

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA
MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS**

JOSÉ LUIS LARA SALCEDO

JOSÉ ANGEL VELASQUEZ PINEDA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2011

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA
MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS**

JOSÉ LUIS LARA SALCEDO

JOSÉ ANGEL VELASQUEZ PINEDA

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

DIRECTOR

FÉLIX JULIO RADA

ING. MECÁNICO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR

FACULTAD DE INGENIERIA MECÁNICA

CARTAGENA DE INDIAS

2011

Cartagena de Indias D.T. y C., 05 de Julio de 2011

Señores

COMITÉ CURRICULAR
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA
Cartagena

Estimados señores

Presentamos para su consideración el trabajo de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS”** como requisito para obtener el título de Ingeniero Mecánico.

Agradecemos de antemano la atención prestada a la presente.

Atentamente

José L. Lara Salcedo
C.C. 1.143.324.597

José A. Velásquez Pineda
C.C. 1.128.062.513

Cartagena de Indias D.T. y C., 05 de Julio de 2011

Señores

COMITÉ CURRICULAR
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERIA
Cartagena

Estimados señores

Me permito presentar para su calificación el trabajo de grado titulado “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS**” desarrollado por los estudiantes José L. Lara Salcedo y José A. Velásquez Pineda, del cual soy director.

Cordialmente.

Félix Julio Rada
Ing. Mecánico

Cartagena de Indias D.T. y C., 05 de Julio de 2011

AUTORIZACIÓN

Yo, José Angel Velásquez Pineda identificado con la cedula de ciudadanía 1.128.062.513 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para ser uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la biblioteca.

Atentamente

José A. Velásquez Pineda
C.C. 1.128.062.513

Cartagena de Indias D.T. y C., 05 de Julio de 2011

AUTORIZACIÓN

Yo, José Luis Lara Salcedo identificado con la cedula de ciudadanía 1.143.324.597 de Cartagena, autorizo a la Universidad Tecnológica de Bolívar para ser uso de mi trabajo de grado y publicarlo en el catalogo online de la biblioteca.

Atentamente

José L. Lara Salcedo
C.C. 1.143.324.597

Nota de aceptación

Presidente del jurado.

Jurado.

Jurado.

Cartagena de Indias D.T. y C., 05 de Julio de 2011

Dedico este trabajo a Dios, fuente de vida y fortaleza en la que todo puedo. A mis padres, José y Angela, quienes con su incansable esfuerzo y apoyo me han dado todo lo necesario para así cumplir mis metas y mis sueños. A mis hermanos, Angélica y Daniel, ya que son las personas que complementan mi vida y con los cuales he aprendido a ser una mejor persona. Y a todos mis familiares y amigos que me apoyaron en todo momento.

JOSÉ VELASQUEZ PINEDA

Dedico este logro a Dios, creador y fuente de sabiduría. A mis padres, José Lara y Nina Salcedo, por su esfuerzo en hacer de mí una buena persona desde el día de mi nacimiento. A mi hermano Michael y mi hermana Laura, personas a las cuales quiero mucho. A mi sobrino Matthias José, en la distancia en estos momentos. Por último y no menos importantes a mi compañero de trabajo de grado, compañeros y amigos.

JOSÉ LARA SALCEDO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

- Dios todo poderoso, dador de vida y fortaleza en nuestros corazones, por llenarnos de sabiduría en los momentos necesarios y por no dejarnos desfallecer hasta alcanzar todo lo que nos proponíamos.
- Esas grandes personas luchadoras que con orgullo tenemos el placer de llamar madres, Angela y Nina, quienes a su manera particular siempre buscaban lo mejor para nuestras vidas. Ustedes son el motor que nos impulsa diariamente para llegar a ser alguien en esta vida; llenándonos de amor, cariño y comprensión cada vez que necesitábamos escuchar una voz de aliento.
- Nuestros hermanos y hermanas, por su apoyo incondicional y escucharnos en esos momentos difíciles en los que eran más que hermanos, eran nuestros amigos.
- Nuestros familiares quienes sin importar la distancia o no compartir diariamente con nosotros siempre estaban al pendiente de todo lo que hacíamos y que era importante en nuestras vidas; esas personas que con su apoyo y cariño incondicional están siempre en nuestros pensamientos y corazones, así como nosotros en sus oraciones.
- Nuestro amigo y director de trabajo de grado, Ing. Félix Julio Rada, por su orientación en esta parte fundamental de nuestra formación profesional y por hacernos explotar nuestro potencial en cada actividad que realizábamos.

- Esas personas que silenciosamente nos apoyaron durante nuestra vida universitaria, con quienes pasamos buenos y dificultosos momentos, de los cuales supimos salir adelante.
- Aquellas personas que nos brindaron su colaboración para poder realizar este trabajo, Wilman Anaya, Devis Anaya, Ledis Aguilar y todas aquellas personas que trabajan diariamente en PVCenter.

JUSTIFICACIÓN

El campo laboral ha exigido y exige hoy en día ingenieros y profesionales mucho más prácticos que investigadores, consciente de los elementos con los cuales se desempeña y labora, su funcionamiento, características y parámetros de operación. Con el diseño y la construcción de un banco de pruebas para la medición de caudal y caída de presión en tuberías paralelas, los estudiantes de la universidad tecnológica de bolívar tendrán una experiencia muy cercana a como se desarrolla el transporte de fluidos en el campo industrial, además de evaluar, conocer e interactuar con equipos que se ven en la industria, como lo son las bombas, válvulas y demás. Las pruebas a realizar en el banco incluyen medición de caudal, caída de presión por tipo de material, análisis de perdidas por distintos accesorios en las tuberías paralelas y distinto tipo de material.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	20
1. TUBERÍAS.....	21
1.1. Sin costura (sin soldadura)	21
1.2. Con costura longitudinal.....	21
2. MATERIALES Y USO DADO A LAS TUBERIAS.....	22
3. CONCEPTOS	23
3.1. NÚMERO DE REYNOLDS	23
3.2. FACTOR DE FRICCIÓN	24
3.3. DIAGRAMA DE MOODY	25
3.4. PERDIDAS MENORES.....	26
3.5. EXPANSIÓN BRUSCA.....	27
3.6. CONTRACCIÓN BRUSCA	28
4. ACCESORIOS EMPLEADOS EN TUBERIAS	30
4.1. BRIDAS.....	30
4.1.1. Tipos de bridas y características	30
Entre las más importantes podemos encontrar las Bidas en PVC, la brida con cuello para soldar, la brida roscada, entre otras.....	30
4.1.1.1. Brida en PVC	30
4.1.1.2. Brida con cuello para soldar	31
4.1.1.3. Brida roscada.....	31
4.2. CODOS.....	31
4.3. REDUCCIÓN	32
4.4. VÁLVULA.....	32
4.4.1.1. Válvula de Bola.....	33
4.5. EMPAQUETADURAS	34
5. SISTEMAS DE TUBERÍAS.....	35
5.1. EN SERIE.....	35

5.2.	EN PARALELO.....	36
5.3.	RAMIFICADAS	37
6.	EQUIPOS DE MEDICIÓN.....	38
6.1.	Caudal o flujo.....	38
6.1.1.	Medidor de turbina	38
6.1.1.1.	Sensor de flujo de paletas 2536 rotor-x.....	39
6.1.1.2.	Transmisor de flujo con indicador de rata y totalizador.....	40
6.2.	Presión en un fluido	41
6.2.1.	Manómetros	42
6.2.1.1.	Manómetros de tubo de Bourdon	42
7.	DISEÑO DEL DIÁMETRO DE ENTRADA Y DE SALIDA.....	43
8.	CÁLCULOS TEÓRICOS DE CAUDAL	44
8.1.	BANCO DE PRUEBA NO. 1.....	46
8.2.	BANCO DE PRUEBA No. 2.....	64
9.	RESULTADOS	74
9.1	RESULTADOS TEÓRICOS.....	74
9.1.1.	Resultados Teóricos Banco De Pruebas No.1.....	75
9.1.2.	Resultados Teóricos Banco De Pruebas No. 2.....	76
9.2	RESULTADOS EXPERIMENTALES.	76
9.2.1	Resultados De Ensayos Experimentales Banco De Pruebas No. 1.	76
9.2.2.	Resultados De Ensayos Experimentales Banco De Pruebas No.2.	78
9.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	79
9.3.1.	Banco De Pruebas Núm. 1.....	79
9.3.2.	Margen De Error De Resultados Del Caudal Teórico Vs. Caudal Real.	81
	GUIA DE LABORATORIO DE MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS	83
	CONCLUSIONES.....	89
	BIBLIOGRAFIA.....	91

LISTADO DE GRAFICAS

Grafica 1: Diagrama de Moody	26
Grafica 2: Caudal vs Diámetro (teórico).	75
Grafica 3: Caudal vs. Diámetro (real).	77
Grafica 4: Presión vs. Diámetro (real).....	80

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Coeficiente de Pérdida para expansiones.....	28
Figura 2: (a) Bridas fijas, (b) Bridas de dos piezas.....	31
Figura 3: Reducción.....	32
Figura 4: Válvula de bola.	33
Figura 5: Válvula de bola con doble unión americana.	34
Figura 6: Empaquetaduras.	34
Figura 7: Tuberías en serie.	35
Figura 8: Tuberías en paralelo.....	36
Figura 9: Tuberías ramificadas.....	37
Figura 10: Medidor de Turbina.....	39
Figura 11: Sensor de flujo de paletas 2536.....	40
Figura 12: Transmisor de flujo.	40
Figura 13: Manómetros de tubo de Bourdon.....	42
Figura 14: Banco de Prueba No. 1.....	46
Figura 15: Contracción Brusca.....	52
Figura 16: Banco de Prueba No. 2.....	64

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Coeficiente de Contracción C_c	29
Tabla 2: Codos estándares.....	32
Tabla 3: Equipos de medición de flujo.	38
Tabla 5: Resultados teóricos banco de pruebas No.1.....	75
Tabla 6: Resultados teóricos banco de pruebas No.2.....	76
Tabla 7: Caudales Reales Banco de Prueba No. 1.	76
Tabla 8: Presiones Reales Banco de Pruebas No.1.	77
Tabla 9: Presiones Experimentales Por Tramos Del Banco De Pruebas No.1.....	78
Tabla 10: Presiones Experimentales Banco De Pruebas No.2.....	78
Tabla 11: Análisis De Caudal Banco De Pruebas No.1.	79
Tabla 12: Análisis De Presión Banco De Pruebas No.1.	80
Tabla 13: Margen de Error de Caudales Banco de Prueba No. 1.....	82
Tabla 14: Margen de Error de Caudales Hallados Por El Método de Streeter.....	120
Tabla 15: Diferencia de Caudal Entre Materiales.....	138

ANEXOS

ANEXO 1. METODO STREETER PARA CALCULOS DE CAUDALES	93
ANEXO 2. DIFERENCIA DE CAUDAL ENTRE MATERIALES	138

INTRODUCCIÓN

La importancia de la exactitud en la medición de caudal de fluidos puede valorarse debido a que las mediciones son de vital importancia para industrias, como la del petróleo, eléctrica (generación), petroquímica, etc. Mediciones incorrectas pueden afectar sin duda la equidad de la transacción de alguna de las partes interesadas. Para llevar a cabo mediciones adecuadas es necesario conocer las propiedades físicas del fluido y el entendimiento de los factores que influyen en ellas.¹

La medición del flujo se utiliza en la industria debido a cuatro razones principales, las cuales son: el conteo, la evaluación del funcionamiento, la investigación y el control de los procesos. Siempre que se esté transfiriendo la custodia de un fluido, existe la necesidad de realizar un conteo de las cantidades involucradas.

Muchos dispositivos se encuentran disponibles para la medición de flujos, algunos de ellos proporcionan mediciones primarias directas, mientras que otras requieren calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga a la salida del dispositivo. La indicación puede ser una presión, un nivel del líquido, un contador mecánico, etc.²

En la vida cotidiana encontramos que la manera más utilizada y efectiva de transportar fluidos es a través de tuberías, siendo utilizadas en distintas aplicaciones.

¹[Artículo de internet], disponible en <http://midelab.com.mx/index.php/component/simplecalendar/?controller=simplecalendar&view=detail&id=2> [Consulta: 18 de julio de 2011]

² [Artículo de internet], disponible en http://www.geocities.ws/ing_industrial/medidore.html [Consulta: 18 de julio de 2011]

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✚ Diseñar y construir un banco de pruebas para la medición de caudal y caída de presión en redes de tuberías paralelas con el fin de que el estudiante tenga una mejor y más completa formación durante sus estudios universitarios.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Diseñar un banco de pruebas para el desarrollo de actividades correspondientes al transporte de fluidos.
- ✚ Analizar el comportamiento de fluidos a través de redes de tuberías paralelas con diferentes materiales, además del análisis de pérdidas en distintos tipos de accesorios.
- ✚ Elaborar un manual de operación para el banco de pruebas.
- ✚ Elaborar un artículo científico sobre el transporte de fluidos a través de tuberías paralelas.

1. TUBERÍAS

La tubería es un conducto cerrado de sección circular y diámetro interior constante que es usado para transportar agua u otros fluidos. Se suele elaborar con diversos materiales. Los materiales de fabricación dependen del fluido transportado, por ejemplo cuando el líquido se utiliza una denominación específica. Aunque es posible transportar materiales que no son un fluido, tales como el hormigón, cereales, documentos encapsulados, etcétera.

1.1. Sin costura (sin soldadura)³

Es la forma más común de fabricación y en consecuencia, la más comercial. La tubería se fabrica a partir de una pieza maciza cilíndrica la cual es calentada en un horno, previo a su extrusión. Luego se deforma con rodillos y posteriormente se realiza un agujero mediante un penetrador. La tubería sin costura es la mejor para contener la presión debido a su homogeneidad en todas sus direcciones.

1.2. Con costura longitudinal⁴

Se origina en una lámina de chapa que se dobla dándole forma a la tubería y cerrándola mediante una soldadura que une los extremos de la chapa doblada. Esta soldadura será la parte más débil de la tubería y marcará la tensión máxima admisible.

³ [Artículo de internet], disponible en <http://www.construmatica.com/construpedia/Tuber%C3%ADa> [Consulta: 18 de julio de 2011]

⁴ [Artículo de internet], disponible en <http://www.construmatica.com/construpedia/Tuber%C3%ADa> [Consulta: 18 de julio de 2011]

2. MATERIALES Y USO DADO A LAS TUBERIAS

Las tuberías se construyen en diversos materiales en función de consideraciones técnicas y económicas, y que pueden presentar varias clases de uso como el doméstico y el industrial, entre otros.

Los sistemas de tuberías pueden presentar varias clases de uso como el doméstico y el industrial, entre otros.

Con respecto al uso doméstico y de desagües, actualmente los materiales más comunes con los que se fabrican tubos para la conducción de agua, por la buena conducción que se presenta y por su economía son: cobre, PVC, acero, hierro fundido, entre otros. Además soportan altas presiones.

En la práctica universitaria encontramos bancos de pruebas usualmente fabricados en PVC, acero y hierro galvanizado. En este trabajo de grado se emplean para la fabricación de los bancos de prueba PVC y hierro galvanizado, siendo los más comunes en la vida cotidiana, para analizar su comportamiento cuando se emplean simultáneamente.

3. CONCEPTOS

3.1. NÚMERO DE REYNOLDS

La naturaleza de flujo, es decir, el que sea laminar o turbulento, y su posición relativa en una escala que indica la importancia relativa de la tendencia a que sea laminar o turbulento se expresa por el *número de Reynolds*⁵. El número de Reynolds es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883.

El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad, velocidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional. Reynolds eligió para formar su número la velocidad media V como velocidad característica y el diámetro del tubo D como longitud característica, de tal manera que⁶:

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu}$$

O equivalentemente por:

$$R_e = \frac{V D}{\nu}$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

V : velocidad del fluido

D : diámetro de la tubería

⁵ Número de Reynolds [artículo de internet], disponible en <http://www.reocities.com/lbosq/control/reynolds.htm> [Consulta: 18 de Julio de 2011]

⁶ Número de Reynolds [artículo de internet], disponible en <http://www.reocities.com/lbosq/control/reynolds.htm> [Consulta: 22 de abril de 2011]

μ : viscosidad dinámica del fluido

ν : Viscosidad cinemática del fluido

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

Además el número de Reynolds permite predecir el carácter turbulento o laminar en ciertos casos.

Para estudios técnicos, el régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2000 y turbulento si el número de Reynolds es superior a 4000. Entre estos dos valores está la zona denominada “crítica” donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibilidad de variación.⁷

3.2. FACTOR DE FRICCIÓN⁸

El factor de fricción (f) o coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach es un parámetro adimensional que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería debida a la fricción y el cual debe ser determinado experimentalmente.

El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($R_e < 2000$) es función sólo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ($R_e > 4000$) es también función del tipo de pared de la tubería.

⁷ CRANE. Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.

⁸ CRANE. Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.

Una vez conocido el coeficiente de fricción se puede calcular la pérdida de carga en una tubería debida a la fricción mediante la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f * \frac{l}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

3.3. DIAGRAMA DE MOODY⁹

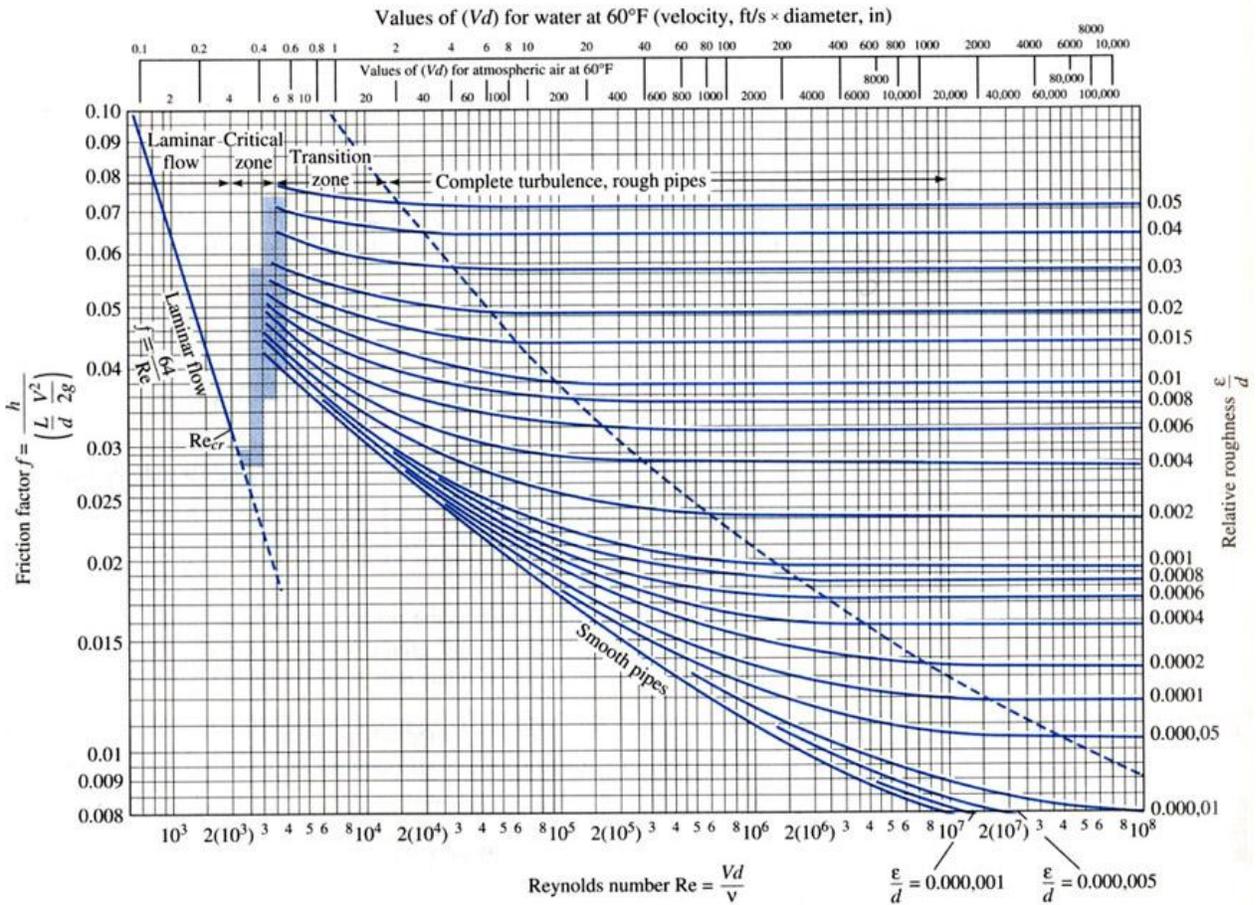
El diagrama de Moody permite determinar el valor del factor de fricción f a partir de Re y K/D de forma directa. Es una representación log - log del factor de fricción f frente al Re , tomando como parámetro K/D . Se distinguen cinco zonas, correspondientes a los distintos regímenes hidráulicos, correspondiendo al coeficiente de fricción f valores diferentes en cada caso. Se puede aplicar a cualquier líquido y a cualquier tipo de flujo.

En el caso de que no se puede calcular Re por desconocer la velocidad (V), en abscisas en la parte superior del diagrama aparece el valor:

$$Re * \sqrt{f} = \frac{D}{V} * \sqrt{\frac{2gDh}{l}}$$

(Expresión obtenida mediante un simple artilugio en la Darcy-Weisbach).

⁹ Universidad de Sevilla. Diagrama de Moody [artículo de internet], disponible en http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_10.htm [Consulta: 22 de abril de 2011]



Grafica 1: Diagrama de Moody.¹⁰

3.4. PERDIDAS MENORES¹¹

Cuando en las redes de tuberías existen elementos como codos, acoples, medidores, válvulas, etc. Es necesario tomarlos en cuenta dentro de nuestro sistema en estudio, ya que, estos elementos agregan pérdidas a nuestro sistema, además de las pérdidas que tenemos por fricción entre la película de fluido

¹⁰Disponible en <http://raulsmtz.wordpress.com/2011/03/30/diagrama-de-moody/> [Consulta: 22 de abril de 2011]

¹¹Jorge De La Cruz. Perdidas Menores [artículo de internet], disponible en <http://jorgeenrique26.blogspot.com/2009/06/perdidas-menores-en-tuberias.html> [Consulta: 22 de abril de 2011]

próxima a las paredes de la tubería y la tubería misma. En la mayoría de las veces se evalúa experimentalmente las pérdidas que dichos accesorios generan, caracterizándolos por una constante "K" la cual va a representar una fracción de la presión de velocidad que se pierde en el accesorio.

$$h_e = K \frac{V_1^2}{2g}$$

La constante K por lo general es especificada por el fabricante del accesorio en base a los resultados experimentales realizados en sus laboratorios, los resultados son presentados en catálogos. Es importante mencionar que no se hace distinción entre flujo laminar y flujo turbulento para obtener el valor de la constante "K", esta constante es solo función del diámetro del accesorio y obviamente del tipo de accesorio que sea (en el caso de válvulas, también es función del grado de apertura de la misma). Mientras que la velocidad a utilizar para calcular la pérdida por el artefacto, puede estipularse en el manual como la velocidad promedio Q/A aguas arriba o aguas abajo hacia el accesorio o desde este. En casi todos los casos, las pérdidas menores se determinan experimentalmente; sin embargo, hay una importante excepción que es la pérdida debida a la expansión brusca y a la contracción brusca de una tubería o sección de tubo.

3.5. EXPANSIÓN BRUSCA

Cuando ocurre una EXPANSIÓN BRUSCA la velocidad del fluido disminuye abruptamente ocasionando una turbulencia que genera una pérdida de energía, dicha pérdida de energía se hace menor si se hace menos abrupta la dilatación de tuberías por medio de bordes no cuadrados. Para la dilatación súbita la constante K se hace dependiente de los diámetros de las tuberías así como la magnitud de

flujo (ver Figura 1). Se puede deducir que la constante K se hallaría de la siguiente forma:

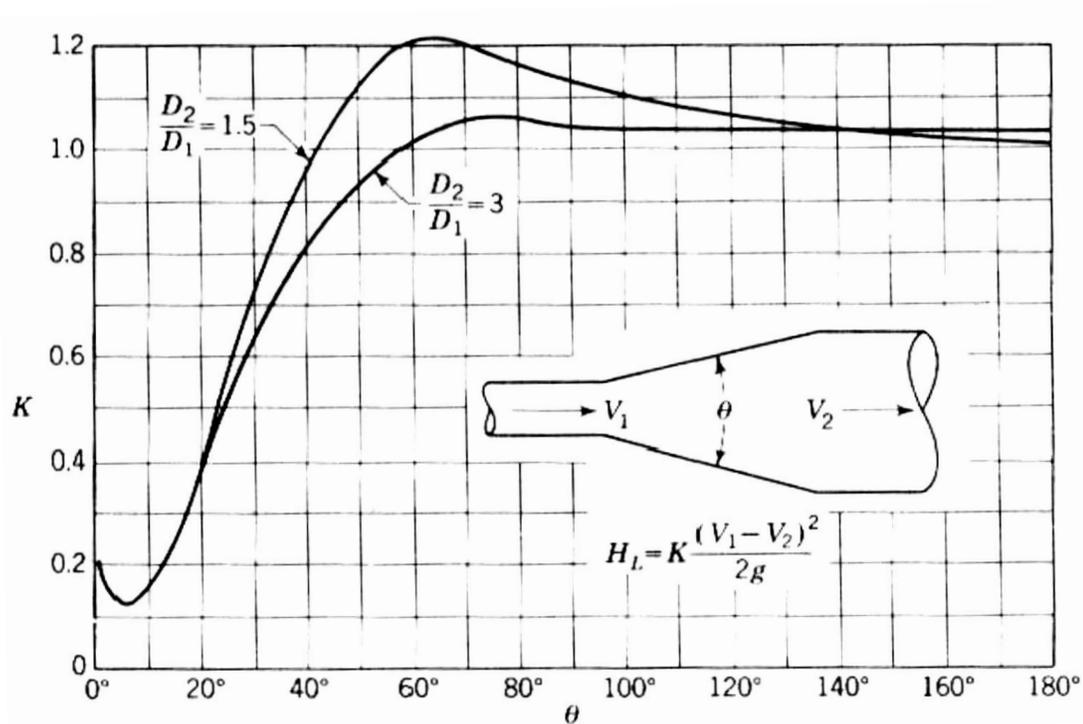


Figura 1: Coeficiente de Pérdida para expansiones.

Fuente: Víctor L. Streeter, Mecánica de los Fluidos, cuarta edición. 1977

3.6. CONTRACCIÓN BRUSCA

En la CONTRACCIÓN BRUSCA al aproximarse el fluido a la trayectoria de contracción la corriente total continua estrechándose durante cierta distancia más allá de la contracción por lo tanto, la sección de cruce mínimo de flujo es menor que la del conducto menor. La sección donde ocurre esta área del mínimo se denomina vena contracta (ver Tabla 1). Más allá de la vena contracta, la corriente de flujo debe desacelerar y dilatarse nuevamente para llenar el conducto. La

turbulencia ocasionada por la contracción y la posterior dilatación genera la pérdida de energía.

A_2/A_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
C_c	0.624	0.632	0.643	0.659	0.681	0.712	0.755	0.813	0.892	1.00

Tabla 1: Coeficiente de Contracción C_c .

Fuente: Víctor L. Streeter, Mecánica de los Fluidos, cuarta edición. 1977

4. ACCESORIOS EMPLEADOS EN TUBERIAS

Los sistemas de tuberías constan de elementos o accesorios, los cuales mejoran el transporte de fluidos. Entre los más utilizados y comunes encontramos: Bridas, Codos, Reducciones, Válvulas, Empaquetaduras, Tornillos y Niples, los cuales son explicados a continuación:

4.1. BRIDAS

Son accesorios para conectar tuberías con equipos (Bombas, calderas, intercambiadores de calor, tanques, etc.) o accesorios (codos, válvulas, etc.). La unión se hace por medio de dos bridas, en la cual una de ellas pertenece a la tubería y la otra al equipo o accesorio a ser conectado.

La ventaja de las uniones bridadas radica en el hecho de que por estar unidas por espárragos, permite el rápido montaje y desmontaje al momento de realizar reparaciones o mantenimiento.

4.1.1. Tipos de bridas y características

Entre las más importantes podemos encontrar las Bridas en PVC, la brida con cuello para soldar, la brida roscada, entre otras.

4.1.1.1. Brida en PVC

Se utilizan como uniones desmontables en tuberías hidráulicas de PVC y CPVC entre sí. Existen de una pieza (fijas) y de dos piezas (ver Figura 2).

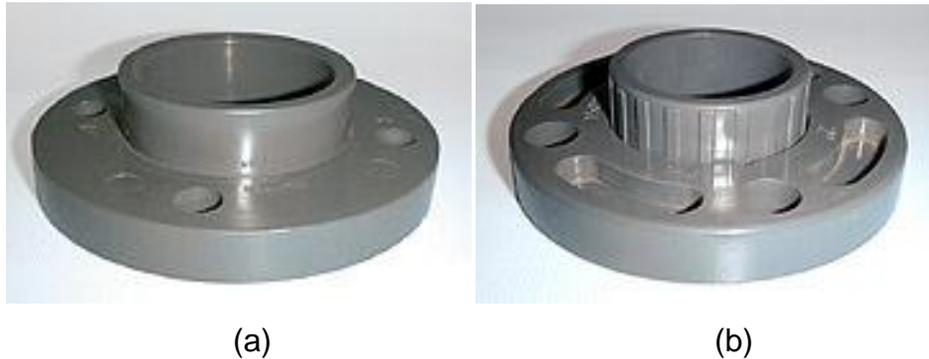


Figura 2: (a) Bridas fijas, (b) Bridas de dos piezas.¹²

4.1.1.2. Brida con cuello para soldar:

Es utilizada con el fin de minimizar el número de soldaduras en pequeñas piezas a la vez que contribuya a contrarrestar la corrosión en la junta.

4.1.1.3. Brida roscada

Pueden ser instaladas sin necesidad de soldadura y se utilizan en líneas con fluidos con temperaturas moderadas, baja presión y poca corrosión, no es adecuada para servicios que impliquen fatigas térmicas.

4.2. CODOS

Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías. Los codos estándar son aquellos que vienen listos para la pre-fabricación de piezas de tuberías y que son fundidos en una sola pieza con características específicas y son:

¹² Disponible en http://www.plastecnia.cl/conten/prod_import/prod_imp01.html [Consulta: 17 de Julio de 2011]

Codos estándar de 45°	Codos estándar de 90°	Codos estándar de 180°
		

Tabla 2: Codos estándares.

4.3. REDUCCIÓN

Son accesorios de forma cónica, fabricadas de diversos materiales y aleaciones. Se utilizan para disminuir el volumen del fluido a través de las líneas de tuberías (ver Figura 3).



Figura 3: Reducción.¹³

4.4. VÁLVULA

Es un accesorio que se utiliza para regular y controlar el fluido de una tubería. Este proceso puede ser desde cero (válvula totalmente cerrada), hasta de flujo (válvula totalmente abierta), y pasa por todas las posiciones intermedias, entre estos dos extremos.

¹³ Disponible en <http://www.laferreteriadigital.com/fd/verDetalleProducto.do?codigo=7122172&selected=>
[Consulta: 17 de Julio de 2011]

4.4.1. Tipos de válvulas

Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador. En este trabajo de grado se utilizaron algunas de las válvulas de movimiento lineal en las que el obturador se mueve en la dirección de su propio eje, como las que se muestran a continuación:

4.4.1.1. Válvula de Bola

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de bola o esfera que tiene un orificio en el centro a lo largo de un eje, que se conecta a los puertos de entrada y salida del cuerpo; La cual gira 90° (ver Figura 4).



Figura 4: Válvula de bola.¹⁴

4.4.1.2. Válvulas De Bola Con Doble Unión Americana

Esta fabricada bajo el mismo principio de una válvula de bola con la diferente en que la entrada y la salida tienen uniones americanas (ver Figura 5). Se utiliza para cortar el paso total del fluido en la tubería.

¹⁴Disponible en http://www.plastecnia.cl/conten/prod_import/prod_imp01.html [Consulta: 17 de Julio de 2011]



Figura 5: Válvula de bola con doble unión americana.¹⁵

4.5. EMPAQUETADURAS

Es un accesorio utilizado para realizar sellados en juntas mecanizadas existentes en líneas de servicio o plantas en proceso (ver Figura 6).



Figura 6: Empaquetaduras.¹⁶

¹⁵ Disponible en http://www.plastecnia.cl/conten/prod_import/prod_imp01.html [Consulta: 17 de Julio de 2011]

¹⁶ Disponible en <http://www.corporacionmarpal.com/productos.html> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

5. SISTEMAS DE TUBERÍAS

Para el transporte de fluidos a través de tuberías pueden presentarse varios sistemas, los cuales presentan características distintas y por lo tanto el comportamiento del flujo o caudal es distinto. Entre los sistemas más comunes se encuentran: en serie, paralelas y ramificadas.

5.1. EN SERIE

Un sistema de tuberías en serie está formado por un conjunto de tuberías que comparten el mismo caudal y tienen diferente sección (ver Figura 7).

Presenta las siguientes características:

- El caudal es el mismo en todas las tuberías (ecuación de continuidad)

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 = \dots = Q_n$$

- La pérdida de carga total en todo el sistema es igual a la suma de las pérdidas en cada una de las tuberías:

$$\Delta h_T = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n$$

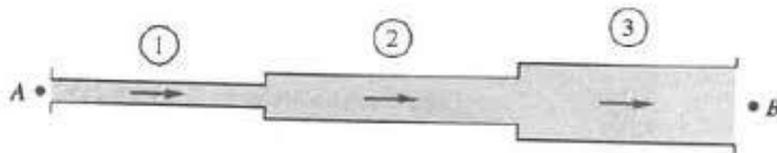


Figura 7: Tuberías en serie.¹⁷

¹⁷ Disponible en http://es.wikipedia.org/wiki/Tuber%C3%ADas_en_serie [Consulta: 17 de Julio de 2011]

5.2. EN PARALELO

Un sistema de tuberías en paralelo está formado por un conjunto de tuberías que nacen y confluyen en un mismo punto (ver Figura 8).

Presenta las siguientes características:

- El caudal total es la suma de los caudales individuales de cada una de las tuberías (ecuación de continuidad)

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

- La pérdida de carga total es igual a la pérdida de carga en cada una de las tuberías del sistema:

$$\Delta h_T = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$$

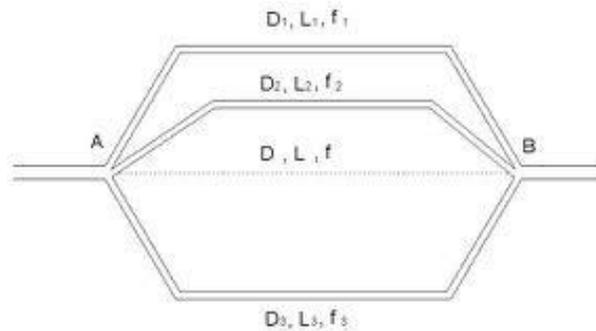


Figura 8: Tuberías en paralelo.¹⁸

¹⁸ Disponible en http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_43.htm [Consulta: 17 de Julio de 2011]

5.3. RAMIFICADAS

Un sistema de tuberías ramificadas está conformado por dos, tres o más tuberías que se ramifican en cierto punto y no vuelven a unirse aguas abajo otra vez (ver Figura 9).

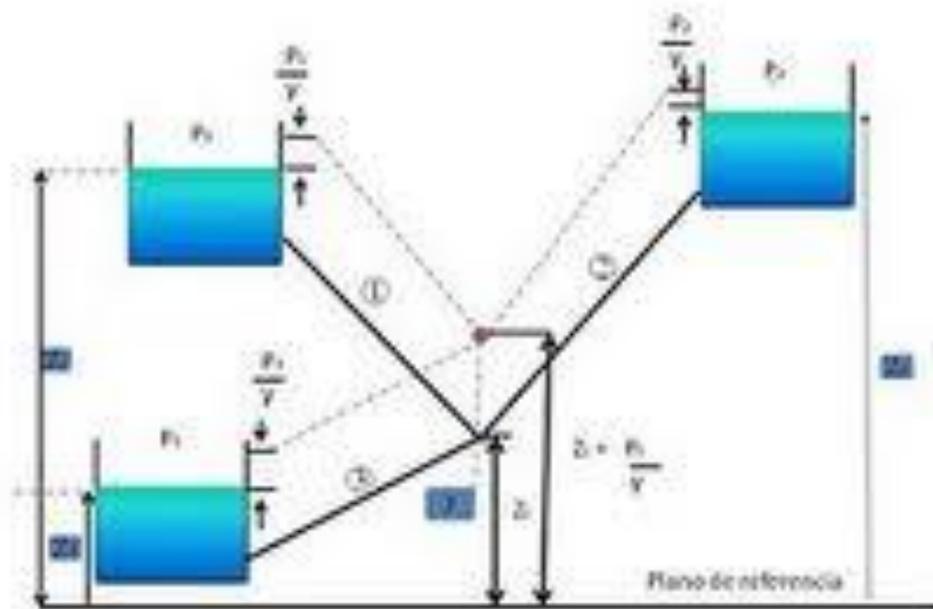


Figura 9: Tuberías ramificadas.¹⁹

¹⁹ Disponible en <http://mirabana87.blogspot.com/2009/04/tuberias-ramificadas.html> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

6. EQUIPOS DE MEDICIÓN

Los elementos y/o variables a medir y tomar en cuenta en este trabajo de grado serán la presión ya el caudal o flujo de agua que se transportara por los distintos tramos de tuberías.

6.1. Caudal o flujo

Es la cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. Menos frecuentemente, se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo. En el presente trabajo de grado se utilizo un medidor volumétrico, teniendo en cuenta la variable de la velocidad del flujo. Los cuales se dividen como se muestra a continuación:

Tipo de Medidor	Sistema	Medidor
Medidores de flujo volumétrico	Velocidad	Turbina
		Ultrasonido

Tabla 3: Equipos de medición de flujo.

6.1.1. Medidor de turbina²⁰

Es un transductor que detecta la velocidad de un flujo utilizando un tubo con una turbina de paletas suspendida axialmente en la dirección del flujo (ver Figura 10). El fluido debe ser limpio y poco abrasivo, sirve para líquidos y gases, no se utiliza para control.

²⁰ Disponible en <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc20.htm> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

La salida eléctrica es generada utilizando el principio de reluctancia, en el cual una señal es generada por el pase del rotor de la turbina en proximidad cercana a una bobina de señal. La señal es enviada a un amplificador que genera un pulso DC y lo transmite a la instrumentación externa.

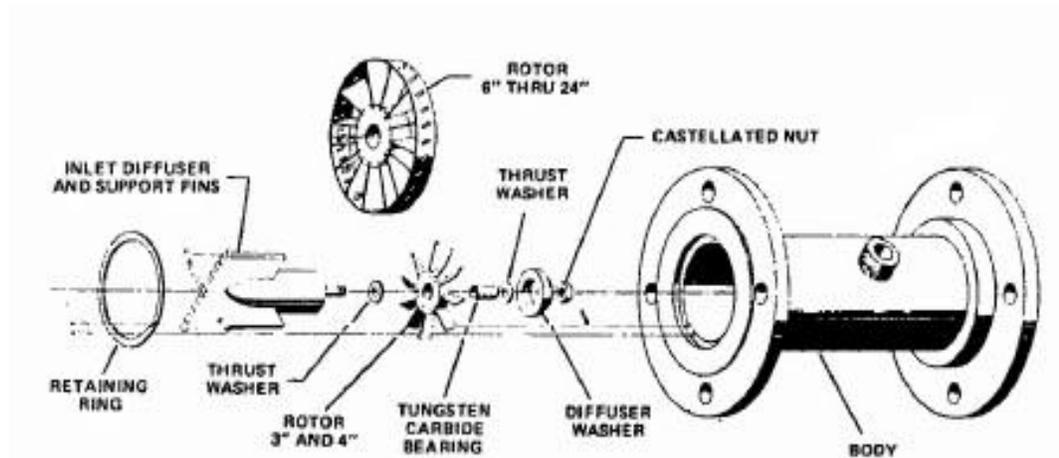


Figura 10: Medidor de Turbina.²¹

6.1.1.1. Sensor de flujo de paletas 2536 rotor-x

El modelo 2536 (ver Figura 11) tiene un colector abierto de procesos de señales con un rango de flujo dinámico amplio de 0,1 a 6 m/s (0,3 a 20 ft/s). El sensor mide las tasas de flujo del líquido en las tuberías llenas y puede ser utilizado en sistemas de baja presión.

²¹Disponible en <http://www.sapiens.itgo.com/documents/doc20.htm> [Consulta: 17 de Julio de 2011]



Figura 11: Sensor de flujo de paletas 2536.²²

6.1.1.2. Transmisor de flujo con indicador de rata y totalizador

Recibe la señal eléctrica emitida por el sensor de paletas, la transforma y muestra la tasa de flujo que pasa por la tubería, en la pantalla LCD (ver Figura 12). Cuenta con un totalizador para conocer el total de flujo que pasa por un determinado tiempo.



Figura 12: Transmisor de flujo.²³

²² Disponible en

<http://www.gfsignet.com/go/Products/Sensors+%26+Instruments/Flow/Sensors/2536+Paddlewheel>

²³ Disponible en <http://www.gfsignet.com/go/A59B7CA619993E1D341FA4FFE214CEE5/> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

6.2. Presión en un fluido

La presión en un fluido es la presión termodinámica que interviene en la ecuación constitutiva y en la ecuación de movimiento del fluido, en algunos casos especiales esta presión coincide con la presión media o incluso con la presión hidrostática.

Todas las presiones representan una medida de la energía potencial por unidad de volumen en un fluido. Para definir con mayor propiedad el concepto de presión en un fluido se distinguen habitualmente varias formas de medir la presión:

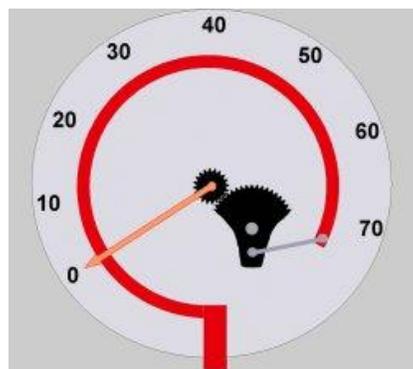
- La **presión media**, o promedio de las presiones según diferentes direcciones en un fluido, cuando el fluido está en reposo esta presión media coincide con la presión hidrostática.
- La **presión hidrostática** es la parte de la presión debida al peso de un fluido en reposo. En un fluido en reposo la única presión existente es la presión hidrostática, en un fluido en movimiento además puede aparecer una presión hidrodinámica adicional relacionada con la velocidad del fluido. Es la presión que sufren los cuerpos sumergidos en un líquido o fluido por el simple y sencillo hecho de sumergirse dentro de este. Se define por la fórmula $P_h = \gamma h$ donde P_h es la presión hidrostática, $\gamma = \rho g$ es el peso específico y h profundidad bajo la superficie del fluido.
- La **presión hidrodinámica** es la presión termodinámica dependiente de la dirección considerada alrededor de un punto que dependerá además del peso del fluido, el estado de movimiento del mismo.

6.2.1. Manómetros²⁴

Los manómetros son los instrumentos utilizados para medir la presión de fluidos (líquidos y gases). Lo común es que ellos determinen el valor de la presión relativa, aunque pueden construirse también para medir presiones absolutas.

6.2.1.1. Manómetros de tubo de Bourdon²⁵

Estos manómetros tienen un tubo metálico elástico, aplanado y curvado de forma especial conocido como tubo de Bourdon, tal y como se muestra en la figura 13 (a), en rojo. Este tubo tiende a enderezarse cuando en su interior actúa una presión, por lo que el extremo libre del tubo de Bourdon se desplaza y este desplazamiento mueve un juego de palancas y engranajes que lo transforman en el movimiento amplificado de una aguja que indica directamente la presión en la escala (ver Figura 13 b).



(a)



(b)

Figura 13: Manómetros de tubo de Bourdon.

²⁴ Manómetros [Artículo de Internet], disponible en <http://www.sabelotodo.org/aparatos/manometros.html> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

²⁵ Manómetros [Artículo de Internet], disponible en <http://www.sabelotodo.org/aparatos/manometros.html> [Consulta: 17 de Julio de 2011]

7. DISEÑO DEL DIÁMETRO DE ENTRADA Y DE SALIDA

A continuación se realiza el diseño del diámetro de entrada y de salida de los bancos de pruebas, basado en las características de la bomba sumergida de la base de prueba GUNT que se encuentra en las instalaciones del laboratorio de fluidos de la Universidad Tecnológica de Bolívar. De igual manera teniendo en cuenta las medidas de la base de pruebas GUNT se determinan las longitudes que tendrán las tuberías de nuestros bancos de pruebas, con tal que se puedan utilizar sin ningún problema.

Teniendo el caudal total la velocidad promedio con la cual fluirá el líquido podemos diseñar el diámetro de la tubería.

$$Q = V * A \rightarrow A = \frac{Q}{V}.$$

Donde:

$$Q = 230l/min \cong 8ft^3/min. \text{ (Caudal arrojado por la bomba GUNT)}$$

$V = 7ft/seg$. De acuerdo a tablas para calculos hidraulicos, en un rango de 0 – 250 *gpm*.

Hallamos el área y luego el diámetro:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{8 \frac{ft^3}{min} * \frac{1min}{60seg}}{7ft/seg} = 0,019ft^2.$$

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \rightarrow D^2 = \frac{4A}{\pi} \rightarrow D = \sqrt{\frac{4 * 0,019}{\pi}} = 0,1557ft * \frac{12in}{1ft}$$

$$D = 1,87in \cong 2in$$

8. CÁLCULOS TEÓRICOS DE CAUDAL

En este capítulo se desarrollaran los cálculos teóricos de los dos bancos de pruebas construidos, con el fin de conocer cuánto caudal está pasando por cada tramo de tubería. Teniendo en cuenta el diámetro de entrada encontrado en el capítulo anterior y el caudal que arroja la bomba del banco de pruebas GUNT se desarrollan los cálculos de la velocidad del flujo en la entrada y la salida y del caudal supuesto que pasa por el tramo 1 de cada banco de prueba correspondiente.

Para el estudio de los bancos de pruebas se realiza el siguiente procedimiento²⁶:

1. Se supone una descarga Q'_1 para la tubería 1.
2. Se calcula h'_{f1} considerando el supuesto anterior.
3. Se calcula Q'_2, Q'_3, Q'_4, Q'_5 y Q'_6 , usando h'_{f1} .
4. Para estas 6 descargas con pérdida de carga común, supóngase que el Q dado se distribuye en las tuberías igual que $Q'_1, Q'_2, Q'_3, Q'_4, Q'_5$ y Q'_6 ; por lo tanto

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\sum Q'} Q \quad Q_2 = \frac{Q'_2}{\sum Q'} Q \quad Q_3 = \frac{Q'_3}{\sum Q'} Q \quad Q_4 = \frac{Q'_4}{\sum Q'} Q \quad Q_5 = \frac{Q'_5}{\sum Q'} Q \quad Q_6 = \frac{Q'_6}{\sum Q'} Q$$

5. Se debe comprobar la validez de estas descargas mediante los cálculos de $h_{f1}, h_{f2}, h_{f3}, h_{f4}, h_{f5}$ y h_{f6} para los Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5 y Q_6 calculados en el paso anterior.

Este procedimiento funciona para un número cualquiera de tuberías. Partiendo de parámetros conocidos como el diámetro de la tubería, su longitud y la rugosidad del material.

²⁶ Víctor L. Streeter, Mecánica de los Fluidos, cuarta edición. 1977 (Tuberías en Paralelo)

Las condiciones que deben cumplirse son:

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + \dots + Q_n$$

$$h_T = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + \dots + h_n$$

A partir de esto se estipularon para el banco de pruebas No. 1 los diámetros de $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ " y 1" (ver Figura 14), en tuberías de PVC y hierro galvanizado, y para el banco de pruebas No. 2 se estipulo un diámetro de $1\frac{1}{4}$ " para todos los tramos de tubería (ver Figura 16); esto para poder realizar los cálculos correspondientes.

Luego de obtener todos los caudales supuestos que transportan cada tramo de los bancos de pruebas se encuentran los valores reales, con el fin de determinar las pérdidas totales y comprobar si se cumplen las condiciones de un sistema de tuberías en paralelo.

8.1. BANCO DE PRUEBA NO. 1

ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Boquilla ¼" de bronce
2	Expansión 2"x3/4" PVC
3	Manómetro 0-14 psi
4	Bridas PVC 2"
5	Tubería PVC 2"
6	Tees PVC 2"
7	Reducción PVC 2"x1"
8	Reducción PVC 2"x3/4"
9	Reducción PVC 2"x1/2"
10	Reducción Roscada PVC 2"x1/2"
11	Reducción Roscada PVC 2"x3/4"
12	Reducción Roscada PVC 2"x1"
13	Tubería PVC 2"
14	Tubería PVC 1"
15	Tubería PVC ¾"
16	Tubería PVC ½"
17	Tubería Hierro Galvanizado ½"
18	Tubería Hierro Galvanizado ¾"
19	Tubería Hierro Galvanizado 1"
20	Codos 90° PVC 2"
21	Válvula de Bola PVC 1"
22	Válvula de Bola PVC ¾"
23	Válvula de Bola PVC ½"
24	Válvula de Bola PVC Universal ½"
25	Válvula de Bola PVC Universal ¾"
26	Válvula de Bola PVC Universal 1"
27	Tee Soporte de Sensor PVC 1"
28	Tee Soporte de Sensor PVC ½"
29	Tee Soporte de Sensor PVC ¾"

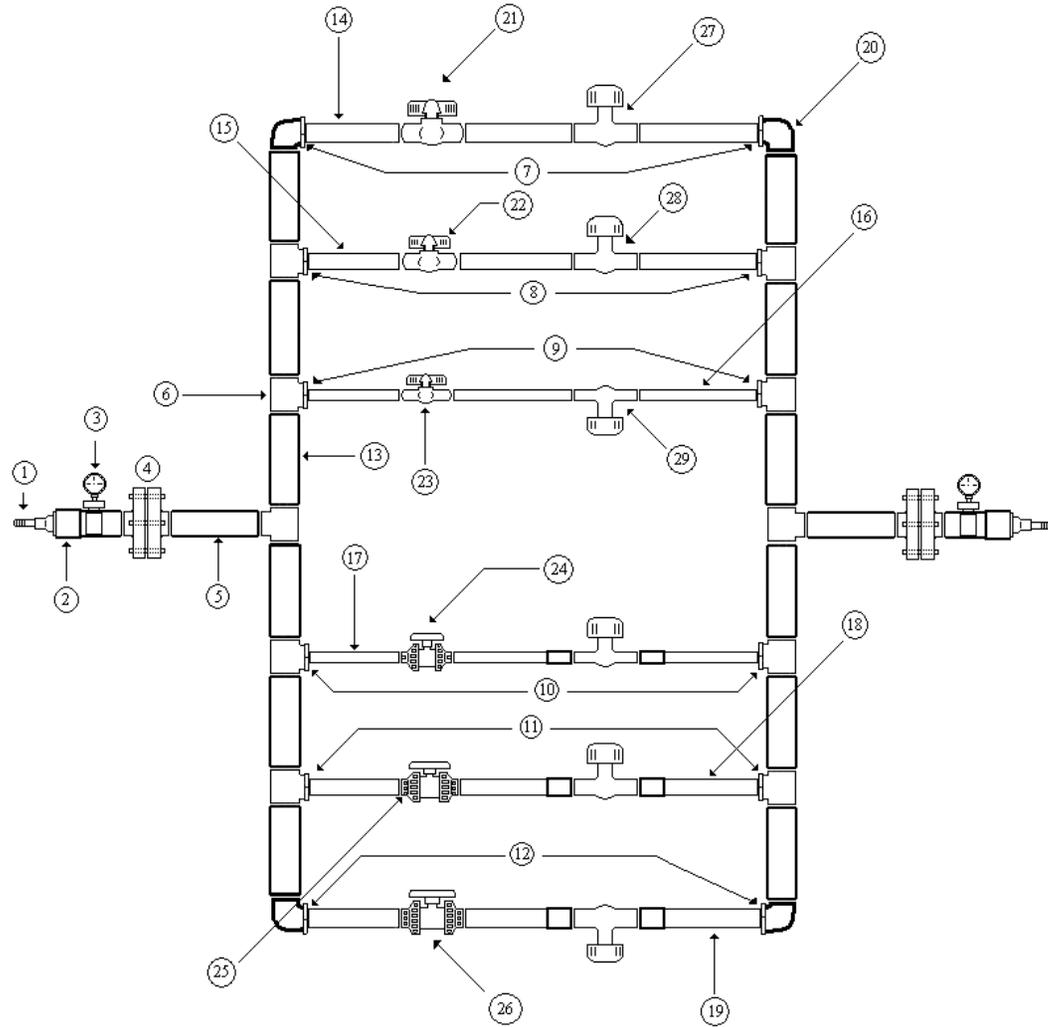


Figura 14: Banco de Prueba No. 1

Después de probar la bomba del banco de prueba GUNT, con el fin de conocer el caudal de trabajo necesario, encontrando el tiempo que dura el proceso de llenado hasta 60 litros del depósito que se encuentra en el mismo banco. Este proceso se repitió 8 veces y se sacó el promedio de los diferentes datos tomados, determinando así que el caudal con el cual se trabajara este análisis es de 55 l/min:

$$\text{Caudal: } Q = 55 \frac{l}{\text{min}} = 0,032 \frac{ft^3}{\text{seg}}$$

$$\text{Diámetros de las tuberías: } D_1 = D_6 = 1 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,083 \text{ ft}$$

$$D_2 = D_5 = 0,75 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,0625 \text{ ft}$$

$$D_3 = D_4 = 0,5 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,0416 \text{ ft}$$

$$\text{Áreas de las tuberías: } A_1 = A_6 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,083ft)^2 = 0,0054ft^2$$

$$A_2 = A_5 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,0625ft)^2 = 0,0030ft^2$$

$$A_3 = A_4 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,0416ft)^2 = 0,0013ft^2$$

$$\text{Diámetro de la tubería de entrada y salida: } D = 2 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,166 \text{ ft}$$

Área de la tubería de entrada y salida:

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,166ft)^2 = 0,0218ft^2$$

$$\text{Rugosidad de PVC: } e = 0,0015 \text{ mm} * \frac{1cm}{10mm} * \frac{1ft}{30,38cm} \approx 4,93 \times 10^{-6} ft$$

$$\text{Rugosidad de Galvanizado: } e = 0,15 \text{ mm} * \frac{1cm}{10mm} * \frac{1ft}{30,38cm} \approx 4,93 \times 10^{-4} ft$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 1 (PVC): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-6} ft}{0,083 ft} = 0,00006$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 2 (PVC): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-6} ft}{0,0625 ft} = 0,00008$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 3 (PVC): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-6} ft}{0,0416 ft} = 0,0001$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 4 (Galvanizado): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-4} ft}{0,0416 ft} = 0,01$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 5 (Galvanizado): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-4} ft}{0,0625 ft} = 0,008$$

$$\text{Rugosidad relativa tramo 6 (Galvanizado): } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-4} ft}{0,083 ft} = 0,006$$

$$\text{Viscosidad dinámica del agua a } 20^\circ \text{ C: } \nu = 1,091 \times 10^{-5} \frac{ft^2}{seg}$$

Longitudes de las tuberías:

$$l_{ent} = l_{sal} = 17cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 0,56ft.$$

$$l_1 = 55,7cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,83ft.$$

$$l_2 = 48,7cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,6ft.$$

$$l_3 = 42,5cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,4ft.$$

$$l_4 = 37,1cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,22ft.$$

$$l_5 = 43,3cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,42ft.$$

$$l_6 = 42,9cm * \frac{1ft}{30,38cm} = 1,41ft.$$

Gravedad: $g = 32,2 \frac{ft}{seg^2}$

Velocidad de entrada y salida: $V = \frac{Q}{A} = \frac{0,032ft^3/seg}{0,0218ft^2} = 1,47 \frac{ft}{seg}$

Coeficientes de pérdidas por accesorios:

- ✓ Codos de 90° $K = 0,9$
- ✓ Válvulas $K = 0,19$
- ✓ Entrada $K = 0,5$
- ✓ Salida $K = 1,0$

Descripción de los tramos de tubería:

- ✓ Tramo 1: 2 codos de 90°, 1 válvula, Contracción de 2 in a 1 in, Expansión de 1 in a 2 in, 1 Tee de 1 in y 6 Tees de 2 in.
- ✓ Tramo 2: 1 válvula, Contracción de 2 in a 0,75 in, Expansión de 0,75 in a 2 in, 1 Tee de 0,75 in y 6 Tees de 2 in.
- ✓ Tramo 3: 1 válvula, Contracción de 2 in a 0,5 in, Expansión de 0,5 in a 2 in, 1 Tee de 0,5 in y 4 Tees de 2 in.
- ✓ Tramo 4: 1 válvula, Contracción de 2 in a 0,5 in, Expansión de 0,5 in a 2 in, 1 Tee de 0,5 in y 4 Tees de 2 in.
- ✓ Tramo 5: 1 válvula, Contracción de 2 in a 0,75 in, Expansión de 0,75 in a 2 in, 1 Tee de 0,75 in y 6 Tees de 2 in.
- ✓ Tramo 6: 2 codos de 90°, 1 válvula, Contracción de 2 in a 1 in, Expansión de 1 in a 2 in, 1 Tee de 1 in y 6 Tees de 2 in.

Se calculan todas las perdidas relacionadas con las tuberías y accesorios de entrada y la salida del banco de prueba:

Perdidas en la entrada: $h_{ent} = K \frac{V^2}{2g} = 0,5 \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0167ft$

Perdidas en la salida: $h_{sal} = K \frac{V^2}{2g} = 1,0 \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0335ft$

Perdidas en la entrada por longitud:

$$h_{ent} = f_{ent} * \frac{l_{ent}}{D_{ent}} * \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,014 * \frac{0,56}{0,166} * \frac{(1,47)^2}{2 * 32,2} = 0,00158ft.$$

Perdidas en la salida por longitud:

$$h_{ent} = f_{sal} * \frac{l_{sal}}{D_{sal}} * \frac{V_{sal}^2}{2g} = 0,014 * \frac{0,56}{0,166} * \frac{(1,47)^2}{2 * 32,2} = 0,00158ft.$$

Perdidas por expansión en la entrada: pasa de 1/2" a 3/4" y de 3/4" a 2".

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_{ent-boquilla}}{D_{sal-boquilla}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{0,75in} \right)^2 \right]^2 = 0,308$$

$$h_{expa-ent} = K_{expa} \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,308 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0103ft..$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_{sal-boquilla}}{D_{ent}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in} \right)^2 \right]^2 = 0,738$$

$$h_{expa-ent} = K_{expa} \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,738 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0247ft.$$

$$h_{expa-ent} = 0,0103 ft + 0,0247 ft = 0,035ft.$$

Perdidas por contracción en la salida: pasa de 2" a 3/4" y de 3/4" a 1/2".

$$C_c \rightarrow \frac{A_{ent-boquilla}}{A_{sal}} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624$$

$$h_{contr-sal} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V_{sal}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1 \right)^2 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0121ft. ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{sal-boquilla}}{A_{ent-boquilla}} = \frac{0,00136}{0,0030} = 0,4 \rightarrow C_c = 0,659$$

$$h_{contr-sal} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_{sal}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,659} - 1\right)^2 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,00895ft. ;$$

$$h_{contr-sal} = 0,0121ft + 0,00895ft = 0,0210ft$$

Suponemos el caudal que pasara por el tramo 1. Al tener los cuatro tramos diámetros distintos, suponemos mayor caudal por las tuberías de mayor diámetro, entonces asignamos al tramo 1, un 25% del caudal total:

$$Q'_1 = 0,00809 \frac{ft^3}{seg}.$$

Teniendo Q'_1 hallamos la velocidad supuesta 1 (V'_1) así:

$$Q = V * A \rightarrow V = \frac{Q}{A}$$

Se halla la velocidad supuesta del tramo 1:

$$V'_1 = \frac{Q'_1}{A} = \frac{0,00809ft^3/seg}{0,0054ft^2} = 1,49 \frac{ft}{seg}$$

El número de Reynolds del tramo 1:

$$Re'_1 = \frac{V'_1 * D}{\nu} = \frac{1,49 * 0,083}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,1 \times 10^5$$

A partir de este se encuentra el factor de fricción por medio del diagrama de Moody, teniendo en cuenta también la rugosidad relativa, obteniendo para el tramo 1 un factor de fricción supuesto de $f'_1 = 0,018$.

En el análisis se deben tener en cuenta las pérdidas por contracción ($h_{cont.}$) y expansión ($h_{exp.}$) brusca que tiene el fluido al momento de cambiar el diámetro de la tubería. Las pérdidas para estos dos casos se someten al mismo análisis. Para expresar las pérdidas se hace por medio del coeficiente k que generalmente se determina experimentalmente y en los casos de los accesorios (codos, válvulas, etc.) se encuentra tabulado.

→ Para Contracción se tiene que: $h_c = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g}$

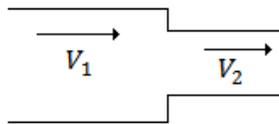


Figura 15: Contracción Brusca.

Para efecto de cálculos, se supone en el análisis que los tramos parten y finalizan en un mismo punto para así puedan tener efecto de un sistema en paralelo y evitar que sean tomadas como ramificadas. Y las Tés en las cuales se instala el sensor de medición será remplazada por su longitud equivalente e incluida en la pérdida por longitud, con el fin de realizar la pérdida de carga en cada tramo, de la siguiente manera:

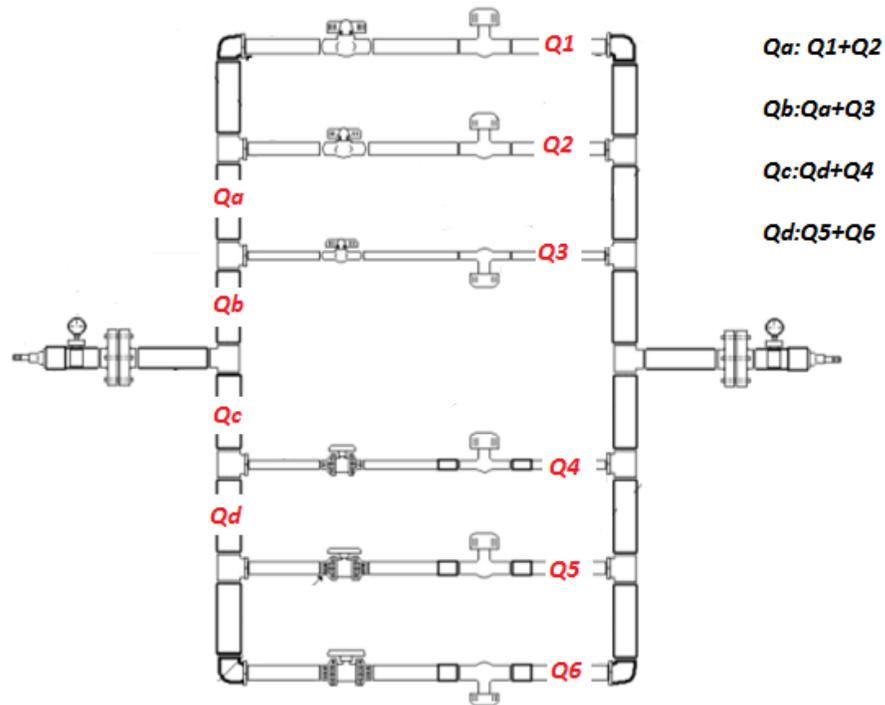
$$l_e = \frac{Kd}{f}$$

Donde;

K : Factor del accesorio, en este caso 0,3 por ser una T de paso directo.

d : Diámetro del tramo de tubería.

f : Factor de fricción del tramo.



Tomando como punto de entrada la Tee en el tramo 2 y teniendo en cuenta que $Q'_1 = 0.00809$, igualamos las perdidas del tramo 1 y 2 para así encontrar Q_2 reemplazando:

$$h_1 = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} + K \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{expa} \frac{V'_2{}^2}{2g} + h_{contr}$$

Pero,

$$h_1 = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V'_1{}^2}{2g} + K \frac{V'_1{}^2}{2g} + K_{expa} \frac{V'_1{}^2}{2g} + h_{contr} + h_{codo}$$

Y sabiendo que $V = \frac{Q}{A}$ la ecuación nos queda de la siguiente manera,

$$h_1 = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{expa} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + h_{contr} + h_{codo}$$

$$h_1 = 0,018 \frac{2,76}{0,083} \frac{(0,00809)^2}{2(32,2)(0,0054)^2} + 0,00655 + 0,0116 + 0,0193 + 0,062$$

$$h_1 = 0,0209 + 0,00655 + 0,0116 + 0,0193 + 0,062 = 0,120 \text{ ft}$$

$$h_1 = 0.120 \text{ ft} = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} + K \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{\text{expa}} \frac{V'_2{}^2}{2g} + h_{\text{contr}}$$

$$0.120 \text{ ft} = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{\text{expa}} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + h_{\text{contr}}$$

$$0.120 \text{ ft} = h_2 = 1215.84Q_2^2 + 327.81Q_2^2 + 626.44Q_2^2 + 1273.29Q_2^2$$

$$0.120 \text{ ft} = 3443.38Q_2^2 \rightarrow Q_2^2 = \frac{0.120}{3443.38} \rightarrow Q_2 = \sqrt{3.48 \times 10^{-5}}$$

$$Q'_2 = 0.0059 \rightarrow V_2 = 1.97 \text{ ft/s}$$

$$Q_a = Q_1 + Q_2 = 0.00809 + 0.0059 = 0.014$$

$$Q_a = 0.014 \rightarrow V_a = 0.639 \text{ ft/s}$$

Repetimos el proceso con la tubería 3 para hallar Q_3 , suponiendo turbulencia completa:

$$h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{\text{expa}} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + h_{\text{contr}} + h_{\text{Tee(directo)}} + h_{\text{Tee(ramal)}}$$

$$h_3 = 0,022 \frac{1,997}{0,0416} \frac{Q'_3{}^2}{2(32,2)(0,0013)^2} + 1745.74Q_3^2 + 3336.06Q_3^2 + 8067.18Q_3^2 + 33077.29Q_3^2 + 2756.44Q_3^2$$

$$h_3 = 58686.35Q_3^2 = h_1$$

$$58686.35Q_3^2 = 0.120 \rightarrow Q'_3 = \sqrt{\frac{0.120}{58686.35}}$$

$$Q'_3 = 0.00143 \rightarrow V_3 = 1.1 \text{ ft/s}$$

$$Q_b = Q_a + Q_3 = 0.014 + 0.00143 = 0.0154$$

$$Q_b = 0.0154 \rightarrow V_b = 0.70 \text{ ft/s}$$

$$Q_T = 0.032 = Q_b + Q_c \rightarrow Q_c = Q_T - Q_b$$

$$Q_c = 0.032 - 0.0154 = 0.0166$$

$$Q_c = 0.0166 \rightarrow V_c = 0.76 \text{ ft/s}$$

Para encontrar los caudales en las tuberías 4, 5 y 6 se tiene el siguiente sistema de ecuaciones, el cual se resuelve posteriormente por igualación y sustitución:

$$(1) h_5 = h_4 = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{expa} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + h_{contr} + h_{Tee(directo)} + h_{Tee(ramal)}$$

$$(2) h_5 = f'_5 * \frac{l_5}{D} * \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + K \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + K_{expa} \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + h_{contr}$$

$$(3) h_5 = h_6 = f'_6 * \frac{l_6}{D} * \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + K \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + K_{expa} \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + h_{contr} + h_{codo}$$

$$(4) Q_c = Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_4 + Q_d$$

$$(5) Q_d = Q_5 + Q_6$$

Se desarrollan las ecuaciones (1), (2) y (3) con el objetivo de simplificarlas:

$$(1) h_5 = 0,022 \frac{1,792}{0,0416} \frac{Q'_4{}^2}{2(32,2)(0,0013)^2} + 1745.74Q_4^2 + 3336.06Q_4^2 + 8067.18Q_4^2 + 33077.29Q_4^2 + 2756.44Q_4^2$$

$$h_5 = 8707.53Q_4^2 + 1745.74Q_4^2 + 3336.06Q_4^2 + 8067.18Q_4^2 + 33077.29Q_4^2 + 2756.44Q_4^2$$

$$h_5 = 57690.25Q_4^2 \quad (1.1)$$

$$(2) h_5 = 0,022 \frac{1,802}{0,0625} \frac{Q'_5{}^2}{2(32,2)(0,0030)^2} + 327.81Q_5^2 + 626.44Q_5^2 + 1273.29Q_5^2$$

$$h_5 = 1094.38Q_5^2 + 327.81Q_5^2 + 626.44Q_5^2 + 1273.29Q_5^2$$

$$h_5 = 3321.92Q_5^2 \quad (2.1)$$

$$(3) h_5 = 0,022 \frac{2,074}{0,083} \frac{Q_6'^2}{2(32,2)(0,0054)^2} + 101.18Q_6'^2 + 180.55Q_6'^2 + 299.54Q_6'^2 + 958.51Q_6'^2$$

$$h_5 = 292.74Q_6'^2 + 101.18Q_6'^2 + 180.55Q_6'^2 + 299.54Q_6'^2 + 958.51Q_6'^2$$

$$h_5 = 1832.52Q_6'^2 \quad (3.1)$$

Igualando (2.1) y (3.1),

$$3321.92Q_5^2 = 1832.52Q_6'^2 \quad \rightarrow \quad Q_5 = \sqrt{\frac{1832.52Q_6'^2}{3321.92}} = 0.74Q_6$$

$$Q_5 = 0.74Q_6 \quad (6)$$

Reemplazando (6) en (5),

$$Q_d = Q_5 + Q_6 = 0.74Q_6 + Q_6$$

$$Q_d = 1.74Q_6 \quad (7)$$

Igualando (1.1) y (2.1),

$$57690.25Q_4^2 = 3321.92Q_5^2$$

$$Q_4 = \sqrt{\frac{3321.92Q_5^2}{57690.25}} = 0.239Q_5 \quad (8)$$

Reemplazando (7) y (8) en (4)

$$Q_c = Q_4 + Q_d$$

$$Q_c = 0.239Q_5 + 1.74Q_6 \quad \rightarrow \quad \text{pero } Q_5 = 0.74Q_6 \text{ entonces tenemos que,}$$

$$Q_c = 0.239(0.74Q_6) + 1.74Q_6 = 0.177Q_6 + 1.74Q_6$$

$$Q_c = 0.0166 = 1.92Q_6$$

$$0.0166 = 1.92Q_6 \quad \rightarrow \quad Q_6 = \frac{0.0166}{1.92}$$

$$Q_6 = 0.00865 \quad \rightarrow \quad V_6 = 1.60 \text{ ft/s}$$

A partir del anterior procedimiento donde se encontró el valor de Q_6 , se resuelven las demás ecuaciones para encontrar los valores necesarios:

De (6),

$$Q_5 = 0.74Q_6 = 0.74(0.00865)$$

$$Q_5 = 0.00640 \quad \rightarrow \quad V_5 = 2.13 \text{ ft/s}$$

De (8),

$$Q_4 = 0.239Q_5 = 0.239(0.00640)$$

$$Q_4 = 0.00153 \quad \rightarrow \quad V_4 = 1.18 \text{ ft/s}$$

De (7),

$$Q_d = 1.74Q_6 = 1.74(0.00865)$$

$$Q_d = 0.0150 \quad \rightarrow \quad V_d = 0.69 \text{ ft/s}$$

A partir de estos análisis se obtienen los supuestos números de Reynolds y factores de fricción con ayuda del diagrama de Moody, con el fin de recalcular y encontrar los valores reales:

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{1,97 * 0,0625}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,11 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0115$$

$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{1,1 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,042 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0124$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{1,18 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,045 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,0403$$

$$Re_5 = \frac{V_5 * D}{\nu} = \frac{2,13 * 0,0625}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,12 \times 10^5. \quad \rightarrow f_5 = 0,0351$$

$$Re_6 = \frac{V_6 * D}{\nu} = \frac{1,60 * 0,083}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,12 \times 10^5. \quad \rightarrow f_6 = 0,0321$$

Se recalculan las pérdidas y caudales para así ajustar los cálculos con los nuevos factores de fricción encontrados:

$$0.120 \text{ ft} = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{\text{expa}} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + h_{\text{contr}}$$

$$0.120 \text{ ft} = h_2 = 2852.26Q_2^2$$

$$0.120 \text{ ft} = 2852.26Q_2^2 \rightarrow Q_2^2 = \frac{0.120}{2852.26} \rightarrow Q_2 = \sqrt{4.21 \times 10^{-5}}$$

$$Q'_2 = 0.00649 \rightarrow V_2 = 2.16 \text{ ft/s}$$

$$Q_a = Q_1 + Q_2 = 0.00809 + 0.00649 = 0.0146$$

$$Q_a = 0.0146 \rightarrow V_a = 0.66 \text{ ft/s}$$

Repetimos el proceso con la tubería 3 para hallar Q_3 , suponiendo turbulencia completa:

$$h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{\text{expa}} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + h_{\text{contr}} + h_{\text{Tee(directo)}} + h_{\text{Tee(ramal)}}$$

$$h_3 = 0,0124 \frac{1,997}{0,0416} \frac{Q'_3{}^2}{2(32,2)(0,0013)^2} + 1745.74Q_3^2 + 3336.06Q_3^2 + 8067.18Q_3^2 + 33077.29Q_3^2 + 2756.44Q_3^2$$

$$h_3 = 54452.04Q_3^2 = h_1$$

$$54452.04Q_3^2 = 0.120 \rightarrow Q'_3 = \sqrt{\frac{0.120}{54452.04}}$$

$$Q'_3 = 0.00148 \rightarrow V_3 = 1.14 \text{ ft/s}$$

$$Q_b = Q_a + Q_3 = 0.0146 + 0.00148 = 0.0161$$

$$Q_b = 0.0161 \rightarrow V_b = 0.70 \text{ ft/s}$$

$$Q_T = 0.032 = Q_b + Q_c \rightarrow Q_c = Q_T - Q_b$$

$$Q_c = 0.032 - 0.0161 = 0.016$$

$$Q_c = 0.016 \rightarrow V_c = 0.73 \text{ ft/s}$$

Para encontrar los caudales en las tuberías 4, 5 y 6 se tiene el siguiente sistema de ecuaciones, el cual se resuelve posteriormente por igualación y sustitución:

$$(1) h_5 = h_4 = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{expa} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + h_{contr} + h_{Tee(directo)} + h_{Tee(ramal)}$$

$$(2) h_5 = f'_5 * \frac{l_5}{D} * \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + K \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + K_{expa} \frac{Q'_5{}^2}{2gA_5^2} + h_{contr}$$

$$(3) h_5 = h_6 = f'_6 * \frac{l_6}{D} * \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + K \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + K_{expa} \frac{Q'_6{}^2}{2gA_6^2} + h_{contr} + h_{codo}$$

$$(4) Q_c = Q_4 + Q_5 + Q_6 = Q_4 + Q_d$$

$$(5) Q_d = Q_5 + Q_6$$

Se desarrollan las ecuaciones (1), (2) y (3) con el objetivo de simplificarlas:

$$(1) h_5 = 0,0403 \frac{1,792}{0,0416} \frac{Q'_4{}^2}{2(32,2)(0,0013)^2} + 1745.74Q_4^2 + 3336.06Q_4^2 + 8067.18Q_4^2 + 33077.29Q_4^2 + 2756.44Q_4^2$$

$$h_5 = 15950.60Q_4^2 + 1745.74Q_4^2 + 3336.06Q_4^2 + 8067.18Q_4^2 + 33077.29Q_4^2 + 2756.44Q_4^2$$

$$h_5 = 64933.32Q_4^2 \quad (1.1)$$

$$(2) h_5 = 0,0351 \frac{1,802}{0,0625} \frac{Q'_5{}^2}{2(32,2)(0,0030)^2} + 327.81Q_5^2 + 626.44Q_5^2 + 1273.29Q_5^2$$

$$h_5 = 1746.04Q_5^2 + 327.81Q_5^2 + 626.44Q_5^2 + 1273.29Q_5^2$$

$$h_5 = 3973.58Q_5^2 \quad (2.1)$$

$$(3) h_5 = 0,0321 \frac{2,074}{0,083} \frac{Q_6'^2}{2(32,2)(0,0054)^2} + 101.18Q_6'^2 + 180.55Q_6'^2 + 299.54Q_6'^2 + 958.51Q_6'^2$$

$$h_5 = 427.13Q_6'^2 + 101.18Q_6'^2 + 180.55Q_6'^2 + 299.54Q_6'^2 + 958.51Q_6'^2$$

$$h_5 = 1965.58Q_6'^2 \quad (3.1)$$

Igualando (2.1) y (3.1),

$$3973.58Q_5^2 = 1965.58Q_6'^2 \quad \rightarrow \quad Q_5 = \sqrt{\frac{1965.58Q_6'^2}{3973.58}} = 0.70Q_6$$

$$Q_5 = 0.70Q_6 \quad (6)$$

Reemplazando (6) en (5),

$$Q_d = Q_5 + Q_6 = 0.70Q_6 + Q_6$$

$$Q_d = 1.70Q_6 \quad (7)$$

Igualando (1.1) y (2.1),

$$64933.32Q_4^2 = 3973.58Q_5^2$$

$$Q_4 = \sqrt{\frac{3973.58Q_5^2}{64933.32}} = 0.25Q_5 \quad (8)$$

Reemplazando (7) y (8) en (4)

$$Q_c = Q_4 + Q_d$$

$$Q_c = 0.25Q_5 + 1.70Q_6 \quad \rightarrow \quad \text{pero } Q_5 = 0.70Q_6 \text{ entonces tenemos que,}$$

$$Q_c = 0.25(0.70Q_6) + 1.70Q_6 = 0.175Q_6 + 1.70Q_6$$

$$Q_c = 0.016 = 1.87Q_6$$

$$0.016 = 1.87Q_6 \quad \rightarrow \quad Q_6 = \frac{0.016}{1.87}$$

$$Q_6 = 0.00856 \quad \rightarrow \quad V_6 = 1.64 \text{ ft/s}$$

A partir del anterior procedimiento donde se encontró el valor de Q_6 , se resuelven las demás ecuaciones para encontrar los valores necesarios:

De (6),

$$Q_5 = 0.70Q_6 = 0.70(0.00856)$$

$$Q_5 = 0.00599 \quad \rightarrow \quad V_5 = 2.0 \text{ ft/s}$$

De (8),

$$Q_4 = 0.25Q_5 = 0.25(0.00599)$$

$$Q_4 = 0.00150 \quad \rightarrow \quad V_4 = 1.15 \text{ ft/s}$$

De (7),

$$Q_d = 1.70Q_6 = 1.70(0.00856)$$

$$Q_d = 0.0145 \quad \rightarrow \quad V_d = 0.66 \text{ ft/s}$$

Obteniendo los caudales supuestos de cada tramo de tubería, se encuentra el total de estos:

$$\Sigma Q' = 0,00809 + 0,00649 + 0,00148 + 0,00150 + 0,00599 + 0,00856$$

$$\Sigma Q' = 0,032 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

A partir del cálculo anterior se encuentran los caudales reales en cada tramo:

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00809}{0,032} * 0,032 = 0,00809 ft^3/seg.$$

$$Q_2 = \frac{Q'_2}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00649}{0,032} * 0,032 = 0,00649 ft^3/seg.$$

$$Q_3 = \frac{Q'_3}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00148}{0,032} * 0,032 = 0,00148 ft^3/seg.$$

$$Q_4 = \frac{Q'_4}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00150}{0,032} * 0,032 = 0,00150 ft^3/seg.$$

$$Q_5 = \frac{Q'_5}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00599}{0,032} * 0,032 = 0,00599 ft^3/seg.$$

$$Q_6 = \frac{Q'_6}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00856}{0,032} * 0,032 = 0,00856 ft^3/seg.$$

$$\sum Q = 0,00809 + 0,00649 + 0,00148 + 0,00150 + 0,00559 + 0,00856 = 0,032$$

$$\sum Q = 0,032 ft^3/seg.$$

Se observa que son diferentes los caudales, el expulsado por la bomba y el encontrado teóricamente a la salida de los tramos en paralelo. Se precede a hallar las velocidades reales y los factores de fricción:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{0,00809}{0,0054} = 1,5 ft/seg.$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{0,00649}{0,0030} = 2,16 ft/seg.$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{A} = \frac{0,00148}{0,0013} = 1,14 ft/seg.$$

$$V_4 = \frac{Q_4}{A} = \frac{0,00150}{0,0013} = 1,15 ft/seg.$$

$$V_5 = \frac{Q_5}{A} = \frac{0,00599}{0,0030} = 2,0 ft/seg.$$

$$V_6 = \frac{Q_6}{A} = \frac{0,00856}{0,0054} = 1,6ft/seg.$$

Números de Reynolds y factores de fricción reales:

$$Re_1 = \frac{V_1 * D}{\nu} = \frac{1,5 * 0,083}{1,091 * 10^{-5}} = 0,11 \times 10^5. \quad \rightarrow f_1 = 0,0109$$

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{2,16 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,12 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0115$$

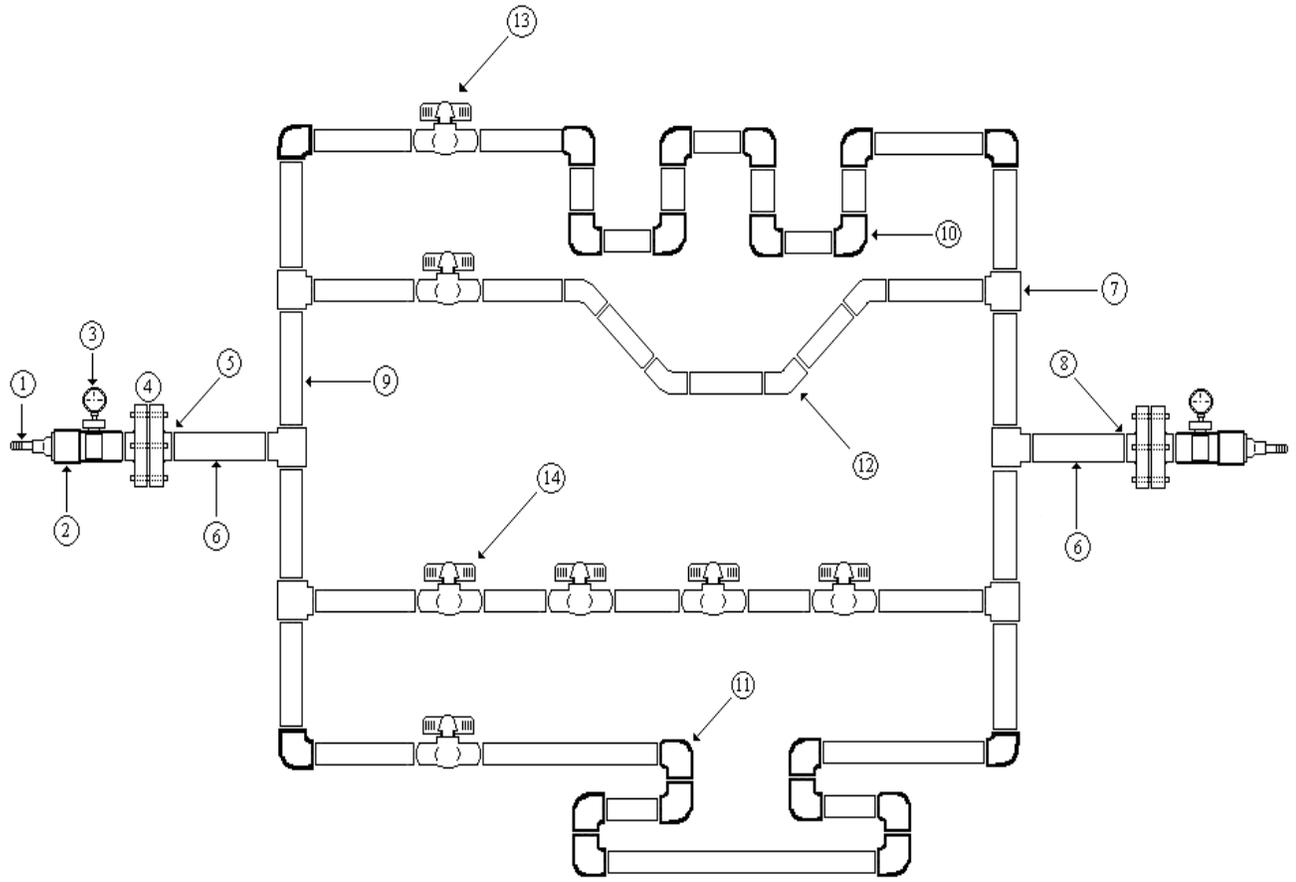
$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{1,14 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,04 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0124$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{1,15 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,04 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,0403$$

$$Re_5 = \frac{V_5 * D}{\nu} = \frac{2,0 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,11 \times 10^5. \quad \rightarrow f_5 = 0,0351$$

$$Re_6 = \frac{V_6 * D}{\nu} = \frac{1,6 * 0,083}{1,091 * 10^{-5}} = 0,12 \times 10^5. \quad \rightarrow f_6 = 0,0321$$

8.2. BANCO DE PRUEBA No. 2



ITEM	DESCRIPCIÓN
1	Boquilla 3/4" de bronce
2	Expansión 2"x3/4" PVC
3	Manómetro 0-14 psi
4	Bridas PVC 2"
5	Reducción PVC 2"x1 1/4"
6	Tubería PVC 1/4"
7	Tees PVC 1/4"
8	Reducción PVC 2"x1 1/4"
9	Tubería PVC 1/4"
10	Codos 90° PVC 1/4"
11	Codos 90° PVC 1/4"
12	Codos 45° PVC 1/4"
13	Válvula de Bola PVC 1/4"
14	Válvula de Bola PVC 1/4"

Figura 16. Banco de Prueba No. 2

$$\text{Caudal: } Q = 55 \frac{l}{min} = 0,032 \frac{ft^3}{seg}$$

$$\text{Diámetro de la tubería: } D = 1,25 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,104 \text{ ft}$$

$$\text{Área de la tubería: } A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,104ft)^2 = 0,0085ft^2$$

$$\text{Diámetro de la tubería de entrada y salida: } D = 2 \text{ in} * \frac{1ft}{12 \text{ in}} \approx 0,166 \text{ ft}$$

$$\text{Área de la tubería de entrada y salida: } A = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0,166ft)^2 = 0,0218ft^2$$

$$\text{Rugosidad de PVC: } e = 0,0015 \text{ mm} * \frac{1cm}{10mm} * \frac{1ft}{30,38cm} \approx 4,93 \times 10^{-6} ft$$

$$\text{Rugosidad relativa: } \frac{e}{d} = \frac{4,93 \times 10^{-6} ft}{0,104 \text{ ft}} = 0,00005$$

$$\text{Viscosidad dinámica del agua a } 20^\circ \text{ C: } \nu = 1,091 \times 10^{-5} \frac{ft^2}{seg}$$

$$\text{Longitudes: } l_1 = 1,66ft ; l_2 = 0,744 ; l_3 = 0,721ft ; l_4 = 1,22ft$$

$$\text{Gravedad: } g = 32,2 \frac{ft}{seg^2}$$

$$\text{Velocidad de entrada y salida: } V = \frac{Q}{A} = \frac{0,032ft^3/seg}{0,0218ft^2} = 1,47 \frac{ft}{seg}$$

Coeficientes de pérdidas por accesorios:

- ✓ Codos de 90° , $K = 0,9$
- ✓ Codos de 45° , $K = 0,4$
- ✓ Válvulas, $K = 0,19$
- ✓ Entrada, $K = 0,5$
- ✓ Salida, $K = 1,0$

Descripción de los tramos de tubería:

- ✓ Tramo 1: 10 codos de 90°, 1 válvula.
- ✓ Tramo 2: 4 codos de 45°, 1 válvula.
- ✓ Tramo 3: 4 válvulas.
- ✓ Tramo 4: 10 codos de 90°, 1 válvula.

$$\text{Perdidas en la entrada: } h_{ent} = K \frac{V^2}{2g} = 0,5 \frac{(1,47)^2}{2 \cdot 32,2} = 0,0167ft$$

$$\text{Perdidas en la salida: } h_{sal} = K \frac{V^2}{2g} = 1,0 \frac{(1,47)^2}{2 \cdot 32,2} = 0,0335ft$$

Perdidas en la entrada por longitud:

$$h_{ent} = f_{ent} * \frac{l_{ent}}{D_{ent}} * \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,014 * \frac{0,56}{0,166} * \frac{(1,47)^2}{2 * 32,2} = 0,00158ft.$$

Perdidas en la salida por longitud:

$$h_{ent} = f_{sal} * \frac{l_{sal}}{D_{sal}} * \frac{V_{sal}^2}{2g} = 0,014 * \frac{0,56}{0,166} * \frac{(1,47)^2}{2 * 32,2} = 0,00158ft.$$

Perdidas por expansión en la entrada: pasa de 1/2" a 3/4" y de 3/4" a 2".

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_{ent-boquilla}}{D_{sal-boquilla}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{0,75in} \right)^2 \right]^2 = 0,308$$

$$h_{expa-ent} = K_{expa} \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,308 * \frac{(1,47)^2}{2 \cdot 32,2} = 0,0103ft..$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_{sal-boquilla}}{D_{ent}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in} \right)^2 \right]^2 = 0,738$$

$$h_{expa-ent} = K_{expa} \frac{V_{ent}^2}{2g} = 0,738 * \frac{(1,47)^2}{2 \cdot 32,2} = 0,0247ft.$$

$$h_{\text{expa-ent}} = 0,0103 \text{ ft} + 0,0247 \text{ ft} = 0,035 \text{ ft}.$$

Perdidas por contracción en la salida: pasa de 2" a ¾" y de ¾" a ½".

$$C_c \rightarrow \frac{A_{\text{ent-boquilla}}}{A_{\text{sal}}} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624$$

$$h_{\text{contr-sal}} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V_{\text{sal}}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1 \right)^2 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,0121 \text{ ft. ;}$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{\text{sal-boquilla}}}{A_{\text{ent-boquilla}}} = \frac{0,00136}{0,0030} = 0,4 \rightarrow C_c = 0,659$$

$$h_{\text{contr-sal}} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V_{\text{sal}}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,659} - 1 \right)^2 * \frac{(1,47)^2}{2*32,2} = 0,00895 \text{ ft. ;}$$

$$h_{\text{contr-sal}} = 0,0121 \text{ ft} + 0,00895 \text{ ft} = 0,0210 \text{ ft}$$

Suponemos el caudal que pasara por el tramo 1. Al tener los cuatro tramos el mismo diámetro dividimos el caudal total entre los cuatro tramos, lo cual nos da:

$$Q'_1 = 0,008 \frac{\text{ft}^3}{\text{seg}}$$

Teniendo Q'_1 se encuentra la velocidad supuesta 1 (V'_1) así: $Q = V * A \rightarrow V = \frac{Q}{A}$

La velocidad supuesta del tramo 1 es: $V'_1 = \frac{Q'_1}{A} = \frac{0,008 \text{ ft}^3/\text{seg}}{0,0085 \text{ ft}^2} = 0,94 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$

$$V'_1 = 0,94 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$$

Igualamos las pérdidas del tramo 1 y 2 para así encontrar Q_2 , suponiendo turbulencia completa:

$$h_1 = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} + K \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{\text{expa}} \frac{V'_2{}^2}{2g} + h_{\text{contr}}$$

Pero,

$$h_1 = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V'_1{}^2}{2g} + K \frac{V'_1{}^2}{2g} + K_{\text{expa}} \frac{V'_1{}^2}{2g} + h_{\text{contr}} + h_{\text{codo}}$$

Y sabiendo que $V = \frac{Q}{A}$ la ecuación nos queda de la siguiente manera,

$$h_1 = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{\text{Valv}} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{\text{Tes}} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{\text{codos } 90^\circ} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2}$$

$$h_1 = 0,022 \frac{1,66}{0,104} * \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 0,19 \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 1,8 \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} \\ + 0,3 * (2) \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 0,9 * (10) \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2}$$

$$h_1 = 0,00483 + 0,00261 + 0,00825 + 0,0248 + 0,124 = 0,164 \text{ ft}$$

$$h_1 = 0,164 \text{ ft} = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{\text{Valv}} \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{\text{Tes}} \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{\text{codos } 45^\circ} \frac{V'_2{}^2}{2g}$$

$$0,164 \text{ ft} = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{\text{Valv}} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{\text{Tes}} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{\text{codos } 45^\circ} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2}$$

$$0,164 \text{ ft} = h_2 = \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} (f'_2 * \frac{l_2}{D} + K_{\text{Valv}} + K_{\text{Tes}} + K_{\text{codos } 45^\circ})$$

$$0,164 \text{ ft} = h_2 = \frac{Q_2^2}{2(32,2)(0,0085)^2} (0,022 * \frac{0,74}{0,104} + 0,19 + (1,8 * 2) + 0,3 + (0,4 * 4))$$

$$h_2 = 0.164 = 1256,42Q_2^2$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{0,164}{1256,42}}$$

$$Q'_2 = 0.0114 \rightarrow V'_2 = 1.34 \text{ ft/s}$$

Repetimos el proceso con las tuberías 3 y 4 para hallar Q_3 y Q_4 :

$$h_1 = 0.164 \text{ ft} = h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} + K_{Valv} \frac{V'_3{}^2}{2g} + K_{Tes} \frac{V'_3{}^2}{2g}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{Valv} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{Tes} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_3 = \frac{Q_3^2}{2gA_3^2} (f'_3 * \frac{l_3}{D} + K_{Valv} + K_{Tes})$$

$$0.164 \text{ ft} = h_3 = \frac{Q_3^2}{2(32,2)(0.0085)^2} (0,022 * \frac{0,72}{0,104} + (0,19 * 4) + (1,8 * 2) + 0,3)$$

$$h_3 = 0.164 = 1034,19Q_3^2$$

$$Q_3 = \sqrt{\frac{0,164}{1034,19}}$$

$$Q'_3 = 0.0126 \rightarrow V'_3 = 1.48 \text{ ft/s}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_4 = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{Valv} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{Tes} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{codos 90^\circ} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_4 = 55,466Q'_4{}^2 + 128,952Q'_4{}^2 + 386,855Q'_4{}^2 + 40,835Q'_4{}^2 + 1934,28Q'_4{}^2$$

$$0.164 = 2546,39Q'_4{}^2$$

$$Q_4 = \sqrt{\frac{0,164}{2546,39}}$$

$$Q'_4 = 0.00802 \rightarrow V'_4 = 0.94 \text{ ft/s}$$

A partir de estos análisis se obtienen los supuestos números de Reynolds y factores de fricción con ayuda del diagrama de Moody, con el fin de recalcular y encontrar los valores reales:

$$Re_1 = \frac{V_1 * D}{\nu} = \frac{0,94 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,089 \times 10^5. \quad \rightarrow f_1 = 0,020$$

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{1,34 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,12 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0195$$

$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{1,48 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,014 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0195$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{0,94 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,089 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,020$$

Se recalculan las pérdidas y caudales para así ajustar los cálculos con los nuevos factores de fricción encontrados:

$$h_1 = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{Valv} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{Tes} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2} + K_{codos 90^\circ} \frac{Q'_1{}^2}{2gA_1^2}$$

$$h_1 = 0,020 \frac{1,66}{0,104} * \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 0,19 \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 1,8 \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 0,3 * (2) \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2} + 0,9 * (10) \frac{(0,0080)^2}{2(32,2)(0,0085)^2}$$

$$h_1 = 0,00439 + 0,00261 + 0,00825 + 0,0248 + 0,124 = 0,164 \text{ ft}$$

$$h_1 = 0.164ft = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{Valv} \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{Tes} \frac{V'_2{}^2}{2g} + K_{codos 45^\circ} \frac{V'_2{}^2}{2g}$$

$$0.164ft = h_2 = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{Valv} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{Tes} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2} + K_{codos 45^\circ} \frac{Q'_2{}^2}{2gA_2^2}$$

$$0.164 ft = h_2 = \frac{Q_2^2}{2gA_2^2} (f'_2 * \frac{l_2}{D} + K_{Valv} + K_{Tes} + K_{codos 45^\circ})$$

$$0.164 ft = h_2 = \frac{Q_2^2}{2(32,2)(0.0085)^2} (0,0195 * \frac{0,74}{0,104} + 0,19 + (1,8 * 2) + 0,3 + (0,4 * 4))$$

$$h_2 = 0.164 = 1252,71Q_2^2$$

$$Q_2 = \sqrt{\frac{0,164}{1252,71}}$$

$$Q'_2 = 0.0114 \rightarrow V'_2 = 1.34 ft/s$$

Repetimos el proceso con las tuberías 3 y 4 para hallar Q_3 y Q_4

$$h_1 = 0.164ft = h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} + K_{Valv} \frac{V'_3{}^2}{2g} + K_{Tes} \frac{V'_3{}^2}{2g}$$

$$0.164ft = h_3 = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{Valv} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2} + K_{Tes} \frac{Q'_3{}^2}{2gA_3^2}$$

$$0.164 ft = h_3 = \frac{Q_3^2}{2gA_3^2} (f'_3 * \frac{l_3}{D} + K_{Valv} + K_{Tes})$$

$$0.164 ft = h_3 = \frac{Q_3^2}{2(32,2)(0.0085)^2} (0,0195 * \frac{0,72}{0,104} + (0,19 * 4) + (1,8 * 2) + 0,3)$$

$$h_3 = 0.164 = 1030,54Q_3^2$$

$$Q_3 = \sqrt{\frac{0,164}{1030,54}}$$

$$Q'_3 = 0.0126 \rightarrow V'_3 = 1.48 \text{ ft/s}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_4 = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{Valv} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{Tes} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2} + K_{codos 90^\circ} \frac{Q'_4{}^2}{2gA_4^2}$$

$$0.164 \text{ ft} = h_4 = 50,423Q'_4{}^2 + 128,952Q'_4{}^2 + 386,855Q'_4{}^2 + 40,835Q'_4{}^2 + 1934,28Q'_4{}^2$$

$$0.164 = 2541,34Q'_4{}^2$$

$$Q_4 = \sqrt{\frac{0,164}{2541,34}}$$

$$Q'_4 = 0.00803 \rightarrow V'_4 = 0.94 \text{ ft/s}$$

Obteniendo los caudales supuestos de cada tramo de tubería, se encuentra el total de estos:

$$\Sigma Q' = 0,0080 + 0,0114 + 0,0126 + 0,00803$$

$$\Sigma Q' = 0,040 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

A partir del cálculo anterior se encuentran los caudales reales en cada tramo:

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,0080}{0,040} * 0,032 = 0,00640 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

$$Q_2 = \frac{Q'_2}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,0114}{0,040} * 0,032 = 0,00912 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

$$Q_3 = \frac{Q'_3}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,0126}{0,040} * 0,032 = 0,0101 \text{ ft}^3/\text{seg.}$$

$$Q_4 = \frac{Q'_4}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00803}{0,040} * 0,032 = 0,00642 ft^3/seg.$$

$$\sum Q = 0,00640 + 0,00912 + 0,0101 + 0,00642$$

$$\sum Q = 0,032 ft^3/seg.$$

Se observa que son diferentes los caudales, el expulsado por la bomba y el encontrado teóricamente a la salida de los tramos en paralelo. Se precede a hallar las velocidades reales y los factores de fricción:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{0,00640}{0,0085} = 0,75 ft/seg.$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{0,00912}{0,0085} = 1,07 ft/seg.$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{A} = \frac{0,0101}{0,0085} = 1,19 ft/seg.$$

$$V_4 = \frac{Q_4}{A} = \frac{0,00642}{0,0085} = 0,75 ft/seg.$$

Números de Reynolds y factores de fricción reales:

$$Re_1 = \frac{V_1 * D}{\nu} = \frac{0,75 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,071 \times 10^5. \quad \rightarrow f_1 = 0,020$$

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{1,07 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,101 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0195$$

$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{1,19 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,113 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0195$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{0,75 * 0,0416}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,071 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,020$$

9. RESULTADOS

9.1 RESULTADOS TEÓRICOS.

En ambos bancos de pruebas se pudo encontrar que se cumplen los conceptos principales que rigen un sistema de tuberías en paralelo:

- ✓ El caudal total es la suma del caudal que pasa por cada uno de los tramos que conforman el sistema.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

- ✓ La pérdida de carga total es igual a la pérdida de carga en cada una de las tuberías del sistema.

$$\Delta h_T = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$$

Para determinar la caída de presión en unidades presentes en los manómetros instalados en los bancos de pruebas, se utilizó la siguiente conversión:

$$1 \text{ in } H_2O = 2.54 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$$

$$1 \text{ psi} = 0.0703 \text{ kgf/cm}^2$$

$$1 \text{ ft } H_2O \cdot \frac{12 \text{ in}}{1 \text{ ft}} = 12 \text{ in } H_2O$$

$$12 \text{ in } H_2O \cdot \frac{2.54 \times 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2}{1 \text{ in } H_2O} = 0.03048 \text{ kgf/cm}^2$$

$$0.03048 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \frac{1 \text{ psi}}{0.0703 \text{ kgf/cm}^2} = 0.43 \text{ psi}$$

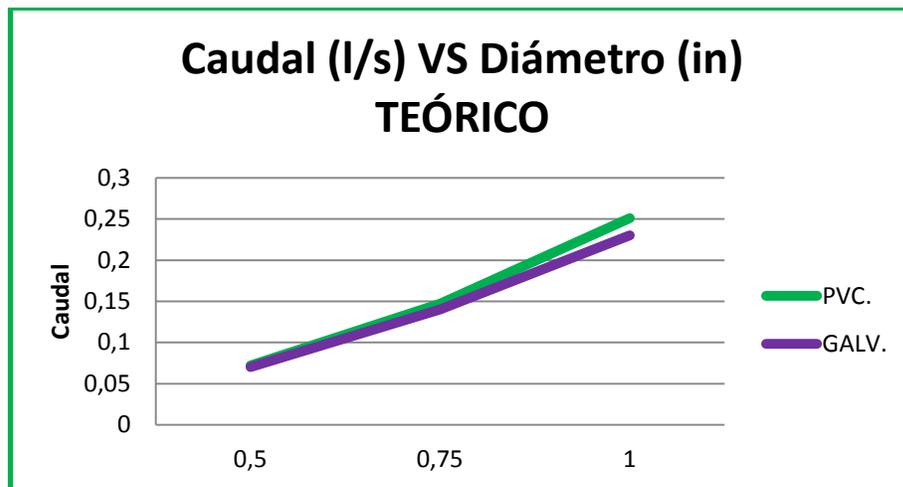
9.1.1. Resultados Teóricos Banco De Pruebas No.1.

Realizados los cálculos correspondientes al banco de pruebas No.1, basados en la teoría de un sistema de tuberías en paralelo, se obtuvieron los siguientes resultados en cuanto a caída de presión, velocidad y caudal que se transporta por cada uno de los tramos:

Tramo	Material	Diámetro (in)	C.P.T. (ft de H ₂ O)	C.P.T. (in de H ₂ O)	C.P.T. (psi)	V.T. (ft/s)	C.T. (ft ³ /s)	C.T. (l/s)
1	PVC	1	0,77	9,24	0,33	1,7	0,0092	0,26
2		¾				1,73	0,00518	0,147
3		½				2,0	0,00262	0,074
4	Galv.	½				1,9	0,00247	0,07
5		¾				1,68	0,00504	0,14
6		1				1,34	0,00722	0,20

Donde C.P.T.= Caída de Presión Teórica. ; Galv.: Galvanizado. ; V.T.: Velocidad teórica. ; C.T.: Caudal teórico.

Tabla 5: Resultados teóricos banco de pruebas No.1.



Grafica 2: Caudal vs Diámetro (teórico).

Como podemos observar en la grafica, de acuerdo a los resultados obtenidos teóricamente, las tuberías de PVC transportaran más caudal que las tuberías galvanizadas en cada uno de los diámetros empleados en este banco de pruebas.

9.1.2. Resultados Teóricos Banco De Pruebas No. 2.

Igualmente se realizaron los respectivos cálculos para el banco de pruebas No.2, el cual arrojo los siguientes resultados:

Núm. Tramo	Material	Diámetro (in)	Caída de Presión Teórica (ft de H ₂ O)	Caída de Presión Teórica (in de H ₂ O)	Caída de Presión Teórica (psi)
1	PVC	1 ¼	0,26	3,12	0,11
2					
3					
4					

Tabla 6: Resultados teóricos banco de pruebas No.2.

9.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES.

9.2.1 Resultados De Ensayos Experimentales Banco De Pruebas No. 1.

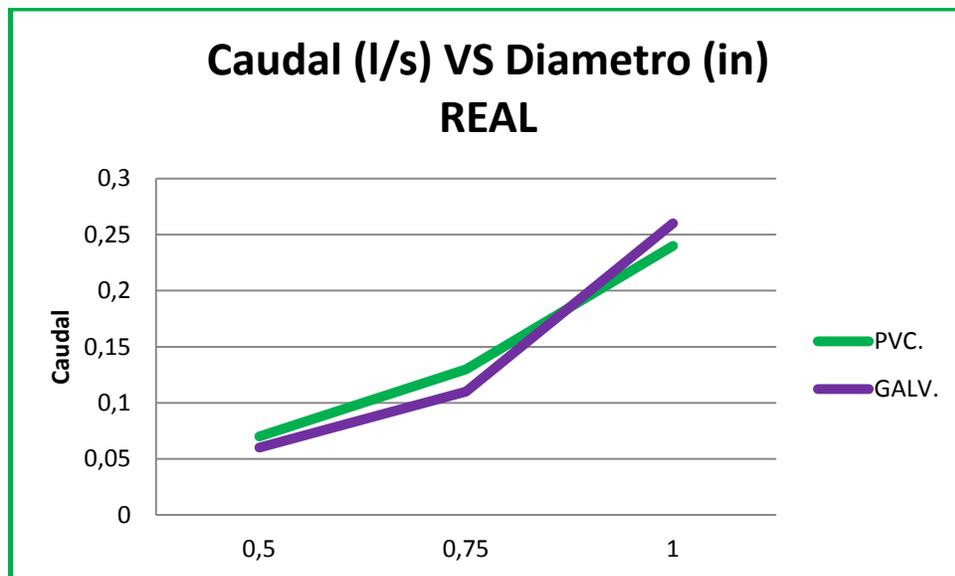
Se realizaron varios ensayos en el banco de prueba No.1 para determinar el caudal real que pasa por cada una de las tuberías, teniendo en cuenta la variación del diámetro y del tipo de material. Por lo cual los valores ingresados en la siguiente tabla corresponden a un promedio de los valores tomados:

Material	Diámetro	Válvulas Abiertas	Caudal Real (l/s)
PVC	1"	Todas	0.24
		Solo la del tramo	0.92
	¾"	Todas	0.13
		Solo la del tramo	0.78
	½"	Todas	0.07
		Solo la del tramo	0.70
Galvanizado	½"	Todas	0.06
		Solo la del tramo	0.72
	¾"	Todas	0.11
		Solo la del tramo	0.84
	1"	Todas	0.26
		Solo la del tramo	0.93

Tabla 7: Caudales Reales Banco de Prueba No. 1.

Pruebas	Presiones (psi)	
	Entrada	Salida
Todas las válvulas cerradas	14	0
Todas las válvulas abiertas	4.2	4
Solo Tuberías PVC	4.2	3.8
Solo Tuberías Galvanizadas	4.2	3.9

Tabla 8: Presiones Reales Banco de Pruebas No.1.



Grafica 3: Caudal vs. Diámetro (real).

En la grafica observamos que el caudal se comporta de una manera similar a como se mostraba en la grafica 2, vemos que en las pruebas la tubería de galvanizado de 1in transporta más fluido que la tubería de PVC del mismo diámetro, esto es debido a la presión de la bomba, ya que las tuberías de PVC se encuentran a mayor altura, y por lo tanto la presión que ejerce la bomba es un poco ineficiente para subir y/o transportar el agua a dicha altura, en cambio las tuberías de galvanizado se encuentran por debajo y la presión de la bomba es optima.

De igual manera se analizó la caída de presión que ocurre en cada tramo del banco de pruebas, tomando valores cuando solo se abre la válvula que se encuentra en el tramo analizado. Para así demostrar las diferencias de presión teniendo en cuenta los dos tipos de materiales de las tuberías (PVC e hierro galvanizado), la altura en que se encuentran y su respectivo diámetro.

Núm. Tramo	Material	Diámetro	Válvulas Abiertas	Presiones Reales (psi)		Caída de Presión (psi)
				Entrada	Salida	
1	PVC	1"	Solo la del tramo	4.6	3.8	0.8
2		¾"		5.6	3.2	2.4
3		½"		7.7	2	5.7
4	Galv.	½"	Solo la del tramo	7.5	2.2	5.3
5		¾"		5.8	3	2.8
6		1"		4.4	3.7	0.7

Tabla 9: Presiones Experimentales Por Tramos Del Banco De Pruebas No.1.

9.2.2. Resultados De Ensayos Experimentales Banco De Pruebas No.2.

De igual manera se realizaron ensayos en el banco de prueba No. 2 y se encontró que las perdidas obtenidas en el cálculo teórico corresponden a la caída de presión que ocurre en cada tramo de tubería.

Tramo	Presiones Reales (psi)		Perdida Teórica (psi)	Caída de Presión Real (psi)
	Entrada	Salida		
1	4.6	3.8	0.7	0.8
2	4.4	3.8		0.6
3	4.4	3.8		0.6
4	4.6	3.8		0.8
Promedio de Perdida Real				0.7

Tabla 10: Presiones Experimentales Banco De Pruebas No.2.

El promedio de las pérdidas que se encontraron experimentalmente es de 0.7 *psi*, lo cual demuestra que la teoría se cumple aproximadamente en un 95%, es decir, que en un sistema de tuberías en paralelo, las pérdidas o caída de presión de cada uno de los tramos debe ser igual al otro, independientemente de su configuración como se demostró en esta ocasión, ya que los 4 tramos empleados para este banco de pruebas consta de un número y configuración distinta de accesorios. Además podemos concluir que la caída de presión en este banco de pruebas es mucho mayor experimentalmente que teóricamente, ya que los valores obtenidos en la teoría son de 0,11 *psi*, diciéndonos esto que los accesorios, longitud y demás pérdidas tienen un mayor impacto de cómo indica la teoría. Cabe resaltar que la tabla 10, indica los valores cuando solo se transporta agua o fluido por ese tramo, afectando así la presión del sistema en paralelo, ya que al estar todos los tramos en funcionamiento la caída de presión del banco es de 0,2 *psi* aproximadamente.

9.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES.

9.3.1. Banco De Pruebas Núm. 1.

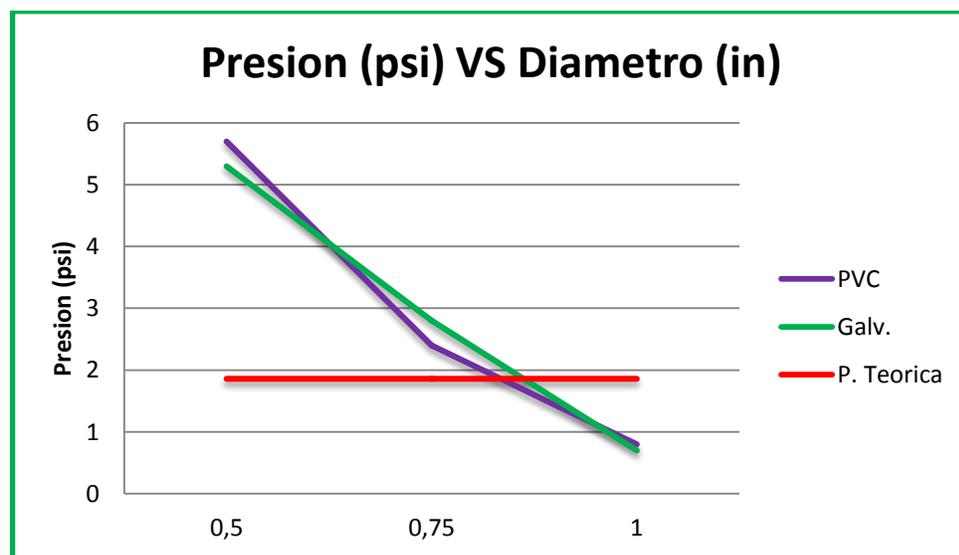
Núm. Tramo	Material	Diámetro	Caudal Teórico (l/s)	Válvulas Abiertas	Caudal Real (l/s)
1	PVC	1"	0,26	Todas	0.24
				Solo la del tramo	0.92
2		¾"	0,147	Todas	0.13
				Solo la del tramo	0.78
3		½"	0,074	Todas	0.07
				Solo la del tramo	0.70
4	Galv.	½"	0,07	Todas	0.06
				Solo la del tramo	0.72
5		¾"	0,14	Todas	0.11
				Solo la del tramo	0.84
6		1"	0,20	Todas	0.26
				Solo la del tramo	0.93

Tabla 11: Análisis De Caudal Banco De Pruebas No.1.

En este banco de pruebas podemos observar que los datos teóricos difieren un poco de los datos tomados en los ensayos, lo cual nos dice que las pérdidas producidas por los efectos de longitud y accesorios es cercana y significativa como se obtuvo teóricamente, ya que los caudales teóricos son obtenidos a partir de las pérdidas producidas por dichos factores.

Núm. Tramo	Material	Diámetro	Caída de Presión teórica (psi)	Válvulas Abiertas	Presiones Reales (psi)		Caída de Presión (psi)
					Entrada	Salida	
1	PVC	1"	1.86	Solo la del tramo	4.6	3.8	0.8
2		¾"			5.6	3.2	2.4
3		½"			7.7	2	5.7
4	Galv.	½"		Solo la del tramo	7.5	2.2	5.3
5		¾"			5.8	3	2.8
6		1"			4.4	3.7	0.7

Tabla 12: Análisis De Presión Banco De Pruebas No.1.



Grafica 4: Presión vs. Diámetro (real).

La caída de presión individual por tramo en el banco de pruebas Núm. 1., varía con relación al diámetro de la tubería como se observa, ya que fueron tomadas

utilizando solo el tramo, por lo cual en la tuberías de $\frac{1}{2}$ in la presión de entrada se eleva a los valores de más de 7 *psi* y la salida a valores aproximados a 2 *psi*, oscilando la caída de presión entre 5 y 6 *psi* como se muestra en la gráfica, por lo tanto la caída de presión es mucho mayor que en los tramos de 1 y $\frac{3}{4}$ in, lo cual nos dice que experimentalmente hay mucha más caída de presión que teóricamente en un análisis de tramo por tramo, mientras que funcionando todos los tramos la caída de presión es de tan solo 0,2 *psi* como pudimos observar en la tabla 8 y está muy cerca de la caída de presión teórica que es 0,33 *psi*, lo cual nos dice que las perdidas por longitud, accesorios, contracción, expansión, entrada y salida son tan significativas como se obtuvo teóricamente y se presenta un margen de error de 39,4% en dicha caída de presión.

9.3.2. Margen De Error De Resultados Del Caudal Teórico Vs. Caudal Real.

Teniendo los valores reales del caudal que pasa por cada tramo de tubería del Banco de Prueba No. 1 (ver Figura 23), se realiza el cálculo del porcentaje de error con respecto al valor que se encontró teóricamente:

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\%$$

VT (Valor Teórico): es el valor o resultado que dice en los libros o que se debe obtener.

VE (Valor Experimental): es el que se obtuvo experimentalmente.

Los valores empleados a continuación para datos reales son los correspondientes a los valores cuando se encontraban todas las válvulas abiertas, el cual es la forma en cómo funciona un sistema de tuberías en paralelo.

Tramo 1

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,23 - 0,24}{0,23} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = -4,3\%$$

Tramo 2

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,18 - 0,13}{0,18} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = 27,8\%$$

Tramo 3

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,042 - 0,07}{0,042} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = -66,7\%$$

Tramo 4

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,042 - 0,06}{0,042} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = -42,8\%$$

Tramo 5

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,17 - 0,11}{0,17} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = 35,3\%$$

Tramo 6

$$\frac{VT - VE}{VT} \times 100\% = \frac{0,24 - 0,26}{0,24} \left(\frac{l}{s}\right) \times 100\% = -8,3\%$$

Promediadamente el margen de error se encuentra en un 30,9%, lo cual nos indica que la teoría difiere de lo experimental o real en esta cifra, para este caso en específico pudimos notar que los valores teóricos son menores que los experimentales en su mayoría, concluyendo así que las pérdidas o las caídas de presiones por los factores mencionados a lo largo del documento (accesorios, longitud, entre otros), son realmente cercanas a lo real.

	Caudal teórico Ft/s	Caudal teórico L/s	Caudal real L/s	% de Error
Tramo 1	0,00809	0,23	0,24	-4,3%
Tramo 2	0,00649	0,18	0,13	27,8%
Tramo 3	0,00148	0,042	0,07	-66,7%
Tramo 4	0,00150	0,042	0,06	-42,8%
Tramo 5	0,00599	0,17	0,11	35,3%
Tramo 6	0,00856	0,24	0,26	-8,3%
PROMEDIO				30,9%

Tabla 13: Margen de Error de Caudales Banco de Prueba No. 1.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR.

GUIA DE LABORATORIO DE MEDICIÓN DE CAUDAL Y CAÍDA DE PRESIÓN EN TUBERÍAS PARALELAS.

1. INTRODUCCIÓN.

Un sistema de tuberías en paralelo está formado por un conjunto de tuberías que nacen y confluyen en un mismo punto.

Para un sistema genérico de n tuberías en paralelo se verifica que:

- ✓ El caudal total es la suma de los caudales individuales de cada una de las tuberías (ecuación de continuidad).

$$Q_T = \sum_{i=1}^n Q_i$$

1. La pérdida de carga total es igual a la pérdida de carga en cada una de las tuberías del sistema:

$$\Delta h_T = \Delta h_i = \Delta h_{fi} + \Delta h_{mi} \quad \text{donde } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

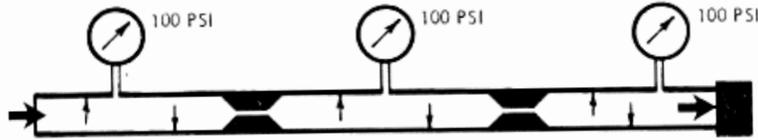
Donde h_{fi} y h_{mi} son las pérdidas primarias y secundarias en cada una de las tuberías del sistema.

2. MARCO TEORICO.

Las pérdidas en los sistemas de tuberías se refieren a la pérdida de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las contiene. Las pérdidas pueden ser continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc.

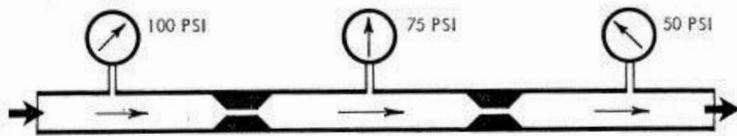
La caída o pérdida de presión en tuberías "solo" se produce cuando el fluido está en "movimiento" es decir cuando hay circulación. Cuando esta cesa, caso de la figura 1 las caídas de presión desaparecen y los tres manómetros darán idéntico valor.

Figura 1.



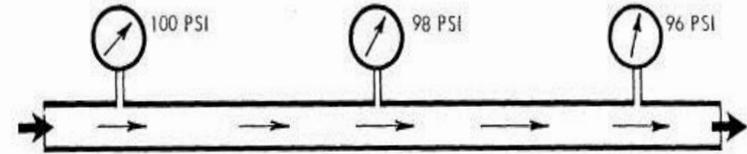
Si al mismo circuito de la figura anterior le retiramos el tapón del extremo aparecerán pérdidas de presión por circulación que podemos leer en los manómetros de la Fig.2. Cuando más larga sea la tubería y más severas las restricciones mayores serán las pérdidas de presión.

Figura 2.



Si quitamos las restricciones una gran proporción de la pérdida de presión desaparece. En un sistema bien dimensionado, la pérdida de presión natural a través de la tubería y válvulas será realmente pequeña como lo indican los manómetros de la Fig. 3.

Figura 3.



3. OBJETIVO.

Aplicar los fundamentos teóricos sobre la medición de caudal y caída de presión en redes de tuberías paralelas y sobre los principales parámetros hidráulicos del sistema.

3.1 Objetivos Específicos.

2. Calcular y/o encontrar el material (PVC o Galvanizado) que presenta mayor pérdida en el banco de pruebas.
3. Encontrar el tramo de tubería que presenta mayor pérdida en cada uno de los bancos de pruebas.

4. Comparar los datos teóricos obtenidos mediante el diseño del banco y los datos reales tomados en la práctica de laboratorio.

4. MATERIALES Y EQUIPO A UTILIZAR.

- 4.1 Bancos de pruebas tuberías en paralelo No.1 y No.2.
- 4.2 Bomba para bancos de prueba GUNT.
- 4.3 Válvulas manuales.
- 4.4 Medidores de caudal y de presión.

5. PROCEDIMIENTO.

1. Realice el montaje del banco de prueba No.1.
2. Suministre de flujo eléctrico a la Bomba ubicada en la base de pruebas GUNT, de acuerdo al manual de operación.
3. Realice la conexión del sensor medidor de caudal a la pantalla y al flujo eléctrico (solo para el banco de prueba No.1).

4. Arranque el equipo de acuerdo a las instrucciones dadas por el auxiliar del laboratorio.
5. Realice las pruebas necesarias para medir el caudal y la presión del sistema.
6. Halle el caudal total variando el número de tramos utilizados. (Ejemplo: utilice los 6 tramos, luego 5, luego 4, y así sucesivamente hasta usar solo un tramo de tubería).
7. Halle el caudal total utilizando solo los tramos de PVC.
8. Halle el caudal total utilizando solo los tramos de Galvanizado.
9. Desmonte y cambio del banco de prueba cuando vaya a realizar el ensayo en uno diferente.
10. Apague el equipo de acuerdo al manual de operación.
11. Realice el montaje del banco de prueba No. 2.
12. Realice nuevamente las instrucciones dadas anteriormente.

13. Halle el caudal total teniendo en cuenta las pérdidas por causa de las diferentes curvas (90°, 45°, 180°) y válvulas. (Ejemplo: utilice los 4 tramos, luego 3, y así sucesivamente hasta usar solo un tramo de tubería).

6. ACTIVIDADES DE FUNDAMENTACION TEORICA.

6.1 Defina los siguientes conceptos.

Caudal:

Presión:

Pérdidas:

Ecuación de Bernoulli:

Diagrama de Moody:

Factor de fricción:

Rugosidad:

Viscosidad dinámica:

6.2 Mencione las principales diferencias entre un sistema de tuberías en serie y un sistema de tuberías en paralelo, muestre un esquema.

6.3 Mencione los tipos de pérdidas que se presentan en los sistemas de tuberías.

6.4 Mencione los factores de pérdidas para los siguientes accesorios de tuberías: Válvula, Entrada, Codos, Salida, Contracción, Expansión.

7. ANÁLISIS E INTERPRETACION DE DATOS.

Luego de haber realizados las anteriores pruebas en el banco de prueba No. 1:

- ✓ Determine el caudal real que está pasando por cada tubería con el sensor de caudal.

- ✓ Compare el comportamiento de cada uno de los tramos de PVC con los tramos de tubería Galvanizada.
- ✓ Calcule las pérdidas en cada una de las pruebas realizadas.
- ✓ Analice los resultados y determine si se cumplen o no los criterios de los sistemas de tuberías en paralelo, sino cumple, diga cuál es el tramo de tubería que presenta mayor pérdida y porque.
- ✓ Como es la relación entre las pérdidas y el diámetro (grafique).

Luego de haber realizados las anteriores pruebas en el banco de prueba No. 2 responda:

- ✓ Calcule las pérdidas en cada una de las pruebas realizadas.
- ✓ Analice los resultados y determine si se cumplen o no los criterios de los sistemas de tuberías en paralelo, sino cumple, diga cuál es el tramo de tubería que presenta mayor pérdida y porque.

- ✓ Como es la relación entre las perdidas y el diámetro (grafique).

8. CONCLUSIONES.

9. BIBLIOGRAFÍA.

CONCLUSIONES

Al concluir este trabajo de grado se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Al hacer los ensayos en el banco de prueba No.1 se concluyo que la altura en la que se encuentran las tuberías es de vital importancia para que el caudal fluya correctamente independientemente del diámetro de la tubería. Al realizar el cálculo teórico esto no se tiene en cuenta.
- La caída de presión en el banco de pruebas Núm.2 confirma que las pérdidas en un sistema de tuberías en paralelo es la misma en cada uno de los tramos del mismo sin importar la configuración ni el número de accesorios presentes en el tramo.
- Al estar ambos bancos de pruebas fluctuando en un rango de un número de Reynolds mayor a 4000, entonces podemos afirmar que el régimen del flujo en dichos bancos se encuentra en un estado de flujo turbulento, el cual se caracteriza por presentar un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional, pudiendo así influenciar un poco la medición del sensor a pesar de estar calibrado y certificado.
- Las tuberías de Hierro Galvanizado presentaron mayor porcentaje o margen error en las mediciones de caudal, por lo cual podemos concluir que el efecto de la rugosidad del material afecta el transporte del fluido por el ducto o tubo. En este caso los materiales empleados fueron PVC y Galvanizado teniendo como rugosidad 0,0015 y 0,15 *mm* respectivamente, lo cual afirma que entre mayor es la rugosidad mas perdida presenta el material, es decir la adherencia del fluido a las paredes de la tubería es mayor.

- Pudimos observar que se cumple en un 100% la teoría de que entre menor es el diámetro de la tubería por la cual se transporta un fluido, mayor será su velocidad en ambas tuberías del banco de pruebas Núm. 1., ya que la tuberías que experimentalmente presentaron mayor velocidad fueron la de $\frac{1}{2}$ in, con una velocidad aproximada de 1,935 ft/s.
- Se observa que el método de Streeter cubre más pérdidas que el anterior análisis planteado, por lo cual los caudales encontrados resultan mayores. Teniendo en cuenta que el método propuesto por Streeter está basado en análisis previos y ecuaciones previas y este análisis es basado en un método simple matemático.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ EDILBERTO VÁSQUEZ AGUILAR, RAFAEL ENRIQUE GUTIÉRREZ MENESES, Diseño, construcción y montaje de un banco de pruebas para la medición del caudal en placa de orificio y vertedero, Trabajo de grado Universidad Tecnológica de Bolívar, 2002.
- ✓ VÍCTOR L. STREETER, Mecánica de los fluidos, Mac Graw Hill, Novena edición, 2000.
- ✓ www.ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%202.Conducciones%20forzadas/tutorial_10.htm
- ✓ www.jorgeenrique26.blogspot.com/2009/06/perdidas-menores-en-tuberias.html
- ✓ Apuntes propios de Mecánica de Fluidos, Maquinas Hidráulicas.

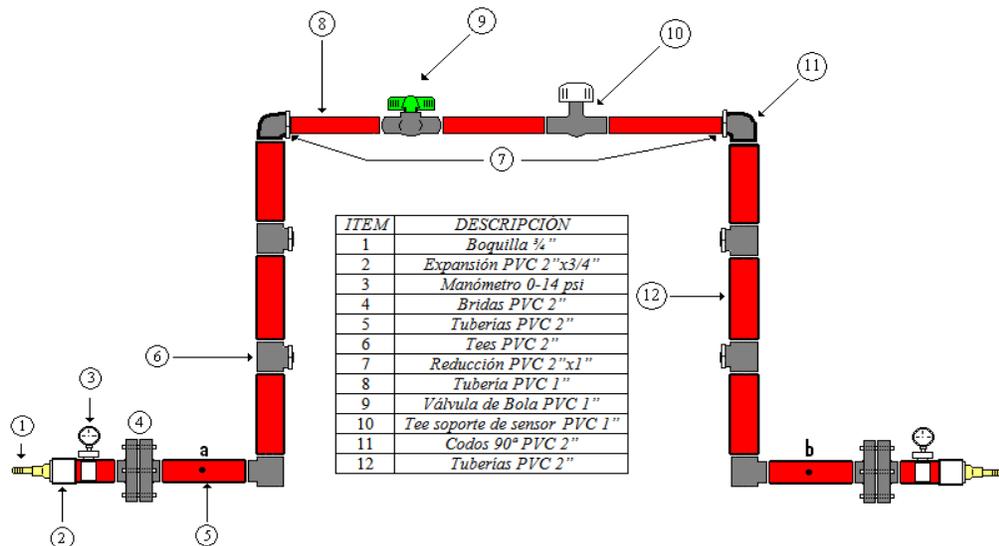
ANEXOS

ANEXO 1. METODO STREETER PARA CALCULOS DE CAUDALES

BANCO DE PRUEBA No.1

Se hallan las pérdidas supuestas por tramo. El análisis se realiza desde el punto a hasta el punto b y se determina que el caudal que pasa por estos puntos es el mismo de entrada. Se ignoran las pérdidas producidas por las intersecciones.

Tramo 1



$$h'_1 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_T + h_{sal}$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V'_1{}^2}{2g} = 0,018 * \frac{3,21}{0,083} * \frac{(1,49)^2}{2 * 32,2} = 0,0239ft.$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{tramo1}}{A_2''} = \frac{0,0054}{0,0218} = 0,2 \rightarrow C_c = 0,632$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_1'^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,632} - 1\right)^2 * \frac{(1,49)^2}{2*32,2} = 0,0116ft. ;$$

$$h_{valv} = K \frac{V_1'^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,49)^2}{2*32,2} = 0,00655ft.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_1}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{1in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,5625$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_1'^2}{2g} = 0,5625 * \frac{(1,49)^2}{2*32,2} = 0,0193ft.$$

$$h_{codo} = K \frac{V_1'^2}{2g} = (2) * 0,9 * \frac{(1,49)^2}{2*32,2} = 0,062ft.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC²⁷:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_1'^2}{2g} = 0,3 * (4) * \frac{(1,49)^2}{2*32,2} = 0,0414ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_1'^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(1,49)^2}{2 * 32,2} = 0,124ft$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_T + h_{sal}.$$

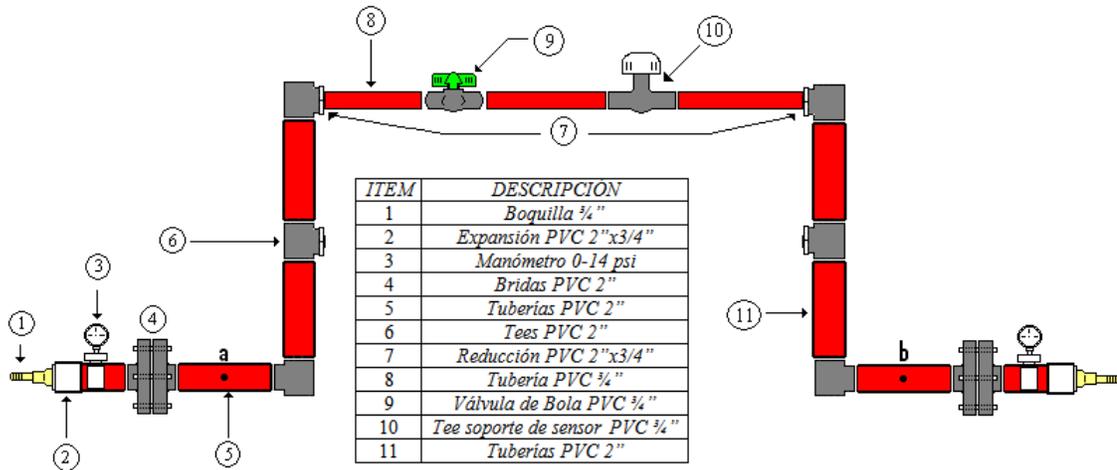
$$h'_1 = 0,0167 + 0,0239 + 0,0116 + 0,00655 + 0,0193 + 0,062 + 0,0414 + 0,124 + 0,0335 = 0,338ft.$$

La sumatoria de perdidas en todos los tramos de tubería es la misma (en tuberías paralelas) y a partir de esto se buscan las velocidades en las que se transporta el fluido en cada uno de estos.

²⁷ Saldarriaga, Juan G. Hidráulica de Tuberías, Mc Graw Hill. 2000

Se parte de la suposición de que el flujo que pasa por las tuberías se encuentra en régimen turbulento, es decir, $f = 0.022$.

Tramo 2



$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 ft.$$

$$h_{long} = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_{2^2}}{2g} = 0,022 * \frac{2,45}{0,0625} * \frac{V'_{2^2}}{2*32,2} = 0,0133V'_{2^2}.$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_2}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_{2^2}}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_{2^2}}{2*32,2} = 0,0056V'_{2^2}.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_{2^2}}{2g} = 0,19 * \frac{V'_{2^2}}{2*32,2} = 0,0029V'_{2^2}.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_{2^2}}{2g} = 0,738 * \frac{V'_{2^2}}{2*32,2} = 0,0114V'_{2^2}.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_{sal}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in} \right)^2 \right]^2 = 0,738.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \quad y \quad K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{V'_2{}^2}{2 * 32,2} = 0,0140V'_2{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{V'_2{}^2}{2 * 32,2} = 0,0838V'_2{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

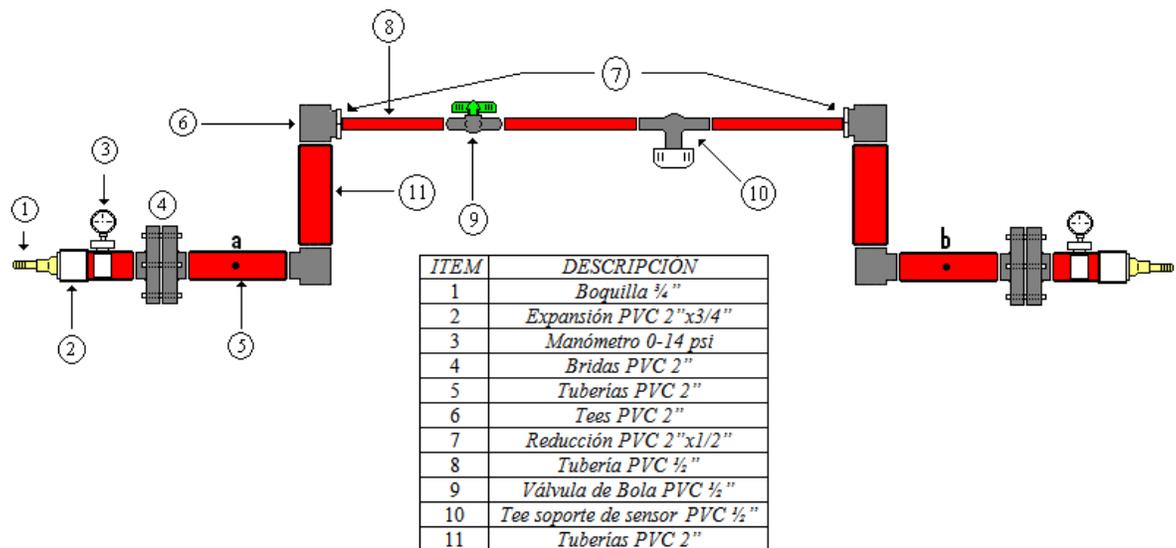
$$0.33 = 0,0167 + 0,0133V'_2{}^2 + 0,0056V'_2{}^2 + 0,0029V'_2{}^2 + 0,0114V'_2{}^2 + 0,0140V'_2{}^2 + 0,0559V'_2{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_2{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0133 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0114 + 0,0140 + 0,0838} = 2,20.$$

$$V'_2 = \sqrt{2,20} = 1,48ft/seg$$

Tramo 3

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$



Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 ft.$$

$$h_{long} = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{1,96}{0,0416} * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0161V'_3{}^2 .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_3{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_3{}^2 . ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_3}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_3{}^2 .$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,878 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0136V'_3{}^2 .$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_3}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_3{}^2}{2 * 32,2} = 0,00466V'_3{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_3{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_3{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

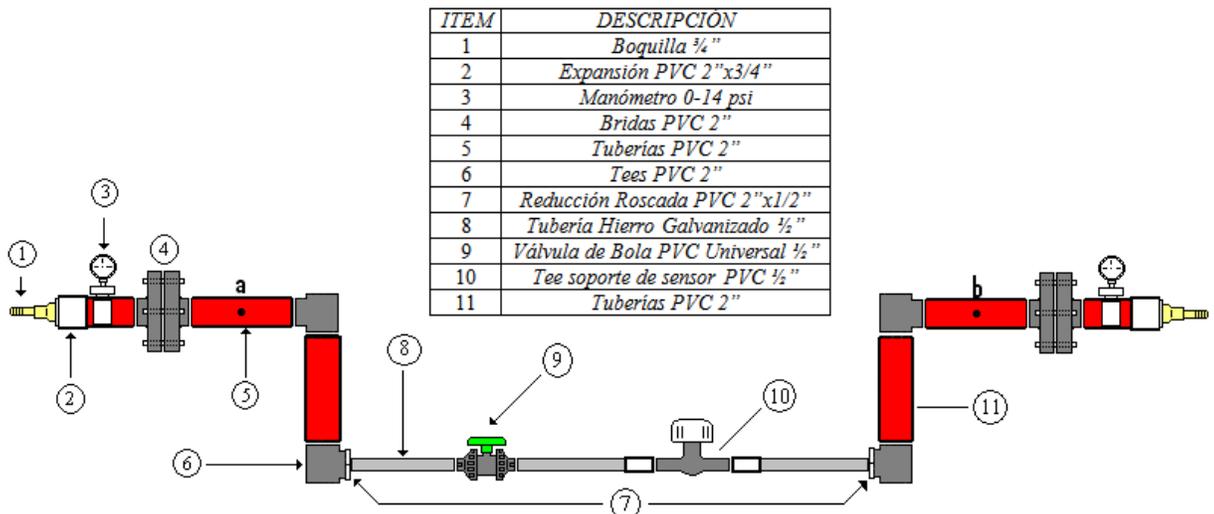
$$0.33 = 0,0167 + 0,0161V'_3{}^2 + 0,0056V'_3{}^2 + 0,0029V'_3{}^2 + 0,0136V'_3{}^2 + 0,00466V'_3{}^2 + 0,0559V'_3{}^2 + 0,0335$$

$$V'_3{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0161 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0136 + 0,00466 + 0,0559} = 2,92$$

$$V'_3 = \sqrt{2,92} = 1,70ft/seg$$

$$V'_3 = 1,70ft/seg$$

Tramo 4



$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{1,787}{0,0416} * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0146V'_4{}^2.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_4{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_4{}^2.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_4}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_4{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,878 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0136V'_4{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_4}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_4{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_4{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_4{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

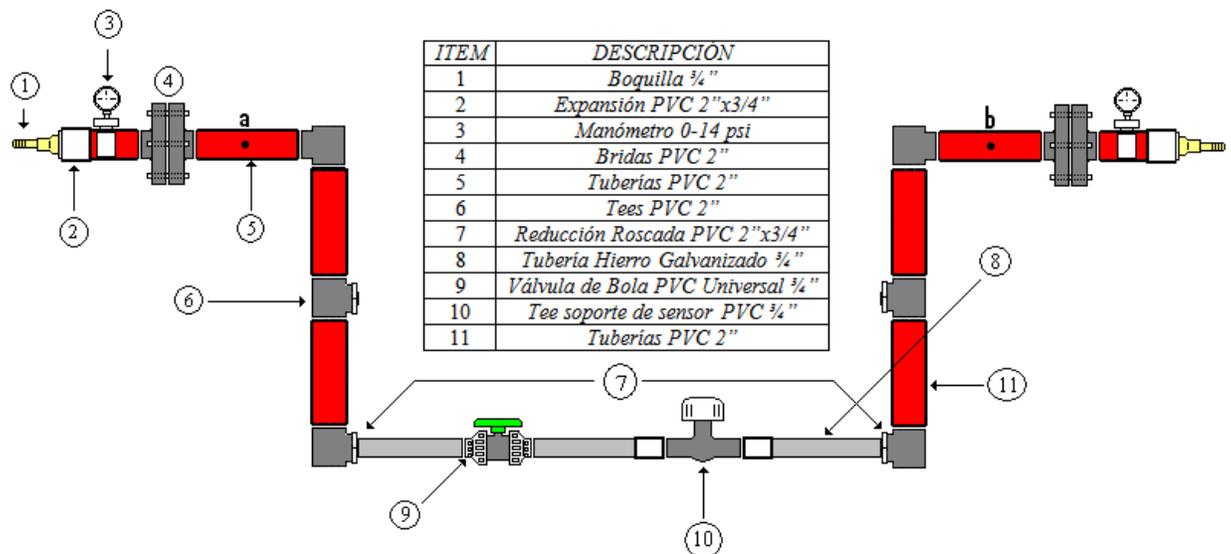
$$h'_1 = h'_4 = 0.33 = 0,0167 + 0,0146V'_4{}^2 + 0,0056V'_4{}^2 + 0,0029V'_4{}^2 + 0,0136V'_4{}^2 + 0,00466V'_4{}^2 + 0,0559V'_4{}^2 + 0,0335 .$$

$$V'_4{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0146 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0136 + 0,00466 + 0,0559} = 2,96$$

$$V'_4 = \sqrt{2,96} = 1,72 \text{ ft/seg}$$

$$V'_4 = 1,72 \text{ ft/seg}$$

Tramo 5



$$h'_5 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 \text{ ft.}$$

$$h_{long} = f'_5 * \frac{l_5}{D} * \frac{V'5{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{2,27}{0,0625} * \frac{V'5{}^2}{2*32,2} = 0,0124V'5{}^2 .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_5{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_5{}^2.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_5}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_5{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,738 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0114V'_5{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_5}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0140V'_5{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{V'_5{}^2}{2 * 32,2} = 0,0838V'_5{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

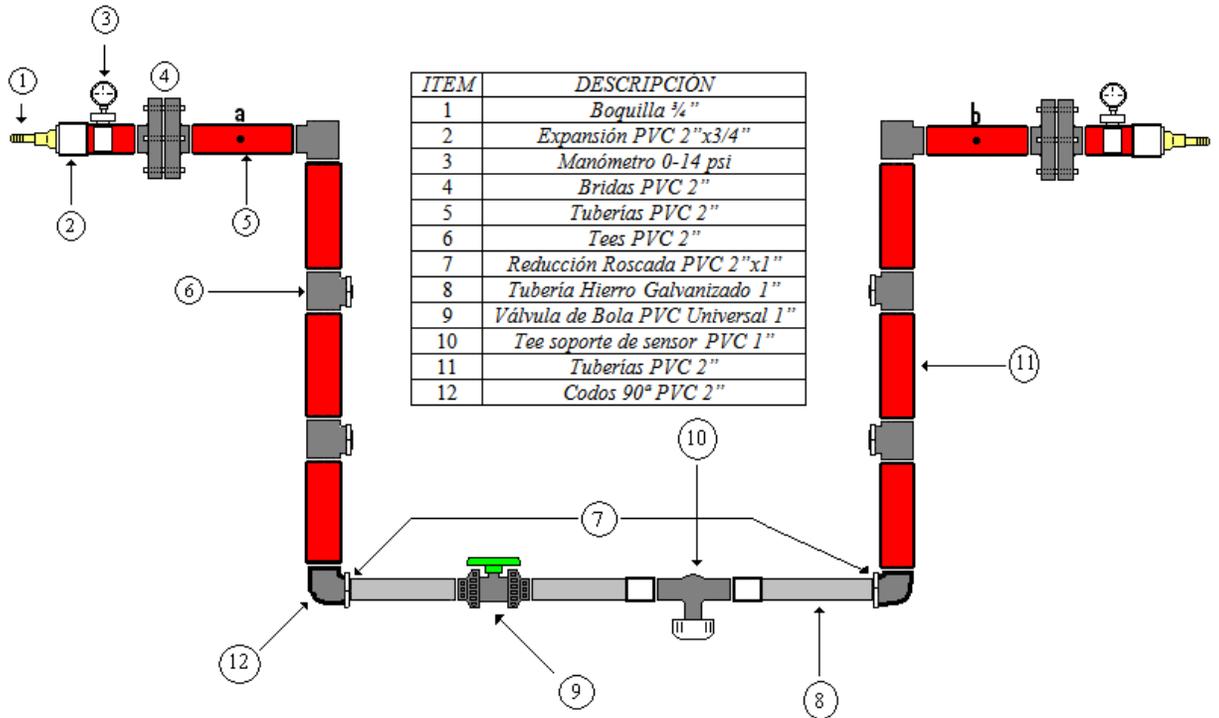
$$h'_1 = h'_5 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0,33 = 0,0167 + 0,0124V'_5{}^2 + 0,0056V'_5{}^2 + 0,0029V'_5{}^2 + 0,0114V'_5{}^2 + 0,0140V'_5{}^2 + 0,0838V'_5{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_5{}^2 = \frac{0,338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0124 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0114 + 0,0140 + 0,0838} = 2,21.$$

$$V'_5 = \sqrt{2,21} = 1,48ft/seg$$

Tramo 6



$$h'_6 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 ft.$$

$$h_{long} = f'_6 * \frac{l_6}{D} * \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{2,54}{0,083} * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0104 V'_6{}^2 .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V'_6{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,632} - 1 \right)^2 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,00526 V'_6{}^2 . ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{tramo6}}{A_2''} = \frac{0,0054}{0,0218} = 0,2 \rightarrow C_c = 0,632.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0029 V'_6{}^2 .$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,5625 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,00873V'_6{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_6}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{1in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,5625.$$

$$h_{codo} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 2 * 0,9 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0279V'_6{}^2.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,3 * (4) * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0186V'_6{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_6{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_6{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_6 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0.33 = 0,0167 + 0,0104V'_6{}^2 + 0,00526V'_6{}^2 + 0,0029V'_6{}^2 + 0,0873V'_6{}^2 + 0,0279V'_6{}^2 + 0,0186V'_6{}^2 + 0,0559V'_6{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_6{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0104 + 0,00526 + 0,0029 + 0,0873 + 0,0279 + 0,0186 + 0,0559} = 1,38$$

$$V'_6 = \sqrt{1,38} = 1,18ft/seg$$

$$V'_6 = 1,18ft/seg$$

A partir de estos análisis se obtienen los supuestos números de Reynolds y factores de fricción con ayuda del diagrama de Moody:

$$Re'_2 = \frac{V'_{l2} * D}{\nu} = \frac{1,48 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,084 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_2 = 0,0115$$

$$Re'_3 = \frac{V'_{l3} * D}{\nu} = \frac{1,70 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,064 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_3 = 0,0124$$

$$Re'_4 = \frac{V'_{l4} * D}{\nu} = \frac{1,72 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,065 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_4 = 0,0403$$

$$Re'_5 = \frac{V'_{l5} * D}{\nu} = \frac{1,48 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,085 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_5 = 0,0351$$

$$Re'_6 = \frac{V'_{l6} * D}{\nu} = \frac{1,18 * 0,083}{1,091 * 10^{-5}} = 0,09 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_6 = 0,0321$$

Se recalculan las pérdidas y velocidades para así ajustar los cálculos con los nuevos factores de fricción encontrados:

Tramo 2

$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 ft.$$

$$h_{long} = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_{l2}{}^2}{2g} = 0,0115 * \frac{2,45}{0,0625} * \frac{V'_{l2}{}^2}{2 * 32,2} = 0,007 V'_{l2}{}^2.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V'_{l2}{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1 \right)^2 * \frac{V'_{l2}{}^2}{2 * 32,2} = 0,0056 V'_{l2}{}^2.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_2}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_{l2}{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_{l2}{}^2}{2 * 32,2} = 0,0029 V'_{l2}{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,738 * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,0114V'_2{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,0140V'_2{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{V'_2{}^2}{2 * 32,2} = 0,0838V'_2{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0.33 = 0,0167 + 0,007V'_2{}^2 + 0,0056V'_2{}^2 + 0,0029V'_2{}^2 + 0,0114V'_2{}^2 + 0,0140V'_2{}^2 + 0,0838V'_2{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_2{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,007 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0114 + 0,0140 + 0,0838} = 2,31.$$

$$V'_2 = \sqrt{2,31} = 1,52ft/seg$$

Tramo 3

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,0124 * \frac{1,96}{0,0416} * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00907V'_3{}^2 .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_3{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_3{}^2 .;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_3}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_3{}^2 .$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,878 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0136V'_3{}^2 .$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_3}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_3{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_3{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_3{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$h'_1 = h'_3 = 0,33 = 0,0167 + 0,00907V'_3{}^2 + 0,0056V'_3{}^2 + 0,0029V'_3{}^2 + 0,0136V'_3{}^2 + 0,00466V'_3{}^2 + 0,0559V'_3{}^2 + 0,0335 .$$

$$V'_3{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,00907 + 0,0056 + 0.0029 + 0,0136 + 0,00466 + 0,0559} = 3,14$$

$$V'_3 = \sqrt{3,14} = 1,77 \text{ ft/seg}$$

$$V'_3 = 1,77 \text{ ft/seg}$$

Tramo 4

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035 \text{ ft.}$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158 \text{ ft.}$$

$$h_{ent} = 0,0167 \text{ ft.}$$

$$h_{long} = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,040 * \frac{1,787}{0,0416} * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0266V'_4{}^2.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_4{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_4{}^2.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_4}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_4{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,878 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,0136V'_4{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_4}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_4{}^2}{2 * 32,2} = 0,00466V'_4{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_4{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_4{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0.33 = 0,0167 + 0,0266V'_4{}^2 + 0,0056V'_4{}^2 + 0,0029V'_4{}^2 + 0,0136V'_4{}^2 + 0,00466V'_4{}^2 + 0,0559V'_4{}^2 + 0,0335$$

$$V'_4{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0266 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0136 + 0,00466 + 0,0559} = 2,64$$

$$V'_4 = \sqrt{2,64} = 1,62ft/seg$$

Tramo 5

$$h'_5 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_5 * \frac{l_5}{D} * \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,035 * \frac{2,27}{0,0625} * \frac{V'_5{}^2}{2 * 32,2} = 0,0197V'_5{}^2.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_5{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0056V'_5{}^2;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_5}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_5{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,738 * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0114V'_5{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_5}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,878.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{V'_5{}^2}{2*32,2} = 0,0140V'_5{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_5{}^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{V'_5{}^2}{2 * 32,2} = 0,0838V'_5{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_5 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0,33 = 0,0167 + 0,0197V'_5{}^2 + 0,0056V'_5{}^2 + 0,0029V'_5{}^2 + 0,0114V'_5{}^2 + 0,0140V'_5{}^2 + 0,0838V'_5{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_5{}^2 = \frac{0,338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0197 + 0,0056 + 0,0029 + 0,0114 + 0,0140 + 0,0838} = 2,10$$

$$V'_5 = \sqrt{2,10} = 1,45ft/seg$$

Tramo 6

$$h'_6 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_6 * \frac{l_6}{D} * \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,032 * \frac{2,54}{0,083} * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0151V'_6{}^2.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V'_6{}^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,632} - 1\right)^2 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,00526V'_6{}^2. ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{tramo6}}{A_2''} = \frac{0,0054}{0,0218} = 0,2 \rightarrow C_c = 0,632.$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0029V'_6{}^2.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V'_1{}^2}{2g} = 0,5625 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,00873V'_6{}^2.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_6}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{1in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,5625.$$

$$h_{codo} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = (2) * 0,9 * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0279V'_6{}^2.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 0,3 * (4) * \frac{V'_6{}^2}{2*32,2} = 0,0186V'_6{}^2.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_6{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_6{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_6{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h'_6 = h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$0.33ft = 0,0167 + 0,0151V'_6{}^2 + 0,00526V'_6{}^2 + 0.0029V'_6{}^2 + 0,0873V'_6{}^2 + 0,0279V'_6{}^2 + 0,0186V'_6{}^2 + 0,0559V'_6{}^2 + 0,0335.$$

$$V'_6{}^2 = \frac{0.338 - 0,0167 - 0,0335}{0,0151 + 0,00526 + 0.0029 + 0,0873 + 0,0279 + 0,0186 + 0,0559} = 1,35$$

$$V'_6 = \sqrt{1,35} = 1,16ft/seg$$

$$V'_6 = 1,16ft/seg$$

Se obtienen los caudales supuestos de cada tramo de tubería:

$$Q'_1 = V'_1 * A_1 = 1,49 * 0,0054 = 0,00805ft^3/seg.$$

$$Q'_2 = V'_2 * A_2 = 1,52 * 0,0030 = 0,00456ft^3/seg.$$

$$Q'_3 = V'_3 * A_3 = 1,77 * 0,0013 = 0,00230ft^3/seg.$$

$$Q'_4 = V'_4 * A_4 = 1,62 * 0,0013 = 0,00210ft^3/seg.$$

$$Q'_5 = V'_5 * A_5 = 1,45 * 0,0030 = 0,00435ft^3/seg.$$

$$Q'_6 = V'_6 * A_6 = 1,16 * 0,0054 = 0,00626ft^3/seg.$$

$$\Sigma Q' = 0,00805 + 0,00456 + 0,00230 + 0,00210 + 0,00435 + 0,00626$$

$$\Sigma Q' = 0,028ft^3/seg.$$

A partir del cálculo anterior se encuentran los caudales reales en cada tramo:

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,00805}{0,028} * 0,032 = 0,0092ft^3/seg.$$

$$Q_2 = \frac{Q'_2}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00456}{0,028} * 0,032 = 0,00521 ft^3/seg.$$

$$Q_3 = \frac{Q'_3}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00230}{0,028} * 0,032 = 0,00263 ft^3/seg.$$

$$Q_4 = \frac{Q'_4}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00210}{0,028} * 0,032 = 0,00240 ft^3/seg.$$

$$Q_5 = \frac{Q'_5}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00435}{0,028} * 0,032 = 0,00497 ft^3/seg.$$

$$Q_6 = \frac{Q'_6}{\sum Q'} * Q = \frac{0,00626}{0,028} * 0,032 = 0,00715 ft^3/seg.$$

$$\sum Q = 0,0092 + 0,00521 + 0,00263 + 0,00240 + 0,00497 + 0,00715 = 0,0316$$

$$\sum Q \approx 0,032 ft^3/seg.$$

Se observa que son iguales los caudales, el expulsado por la bomba y el encontrado teóricamente a la salida de los tramos en paralelo. Por consiguiente se precede a hallar las velocidades reales y los factores de fricción:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{0,0092}{0,0054} = 1,7 ft/seg.$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{0,00521}{0,0030} = 1,74 ft/seg.$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{A} = \frac{0,00263}{0,0013} = 2,02 ft/seg.$$

$$V_4 = \frac{Q_4}{A} = \frac{0,00240}{0,0013} = 1,85 ft/seg.$$

$$V_5 = \frac{Q_5}{A} = \frac{0,00497}{0,0030} = 1,66 ft/seg.$$

$$V_6 = \frac{Q_6}{A} = \frac{0,00715}{0,0054} = 1,32 ft/seg.$$

Números de Reynolds y factores de fricción reales:

$$Re_1 = \frac{V_1 * D}{\nu} = \frac{1,7 * 0,083}{1,091 * 10^{-5}} = 0,13 \times 10^5. \quad \rightarrow f_1 = 0,0110$$

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{1,74 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,01 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0115$$

$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{2,02 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,077 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0124$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{1,85 * 0,0416}{1,091 * 10^{-5}} = 0,070 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,0403$$

$$Re_5 = \frac{V_5 * D}{\nu} = \frac{1,66 * 0,0625}{1,091 * 10^{-5}} = 0,095 \times 10^5. \quad \rightarrow f_5 = 0,0351$$

$$Re_6 = \frac{V_6 * D}{\nu} = \frac{1,32 * 0,083}{1,091 * 10^{-5}} = 0,1 \times 10^5. \quad \rightarrow f_6 = 0,0323$$

Para comprobar que el cálculo anterior es correcto, es decir, que esa es la proporción de caudal que está pasando por cada tubería, se recalculan las pérdidas en cada tramo. Teniendo en cuenta que deben ser iguales de lo contrario el cálculo anterior es erróneo.

Para encontrar las pérdidas reales para cada tramo se toman en cuenta todas las perdidas del tramo (perdidas de accesorios en la entrada y la salida):

Tramo 1

$$h_1 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035 ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V_1^2}{2g} = 0,0110 * \frac{3,21}{0,083} * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,0191ft .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_1^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,632} - 1\right)^2 * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,0152ft. ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_{tramo1}}{A_2} = \frac{0,0054}{0,0218} = 0,2 \rightarrow C_c = 0,632.$$

$$h_{valv} = K \frac{V_1^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,00853ft.$$

$$K_{expa} = 0,6$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_1^2}{2g} = 0,6 * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,0270ft.$$

$$h_{codo} = K \frac{V_1^2}{2g} = (2) * 0,9 * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,0807ft.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_1^2}{2g} = 0,3 * (4) * \frac{(1,70)^2}{2*32,2} = 0,0538.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_1^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(1,70)^2}{2 * 32,2} = 0,161$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_1 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_1 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,0191 + 0,0152 + 0,00853 + 0,0270 + 0,0807 + 0,0538 + 0,161 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,48ft.$$

Tramo 2

$$h_2 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V_2^2}{2g} = 0,0115 * \frac{2,45}{0,0625} * \frac{(1,74)^2}{2*32,2} = 0,0211ft.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_2^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{(1,74)^2}{2*32,2} = 0,0170ft.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_2}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V_2^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,74)^2}{2*32,2} = 0,00893ft.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_2^2}{2g} = 0,738 * \frac{(1,74)^2}{2*32,2} = 0,0346ft.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_2}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,738.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_2^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{(1,74)^2}{2*32,2} = 0,0423.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_2^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{(1,74)^2}{2 * 32,2} = 0,253$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_2 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_2 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,0211 + 0,0170 + 0,00893 + 0,0346 + 0,0423 + 0,253 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,48ft.$$

Tramo 3

$$h_3 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V_3^2}{2g} = 0,0124 * \frac{1,96}{0,0416} * \frac{(2,02)^2}{2*32,2} = 0,0370ft.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_3'^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{(2,02)^2}{2*32,2} = 0,0229ft.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_3}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V_3^2}{2g} = 0,19 * \frac{(2,02)^2}{2*32,2} = 0,0120ft.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_3^2}{2g} = 0,92 * \frac{(2,02)^2}{2*32,2} = 0,0582ft.$$

$$\left(\frac{D_3}{D_{sal}}\right) = \left(\frac{2in}{0,5in}\right) = 4 \text{ y } V = 2,02ft/s \rightarrow K_{expa} = 0,92.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_3^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{(2,02)^2}{2 * 32,2} = 0,0190.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_3^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(2,02)^2}{2 * 32,2} = 0,228$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_3 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_3 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,0370 + 0,0229 + 0,0120 + 0,0582 + 0,0190 + 0,228 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,48ft .$$

Tramo 4

$$h_4 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V_4^2}{2g} = 0,0403 * \frac{1,787}{0,0416} * \frac{(1,85)^2}{2 * 32,2} = 0,092ft .$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1 \right)^2 * \frac{V_4^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1 \right)^2 * \frac{(1,85)^2}{2 * 32,2} = 0,0193ft. ;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_4}{A_{ent}} = \frac{0,0013}{0,0218} = 0,06 \approx 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V_4^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,85)^2}{2*32,2} = 0,0100ft.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_4^2}{2g} = 0,88 * \frac{(1,85)^2}{2*32,2} = 0,0467ft.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_4}{D_{sal}} \right)^2 \right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,5in}{2in} \right)^2 \right]^2 = 0,88.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_4^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{(1,85)^2}{2*32,2} = 0,0159.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_4^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(1,85)^2}{2 * 32,2} = 0,191$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_4 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_4 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,092 + 0,0193 + 0,0100 + 0,0467 + 0,0159 + 0,191 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,48ft .$$

Tramo 5

$$h_5 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_5 * \frac{l_5}{D} * \frac{V_5^2}{2g} = 0,0351 * \frac{2,27}{0,0625} * \frac{(1,66)^2}{2*32,2} = 0,054.$$

$$h_{contr} = \left(\frac{1}{C_c} - 1\right)^2 * \frac{V_5^2}{2g} = \left(\frac{1}{0,624} - 1\right)^2 * \frac{(1,66)^2}{2*32,2} = 0,0155.;$$

$$C_c \rightarrow \frac{A_5}{A_2''} = \frac{0,0030}{0,0218} = 0,1 \rightarrow C_c = 0,624.$$

$$h_{valv} = K \frac{V_5^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,66)^2}{2*32,2} = 0,00812.$$

$$h_{expa} = K_{expa} \frac{V_5^2}{2g} = 0,738 * \frac{(1,66)^2}{2*32,2} = 0,0315.$$

$$K_{expa} = \left[1 - \left(\frac{D_5}{D_{sal}}\right)^2\right]^2 = \left[1 - \left(\frac{0,75in}{2in}\right)^2\right]^2 = 0,738.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_5^2}{2g} = 0,3 * (3) * \frac{(1,66)^2}{2*32,2} = 0,0385.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_5^2}{2g} = 1,8 * (3) * \frac{(1,66)^2}{2 * 32,2} = 0,231$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_5 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{contr} + h_{valv} + h_{expa} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_5 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,054 + 0,0155 + 0,00812 + 0,0315 + 0,0385 + 0,231 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,48.$$

Al finalizar todo el procedimiento correspondiente se observa que se cumplen los principios de los sistemas de tuberías paralelas:

$$✓ Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

$$✓ h_T = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$$

	Caudal teórico Ft/s	Caudal teórico L/s	Caudal real L/s	% de Error
Tramo 1	0,0092	0,26	0,24	7,7%
Tramo 2	0,00518	0,147	0,13	11,6%
Tramo 3	0,00262	0,074	0,07	5,4%
Tramo 4	0,00247	0,067	0,06	10,4%
Tramo 5	0,00504	0,14	0,11	21,4%
Tramo 6	0,00722	0,20	0,26	-30%
PROMEDIO				14,4%

Tabla 14: Margen de Error de Caudales Hallados Por El Método de Streeter.

BANCO DE PRUEBA No. 2

Se hallan las pérdidas supuestas por tramo. El análisis se realiza desde el punto a hasta el punto b y se determina que el caudal que pasa por estos puntos es el mismo de entrada. Se ignoran las pérdidas producidas por las intersecciones y el flujo pasa por las tees de manera directa.

Suponemos el caudal que pasara por el tramo 1. Al tener los cuatro tramos el mismo diámetro dividimos el caudal total entre los cuatro tramos, lo cual nos da:

$$Q'_1 = 0,008 \frac{ft^3}{seg}.$$

Teniendo Q'_1 se encuentra la velocidad supuesta 1 (V'_1) así: $Q = V * A \rightarrow V = \frac{Q}{A}$

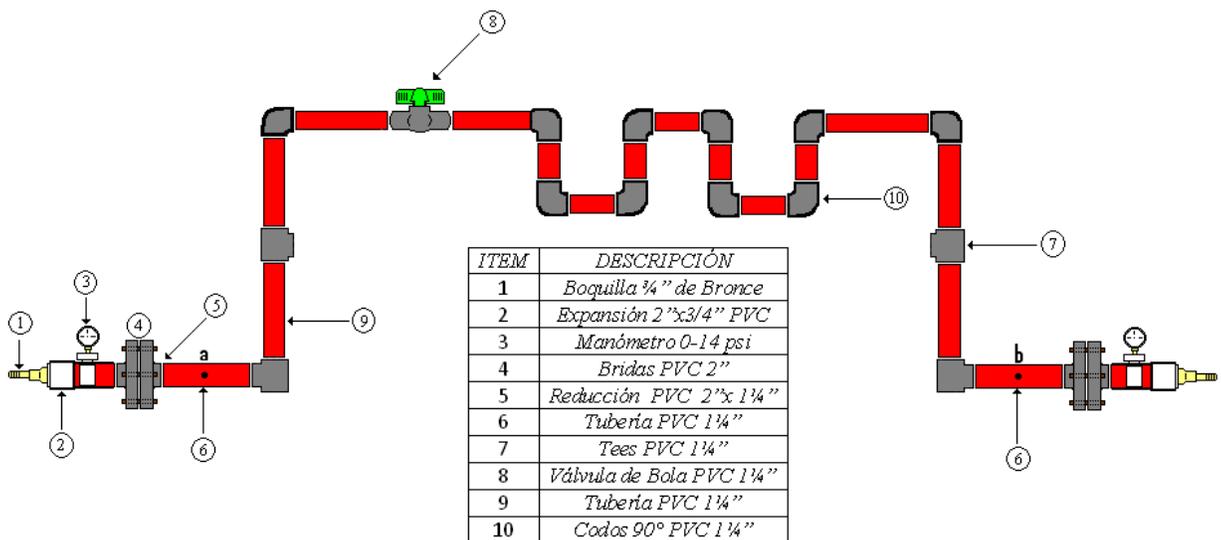
La velocidad supuesta del tramo 1 es: $V'_1 = \frac{Q'_1}{A} = \frac{0,008 ft^3/seg}{0,0085 ft^2} = 0,94 \frac{ft}{seg}$

El número de Reynolds del tramo 1 es:

$$Re'_1 = \frac{V'_1 * D}{\nu} = \frac{0,94 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,08 \times 10^5$$

A partir de este encontramos el factor de fricción por medio del diagrama de Moody, teniendo en cuenta también la rugosidad relativa, obteniendo para el tramo 1 un factor de fricción supuesto de $f'_1 = 0,0175$.

Tramo 1



$$h'_1 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V'_1{}^2}{2g} = 0,0175 * \frac{1,66}{0,104} * \frac{(0,94)^2}{2*32,2} = 0,00383ft .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_1{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{(0,94)^2}{2*32,2} = 0,00260ft.$$

$$h_{codo} = K \frac{V'_1{}^2}{2g} = (10) * 0,9 * \frac{(0,94)^2}{2*32,2} = 0,123ft.$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_1{}^2}{2g} = 0,3 * (2) * \frac{(0,94)^2}{2*32,2} = 0,00823ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_1{}^2}{2g} = 1,8 * (1) * \frac{(0,94)^2}{2 * 32,2} = 0,0247ft$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_1 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

$$h'_1 = 0,0167 + 0,00383 + 0,00260 + 0,123 + 0,00823 + 0,0247 + 0,0335$$

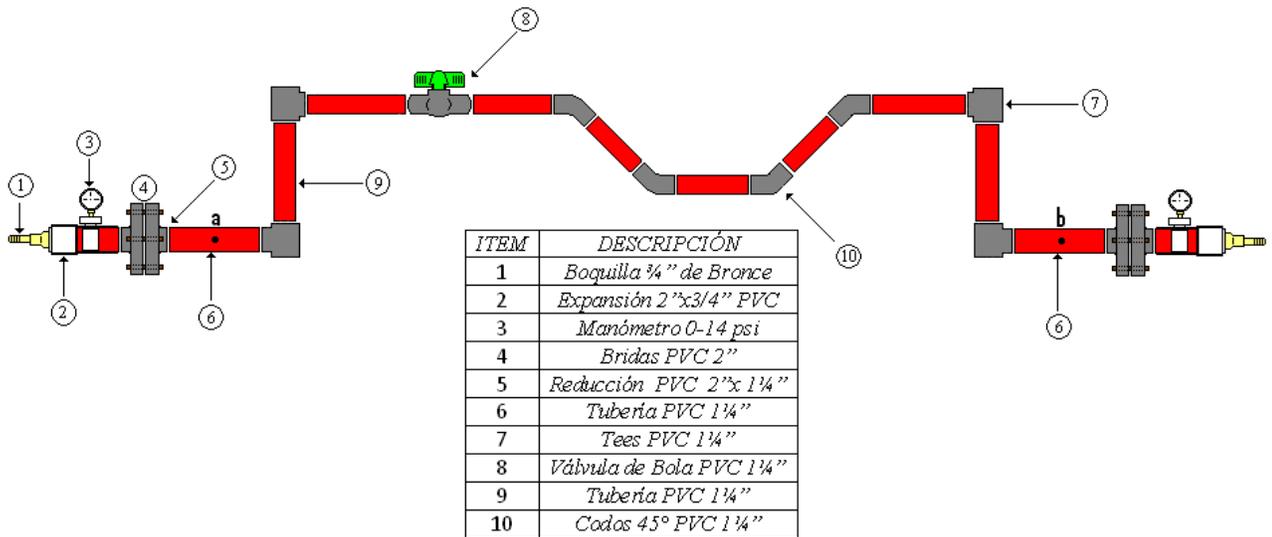
$$h'_1 = 0,213ft$$

La sumatoria de perdidas en todos los tramos de tubería es la misma (en tuberías paralelas) y a partir de esto se buscan las velocidades en las que se transporta el fluido en cada uno de estos.

Se parte de la suposición de que el flujo que pasa por las tuberías se encuentra en régimen turbulento, es decir, $f = 0.022$.

Tramo 2

$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$



Donde:

$$h_{ent} = 0,0167 ft.$$

$$h_{long} = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{0,744}{0,104} * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00244V'_2{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00295V'_2{}^2 .$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_2{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_2{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_2{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

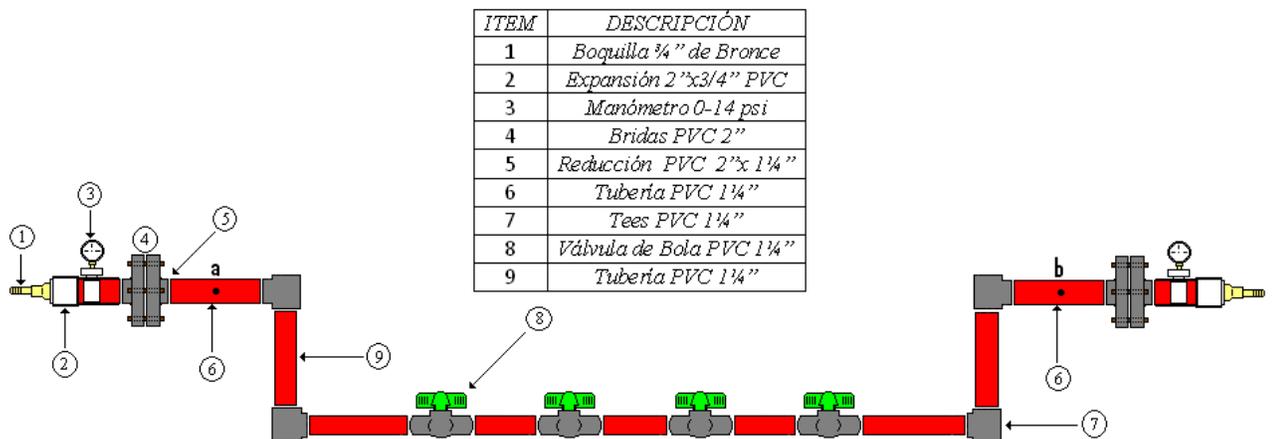
$$h'_1 = h'_2 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00244V'_2{}^2 + 0,00295V'_2{}^2 + 0,00466V'_2{}^2 + 0,0559V'_2{}^2 + 0,0335$$

$$V'_2{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00244 + 0,00295 + 0,00466 + 0,0559} = 2,47$$

$$V'_2 = \sqrt{2,47} = 1,57ft/seg$$

$$V'_2 = 1,57ft/seg$$

Tramo 3



$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{0,721}{0,104} * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00237V'_3{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 4 * 0,19 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0118V'_3{}^2 .$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_3{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_3{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_3{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$h'_1 = h'_3 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00237V'_3{}^2 + 0,0118V'_3{}^2 + 0,00466V'_3{}^2 + 0,0559V'_3{}^2 + 0,0335$$

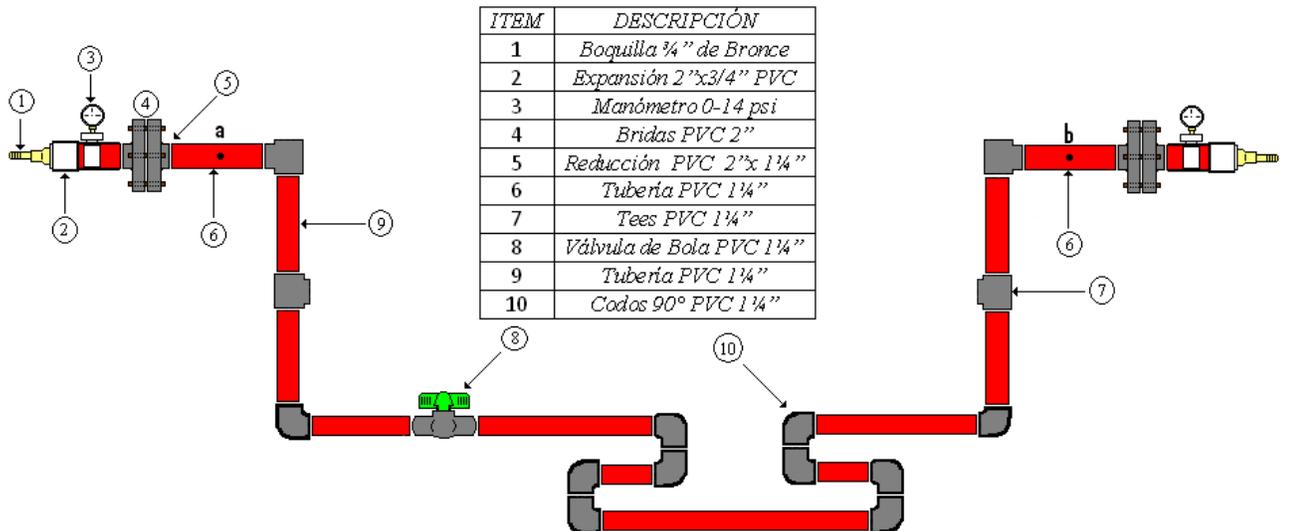
$$V'_3{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00237 + 0,0118 + 0,00466 + 0,0559} = 2,18$$

$$V'_3 = \sqrt{2,18} = 1,48ft/seg$$

$$V'_3 = 1,48ft/seg$$

Tramo 4

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$



Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,022 * \frac{1,22}{0,104} * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00401V'_4{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00295V'_4{}^2 .$$

$$h_{codo} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = (10) * 0,9 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,139V'_4{}^2 .$$

Los coeficientes de fricción para una Tee de PVC:

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,3 * (2) * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00932V'_4{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 1,8 * (1) * \frac{V'_4{}^2}{2 * 32,2} = 0,0279V'_4{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$h'_1 = h'_4 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00401V'_4{}^2 + 0,00295V'_4{}^2 + 0,139V'_4{}^2 + 0,00932V'_4{}^2 + 0,0279V'_4{}^2 + 0,0335$$

$$V'_4{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00401 + 0,00295 + 0,139 + 0,00932 + 0,0279} = 0,89$$

$$V'_4 = \sqrt{0,89} = 0,94ft/seg$$

$$V'_4 = 0,94ft/seg$$

A partir de estos análisis se procede a obtener los factores de fricción mediante los números de Reynolds y con ayuda del diagrama de Moody (ver grafica 1):

$$Re'_2 = \frac{V'_2 * D}{\nu} = \frac{1,57 * 0,104}{1,091 * 10^{-5}} = 0,15 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_2 = 0,0104$$

$$Re'_3 = \frac{V'_3 * D}{\nu} = \frac{1,48 * 0,104}{1,091 * 10^{-5}} = 0,14 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_3 = 0,0104$$

$$Re'_4 = \frac{V'_4 * D}{\nu} = \frac{0,94 * 0,104}{1,091 * 10^{-5}} = 0,089 \times 10^5. \quad \rightarrow f'_4 = 0,0104$$

Se recalculan las pérdidas y velocidades para así ajustar los cálculos con los nuevos factores de fricción encontrados:

Tramo 2

$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,0104 * \frac{0,744}{0,104} * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00115V'_2{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00295V'_2{}^2 .$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_2{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_2{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_2{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_2{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_2{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_2 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}$$

$$h'_1 = h'_2 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00115V'_2{}^2 + 0,00295V'_2{}^2 + 0,00466V'_2{}^2 + 0,0559V'_2{}^2 + 0,0335$$

$$V'_2{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00115 + 0,00295 + 0,00466 + 0,0559} = 2,52$$

$$V'_2 = \sqrt{2,52} = 1,59ft/seg$$

$$V'_2 = 1,59ft/seg$$

Tramo 3

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,0104 * \frac{0,721}{0,104} * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00112V'_3{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 4 * 0,19 * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,0118V'_3{}^2 .$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{V'_3{}^2}{2*32,2} = 0,00466V'_3{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_3{}^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{V'_3{}^2}{2 * 32,2} = 0,0559V'_3{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_3 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$h'_1 = h'_3 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00112V'_3{}^2 + 0,0118V'_3{}^2 + 0,00466V'_3{}^2 + 0,0559V'_3{}^2 + 0,0335$$

$$V'_3{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00112 + 0,0118 + 0,00466 + 0,0559} = 2,22$$

$$V'_3 = \sqrt{2,22} = 1,49ft/seg$$

$$V'_3 = 1,49ft/seg$$

Tramo 4

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f'_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,0104 * \frac{1,22}{0,104} * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00189V'_4{}^2 .$$

$$h_{valv} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,19 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00295V'_4{}^2 .$$

$$h_{codo} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = (10) * 0,9 * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,139V'_4{}^2 .$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \quad y \quad K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 0,3 * (2) * \frac{V'_4{}^2}{2*32,2} = 0,00932V'_4{}^2 .$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V'_4{}^2}{2g} = 1,8 * (1) * \frac{V'_4{}^2}{2 * 32,2} = 0,0279V'_4{}^2$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h'_4 = h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{sal}.$$

$$h'_1 = h'_4 = 0,213ft = 0,0167 + 0,00189V'_4{}^2 + 0,00295V'_4{}^2 + 0,139V'_4{}^2 + 0,00932V'_4{}^2 + 0,0279V'_4{}^2 + 0,0335$$

$$V'_4{}^2 = \frac{0,213 - 0,0167 - 0,0335}{0,00189 + 0,00295 + 0,139 + 0,00932 + 0,0279} = 0,9$$

$$V'_4 = \sqrt{0,9} = 0,95ft/seg$$

$$V'_4 = 0,95ft/seg$$

Se obtienen los caudales supuestos de cada tramo de tubería:

$$Q'_1 = V'_1 * A = 0,94 * 0,0085 = 0,008ft^3/seg.$$

$$Q'_2 = V'_2 * A = 1,59 * 0,0085 = 0,0135ft^3/seg.$$

$$Q'_3 = V'_3 * A = 1,49 * 0,0085 = 0,0127ft^3/seg.$$

$$Q'_4 = V'_4 * A = 0,95 * 0,0085 = 0,00807ft^3/seg.$$

$$\Sigma Q' = 0,008 + 0,0135 + 0,0127 + 0,00807 = 0,0423ft^3/seg.$$

A partir del cálculo anterior se encuentran los caudales reales en cada tramo:

$$Q_1 = \frac{Q'_1}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,008}{0,0423} * 0,032 = 0,00605ft^3/seg.$$

$$Q_2 = \frac{Q'_2}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,0135}{0,0423} * 0,032 = 0,0102ft^3/seg.$$

$$Q_3 = \frac{Q'_3}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,0127}{0,0423} * 0,032 = 0,00961ft^3/seg.$$

$$Q_4 = \frac{Q'_4}{\Sigma Q'} * Q = \frac{0,00807}{0,0423} * 0,032 = 0,0061ft^3/seg.$$

$$\Sigma Q = 0,00605 + 0,0102 + 0,0096 + 0,0061 = 0,032ft^3/seg.$$

Se observa que son iguales los caudales, el expulsado por la bomba y el encontrado teóricamente a la salida de los tramos en paralelo. Por consiguiente se precede a hallar las velocidades reales y los factores de fricción:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{0,00605}{0,0085} = 0,71ft/seg.$$

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} = \frac{0,0102}{0,0085} = 1,2ft/seg.$$

$$V_3 = \frac{Q_3}{A} = \frac{0,00961}{0,0085} = 1,13ft/seg.$$

$$V_4 = \frac{Q_4}{A} = \frac{0,0061}{0,0085} = 0,72ft/seg.$$

Números de Reynolds y factores de fricción reales:

$$Re_1 = \frac{V_1 * D}{\nu} = \frac{0,71 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,068 \times 10^5. \quad \rightarrow f_1 = 0,0104$$

$$Re_2 = \frac{V_2 * D}{\nu} = \frac{1,2 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,11 \times 10^5. \quad \rightarrow f_2 = 0,0104$$

$$Re_3 = \frac{V_3 * D}{\nu} = \frac{1,13 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,11 \times 10^5. \quad \rightarrow f_3 = 0,0104$$

$$Re_4 = \frac{V_4 * D}{\nu} = \frac{0,72 * 0,104}{1,091 \times 10^{-5}} = 0,069 \times 10^5. \quad \rightarrow f_4 = 0,0104$$

Para comprobar que el cálculo anterior es correcto, es decir, que esa es la proporción de caudal que está pasando por cada tubería, se recalculan las pérdidas en cada tramo. Teniendo en cuenta que deben ser iguales de lo contrario el cálculo anterior es erróneo.

Para encontrar las pérdidas reales para cada tramo se toman en cuenta todas las perdidas del tramo (perdidas de accesorios en la entrada y la salida):

Tramo 1

$$h_1 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_1 * \frac{l_1}{D} * \frac{V_1^2}{2g} = 0,0104 * \frac{1,66}{0,104} * \frac{(0,71)^2}{2*32,2} = 0,0013ft .$$

$$h_{valv} = K \frac{V_1^2}{2g} = 0,19 * \frac{(0,71)^2}{2*32,2} = 0,00149ft.$$

$$h_{codo} = K \frac{V_1^2}{2g} = (10) * 0,9 * \frac{(0,71)^2}{2*32,2} = 0,07ft.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_1^2}{2g} = 0,3 * (2) * \frac{(0,71)^2}{2*32,2} = 0,0047ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_1^2}{2g} = 1,8 * (1) * \frac{(0,71)^2}{2 * 32,2} = 0,0141ft$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_1 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + \\ h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_1 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,0013 + 0,00149 + 0,07 + 0,0047 + 0,0141 \\ + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,2ft$$

Tramo 2

$$h_2 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_2 * \frac{l_2}{D} * \frac{V_2^2}{2g} = 0,0104 * \frac{0,744}{0,104} * \frac{(1,2)^2}{2*32,2} = 0,00166ft .$$

$$h_{valv} = K \frac{V_2^2}{2g} = 0,19 * \frac{(1,2)^2}{2*32,2} = 0,00425ft.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_2^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{(1,2)^2}{2*32,2} = 0,00671ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_2^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(1,2)^2}{2 * 32,2} = 0,0805ft$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_2 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_2 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,00166 + 0,00425 + 0,00671 + 0,0805 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,2ft$$

Tramo 3

$$h_3 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_3 * \frac{l_3}{D} * \frac{V_3^2}{2g} = 0,0104 * \frac{0,721}{0,104} * \frac{(1,13)^2}{2*32,2} = 0,00143ft .$$

$$h_{valv} = K \frac{V_3^2}{2g} = 4 * 0,19 * \frac{(1,13)^2}{2*32,2} = 0,0151ft.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_3^2}{2g} = 0,3 * (1) * \frac{(1,13)^2}{2*32,2} = 0,00595ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_3^2}{2g} = 1,8 * (2) * \frac{(1,13)^2}{2 * 32,2} = 0,0714ft$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_3 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} \\ + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_3 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,00143 + 0,0151 + 0,00595 + 0,0714 + \\ 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,2ft$$

Tramo 4

$$h_4 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} \\ + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

Donde:

$$h_{exp-ent} = 0,035ft.$$

$$h_{lon-ent} = 0,00158ft.$$

$$h_{ent} = 0,0167ft.$$

$$h_{long} = f_4 * \frac{l_4}{D} * \frac{V_4^2}{2g} = 0,0104 * \frac{1,22}{0,104} * \frac{(0,72)^2}{2*32,2} = 0,000982ft .$$

$$h_{valv} = K \frac{V_4^2}{2g} = 0,19 * \frac{(0,72)^2}{2*32,2} = 0,00153ft.$$

$$h_{codo} = K \frac{V_4^2}{2g} = (10) * 0,9 * \frac{(0,72)^2}{2*32,2} = 0,0724ft.$$

$$K_{Tee(directo)} = 0,3 \text{ y } K_{Tee(ramal)} = 1,8$$

$$h_{Tee(directo)} = K \frac{V_4^2}{2g} = 0,3 * (2) * \frac{(0,72)^2}{2*32,2} = 0,00483ft.$$

$$h_{Tee(ramal)} = K \frac{V_4^2}{2g} = 1,8 * (1) * \frac{(0,72)^2}{2 * 32,2} = 0,0145ft$$

$$h_{lon-sal} = 0,00158ft.$$

$$h_{cont-sal} = 0,0210ft.$$

$$h_{sal} = 0,0335ft.$$

$$h_4 = h_{exp-ent} + h_{lon-ent} + h_{ent} + h_{long} + h_{valv} + h_{codo} + h_{T(directo)} + h_{T(ramal)} \\ + h_{lon-sal} + h_{cont-sal} + h_{sal}.$$

$$h_4 = 0,035 + 0,00158 + 0,0167 + 0,000982 + 0,00153 + 0,0724 + 0,00483 + \\ 0,0145 + 0,00158 + 0,0210 + 0,0335 = 0,2ft$$

Al finalizar todo el procedimiento correspondiente se observa que se cumplen los principios de los sistemas de tuberías paralelas:

$$✓ Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_n$$

$$✓ h_T = h_1 = h_2 = h_3 = \dots = h_n$$

ANEXO 2. DIFERENCIA DE CAUDAL ENTRE MATERIALES

Se realizaron ensayos en el Banco de Pruebas No. 1 con el fin de encontrar la diferencia de caudal que fluye en las tuberías teniendo en cuenta el tipo de material con el que está constituida (PVC o Hierro Galvanizado). Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

MATERIAL	DIAMETRO	CAUDAL (L/S)	CAUDAL TOTAL (L/S)
PVC	1"	0,505	0,865
	¾"	0,235	
	½"	0,125	
Galvanizado	½"	0,14	0,90
	¾"	0,23	
	1"	0,53	

Tabla 15: Diferencia de Caudal Entre Materiales.

Se Puede notar que la diferencia de caudal entre los dos materiales es de $0,035$ l/s, la cual se da debido a la estanqueidad del fluido en los tramos de Galvanizado cuando solo están en funcionamiento los tramos de PVC.

Luego de haber realizado mediciones de caudal total con el banco de pruebas GUNT, obtuvimos un promedio de $0,91$ l/s, de lo cual podemos concluir que las pérdidas de flujo son mínimas en cada uno de los materiales y que la condición de que el caudal de entrada es igual al de salida se cumple, ya que las pérdidas se dan por la estanqueidad en las tuberías galvanizadas (de manera natural), y no por diseño.

$$0.11 + 0.26 = 0.37 \text{ l/s}$$