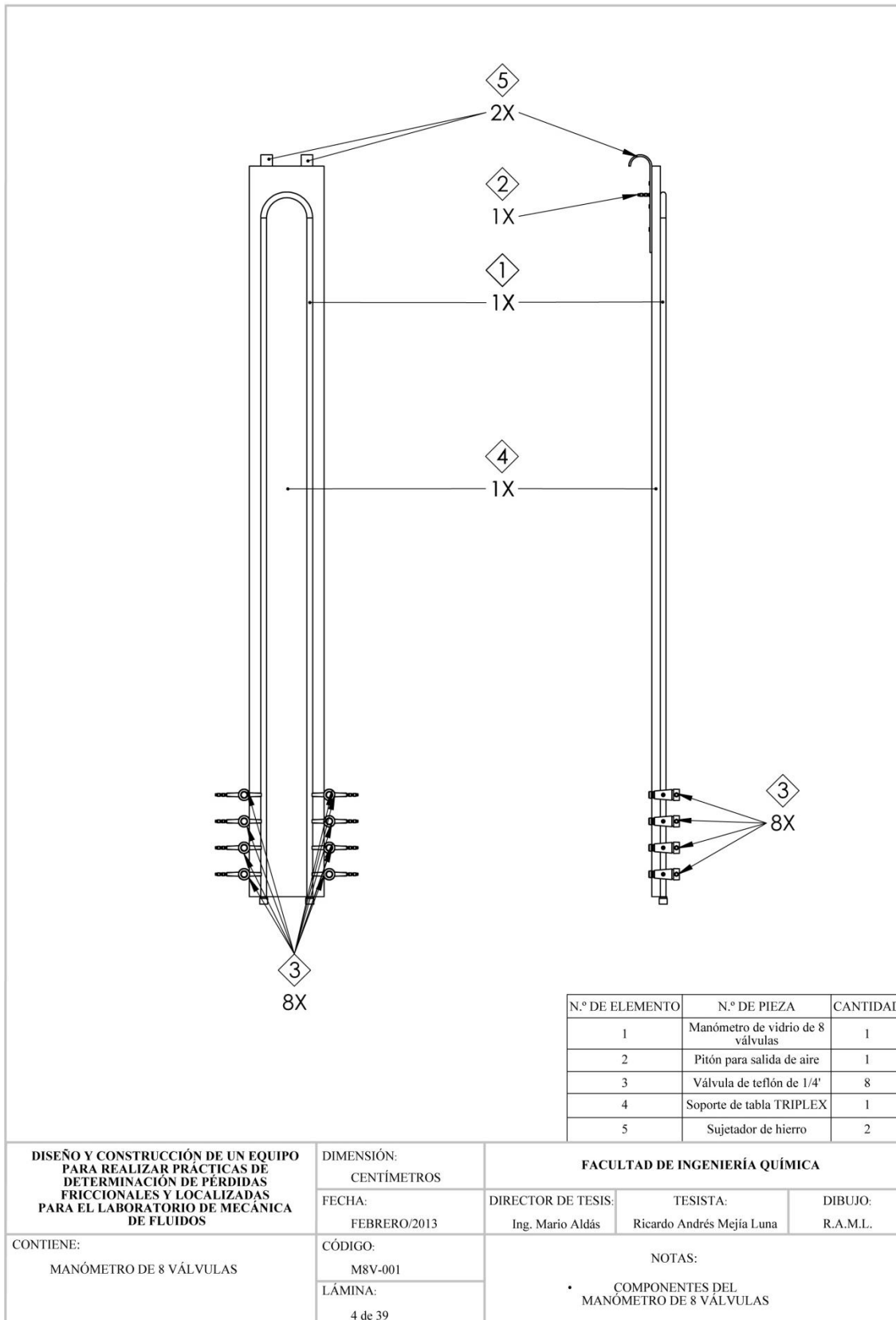
- Crane Corporation, “Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías”
- Kreith, F., Berger S.A., “Mechanical Engineering Handbook”
- Nakayama, Y., “Introduction to Fluid Mechanics”
- Perry, R., “Perry “s Chemical Engineers “ Handbook”
- Potter, M., Wiggert D., “Mecánica de Fluidos”
- Sleigh, Dr. Andrew., “An Introduction to Fluid Mechanics
- Streeter, V., Wylie, E. y Bedford, K., “Mecánica de Fluidos”

Anexos

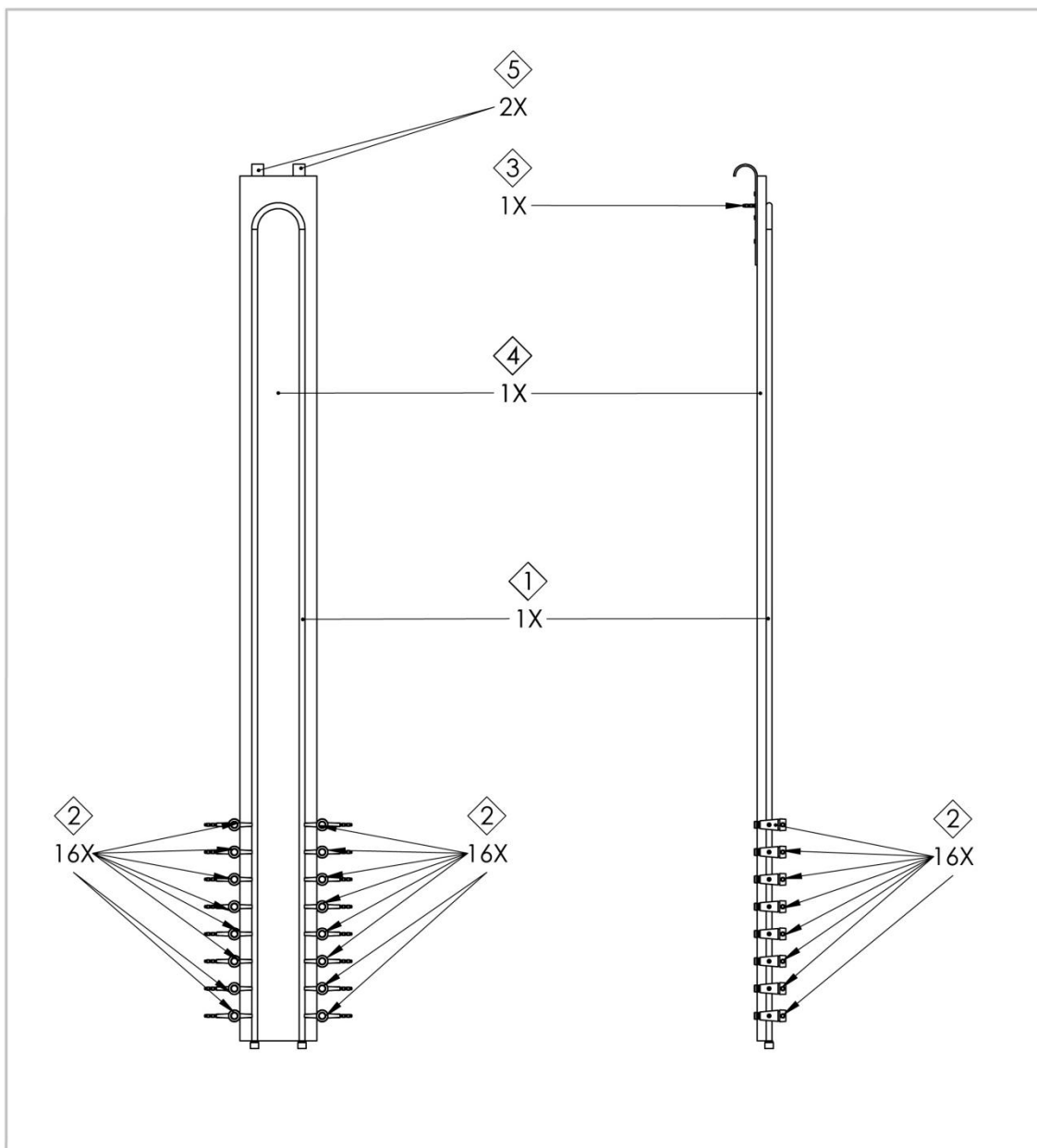
Anexo 1.- Manómetro de 2 válvulas



Anexo 2.- Manómetro de 8 válvulas



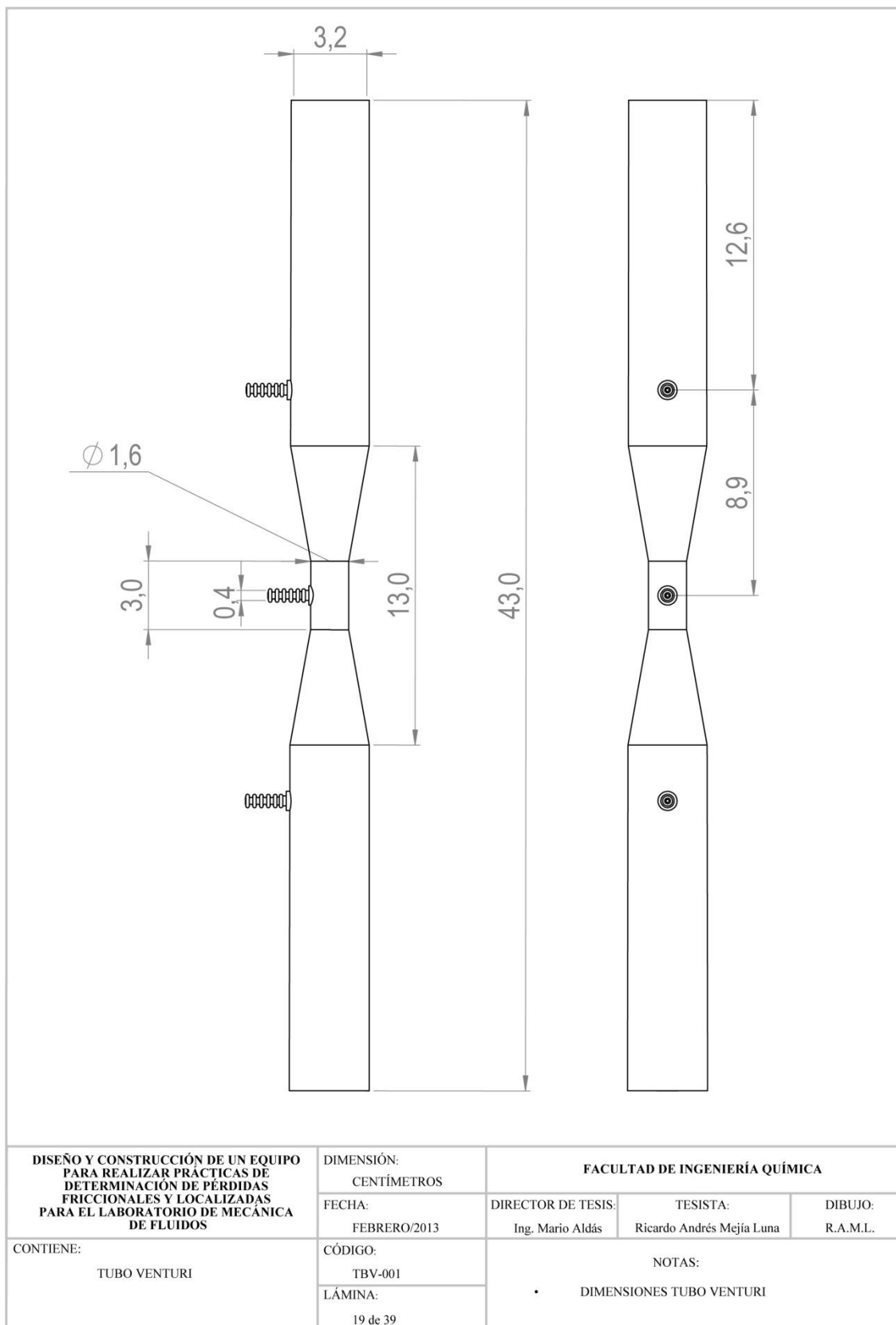
Anexo 3.- Manómetro de 16 válvulas



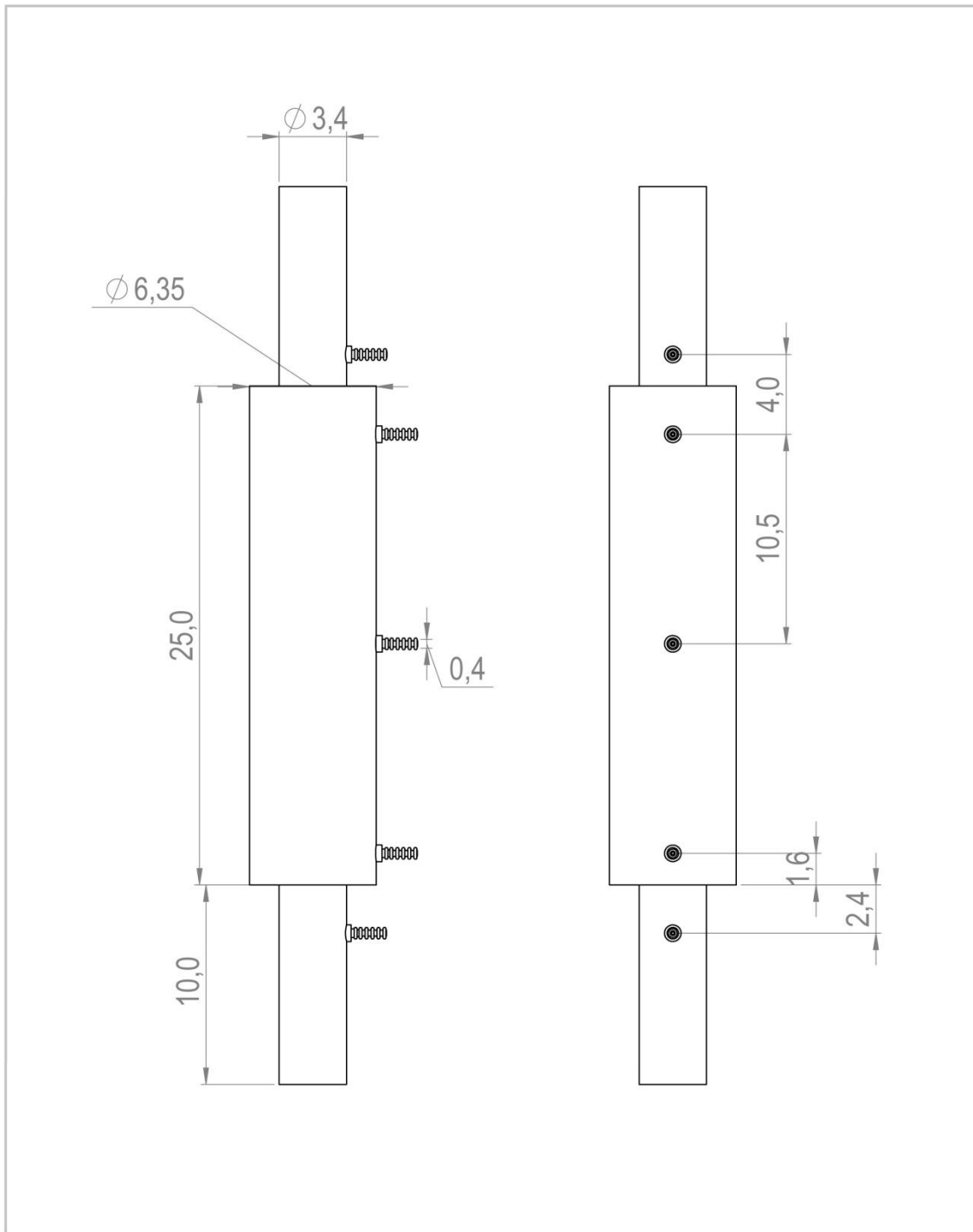
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Manómetro de vidrio de 16 válvulas	1
2	Válvula de teflón de 1/4"	16
3	Pitón para salida de aire	1
4	Soporte de tabla TRIPLEX	1
5	Sujetador de hierro	2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIÓNALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: MANÓMETRO DE 16 VÁLVULAS	CÓDIGO: M16V-001	NOTAS: • COMPONENTES DEL MANÓMETRO DE 16 VÁLVULAS		
	LÁMINA: 7 de 39			

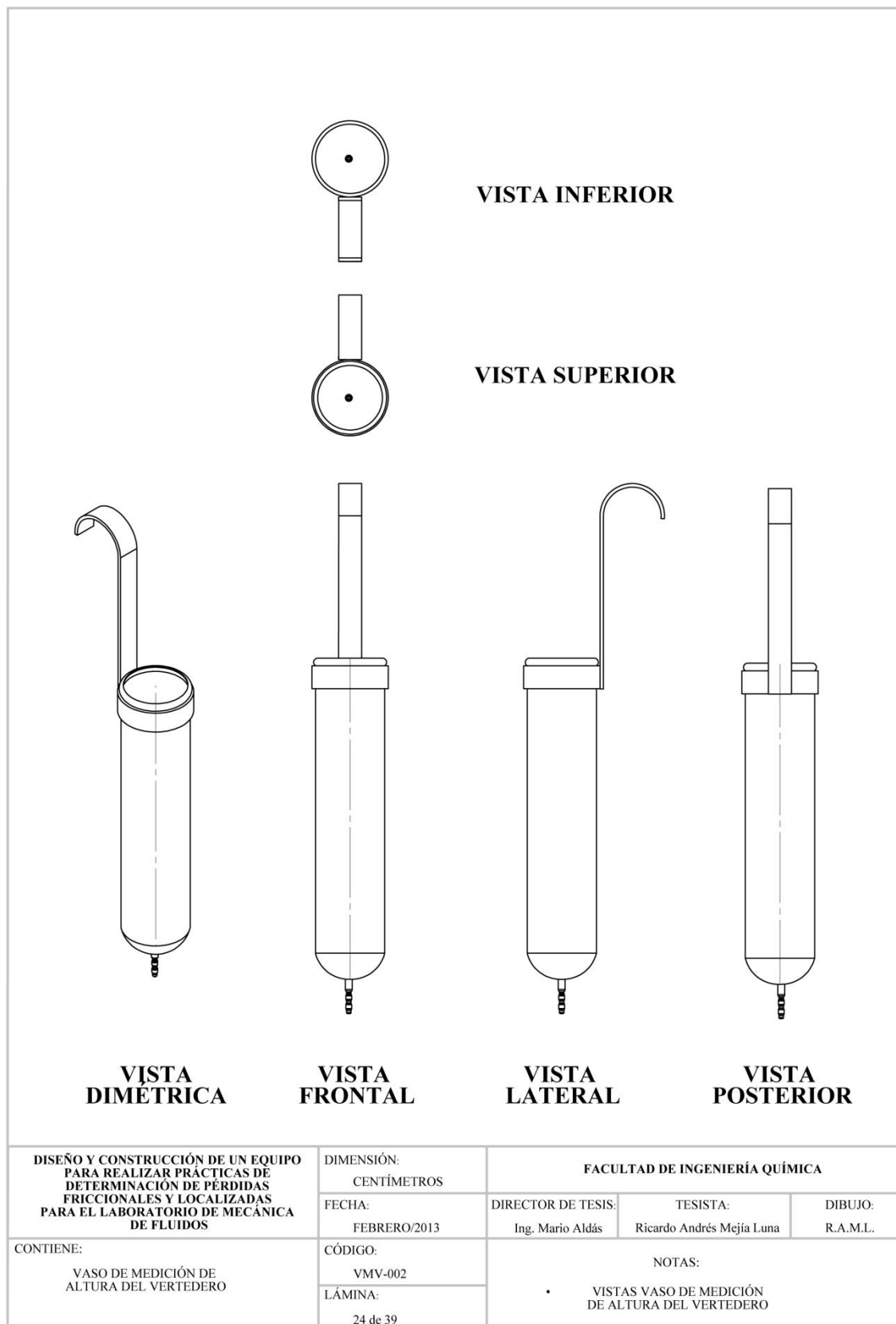
Anexo 4.- Tubo Venturi



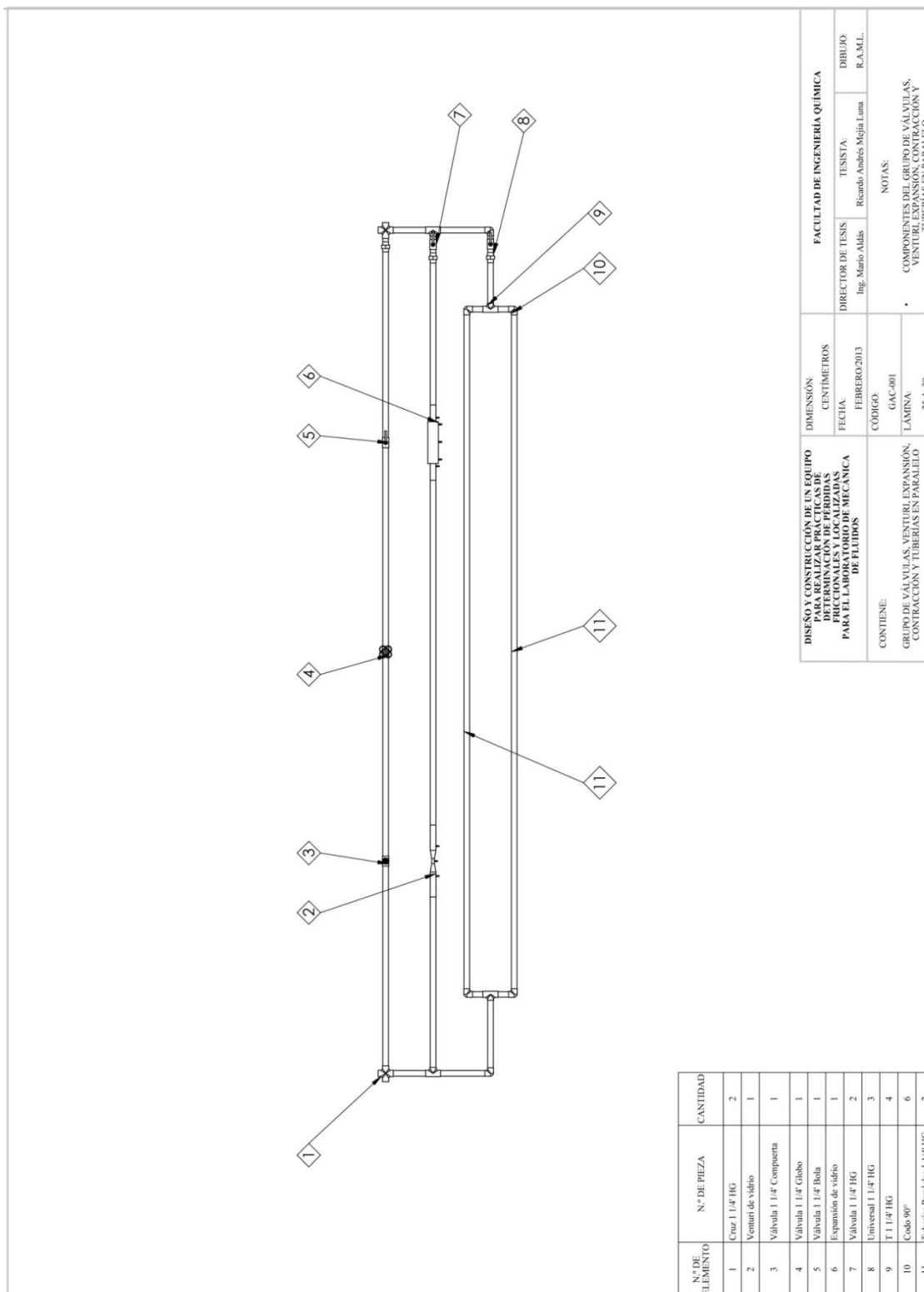
Anexo 5.- Expansión y contracción súbitas



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIÓNALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: EXPANSIÓN SÚBITA	CÓDIGO: ECS-001	NOTAS: • COMPONENTES EXPANSIÓN Y CONTRACCIÓN SÚBITAS		
	LÁMINA: 21 de 39			

Anexo 6.- Vaso de medición de altura de vertedero en "V"


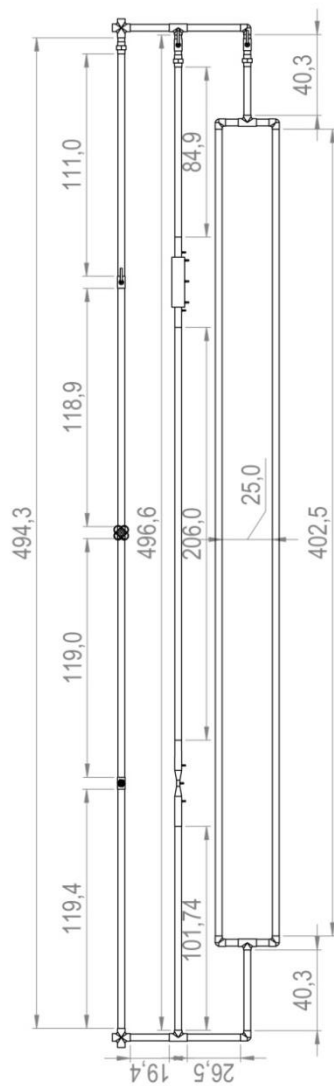
Anexo 7.- Componentes del grupo de accesorios



N° DE ELEMENTO	N° DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cruz 1 1/4" HG	2
2	Venturi de vidrio	1
3	Válvula 1 1/4" Compuerta	1
4	Válvula 1 1/4" Globo	1
5	Válvula 1 1/4" Bola	1
6	Expansión de vidrio	1
7	Válvula 1 1/4" HG	2
8	Universal 1 1/4" HG	3
9	F 1 1/4" HG	4
10	Codo 90°	6
11	Tuberías Paralelas 1 1/4" HG	2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS		DIMENSIONES: CENTÍMETROS		FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA	
CONTIENE: GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO		FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
		CODIGO: GAC-001	NOTAS:		
		LÁMINA: 25 de 39	COMPONENTES DEL GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO		

Anexo 8.- Dimensiones del grupo de accesorios



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA DETERMINACIÓN DE PERDIDAS DE PRESIÓN Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIONES: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA	
	FECHA: FEBRERO 2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldas	TESISISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna
CONTIENE: GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO	CÓDIGO: GAC-002 LÁMINA: 26 de 39	NOTAS: DIMENSIONES DEL GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO	
			DIBUJO: R.A.M.L.

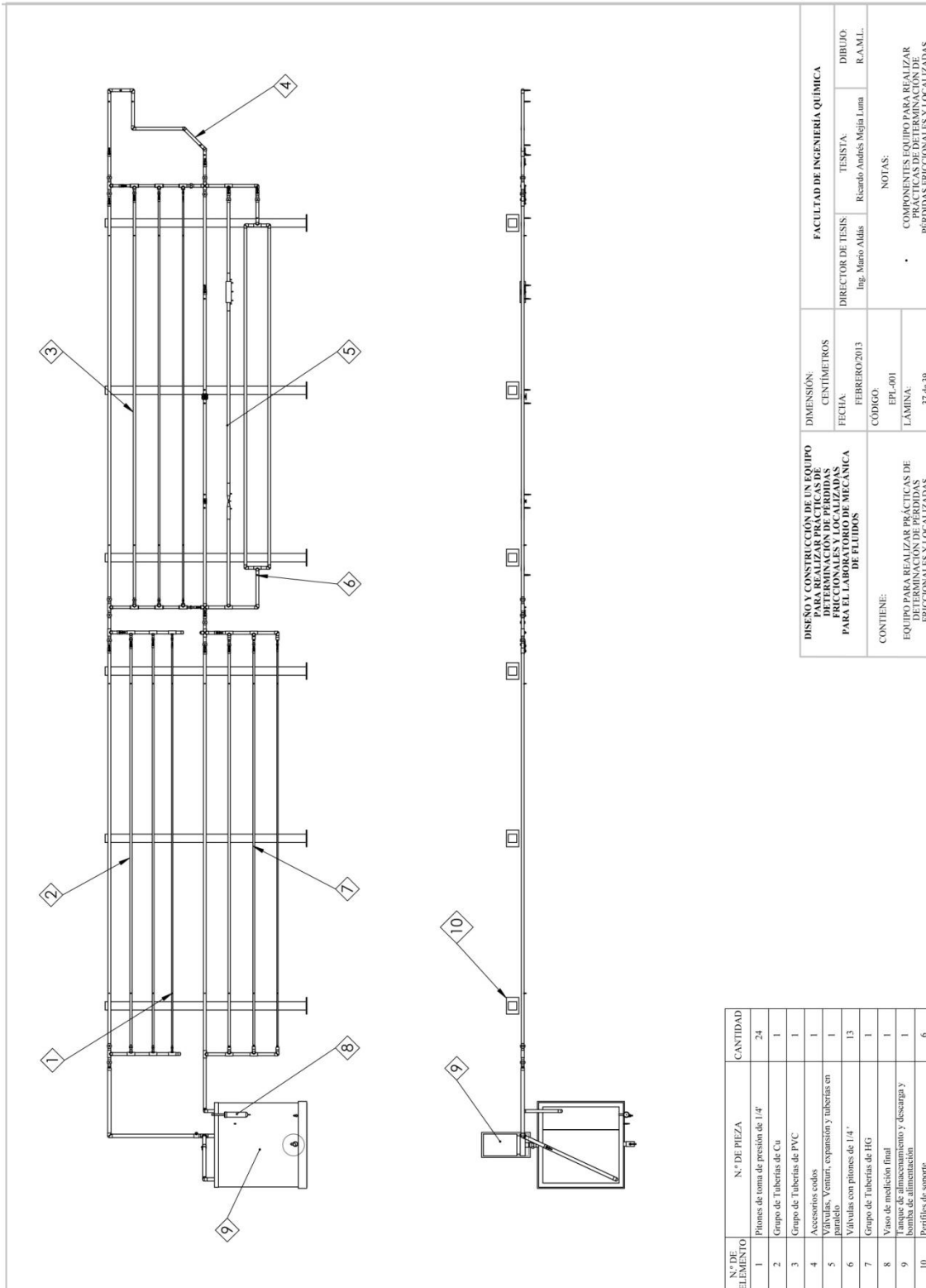
Anexo 9.- Vistas tanque de almacenamiento y descarga

The image contains five technical drawings of a storage and discharge tank:

- VISTA SUPERIOR:** A top-down view of the rectangular tank, showing a central horizontal line and a vertical line on the right side, indicating internal structure or a door.
- VISTA LATERAL:** A side view of the tank, showing its rectangular profile and a small detail on the bottom right corner.
- VISTA FRONTAL:** A front view of the tank, showing a rectangular shape with a small circle on the right side, possibly representing a handle or a fastener.
- VISTA POSTERIOR:** A rear view of the tank, showing a rectangular shape with a small circle on the right side, similar to the front view.
- VISTA DIMÉTRICA:** An isometric view of the tank, showing its three-dimensional form and internal structure.
- VISTA INFERIOR:** A bottom view of the tank, showing a rectangular shape with a small detail on the right side.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRUEBAS DE FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECANICA DE FLUIDOS CONTIENE: TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA	DIMENSION: CENTIMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISITA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
	CODIGO: TAD-002 LÁMINA: 15 de 39	NOTAS: * VISTAS TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA		

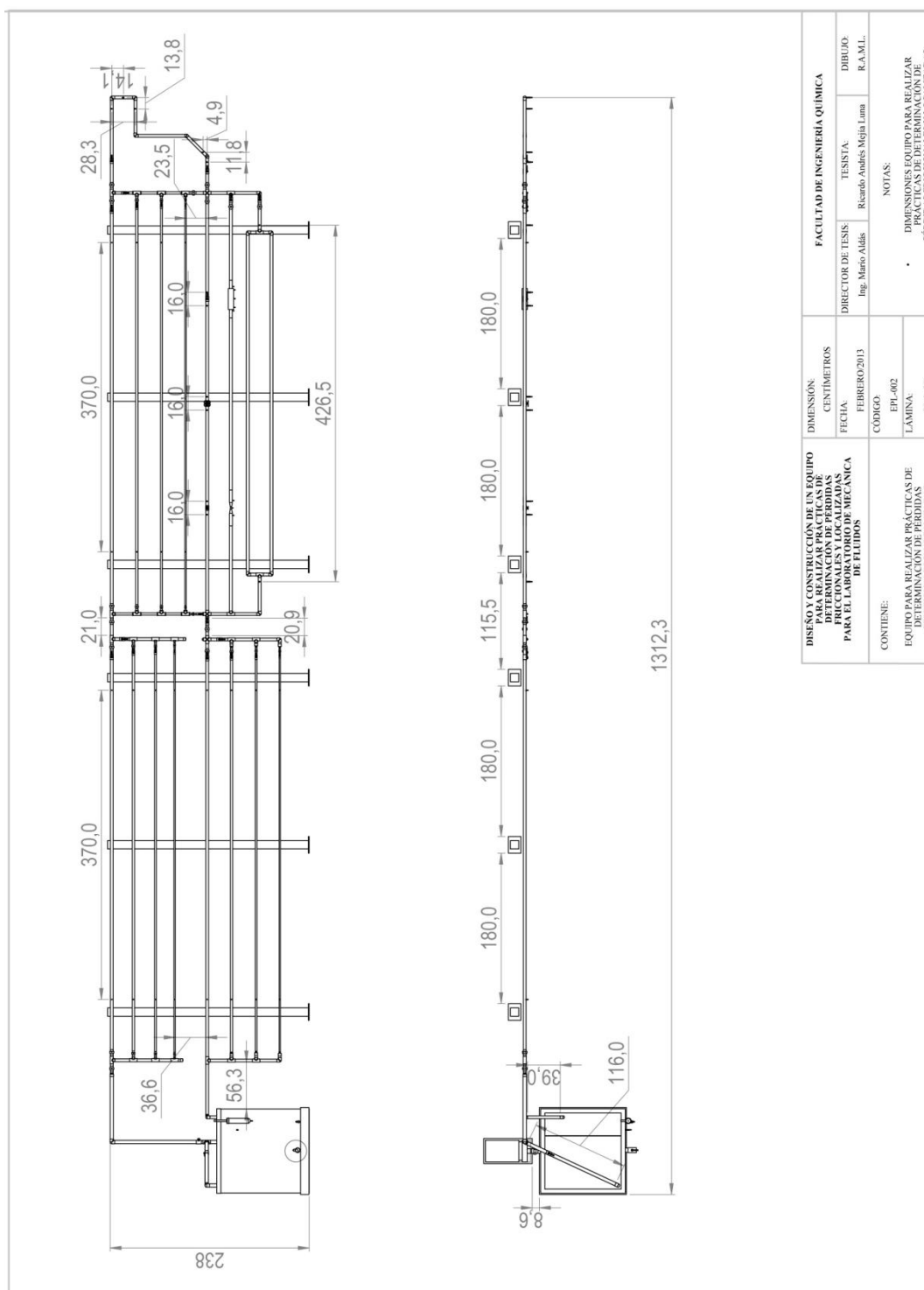
Anexo 10.- Componentes del equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Piñones de toma de presión de 1/4"	24
2	Grupo de Tuberías de Cu	1
3	Grupo de Tuberías de PVC	1
4	Accesorios codos	1
5	Válvulas Venturi, expansión y tuberías en paralelo	1
6	Válvulas con piñones de 1/4"	13
7	Grupo de Tuberías de HG	1
8	Vaso de medición final	1
9	Tanque de almacenamiento y descarga y bomba de alimentación	1
10	Perfiles de soporte	6

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSION: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA	
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldas	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna
CONTIENE: EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS	CÓDIGO: EPI-001	NOTAS:	
LAMINA: 37 de 39		COMPONENTES EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS	
		DIBUJO: R.A.M.L.	

Anexo 11.- Componentes del equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRACTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN:	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA			
	CENTÍMETROS	DIRECTOR DE TESIS:	Ing. Mario Aldás	TESISTA:	Ricardo Andrés Mejía Lima
	FECHA:	FEBRERO/2013	DIBUJO:	R.A.M.L.	
	CÓDIGO:	EPI-002	NOTAS:		
CONTIENE:	EQUIPO PARA REALIZAR PRACTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS	LAMINA:	38 de 39	DIMENSIONES EQUIPO PARA REALIZAR PRACTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS	

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El costo de la construcción del equipo de laboratorio, tomando en cuenta el diseño y la instalación es sumamente inferior al costo del mismo equipo en el mercado.
- Las pérdidas de carga friccionales dependen del material por el que está constituido la tubería, el diámetro y el caudal que por ella circula.
- Las pérdidas de carga varían directamente con la viscosidad del fluido, el cuadrado de la velocidad para flujos turbulentos e inversamente con el diámetro de la tubería.
- Las tuberías, que según bibliografía son consideradas lisas, e incluso las tuberías de hierro galvanizado que posee una rugosidad absoluta constante $\varepsilon = 0,015$ cm, experimentalmente demuestran una rugosidad absoluta mucho menor.
- Existe diferencias significativas entre los valores de literatura y experimentales del factor de fricción f y rugosidad absoluta pero coinciden con la misma tendencia. Para los coeficientes de resistencia de cada accesorio estas diferencias son menores, pero se debe también a que los valores de K no son constantes y que varían según la bibliografía y/o fabricante, modelo y material.

4.2 RECOMENDACIONES

- Únicamente se pueden medir caudales hasta que el vertedero alcance la altura de 8,3 cm por dos motivos: 1.- El límite superior de medición en el vertedero es 8,4 cm. 2.- Pasado este nivel, el caudal es tan alto que dificulta considerablemente su medición en el balde utilizado en la práctica, un balde mayor supondría un esfuerzo innecesario para el método didáctico.

- Vaciar el tanque de almacenamiento y descarga y los manómetros de “U” invertida cada vez que se concluya una práctica de laboratorio para evitar corrosión y acumulación de suciedad.
- Nunca encender la bomba centrífuga si el tanque de alimentación se encuentra vacío.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Barrera, H., Granados, J., Narváez, P. (1999) Solución de redes hidráulicas mediante la aplicación del modelo de balance de nodos y el método de la linealización de ecuaciones. *Revista Ingeniería e Investigación Universidad Nacional de Colombia* (42).
2. Bedoya, M. A. y Lampión, N. (2009) *Estudio comparativo de modelos reológicos para lodos de perforación*. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero en Petróleos no publicadas) Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
3. Blasco, J. (2006) Métodos de Medidas Reológicas. Parte 1: Fluidos Puramente Viscosos. *Curso de Reología Aplicada*. Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, España.
4. Crane Corporation. (1992) *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. México D.F., México, Editorial McGraw Hill.
5. División de recursos hídricos y medio ambiente. (2003) *Guía de Laboratorio, CI41A – Hidráulica*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
6. Fernández, P. *Bombas Centrífugas y Volumétricas, Universidad de Cantabria*. http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/bombas-centrifugas-y-volumetricas.pdf, (Julio, 2013).
7. Fernández, P. (2003) *Mecánica de Fluidos*. Universidad de Cantabria. España

8. García, G. (2010), *Determinación de coeficientes de descarga en vertederos de cresta redondeada*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.
9. Giles, R. (1998) *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. 2da Edición. Colombia. Shaum - McGraw Hill.
10. Ibarrola, E. *Introducción a los fluidos no newtonianos*. Universidad de Córdoba. Argentina.
11. Kreith, F. y Berger S. A. (1999) *Mechanical Engineering Handbook*. Boca Raton, Estados Unidos. CRC Press LLC.
12. Martín, I., Caicedo, R. y Font, R. (2011), *Mecánica de Fluidos: 1. Flujo interno de fluidos incompresibles y compresibles*. Universidad de Alicante, España.
13. McKetta, J. (1991) *Encyclopedia of Chemical Processing and Design*. Estados Unidos. Marcel Dekker Inc.
14. Méndez, A. y Noriega, O. (2009) *Comportamiento reológico de un fluido*. Universidad del Mar. México.
15. Méndez-Sánchez, A., Pérez-Trejo, L. y Paniagua, A. (2010) *Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette)*. Universidad Autónoma de México, México D.F., México.
16. McCabe, W. (1991) *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. 4ta Edición. Madrid, España. McGraw Hill.
17. Mott, R. (2006) *Mecánica de fluidos aplicada*. 6ta Edición. México. Prentice Hall.

18. Nakayama, Y. (2000) *Introduction to Fluid Mechanics*. Reino Unido. Butterworth Heinemann.
19. Pardo, L. (2000) *Flujo en Tuberías*. Universidad Tecnológica del Chocó, Quibdó, Colombia.
20. Pasinato, D. (2008) *Fundamentos de Mecánica de Fluido*. Plaza Huincul, Argentina. Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional.
21. Perry, R. (2008) *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8va Edición. Estados Unidos. Editorial Mc Graw Hill.
22. Potter, M. y Wiggert D. (2002) *Mecánica de Fluidos*. 3era Edición. Estados Unidos. Editorial Thompson.
23. Rojas, O., Briceño, M. I. y Avendaño, J. (2012) *Fundamentos de Reología* Laboratorio de formulación, interfases, reología y procesos. Universidad de los Andes. Venezuela.
24. Soria, A. (2003) *Manuales de los laboratorios de fenómenos de transporte* Recuperado de <http://es.scribd.com/doc/70723647/Man-Lab-Fen-Trans> (Mayo, 2011).
25. Shames, I. (1995) *Mecánica de Fluidos*. 3era Edición. Santafé de Bogotá, Colombia. Editorial McGraw Hill.
26. Sleigh, Dr. Andrew. (2001) *An Introduction to Fluid Mechanics*. University of Leeds. Leeds, Inglaterra.
27. Streeter, V., Wylie, E. y Bedford, K. (2000) *Mecánica de Fluidos*. 9na Edición. Santafé de Bogotá, Colombia. Editorial McGraw Hill.

28. TECNUN. (2007) *Práctica de Laboratorio 4: Pérdidas de Carga en los componentes de las instalaciones hidráulicas*, Universidad de Navarra. España.
29. Universidad de Oviedo (2008) *Pérdidas de carga en tuberías*. Área de Mecánica de Fluidos, España.
30. Velásquez, A. y Velásquez, S. (2006) *Guía de Laboratorio de Mecánica de Fluidos. Balance de Masa y Energía en tuberías y accesorios hidráulicos (C206)*, Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile.

ANEXOS

ANEXO I

DIAGRAMA DE MOODY

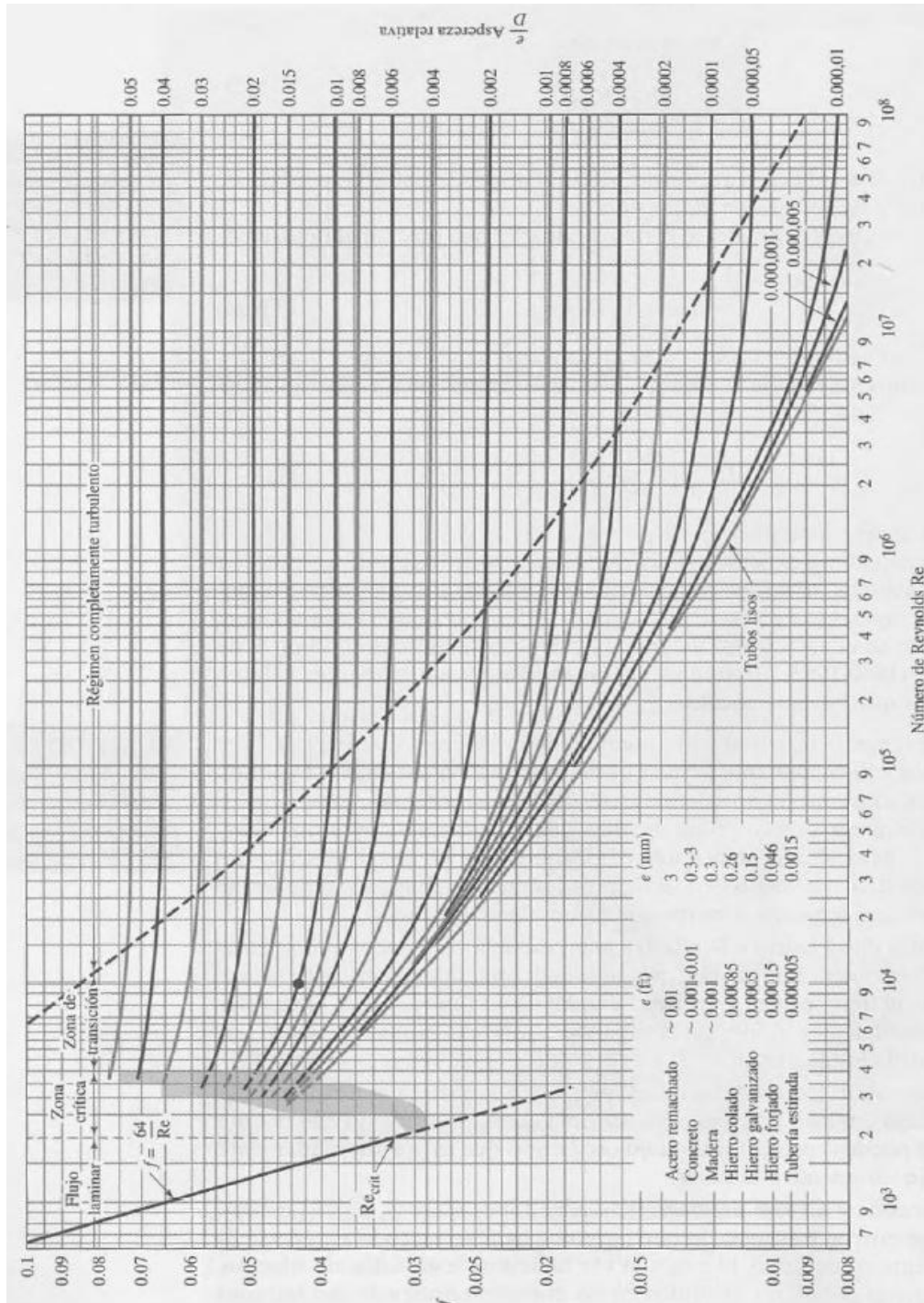


Figura AI.1. Diagrama de Moody

(Potter, 2002)

ANEXO II

DIAGRAMAS DEL EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS

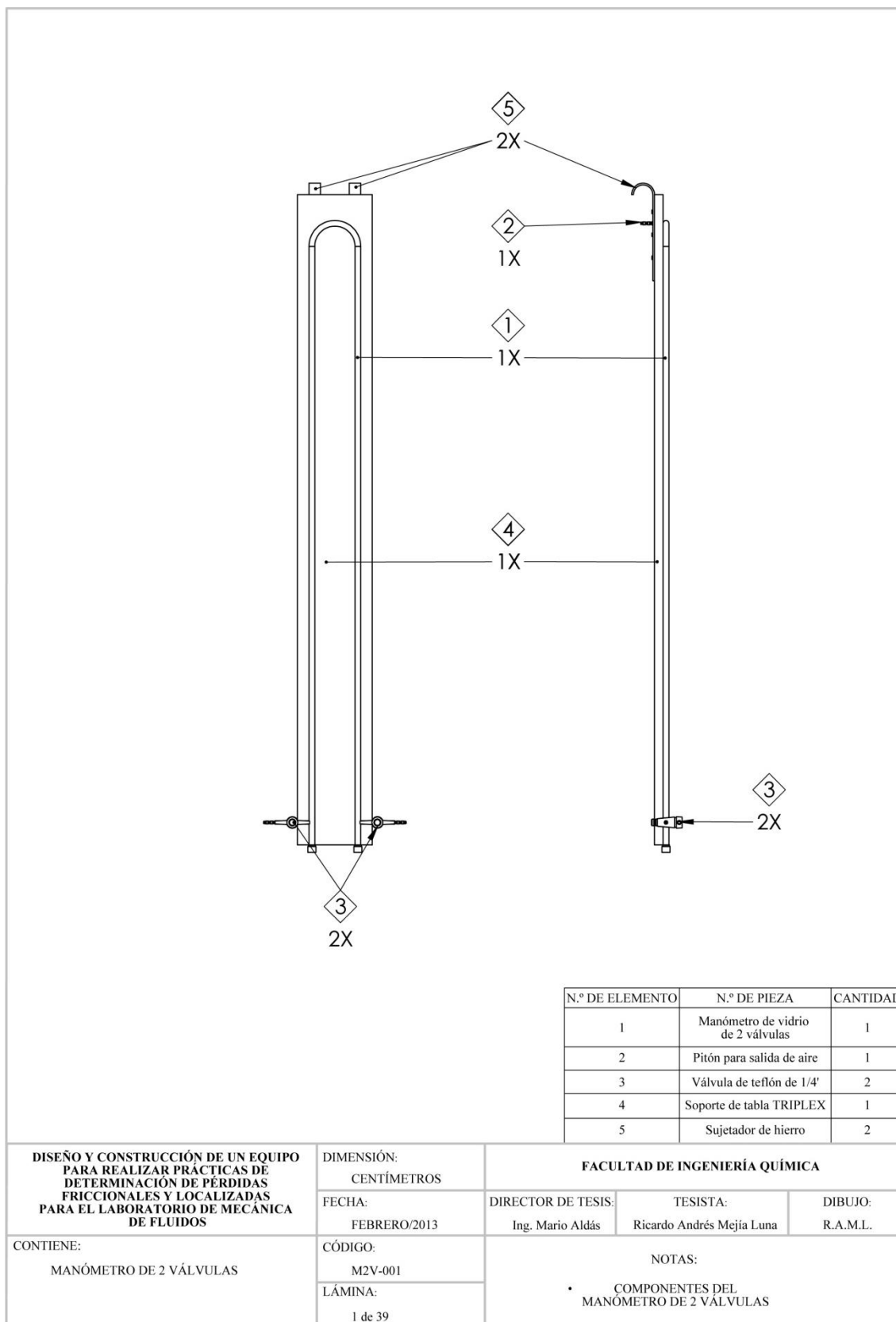


Figura AII.1. Componentes del manómetro de 2 válvulas

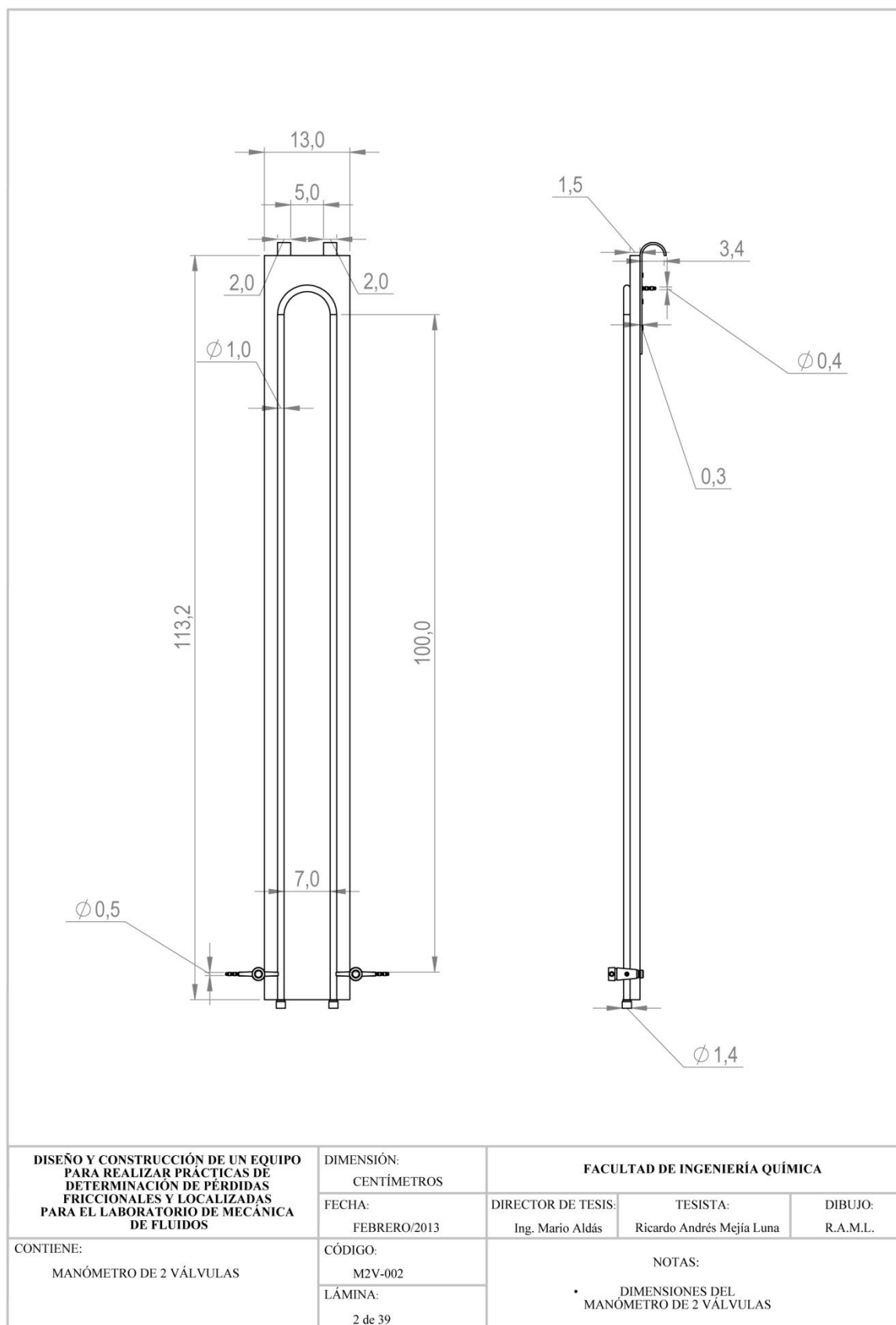


Figura AII.2. Dimensiones del manómetro de 2 válvulas

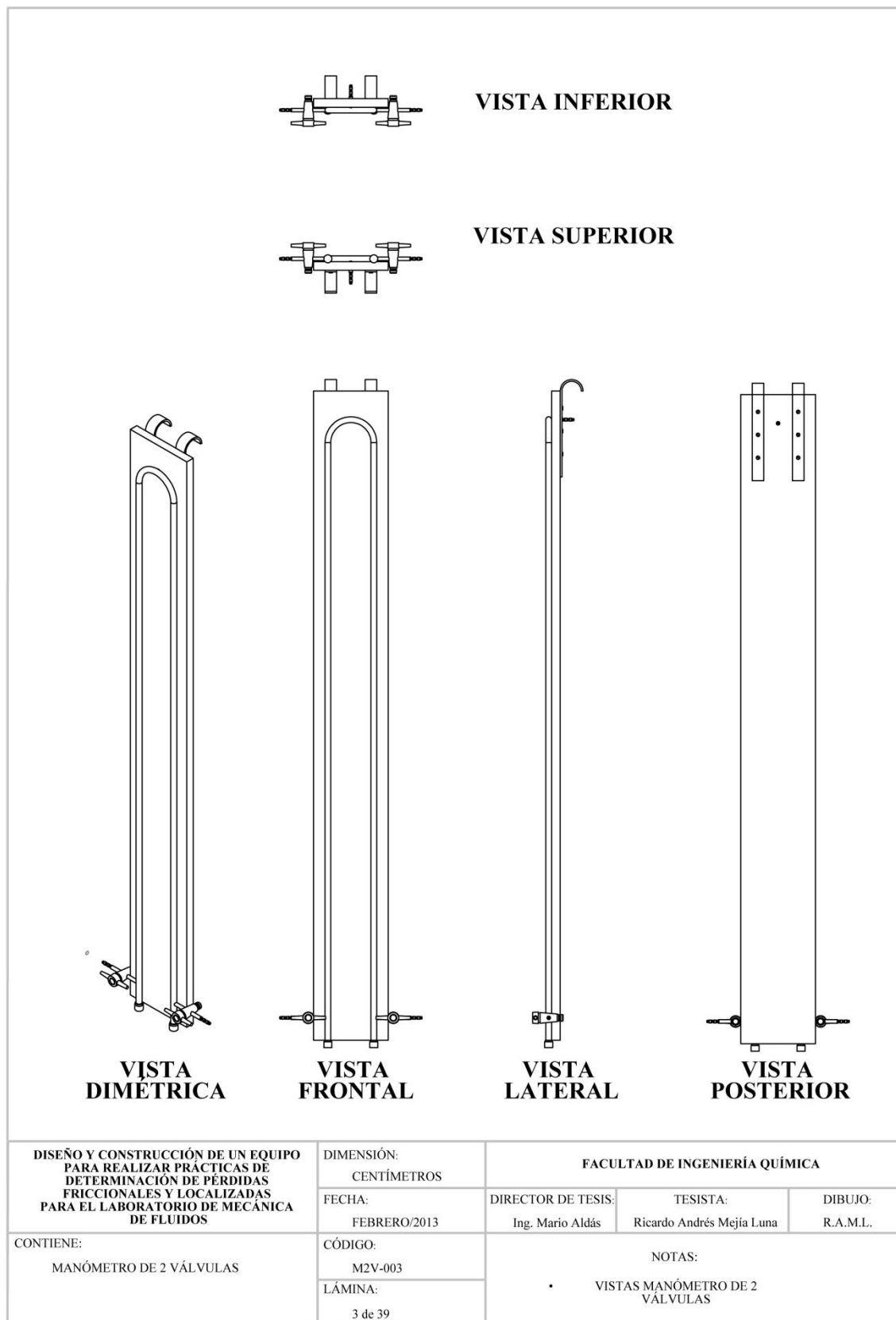


Figura AII.3. Vistas del manómetro de 2 válvulas

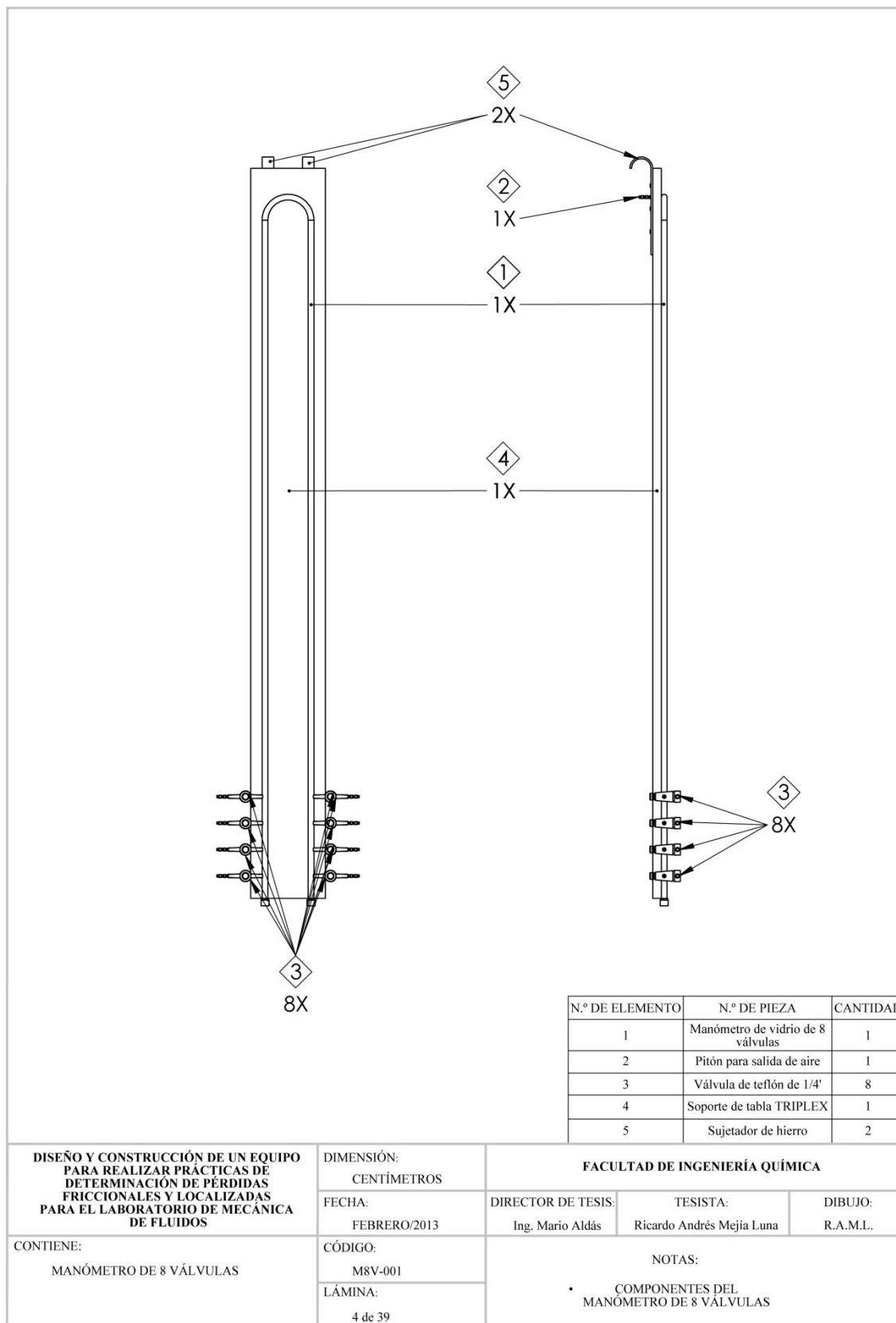


Figura AII.4. Componentes del manómetro de 8 válvulas

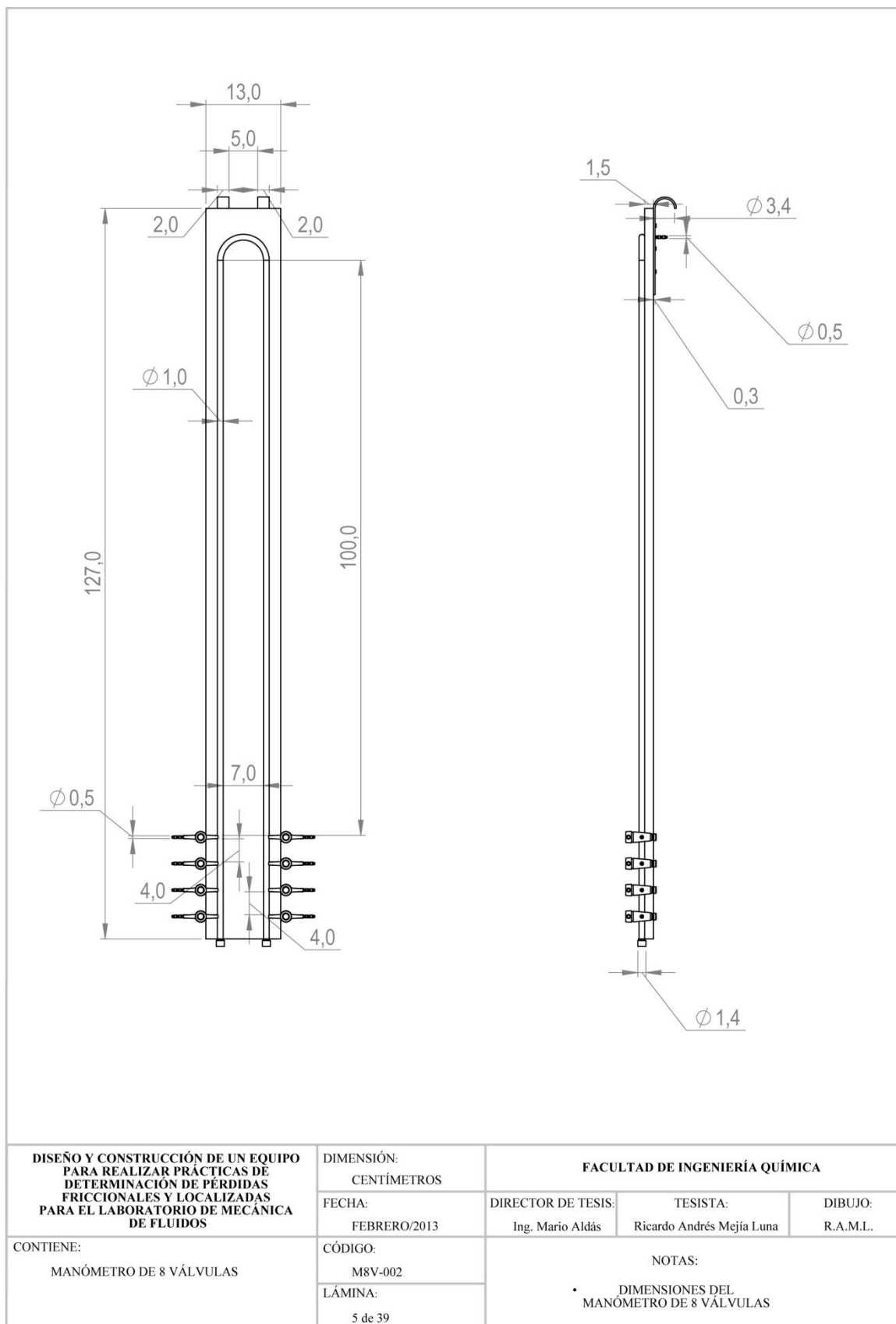


Figura AII.5. Dimensiones del manómetro de 8 válvulas

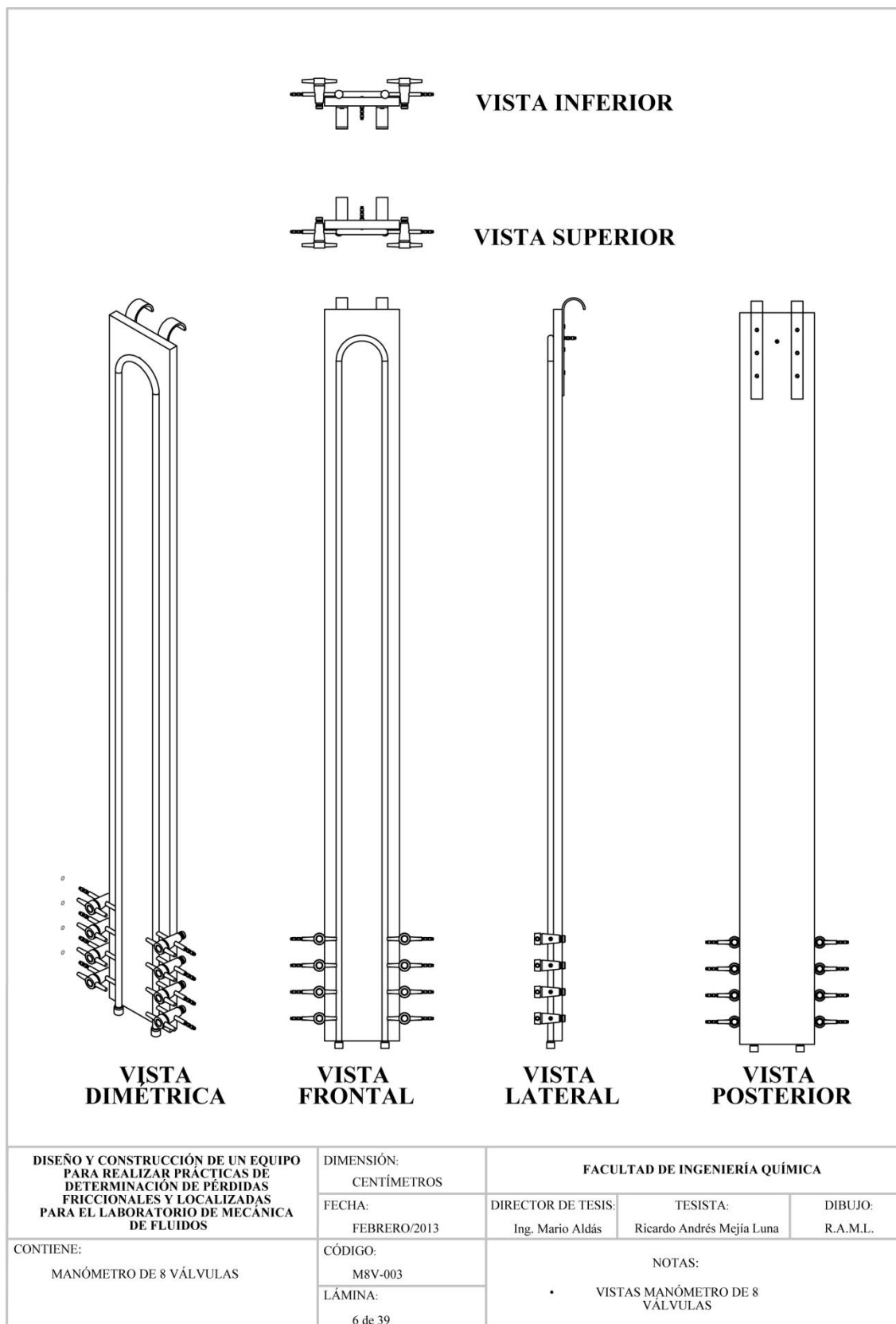


Figura AII.6. Vistas del manómetro de 8 válvulas

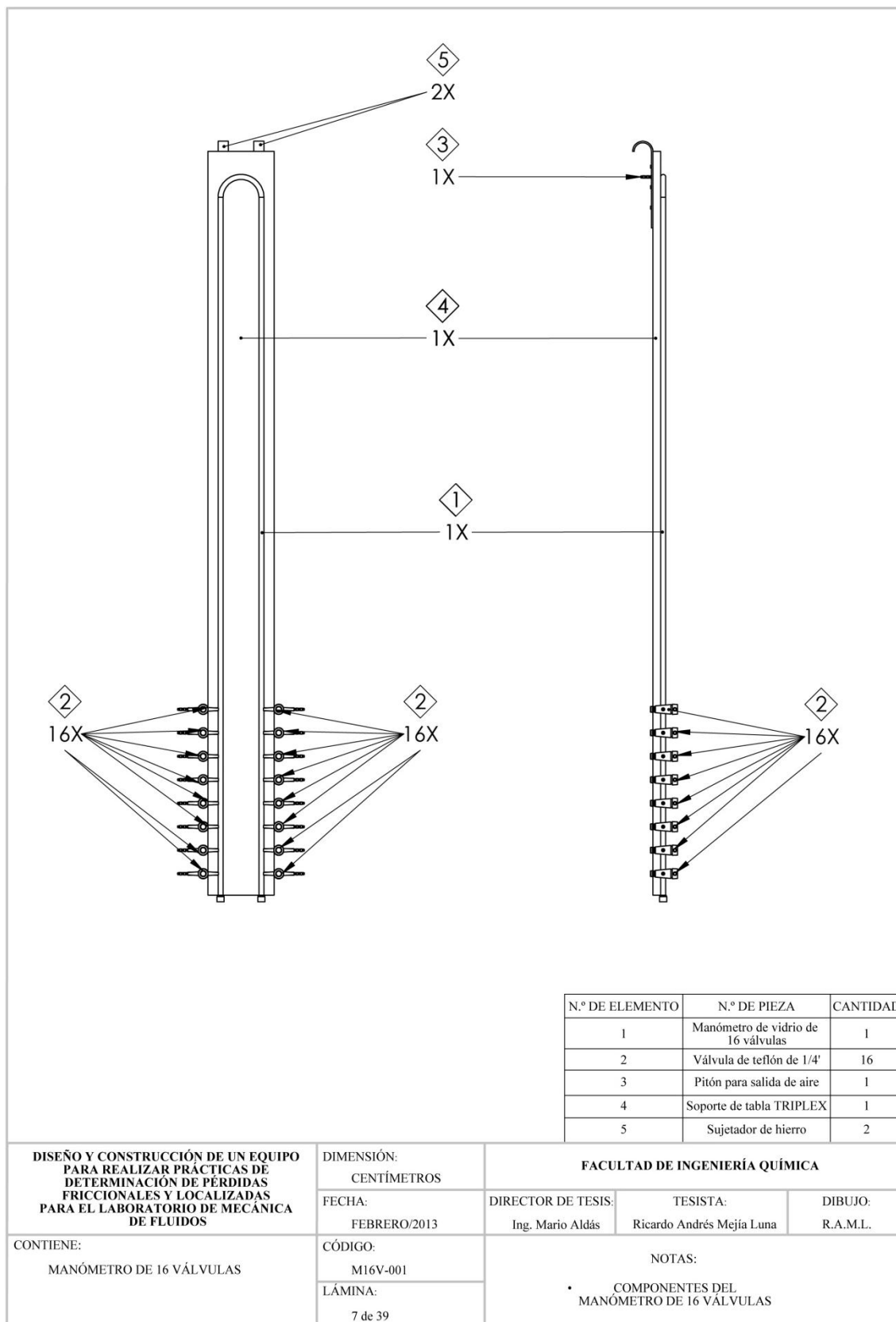


Figura AII.7. Componentes del manómetro de 16 válvulas

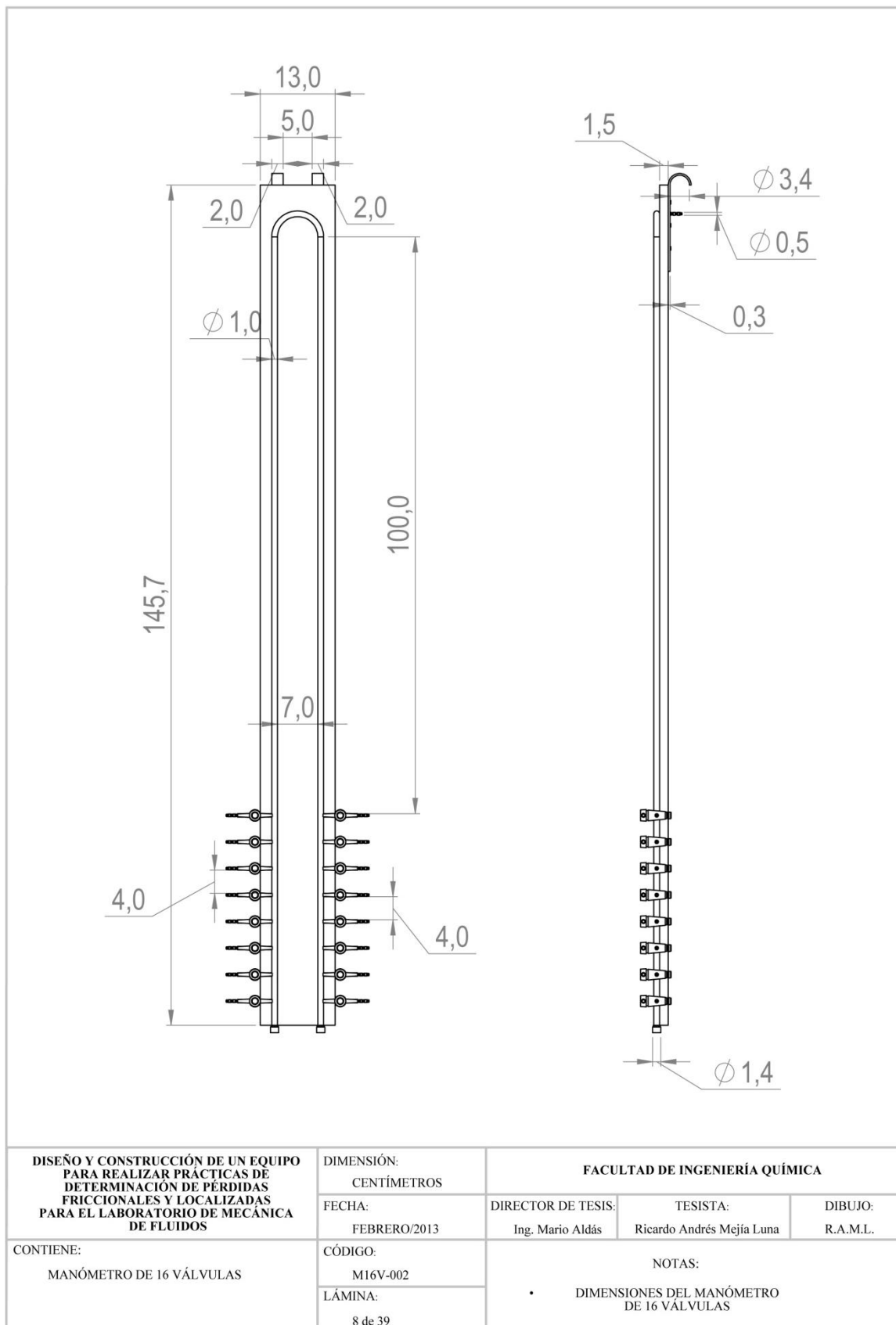


Figura AII.8. Dimensiones del manómetro de 16 válvulas

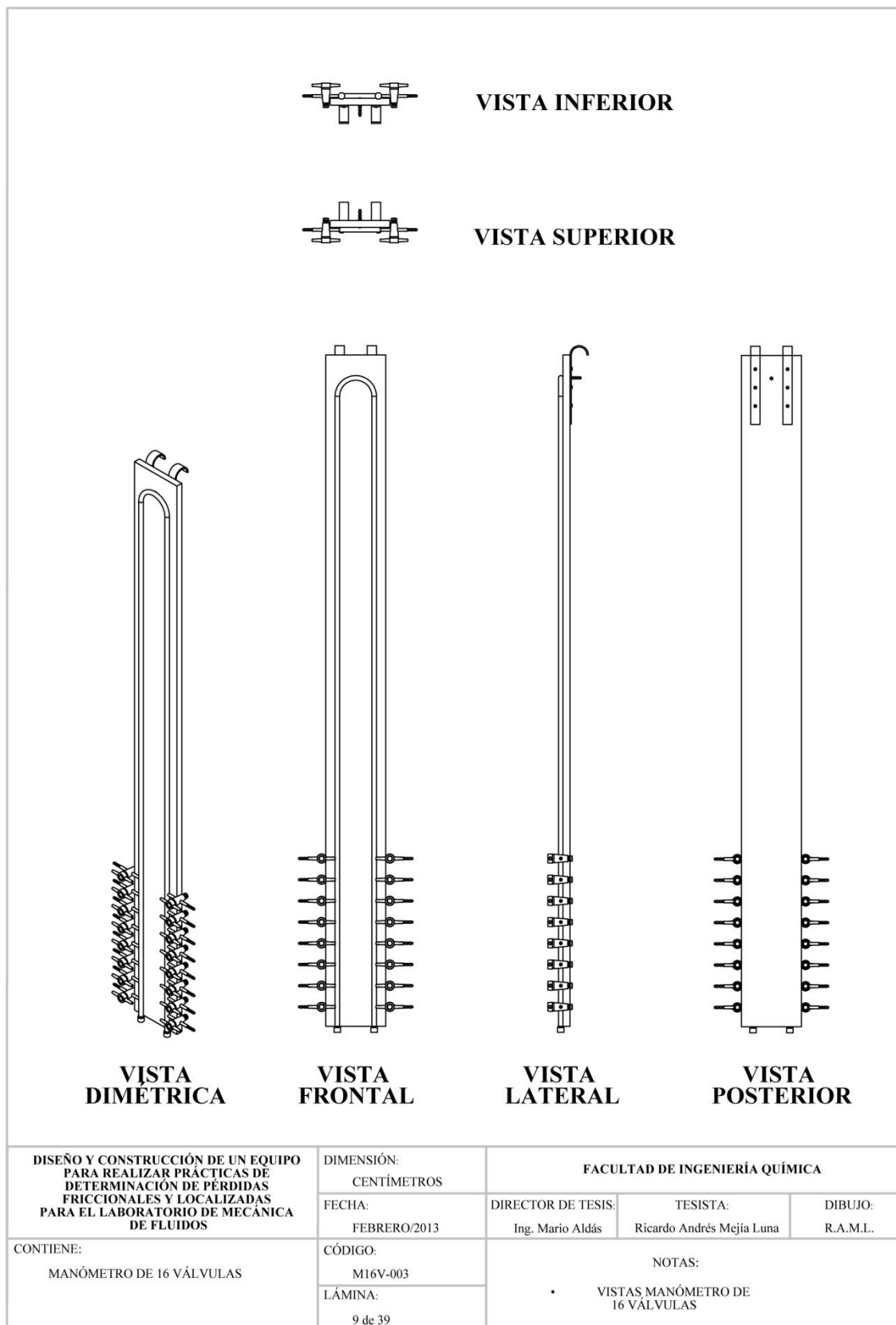
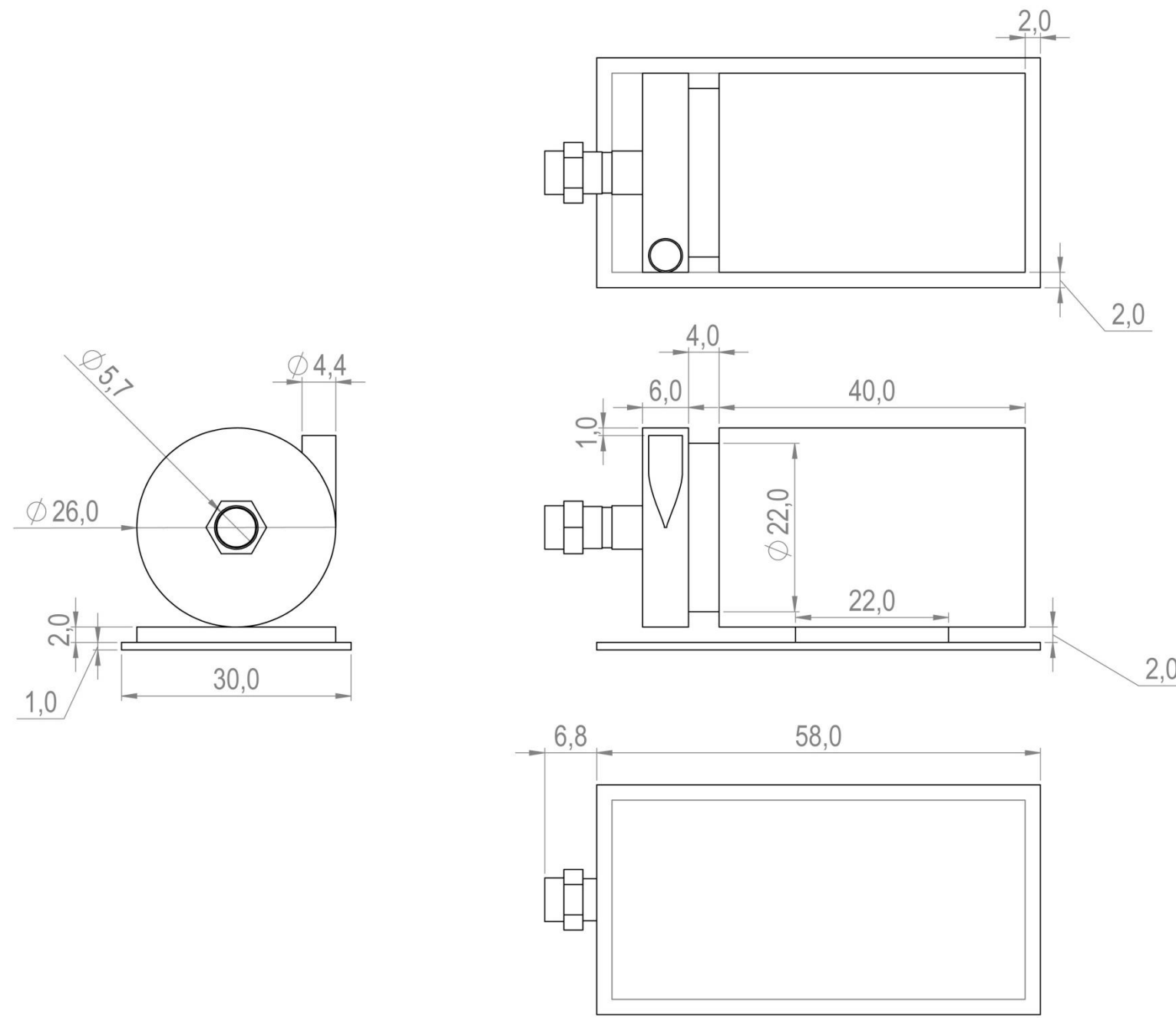


Figura AII.9. Vistas del manómetro de 16 válvulas



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: BOMBA DE ALIMENTACIÓN	CÓDIGO: BAD-001	NOTAS: • DIMENSIONES BOMBA DE ALIMENTACIÓN		
	LÁMINA: 10 de 39			

Figura AII.10. Dimensiones bomba de alimentación

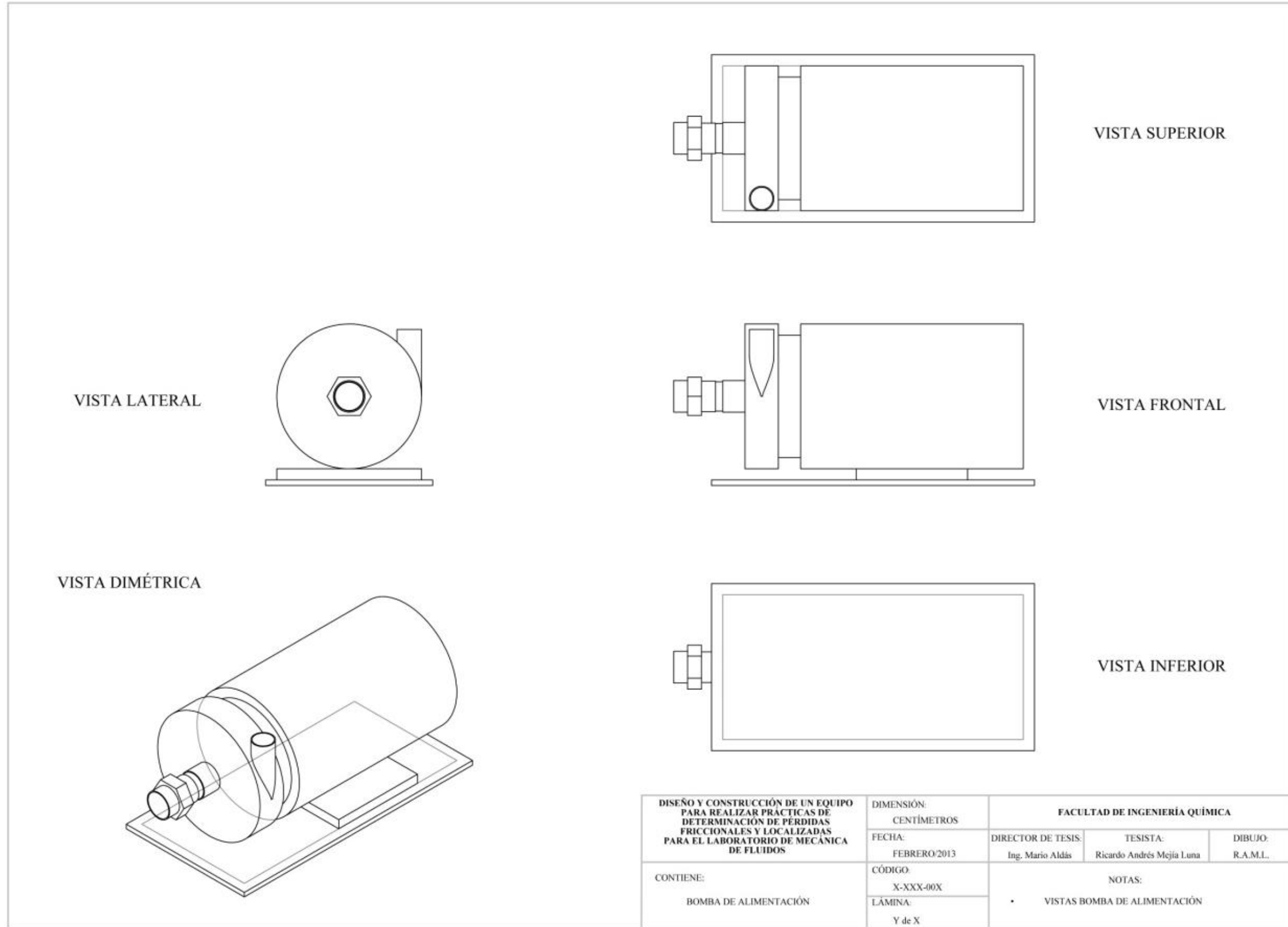


Figura AII.11. Vistas bomba de alimentación

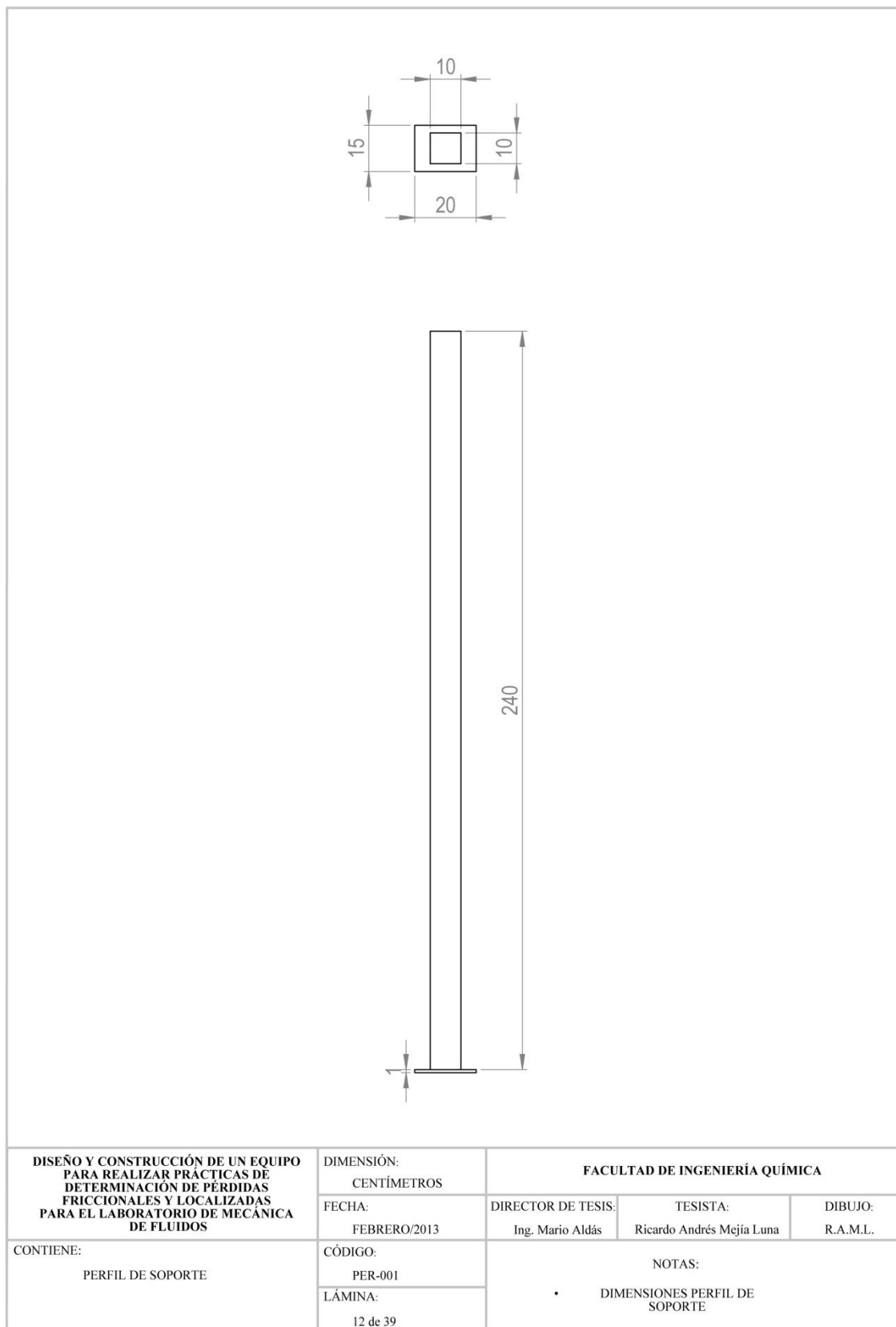


Figura AII.12. Dimensiones perfil de soporte

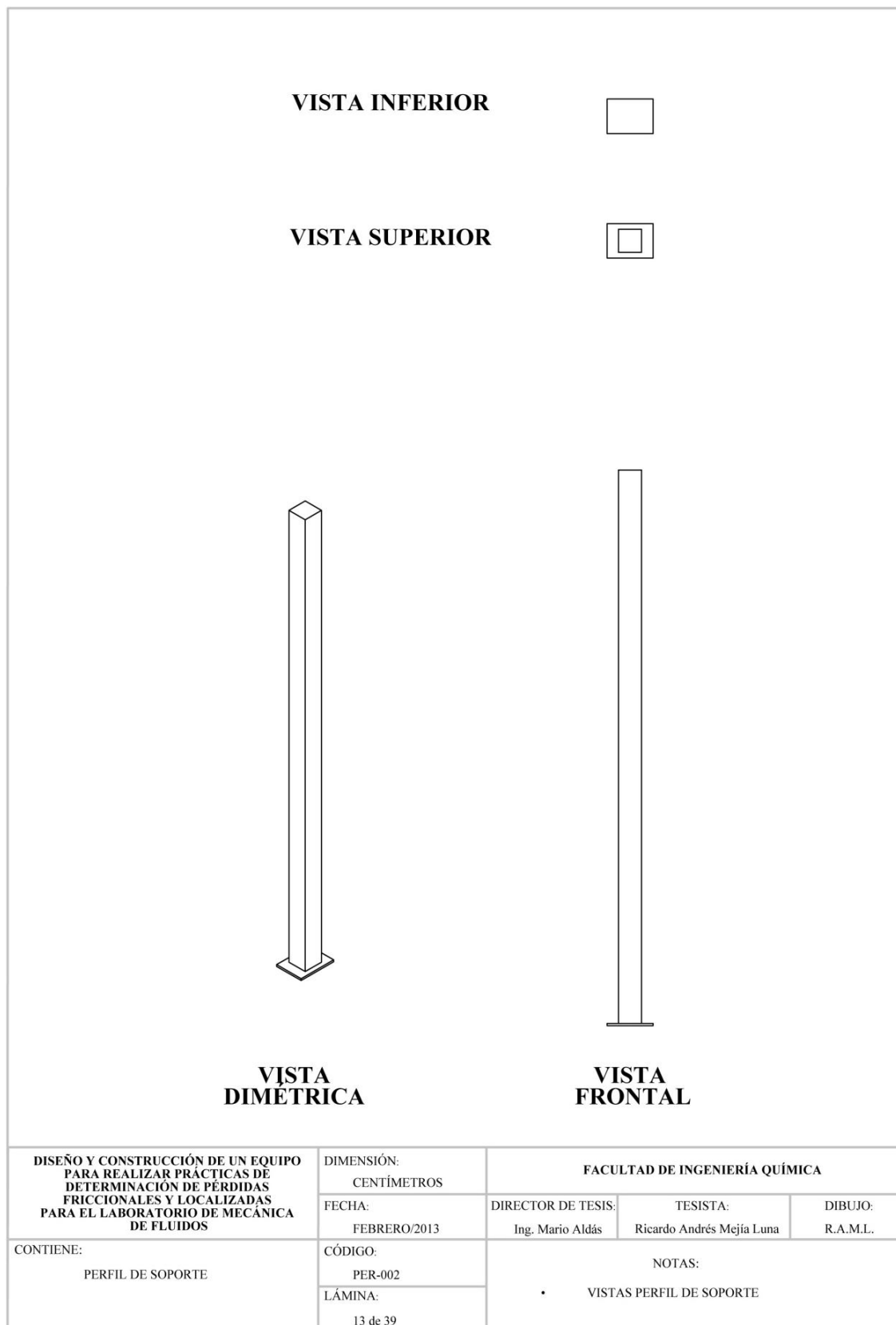
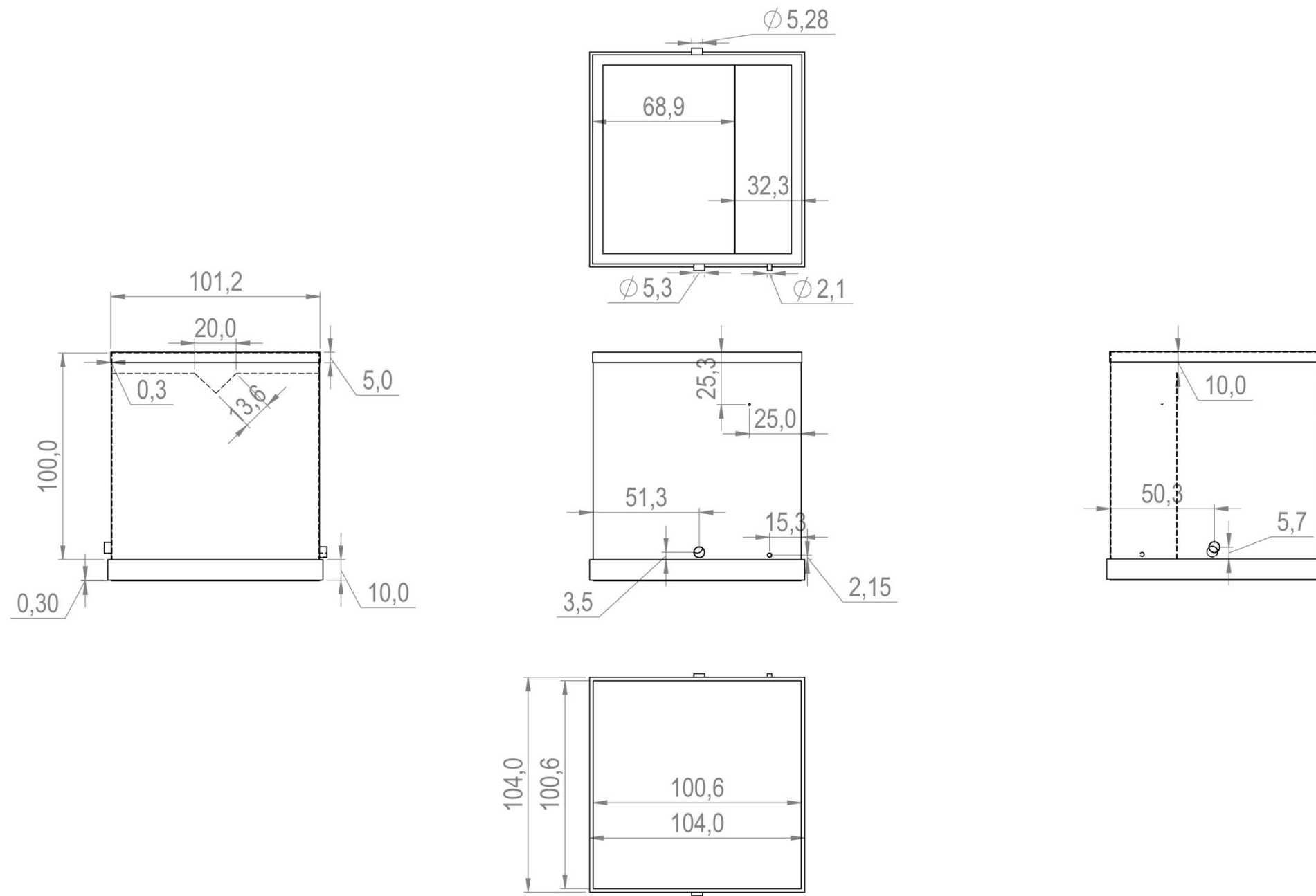


Figura AII.13. Vistas perfil de soporte



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA	CÓDIGO: TAD-001	NOTAS: • DIMENSIONES TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y DESCARGA		
	LÁMINA: 14 de 39			

Figura AII.14. Dimensiones tanque de almacenamiento y descarga

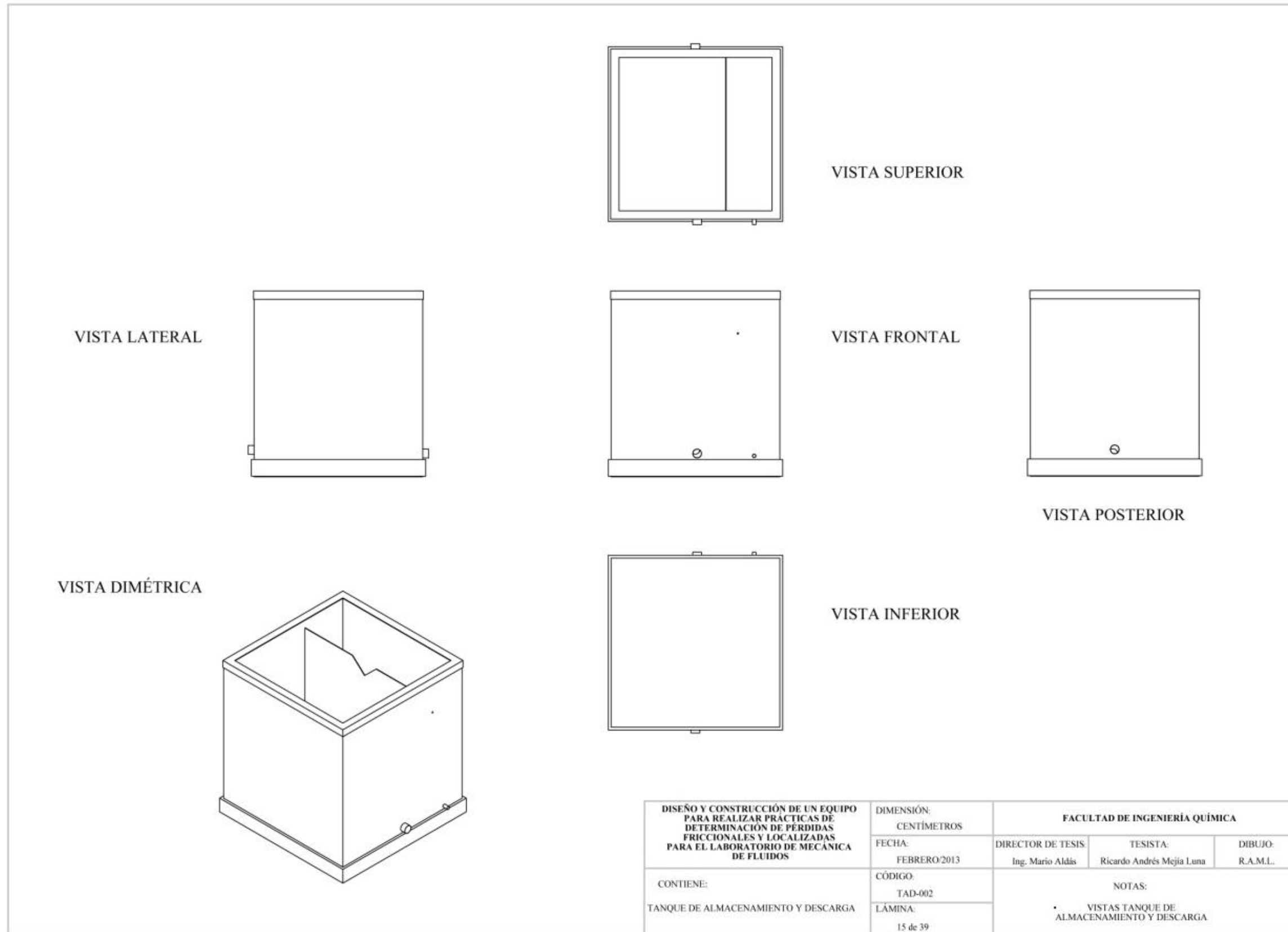


Figura AII.15. Vistas tanque de almacenamiento y descarga

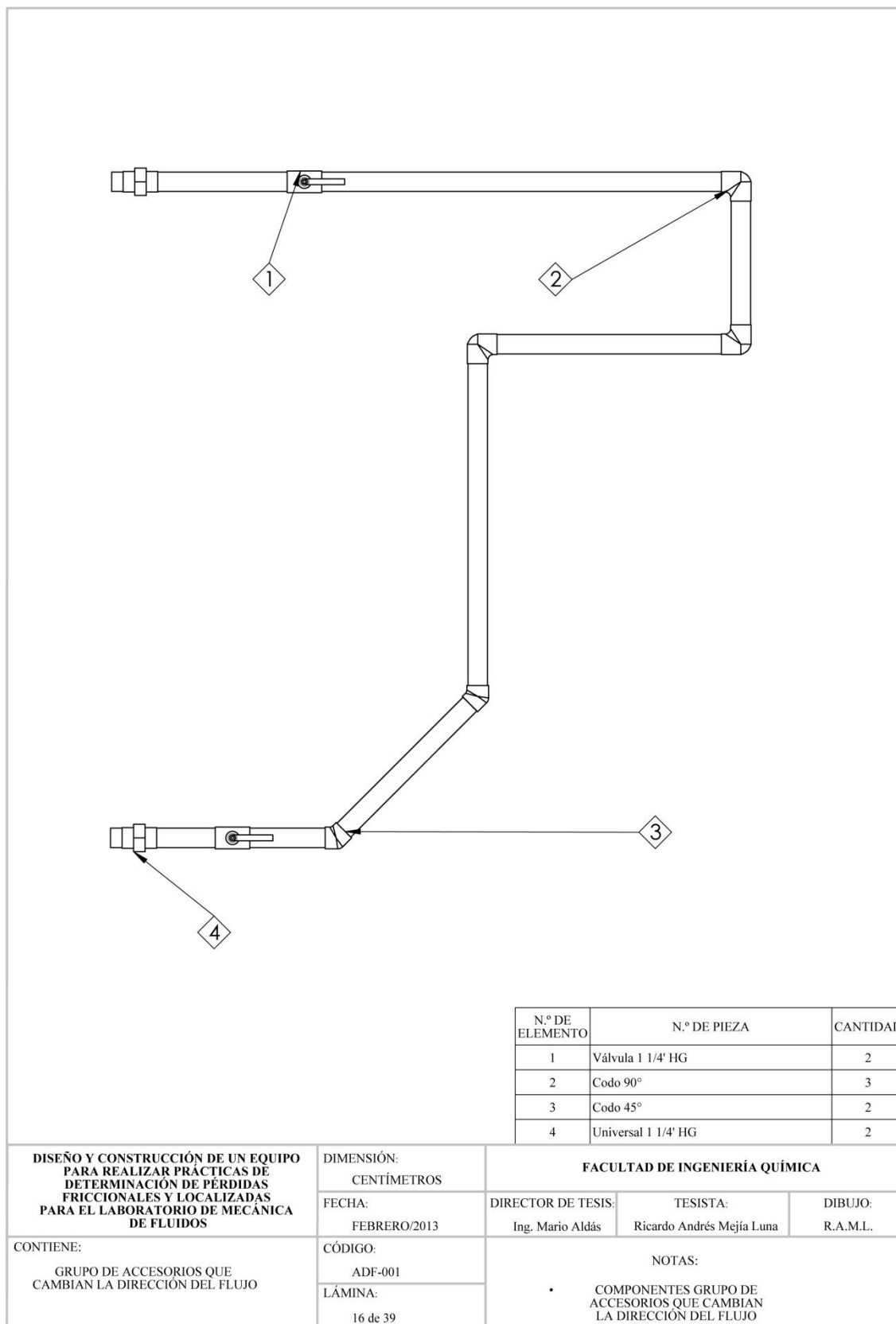
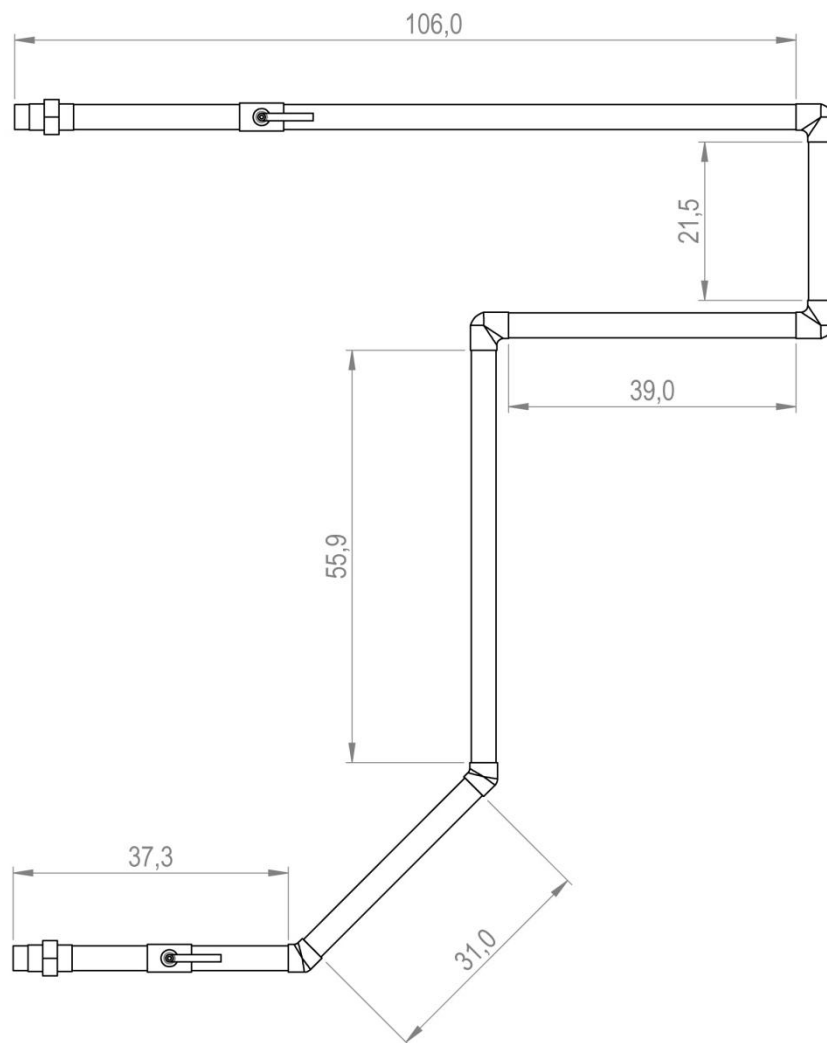


Figura AII.16. Componentes grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: GRUPO DE ACCESORIOS QUE CAMBIAN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO	CÓDIGO: ADF-002	NOTAS: • DIMENSIONES GRUPO DE ACCESORIOS QUE CAMBIAN LA DIRECCIÓN DEL FLUJO		
	LÁMINA: 17 de 39			

Figura AII.17. Dimensiones grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo

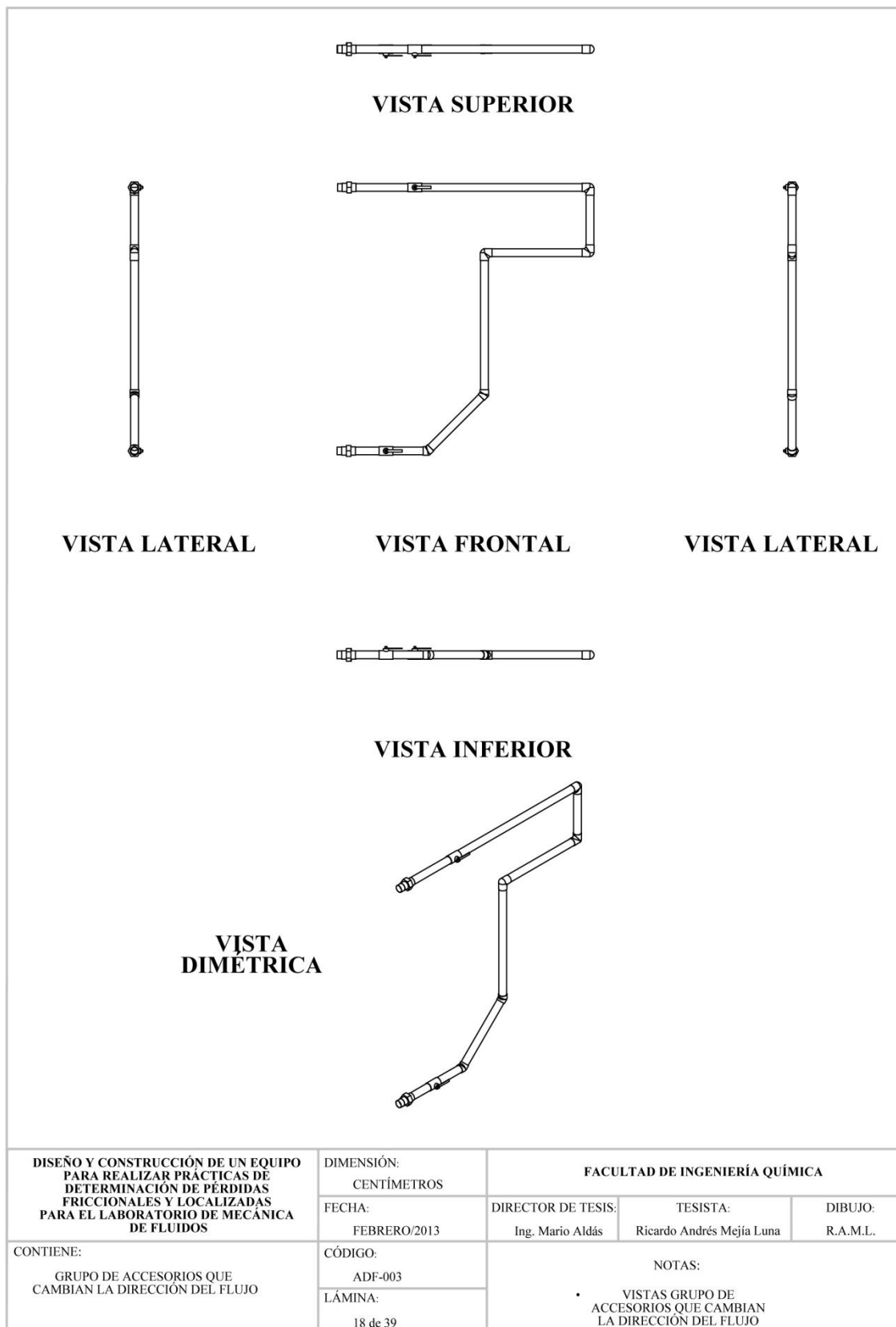


Figura AII.18. Vistas grupo de accesorios que cambian la dirección del flujo

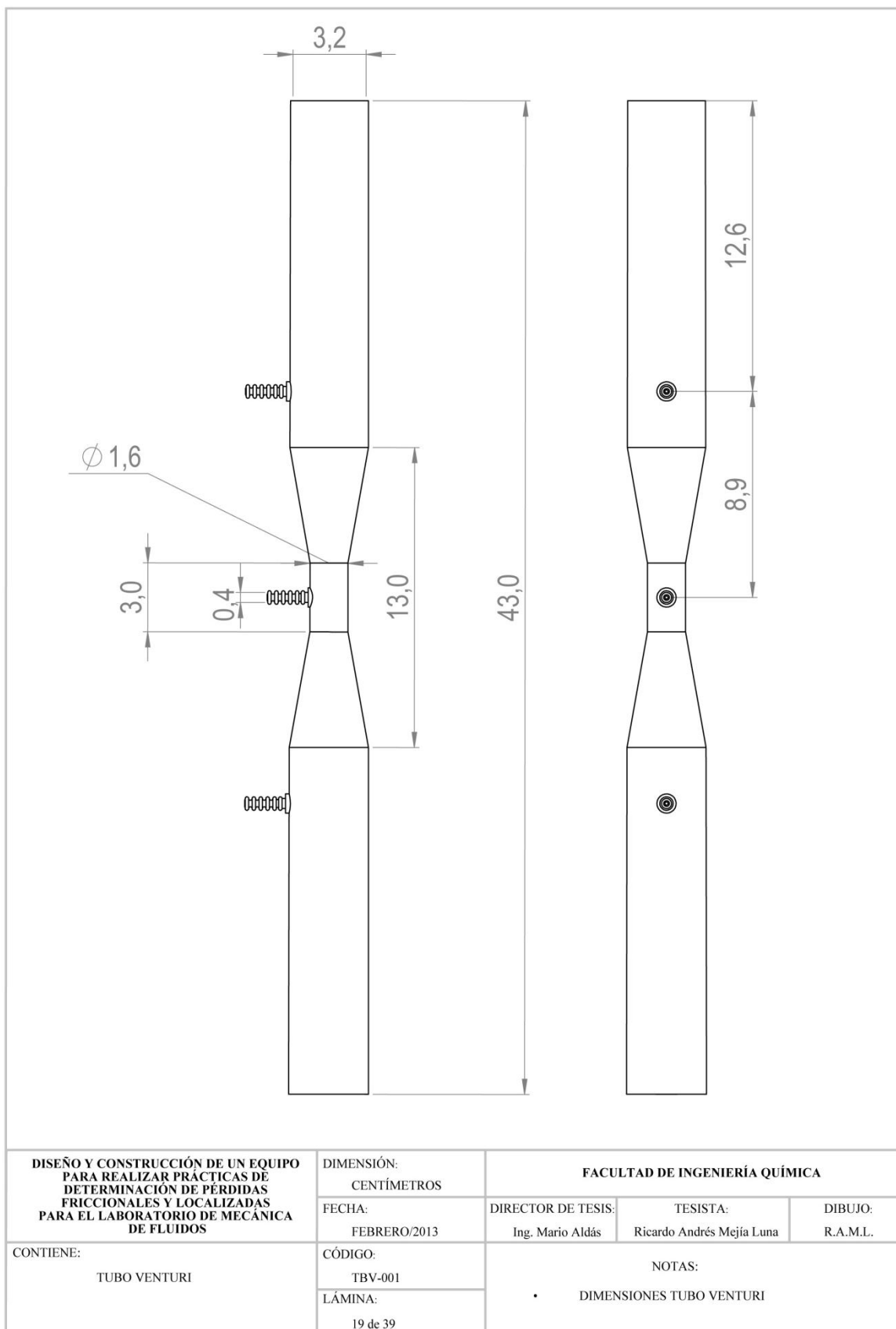


Figura AII.19. Dimensiones tubo Venturi

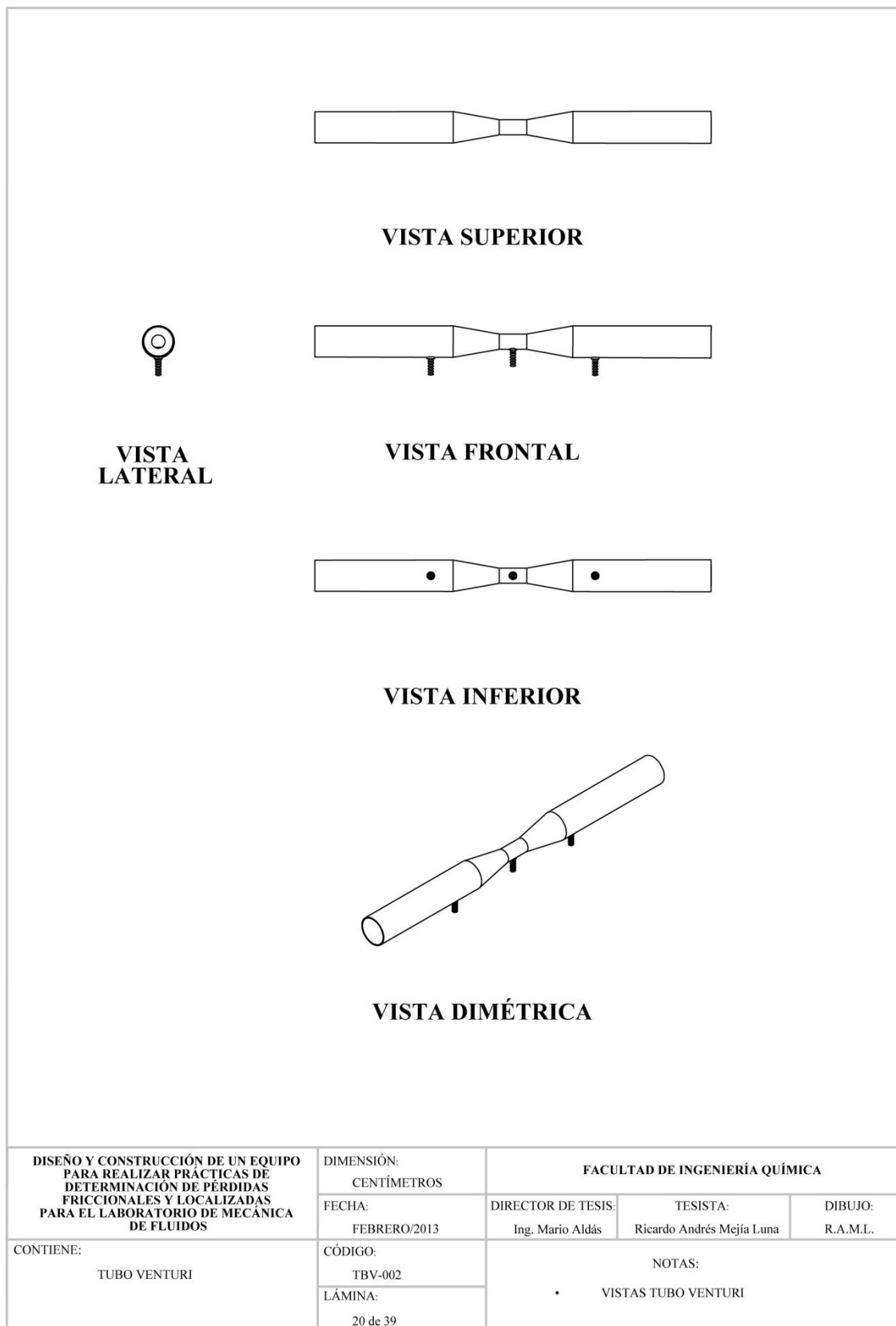


Figura AII.20. Vistas tubo Venturi

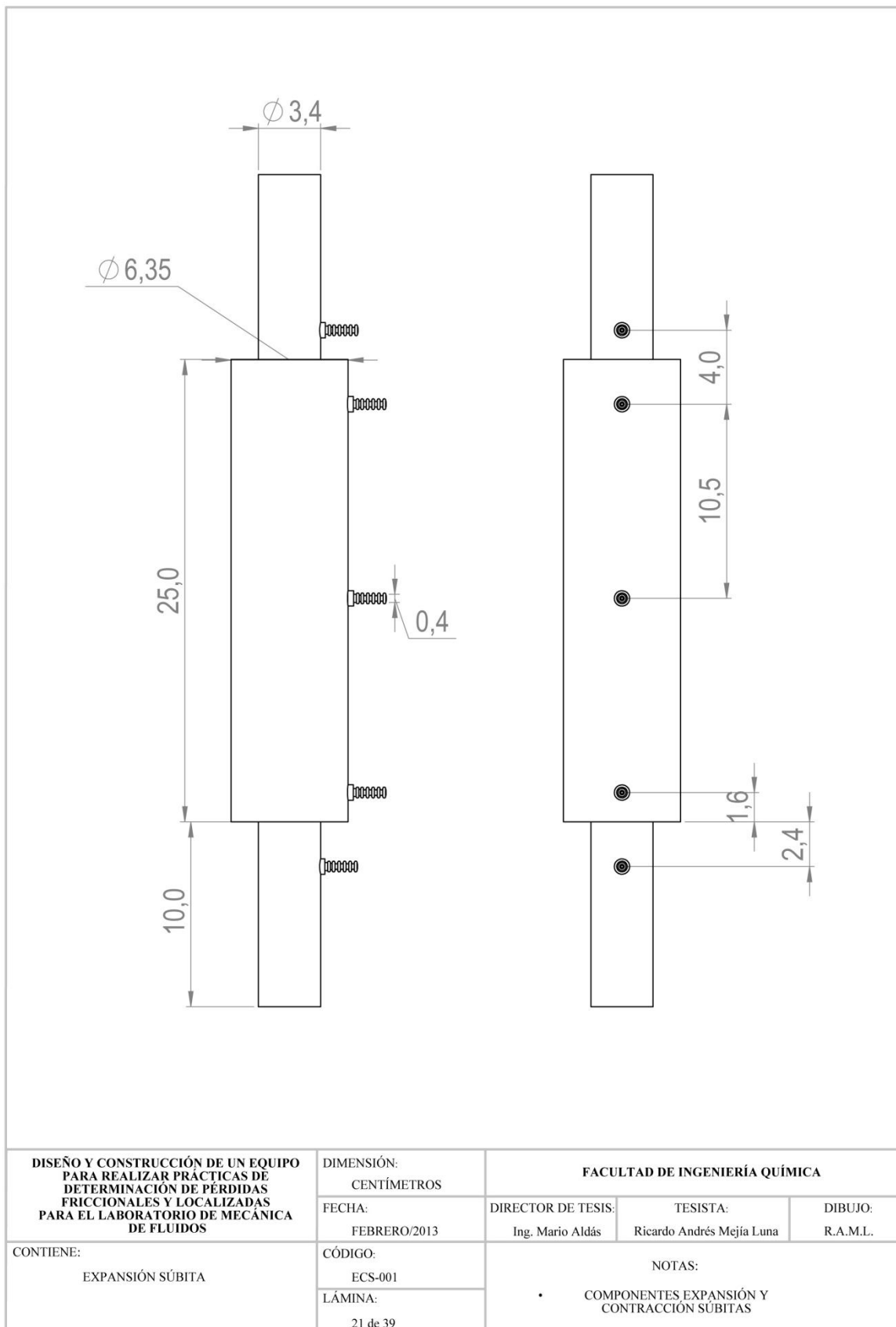


Figura AII.21. Dimensiones expansión y contracción súbitas

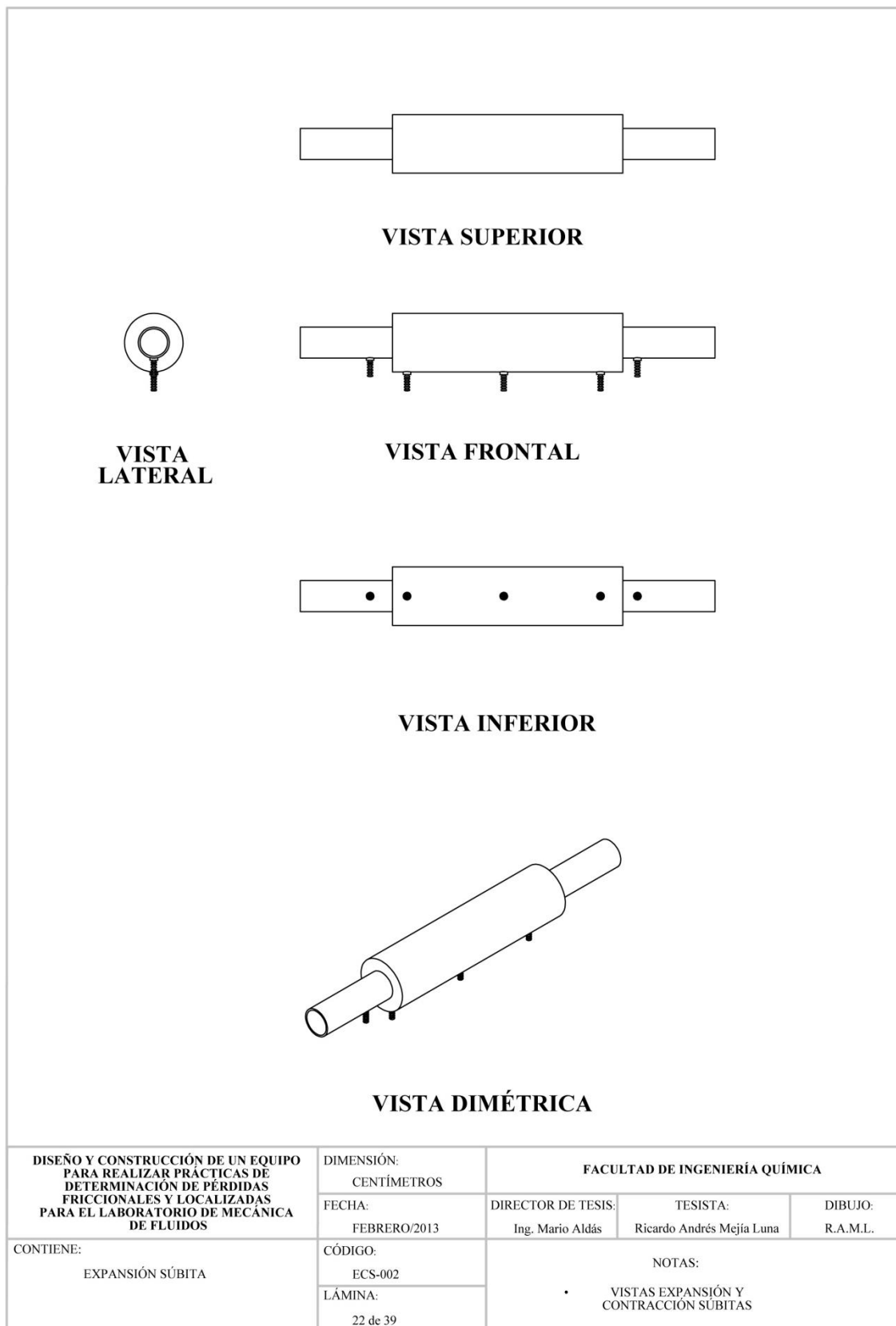
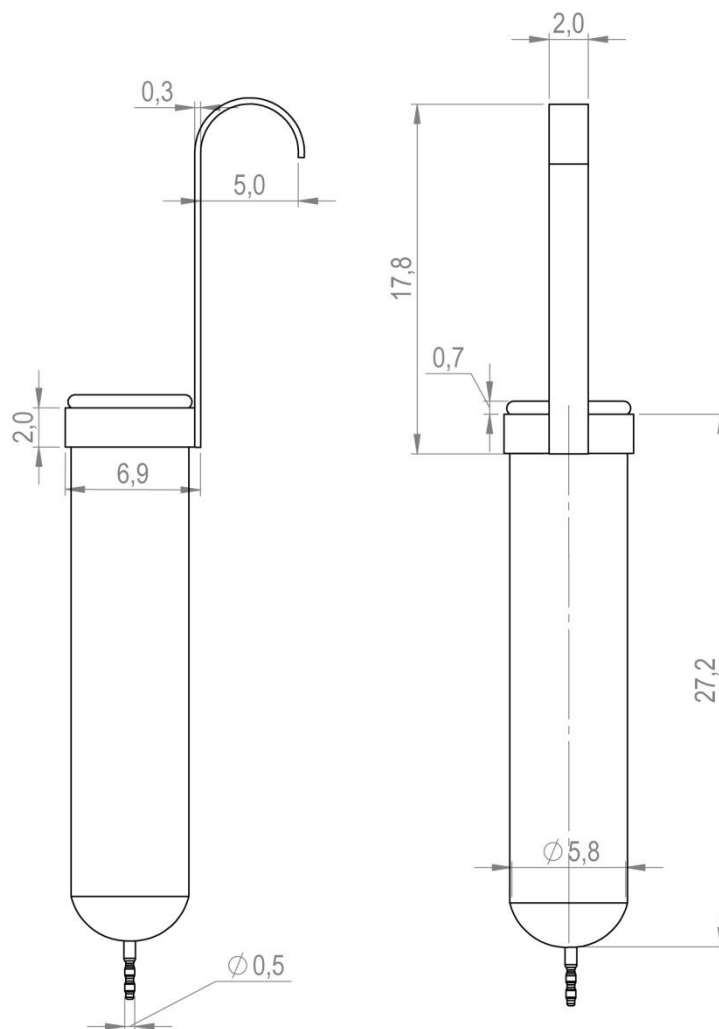


Figura AII.22. Vistas expansión y contracción súbitas



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: VASO DE MEDICIÓN DE ALTURA DEL VERTEDERO	CÓDIGO: VMV-001	NOTAS: • DIMENSIONES VASO DE MEDICIÓN DE ALTURA DEL VERTEDERO		
	LÁMINA: 23 de 39			

Figura AII.23. Dimensiones vaso de medición de altura del vertedero

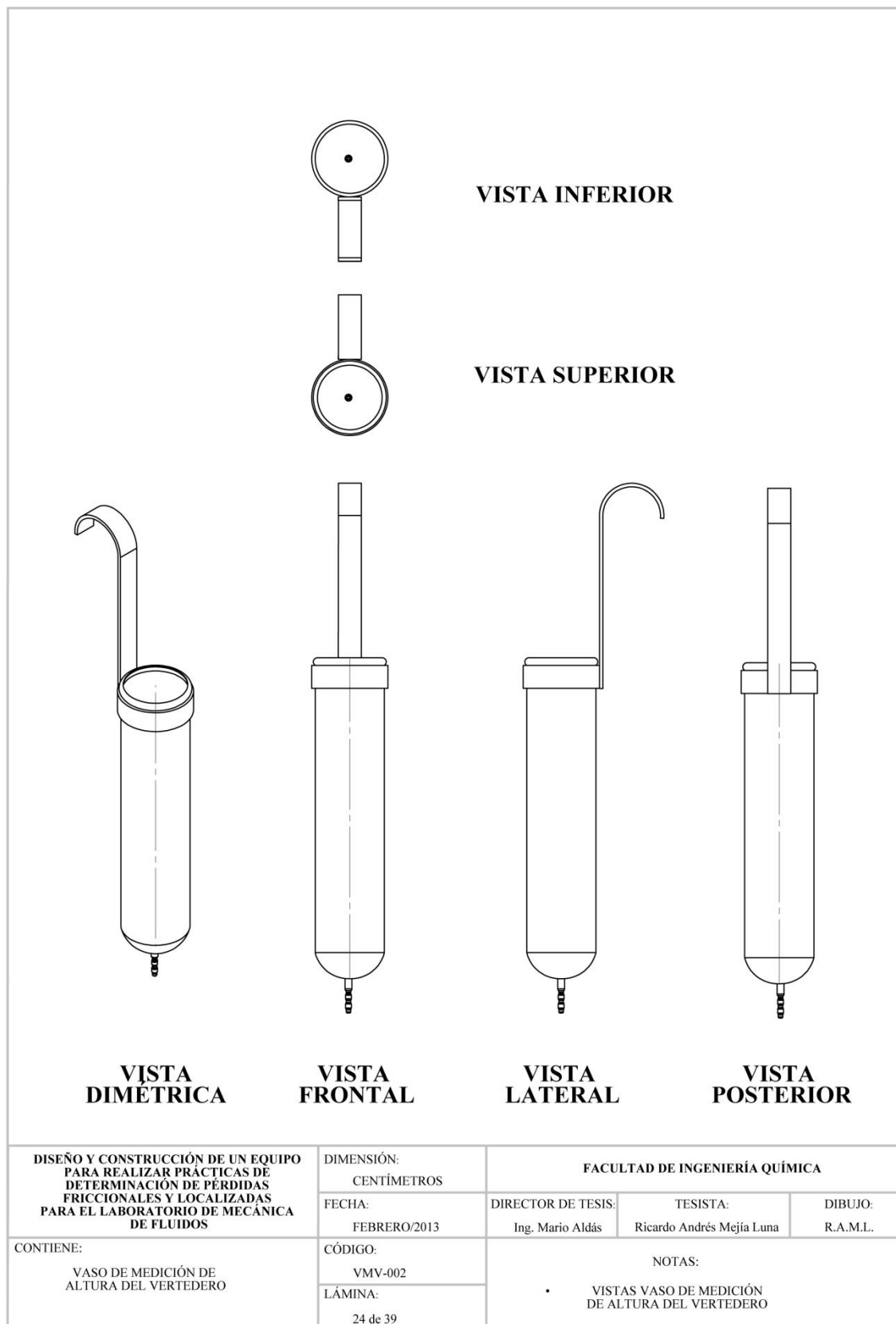
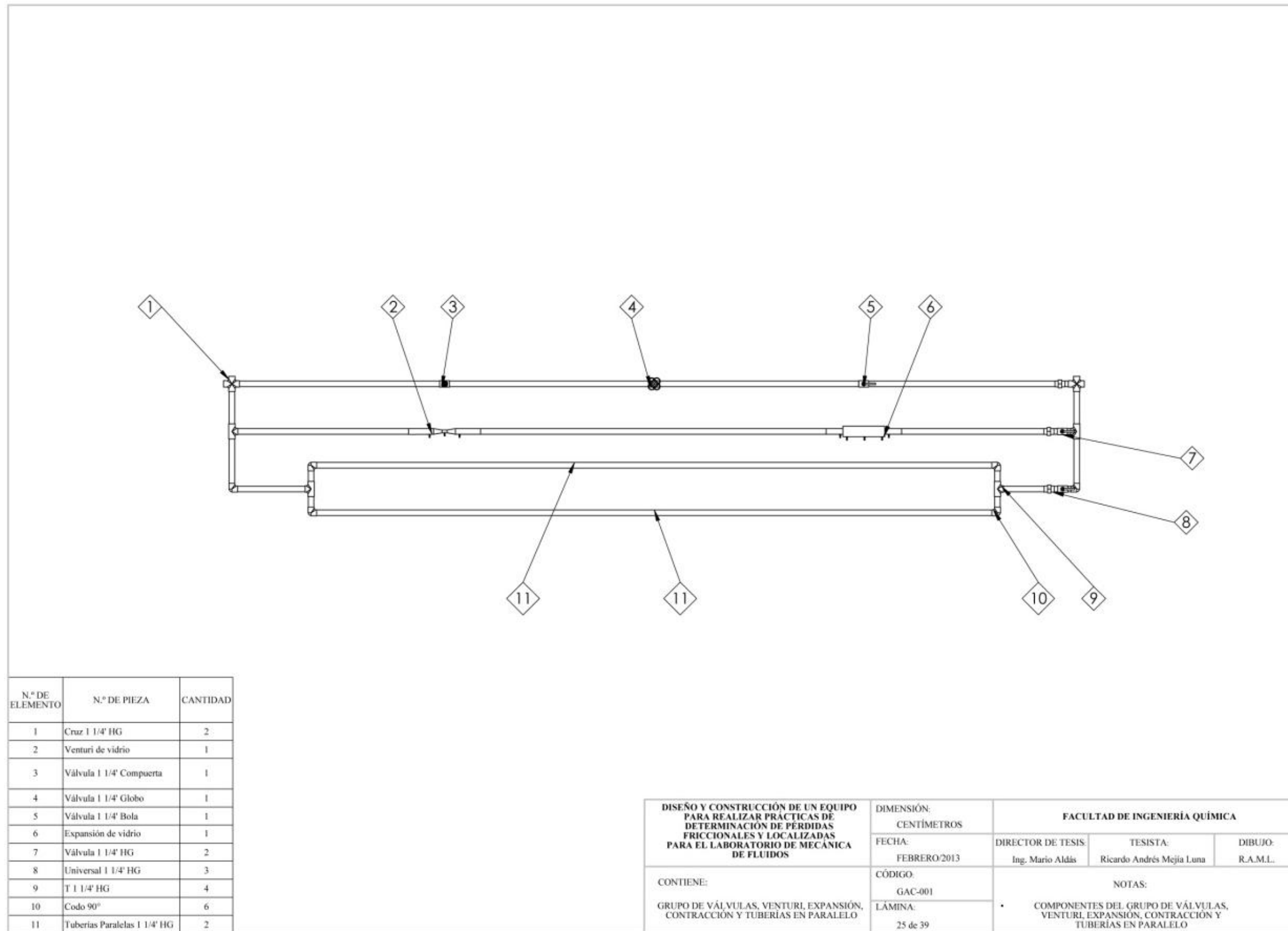


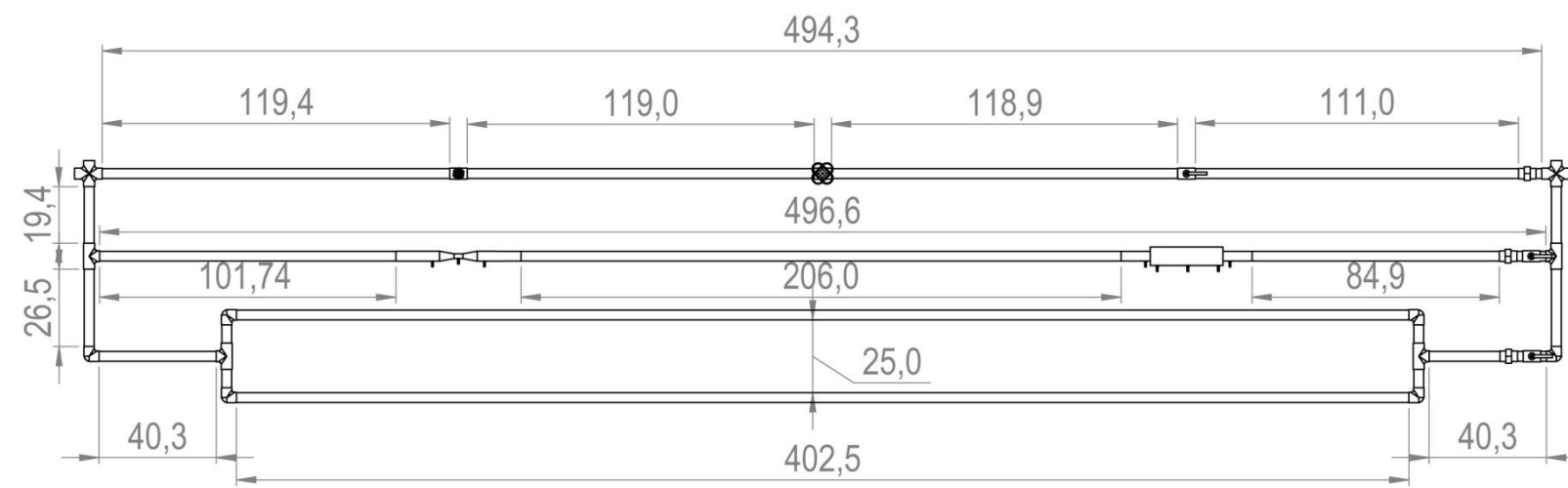
Figura AII.24. Vistas vaso de medición de altura del vertedero



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Cruz 1 1/4" HG	2
2	Venturi de vidrio	1
3	Válvula 1 1/4" Compuerta	1
4	Válvula 1 1/4" Globo	1
5	Válvula 1 1/4" Bola	1
6	Expansión de vidrio	1
7	Válvula 1 1/4" HG	2
8	Universal 1 1/4" HG	3
9	T 1 1/4" HG	4
10	Codo 90º	6
11	Tuberías Paralelas 1 1/4" HG	2

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRACTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013			
CONTIENE: GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO	CÓDIGO: GAC-001	NOTAS: • COMPONENTES DEL GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO		
	LÁMINA: 25 de 39			

Figura AII.25. Componentes del grupo de válvulas, Venturi, expansión y contracción súbitas y tuberías en serie



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN: CENTÍMETROS	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	FECHA: FEBRERO/2013	DIRECTOR DE TESIS: Ing. Mario Aldás	TESISTA: Ricardo Andrés Mejía Luna	DIBUJO: R.A.M.L.
CONTIENE: GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO	CÓDIGO: GAC-002	NOTAS:		
	LÁMINA: 26 de 39	<ul style="list-style-type: none"> DIMENSIONES DEL GRUPO DE VÁLVULAS, VENTURI, EXPANSIÓN, CONTRACCIÓN Y TUBERÍAS EN PARALELO 		

Figura AII.26. Dimensiones del grupo de válvulas, Venturi, expansión y contracción súbitas y tuberías en serie

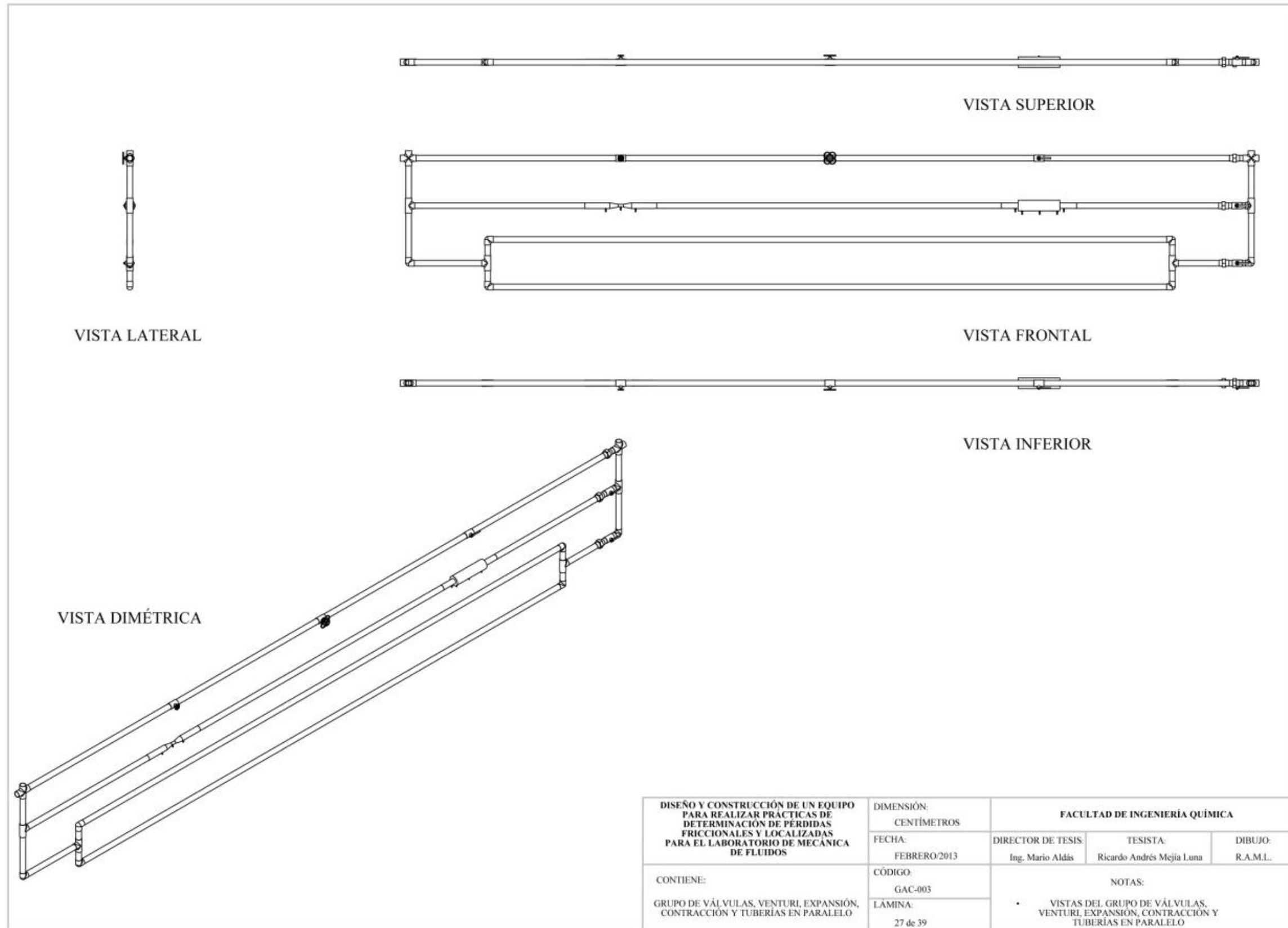


Figura AII.27. Vistas del grupo de válvulas, Venturi, expansión y tuberías en serie

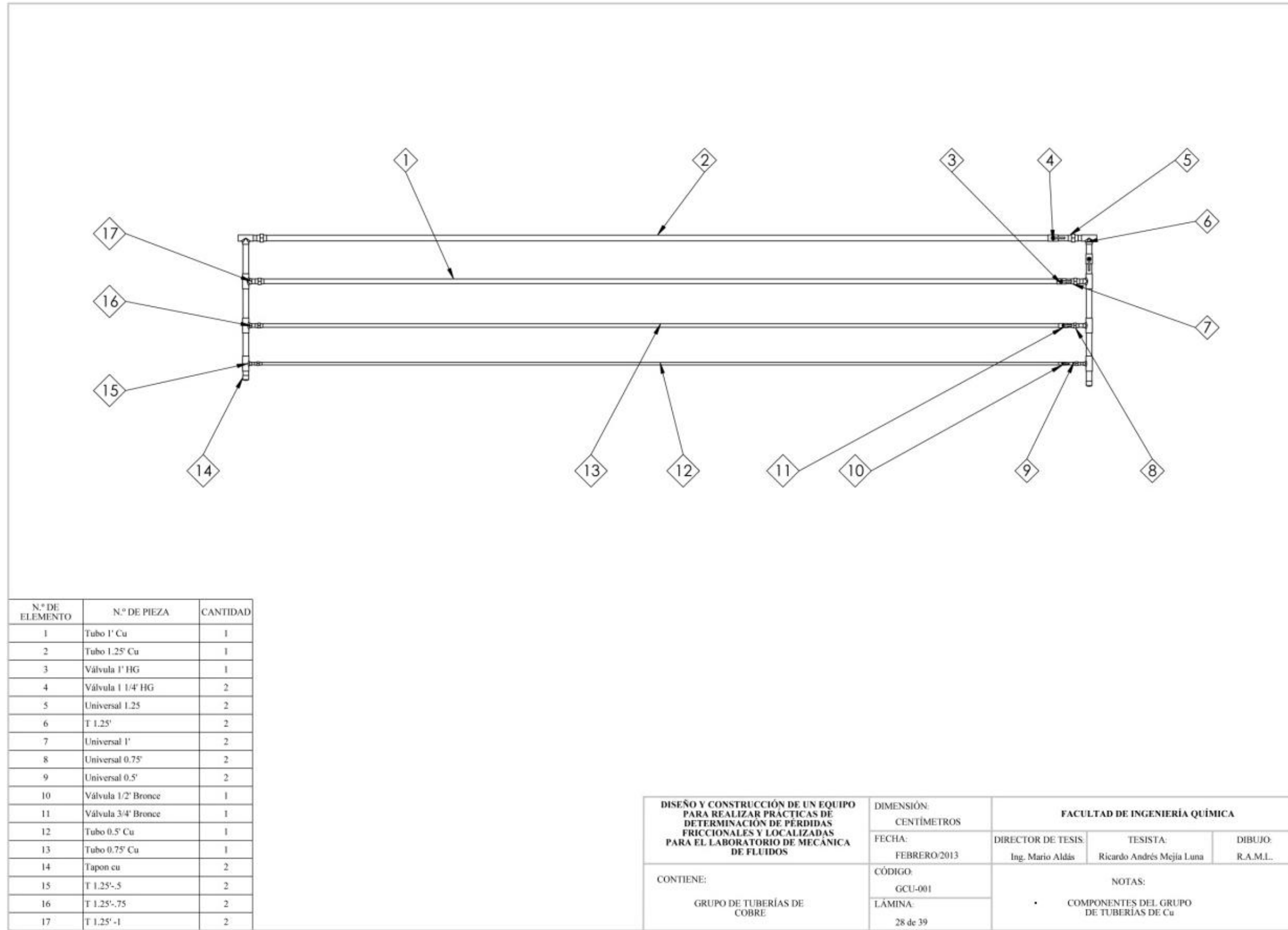


Figura AII.28. Componentes del grupo de tuberías de Cu

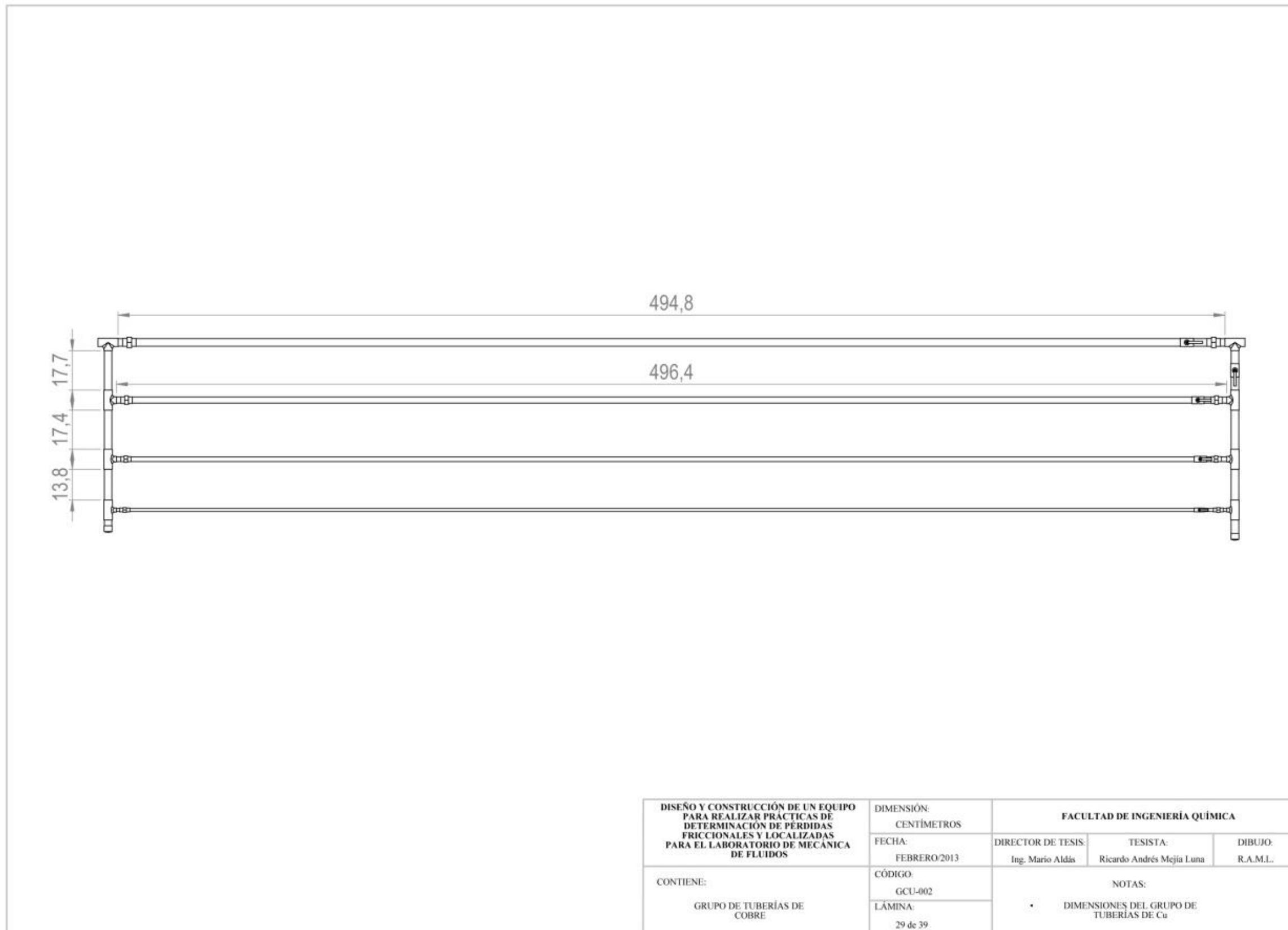


Figura AII.29. Dimensiones del grupo de tuberías de Cu

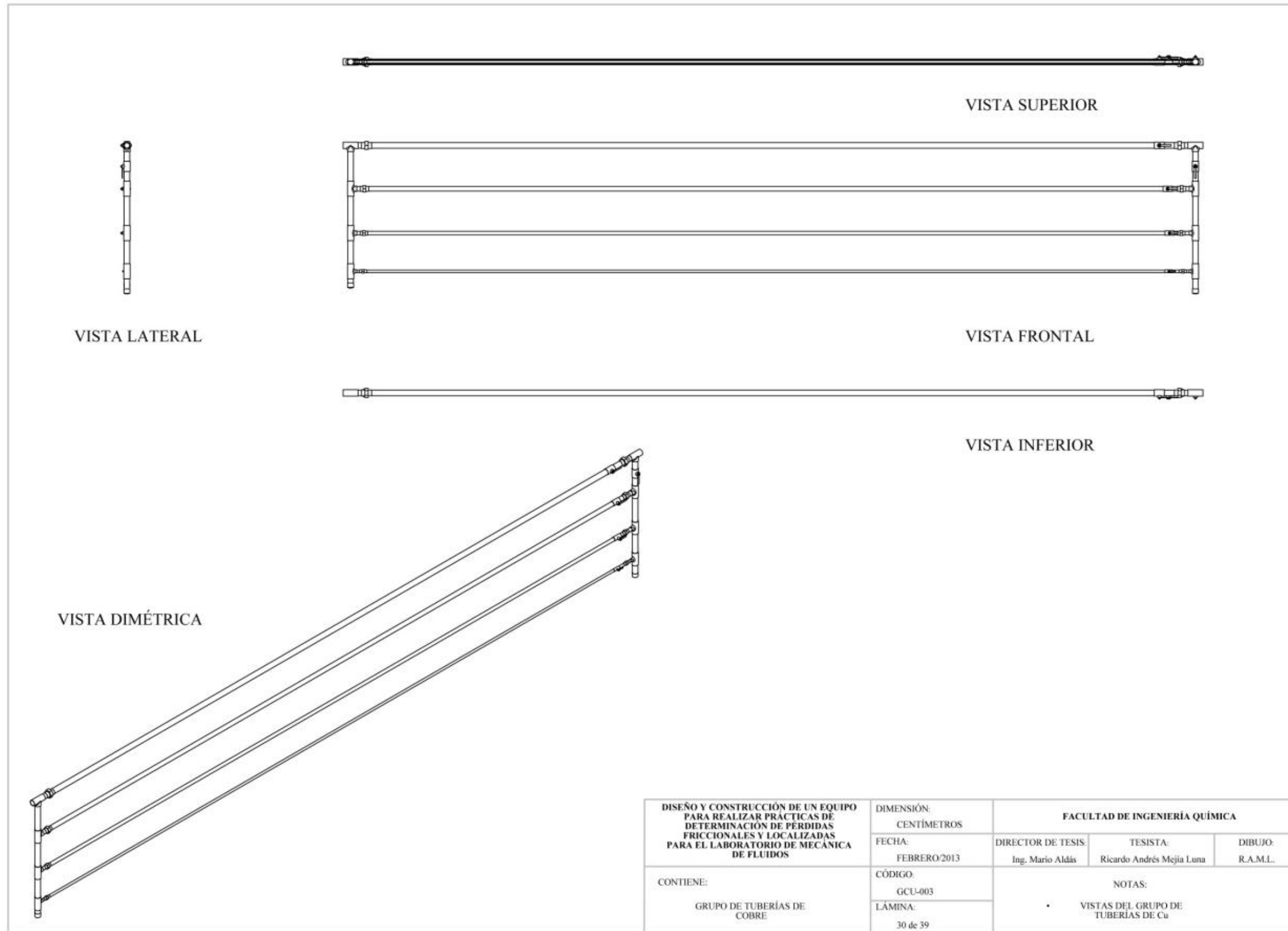


Figura AII.30. Vistas del grupo de tuberías de Cu

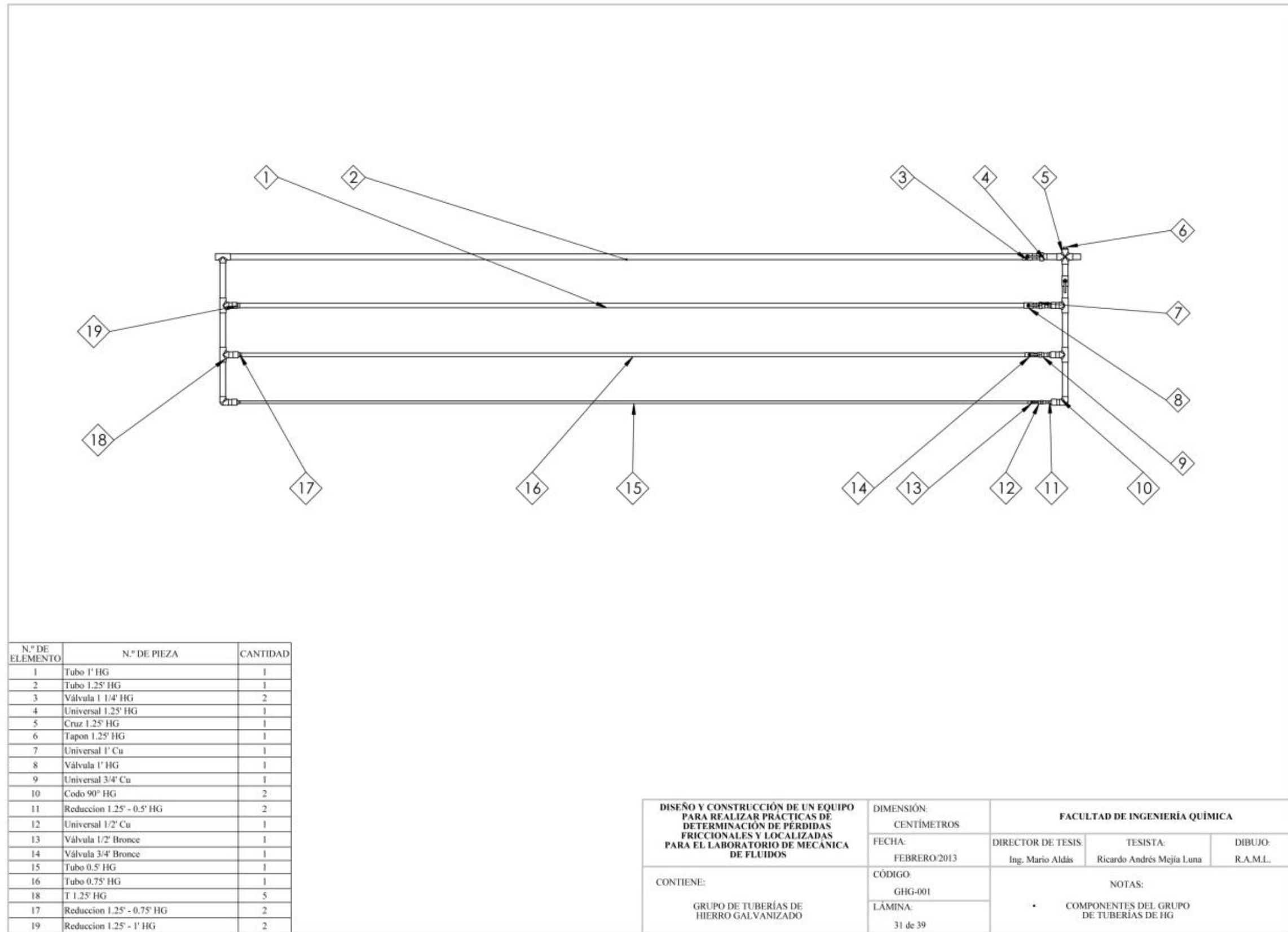
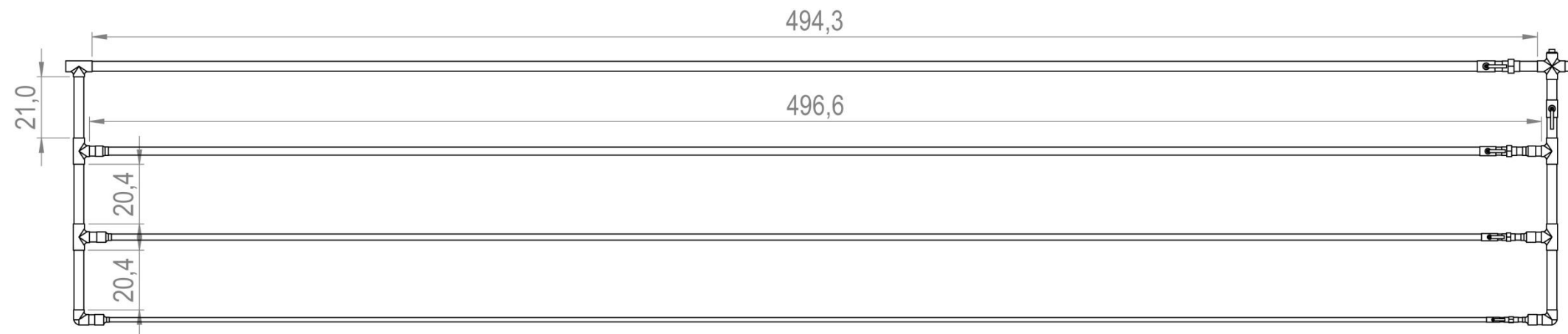


Figura AII.31. Componentes del grupo de tuberías de HG



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN:	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	CENTÍMETROS			
CONTIENE: GRUPO DE TUBERÍAS DE HIERRO GALVANIZADO	FECHA:	DIRECTOR DE TESIS:	TESISTA:	DIBUJO:
	FEBRERO/2013	Ing. Mario Aldás	Ricardo Andrés Mejía Luna	R.A.M.L.
	CÓDIGO:	NOTAS:		
	GHG-002	• DIMENSIONES DEL GRUPO DE TUBERÍAS DE HG		
	LÁMINA:			
	32 de 39			

Figura AII.32. Dimensiones del grupo de tuberías de HG

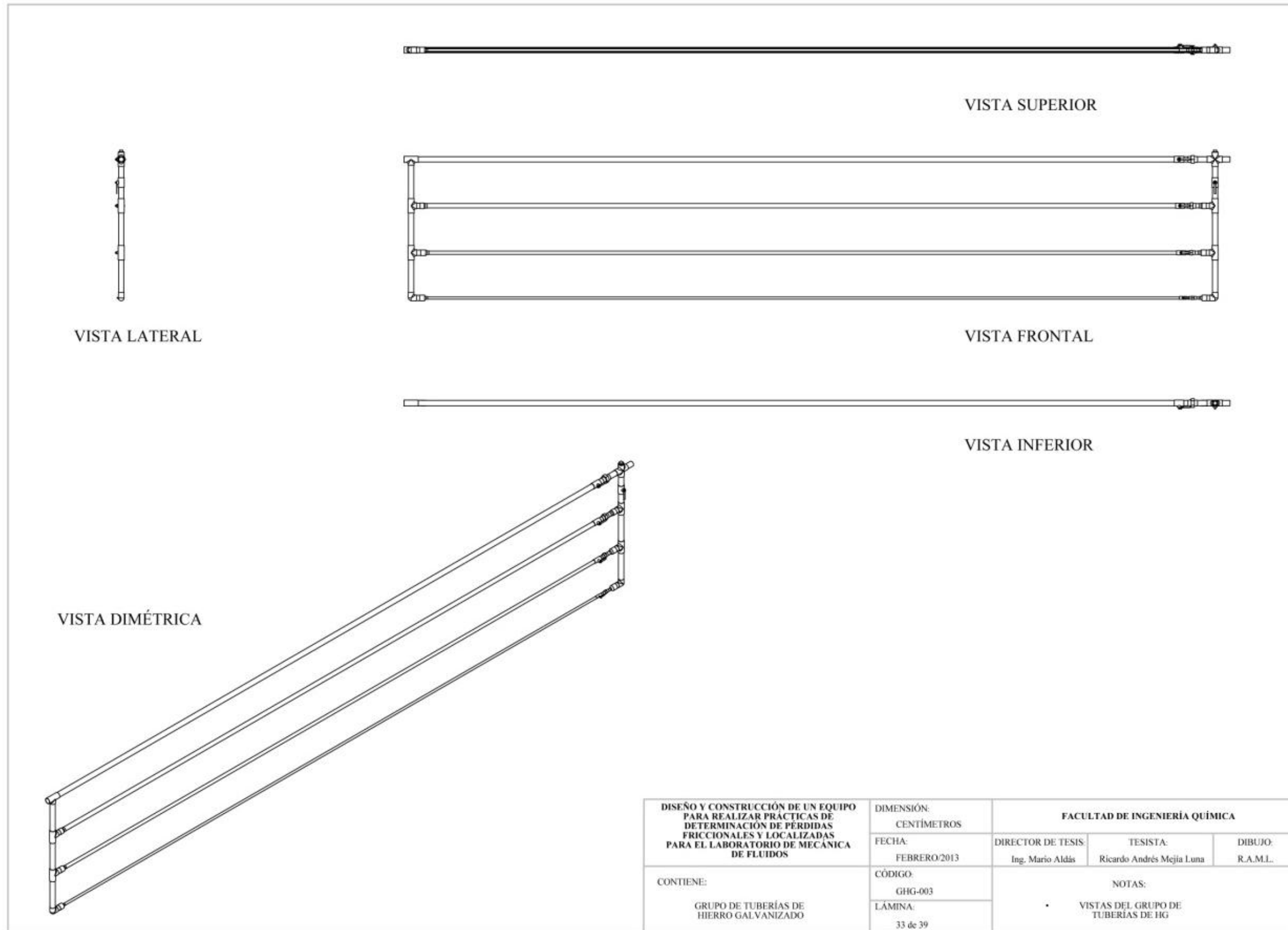


Figura AII.33. Vistas del grupo de tuberías de HG

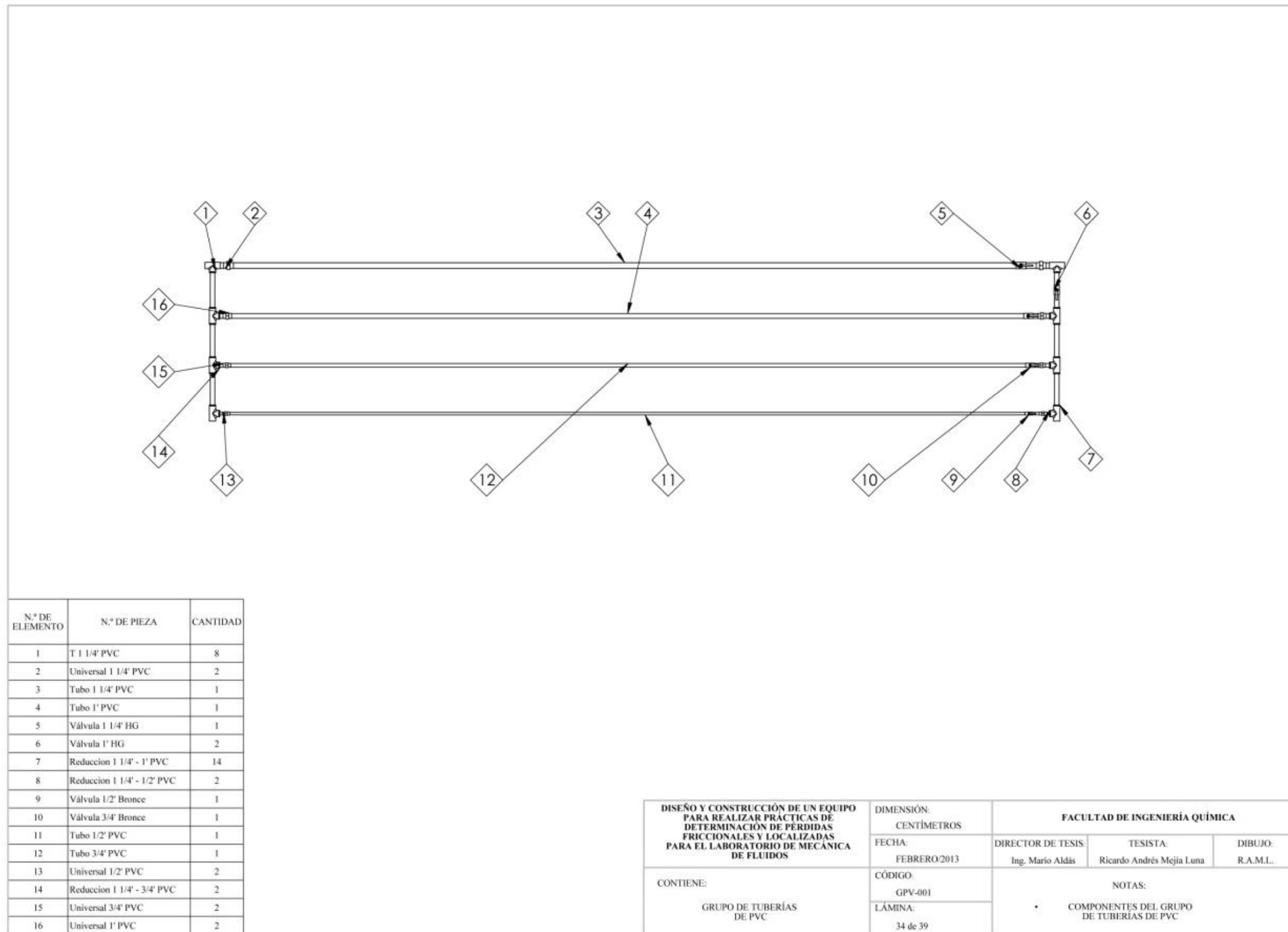
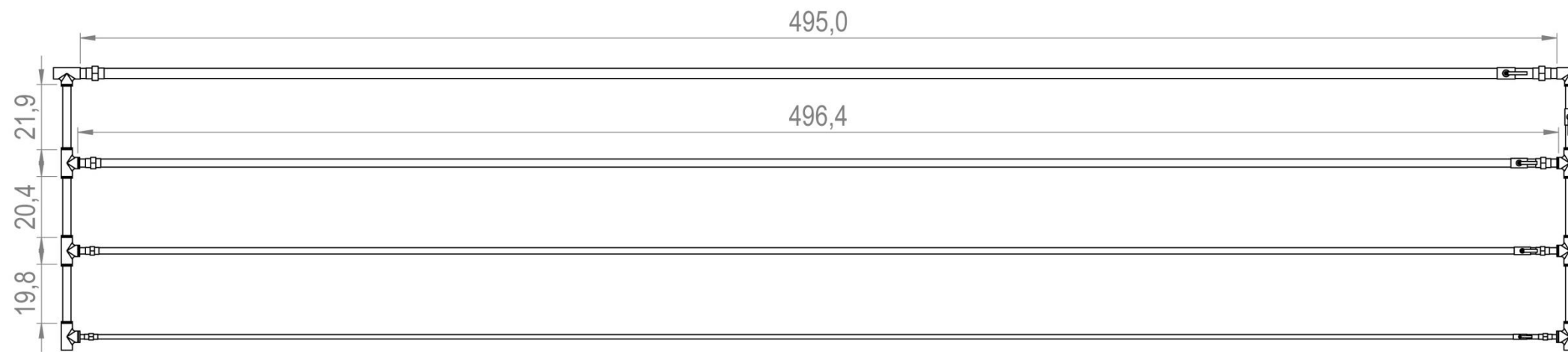


Figura AII.34. Componentes del grupo de tuberías de PVC



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA REALIZAR PRÁCTICAS DE DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS FRICCIONALES Y LOCALIZADAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS	DIMENSIÓN:	FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	CENTÍMETROS			
CONTIENE: GRUPO DE TUBERÍAS DE PVC	FECHA:	DIRECTOR DE TESIS:	TESISTA:	DIBUJO:
	FEBRERO/2013	Ing. Mario Aldás	Ricardo Andrés Mejía Luna	R.A.M.L.
	CÓDIGO:	NOTAS:		
	GPV-002	• DIMENSIONES DEL GRUPO DE TUBERÍAS DE PVC		
	LÁMINA:			
	35 de 39			

Figura AII.35. Dimensiones del grupo de tuberías de PVC

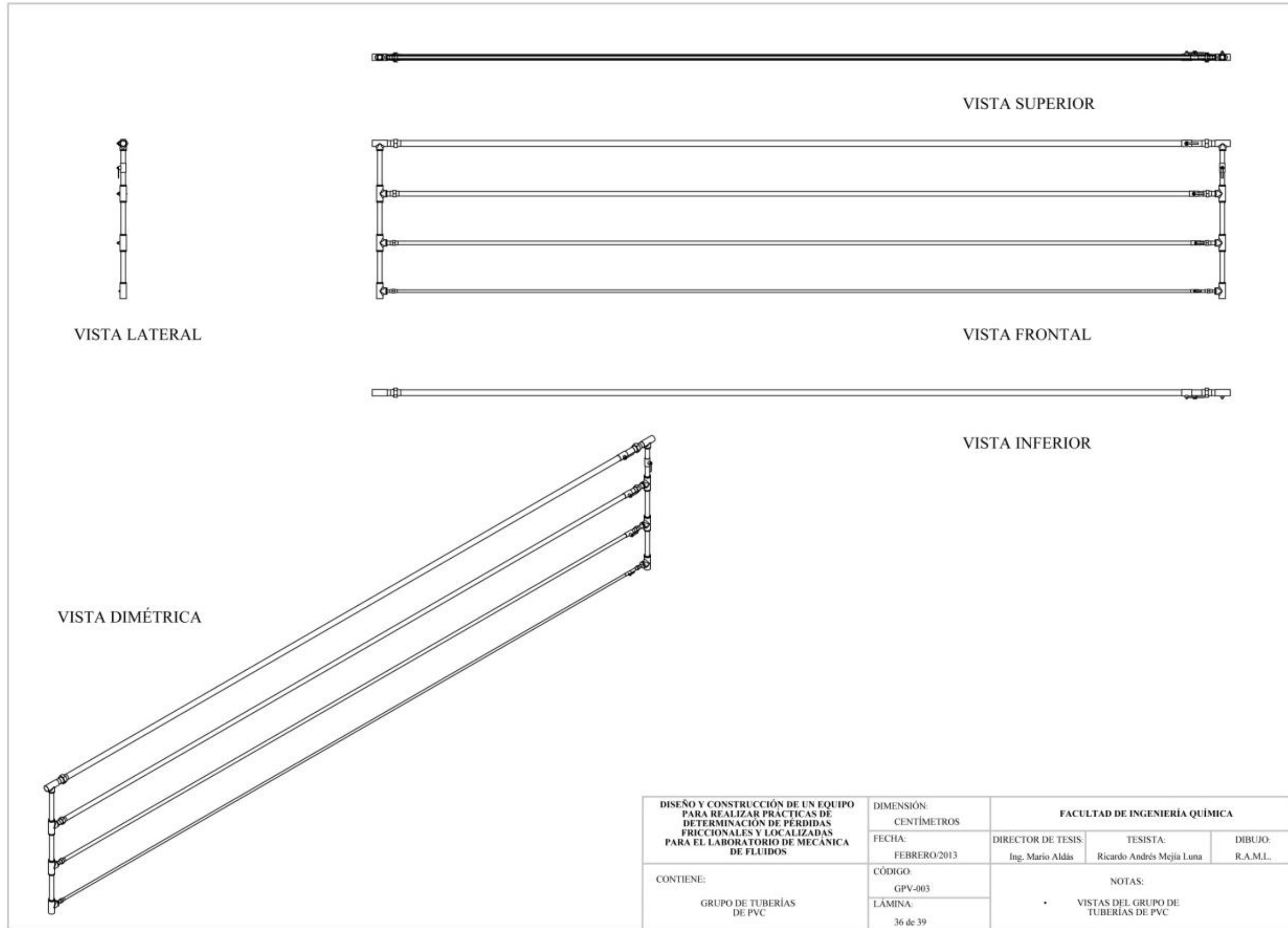


Figura AII.36. Vistas del grupo de tuberías de PVC

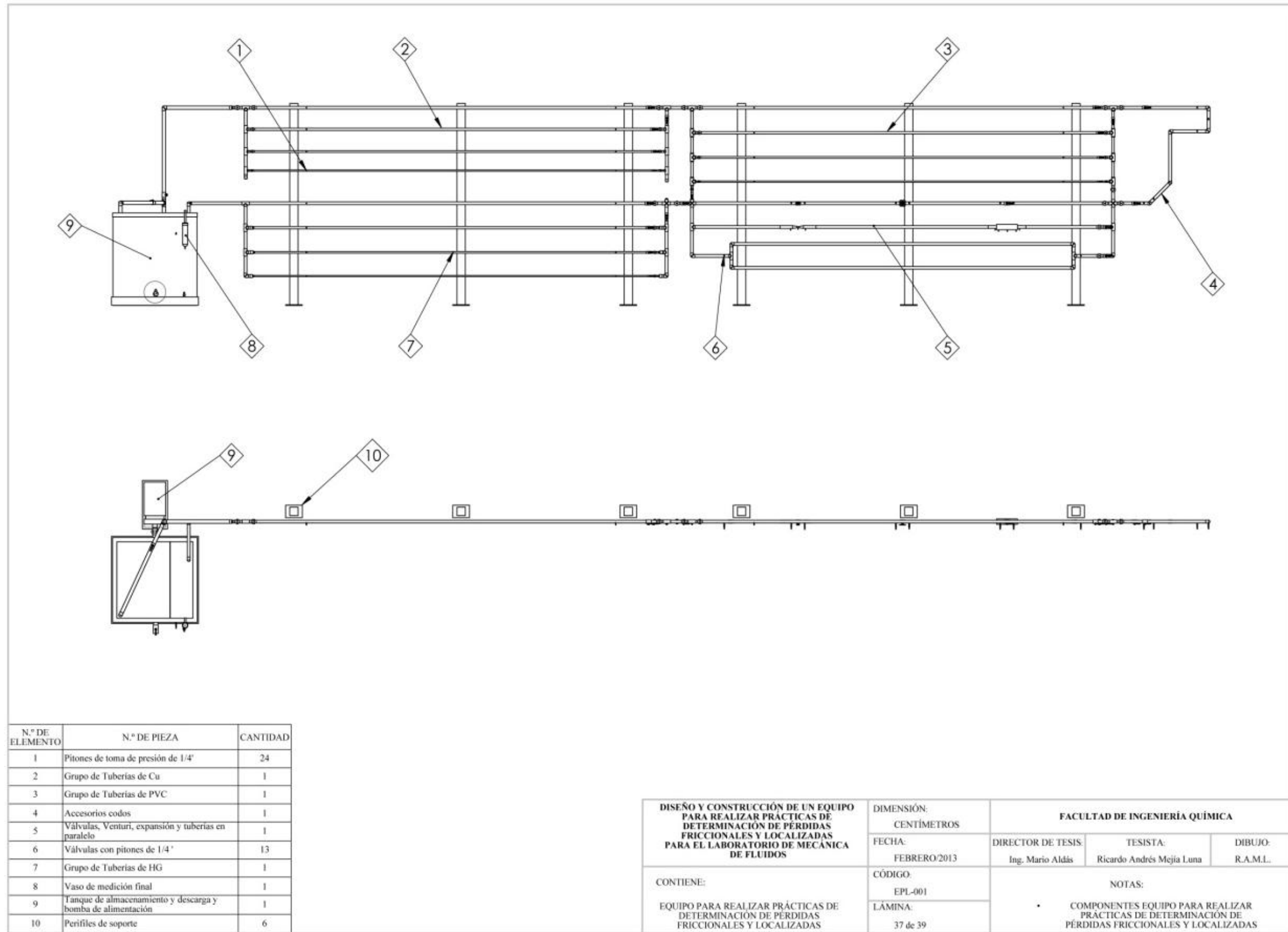


Figura AII.37. Componentes equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

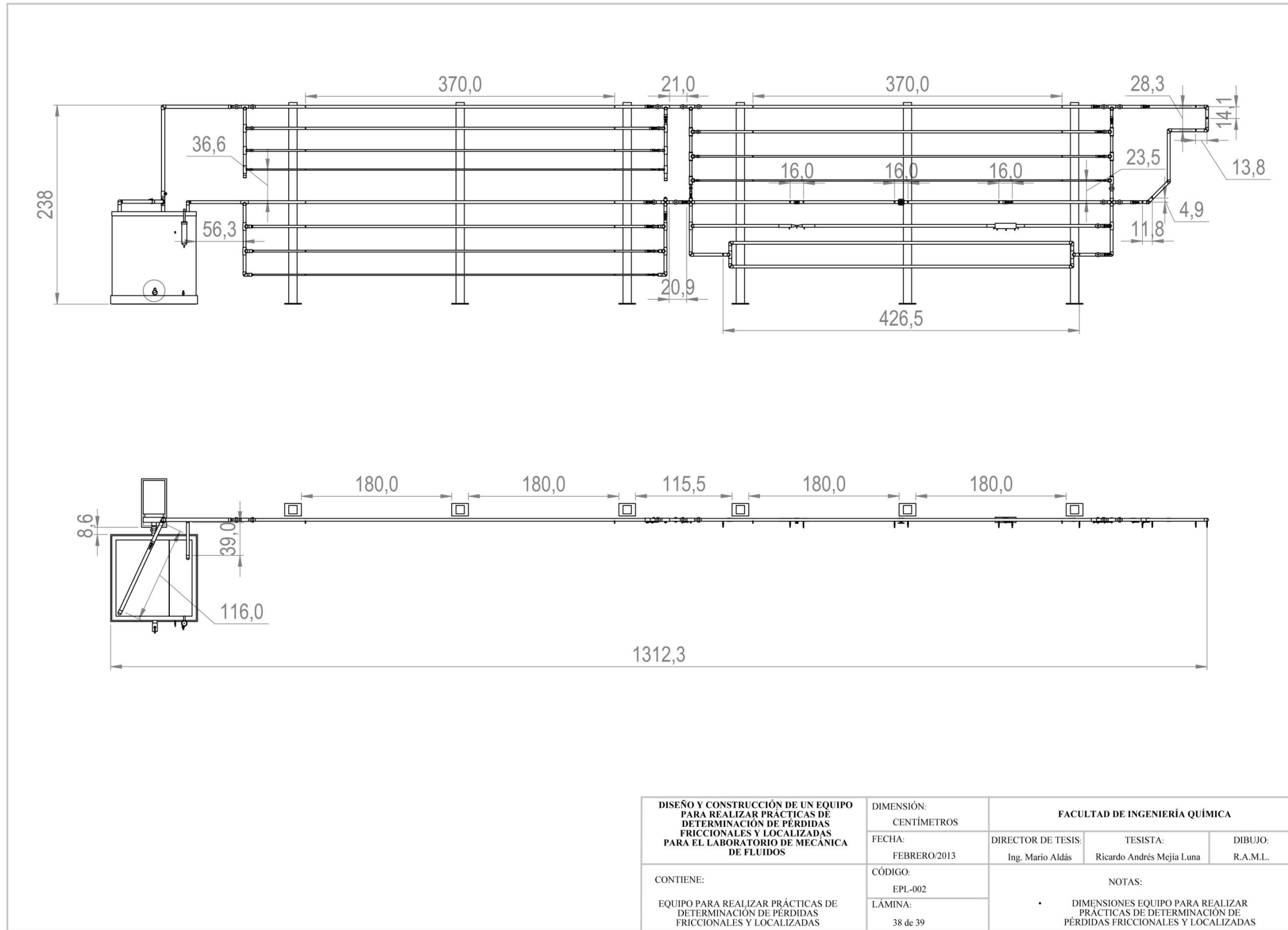


Figura AII.38. Dimensiones equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

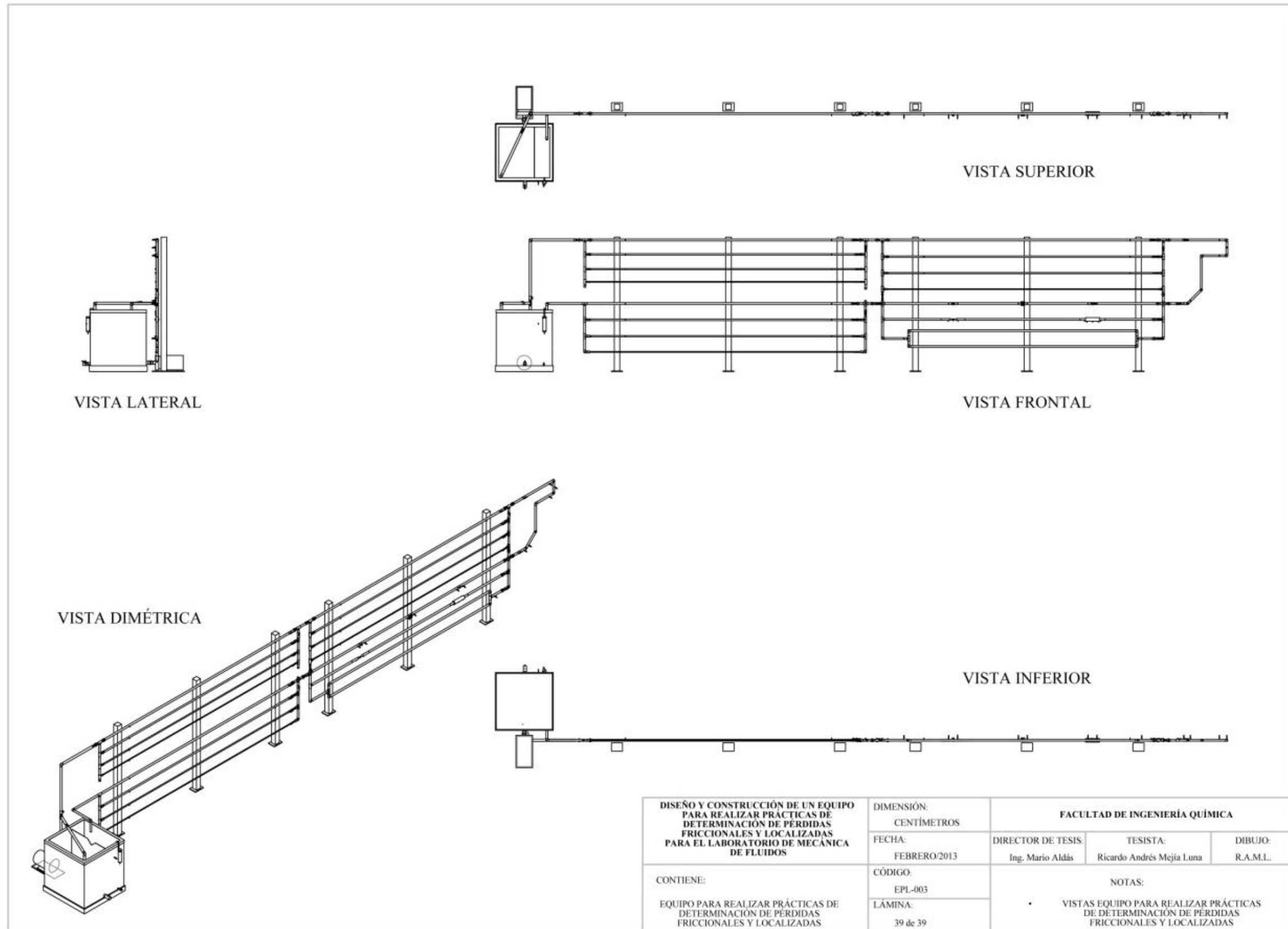


Figura AII.39. Vistas equipo para realizar prácticas de determinación de pérdidas friccionales y localizadas

ANEXO III

DATOS DE OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES

Tabla AIII.1. Mediciones en la tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
69,6	69,5	3,3	69,53	1,4
69,2	69,4	4,2	68,11	1,6
68,1	68,6	10,1	96,20	2,0
68,7	69,2	4,0	32,41	2,1
68,5	69,1	10,3	73,76	2,1
68,0	68,9	10,2	64,85	2,3
68,3	69,4	10,1	57,09	2,5
67,5	68,7	10,0	49,83	2,6
67,4	69,0	10,2	47,69	2,7
67,4	69,4	10,2	39,12	2,9
65,9	69,0	9,9	31,33	3,2
66,3	69,6	10,8	30,97	3,3
66,1	69,9	10,0	24,57	3,5
64,5	69,1	10,1	23,15	3,7
64,0	69,0	11,5	25,37	3,8
62,0	68,0	10,1	19,90	4,0
60,9	67,6	12,0	22,64	4,1
60,1	68,0	12,0	20,55	4,2
56,8	66,0	11,9	18,98	4,4
53,5	64,6	12,0	16,99	4,6
53,5	64,8	11,6	16,11	4,6
49,4	63,0	12,0	15,56	4,8
46,2	62,0	12,1	14,46	5,0
42,1	60,2	12,3	13,05	5,2
37,1	58,5	12,0	11,80	5,4
32,3	56,3	12,1	11,24	5,5

Tabla AIII.1. Mediciones en la tubería de Cobre de 1 ¼ " de diámetro (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
29,6	55,9	13,0	11,35	5,6
26,0	55,0	12,8	10,35	5,7
19,0	53,0	11,5	8,65	5,9
15,7	52,2	12,0	8,85	6,0
9,1	51,2	12,2	8,23	6,3
3,8	51,0	11,5	7,07	6,5
0,5	50,5	12,2	7,18	6,6
20,0	77,4	13,2	7,46	6,7
0,5	60,6	11,4	6,07	6,9
9,0	76,8	12,6	6,10	7,1
4,4	76,5	11,8	5,75	7,3

Tabla AIII.2. Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
69,6	69,5	10,1	96,20	2,0
69,5	69,6	3,3	69,53	1,4
69,6	69,4	4,2	68,11	1,6
69,4	69,0	10,3	73,76	2,1
70,1	69,5	10,2	64,85	2,3
69,8	69,1	4,0	32,41	2,1
70,1	69,3	10,1	57,09	2,5
70,7	69,9	10,0	49,83	2,6
71,0	69,8	10,2	47,69	2,7
71,1	69,7	10,2	39,12	2,9
72,5	70,7	9,9	31,33	3,2
72,3	70,2	10,8	30,97	3,3
74,4	71,7	10,0	24,57	3,5
85,4	81,8	11,5	25,37	3,8
75,2	71,3	10,1	19,90	4,0
85,8	81,6	10,1	23,15	3,7

Tabla AIII.2. Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ " de diámetro
(continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
75,7	70,8	12,0	22,64	4,1
76,7	71,1	12,0	20,55	4,2
77,1	70,5	11,9	18,98	4,4
78,0	70,2	12,0	16,99	4,6
77,9	69,6	11,6	16,11	4,6
79,0	69,0	12,0	15,56	4,8
79,6	67,8	12,1	14,46	5,0
80,0	67,0	12,3	13,05	5,2
80,3	65,0	12,0	11,80	5,4
81,5	64,1	12,1	11,24	5,5
82,2	62,2	13,0	11,35	5,6
83,3	61,6	12,8	10,35	5,7
84,6	58,0	11,5	8,65	5,9
85,6	57,0	12,0	8,85	6,0
87,6	54,6	12,2	8,23	6,3
88,6	51,0	11,5	7,07	6,5
89,8	49,3	12,2	7,18	6,6
110,7	64,0	13,2	7,46	6,7
111,5	62,3	11,4	6,07	6,9
114,6	58,3	12,6	6,10	7,1
91,6	30,2	11,8	5,75	7,3
105,9	42,6	11,7	5,37	7,4
102,4	20,6	11,3	4,51	7,7
104,6	15,2	13,0	5,24	7,9
107,6	9,2	12,5	4,33	8,2
110,8	2,6	10,0	3,33	8,4

Tabla AIII.3. Mediciones en la tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
52,2	52,3	3,3	69,53	1,4
52,1	52,3	4,2	68,11	1,6
89,4	89,7	10,1	96,20	2,0
88,6	89,1	10,3	73,76	2,1
51,5	52,1	4,0	32,41	2,1
88,4	89,3	10,2	64,85	2,3
88,5	89,5	10,1	57,09	2,5
88,3	89,4	10,0	49,83	2,6
87,9	89,3	10,2	47,69	2,7
87,5	89,5	10,2	39,12	2,9
86,9	89,3	9,9	31,33	3,2
86,1	89,2	10,8	30,97	3,3
84,6	89,5	11,5	25,37	3,8
82,6	88,6	10,1	19,90	4,0
81,4	88,1	12,0	22,64	4,1
80,4	88,1	12,0	20,55	4,2
76,1	85,2	11,9	18,98	4,4
73,2	84,1	11,6	16,11	4,6
73,4	84,5	12,0	16,99	4,6
69,3	82,5	12,0	15,56	4,8
65,9	81,0	12,1	14,46	5,0
61,2	79,0	12,3	13,05	5,2
56,2	76,8	12,0	11,80	5,4
50,6	73,5	12,1	11,24	5,5
47,3	72,9	13,0	11,35	5,6
42,8	70,5	12,8	10,35	5,7
36,3	69,0	11,5	8,65	5,9
32,1	67,1	12,0	8,85	6,0
24,6	65,5	12,2	8,23	6,3
18,6	63,6	11,5	7,07	6,5
15,1	63,4	12,2	7,18	6,6

Tabla AIII.3. Mediciones en la tubería de PVC de 1 ¼ " de diámetro (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
7,9	62,6	13,2	7,46	6,7
5,0	62,6	11,4	6,07	6,9
7,0	71,6	12,6	6,10	7,1
2,8	72,0	11,8	5,75	7,3
0,6	71,1	11,7	5,37	7,4

Tabla AIII.4. Mediciones en la tubería de Cobre de 1 " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
78,7	80,4	9,0	69,99	2,3
80,5	83,2	10,4	61,20	2,5
77,9	82,3	9,2	40,07	2,8
74,3	81,1	10,8	36,54	2,9
72,1	80,3	11,5	35,81	3,4
71,0	80,7	11,0	30,01	3,5
75,0	88,9	8,8	19,96	3,8
62,3	77,7	10,2	22,10	4,0
59,2	76,7	10,3	21,07	4,1
52,3	74,4	9,9	16,56	4,3
45,7	72,1	11,4	18,13	4,5
43,3	71,0	10,0	15,09	4,6
36,9	68,5	10,0	13,96	4,7
20,7	63,6	10,3	12,13	5,1
15,7	63,0	10,0	11,15	5,2
11,5	62,5	10,8	11,41	5,3

Tabla AIII.5. Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado 1 " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
87,6	86,0	9,0	69,99	2,3
88,7	86,2	10,4	61,20	2,5
90,9	87,0	9,2	40,07	2,8
91,6	85,0	10,8	36,54	2,9
90,5	82,3	11,5	35,81	3,4
92,2	82,6	11,0	30,01	3,5
94,5	81,6	8,8	19,96	3,8
95,5	81,0	10,2	22,10	4,0
96,5	79,1	10,3	21,07	4,1
98,0	76,5	9,9	16,56	4,3
99,3	73,5	11,4	18,13	4,5
98,2	71,1	10,0	15,09	4,6
96,5	65,1	10,0	13,96	4,7
101,7	57,9	10,3	12,13	5,1
103,1	55,3	10,0	11,15	5,2
104,6	52,2	10,8	11,41	5,3

Tabla AIII.6. Mediciones en la tubería de PVC 1 " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
78,8	81,2	9,0	69,99	2,3
79,5	83,5	10,4	61,20	2,5
78,4	84,7	9,2	40,07	2,8
76,3	86,5	10,8	36,54	2,9
75,6	87,4	11,5	35,81	3,4
73,0	87,9	11,0	30,01	3,5
68,5	88,2	8,8	19,96	3,8
65,6	88,4	10,2	22,10	4,0
62,5	88,0	10,3	21,07	4,1
55,2	87,8	9,9	16,56	4,3
48,4	87,2	11,4	18,13	4,5

Tabla AIII.6. Mediciones en la tubería de PVC 1 " de diámetro (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
46,7	87,4	10,0	15,09	4,6
40,6	87,4	10,0	13,96	4,7
25,9	87,9	10,3	12,13	5,1
18,7	88,5	10,0	11,15	5,2
13,5	89,1	10,8	11,41	5,3

Tabla AIII.7. Mediciones en la tubería de Cobre ¾ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
65,8	69,4	8,1	103,80	1,9
63,2	79,5	10,0	89,01	2,1
51,0	72,0	9,5	45,63	2,9
49,7	72,0	10,0	46,39	2,9
44,3	72,5	10,1	39,99	3,0
42,2	73,0	10,1	38,19	3,1
39,0	73,7	10,1	36,10	3,2
36,8	75,8	10,1	34,36	3,3
32,9	75,4	10,1	31,58	3,3
24,0	75,4	10,1	32,45	3,4
22,0	78,1	10,1	26,65	3,6
18,1	80,8	10,1	25,42	3,7
13,4	81,4	14,0	33,57	3,8
12,1	98,4	10,2	20,36	4,0
0,4	101,4	10,2	19,88	4,1

Tabla AIII.8. Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado $\frac{3}{4}$ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
70,3	68,2	8,1	103,80	1,9
70,3	67,4	10,0	89,01	2,1
76,6	64,1	9,5	45,63	2,9
76,7	63,5	10,0	46,39	2,9
78,6	61,4	10,1	39,99	3,0
79,5	61,3	10,1	38,19	3,1
60,1	81,1	10,1	36,10	3,2
58,2	81,6	10,1	34,36	3,3
1157,8	83,3	10,1	31,58	3,3
57,4	82,9	10,1	32,45	3,4
54,4	83,3	10,1	26,65	3,6
54,0	90,4	10,1	25,42	3,7
51,7	91,3	14,0	33,57	3,8
63,6	113,3	10,2	20,36	4,0
58,2	117,9	10,2	19,88	4,1

Tabla AIII.9. Mediciones en la tubería de PVC $\frac{3}{4}$ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
45,5	48,9	8,1	103,80	1,9
43,2	49,6	10,0	89,01	2,1
34,8	54,5	10,0	46,39	2,9
34,7	54,8	9,5	45,63	2,9
30,3	56,8	10,0	39,99	3,0
28,7	57,1	10,1	38,19	3,1
26,4	58,3	10,1	36,10	3,2
24,3	59,3	10,1	34,36	3,3
22,3	60,4	10,1	32,45	3,4
21,9	60,5	10,1	31,58	3,3
14,0	65,7	10,1	26,65	3,6
11,1	66,2	10,1	25,42	3,7

Tabla AIII.9. Mediciones en la tubería de PVC $\frac{3}{4}$ " de diámetro (continuación...)

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
7,1	68,2	14,0	33,57	3,8
33,1	109,7	10,2	20,36	4,0
22,4	111,5	10,2	19,88	4,1

Tabla AIII.10. Mediciones en la tubería de Cobre $\frac{1}{2}$ " de diámetro

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
68,6	69,9	3,5	305,91	1,1
67,2	70,9	6,0	193,14	1,4
65,5	70,2	6,0	176,69	1,4
64,3	70,4	8,0	177,29	1,4
53,6	62,6	7,0	117,55	1,7
61,5	72,0	6,4	112,66	1,7
29,2	76,6	6,2	43,41	2,4
16,9	81,4	6,2	35,17	2,6
2,6	108,4	8,0	35,86	2,8

Tabla AIII.11. Mediciones en la tubería de Hierro Galvanizado $\frac{1}{2}$ " de diámetro

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
70,0	69,4	3,5	305,91	1,1
71,2	69,6	6,0	193,14	1,4
70,5	68,3	6,0	176,69	1,4
70,8	68,0	8,0	177,29	1,4
72,9	67,8	6,4	112,66	1,7
73,5	66,3	7,0	117,55	1,7
80,6	56,4	6,2	43,41	2,4
85,4	50,6	6,2	35,17	2,6
40,7	94,3	8,0	35,86	2,8
126,4	0,9	8,2	25,28	3,4

Tabla AIII.12. Mediciones en la tubería de PVC ½ " de diámetro

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
48,1	48,8	3,5	305,91	1,1
98,0	100,3	6,0	193,14	1,4
45,0	49,1	8,0	177,29	1,4
45,6	49,9	6,0	176,69	1,4
43,5	50,6	6,4	112,66	1,7
86,8	101,2	7,0	117,55	1,7
24,6	56,1	6,2	43,41	2,4
16,1	59,7	6,2	35,17	2,6
26,3	97,8	8,0	35,86	2,8

Tabla AIII.13. Mediciones en el codo de 90 ° superior

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
95,7	95,9	10,2	73,9	2,4
91,5	91,8	10,0	61,5	2,5
91,3	91,9	9,4	45,7	2,7
90,8	91,5	10,0	37,0	2,9
90,9	92,0	10,0	28,4	3,3
89,6	91,5	10,0	22,9	3,6
88,4	91,0	10,3	20,1	3,9
87,7	91,0	10,8	18,4	4,1
86,7	90,7	11,0	16,8	4,4
83,5	88,7	10,0	13,8	4,7
79,6	85,9	10,2	12,7	4,8
73,5	81,7	10,0	10,5	5,1
69,0	79,0	9,9	9,8	5,3
66,4	77,4	10,0	9,3	5,5
60,5	73,7	10,4	8,8	5,7
57,2	72,2	13,0	8,5	5,8
50,1	68,2	9,9	6,7	6,0
46,5	66,7	10,4	6,5	6,2

Tabla AIII.13. Mediciones en el codo de 90 ° superior (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
38,4	62,3	9,6	5,7	6,4
34,3	61,8	10,5	6,0	6,5
29,4	59,6	10,5	5,8	6,7
23,2	57,8	11,7	6,0	7,0
19,0	56,3	11,5	5,7	7,2
15,2	56,0	10,8	5,2	7,4
9,4	55,4	11,1	5,2	7,5
6,8	54,4	11,7	5,2	7,6
3,3	55,8	10,8	4,5	7,7

Tabla AIII.14. Mediciones en el codo de 90 ° inferior

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
86,0	85,6	9,5	46,8	2,6
85,9	85,3	10,1	42,8	2,8
86,1	85,1	9,8	30,3	3,0
85,7	84,3	9,8	26,1	3,3
87,3	85,6	10,3	24,3	3,6
86,9	85,0	10,3	21,8	3,8
86,0	83,6	10,2	19,9	4,0
85,6	82,9	10,4	18,9	4,1
86,1	82,9	10,1	17,1	4,2
84,3	80,6	10,0	14,7	4,4
82,3	77,6	9,9	13,5	4,6
80,4	74,8	10,0	12,3	4,8
78,4	71,7	9,5	10,3	5,1
76,9	69,1	10,4	10,8	5,2
74,7	65,7	10,6	10,1	5,3
70,2	59,3	10,6	9,3	5,5
68,1	54,7	11,6	8,9	5,8
66,6	51,4	10,3	7,8	5,9

Tabla AIII.14. Mediciones en el codo de 90 ° inferior (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
62,2	45,3	10,0	6,8	6,1
59,9	39,2	12,2	7,7	6,3
57,2	33,8	12,7	7,2	6,6
55,1	27,3	10,5	5,9	6,8
55,7	28,4	11,4	6,2	6,8
54,8	21,1	10,9	5,5	7,1
52,0	16,3	11,3	5,1	7,3
50,4	11,7	10,0	4,5	7,6
50,4	8,8	10,9	4,9	7,7
50,0	3,2	10,7	4,1	7,8
53,8	3,2	11,4	4,5	7,9

Tabla AIII.15. Mediciones en el codo de 45 °

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
71,4	71,0	9,4	23,21	3,1
71,4	70,9	9,6	28,11	3,2
73,5	72,8	10,1	23,37	3,7
70,8	69,4	10,4	17,2	4,2
70,4	68,4	10,1	14,8	4,5
68,9	66,7	10,1	13,32	4,7
66,3	63,6	12,1	14,67	4,9
64,9	61,6	10,2	10,7	5,1
62,6	59,7	11,8	11,58	5,3
60,0	55,4	9,8	8,95	5,4
58,2	53,5	9,9	8,58	5,6
55,7	49,8	10,0	7,89	5,7
53,3	46,7	10,7	7,98	6
50,4	42,7	10,0	7,05	6,1
48,1	39,6	11,8	7,42	6,3
46,7	36,3	12,6	7,41	6,5

Tabla AIII.15. Mediciones en el codo de 45 ° (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
43,8	33,4	15,0	8,52	6,6
40,1	25,4	12,5	6,17	7
37,4	20,7	13,2	5,92	7,3
35,6	16,1	11,2	5,01	7,5
34,0	12,6	11,5	5,04	7,7
33,5	9,7	13,0	4,54	7,8
32,1	6,3	14,4	5,35	8
32,0	4,0	11,4	4,26	8,2
38,0	6,5	9,3	3,41	8,3

Tabla AIII.16. Mediciones en la válvula de globo totalmente abierta

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
88,0	87,7	8,0	103,7	1,6
83,6	83,1	8,1	79,5	2,0
84,2	83,1	8,0	63,8	2,3
85,1	83,2	8,0	41,8	2,5
85,1	81,9	9,8	40,7	2,8
85,8	81,9	9,9	32,7	3,0
87,5	79,6	10,1	26,1	3,6
89,8	79,0	10,1	21,1	3,8
91,3	76,3	10,0	18,0	4,0
93,4	73,3	10,3	15,8	4,4
94,1	69,2	10,3	14,1	4,6
97,4	63,5	10,0	12,5	4,9
97,5	57,0	9,9	10,6	5,0
95,3	42,7	10,4	9,8	5,4
97,9	35,9	9,7	8,4	5,6
97,8	27,5	10,0	8,2	5,7
101,4	19,3	9,8	7,3	5,9
98,8	2,6	9,7	6,8	6,1

Tabla AIII.17. Mediciones en la válvula de globo cerrada ½ vuelta

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
89,5	89,3	8,2	230,5	1,2
87,8	87,4	9,1	105,9	1,6
88,7	87,7	8,2	60,0	2,0
90,1	88,0	7,9	38,3	2,5
91,1	86,3	8,3	26,6	3,0
93,6	84,2	10,2	24,5	3,4
97,5	83,2	10,0	19,4	4,0
98,7	78,4	10,0	16,4	4,3
97,2	70,2	9,8	13,9	4,6
98,4	62,1	9,9	12,3	4,8
97,0	50,2	10,0	10,7	5,1
98,1	40,9	10,3	10,0	5,4
101,5	30,4	9,7	8,5	5,6
98,8	11,2	9,9	7,8	5,9

Tabla AIII.18. Mediciones en la válvula de globo cerrada 1 vuelta

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
90,3	90,0	8,2	123,9	1,6
90,6	89,5	8,2	65,4	1,9
91,9	88,1	10,0	42,4	2,8
97,2	85,2	10,2	24,0	3,6
101,7	81,5	10,5	18,6	4,1
102,8	71,4	10,2	15,0	4,5
101,9	60,2	10,3	12,4	4,9
97,2	44,2	10,5	11,3	5,1
101,2	32,6	10,6	10,4	5,4
101,6	11,4	10,9	9,1	5,7

Tabla AIII.19. Mediciones en la válvula de globo cerrada 1 ½ vueltas

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert}
91,4	90,4	10,2	100,2	1,9
92,5	89,3	10,4	56,8	2,4
94,7	86,5	9,6	32,9	3,0
97,2	82,8	10,2	25,8	3,6
101,0	79,1	10,5	21,3	3,9
98,8	60,0	10,3	16,4	4,4
98,6	46,0	10,2	13,8	4,6
101,2	30,7	10,0	11,6	4,9
98,5	3,2	10,4	10,6	5,3

Tabla AIII.20. Mediciones en la válvula de globo cerrada 2 vueltas

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
93,2	92,5	10,5	229,9	1,5
95,1	92,0	10,0	83,0	2,1
97,7	86,6	10,2	44,5	2,8
98,2	69,1	9,9	27,5	3,4
101,1	36,3	10,1	19,6	4,0

Tabla AIII.21. Mediciones en válvula de compuerta totalmente abierta

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
93,9	93,7	10,0	38,7	2,9
94,7	94,3	10,2	25,3	3,3
95,3	94,7	10,2	18,4	4,1
93,2	92,2	10,1	14,0	4,5
90,0	88,3	10,4	11,5	5,0
86,0	84,2	10,0	9,3	5,4
80,3	77,2	9,5	7,0	5,9
71,5	67,7	9,7	6,0	6,3
61,4	56,0	10,6	5,7	6,9

Tabla AIII.21. Mediciones en válvula de compuerta totalmente abierta (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
54,5	47,1	11,1	5,1	7,4
49,9	39,9	11,5	4,7	7,6
44,8	33,5	11,8	4,4	8,0
44,5	31,3	12,0	4,3	8,3

Tabla AIII.22. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 1 vuelta

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
94,4	94,1	9,8	32,9	3,1
93,7	92,9	10,2	19,7	3,8
94,0	92,9	10,3	15,8	4,4
91,2	89,3	10,3	12,1	4,9
81,6	78,2	10,5	8,7	5,4
69,8	64,8	10,0	6,2	6,4
63,0	54,6	10,0	5,3	6,9
58,2	48,2	9,5	4,4	7,3
53,7	41,3	11,0	4,8	7,5
49,5	33,7	11,2	4,4	8,0
47,3	29,2	10,7	3,8	8,2

Tabla AIII.23. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 2 vueltas

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
97,5	97,0	10,0	38,7	3,0
93,0	91,3	10,1	20,9	3,6
93,6	90,0	10,0	13,9	4,4
91,9	86,5	10,1	11,2	5,0
85,2	56,4	9,7	8,2	5,6
78,3	64,1	10,1	6,7	6,1
71,9	52,3	10,4	5,8	6,6
69,3	43,3	10,0	4,7	7,1
64,4	32,4	11,5	5,1	7,4

Tabla AIII.21. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 2 vueltas (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
63,3	19,6	12,7	5,0	7,9
63,6	13,1	11,7	4,3	8,2

Tabla AIII.24. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 3 vueltas

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
93,2	92,5	8,3	46,1	2,5
94,6	89,9	10,3	19,4	3,8
96,3	88,0	10,2	14,3	4,5
93,1	78,0	10,0	10,3	5,1
91,6	68,8	9,9	8,4	5,6
89,8	60,3	10,9	8,2	5,9
86,0	40,7	10,5	5,8	6,5
87,2	16,8	9,6	4,6	7,3
92,2	1,8	9,8	4,1	7,5

Tabla AIII.25. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 4 vueltas

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
68,5	67,4	8,2	54,9	2,3
70,0	65,9	10,0	34,5	2,7
72,5	64,0	10,0	23,3	3,9
77,2	59,9	10,2	17,0	4,4
79,3	55,7	10,0	14,0	4,5
82,6	45,2	10,6	12,0	5,0
84,3	32,8	11,3	10,8	5,4
89,7	22,1	10,2	8,7	5,7
94,0	5,7	10,1	7,3	6,1

Tabla AIII.26. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 5 vueltas

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
68,8	66,5	8,3	71,9	2,1
71,6	62,5	8,2	36,1	2,7
80,6	53,6	10,1	24,9	3,5
93,2	43,1	10,3	19,4	4,1
91,9	10,3	10,5	15,2	4,5

Tabla AIII.27. Mediciones en válvula de compuerta cerrada 6 vueltas

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
88,5	84,5	4,3	201,8	1,0
97,0	52,4	8,2	77,4	1,9

Tabla AIII.28. Mediciones en válvula de bola totalmente abierta

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
97,5	97,3	10,1	47,9	2,8
95,4	95,0	10,0	38,9	3,0
94,8	94,3	9,8	29,6	3,3
93,8	93,2	9,5	21,0	3,7
94,1	93,1	10,7	18,0	4,3
89,9	88,5	10,5	13,0	4,8
84,4	82,2	11,4	12,0	5,2
75,3	71,9	10,0	7,9	5,8
67,3	62,1	10,0	6,9	6,1
60,3	54,0	11,2	6,6	6,5
58,4	50,6	10,7	5,6	6,6
57,9	49,8	9,7	5,3	6,7
51,0	42,6	11,8	5,2	7,2
46,5	36,0	10,9	4,9	7,5
45,2	32,5	11,9	5,1	7,6
41,4	26,4	11,2	4,5	7,8

Tabla AIII.29. Mediciones en válvula de bola abierta $\frac{3}{4}$

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
91,3	90,9	10,0	46,4	2,8
91,4	90,7	10,0	30,6	3,2
91,3	90,3	10,2	26,1	3,4
92,4	91,1	10,4	20,8	3,7
92,2	90,6	10,2	18,4	4,1
85,4	83,3	10,5	13,6	4,6
85,8	82,6	10,0	11,0	4,9
83,6	79,3	9,6	9,1	5,3
78,9	72,9	10,1	8,2	5,8
74,6	67,1	10,9	7,4	6,0
70,7	62,2	10,0	6,3	6,3
66,9	59,9	10,0	5,9	6,6
62,6	50,4	9,7	4,9	7,0
57,3	42,8	9,3	4,4	7,2
56,7	40,6	10,0	4,6	7,3
53,3	34,2	11,3	4,8	7,5
50,2	27,3	11,0	4,2	8,0
39,1	24,2	9,5	3,6	8,1

Tabla AIII.30. Mediciones en válvula de bola abierta $\frac{1}{2}$

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
94,3	93,7	10,0	52,4	2,6
92,3	89,2	10,3	25,0	3,4
94,5	89,4	10,2	18,7	4,0
94,2	87,4	10,2	16,2	4,2
93,8	84,7	10,1	13,8	4,6
92,9	86,6	9,0	11,8	4,9
91,5	76,0	10,0	10,2	5,1
90,5	71,6	9,8	9,2	5,3
90,0	67,4	10,3	8,7	5,6

Tabla AIII.30. Mediciones en válvula de bola abierta $\frac{1}{2}$ (continuación...)

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
88,1	61,1	10,5	7,8	5,8
87,0	55,3	10,4	7,1	6,0
86,3	48,4	10,0	6,5	6,2
86,2	48,1	10,4	5,9	6,6
86,0	30,0	9,6	5,2	6,9
87,4	19,6	10,9	5,1	7,3
88,5	11,7	10,5	4,7	7,4
89,4	4,2	10,7	4,4	7,5

Tabla AIII.31. Mediciones en válvula de bola $\frac{1}{4}$ abierta

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
95,3	94,0	10,1	56,1	2,9
93,5	90,5	9,9	34,9	3,0
94,0	88,3	10,3	27,3	3,2
97,3	87,8	10,3	20,2	3,9
98,7	84,0	11,6	18,2	4,3
94,6	73,5	10,3	13,3	4,7
94,0	67,0	9,7	11,1	5,0
94,6	60,8	9,5	9,2	5,2
95,4	50,6	9,9	8,5	5,5
96,7	41,0	10,2	7,8	5,8
95,5	26,6	9,3	6,6	6,1
98,4	15,0	9,6	6,1	6,3
101,2	3,9	9,9	5,7	6,6

Tabla AIII.32. Mediciones en la expansión súbita de vidrio con separación de 4 cm

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
74,6	72,2	10,0	8,8	5,4
68,1	64,9	10,2	8,2	5,8
61,4	57,5	10,4	7,4	6,1

Tabla AIII.32. Mediciones en la expansión súbita de vidrio con separación de 4 cm
(continuación...)

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
55,3	50,4	10,6	6,5	6,3
48,1	42,3	10,4	5,7	6,7
41,1	34,6	11,0	5,7	7,1
36,5	28,9	10,0	4,5	7,3
29,9	20,7	8,2	3,2	7,6
28,0	18,1	8,7	3,3	7,7
25,0	13,6	9,7	3,3	8,2

Tabla AIII.33. Mediciones en la expansión súbita de vidrio con separación de 14,5 cm

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
68,5	70,4	10,0	8,8	5,5
57,2	60,2	10,2	7,4	6,0
49,4	53,4	10,0	6,4	6,2
39,9	35,2	9,2	5,0	6,7
31,2	38,4	10,5	4,9	7,3
24,2	33,4	9,8	4,2	7,5
18,3	29,4	12,2	4,9	7,7
13,2	25,5	10,9	3,9	8,1

Tabla AIII.34. Mediciones en la contracción súbita de vidrio con separación de 4 cm

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
87,4	90,1	10,2	16,7	4,3
79,0	84,0	10,0	12,3	4,8
67,0	75,4	10,1	9,4	5,3
54,2	67,3	10,1	7,7	5,9
42,9	60,7	10,2	6,4	6,3
28,6	54,0	9,9	4,9	6,9

Tabla AIII.34. Mediciones en la contracción súbita de vidrio con separación de 4 cm
(continuación...)

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
18,1	49,1	11,0	5,3	7,3
9,1	47,2	10,3	4,3	7,5
1,4	46,5	10,1	4,0	7,8

Tabla AIII.35. Mediciones en la contracción súbita de vidrio con separación de 14,5 cm

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
89,8	91,0	10,0	26,2	3,6
82,7	85,2	10,8	20,0	4,1
77,7	82,4	10,1	13,2	4,6
67,6	75,4	9,9	10,0	5,2
56,8	68,4	10,0	8,4	5,7
44,8	61,4	9,4	6,5	6,1
32,8	56,7	10,9	6,4	6,5
21,4	51,0	9,6	4,7	7,0
12,8	49,3	9,8	4,3	7,4
1,5	48,2	10,9	4,3	7,9

Tabla AIII.36. Mediciones en las tuberías en paralelo

h_1 (cm)	h_2 (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
51,7	51,6	10,2	129,92	1,8
50,8	50,5	10,0	78,01	1,9
51,2	50,6	10,0	54,50	2,2
52,8	49,8	10,3	25,65	3,4
54,9	49,5	10,4	21,85	3,8
55,1	47,7	10,0	19,07	4,0
56,1	47,1	10,2	17,25	4,3
56,1	46,3	10,5	16,19	4,4
55,2	45,0	10,0	14,37	4,6
56,7	42,8	10,3	12,61	4,8

Tabla AIII.36. Mediciones en las tuberías en paralelo (continuación...)

h₁ (cm)	h₂ (cm)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
53,7	42,0	10,4	11,96	4,9
52,9	38,9	9,7	10,20	5,2
52,8	37,6	10,5	10,39	5,3
52,1	34,0	10,5	9,30	5,6
51,3	30,9	11,0	9,16	5,7
50,6	27,3	10,7	8,22	5,8
50,7	25,6	10,0	7,60	5,9
51,1	23,4	11,2	8,06	6,0
50,3	20,1	10,7	7,30	6,2
50,0	16,3	10,7	6,61	6,4
51,1	10,5	9,9	5,62	6,5
51,1	5,2	12,0	6,57	6,8
83,3	30,1	10,8	5,58	7,0
83,5	25,4	12,5	5,95	7,3
82,8	19,9	11,1	5,14	7,5
84,4	14,7	9,1	3,86	7,6
84,3	9,0	10,7	4,41	7,7
85,5	6,7	10,2	4,11	7,7

Tabla AIII.37. Mediciones en el venturímetro

h₁ (cm/s)	h₂ (cm/s)	V (L)	t (s)	h_{vert} (cm)
90,6	85,3	8,0	51,05	2,4
95,5	76,7	10,0	32,15	3,3
97,8	67,7	10,4	25,66	3,6
101,5	60,8	10,2	21,35	3,9
97,8	38,4	10,3	17,27	4,3
96,7	22,6	10,4	15,53	4,5
97,8	1,9	10,2	13,36	4,7

h₁: altura 1 en el manómetro de vidrio

h₂: altura 2 en el manómetro de vidrio

V: volumen registrado en el balde graduado

t: tiempo en alcanzar el volumen registrado

h_{vert}: altura en el vaso de vidrio comunicante del vertedero en "V"

ANEXO IV

**DIAGRAMAS EXPERIMENTALES DE TUBERÍAS Y ACCESORIOS
UTILIZANDO EL VERTEDERO EN "V" CALIBRADO**

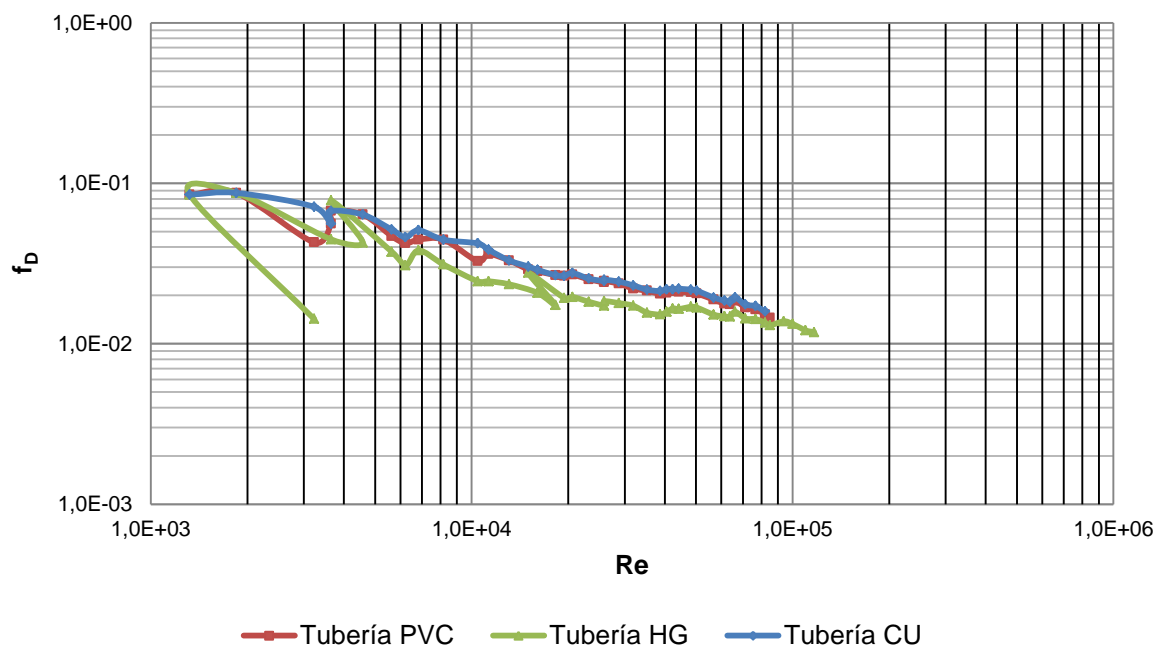


Figura AIV.1. Diagrama de Moody, Tuberías de 1 ¼ " de diámetro

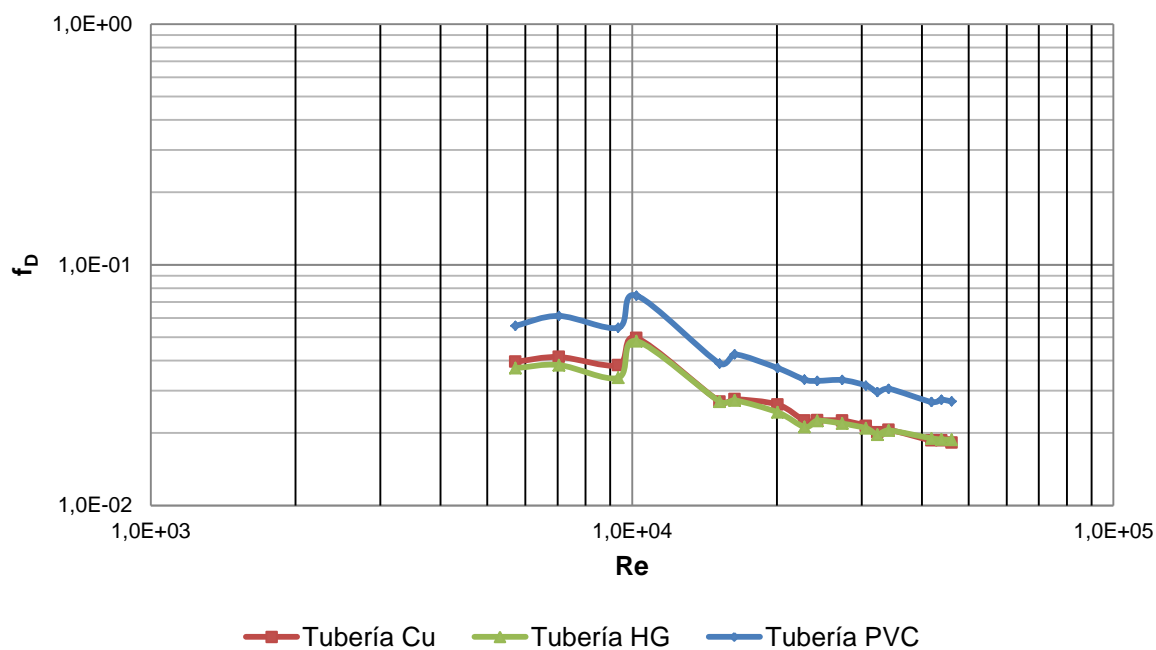


Figura AIV.2. Diagrama de Moody, Tuberías de 1 " de diámetro

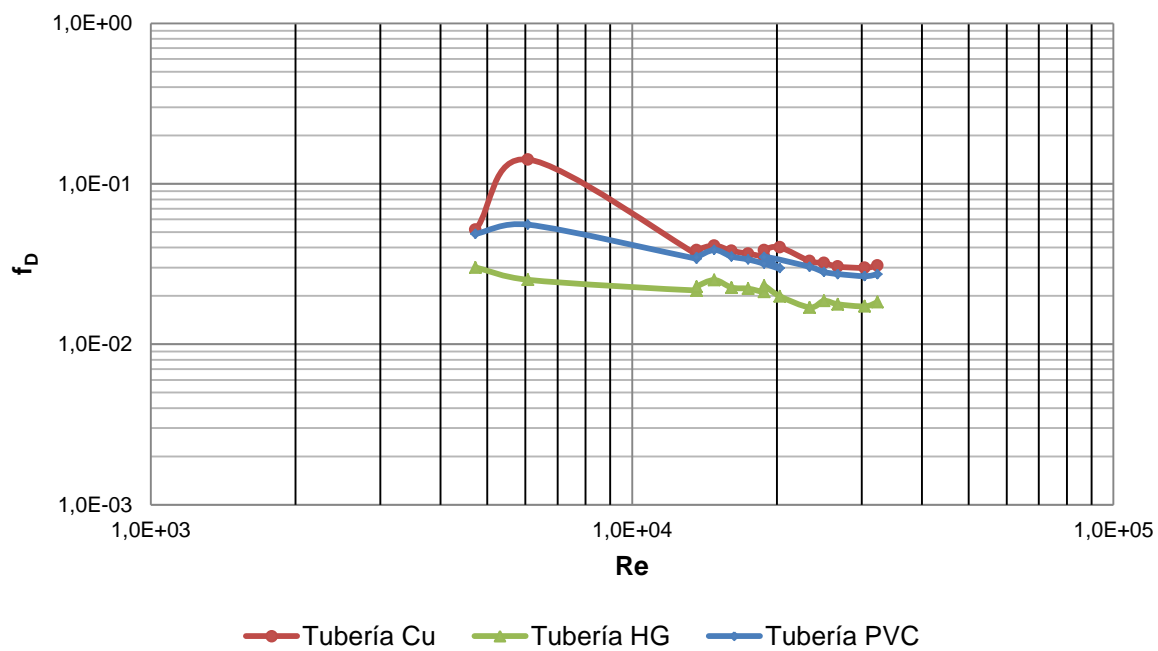


Figura AIV.3. Diagrama de Moody, Tuberías de $3/4$ " de diámetro

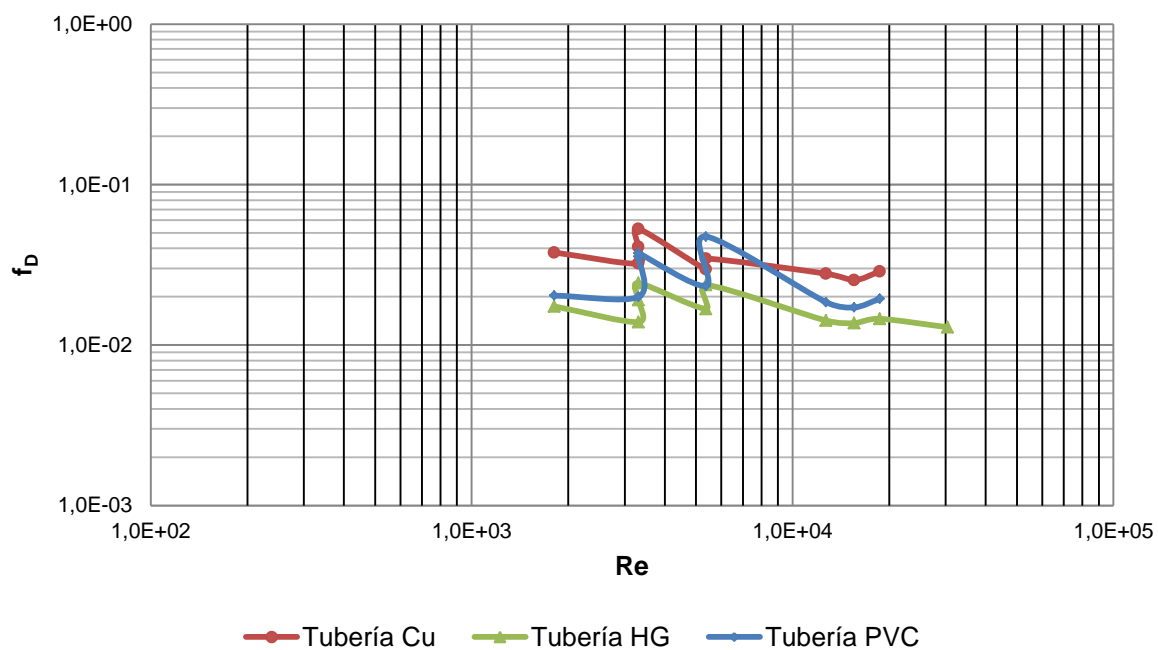


Figura AIV.4. Diagrama de Moody, Tubería de $1/2$ " de diámetro

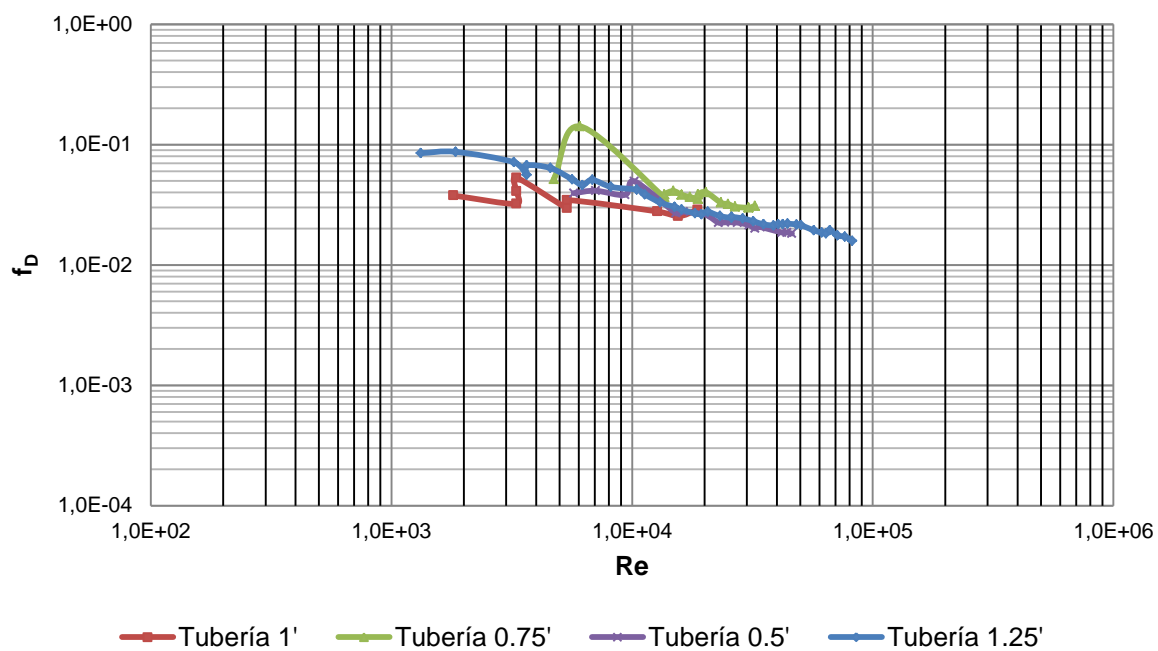


Figura AIV.5. Diagrama de Moody, Tuberías de Cobre

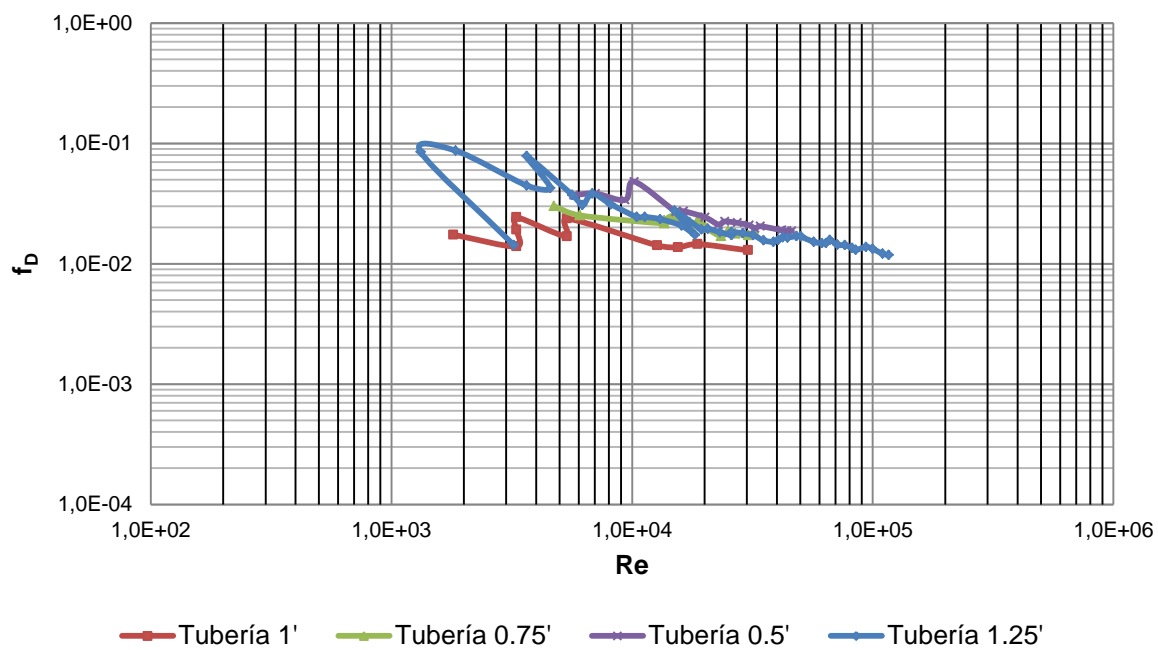


Figura AIV.6. Diagrama de Moody, Tubería de Hierro Galvanizado

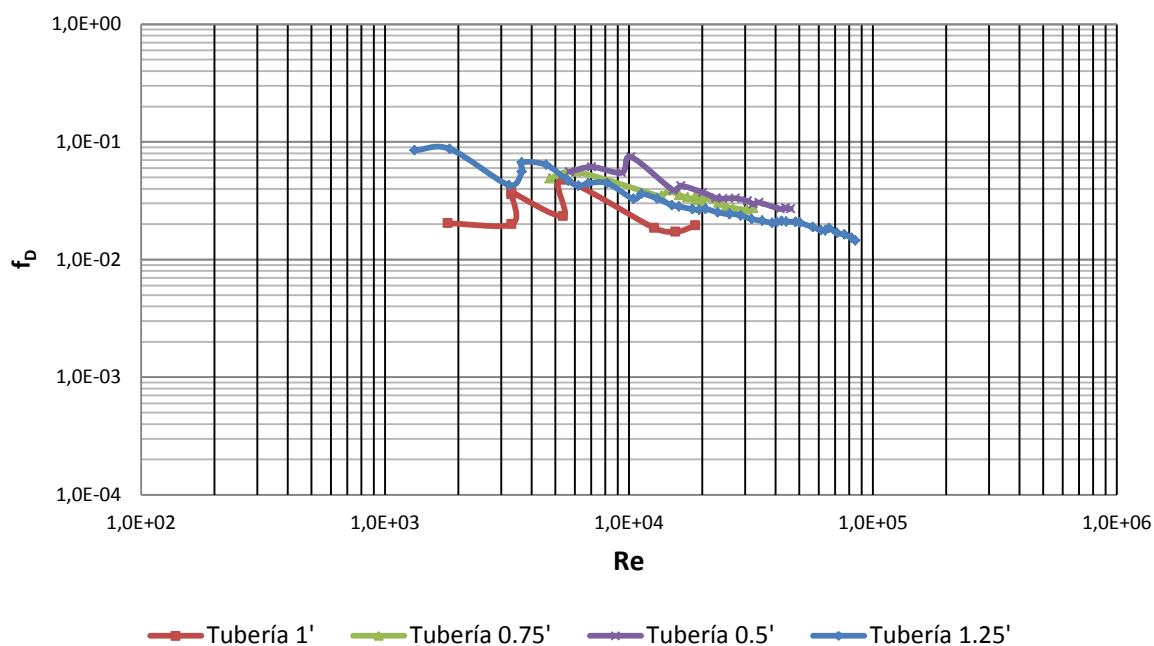


Figura AIV.7. Diagrama de Moody, Tubería de PVC

Tabla AIV.1. Rugosidades absolutas y relativas experimentales de cada tubería

Tubería	ϵ/D	ϵ (cm)
Tubería de Cobre de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de PVC de 1 ¼ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Cobre de 1 "	1E-06	2,54E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de 1 "	1E-06	2,54E-06
Tubería de PVC de 1 "	5E-06	1,27 E-05
Tubería de Cobre de ¾ "	5E-05	1,27 E-04
Tubería de Hierro Galvanizado de ¾ "	< 1E-06	< 7,50E-07
Tubería de PVC de ¾ "	1E-05	7,50E-06
Tubería de Cobre de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de Hierro Galvanizado de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06
Tubería de PVC de ½ "	< 1E-06	< 3,18E-06

ϵ : rugosidad absoluta

ϵ/D : rugosidad relativa

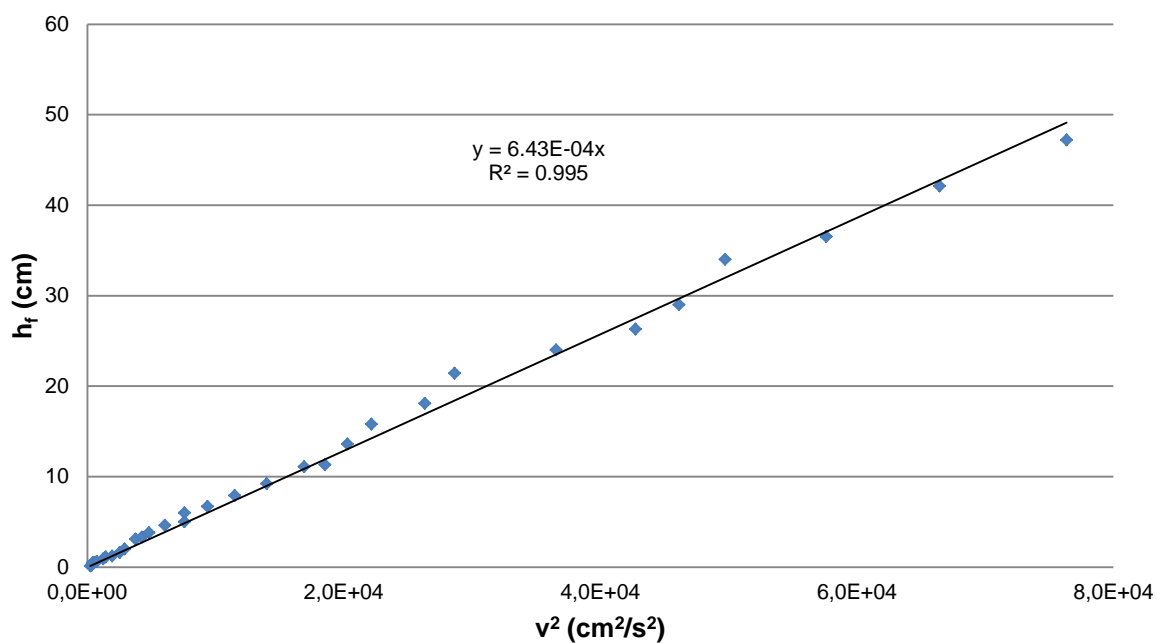


Figura AIV.8. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1 1/4 " de diámetro

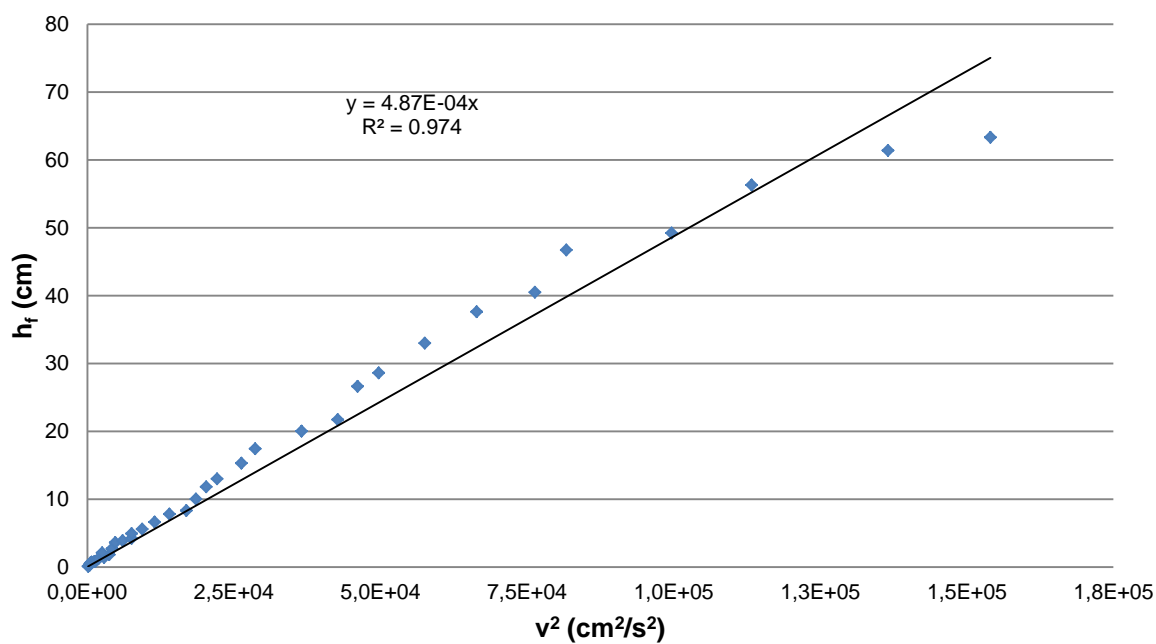


Figura AIV.9. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 1/4 " de diámetro

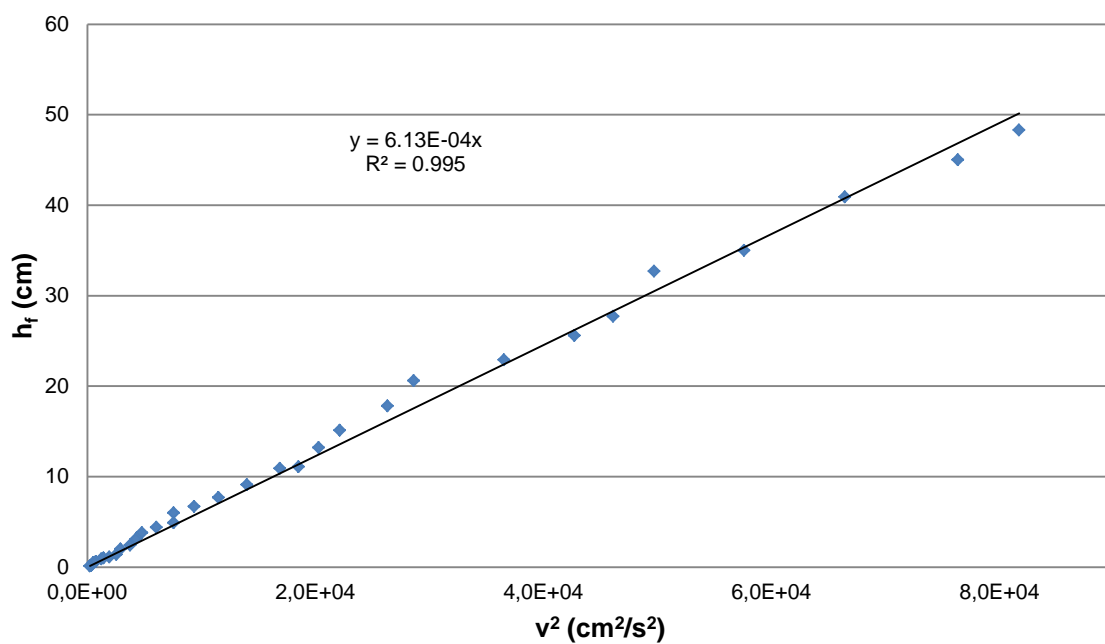


Figura AIV.10. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 1/4 " de diámetro

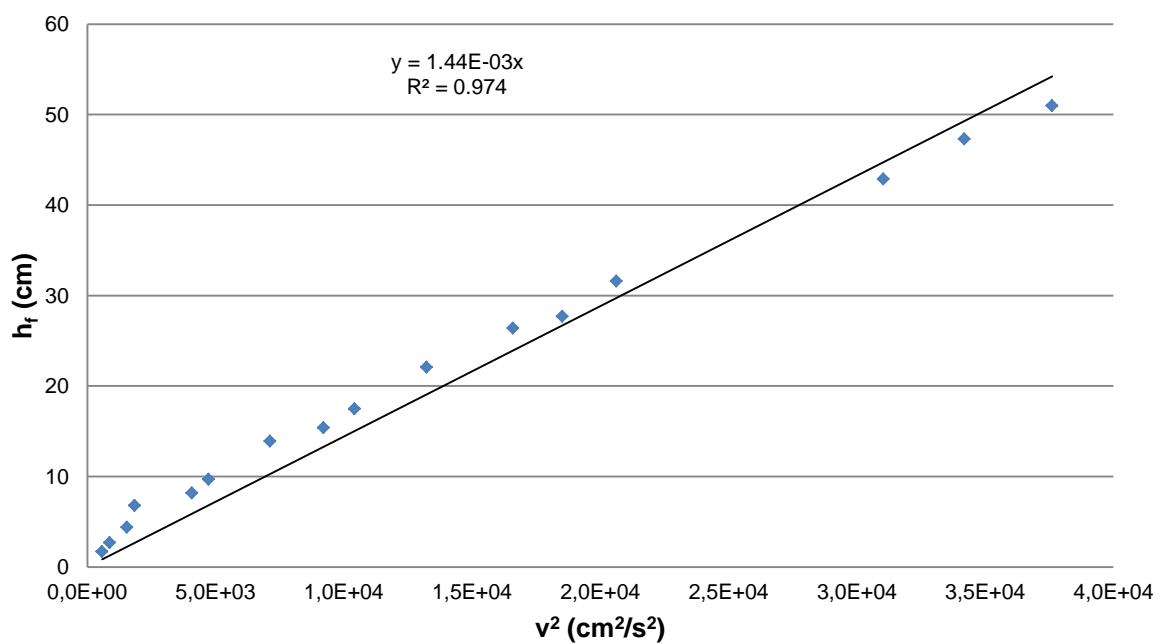


Figura AIV.11 Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido tubería para de Cobre de 1 " de diámetro

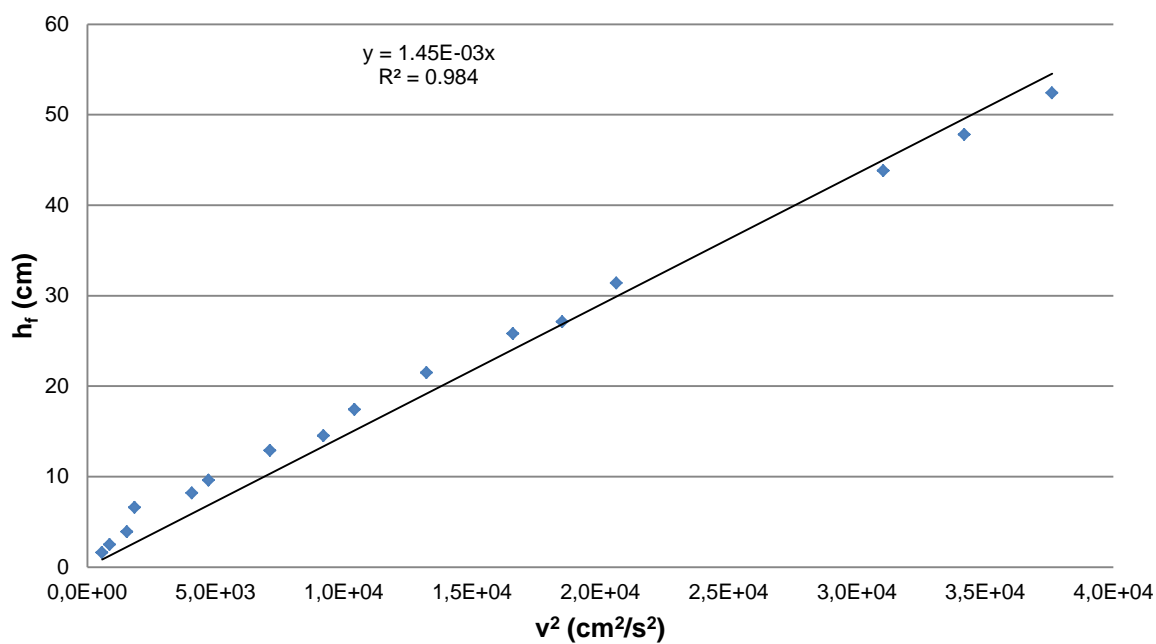


Figura AIV.12. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1 " de diámetro

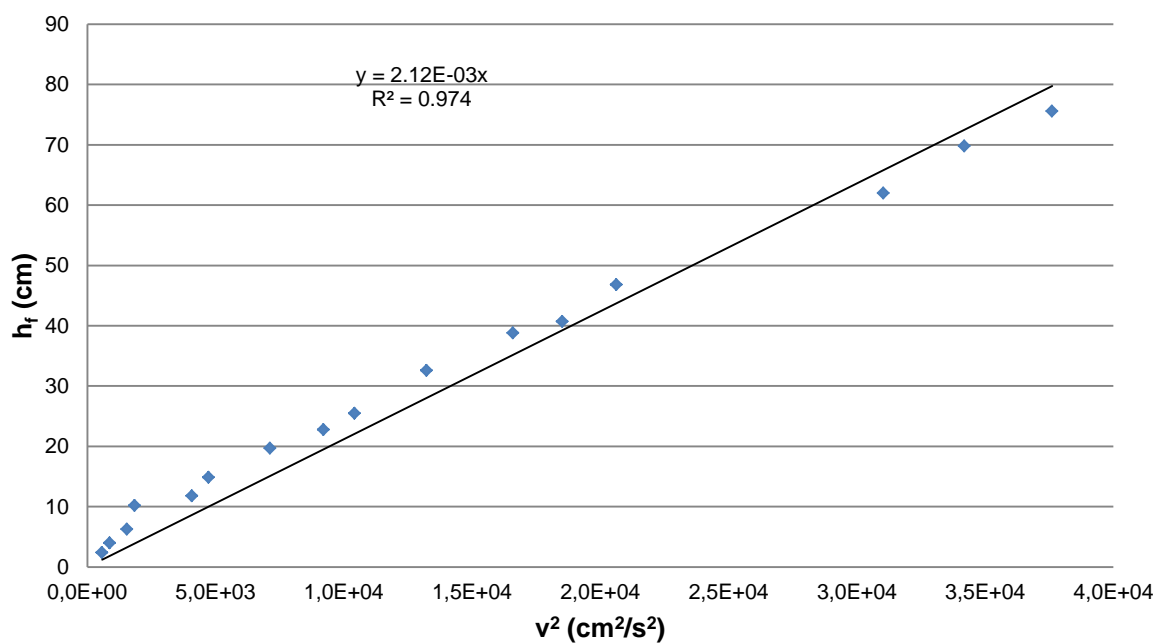


Figura AIV.13. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1 " de diámetro

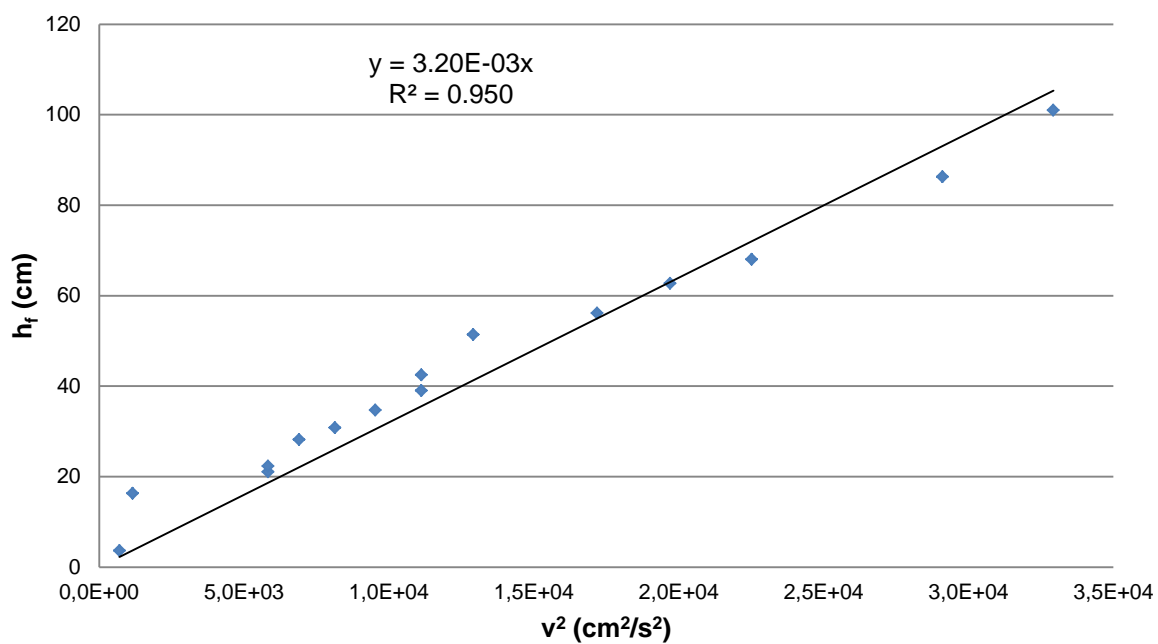


Figura AIV.14. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de $\frac{3}{4}$ " de diámetro

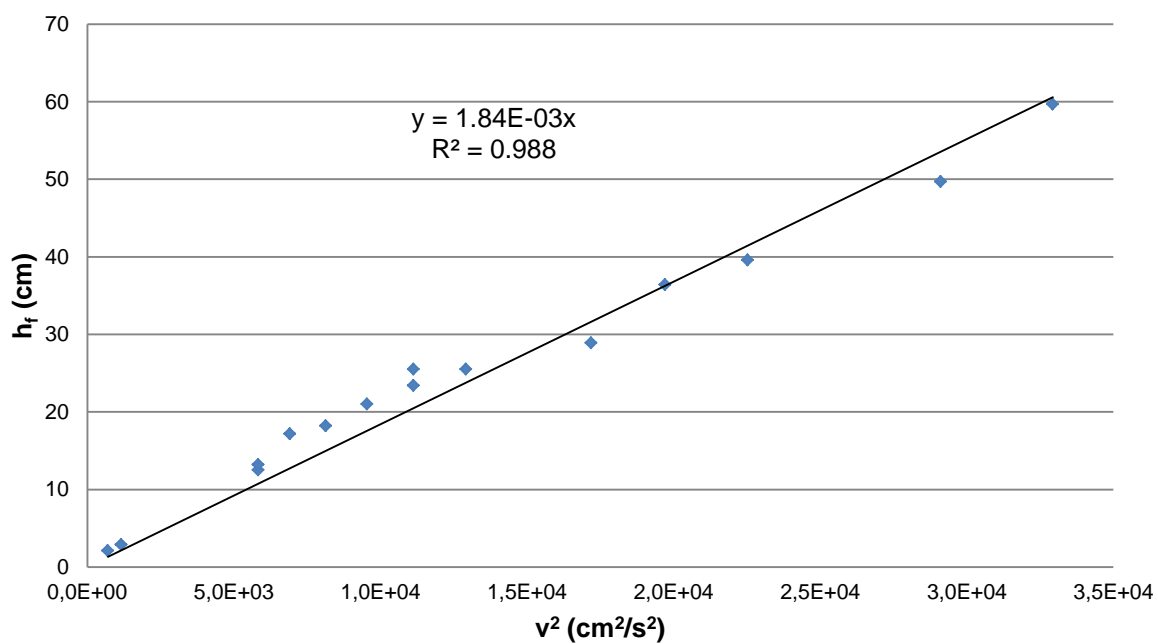


Figura AIV.15. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de $\frac{3}{4}$ " de diámetro

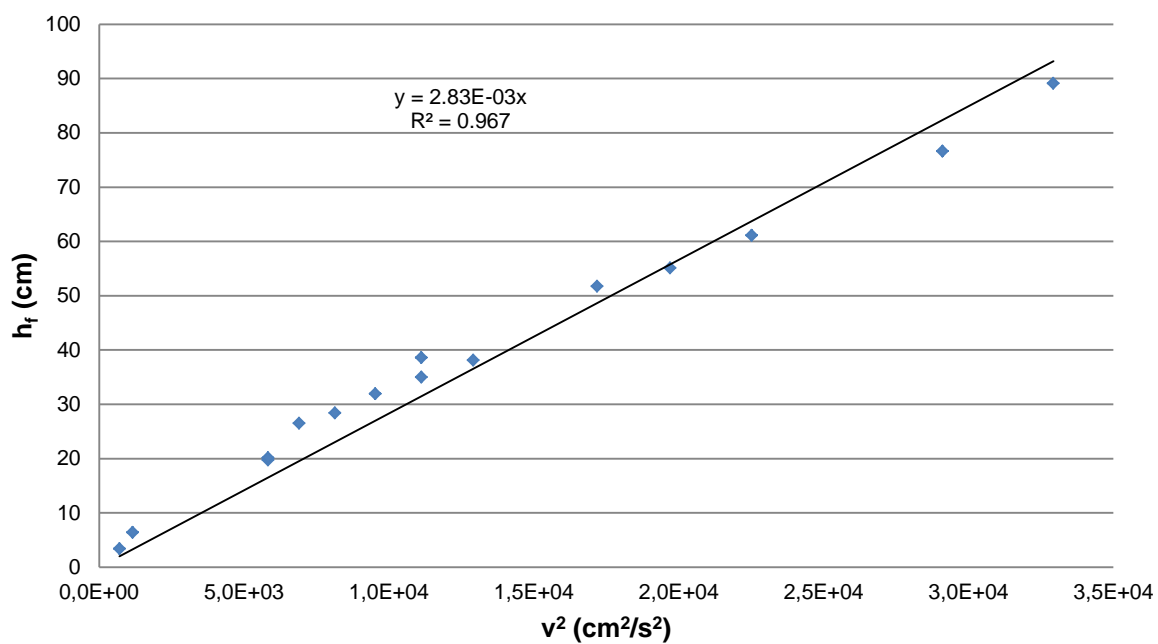


Figura AIV.16. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 3/4 " de diámetro

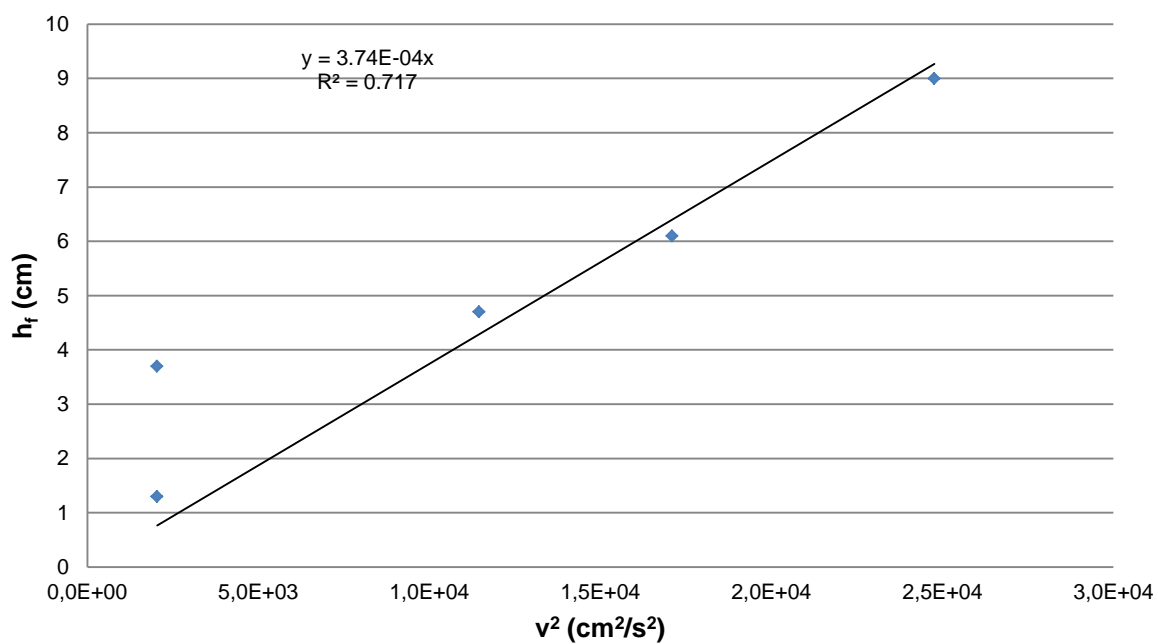


Figura AIV.17. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Cobre de 1/2 " de diámetro

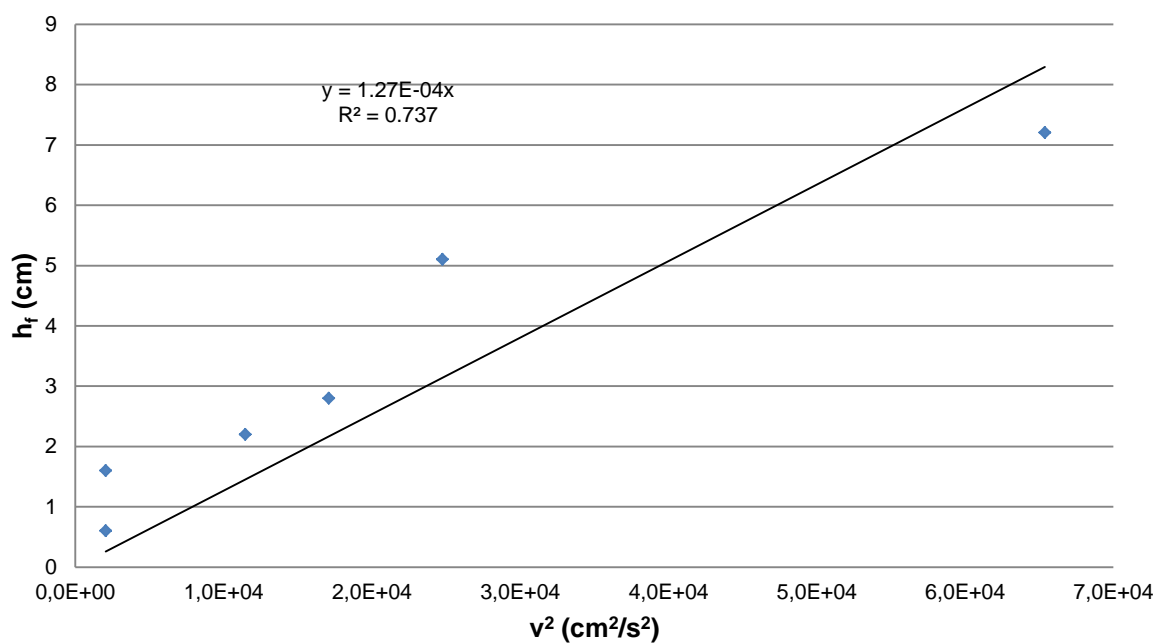


Figura AIV.18. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de Hierro Galvanizado de 1/2 " de diámetro

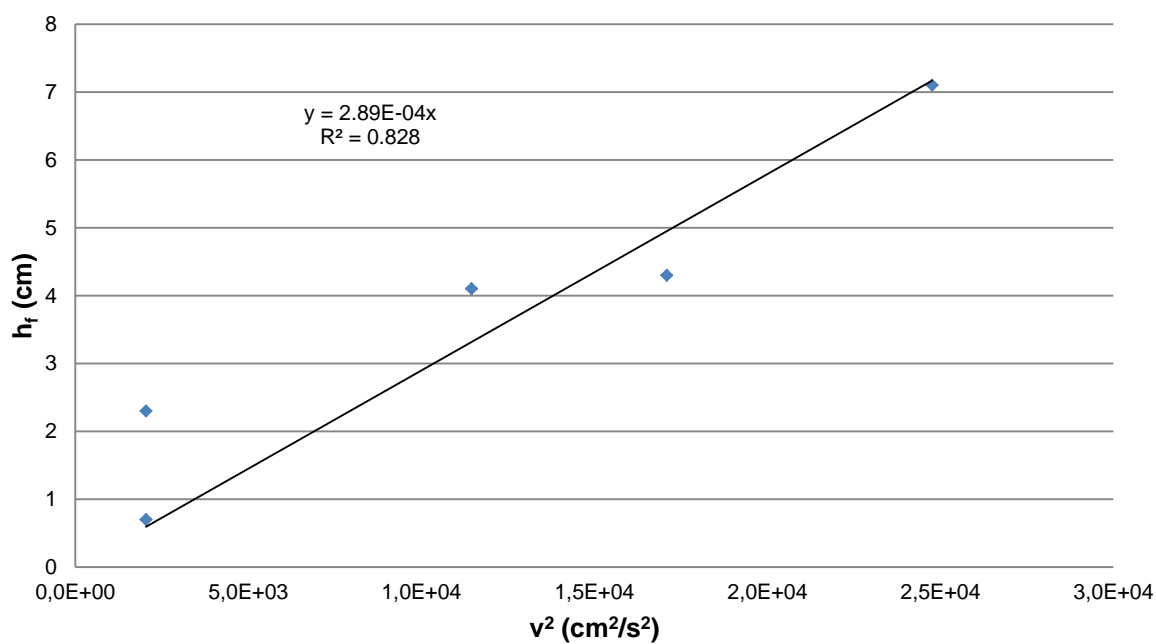


Figura AIV.19. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para tubería de PVC de 1/2 " de diámetro

Tabla AIV.2. Coeficientes de Resistencia para cada accesorio

ACCESORIO	$K_{resistencia}$	ACCESORIO	$K_{resistencia}$
Codo 90 ° superior	1,309	Válvula de compuerta 3 vueltas cerrada	2,445
Codo 90 ° inferior	1,206	Válvula de compuerta 4 vueltas cerrada	7,286
Codo 45 °	0,495	Válvula de compuerta 5 vueltas cerrada	26,911
Válvula de globo Abierta totalmente	7,783	Válvula de bola Abierta totalmente	0,384
Válvula de globo ½ vuelta cerrada	12,088	Válvula de bola ¼ vuelta cerrada	0,607
Válvula de globo 1 vuelta cerrada	11,146	Válvula de bola ½ vuelta cerrada	2,225
Válvula de globo 1 ½ vueltas cerrada	15,326	Válvula de bola ¾ vuelta cerrada	5,102
Válvula de globo 2 vueltas cerrada	38,303	Expansión súbita 4 cm de separación	0,103
Válvula de compuerta Totalmente abierta	0,269	Expansión súbita 14,5 cm de separación	0,094
Válvula de compuerta 1 vuelta cerrada	0,344	Contracción súbita 4 cm de separación	0,432
Válvula de compuerta 2 vueltas cerrada	1,109	Contracción súbita 14,5 cm de separación	0,479

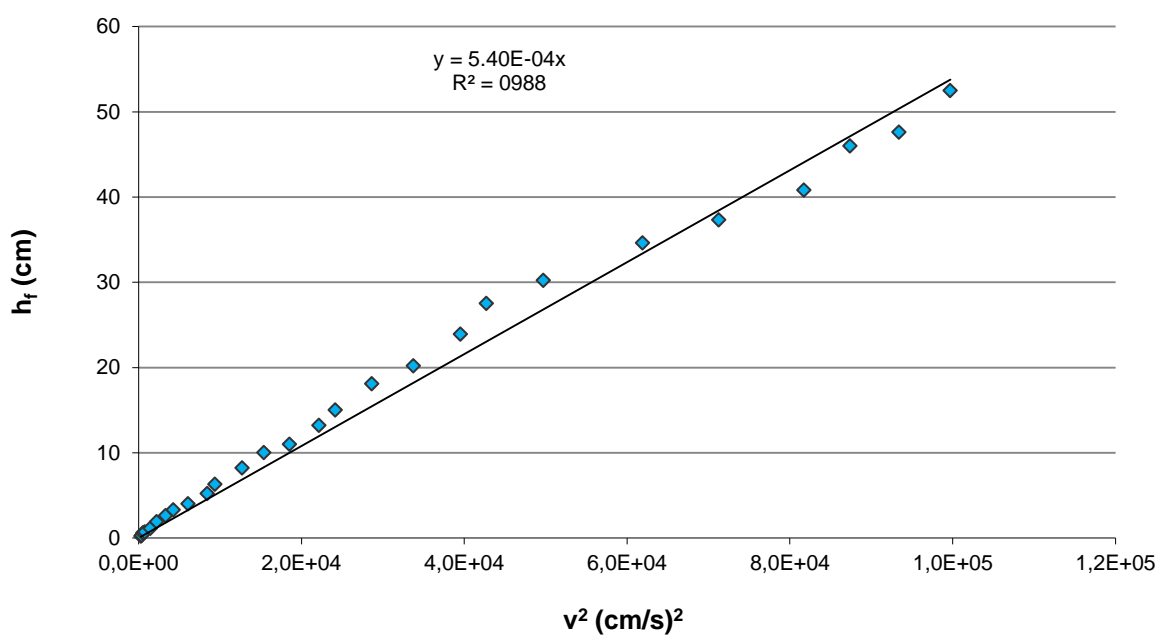


Figura AIV.20. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90 ° superior

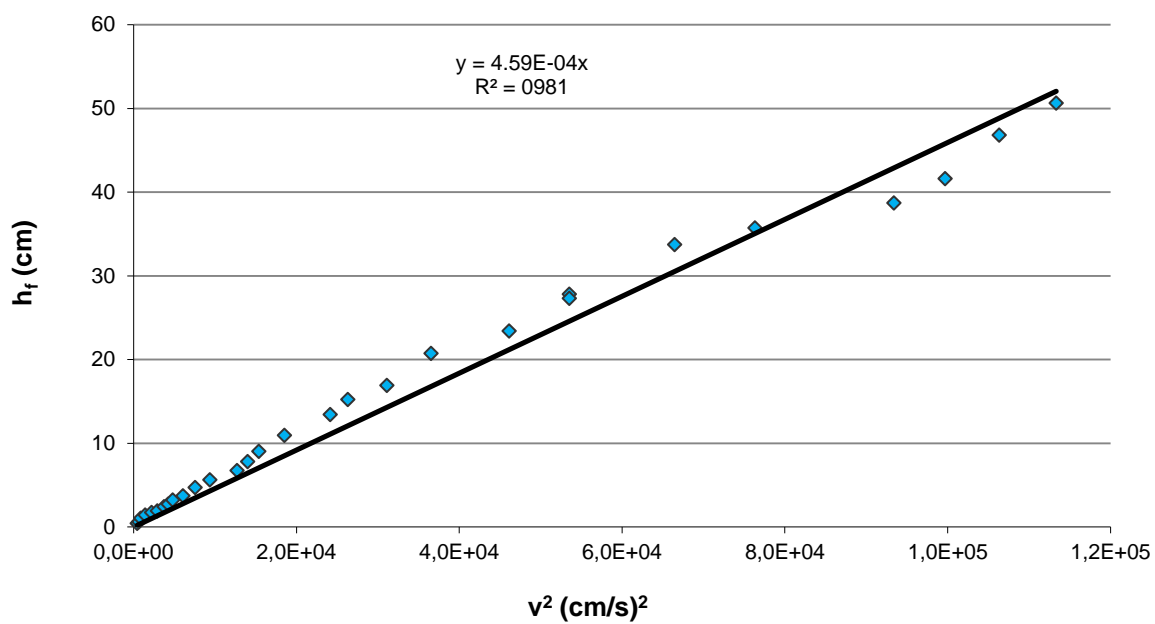


Figura AIV.21. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 90° inferior

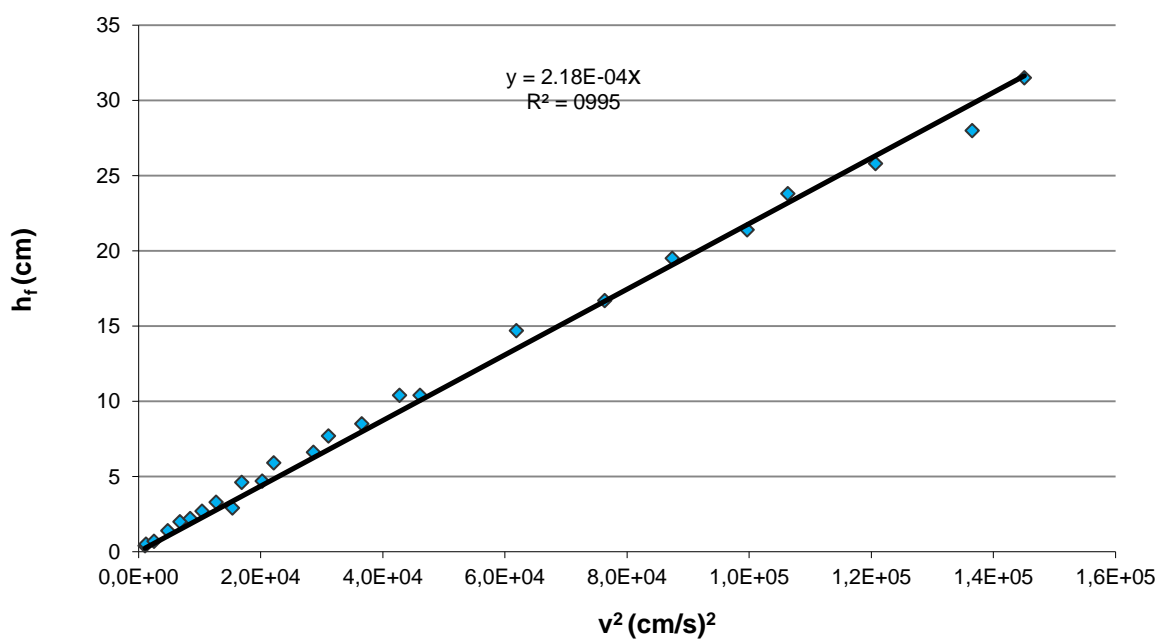


Figura AIV.22. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para codo de 45°

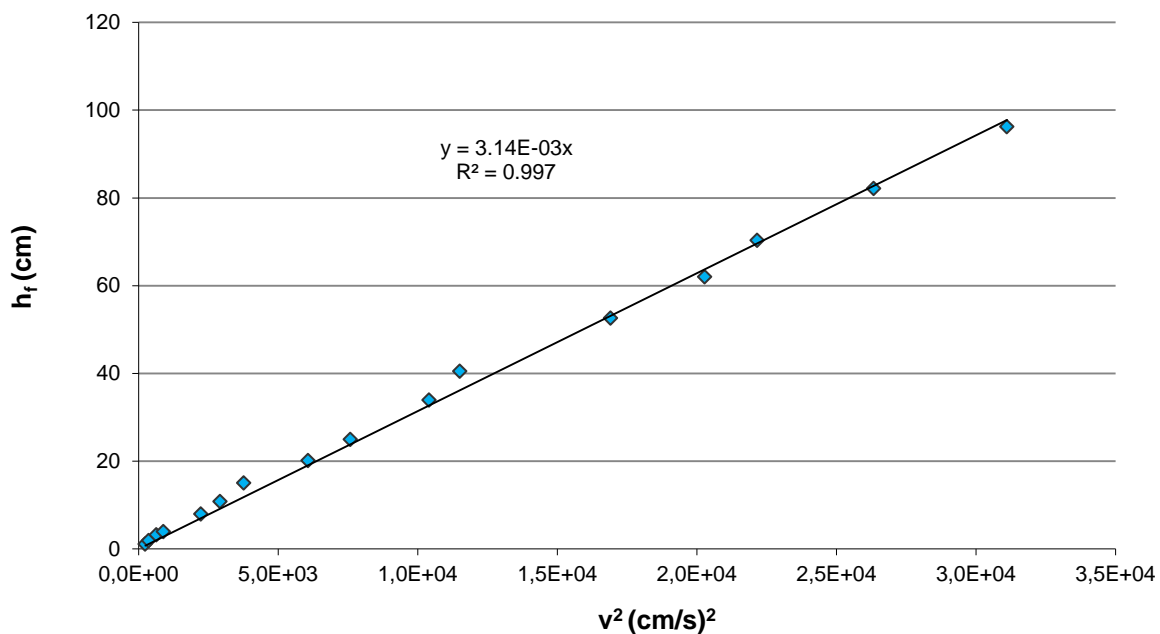


Figura AIV.23. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo totalmente abierta

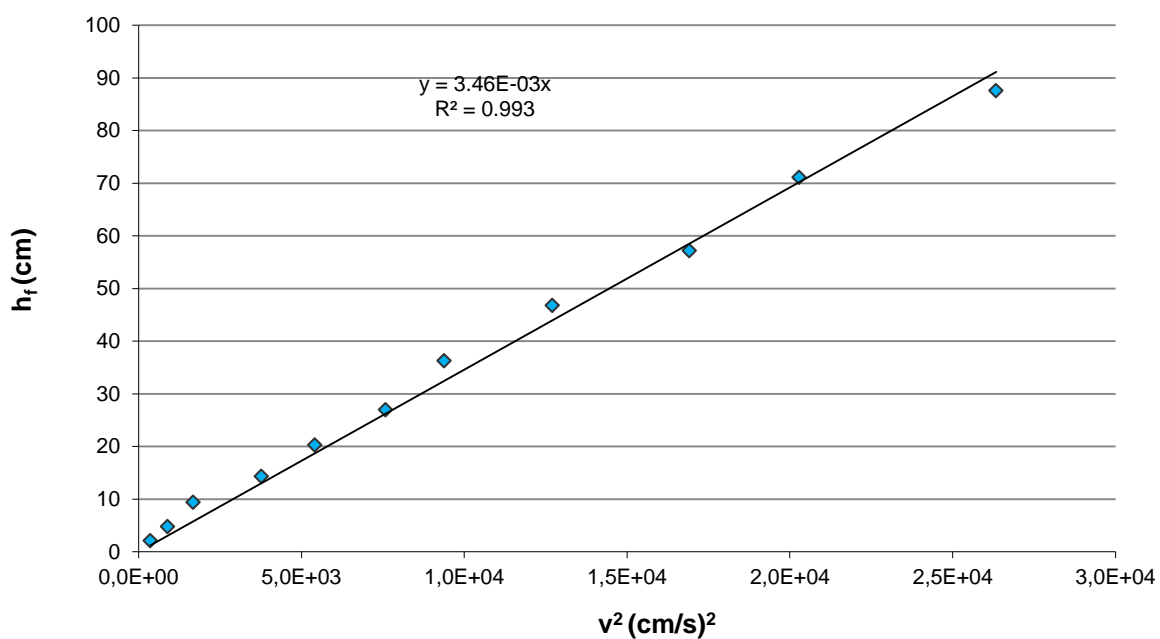


Figura AIV.24. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta

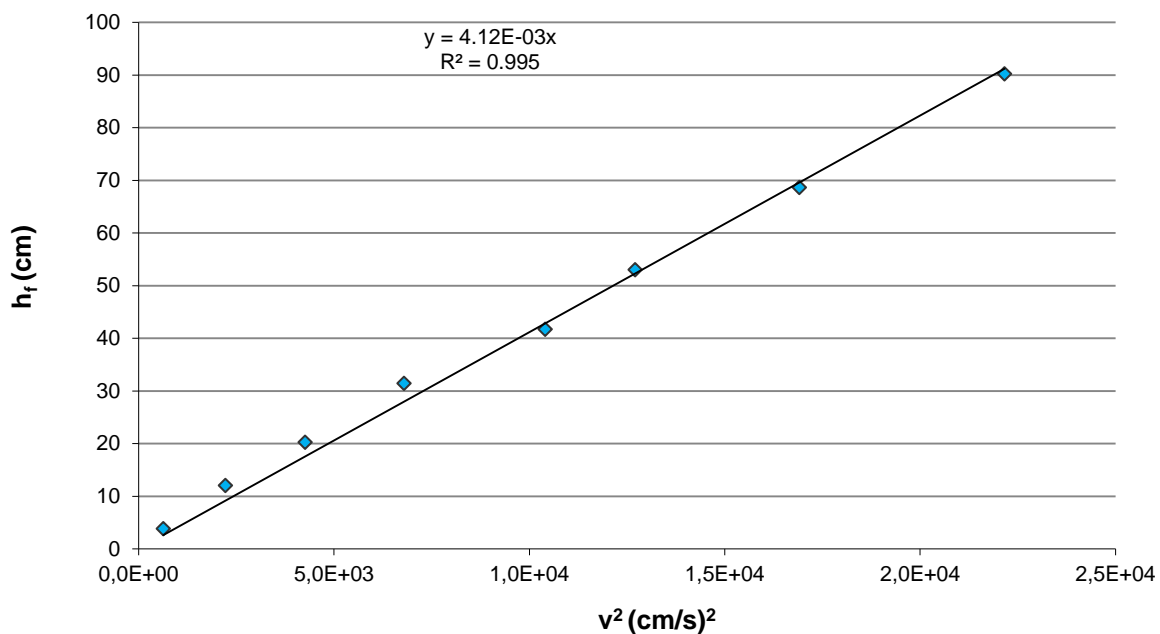


Figura AIV.25. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 vuelta

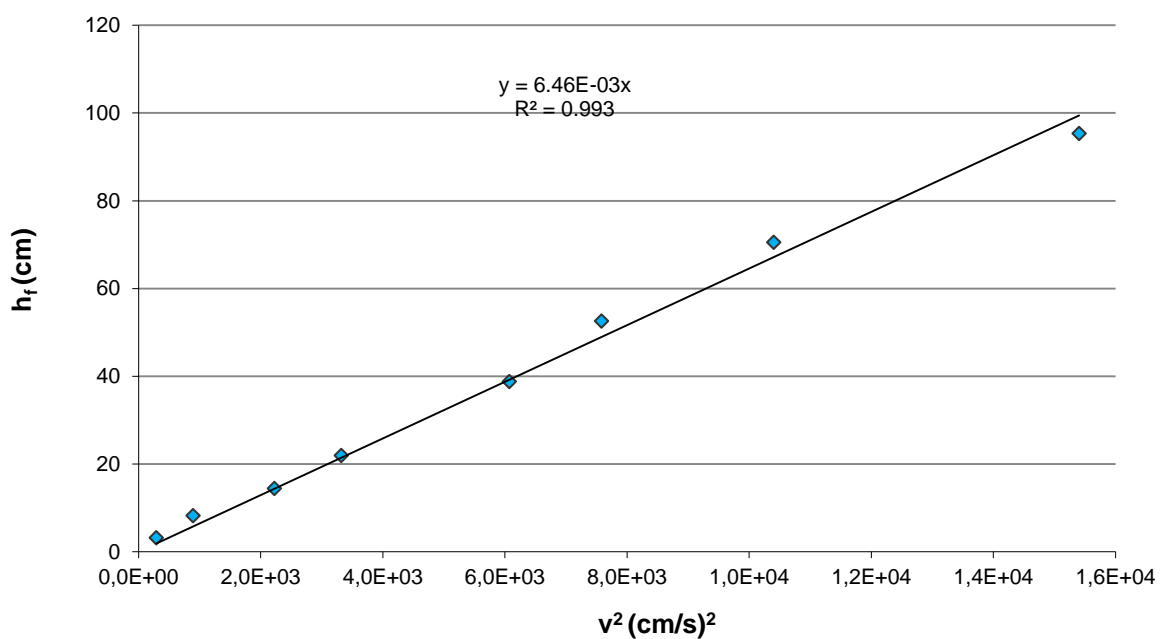


Figura AIV.26. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo cerrada 1 1/2 vueltas

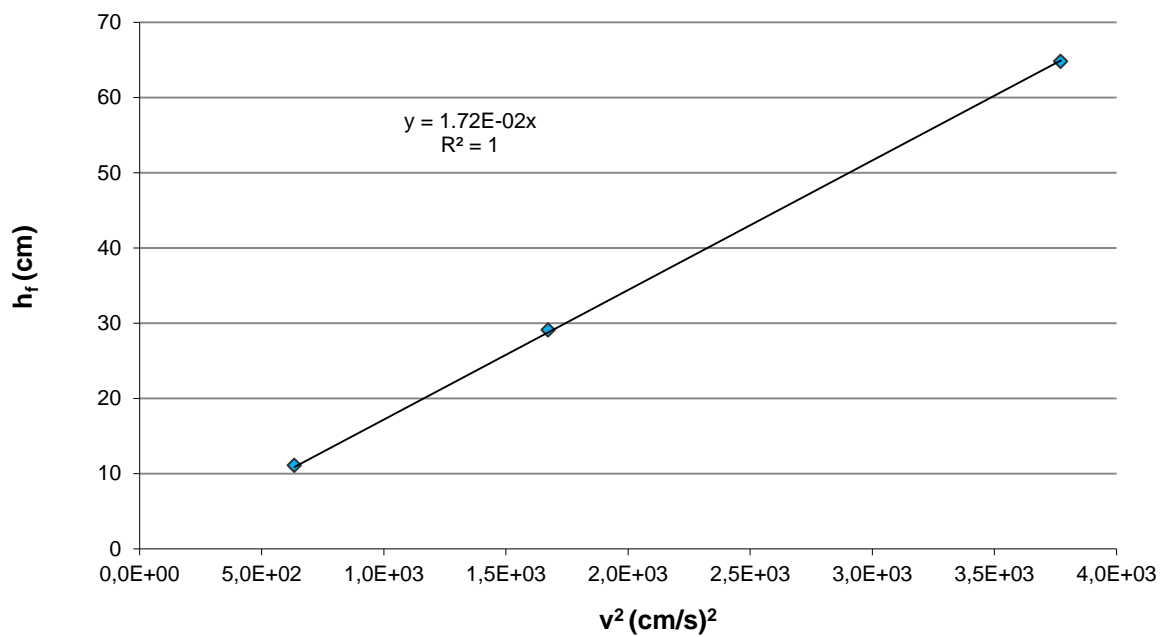


Figura AIV.27. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de globo 2 vueltas

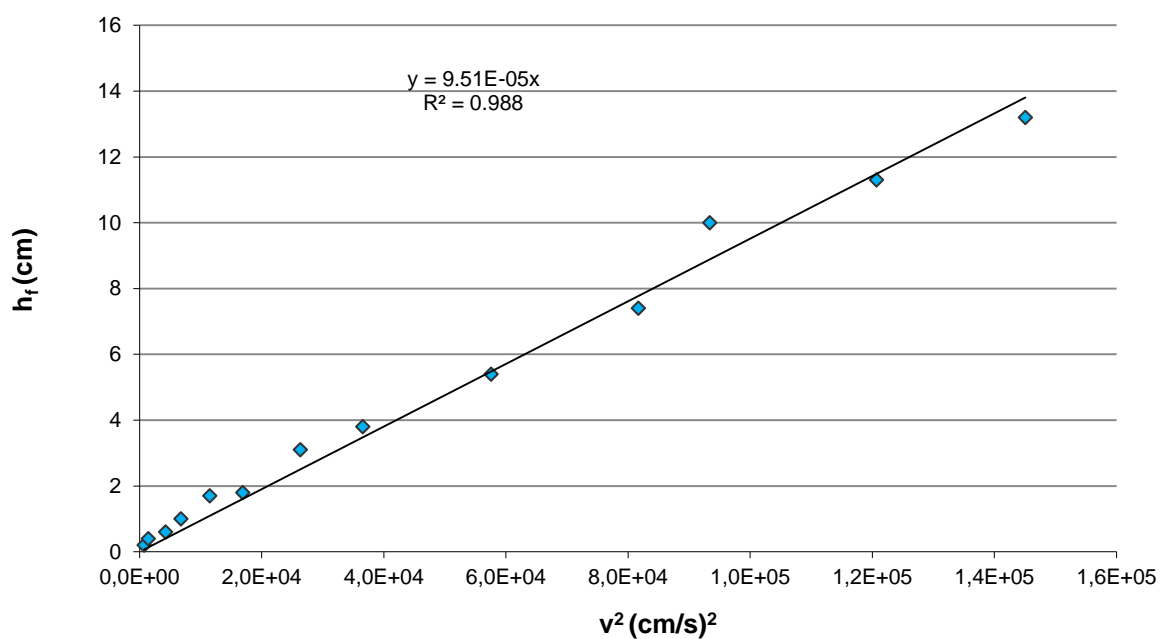


Figura AIV.28. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta totalmente abierta

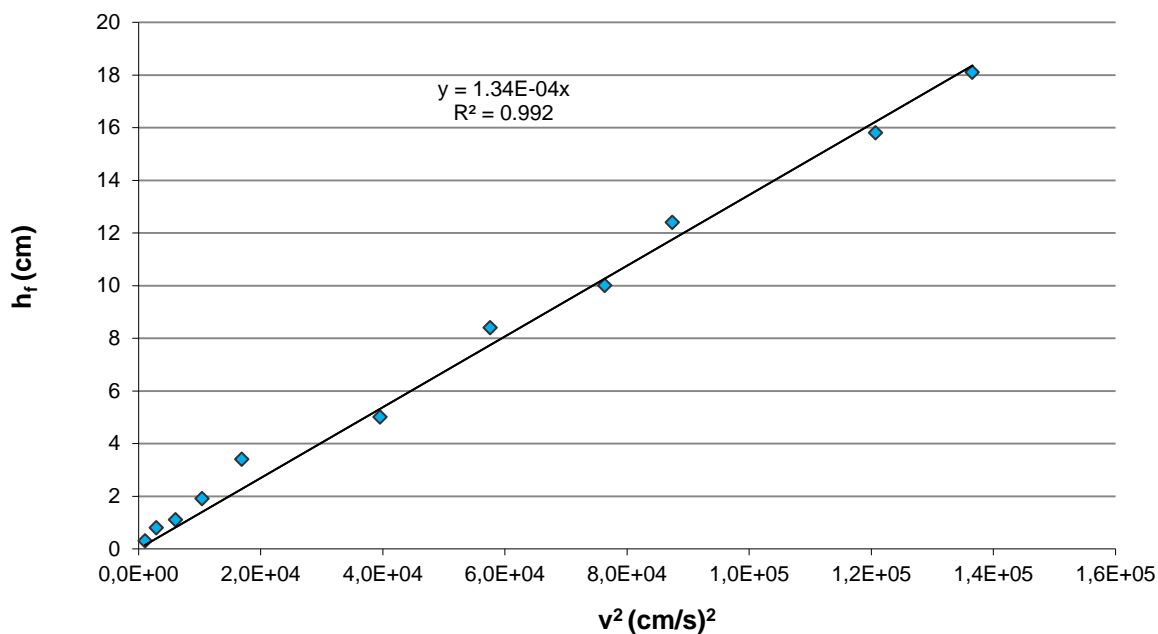


Figura AIV.29. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 1 vuelta

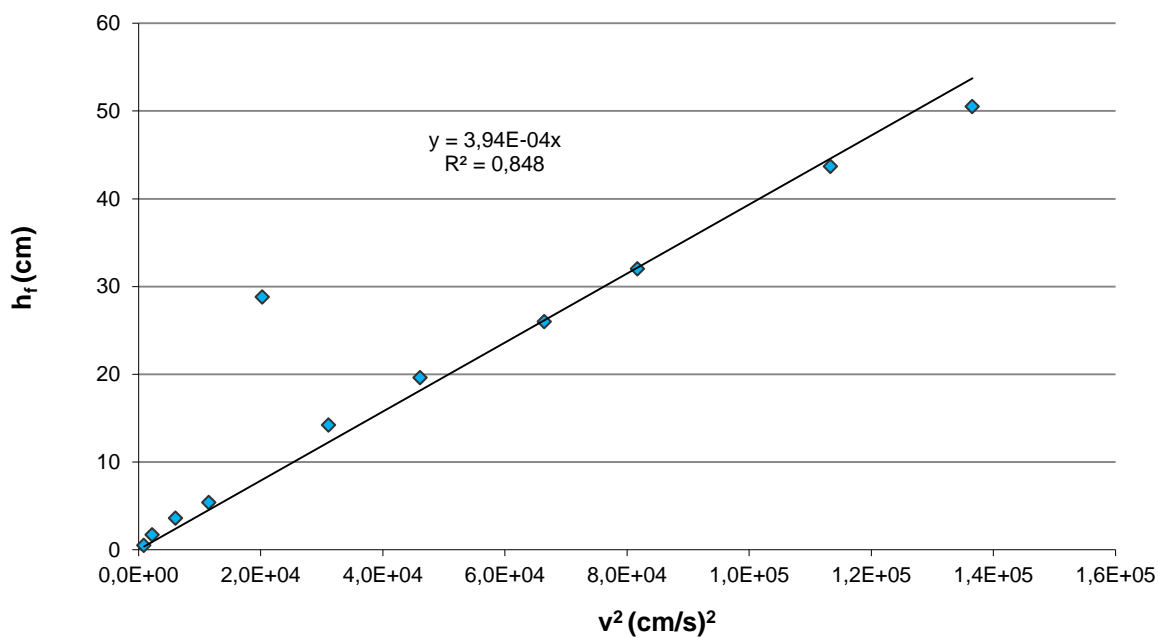


Figura AIV.30. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 2 vueltas

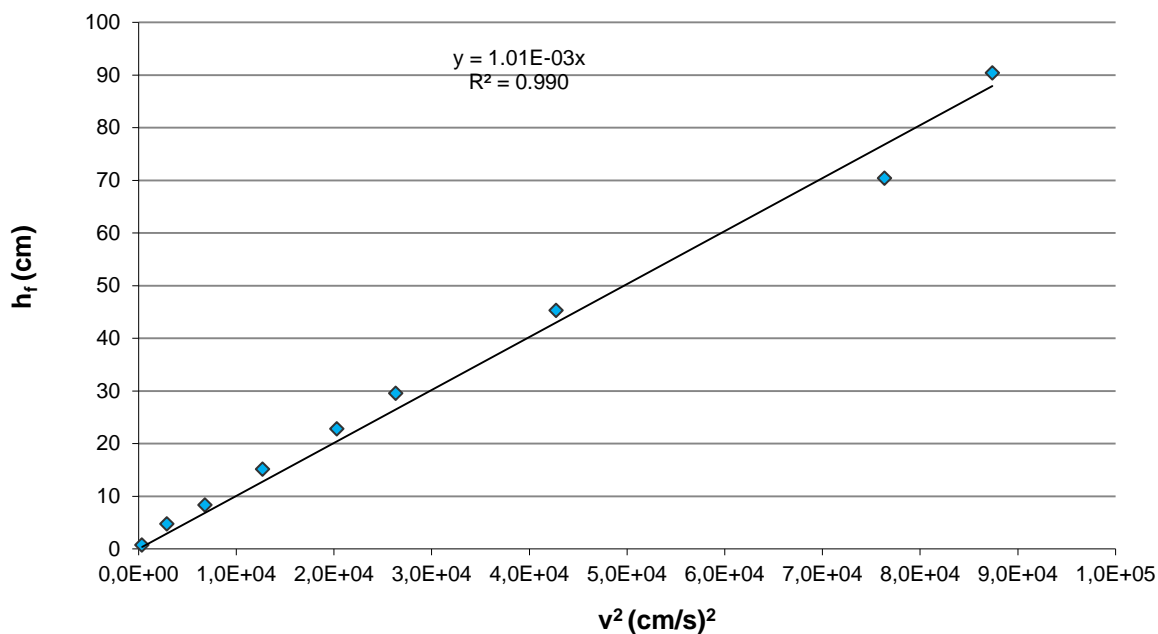


Figura AIV.31. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 3 vueltas

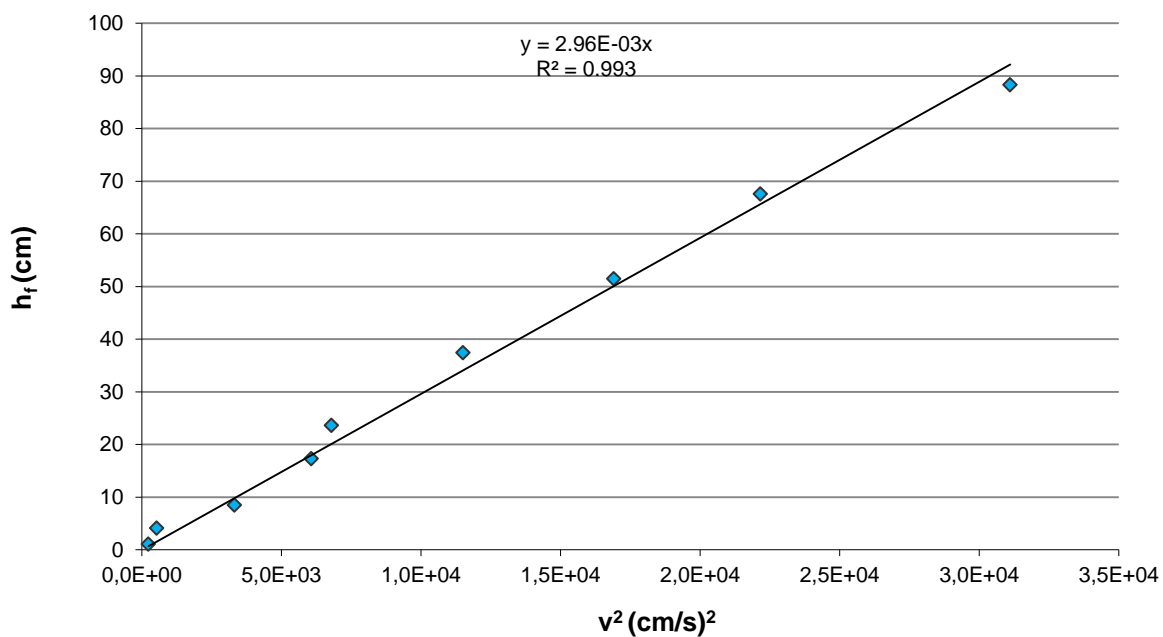


Figura AIV.32. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 4 vueltas

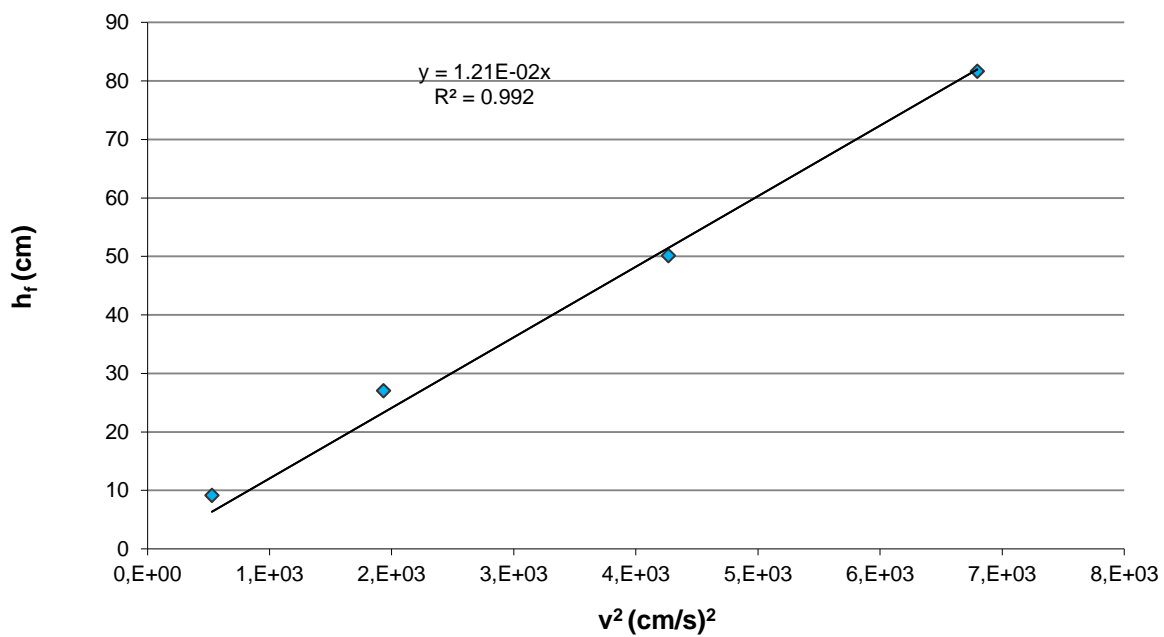


Figura AIV.33. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de compuerta cerrada 5 vueltas

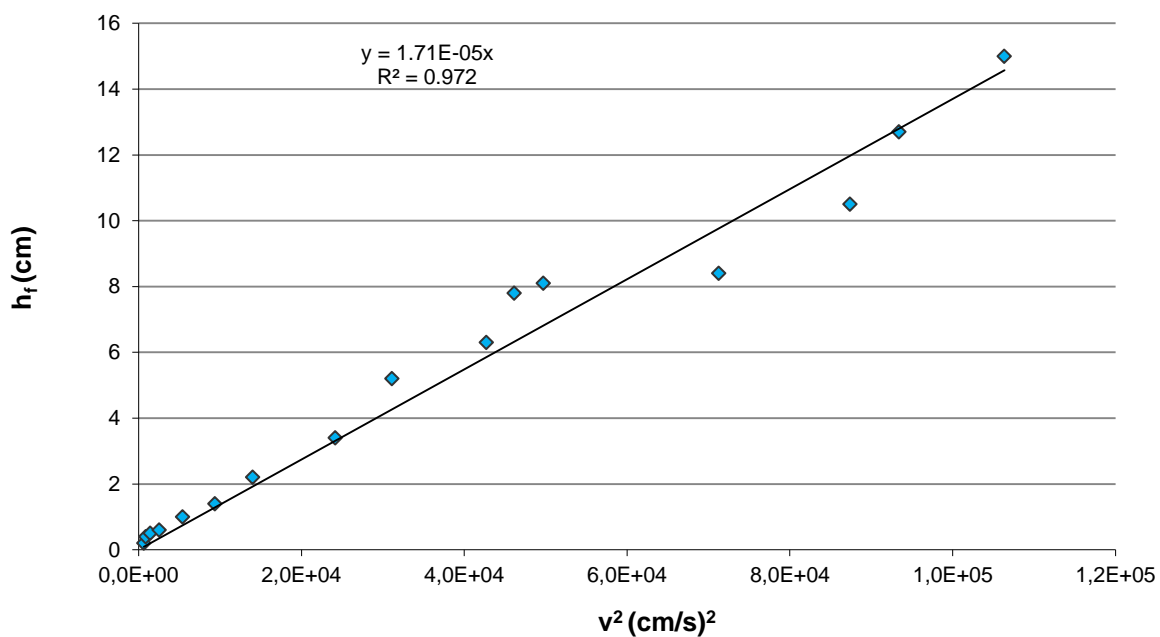


Figura AIV.34. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola totalmente abierta

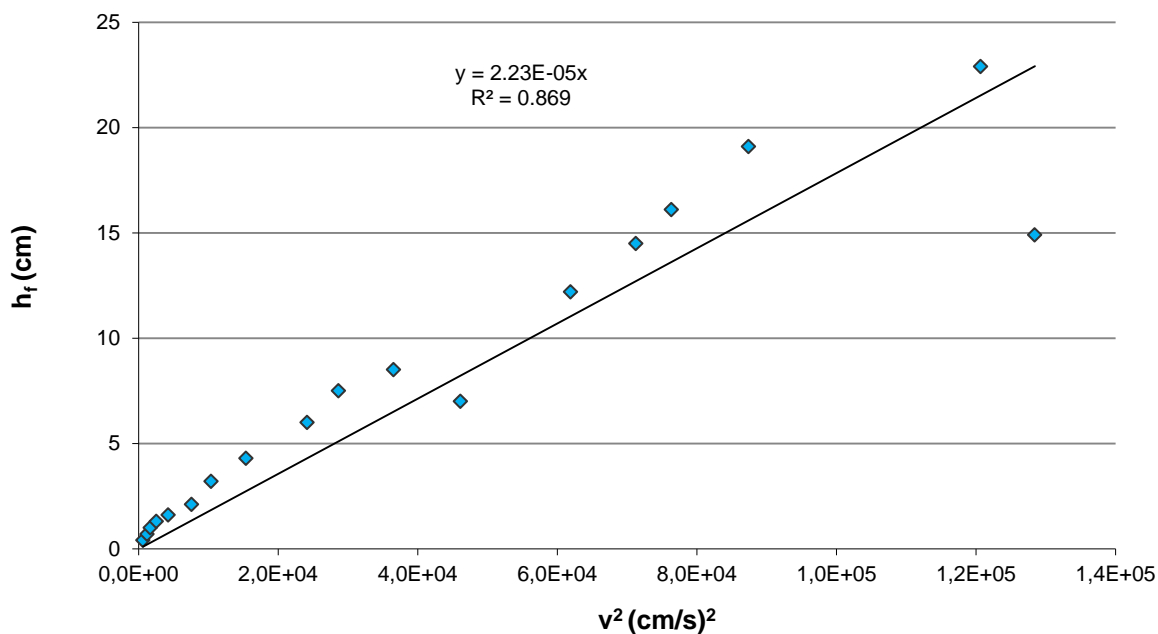


Figura AIV.35. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola cerrada $\frac{1}{4}$ vuelta

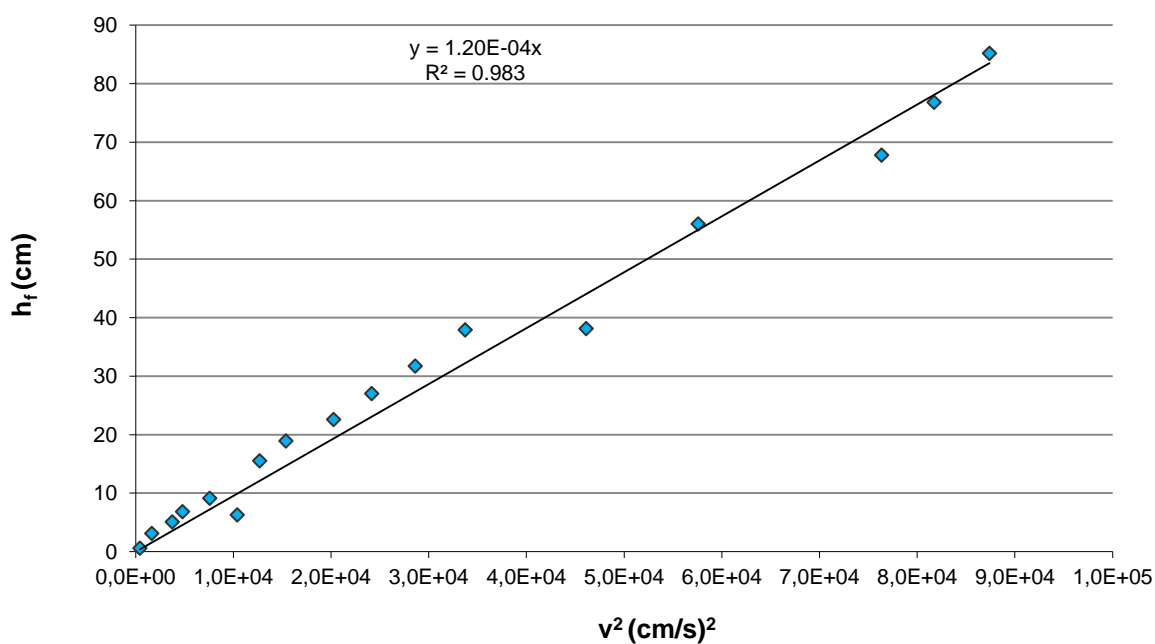


Figura AIV.36. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de de bola cerrada $\frac{1}{2}$ vuelta

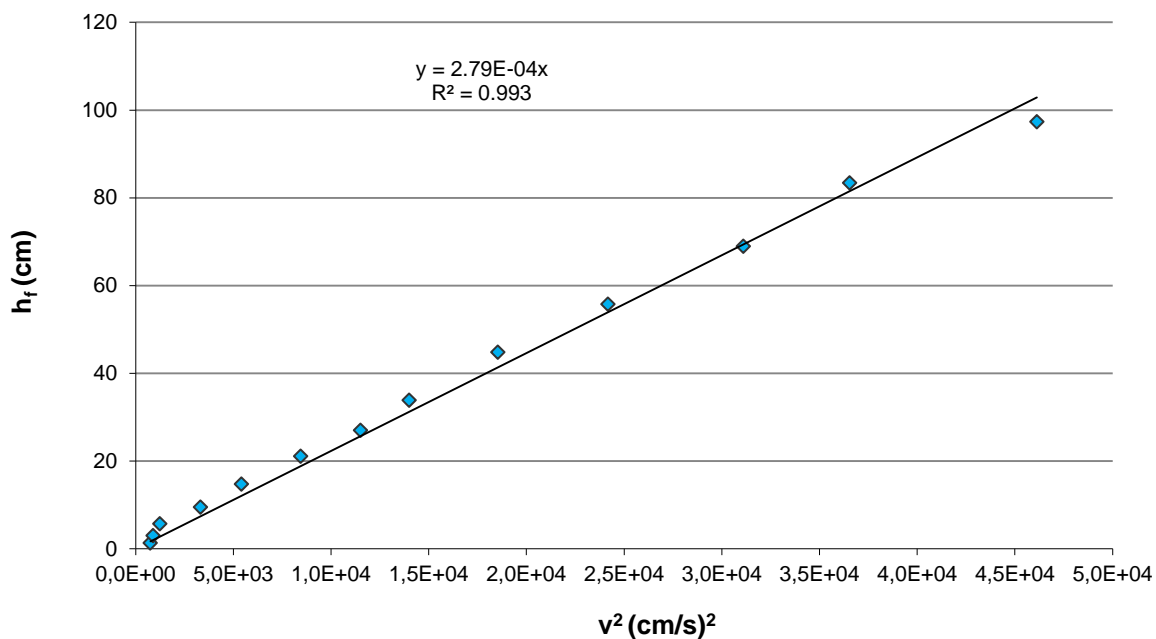


Figura AIV.37. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para válvula de bola cerrada $\frac{3}{4}$ vuelta

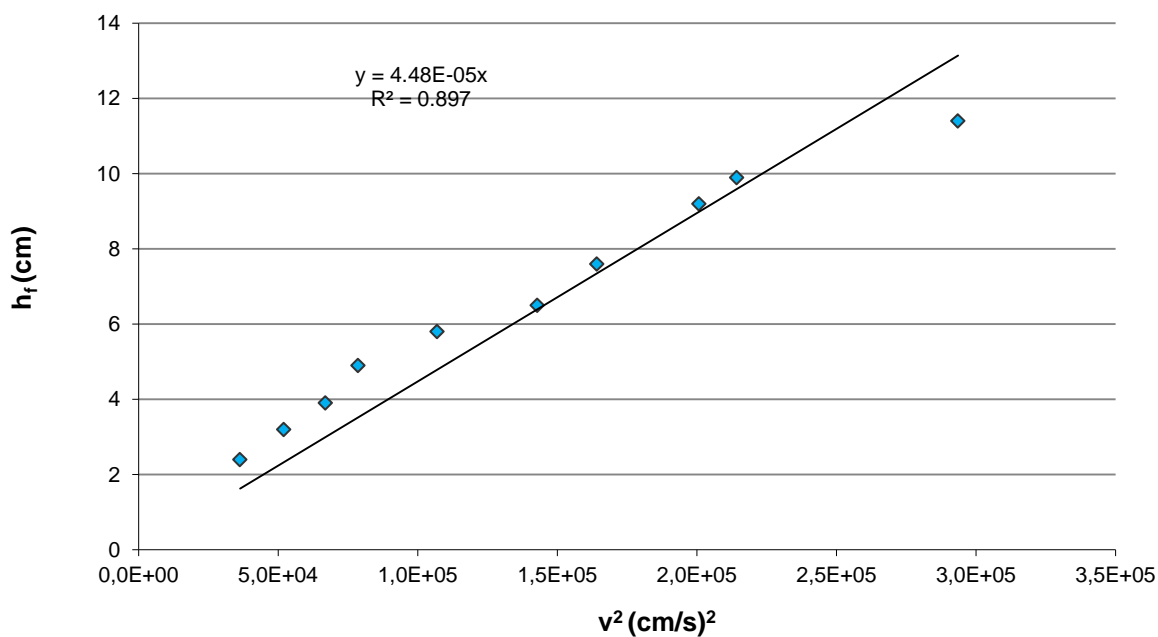


Figura AIV.38. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 4 cm

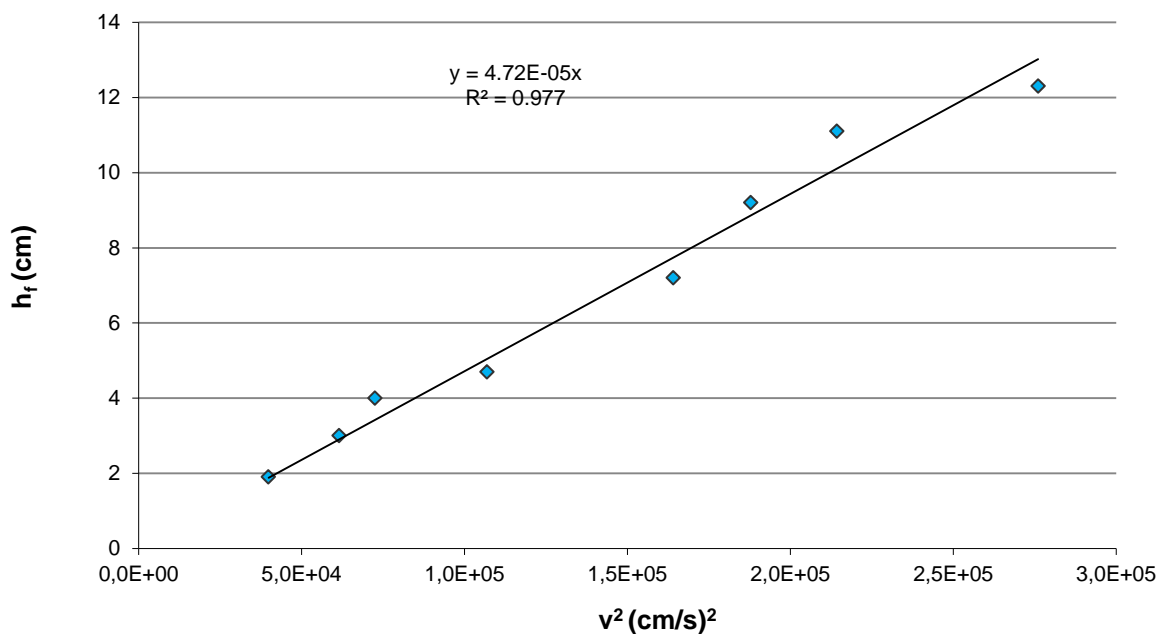


Figura AIV.39. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para expansión súbita separada 14,5 cm

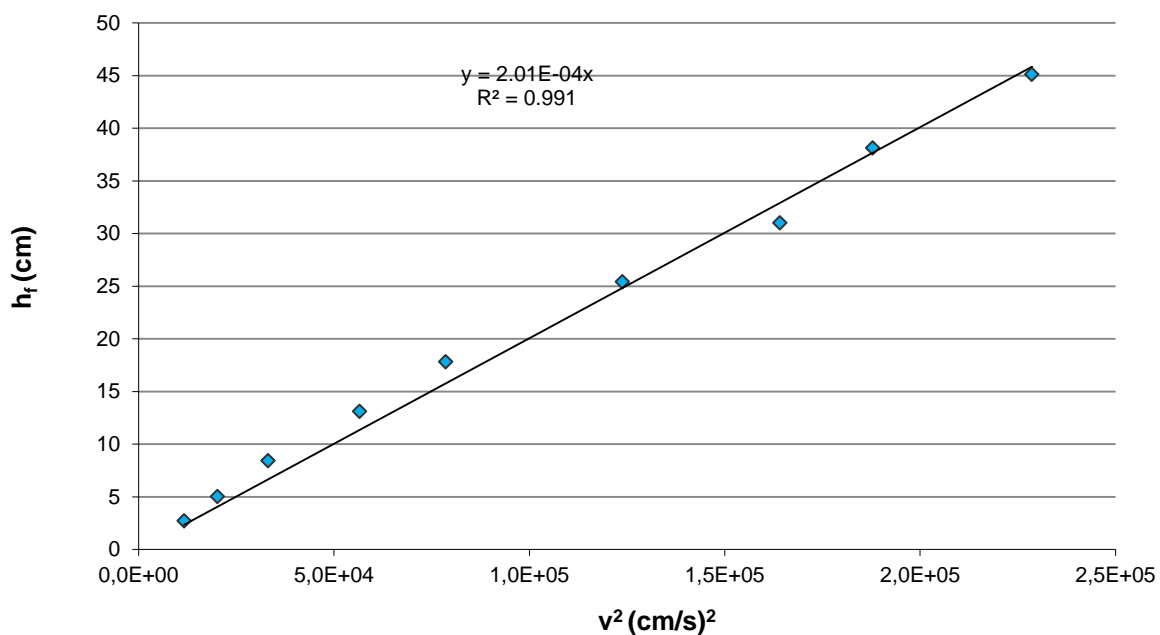


Figura AIV.40. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 4 cm

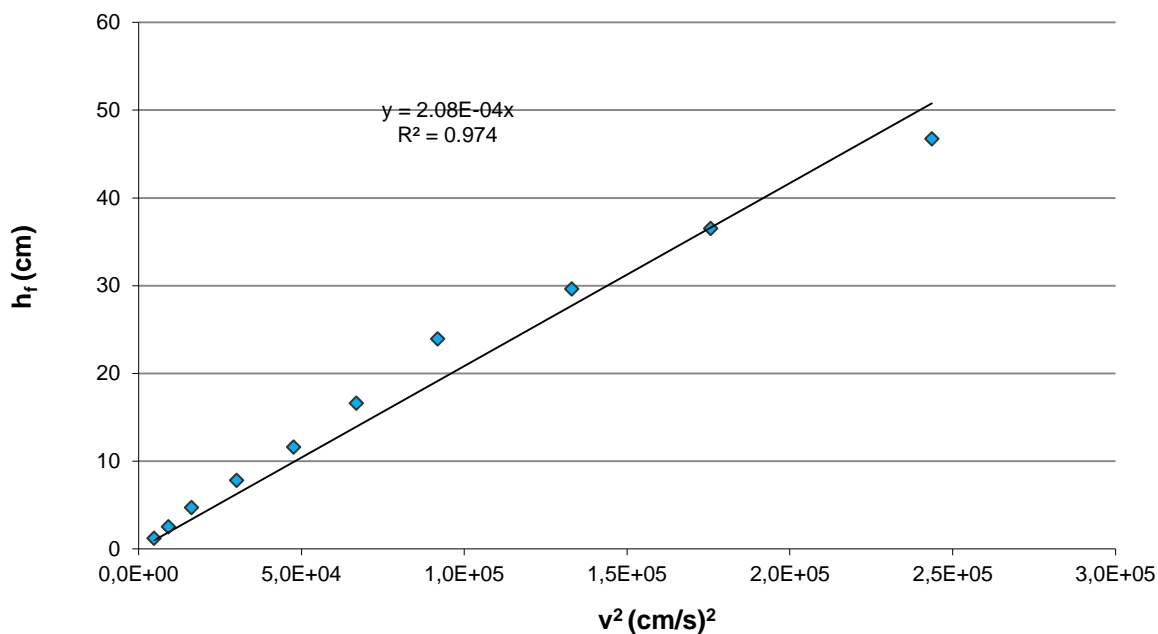


Figura AIV.41. Pérdidas de carga vs cuadrado de la velocidad del fluido para contracción súbita separada 14,5 cm

Tabla AIV.3. Longitudes equivalentes para cada accesorio

ACCESORIO	Le (cm)	ACCESORIO	Le (cm)
Codo 90 ° superior	119,10	Válvula de compuerta 3 vueltas cerrada	222,53
Codo 90 ° inferior	110,18	Válvula de compuerta 4 vueltas cerrada	629,66
Codo 45 °	46,60	Válvula de compuerta 5 vueltas cerrada	2 265,72
Válvula de globo Abierta totalmente	761,41	Válvula de bola Abierta totalmente	37,63
Válvula de globo ½ vuelta cerrada	1 090,14	Válvula de bola ¼ vuelta cerrada	60,28
Válvula de globo 1 vuelta cerrada	1 068,33	Válvula de bola ½ vuelta cerrada	225,37
Válvula de globo 1 ½ vueltas cerrada	1 494,89	Válvula de bola ¾ vuelta cerrada	507,96
Válvula de globo 2 vueltas cerrada	3 494,31	Expansión súbita 4cm de separación	10,54
Válvula de compuerta Totalmente abierta	24,85	Expansión súbita 14,5 cm de separación	9,69
Válvula de compuerta 1 vuelta cerrada	31,93	Contracción súbita 4cm de separación	43,58
Válvula de compuerta 2 vueltas cerrada	98,10	Contracción súbita 14,5 cm de separación	47,32

Le: Longitud equivalente

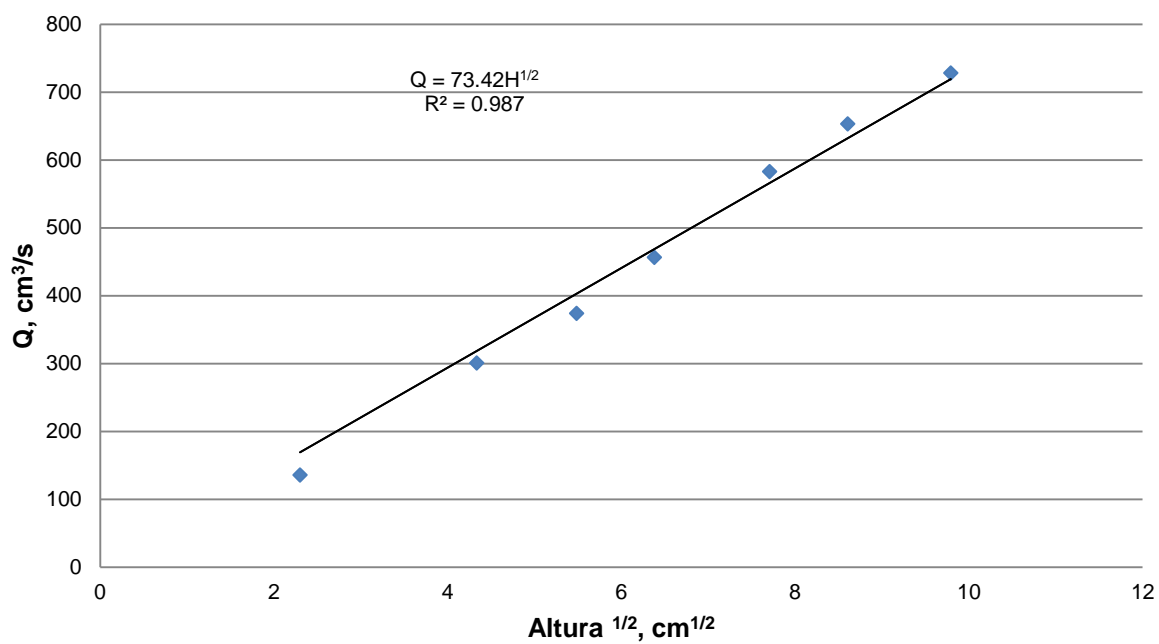


Figura AIV.42. Caudal vs. $Altura^{1/2}$ en el venturímetro para el cálculo del coeficiente de descarga

Tabla AIV.4. Coeficientes del venturímetro

K_{real} (cm ^{5/2} /s)	73,42
C_d real	0,809
C_d promedio	0,777
ERROR (%)	3,96 %

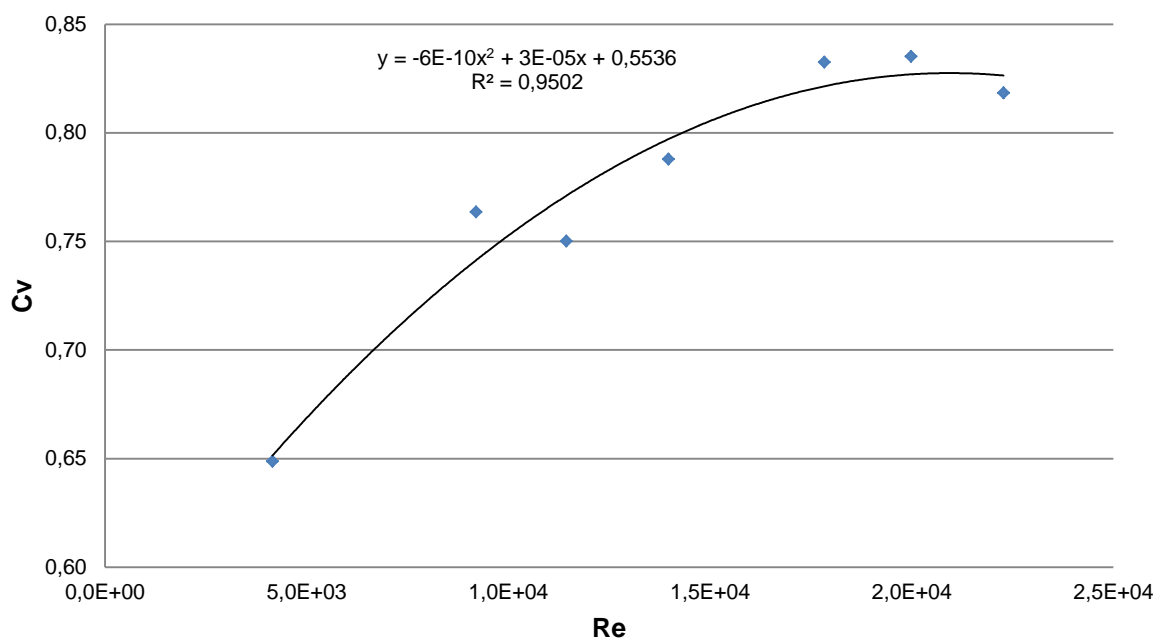


Figura AIV.43. Coeficiente de velocidade vs. Número de Reynolds para venturímetro

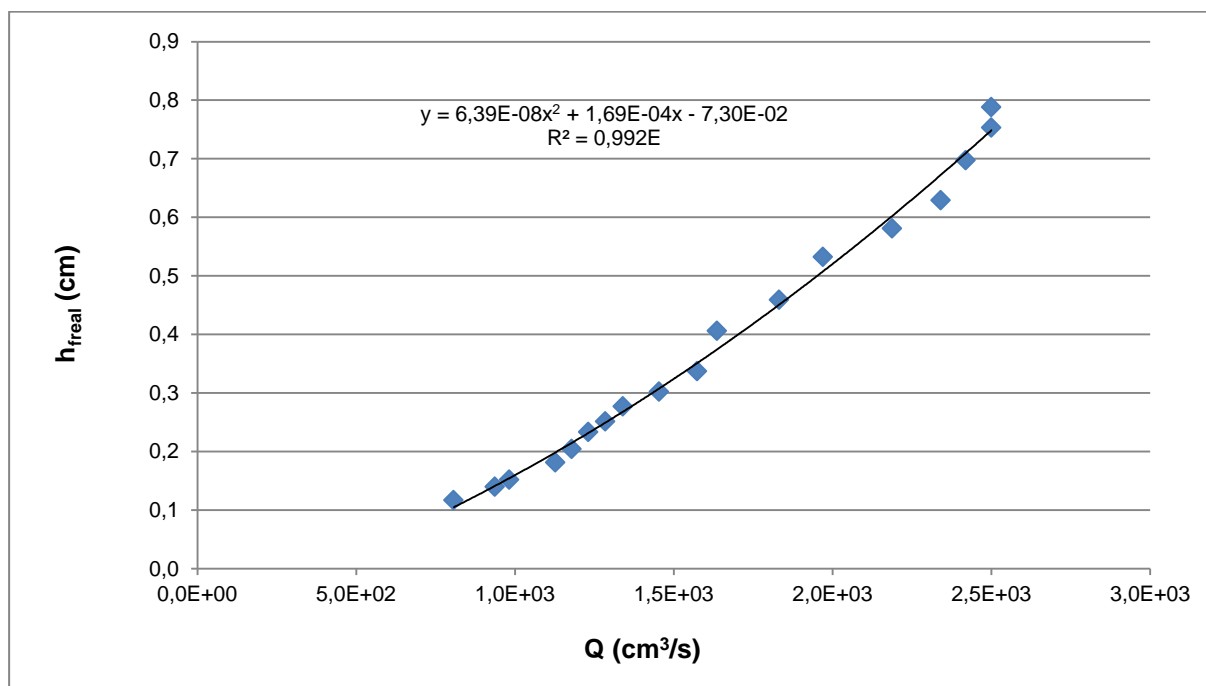


Figura AIV.44. Pérdidas de carga calculadas vs. caudal para tubérias em paralelo

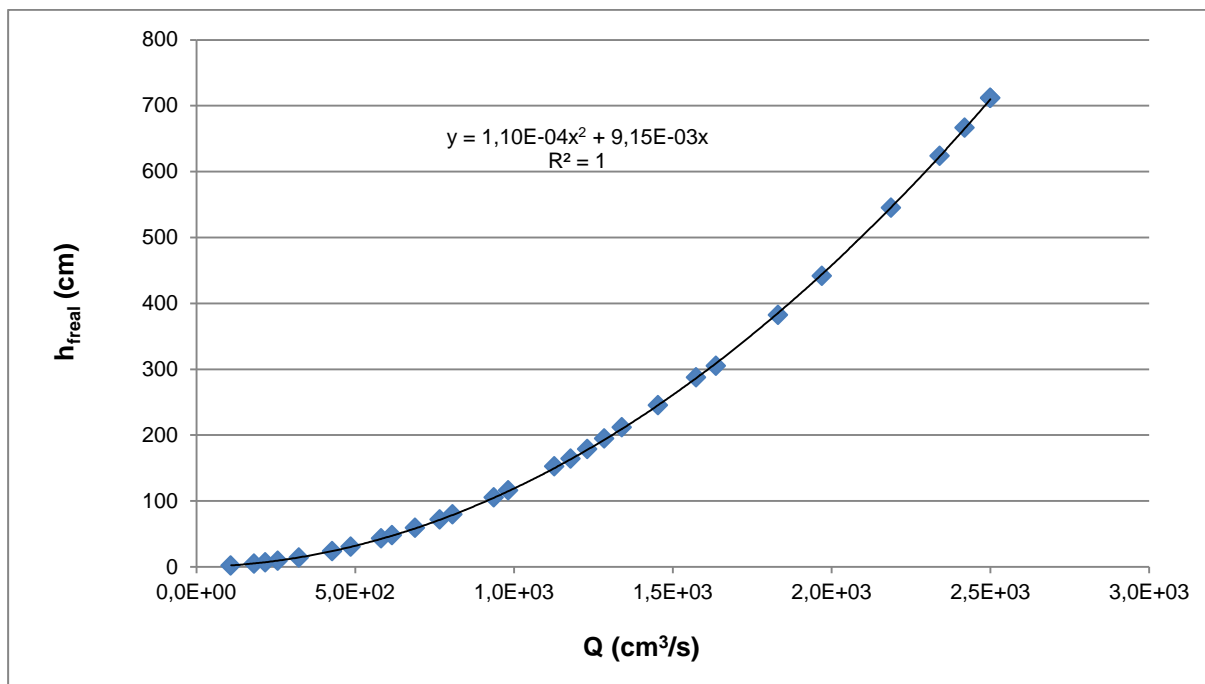


Figura AIV.45. Pérdidas de carga reales vs. caudal para tuberías en paralelo

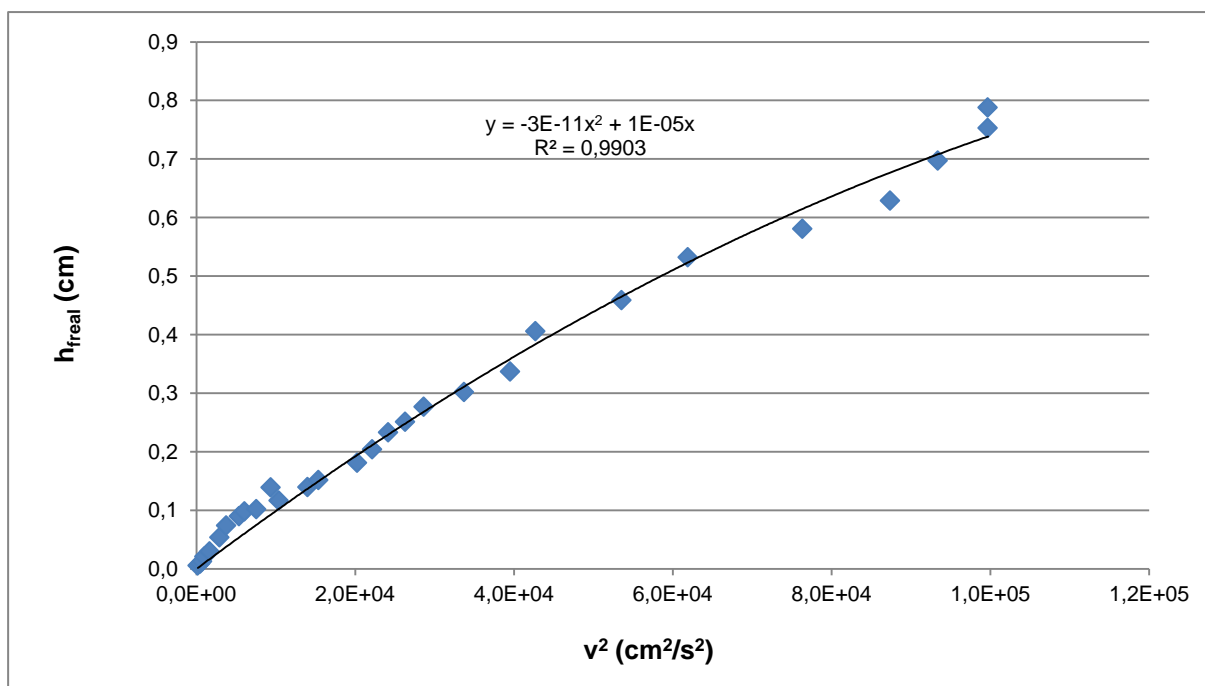


Figura AIV.46. Pérdidas de carga reales vs. cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías en paralelo

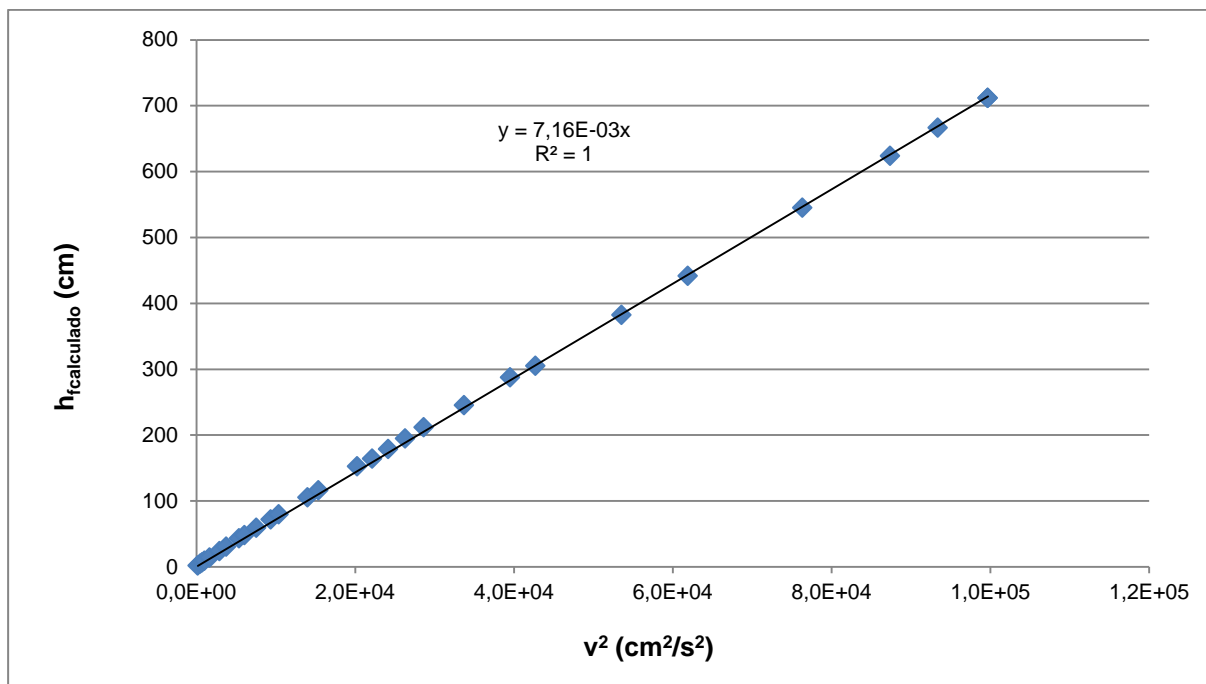


Figura AIV.47. Pérdidas de carga calculadas vs. cuadrado de la velocidad de flujo para tuberías en paralelo