

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Diseño y manufactura de un banco de pruebas para
pérdidas de carga en tuberías y accesorios, desarrollo de
curvas de sistema y bomba centrífuga

Trabajo de graduación presentado por

Andrés Orlando González Armas

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala

2014

Diseño y manufactura de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios, desarrollo de curvas de sistema y bomba centrífuga

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Diseño y manufactura de un banco de pruebas para
pérdidas de carga en tuberías y accesorios, desarrollo de
curvas de sistema y bomba centrífuga

Trabajo de graduación presentado por
Andrés Orlando González Armas
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería
Mecánica

Guatemala

2014

Vo. Bo.:

(f) 
Ingeniero Manuel Eduardo Ruano Pérez

Tribunal Examinador:

(f) 
Ingeniero Víctor Hugo Ayerdi Bardales

(f) 
Ingeniero Manuel Eduardo Ruano Pérez

(f) 
Ingeniero Andrés Viau

Fecha de aprobación: Guatemala 8 de diciembre, 2014

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE ECUACIONES.....	VIII
LISTA DE TABLAS	IX
RESUMEN.....	XI
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS	2
A. General.....	2
B. Específicos.....	2
III. JUSTIFICACIÓN.....	3
IV. METODOLOGÍA.....	4
A. DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA	4
B. ESPECIFICACIONES DE EQUIPO Y COMPONENTES	8
1. Componentes para distribución de flujo	8
2. Componentes para direccionamiento de flujo y demás accesorios.....	13
3. Componentes para control de flujo	15
4. Componentes para toma de datos.....	16
5. Diseño del depósito de agua	17
C. CONFIGURACIONES DE TUBERÍA, TRAMOS Y ACCESORIOS	23
1. Configuración de tubería 1.	29
2. Configuración de tubería 2.	30
3. Configuración de tubería 3.	32
4. Configuración de tubería 4.	33
5. Configuración de tubería 5.	35
6. Configuración de tubería 6.	37
D. CÁLCULO Y ANÁLISIS DE PÉRDIDA DE CARGA.....	38
1. Desarrollo y cálculo de coeficiente de resistencia de rotámetro.....	40
2. Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia de los accesorios del sistema de tuberías.....	46
3. Desarrollo y cálculo de pérdidas de carga en configuración de tubería 1.....	56
4. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 2.....	80
5. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 3.....	87
6. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 4.....	95
7. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 5.....	102
8. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 6.....	111
9. Resumen y análisis de pérdidas de carga en sistema completo de configuraciones de tubería.	118
F. COMPARACIÓN DE PRESIÓN DE CADA CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA.	121
V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS.....	128
VI. CONCLUSIONES.....	131
VII. RECOMENDACIONES.....	133
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	134
IX. ANEXOS	135

LISTA DE FIGURAS

FIGURA No. 1: BOMBA CENTRÍFUGA AQUAPRO-JET60 SP	8
FIGURA No. 2: TUBERÍA PVC	9
FIGURA No. 3: TUBERÍA DE COBRE DE TEMPLE RÍGIDO TIPO M	10
FIGURA No. 4: TUBERÍA ACERO GALVANIZADO	12
FIGURA No. 5: ROTÁMETRO LFME-13-F2.....	17
FIGURA No. 6: MANÓMETRO, 0-60 PSI	17
FIGURA No. 7: DIMENSIONES DE CONO TRUNCADO	22
FIGURA No. 8: DISEÑO DE TUBERÍA DE BANCO DE PRUEBAS	24
FIGURA No. 9: DIRECCIÓN DE FLUJO EN EL SISTEMA DE TUBERÍA	25
FIGURA No. 10: CONFIGURACIONES DEL SISTEMA DE TUBERÍA	25
FIGURA No. 11: UBICACIÓN DE MATERIALES Y ACCESORIOS DEL DISEÑO	27
FIGURA No. 12: TRAMO DE ALIMENTACIÓN	28
FIGURA No. 13: TRAMO DE RETORNO A DEPÓSITO	28
FIGURA No. 14: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	29
FIGURA No. 15: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	31
FIGURA No. 16: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	32
FIGURA No. 17: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	34
FIGURA No. 18: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	36
FIGURA No. 19: CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	37
FIGURA No. 20: PIEZAS DEL ROTÁMETRO	40
FIGURA No. 21: SECCIÓN TRANSVERSAL Y DIMENSIONES INTERNAS DE ROTÁMETRO	41
FIGURA No. 22: EXPANSIÓN GRADUAL EN EL CENTRO DEL BULBO	43
FIGURA No. 23: CONTRACCIÓN GRADUAL EN LA SECCIÓN 1 DEL BULBO	43
FIGURA No. 24: CONTRACCIÓN SÚBITA EN LA SECCIÓN 2 DEL BULBO	44
FIGURA No. 25: CONTRACCIÓN GRADUAL EN LA TRANSICIÓN SUPERIOR.....	44
FIGURA No. 26: EXPANSIÓN GRADUAL EN LA TRANSICIÓN INFERIOR	45
FIGURA No. 27: CONTRACCIÓN SÚBITA EN REDUCTOR TIPO BUJE 1" A ¾"	46
FIGURA No. 28: EXPANSIÓN SÚBITA EN REDUCTOR TIPO BUJE 1" A ¾"	46
FIGURA No. 29: EXPANSIÓN EN ADAPTADOR MACHO	47
FIGURA No. 30: CODO 90°, 1 PULGADA	48
FIGURA No. 31: CODO 90°, ¾ PULGADA.....	48
FIGURA No. 32: CODO 45°, 1 PULGADA	49
FIGURA No. 33: CODO 45°, ¾ PULGADA.....	49
FIGURA No. 34: TEE 1 PULGADA, TRAMO RECTO	49
FIGURA No. 35: TEE 1 PULGADA, TRAMO DE DERIVACIÓN.....	50
FIGURA No. 37: YEE 45°, RECTO - DE DERIVACIÓN.....	50
FIGURA No. 38: YEE 45°, DE DERIVACIÓN – RECTO	51
FIGURA No. 39: UNIÓN UNIVERSAL, 1 PULGADA	51
FIGURA No. 40: UNIÓN UNIVERSAL, ¾ PULGADA.....	52
FIGURA No. 41: VÁLVULA DE RETENCIÓN DE DISCO OSCILANTE, 1 PULGADA	53
FIGURA No. 42: VÁLVULA DE RETENCIÓN DE DISCO OSCILANTE, ¾ PULGADA.....	53
FIGURA No. 43: VÁLVULA DE BOLA, ¾ PULGADA	53
FIGURA No. 44: VÁLVULA DE GLOBO, 1 PULGADA.....	54
FIGURA No. 45: PROYECCIÓN DE SUCCIÓN DEL DEPÓSITO	54
FIGURA No. 46: VÁLVULA DE PIE, 1 PULGADA.....	55
FIGURA No. 47: PROYECCIÓN DE DESCARGA HACIA EL DEPÓSITO.....	55
FIGURA No. 48: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	57
FIGURA No. 49: CURVA DEL SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	74
FIGURA No. 50: CURVA DE BOMBA CENTRÍFUGA	75
FIGURA No. 51: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	75
FIGURA No. 52: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	77
FIGURA No. 53: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	80
FIGURA No. 54: CURVA DE SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	85
FIGURA No. 55: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	85

FIGURA No. 56: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	86
FIGURA No. 57: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	87
FIGURA No. 58: CURVA DE SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	92
FIGURA No. 59: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	93
FIGURA No. 60: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	94
FIGURA No. 61: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	95
FIGURA No. 62: CURVA DE SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	100
FIGURA No. 63: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	101
FIGURA No. 64: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	102
FIGURA No. 65: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	103
FIGURA No. 66: CURVA DE SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	108
FIGURA No. 67: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	109
FIGURA No. 68: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	110
FIGURA No. 69: DIMENSIONES DE LONGITUDES EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	111
FIGURA No. 70: CURVA DE SISTEMA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	116
FIGURA No. 71: CURVA DE OPERACIÓN DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	116
FIGURA No. 72: ALTURA DE TUBERÍA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	117
FIGURA No. 73: CURVA DEL SISTEMA DE TUBERÍAS COMPLETO	119
FIGURA No. 74: CURVA DE OPERACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO	120

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN NO. 1: NÚMERO DE REYNOLDS	5
ECUACIÓN NO. 2: ECUACIÓN DE ENERGÍA DE FLUJO ESTACIONARIO	5
ECUACIÓN NO. 3: PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN EN TUBERÍA	6
ECUACIÓN NO. 4: PÉRDIDA DE CARGA POR ACCESORIO	7
ECUACIÓN NO. 5: PÉRDIDAS DE CARGA TOTALES	7
ECUACIÓN NO. 6: VOLUMEN DE CILINDRO	18
ECUACIÓN NO. 7: FACTOR DE FRICCIÓN EN TUBERÍA	39
ECUACIÓN NO. 8: EXPANSIÓN GRADUAL – ÁNGULO MENOR A 45°	41
ECUACIÓN NO. 9: EXPANSIÓN GRADUAL – ÁNGULO ENTRE 45° Y 180°	42
ECUACIÓN NO. 10: CONTRACCIÓN GRADUAL – ÁNGULO MENOR A 45°	42
ECUACIÓN NO. 11: CONTRACCIÓN GRADUAL – ÁNGULO ENTRE 45° Y 180°	42
ECUACIÓN NO. 12: EXPANSIÓN SÚBITA	42
ECUACIÓN NO. 13: CONTRACCIÓN SÚBITA	42
ECUACIÓN NO. 14: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL	56
ECUACIÓN NO. 15: CAUDAL	57
ECUACIÓN NO. 16: ÁREA	58
ECUACIÓN NO. 17: EFICIENCIA DE BOMBA CENTRÍFUGA	76
ECUACIÓN NO. 18: ECUACIÓN DE ENERGÍA DE FLUJO ESTACIONARIO APLICADO AL SISTEMA DE TUBERÍAS	77

LISTA DE TABLAS

TABLA NO. 1 ESPECIFICACIONES DE LA TUBERÍA DE PVC CÉDULA 40	10
TABLA NO. 2: ESPECIFICACIONES DE TUBERÍA DE COBRE RÍGIDO TIPO M.....	11
TABLA NO. 3: ESPECIFICACIONES DE TUBERÍA DE ACERO GALVANIZADO CÉDULA 40.....	13
TABLA NO. 4: DIMENSIONES MÍNIMAS FINALES DEL DEPÓSITO DE AGUA	21
TABLA NO. 5: RESUMEN DE DIMENSIONES GENERALES FINALES Y VOLUMEN DEL DEPÓSITO DE AGUA	23
TABLA NO. 6: TABLA DE MATERIALES	26
TABLA NO. 7: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	30
TABLA NO. 8: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	31
TABLA NO. 9: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	33
TABLA NO. 10: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	34
TABLA NO. 11: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	36
TABLA NO. 12: DISPOSICIÓN DE EQUIPO EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	38
TABLA NO. 13: PIEZAS DEL ROTÁMETRO.....	40
TABLA NO. 14: DEFINICIÓN DE FACTOR DE FRICCIÓN PARA ACCESORIOS	47
TABLA NO. 15: RESUMEN DE PROPIEDADES DEL AGUA	59
TABLA NO. 16: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	61
TABLA NO. 17: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO RECTO	64
TABLA NO. 18: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA CON TUBERÍA DE ACERO GALVANIZADO	67
TABLA NO. 19: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA CON TUBERÍA PVC.....	70
TABLA NO. 20: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	71
TABLA NO. 21: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO RECTO DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	71
TABLA NO. 22: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE SALIDA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	72
TABLA NO. 23: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1	72
TABLA NO. 24: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA TOTAL DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	73
TABLA NO. 25: CAUDAL VS. ALTURA DE BOMBA CENTRÍFUGA	74
TABLA NO. 26: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 1.....	79
TABLA NO. 27: LONGITUDES DE TUBERÍA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	80
TABLA NO. 28: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	81
TABLA NO. 29: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO RECTO	81
TABLA NO. 30: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA CON TUBERÍA DE ACERO GALVANIZADO	81
TABLA NO. 31: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA CON TUBERÍA PVC.....	82
TABLA NO. 32: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	82
TABLA NO. 33: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO RECTO DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	83
TABLA NO. 34: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE SALIDA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	83
TABLA NO. 35: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	84
TABLA NO. 36: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2	84
TABLA NO. 37: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 2.....	87
TABLA NO. 38: LONGITUDES DE TUBERÍA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	88
TABLA NO. 39: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	88
TABLA NO. 40: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO RECTO	89
TABLA NO. 41: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE ACERO GALVANIZADO	89
TABLA NO. 42: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE PVC.....	89
TABLA NO. 43: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	90
TABLA NO. 44: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO RECTO DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	90
TABLA NO. 45: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE SALIDA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	91
TABLA NO. 46: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	91
TABLA NO. 47: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3	92
TABLA NO. 48: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 3.....	94
TABLA NO. 49: LONGITUDES DE TUBERÍA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4.....	95
TABLA NO. 50: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	96
TABLA NO. 51: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ACCESORIOS.....	96
TABLA NO. 52: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE ACERO GALVANIZADO	97
TABLA NO. 53: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE PVC.....	97
TABLA NO. 54: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	98

TABLA NO. 55: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO RECTO DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	98
TABLA NO. 56: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE SALIDA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	99
TABLA NO. 57: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	99
TABLA NO. 58: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	100
TABLA NO. 59: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 4	102
TABLA NO. 60: LONGITUDES DE TUBERÍA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	103
TABLA NO. 61: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	104
TABLA NO. 62: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ACCESORIOS.....	104
TABLA NO. 63: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE ACERO GALVANIZADO	105
TABLA NO. 64: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE PVC.....	105
TABLA NO. 65: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	106
TABLA NO. 66: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ACCESORIOS DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	106
TABLA NO. 67: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE SALIDA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	107
TABLA NO. 68: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	107
TABLA NO. 69: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5	108
TABLA NO. 70: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 5.....	110
TABLA NO. 71: LONGITUDES DE TUBERÍA EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	111
TABLA NO. 72: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE ENTRADA	112
TABLA NO. 73: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS DE TRAMO DE ACCESORIOS.....	112
TABLA NO. 74: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS EN TRAMO DE SALIDA DE ACERO GALVANIZADO	112
TABLA NO. 75: COEFICIENTES DE RESISTENCIA DE ACCESORIOS DE TRAMO DE SALIDA DE PVC.....	113
TABLA NO. 76: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ENTRADA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	113
TABLA NO. 77: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ACCESORIOS DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	114
TABLA NO. 78: PÉRDIDA DE CARGA EN TRAMO DE ACCESORIOS DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	114
TABLA NO. 79: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL, CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	115
TABLA NO. 80: CAUDAL VS. PÉRDIDA DE CARGA DE CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6	115
TABLA NO. 81: PRESIONES ESPERADAS Y CAMBIO DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN DE TUBERÍA 6.....	118
TABLA NO. 82: PÉRDIDA DE CARGA TOTAL DEL BANCO DE PRUEBAS	119
TABLA NO. 83: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 1	121
TABLA NO. 84: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 2	121
TABLA NO. 85: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 3	122
TABLA NO. 86: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 4	122
TABLA NO. 87: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 5	123
TABLA NO. 88: COMPARACIÓN DE PRESIÓN EN CONFIGURACIÓN 5	123

RESUMEN

El departamento de ingeniería mecánica no cuenta con un sistema para entender el funcionamiento de pérdidas de carga en tuberías, un medio donde los estudiantes puedan aplicar sus conocimientos teóricos del curso de mecánica de fluidos. El presente proyecto tiene la finalidad de construir un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios que sea funcional y útil para el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería.

El propósito del proyecto es familiarizarse con las diferentes configuraciones, materiales, accesorios, dimensiones y características de tuberías. Se realizan pruebas de las diferentes configuraciones de tubería haciendo circular agua desde y hacia el depósito de agua en un ciclo cerrado controlando el flujo de agua por medio de válvulas manuales. Posteriormente observar la presión marcada por manómetros y caudal en rotámetro para poder realizar cálculos de pérdidas menores y mayores en las configuraciones de tubería, y con ello también desarrollar gráficos de curva de sistema y curva de bomba centrífuga para el entendimiento de operación del sistema. Finalmente se proporciona un manual de operación y procedimiento para que el estudiante tenga una visión amplia de todos aquellos factores que intervienen en el funcionamiento de las pérdidas en tuberías.

I. INTRODUCCIÓN

En la práctica es común encontrar el flujo de fluidos en tuberías circulares y no circulares. Muchas de las aplicaciones vienen dadas por riego, sistemas de drenajes o simplemente distribuir agua en una comunidad o en hogares.

En la industria es común encontrar sistemas de bombeo y tuberías que alimentan diversidad de elementos y sistemas complejos, estos sistemas de tuberías vienen dados por variedad de dimensiones, materiales y especificaciones técnicas del transporte del fluido. El transporte del fluido deriva de la necesidad de proveer un fluido a un elemento que lo necesita, como enfriamiento, alimentación, producto final, etc. Y para ello se hace análisis de pérdidas de energía del fluido a través de tuberías para que el fluido llegue a su destino final con los requerimientos óptimos.

La pérdida de energía viene dada debido a la rugosidad interna de la tubería según el material de la misma, así también, la energía del fluido se pierde por la adición de accesorios como codos y tes que son indispensables para derivar o cambiar de dirección el transporte del fluido. Por tal razón debe hacerse un estudio previo de las pérdidas de carga o energía del fluido para seleccionar una bomba adecuada y así proveer de un caudal y presión óptima asegurando que el fluido llegue a su destino. De igual forma, al hacer el estudio de las pérdidas de carga se asegura que la bomba funcione de forma eficiente.

Es necesario e importante que el estudiante de ingeniería se relacione con este tipo de sistemas y haga un análisis detenido de la energía perdida en el fluido. El banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios pretende dar una experiencia en conocimiento amplio de la importancia de conocer las pérdidas de energía del fluido y conforme a la experiencia pueda aplicar sus conocimientos a un nivel industrial.

II. OBJETIVOS

A. General

1. Diseñar y manufacturar un banco de pruebas para conocer pérdidas de carga en tuberías y accesorios.

B. Específicos

1. Ensamblar seis ramales con ductos de diferentes materiales, dimensiones y especificaciones.
2. Instalar accesorios como: codos, tes, yes, reductores y válvulas en los ramales para el control de flujo.
3. Determinar las pérdidas de carga en ramales instalados con diferentes materiales.
4. Determinar las curvas características del sistema según configuración de los ramales de tubería.
5. Desarrollar un manual de procedimiento para práctica de laboratorio.

III. JUSTIFICACIÓN

El departamento de ingeniería mecánica busca fomentar un aprendizaje integral a los estudiantes de ingeniería, una base teórica que pueda ser aplicada en una práctica de laboratorio, así como también crear un criterio para el entendimiento de los problemas generados en un sistema de fluidos. Por lo tanto, el diseño y manufactura de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios permitirá a los estudiantes de ingeniería un método y herramientas de aprendizaje práctico, además realimentación de temas relacionados con el curso. Así también, el banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios permitirá al estudiante involucrarse con el sistema, su operación, pérdidas de carga en tuberías y accesorios más comunes del área local y conocimiento de las curvas características del sistema y bomba centrífuga.

IV. METODOLOGÍA

A. Diseño y manufactura de un banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios, desarrollo de curvas de sistema y bomba centrífuga

El flujo de un líquido en una tubería viene acompañado de una pérdida dada en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante (dimensiones de longitud) denominada habitualmente pérdida de carga. En el caso de tuberías horizontales, la pérdida de carga se manifiesta como una disminución de presión en el sentido del flujo.

La pérdida de carga está relacionada con variables fluido-dinámicas como rugosidad y longitud de tubería y según sea el tipo de flujo. Además de las pérdidas de carga lineales (a lo largo de la tubería), también se producen pérdidas de carga singulares en puntos como codos, válvulas, tes, yes, etc.

Para solucionar problemas prácticos de flujos en tuberías, se aplica el principio de la energía, la ecuación de continuidad y los principios y ecuaciones de la resistencia de fluidos en tuberías cerradas.

La resistencia al flujo y pérdida de energía se da tanto en tuberías como en accesorios como, codos, tes, yes, válvulas, que disipan energía al producir turbulencias a escala relativamente grandes. Estas pérdidas son muy comunes en la industria y su análisis es de gran importancia para llevar fluido de un lugar con requisitos mínimos de caudal y presión para diversos sistemas.

Existen regímenes de flujo en tuberías los cuales vienen dados por la velocidad del fluido que viaja a través de las tuberías. Se dice que el régimen laminar se caracteriza por *líneas de corriente suaves y movimiento sumamente ordenado*; mientras que en el régimen turbulento se caracteriza por *fluctuaciones de velocidad y movimiento desordenado*. (Cengel & Cimbala, 2006). La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre repentinamente; esto sucede sobre cierta región en la que el flujo fluctúa entre flujos laminar y turbulento antes de volverse totalmente turbulento.

Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, rugosidad de la superficie por donde el fluido viaja, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros. Osborne Reynolds en 1880 descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama número de Reynolds y se expresa para flujo interno en una tubería circular como:

Ecuación No. 1: Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu}$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

ρ : densidad del fluido (lb/pie³)

V : velocidad (pie/s)

D_i : diámetro interno de la tubería (pulgada)

μ : viscosidad cinemática (lb/pie * s)

Ecuación general de la energía

Una de las leyes más fundamentales es la primera ley de la termodinámica, también conocida como principio de la conservación de la energía, para un sistema de tuberías la energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal fijado como referencia es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión, a adición carga de la bomba entregada al fluido y la altura debida a la velocidad y que es válida solo para fluidos incompresibles; es decir:

Ecuación No. 2: Ecuación de energía de flujo estacionario

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_B - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

$\frac{P_1}{\rho g}$: Altura debida a Presión, (pies)

$\frac{V_1^2}{2g}$: Altura debida a Velocidad, (pies)

z_1 : Altura geométrica (pies)

h_B : Energía añadida al fluido por la bomba (pies)

h_L : Pérdidas de energía del fluido por efecto de rugosidad a lo largo de las tuberías (pies) o por presencia de accesorios, (pies)

Un interés considerable en el análisis de flujo de tubería es el que causa la caída de carga, porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo. Esto se debe a rugosidad de tubería, longitud de tubería y accesorios que estén instalados alrededor de la red de tubería.

Pérdidas mayores o primarias

La mayor parte de la energía perdida por un sistema se asocia a la fricción en las porciones rectas de la tubería y se denomina pérdidas mayores, también conocida como pérdidas primarias.

Las pérdidas de carga ocasionada por la fricción de la tubería recta esta denominada por la ecuación de Darcy:

Ecuación No. 3: Pérdida de carga por fricción en tubería

$$h_L = f \frac{L V^2}{D_i 2g}$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

f : factor de fricción del material de la tubería

L : Longitud de tubería (pies)

D_i : Diámetro interno de la tubería (pulgada)

V : velocidad del fluido (pies/s)

g : gravedad (pies/s²)

La ecuación anterior (Ecuación No. 3) es la ecuación general de la pérdida de presión conocida también como la ecuación de Darcy.

Pérdidas menores o secundarias

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varios accesorios o distribuidores de flujo, el cual llevan el fluido de un lugar a otro. Dichos componentes interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que produce, también conocida como pérdidas secundarias.

Un método común para determinar las pérdidas de carga a través de un accesorio, es por medio del coeficiente de pérdida o resistencia, K_L .

Ecuación No. 4: Pérdida de carga por accesorio

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

K_L : *coeficiente de resistencia según accesorio*

V : *velocidad del fluido (pies/s)*

g : *gravedad (pies/s²)*

Las pérdidas totales de energía h_L es dada por:

Ecuación No. 5: Pérdidas de carga totales

$$h_L = \sum \text{pérdidas por fricción en tuberías} + \sum \text{pérdidas por accesorios}$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

B. Especificaciones de equipo y componentes

1. Componentes para distribución de flujo

a. Bomba Centrífuga. El banco de pruebas tiene una bomba centrífuga marca AQUAPRO-JET60 SP de 0.5HP, con un caudal máximo de 42 Lts/min (11.25 GPM), 8 Bar, 3450 RPM y 128 pies de cabeza de bomba; dicha bomba es impulsada por un motor eléctrico monofásico 120V/60Hz marca Siemens directamente acoplado a la bomba. Esta bomba se encarga de hacer circular agua desde y hacia un depósito en un circuito cerrado. Un manómetro ubicado en la bomba muestra la presión de operación de la bomba. La curva de desempeño de la bomba centrífuga se muestra en anexos.

Figura No. 1: Bomba Centrífuga AQUAPRO-JET60 SP



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

b. Tubería. La tubería o conducto cerrado tiene como fin o propósito transportar un fluido de un lugar a otro. Se suele fabricar de diferentes materiales, tamaños, secciones transversales y características. Este proyecto incluye el uso de tres principales materiales utilizados en el mercado local; PVC, cobre y acero galvanizado.

1) Tubería de PVC. El Policloruro de Vinilo (PVC, siglas en inglés) es un polímero termoplástico que se utiliza mayormente para la manufactura de tubería de presión y fontanería. La tubería de PVC es el elemento más común en los hogares y algunas industrias para el transporte de fluido, se caracteriza por alta resistencia a la corrosión, duración, alta permeabilidad y bajo costo en comparación a otros materiales de tubería.

Figura No. 2: Tubería PVC



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a) **Manufactura.** Tubería de PVC se produce en forma de monómero de cloruro de vinilo que se hace reaccionar para formar cadenas de polímero. El plástico pasa por un proceso de extrusión a través de troqueles en que el resultado es un tubo circular de diámetro y espesor de pared requerido.

Dependiendo del método utilizado para unir la tubería en el campo, el tubo se puede hacer con los extremos de campana, extremos con rosca interna o externa (no comunes) o simplemente con extremos rectos. Tuberías de PVC con rosca en los extremos no son recomendadas para temperaturas mayores de 43°C (Silowash, 2010). Esto podría causar derretimiento del material en la parte donde se encuentra ubicada la rosca debido a que en esta parte contiene menos material.

b) **Aplicaciones.** La tubería de PVC es mayormente utilizada para transporte y distribución de agua en hogares e industrias, siendo este último un sistema más complejo.

En los hogares, cuando se necesita una distribución de agua sencilla, de bajo costo y de rápida instalación se recurre a la tubería de PVC. De igual forma, en la distribución de agua en industrias generalmente son sistemas más complejos, pero de igual funcionalidad, requiere de mayor cantidad de elementos, componentes y accesorios para su distribución, usualmente se aplica a distribución de agua con temperaturas cercanas a la temperatura ambiente.

Sin embargo, en las dos aplicaciones comúnmente se dejan al aire libre. Aunque el PVC contiene estabilizadores que ayudan a prevenir la degradación causada por la luz ultravioleta, la tubería PVC debería ser cubierta por una capa de pintura látex si se expone a la luz del sol, otra opción es cubrir el tubo con una lona opaca para que absorba el calor ocasionado por la radiación solar.

No es conveniente distribuir agua caliente por tubería PVC ya que tiene un límite de temperatura máxima de sólo 60°C.

c) Especificaciones y regulaciones. Espesores de pared para tubería de PVC están disponibles en cédulas 40, 80, y 120, estos valores adimensionales representan la relación entre la presión interna de operación y el esfuerzo permisible en el material. Así también, tienen estrecha correlación con las relaciones de dimensiones, estas se refieren a las Relaciones de Dimensiones Estándar (SDR, por sus siglas en inglés). Es decir, es la relación del diámetro exterior de la tubería al espesor de pared, también son inversamente proporcionales a las presiones de trabajo (Silowash, 2010). Por lo tanto, mientras más bajas las proporciones de dimensión, mayor será la presión de trabajo.

La tubería PVC que se utiliza en este estudio es de denominación:

ASTM D2241: especificación estándar para tubería de presión nominal de Policloruro de vinilo (PVC) (Series SDR, por sus siglas en inglés).

Tabla No. 1 Especificaciones de la tubería de PVC cédula 40

Diámetro nominal (pulgadas)	Diámetro interior (pulgadas)	Diámetro exterior (pulgadas)	Rugosidad (pies)
1 pulgada	1.029	1.315	$5 \cdot 10^{-5}$
$\frac{3}{4}$ pulgada	0.804	1.05	$5 \cdot 10^{-5}$

Fuente: (Silowash, 2010)

2) Tubería de cobre de temple rígido tipo M. El cobre es un material dúctil que fácilmente se puede convertir en tubería. Es resistente a la corrosión en diferentes condiciones de trabajo.

La tubería de cobre es un excelente material para distribuir agua de altas y bajas temperaturas, debido a esto es regularmente usado en proyectos de plomería e hidrología.

Figura No. 3: Tubería de cobre de temple rígido tipo M



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a) Manufactura. El cobre es insertado a un horno donde se lleva a cabo la fusión del material, por encima de los 1085°C. Las impurezas se eliminan a través de diversas técnicas de escorificación, con el resultado se obtiene un 99.9% de cobre puro (Silowash, 2010).

Su fabricación por extrusión permite obtener tubos de una sola pieza, sin costura y de paredes lisas y tersas según la matriz, asegurando la resistencia a la presión de manera uniforme y un mínimo de pérdidas de presión por fricción en la conducción de fluidos. Sus dos temple en los tipos normales de fabricación, rígido y flexible, dan una mayor gama de usos que otras tuberías que se fabrican con un solo temple. Su color de identificación es el rojo.

b) **Aplicaciones.** Se fabrica para ser usada en instalaciones hidráulicas de agua fría y caliente para casas y edificios, en general en donde las presiones de servicio sean bajas.

La propiedad de que el cobre sea resistente a la corrosión es debido a la formación de una capa de óxido. Si la capa de óxido es eliminada o deteriorada se puede producir picaduras en la tubería. Estas picaduras por lo general ocurren cuando hay turbulencia localizada. Una vez la picadura comienza, la turbulencia incrementa y el proceso de picadura se acelera.

Cuando se transporta agua caliente por tubería de cobre, se recomienda velocidades comprendidas en el rango de 3 a 5 pies por segundo (Silowash, 2010).

Además de la tubería tipo M, se encuentran dos más tipos de tubería de cobre de temple rígido, tales como:

Tipo L: es un tipo de tubería para usarse en instalaciones hidráulicas en condiciones severas de servicio y seguridad que la tubería tipo M, por ejemplo: en instalaciones de gases medicinales y combustibles, vapor, aire comprimido, en calefacción, refrigeración, etc. Su color de identificación es el azul.

Tipo K: es la denominación para las tuberías que por sus características se recomienda usar en instalaciones de tipo industrial, conduciendo líquidos y gases en condiciones más severas de presión y temperatura. Su color de identificación es el verde.

c) **Especificaciones y regulaciones.** La tubería de cobre rígida que se utiliza en este estudio es de denominación:

ASTM B88: Especificación estándar para tubos de agua de cobre sin costura.

Tabla No. 2: Especificaciones de tubería de cobre rígido tipo M

Diámetro nominal (pulgadas)	Diámetro interior (pulgadas)	Diámetro exterior (pulgadas)	Rugosidad (pies)
1 pulgada	1.055	1.125	$5 \cdot 10^{-6}$
$\frac{3}{4}$ pulgada	0.811	0.875	$5 \cdot 10^{-6}$

Fuente: (Silowash, 2010)

3) Tubería de acero galvanizado. Este tipo de tubería es una tubería de acero que está protegida exteriormente por medio del acabado galvanizado. Se recomienda en instalaciones industriales donde la tubería este visible o a la intemperie. Este tipo de tubería también se utiliza en hogares para la distribución de agua potable debido a su bajo costo y rápida instalación. (Harper, 2004).

Figura No. 4: Tubería Acero Galvanizado



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a) **Manufactura.** El acero galvanizado es un material compuesto por acero y recibe una capa de zinc fundido prácticamente puro, que al solidificar se une al acero base formando un material altamente resistente a la oxidación y corrosión denominado acero galvanizado, usualmente se agregan varias capas de zinc según la aplicación. Para tubería de acero galvanizado se usa el procedimiento de galvanización en caliente para recubrir piezas terminadas de hierro o acero mediante su inmersión en un crisol de zinc fundido a 450°C (Harper, 2004). El tubo puede suministrarse roscado o sin roscar.

b) **Aplicaciones.** Su uso es mayor en la industria donde se manejan presiones altas comparadas con la presión que se maneja en la distribución de agua en el hogar, sin embargo, tiene usos en la distribución de agua potable.

La tubería de acero galvanizado se puede usar para distribución de agua potable o incluso químicos de bajos índices corrosivos. La característica principal del acero galvanizado es que tiene un recubrimiento de zinc y si este es eliminado o desprendido se acelera el proceso de oxidación de la tubería. Por lo tanto, se recomienda evitar colocar tubería de cobre en combinación con tubería de acero galvanizado, si la tubería de cobre se sitúa arriba de la de galvanizado, los iones de cobre son arrastrados y depositados en la tubería de acero galvanizado, esto ocasiona erosión del zinc y, por lo tanto, desprendimiento por lo que este acelerará el proceso de oxidación. Para este proyecto, no representa este tipo problema debido a que se harán solamente algunas pruebas ocasionales cuando sea requerido y no estará en funcionamiento las 24 horas. Además, cuando no es requerido el sistema cuenta con sistemas de desfogue del fluido en el tanque y tuberías.

- c) Especificaciones y regulaciones. ASTM A53/A53-12: Especificación Normalizada para tubos de acero negro e inmerso en caliente, galvanizados, soldados y con costura.

Tabla No. 3: Especificaciones de tubería de acero galvanizado cédula 40

Diámetro nominal (pulgadas)	Diámetro interior (pulgadas)	Diámetro exterior (pulgadas)	Rugosidad (pies)
1 pulgada	1.049	1.315	$5 \cdot 10^{-4}$
$\frac{3}{4}$ pulgada	0.824	1.05	$5 \cdot 10^{-4}$

Fuente: (Binder, 1956)

2. Componentes para direccionamiento de flujo y demás accesorios

- a. Unión tipo codo de 90° y 45°. Codos de 90° y codos de 45° se utilizan más que cualquier otro accesorio para distribución de tubería, se utilizan para maniobrar alrededor de obstáculos e introducen la flexibilidad en los sistemas de tuberías.

Los codos 90° se pueden encontrar de diversos materiales, en este estudio, al igual que la tubería solo se trabaja con PVC, acero galvanizado y cobre.

Para tubería PVC los codos de 90° son lisos en su parte interna y para su instalación es necesario adherirlo a la tubería PVC con pegamento para PVC. En este estudio se encuentran codos de PVC de 90° de $\frac{3}{4}$ pulgada

Para tubería de acero galvanizado los codos de 90° son roscados en su parte interna, en este estudio se encuentran codos de acero galvanizado de 90° de $\frac{3}{4}$ pulgada y 1 pulgada rosca NPT (ANSI B16.11). Así también codos de acero galvanizado de 45° de $\frac{3}{4}$ pulgada rosca NPT (ANSI B16.11).

Para tubería de cobre de temple rígido tipo M los codos de 90° son lisos y para su instalación es necesario soldarlo a la tubería de cobre con varilla de plata y un fundente para evitar fugas o filtraciones. En este estudio se encuentran codos de 90° de $\frac{3}{4}$ ".

- b. Unión tipo tee. Se utilizan para formar conexiones de ramales de tubería donde son requeridos obtener una derivación a 90° del ramal. Muchas de las aplicaciones de la unión tipo tee es en sistemas paralelos de tubería.

Para tubería PVC las tes son lisas en su parte interna y para su instalación es necesario adherirla a la tubería PVC con pegamento para PVC. En este estudio se encuentran tes de $\frac{3}{4}$ ".

Para tubería de acero galvanizado las tes son roscadas en su parte interna, en este estudio se incluyen tes de $\frac{3}{4}$ " y de 1" rosca NPT (ANSI B16.11).

Para tubería de cobre de temple rígido tipo M las tes son lisas y para su instalación es necesario soldarlas a la tubería de cobre con varilla de playa y un fundente para evitar fugas o filtraciones. En este estudio se encuentran tes de $\frac{3}{4}$ ".

c. Unión tipo yee. Se utilizan para formar conexiones de ramales de tubería donde son requeridos obtener una derivación a 45° del ramal. Incluso se pueden obtener derivaciones a 90° pero con una curva suave.

Para tubería PVC las yes son lisas en su parte interna y para su instalación es necesario adherirla a la tubería PVC con pegamento para PVC. En este estudio se encuentran y es de $\frac{3}{4}$ ".

Para tubería de acero galvanizado las yes son roscadas en su parte interna, en este estudio se incluyen yes de $\frac{3}{4}$ " rosca NPT (ANSI B16.11).

d. Unión universal. La unión universal es un accesorio de conexión mecánica en sus extremos de dos tuberías. Esta se compone de dos piezas que se unen con una rosca NPT, la cual permite acoplar y desacoplar los extremos de tuberías sin perjudicar el desarmado completo de la red o configuración de la tubería.

Para tubería PVC la unión universal es lisa en ambos extremos, para adherir la tubería a la unión universal es necesario untar pegamento para PVC. En este estudio se encuentran uniones universales de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada

Para tubería de acero galvanizado la unión universal es roscada en ambos extremos en su parte interna, en este estudio se encuentran uniones universales de acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ " y 1" rosca NPT (ANSI B16.11).

Para tubería de cobre de temple rígido tipo M la unión universal es lisa y para su instalación es necesario soldarlas a la tubería de cobre con varilla de playa y un fundente para evitar fugas o filtraciones. En este estudio se encuentran uniones universales de $\frac{3}{4}$ ".

e. Reductor tipo buje. El reductor tipo buje se usan para cambiar de diámetro entre secciones de tubos adyacentes. El reductor tipo buje siempre se designan de tal manera que el diámetro más grande precede al diámetro más pequeño. El reductor tipo buje es el tipo de

reductor que cuenta con ambos tipos de conexiones; macho y hembra que, pueden ser roscados o lisos.

En este estudio se tiene tubería de acero galvanizado de 1" de la cual se deben derivar 6 ramales de tubería de $\frac{3}{4}$ " por lo que es necesario cambiar de sección con la ayuda de un reductor tipo buje, todos los reductores tipo buje utilizados son de acero galvanizado de 1" a $\frac{3}{4}$ " rosca NPT.

f. Adaptador hembra. Es un accesorio que permite la unión de dos tuberías o accesorios con el mismo diámetro nominal, con la característica que éste permite que las tuberías se inserten en él.

g. Adaptador macho. Es un accesorio que permite, al igual que el adaptador hembra, la unión de dos tuberías o accesorios con el mismo diámetro nominal, con la característica que éste se inserta dentro de la tubería o accesorio.

h. Tapas y tapones. Se usan para terminar y sellar el final de una tubería. Las tapas están disponibles como soldadura a tope o conexiones roscadas y, los tapones están disponibles como conexiones roscadas.

Los tapones, para este estudio, son tapones hembra de PVC y tapón macho de acero galvanizado.

3. Componentes para control de flujo

a. Válvula de globo. Las válvulas de globo, también conocidas también como válvulas de asiento, se utilizan para control minucioso del fluido, con opciones que van desde encendido-apagado hasta rango de apertura y cierre permitiendo así un control de flujo. Estas válvulas se construyen con un elemento de cierre o disco que asienta sobre una sección circular.

La válvula de globo presenta una ventaja importante, esta tiene un golpe de ariete nulo debido a que la apertura y cierre son lentos, es decir que, al hacer girar la perilla, el movimiento genera que el disco llegue hasta el asiento lentamente evitando este fenómeno.

Sin embargo, a medida que el elemento de cierre se aproxima al asiento, la sección de paso se reduce y por tanto aumenta la pérdida de carga disminuyendo el caudal.

b. Válvula de bola. La válvula de bola, también conocida como válvula rápida o llave de paso, se utilizan en este estudio para el control del fluido en sus únicas dos posiciones encendido o apagado con un solo giro de 90° de la manilla que hace girar una esfera con un agujero

transversal que permite el paso del flujo. La apertura o cierre de las válvulas de bola permiten habilitar o deshabilitar los ramales de tuberías para hacer las mediciones

Este tipo de válvulas no ofrecen una regulación precisa del flujo al ser de $\frac{1}{4}$ de vuelta. Su ventaja es que la bola perforada permite la circulación directa en la posición abierta con una pérdida de carga bastante más reducida que la válvula de globo.

Debido a que la válvula de bola puede cerrarse rápidamente de forma manual esta puede producir un golpe de ariete, sin embargo, para este estudio no será de relevancia debido a que, cuando el sistema esté en operación no se hará ningún movimiento de cierre de las válvulas de bola en los ramales de tubería.

c. Válvula de retención. Las válvulas de retención se utilizan en este proyecto para evitar el retorno del agua en las tuberías, el retorno del fluido puede causar daño en la bomba haciendo girar el impulsor en la dirección contraria. La válvula de retención evita golpes de ariete en el sistema, principalmente en la descarga de la bomba. Además, presenta otra ventaja en este estudio, mantener la presión en la tubería para poder tomar las mediciones necesarias en los manómetros.

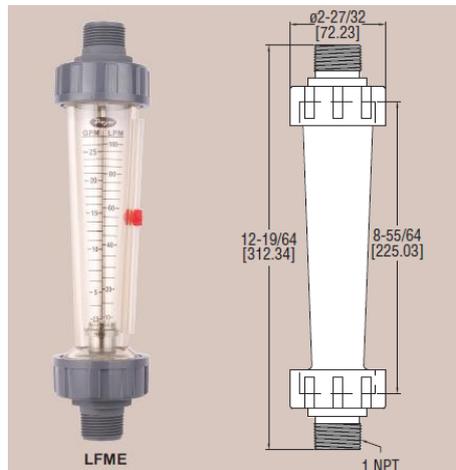
Todas las válvulas de retención se suministran con una flecha de dirección el cuerpo de la válvula para indicar la dirección del flujo.

4. Componentes para toma de datos

a. Rotámetro. El rotámetro marca Dwyer serie LFME-13-F2 tiene capacidad de medición de 20 GPM, este es un rotámetro de policarbonato de eje vertical con conexiones macho de 1 pulgada, rosca NPT. En él, un contrapeso cilíndrico puede ascender por una guía vertical debida a la fuerza de arrastre de la corriente hasta una altura que es proporcional al caudal circulante gracias a la forma troncocónica del conducto interno del rotámetro. Una escala graduada permite leer directamente el valor del caudal.

En la figura siguiente se muestra el rotámetro utilizado:

Figura No. 5: Rotámetro LFME-13-F2



Fuente: (Dwyer, 2009)

b. Manómetro. La presión de la tubería se mide con un manómetro, la pérdida de presión se determina colocando manómetros entre dos puntos de la instalación; al inicio y otro al final del ramal de tubería.

Figura No. 6: Manómetro, 0-60 PSI



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

5. Diseño del depósito de agua

Para garantizar que exista agua dentro de los tubos del banco de pruebas y además tener una reserva de agua es necesario diseñar un depósito que cubra estas necesidades.

El volumen mínimo del tanque se obtiene a partir del volumen que ocupa el agua en toda la configuración de tuberías del banco de pruebas. Adicionalmente, es necesario agregar a 10% del volumen mínimo para tener una reserva mínima de agua.

El depósito de agua es de forma cilíndrica y con tapadera para evitar que polvo y sólidos entren al depósito.

a. Cálculos para dimensionamiento de depósito de agua. A continuación, se muestran los cálculos para conocer las dimensiones mínimas del depósito de agua.

Para obtener el volumen mínimo del tanque es necesario conocer el volumen de agua ocupado dentro de toda la tubería del banco de pruebas. Se tienen dos diferentes diámetros nominales de tubería; $\frac{3}{4}$ pulgada y 1 pulgada, debido a especificaciones de estos materiales cada uno tiene diámetros internos diferentes.

La tubería y el depósito son de forma cilíndrica, por lo que el volumen de un cilindro sigue la siguiente ecuación:

Ecuación No. 6: Volumen de cilindro

$$Vol = \pi r^2 L$$

Fuente: (Jiménez, 2005)

Donde:

$Vol = volumen$

$r = radio\ del\ cilindro$

$L = largo\ del\ cilindro$

Tubería PVC cédula 40:

Diámetro nominal: $\frac{3}{4}$ pulg.

Diámetro interno: 0.804 pulg.

Radio interno: 0.402 pulg.

Longitud total de tubería: 116 pulg

Según Ecuación No. 6

$$Vol_{PVC, 3/4 pulg.} = \pi(0.402 pulg)^2(116 pulg) = 58.89 pulg^3$$

Tubería PVC cédula 40:

Diámetro nominal: 1 pulg.

Diámetro interno: 1.029 pulg.

Radio interno: 0.5145 pulg.

Longitud total de tubería: 25.75 pulg

Según Ecuación No. 6

$$Vol_{PVC,1\text{ pulg.}} = \pi(0.5145\text{ pulg})^2 (25.75\text{ pulg}) = 21.41\text{ pulg}^3$$

Tubería de cobre rígido tipo M

Diámetro nominal: $\frac{3}{4}$ pulg.

Diámetro interno: 0.811 pulg

Radio interno: 0.406 pulg

Longitud total de tubería: 161.75 pulg

Según la Ecuación No. 6

$$Vol_{Cobre,3/4\text{ pulg.}} = \pi(0.406\text{ pulg})^2 (161.75\text{ pulg}) = 83.76\text{ pulg}^3$$

Tubería de acero galvanizado

Diámetro nominal: $\frac{3}{4}$ pulg

Diámetro interno: 0.824 pulg

Radio interno: 0.412 pulg

Longitud total de tubería: 137.5625 pulg

Según la Ecuación No.6

$$Vol_{HG,3/4\text{ pulg.}} = \pi(0.412\text{ pulg})^2 (137.5625\text{ pulg}) = 73.36\text{ pulg}^3$$

Diámetro nominal: 1 pulg

Diámetro interno: 1.049 pulg

Radio Interno: 0.525 pulg

Longitud total de tubería: 215.625 pulg

Según la Ecuación No. 6

$$Vol_{HG,1\text{ pulg.}} = \pi(0.525\text{ pulg})^2 (215.625\text{ pulg}) = 186.71\text{ pulg}^3$$

Volumen mínimo de agua en tuberías;

$$Vol_{min} = Vol_{PVC,1\ pulg.} + Vol_{PVC,1\ pulg.} + Vol_{Cobre,3/4\ pulg.} + Vol_{HG,3/4\ pulg.} + Vol_{HG,1\ pulg.}$$

$$Vol_{min} = 58.89\ pulg^3 + 21.41\ pulg^3 + 83.76\ pulg^3 + 73.36\ pulg^3 + 186.71\ pulg^3$$

$$Vol_{agua-tub} = 424.13\ pulg^3$$

Agregando el 10% del volumen mínimo de agua en tuberías para reserva de agua, se obtiene el volumen mínimo total;

$$Vol_{min} = 424.13\ pulg^3 + 42.413\ pulg^3$$

$$Vol_{min} = 466.54\ pulg^3$$

Volumen mínimo en litro:

$$Vol_{min} = 466.54\ pulg^3 \left(\frac{1\ pie}{12\ pulg} \right)^3 \left(\frac{1\ m}{3.28\ pies} \right)^3 \left(\frac{1\ L}{0.001\ m^3} \right)$$

$$Vol_{min} = 7.65\ Lts$$

Dimensiones mínimas del depósito de agua

El largo del depósito se selecciona en base al espacio que puede ocupar en la parte inferior del banco de pruebas, este debe ser de 40 cm. El agua llega hasta un nivel específico de 30 cm.

$$L_{min} = 25\ cm = 9.843\ pulg$$

Radio mínimo a partir de la Ecuación No. 6

$$r_{min} = \sqrt{\frac{Vol_{min}}{\pi L_{min}}}$$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{466.54\ pulg^3}{\pi (9.843\ pulg)}} = 3.88\ pulg$$

$$1 \text{ pulg} = 2.54 \text{ cm}$$

$$r_{min} = 3.88 \text{ pulg} \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg}} \right) = 9.86 \text{ cm}$$

$$D_{min} = 2 r$$

Donde:

D_{min} = diámetro mínimo

$$D_{min} = 2 (9.86 \text{ cm}) = 19.72 \text{ cm}$$

Tabla No. 4: Dimensiones mínimas finales del depósito de agua

Largo del depósito	Nivel de agua en el depósito	Diámetro mínimo del depósito	Volumen mínimo
30 cm	25 cm	19.72 cm	7.65 Litros

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Sin embargo, se ha seleccionado un depósito para el almacenamiento de agua de forma cilíndrica y en la parte inferior un cono truncado para que, sólidos y suciedad queden en el fondo del depósito evitando así que sean succionados por la bomba centrífuga. Además, el sistema cuenta con un filtro antes de la succión de la bomba como medida de protección adicional.

El volumen de agua que puede succionar la bomba es únicamente el volumen del cilindro del depósito; con dimensiones: 60 cm (23.622 pulgada) de diámetro y una altura de 30 cm (11.811 pulgadas). El agua solo llega hasta una altura de 25 cm (9.843 pulgadas) respecto de la base del cilindro.

Volumen de agua que puede succionar la bomba (cilindro)

Según la Ecuación No. 6

$$Vol_{cil} = \pi r^2 L$$

Donde:

Vol_{cil} = volumen de succión del depósito

r = radio del cilindro (30 cm = 11.811 pulg)

L = nivel de agua (25 cm = 9.843 pulg)

$$Vol_{cil} = \pi (11.811 \text{ pulg})^2 (9.843 \text{ pulg})$$

$$Vol_{cil} = 4,313.27 \text{ pulg}^3$$

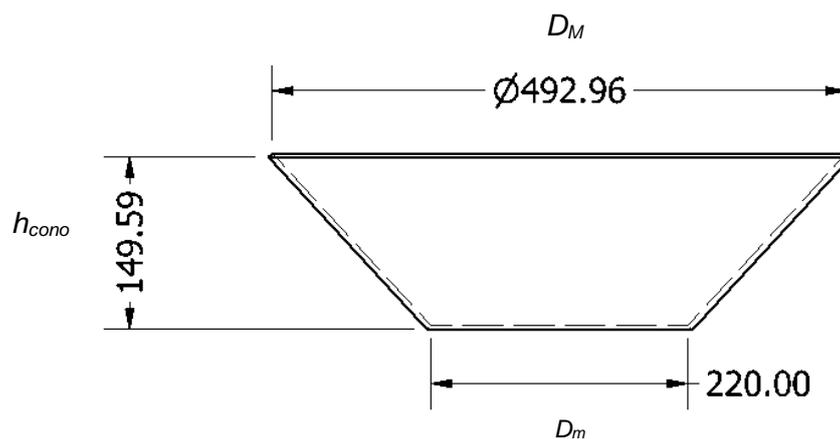
En litros se obtiene:

$$Vol_{cil} = 4,313.27 \text{ pulg}^3 \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulg}} \right)^3 \left(\frac{1 \text{ m}}{3.28 \text{ pies}} \right)^3 \left(\frac{1 \text{ L}}{0.001 \text{ m}^3} \right)$$

$$Vol_{cil} = 70.73 \text{ Lts}$$

En la parte inferior del cilindro se encuentra un cono truncado donde se almacena agua con sólidos y suciedad, cilindro y cono truncado forma el depósito. A continuación, se conoce el volumen de agua en el cono truncado a partir de las siguientes dimensiones:

Figura No. 7: Dimensiones de cono truncado



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Según Ecuación No. 1: Volumen de cono truncado

$$Vol_{cono} = \frac{\pi}{3} h_{cono} (r_M^2 + r_M r_m + r_m^2)$$

Fuente: (Jiménez, 2005)

Donde:

$$r_M = \frac{D_M}{2} = \text{radio mayor}$$

$$r_m = \frac{D_m}{2} = \text{radio menor}$$

h_{cono} = altura del cono truncado

Por lo tanto,

$$Vol_{cono} = \frac{\pi}{3}(14.96cm)((24.65cm)^2 + (24.65cm)(11cm) + (11cm)^2)$$

$$V_{cono} = 15,662.51cm^3$$

En litros se obtiene:

$$Vol_{cono} = 15,662.51 cm^3 \left(\frac{1m}{100cm}\right)^3 \left(\frac{1Lt}{0.001m^3}\right)$$

$$V_{cono} = 15.66 Lts$$

Volumen final de agua en el depósito, en litros:

$$Vol_{final} = Vol_{cil} + Vol_{cono}$$

$$Vol_{final} = 70.73 Lts + 15.66 Lts$$

$$Vol_{final} = 86.40Lts$$

Tabla No. 5: Resumen de dimensiones generales finales y volumen del depósito de agua

Altura cilindro	30cm
Nivel de agua respecto base del cilindro	25cm
Díámetro del cilindro	60cm
Volumen de agua en cilindro	70.73 Litros
Volumen de agua en cono	15.66 Litros
Volumen total de agua en el depósito	86.40 Litros

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

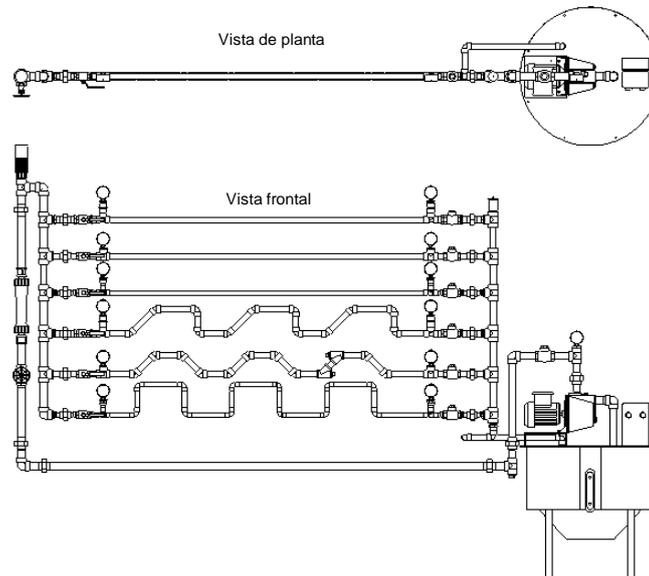
Ver planos del depósito en la sección de anexos para conocer sus dimensiones a detalle.

C. Configuraciones de tubería, tramos y accesorios

El diseño y construcción del banco de pruebas para pérdidas de carga en tubería y accesorios abarca un numeroso estudio de mecánica de fluidos el cual pretende conocer la pérdida de carga o energía del fluido en todo el sistema, así también compete al estudio, análisis y observación de resultados de pérdida de carga de configuraciones de tubería ya establecidas en el diseño. Con cada configuración se pretende obtener diversos resultados y análisis de pérdida de energía del fluido, esto es debido a que cada configuración cuenta con tuberías rectas y accesorios de 3 diferentes materiales, adicionalmente se puede observar las diferencias de curvas características de sistema y bomba de cada configuración.

A continuación, se muestra el diseño final del sistema de tubería del banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios:

Figura No. 8: Diseño de tubería de banco de pruebas



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

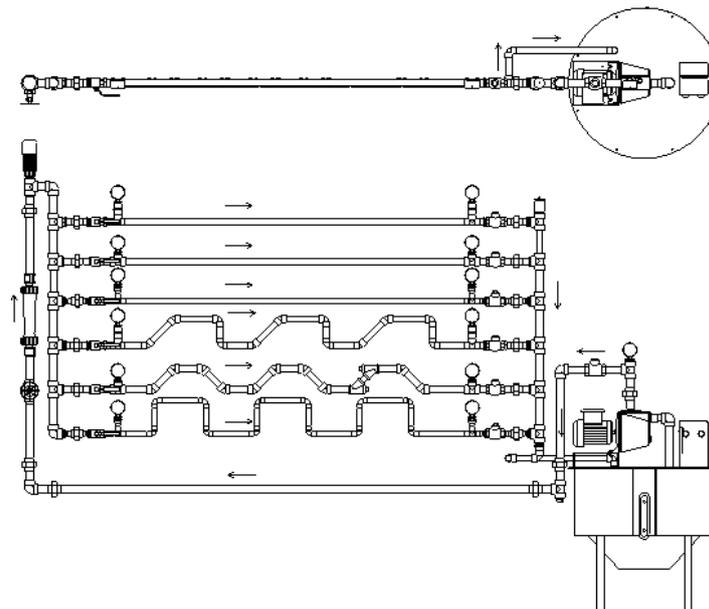
El sistema anterior incluye una diversidad de accesorios y tubería con dimensiones, especificaciones y materiales comunes en la industria guatemalteca, se analiza cada configuración y cada tramo para establecer el comportamiento del fluido y la pérdida de energía y presión particular.

Cada configuración cuenta un manómetro inicial y un manómetro final para toma medición de presión para conocer la caída de presión en el fluido en tramos rectos y en tramos con accesorios.

A partir de este apartado se muestran las configuraciones de tubería, materiales, accesorios y especificaciones para determinar la pérdida de energía según diseño y planos presentados en anexos.

El sistema de tubería comprende un ciclo cerrado de flujo de agua a 20°C en cualquier configuración, el flujo de agua se da a partir de la succión de una bomba centrífuga desde el depósito y devuelve el flujo de agua hacia al depósito. Las flechas muestran la dirección del flujo en cada tramo de tubería del sistema.

Figura No. 9: Dirección de flujo en el sistema de tubería

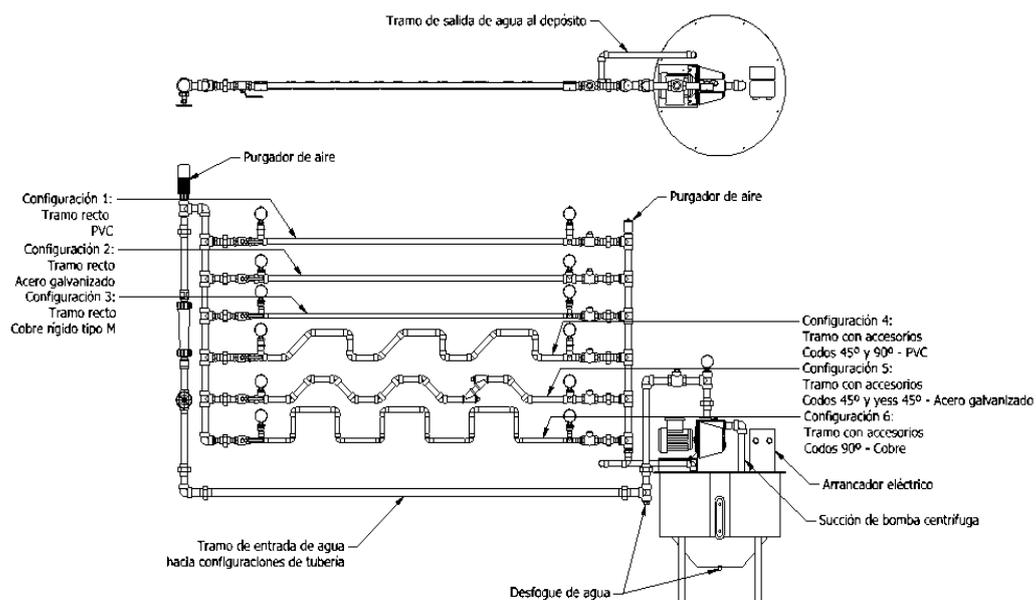


Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El control de flujo lo permite o lo restringe cada una de las válvulas de bola (válvulas rápidas), con ello se cierra o se abre la configuración que se desee analizar, o bien, si se prefiere el sistema de tuberías completo.

A continuación, se muestra la ubicación de las configuraciones del sistema de tubería, el tramo de succión, de distribución de flujo y retorno al depósito de agua.

Figura No. 10: Configuraciones del sistema de tubería



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El sistema de tuberías y el tanque tienen tapones en la parte inferior para vaciar el agua cuando se terminen de hacer las pruebas. La siguiente tabla muestra los materiales utilizados en el diseño y construcción del banco de pruebas y la ubicación de los mismos.

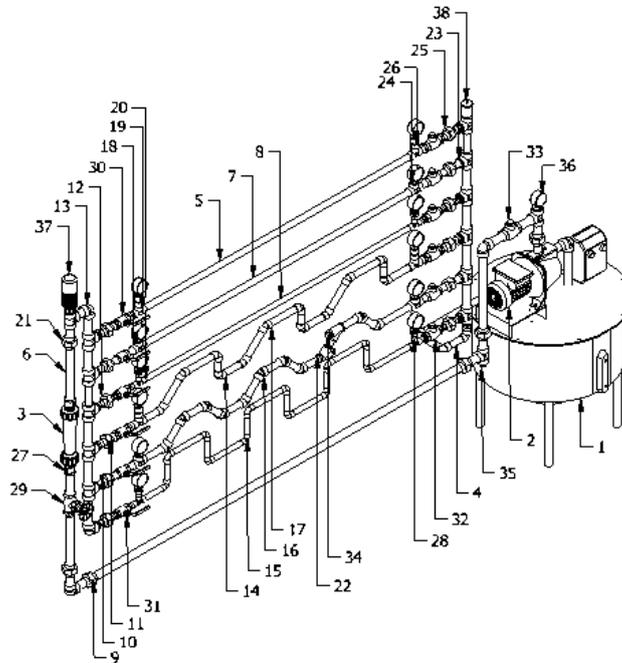
Tabla No. 6: Tabla de materiales

No.	Cantidad	Accesorio	Especificación
1	1	Depósito de agua	Capacidad de 86 litros
2	1	Bomba centrífuga	Modelo LFME-13-F2, policarbonato, 0-80 GPM, rosca NPT
3	1	Rotámetro	42 L/min (11GPM), 128 pies, 3450RPM, 1pulg (succión y descarga)
4	29 ⁵ / ₈ pulgadas	Tubo PVC	1 pulgada ASTM D2241
5	116 pulgadas	Tubo PVC	³ / ₄ pulgada ASTM D2241
6	215 ⁵ / ₈ pulgadas	Tubo HG	pulgada ASTM A53-12
7	137 ⁹ / ₁₆ pulgadas	Tubo HG	³ / ₄ pulgada ASTM A53-12
8	161 ³ / ₄ pulgadas	Tubo cobre tipo M	³ / ₄ pulgada ASTM B88
9	6	Unión universal	1 pulgada acero galvanizado, rosca NPT
10	4	Unión universal	³ / ₄ pulgada acero galvanizado, rosca NPT
11	4	Unión universal	³ / ₄ pulgada, PVC, liso
12	4	Unión universal	³ / ₄ pulgada, cobre, soldable
13	5	Codo 90°	1 pulgada acero galvanizado, rosca NPT
14	10	Codo 90°	³ / ₄ pulgada, PVC, liso
15	12	Codo 90°	³ / ₄ pulgada, cobre, soldable
16	12	Codo 45°	³ / ₄ pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
17	6	Codo 45°	³ / ₄ pulgada PVC, liso
18	4	Tee	³ / ₄ pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
19	4	Tee	³ / ₄ pulgada, PVC, liso
20	4	Tee	³ / ₄ pulgada, cobre, soldable
21	15	Tee	1 pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
22	2	Yee	³ / ₄ pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
23	13	Reductor tipo buje	1 a ³ / ₄ pulgada acero galvanizado, rosca NPT
24	12	Reductor tipo buje	³ / ₄ a ¹ / ₂ pulgada acero galvanizado, rosca NPT
25	16	Adaptador macho	³ / ₄ pulgada, PVC, liso-rosca NPT
26	4	Adaptador hembra	³ / ₄ pulgada, PVC, liso
27	2	Adaptador hembra	1 pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
28	4	Adaptador hembra	³ / ₄ pulgada, cobre, soldable-rosca NPT
29	1	Válvula de globo	1 pulgada, bronce, rosca NPT
30	2	Válvula de bola	³ / ₄ pulgada PVC, liso
31	4	Válvula de bola	³ / ₄ pulgada bronce, rosca NPT
32	6	Válvula de retención	³ / ₄ pulgada, bronce, rosca NPT
33	1	Válvula de retención	1 pulgada, bronce, rosca NPT
34	2	Tapón macho	³ / ₄ pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
35	1	Tapón macho	1 pulgada, acero galvanizado, rosca NPT
36	13	Manómetro	0-60 PSI
37	1	Purgador de aire	Policarbonato
38	1	Purgador de aire	Acero

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

En la Figura No. 11 se muestra la ubicación de los materiales utilizados en el diseño y construcción del banco de pruebas. La numeración va de acuerdo a la tabla de materiales enlistada anteriormente.

Figura No. 11: Ubicación de materiales y accesorios del diseño



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

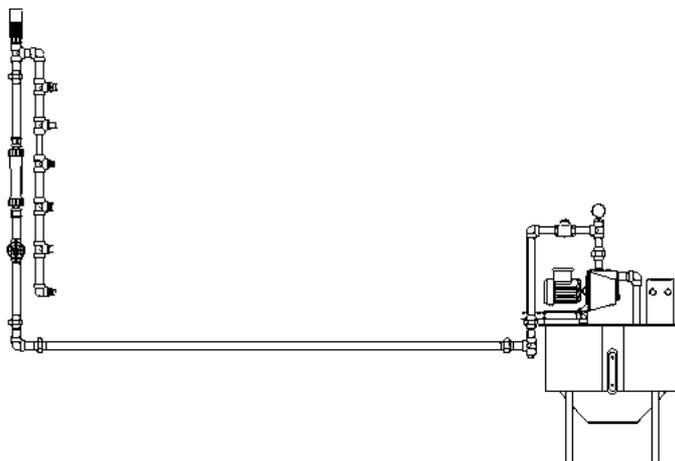
Se tiene un tramo de tubería de acero galvanizado de 1 pulgada desde la succión de la bomba; este provee de flujo de agua hacia las tuberías, el flujo se deriva hacia cada una de las configuraciones de tubería con accesorios tipo Tee de acero galvanizado de 1 pulgada.

En este tramo se encuentra ubicado una válvula de globo de bronce de 1 pulgada la cual regula el caudal, también se encuentra un rotámetro para tomar la medición de caudal en GPM o litros por minuto según apertura o cierre de la válvula de globo.

El tramo de alimentación de agua es el mismo para cada una de las configuraciones, este cuenta con tubería de acero galvanizado de 1 pulgada y se deriva a cada uno de los tramos de medición por medio de la derivación de una Tee de Acero galvanizado, para hacer la conexión hacia tuberías de diferentes materiales y dimensiones, se utilizan reductores tipo buje de acero galvanizado de 1 a $\frac{3}{4}$ de pulgada, seguidamente se instala un adaptador macho de $\frac{3}{4}$ de pulgada para la transición al tramo de tubería de análisis; el adaptador macho es instalado según el material de tubería.

A continuación, se muestra la Figura No. 12 representativa del tramo de alimentación.

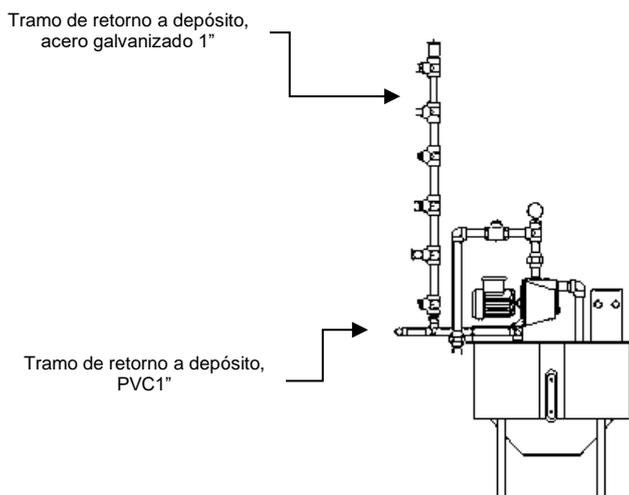
Figura No. 12: Tramo de alimentación



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Una vez el agua ha pasado por cada uno de los tramos de análisis o prueba, retorna al depósito por medio de una conexión similar a la de alimentación de agua, ésta, al igual que la anterior, cuenta con tubería de acero galvanizado de 1 pulgada y accesorios tipo Tee (con conexiones y transiciones iguales), cuando ha pasado por este tramo se deriva con un codo 90° de PVC, una tubería de PVC de 1 pulgada para la descarga del agua utilizada en el sistema hacia el depósito.

Figura No. 13: Tramo de retorno a depósito



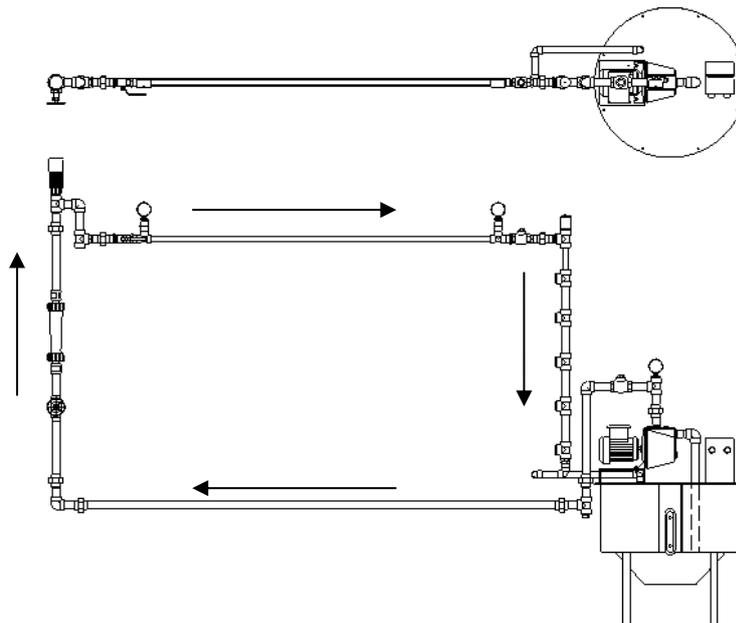
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

1. **Configuración de tubería 1.** La configuración de tubería 1 se caracteriza por ser un tramo recto de tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sea mínima debido a que las pérdidas solo se dan por longitud de la tubería (fricción que genera la rugosidad del PVC en el flujo de agua). La diferencia de presión en este tramo es la referencia para poder ser comparada con el tramo con accesorios de PVC de la configuración 4.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula de bola abierta es la del tramo de tubería PVC, todas las demás permanecen cerradas para hacer el análisis respectivo de la configuración de tubería. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

a. **Disposición de equipo en la configuración de tubería 1.** A continuación, se muestra la configuración de tubería 1, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 14 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 14: Configuración de tubería 1



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 7: Disposición de equipo en configuración de tubería 1

Cantidad	Accesorio	Especificación
6	Codo 90°	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
8	Adaptador macho	PVC, ¾ de pulgada
2	Unión universal	PVC, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	PVC, ¾ de pulgada
2	Tee	PVC, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
215 5/8 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
58 ½ pulgadas	Tubería	PVC, ¾ pulgada
25 ¾ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	42 L/min, 38 metros, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

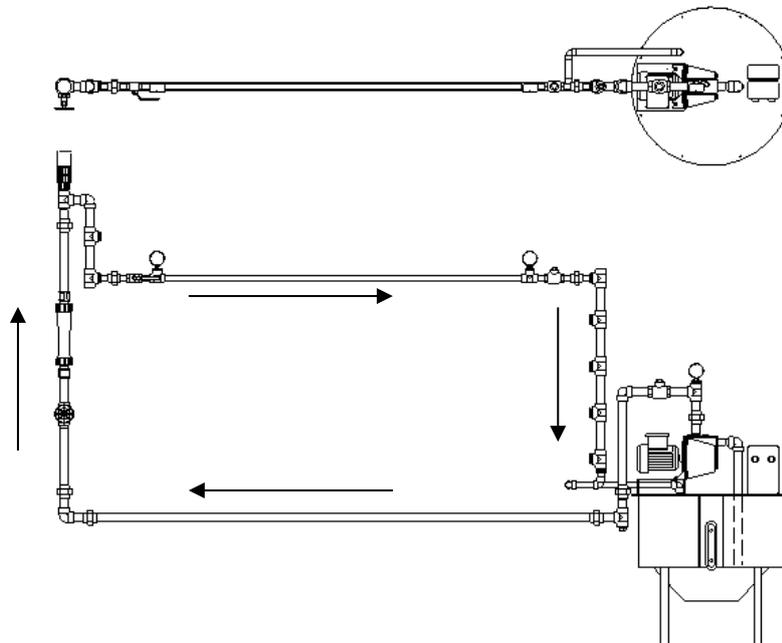
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

2. Configuración de tubería 2. La configuración de tubería 2 se caracteriza por ser un tramo recto de tubería de Acero Galvanizado de ¾ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sean mínima debido a que las pérdidas solo se dan por longitud de la tubería (fricción que genera la rugosidad del acero galvanizado en el flujo de agua). La diferencia de presión en este tramo es la referencia para ser comparada con el tramo con accesorios de acero galvanizado de la configuración de tubería 5.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula abierta es la del tramo de tubería de acero galvanizado, todas las demás deben permanecer cerradas para hacer el análisis respectivo en el tramo. En esta configuración se añade al análisis una Tee de acero galvanizado de 1 pulgada adicional debido a que el tramo se encuentra en la parte inferior del tramo recto anterior de PVC. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

- a. Disposición de equipo en la configuración de tubería 2. A continuación, se muestra la configuración de tubería 2, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 15 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 15: Configuración de tubería 2



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 8: Disposición de equipo en configuración de tubería 2

Cantidad	Accesorio	Especificación
5	Codo 90°	Acero Galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
2	Unión universal	PVC, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	PVC, ¾ de pulgada
2	Tee	Acero galvanizado, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
215 5/8 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
71 5/16 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, ¾ pulgada
25 ¾ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	11.25 GPM, 128 pies, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

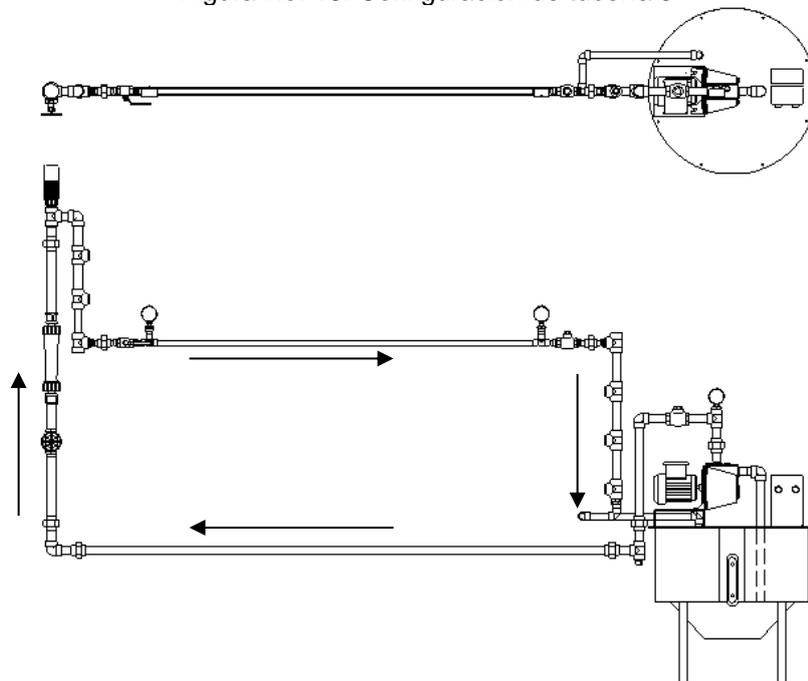
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

3. **Configuración de tubería 3.** La configuración de tubería 3 se caracteriza por ser un tramo recto de tubería de cobre rígido tipo M de $\frac{3}{4}$ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sean mínima debido a que las pérdidas solo se dan por longitud de la tubería (fricción que genera la rugosidad del cobre en el flujo de agua). La diferencia de presión en este tramo es la referencia para ser comparada con el tramo con accesorios de cobre de la configuración de tubería 6.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula abierta es la del tramo recto de tubería de cobre, todas las demás deben permanecer cerradas para hacer el análisis respectivo en el tramo. En esta configuración se añade al análisis 2 Tee de acero galvanizado de 1 pulgada adicionales, debido a que el tramo se encuentra en la parte inferior del tramo anterior de PVC y acero galvanizado. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

a. Disposición de equipo en la configuración de tubería 3. A continuación, se muestra la configuración de tubería 3, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 16 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 16: Configuración de tubería 3



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 9: Disposición de equipo en configuración de tubería 3

Cantidad	Accesorio	Especificación
5	Codo 90°	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
2	Unión universal	Cobre, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	Bronce, ¾ de pulgada
2	Tee	Cobre, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
215 ⁵ / ₈ pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
70 ⁹ / ₁₆ pulgadas	Tubería	Cobre rígido tipo M, ¾ pulgada
25 ³ / ₄ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	11.25 GPM, 128 pies, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

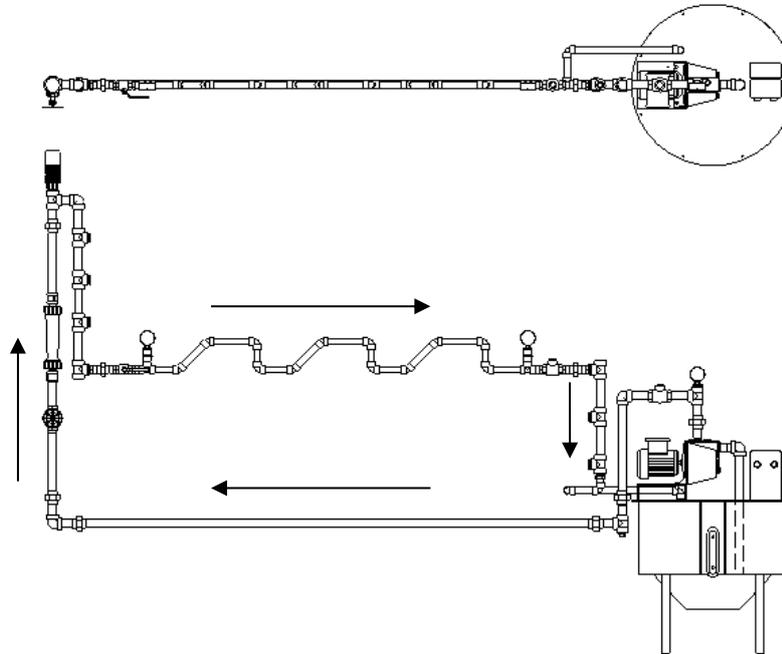
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

4. Configuración de tubería 4. La configuración de tubería 4 se caracteriza por ser un tramo con accesorios, incluyendo codos a 45° y codos a 90° y, tubería de PVC de ¾ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sea aún menor a la del tramo recto de tubería PVC de la configuración de tubería 1 debido a que las pérdidas de presión y carga se dan por accesorios y longitud de tubería.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula abierta es la del tramo de accesorios y tubería de PVC de esta configuración, todas las demás deben permanecer cerradas para hacer el análisis respectivo en el tramo. En esta configuración se añade al análisis 3 Tee de acero galvanizado de 1 pulgada adicionales, debido a que el tramo se encuentra en la parte inferior del tramo anterior de PVC, acero galvanizado y cobre. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

- a. Disposición de equipo en la configuración de tubería 4. A continuación, se muestra la configuración de tubería 4, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 17 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 17: Configuración de tubería 4



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 10: Disposición de equipo en configuración de tubería 4

Cantidad	Accesorio	Especificación
5	Codo 90°	Acero Galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
2	Unión universal	PVC, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	Bronce, ¾ de pulgada
2	Tee	PVC, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
6	Codo 90°	PVC, ¾ pulgada
6	Codo 45°	PVC, ¾ pulgada
215 5/8 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
57 pulgadas	Tubería	PVC, ¾ pulgada

Cantidad	Accesorio	Especificación
25 ¾ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	11.25 GPM, 128 pies, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

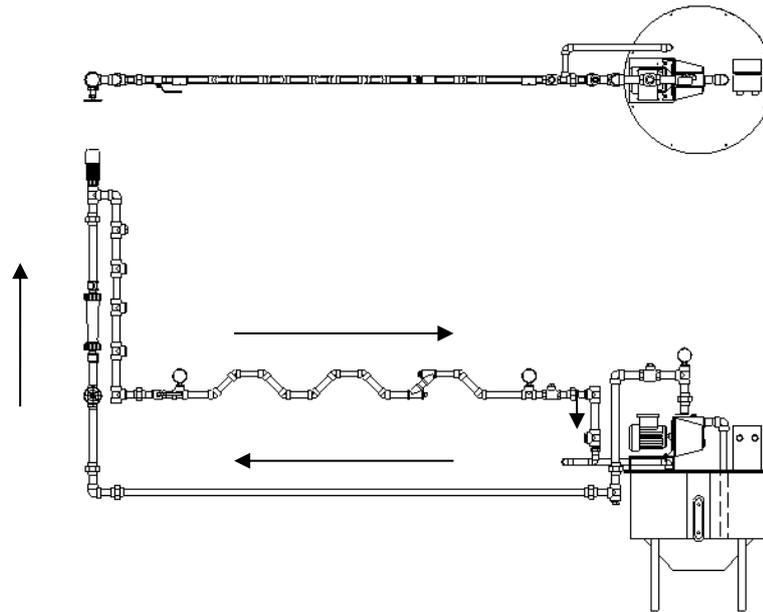
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

5. **Configuración de tubería 5.** La configuración de tubería 5 se caracteriza por ser un tramo con accesorios, incluyendo codos a 45° y yes a 45° y, tubería de acero galvanizado de ¾ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sea aún menor a la del tramo recto de tubería de acero galvanizado de la configuración de tubería 2 debido a que las pérdidas de presión y carga se dan por accesorios y longitud de tubería.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula abierta es la del tramo de accesorios y tubería de acero galvanizado de esta configuración, todas las demás deben permanecer cerradas para hacer el análisis respectivo en el tramo. En esta configuración se añade al análisis 4 Tee de acero galvanizado de 1 pulgada adicionales, debido a que el tramo se encuentra en la parte inferior del tramo recto anterior de PVC, acero galvanizado, cobre y tramo de accesorios de PVC. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

a. **Disposición de equipo en la configuración de tubería 5.** A continuación, se muestra la configuración de tubería 5, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 18 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 18: Configuración de tubería 5



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 11: Disposición de equipo en configuración de tubería 5

Cantidad	Accesorio	Especificación
5	Codo 90°	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de Globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
2	Unión universal	Acero galvanizado, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	Bronce, ¾ de pulgada
2	Tee	Acero Galvanizado, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
2	Yee 45°	Acero galvanizado, ¾ pulgada
10	Codo 45°	Acero galvanizado, ¾ pulgada
215 5/8 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
66 ¼ pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, ¾ pulgada
25 ¾ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	11.25 GPM, 128 pies, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

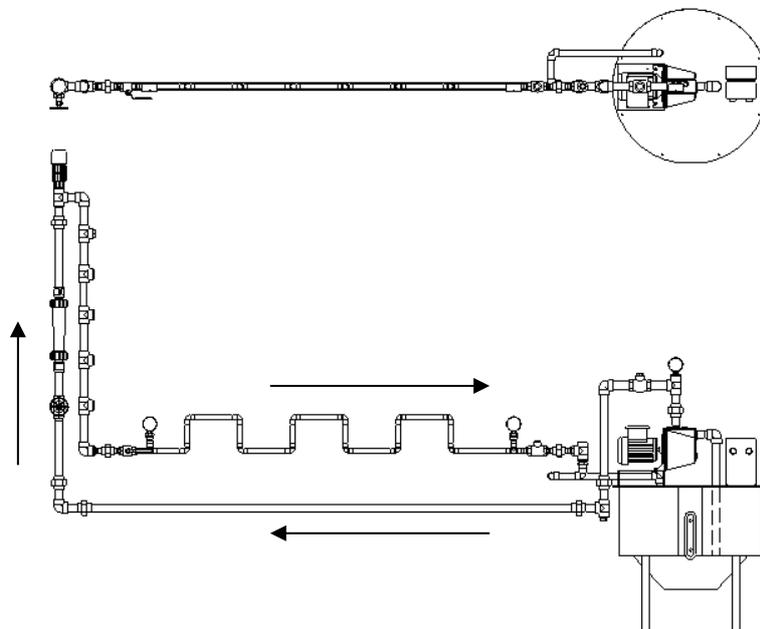
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

6. **Configuración de tubería 6.** La configuración de tubería 6 se caracteriza por ser un tramo con accesorios, incluyendo codos a 90° y tubería de cobre rígido tipo M de $\frac{3}{4}$ pulgada, en cual se toman mediciones de presión con la ayuda de manómetros, la diferencia de presión entre los dos manómetros se espera que sea aún menor a la del tramo recto de tubería de cobre rígido tipo M de la configuración de tubería 3 debido a que las pérdidas de presión y carga se dan por accesorios y longitud de tubería.

El flujo es restringido por válvulas de bola, donde la única válvula abierta es la del tramo de accesorios y tubería de cobre de esta configuración, todas las demás deben permanecer cerradas para hacer el análisis respectivo en el tramo. En esta configuración se añade al análisis 5 Tee de acero galvanizado de 1 pulgada adicionales, debido a que el tramo se encuentra en la parte inferior del tramo recto anterior de PVC, acero galvanizado, cobre y tramo de accesorios de PVC y acero galvanizado. La válvula de retención permite mantener la presión en el tramo para su respectiva medición de presión y a su vez permite que el flujo no retorne.

a. Disposición de equipo en la configuración de tubería 6. A continuación, se muestra la configuración de tubería 6, sus elementos, accesorios y especificaciones necesarios. Refiérase también a la Figura No. 19 para conocer la ubicación de los elementos y accesorios.

Figura No. 19: Configuración de tubería 6



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 12: Disposición de equipo en configuración de tubería 6

Cantidad	Accesorio	Especificación
5	Codo 90°	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, 1 pulgada
1	Válvula de globo	Bronce, 1 pulgada
1	Rotámetro	Policarbonato, 0-20 GPM
2	Adaptador hembra	Acero galvanizado, 1 pulgada
10	Tee	Acero galvanizado, 1 pulgada
2	Reductor tipo buje	Acero galvanizado, de 1 pulgada a ¾ pulgada
2	Unión universal	Cobre, ¾ de pulgada
6	Unión universal	Acero galvanizado, 1 pulgada
1	Válvula de bola	Bronce, ¾ de pulgada
2	Tee	Cobre, ¾ de pulgada
1	Válvula de retención	Bronce, ¾ de pulgada
3	Manómetros	0-60PSI
4	Codo 90°	PVC, 1 pulgada
12	Codo 90°	Cobre, ¾ pulgada
215 5/8 pulgadas	Tubería	Acero galvanizado, 1 pulgada
91 5/16 pulgadas	Tubería	Cobre, ¾ pulgada
25 ¾ pulgadas	Tubería	PVC, 1 pulgada
1	Bomba centrífuga	11.25 GPM, 128 pies, 3450 RPM, 1 pulgada de diámetro en succión y descarga
1	Depósito de agua	Capacidad de 86.4 litros

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

D. Cálculo y análisis de pérdida de carga

Las pérdidas de carga en tuberías son de dos tipos: pérdidas mayores y pérdidas menores.

Las pérdidas mayores, son las pérdidas de superficie por el contacto del fluido con la tubería, mientras más larga la tubería más pérdida de carga habrá.

Las pérdidas menores, son las pérdidas de que se ocasionan por la presencia transiciones, desviaciones del fluido a través de accesorios como codos, válvulas tes, yes, etc.

Para calcular las pérdidas mayores se utiliza la ecuación de Darcy descrita anteriormente como Ecuación No. 3.

$$h_L = f \frac{L V^2}{D_i 2g}$$

Donde:

f: factor de fricción del material de la tubería

L: Longitud de tubería

D_i: Diámetro interno de la tubería

V: velocidad del fluido

g: gravedad

Internamente la tubería, según el material y dimensión expone una rugosidad relativa la cual hace que el fluido se vuelva turbulento y éste pierda energía cuando pasa a través de ella. El factor se define con la ecuación explícita siguiente, según S. E. Halland. (Cengel & Ghajar, 2011).

Ecuación No. 7: Factor de fricción en tubería

$$\frac{1}{\sqrt{f}} \cong -1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_i}{3.7} \right)^{1.11} \right)$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

ε/D_i : rugosidad relativa

ε : rugosidad del material

D_i: Diámetro interior de la tubería

Re = Número de Reynolds

Para calcular las pérdidas menores se utiliza la misma ecuación de Darcy expresada como coeficiente de resistencia, descrita anteriormente como Ecuación No. 4.

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

K_L: coeficiente de resistencia según accesorio

V: velocidad del fluido

g: gravedad

A continuación, se muestra el cálculo de coeficiente de resistencia de todos los accesorios que se encuentran en el sistema de tuberías, el material de los accesorios no es considerado para el estudio y cálculo de coeficientes de resistencia. La cantidad de accesorios y la adición de los mismos varían según la configuración de tubería a analizar:

1. Desarrollo y cálculo de coeficiente de resistencia de rotámetro. El rotámetro está constituido de diferentes componentes, los cuales tienen expansión o contracción gradual para el paso del fluido. La expansión o contracción gradual genera una pérdida de carga adicional al sistema. Cada componente tiene su propio coeficiente de rozamiento debido a sus características, tales como: diámetros y ángulo de sección.

Figura No. 20: Piezas del rotámetro

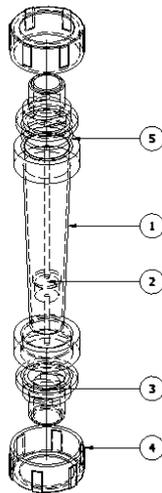


Tabla No. 13: Piezas del Rotámetro

No.	Pieza
1	Bulbo
2	Flotador
3	Conectores: Transición de expansión/contracción
4	Acople
5	Sello (O-Ring)

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

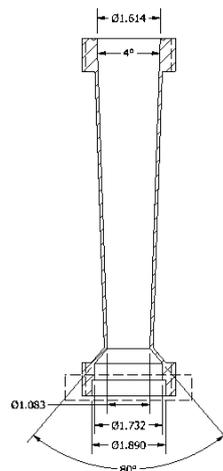
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a. Coeficiente de resistencia del bulbo del rotámetro. El bulbo del rotámetro es la pieza en la cual se da la toma de datos del flujo volumétrico, un flotador de acero inoxidable sube o baja debido al empuje hidrostático del fluido, sube si el empuje hidrostático mayor, y baja si el empuje hidrostático es menor.

En condiciones de estabilidad, el flotador se mantiene a una altura constante, el equilibrio de fuerzas es tal que la suma de la resistencia aerodinámica y el empuje hidrostático del fluido equilibra al peso del flotador, en este punto puede tomarse una medición del flujo volumétrico.

A continuación, se presenta un corte de sección del bulbo del rotámetro y sus dimensiones para calcular el coeficiente de resistencia o rozamiento.

Figura No. 21: Sección transversal y dimensiones internas de rotámetro



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

En una expansión y contracción tubería hay pérdidas de energía ocasionadas por el cambio de sección súbita o gradual, las cuales dependen del diámetro menor, diámetro mayor y, si es un cambio de sección gradual depende también del ángulo que se forma entre la transición, a continuación, se muestran ecuaciones pertinentes:

Expansión gradual:

Ecuación No. 8: Expansión Gradual – Ángulo menor a 45°

$$\theta \leq 45^\circ \quad K = \frac{2.6 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)(1-\beta^2)^2}{\beta^4}$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Donde:

θ : ángulo que se forma entre cambio de sección

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2}$$

d_1 : diámetro menor

d_2 : diámetro mayor

β se define para todas las ecuaciones de expansión y contracción.

Ecuación No. 9: Expansión gradual – Ángulo entre 45° y 180°

$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = \frac{(1-\beta^2)^2}{\beta^4}$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Contracción gradual:

Ecuación No. 10: Contracción gradual – Ángulo menor a 45°

$$\theta \leq 45^\circ \quad K = \frac{0.8 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)(1-\beta^2)^2}{\beta^4}$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Ecuación No. 11: Contracción gradual – Ángulo entre 45° y 180°

$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = \frac{0.5 \sqrt{\operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}(1-\beta^2)}{\beta^4}$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Expansión súbita:

Ecuación No. 12: Expansión súbita

$$K = (1 - \beta^2)^2$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Contracción súbita:

Ecuación No. 13: Contracción súbita

$$K = 0.5(1 - \beta^2)$$

Fuente: (CRANE, 1995)

Se analiza las expansiones y contracciones en la parte central e inferior del bulbo para conocer el coeficiente de resistencia.

1. Expansión gradual en el centro del bulbo. El flujo que pasa a través del centro del bulbo mostrado en la Figura No. 22, internamente en la zona del cuadro mostrado ocasiona una expansión gradual con un ángulo de 4° y debe aplicarse la Ecuación No. 7: Expansión gradual – Ángulo menor a 45°; para conocer el coeficiente de resistencia en la sección del bulbo.

Figura No. 22: Expansión gradual en el centro del bulbo

Donde:

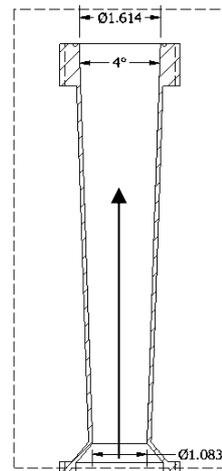
$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.083 \text{ pulg})^2}{(1.614 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.450$$

Por lo tanto;

$$K = \frac{2.6 \operatorname{sen}\left(\frac{4^\circ}{2}\right) (1 - 0.450^2)^2}{0.450^4}$$

$$K = 1.41$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

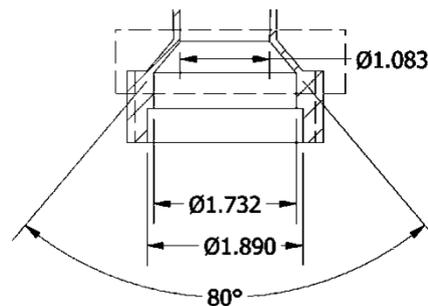
2. Contracción gradual en la sección 1 del bulbo. El flujo que pasa a través de la sección 1 del bulbo mostrado en la Figura No. 23, internamente en la zona del cuadro mostrado ocasiona una contracción gradual con un ángulo de 80° y debe aplicarse la Ecuación No. 10: Contracción gradual – Ángulo entre 45° y 180° ; para conocer el coeficiente de resistencia en la sección del bulbo.

Figura No. 23: Contracción gradual en la sección 1 del bulbo

Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.083 \text{ pulg})^2}{(1.732 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.391$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

$$K = \frac{0.5 \sqrt{\operatorname{sen}\left(\frac{80^\circ}{2}\right)} (1 - 0.391^2)}{0.391^4}$$

$$K = 14.53$$

3. Contracción súbita en la sección 2 del bulbo. El flujo que pasa a través de la sección 2 del bulbo mostrado en la Figura No. 24, internamente la zona en el cuadro marcado ocasiona una contracción súbita y debe aplicarse la Ecuación No. 12: Contracción súbita; para conocer el coeficiente de resistencia en la sección del bulbo.

Figura No. 24: Contracción súbita en la sección 2 del bulbo

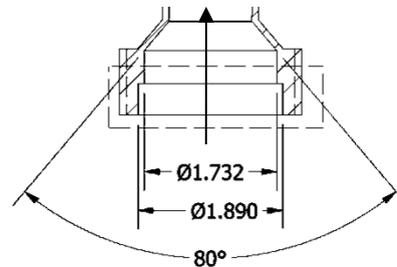
Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.732 \text{ pulg})^2}{(1.890 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.840$$

$$K = 0.5(1 - 0.840^2)$$

$$K = 0.15$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

b. Contracción gradual en la transición superior. La transición superior conecta el rotámetro a la tubería de 1 pulgada de acero galvanizado, el flujo que pasa a través del elemento sigue la dirección de la flecha mostrada en la Figura No. 25. Internamente en el elemento mostrado ocasiona una contracción gradual con un ángulo de 80° y debe aplicarse la Ecuación No. 10: Contracción gradual – Ángulo entre 45° y 180°; para conocer el coeficiente de resistencia en el elemento.

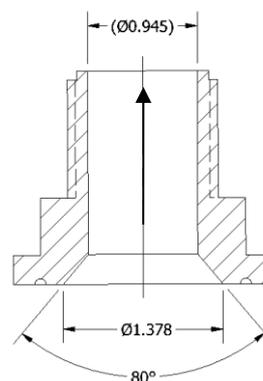
Figura No. 25: Contracción gradual en la transición superior

Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(0.945 \text{ pulg})^2}{(1.378 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.470$$

$$K = \frac{0.5 \sqrt{\sin\left(\frac{80^\circ}{2}\right)} (1 - 0.470^2)}{0.470^4}$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

$$K = 6.40$$

c. Expansión gradual en la transición inferior. La transición inferior conecta la tubería de 1 pulgada de acero galvanizado al rotámetro, el flujo que pasa a través del elemento sigue la dirección de la flecha mostrada en la Figura No. 26. Internamente en el elemento mostrado ocasiona una expansión gradual con un ángulo de 80° y debe aplicarse la Ecuación No. 8: Expansión Gradual – Ángulo entre 45° y 180° ; para conocer el coeficiente de resistencia en el elemento.

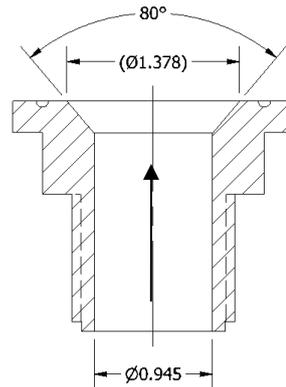
Figura No. 26: Expansión gradual en la transición inferior

Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(0.945 \text{ pulg})^2}{(1.378 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.470$$

$$K = \frac{(1 - 0.470^2)^2}{0.470^4}$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

$$K = 12.44$$

La pérdida de presión en el flotador del rotámetro es 0.70 PSI. (Dwyer, 2009)

Se hace la sumatoria de cada uno de los coeficientes de pérdida de todas las secciones y transiciones en el rotámetro y se obtiene:

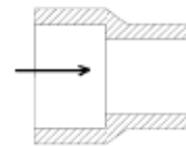
$$K = 1.41 + 14.53 + 0.15 + 6.4 + 12.44$$

$$K = 34.93$$

2. Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia de los accesorios del sistema de tuberías

a. Contracción súbita en reductor tipo buje 1" a ¾". El reductor tipo buje se conecta en la posición mostrada en la Figura No. 27 para conectar la tubería de 1 pulgada a otra de ¾ pulgada, internamente ocasiona una contracción súbita en el cambio de sección y se aplica la Ecuación No. 12: Contracción súbita; para conocer el coeficiente de resistencia en el elemento.

Figura No. 27: Contracción súbita en reductor tipo buje 1" a ¾"



Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.050 \text{ pulg})^2}{(1.315 \text{ pulg})^2}$$

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

$$\beta = 0.638$$

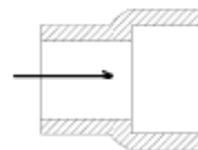
Por lo tanto;

$$K = 0.5(1 - 0.638^2)$$

$$K = 0.30$$

b. Expansión súbita en reductor tipo buje 1" a ¾". El reductor tipo buje se conecta en la posición de la Figura No. 28 para conectar de una tubería de ¾ de pulgada a otra de 1 pulgada, internamente ocasiona una expansión súbita en el cambio de sección y se aplica la Ecuación No. 12: Contracción súbita; para conocer el coeficiente de resistencia en el elemento.

Figura No. 28: Expansión súbita en reductor tipo buje 1" a ¾"



Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.050 \text{ pulg})^2}{(1.315 \text{ pulg})^2}$$

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

$$\beta = 0.638$$

Por lo tanto,

$$K = (1 - 0.638^2)^2$$

$$K = 0.35$$

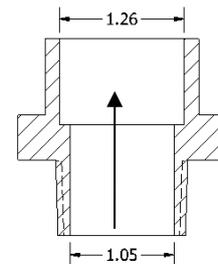
c. Expansión en adaptador macho de 1 pulgada. El adaptador se conecta en la posición de la Figura No. 29 para conectar de una tubería de 1 de pulgada de acero galvanizado a otra de 1 pulgada de PVC, internamente ocasiona una expansión súbita en el cambio de sección y se aplica la Ecuación No. 12: Contracción súbita; para conocer el coeficiente de resistencia en el elemento.

Donde:

$$\beta = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \frac{(1.050 \text{ pulg})^2}{(1.260 \text{ pulg})^2}$$

$$\beta = 0.694$$

Figura No. 29: Expansión en adaptador macho



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = (1 - 0.694^2)^2$$

$$K = 0.26$$

El factor de fricción f_t se define en la siguiente tabla, únicamente depende del diámetro nominal de la tubería:

Tabla No. 14: Definición de factor de fricción para accesorios

Tamaño nominal, pulgadas	Factor de fricción f_t
½	0.027
¾	0.025
1	0.023
1 ¼	0.022
1 ½	0.021
2	0.019

Fuente: (McQuinston, Parker, & Spittler, 2010)

d. Coeficiente de resistencia en codos de 90°

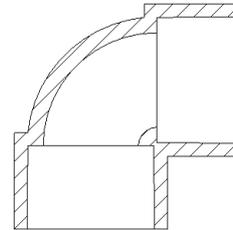
Codo 90°, 1 pulgada:

$$K = 30f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.023$$

Figura No. 30: Codo 90°, 1 pulgada



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 30 * 0.023$$

$$K = 0.69$$

e. Codo 90°, ¾ pulgada:

$$K = 30f_t$$

Figura No. 31: Codo 90°, ¾ pulgada

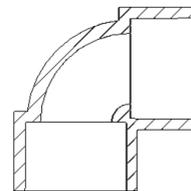
Donde:

$$f_t = 0.025$$

Por lo tanto;

$$K = 30 * 0.025$$

$$K = 0.75$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

f. Coeficiente de resistencia en codos de 45°

1) Codo 45°, 1 pulgada:

$$K = 16f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 16 * 0.023$$

$$K = 0.37$$

2) Codo 45°, ¾ pulgada:

$$K = 16f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Por lo tanto;

$$K = 16 * 0.025$$

$$K = 0.40$$

g. Coeficiente de resistencia en Tes

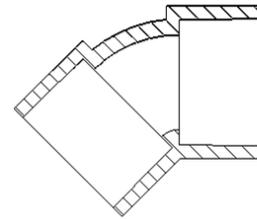
1) Tee 1 pulgada, tramo recto

$$K = 20f_t$$

Donde:

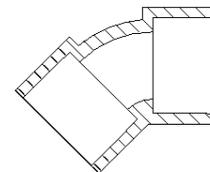
$$f_t = 0.023$$

Figura No. 32: Codo 45°, 1 pulgada



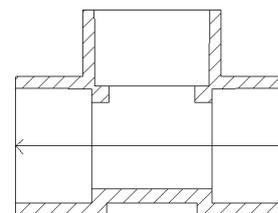
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Figura No. 33: Codo 45°, ¾ pulgada



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Figura No. 34: Tee 1 pulgada, tramo recto



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 20 * 0.023$$

$$K = 0.46$$

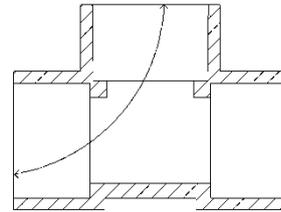
Figura No. 35: Tee 1 pulgada, tramo de derivación

2) Tee 1 pulgada, tramo de derivación

$$K = 60f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.023$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 60 * 0.023$$

$$K = 1.38$$

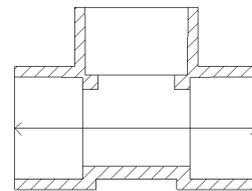
Figura No. 36: Tee ¾ pulgada, tramo recto

3) Tee ¾ pulgada, tramo recto

$$K = 20f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 20 * 0.025$$

$$K = 0.5$$

h. Coeficiente de resistencia en Yes de 45°

Yee, ¾ pulgada Figura No. 37:

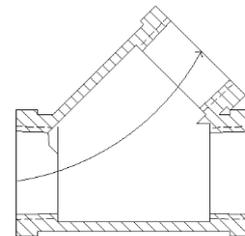
1)

$$K = 20f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Yee 45°, recto - de derivación



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 20 * 0.025$$

$$K = 0.5$$

Yee, $\frac{3}{4}$ pulgada Figura No. 38:
2)

$$K = 110f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Por lo tanto;

$$K = 110 * 0.025$$

$$K = 2.75$$

i. Coeficiente de resistencia en Unión universal

1) Unión universal, 1 pulgada

$$K = 1f_t$$

Donde:

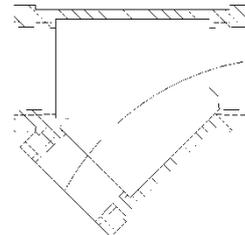
$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 1 * 0.023$$

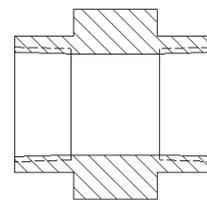
$$K = 0.023$$

Yee 45°, de derivación – recto



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Figura No. 39: Unión universal, 1 pulgada



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

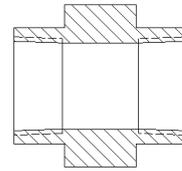
2) Unión universal, $\frac{3}{4}$ pulgada

$$K = 1f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Figura No. 40: Unión universal, $\frac{3}{4}$ pulgada



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 1 * 0.025$$

$$K = 0.025$$

j. Coeficientes de resistencia en adaptadores

1) Adaptadores, 1 pulgada

$$K = 1f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Por lo tanto;

$$K = 1 * 0.025$$

$$K = 0.025$$

2) Adaptadores, $\frac{3}{4}$ pulgada

$$K = 1f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 1 * 0.023$$

$$K = 0.023$$

k. Coeficientes de resistencia en válvulas

1) Válvula de retención, 1 pulgada

$$K = 50f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 50 * 0.023$$

$$K = 1.15$$

2) Válvula de retención, ¾ pulgada

$$K = 50f_t$$

Donde:

$$f_t = 0.025$$

Por lo tanto;

$$K = 50 * 0.025$$

$$K = 1.25$$

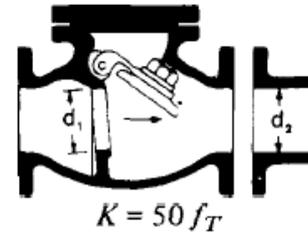
3) Válvula de bola, ¾ pulgada

$$K = 150f_t$$

Donde:

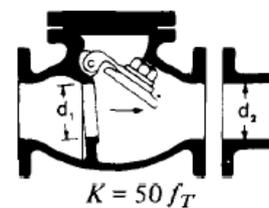
$$f_t = 0.025$$

Figura No. 41: Válvula de retención de disco oscilante, 1 pulgada



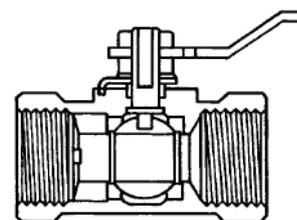
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Figura No. 42: Válvula de retención de disco oscilante, ¾ pulgada.



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Figura No. 43: Válvula de bola, ¾ pulgada



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Por lo tanto;

$$K = 150 * 0.025$$

$$K = 3.75$$

$$K = 150 f_t$$

4) Válvula de globo, 1 pulgada

$$K = 340 f_t$$

Donde:

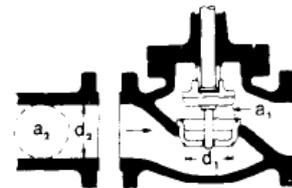
$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 340 * 0.023$$

$$K = 7.82$$

Figura No. 44: Válvula de globo, 1 pulgada



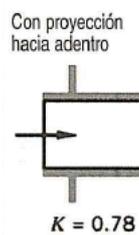
$$K_r = 340 f_t$$

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

I. Coeficiente de resistencia en depósito

1) Coeficiente de resistencia en succión del depósito

Figura No. 45: Proyección de succión del depósito



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

2) Coeficiente de resistencia en succión del depósito con válvula de pie

Figura No. 46: Válvula de pie, 1 pulgada

$$K = 420f_t$$

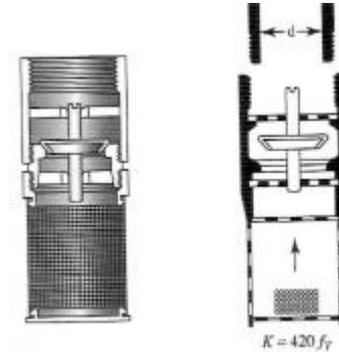
Donde:

$$f_t = 0.023$$

Por lo tanto;

$$K = 420 * 0.023$$

$$K = 9.66$$



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

3) Coeficiente de resistencia en descarga hacia el depósito

Figura No. 47: Proyección de descarga hacia el depósito



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La pérdida de carga total es igual a las pérdidas de carga causadas por longitud de tubería (pérdidas mayores) y cada accesorio instalado (pérdidas menores) de cada configuración, sigue la Ecuación No. 5.

$$h_L = \sum \text{pérdidas por fricción en tuberías} + \sum \text{pérdidas por accesorios}$$

$$h_{L,Total} = f \frac{L V^2}{D_i 2g} + K_L \frac{V^2}{2g}$$

Para obtener una expresión más reducida de la pérdida de carga total de la configuración el factor común $\frac{v^2}{2g}$ de la ecuación, tal como sigue a continuación:

Ecuación No. 14: Pérdida de carga total

$$h_{L,Total} = \frac{V^2}{2g} \left(f \frac{L}{D_i} + \sum K_{L,n} \right)$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

La aplicación de la Ecuación No. 14 tiene ciertos requerimientos, la longitud equivalente de la tubería $\frac{L}{D_i}$ tiene que ser del mismo diámetro nominal y del mismo material. Por ninguna razón se puede hacer el cálculo con diferentes diámetros de tubería o material debido a que depende de la rugosidad relativa del material de la tubería en análisis.

Otro requerimiento es que $\sum K_{L,n}$ representa la sumatoria de todos los coeficientes de resistencia de los accesorios involucrados en la distribución de agua en las configuraciones. Por tanto, se utilizará la Ecuación No. 14 para determinar la pérdida de carga en cada configuración. Se propone un caudal promedio para hacer el análisis paso a paso, posteriormente se mostrarán resultados.

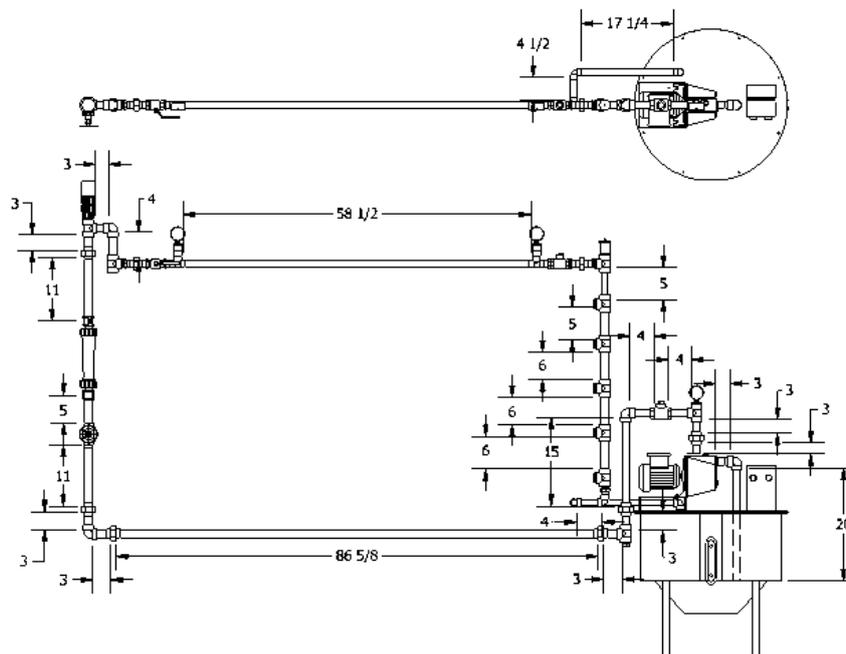
3. Desarrollo y cálculo de pérdidas de carga en configuración de tubería 1. La configuración de tubería consta de tres ramales de diferentes materiales y diámetros nominales, se hace el cálculo para cada uno de ellos con 7 GPM como caudal propuesto.

Los tres ramales que conforman la configuración 1 son:

- a. Tramo de tubería de entrada o alimentación de acero galvanizado.
- b. Tramo recto de tubería de PVC.
- c. Tramo de salida.
 - 1) Tramo de salida con tubería de acero galvanizado.
 - 2) Tramo de salida con tubería de PVC.

A continuación, se muestra la siguiente figura de la configuración de tubería 1 y sus dimensiones en pulgadas:

Figura No. 48: Dimensiones de longitudes en configuración de tubería 1



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- a. Cálculo de pérdida de carga en tubería de entrada. El caudal propuesto en el análisis es 7 GPM, se procede a calcular la velocidad del fluido en el tramo de entrada o alimentación, tubería de acero galvanizado de 1 pulgada.

La velocidad del fluido se obtiene con la ecuación de caudal, como se muestra a continuación:

Ecuación No. 15: Caudal

$$Q = VA$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

Q : Caudal (pie^3/s)

V : Velocidad (pie/s)

A : Área (pie^2)

Donde el área para la tubería del tramo de entrada es:

Ecuación No. 16: Área

$$A = \frac{\pi}{4}(D_i)^2$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

La tubería de acero galvanizado de 1 pulgada tiene un diámetro interior (D_i) igual a 1.049 pulgadas según la Tabla No. 1, por lo tanto, el área es:

$$A = \frac{\pi}{4}(1.049 \text{ pulgadas})^2$$

$$A = 0.864 \text{ pulgadas}^2$$

El área será expresada en pies^2 para facilitar los cálculos, tal como sigue

1 galón (US) tiene 0.13368 pies^3

$$A = 0.864 \text{ pulgadas}^2 \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)^2 = 6.00 * 10^{-3} \text{ pies}^2$$

Conversión de GPM a pie^3/s :

Por lo tanto;

$$7 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left(\frac{0.13368 \text{ pies}^3}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}$$

Despejando la Ecuación No. 14 para obtener velocidad del fluido V ;

$$V = Q/A$$

Por lo tanto;

$$V = (0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}) / (6.00 * 10^{-3} \text{ pies}^2)$$

$$V = 2.60 \text{ pies/s}$$

Para el análisis es necesario conocer la temperatura del fluido que está fluyendo, en este proyecto y análisis se utiliza agua a 68°F (20°C). Este dato se muestra en el termo-nivel que se encuentra ubicado en la parte frontal del depósito.

Se calcula el número de Reynolds con la Ecuación No. 1 que representa si el flujo es turbulento. Se utilizan las propiedades del agua a la temperatura indicada, viscosidad dinámica y densidad.

$$Re = \frac{\rho V D_i}{\mu}$$

Donde:

ρ : densidad del fluido

V : velocidad

D_i : diámetro interno de la tubería

μ : viscosidad cinemática

Se muestran las propiedades del agua a diferentes temperaturas en anexos. Se muestra un resumen a continuación:

Tabla No. 15: Resumen de propiedades del agua

Temperatura (°F)	Densidad ρ (slugs/pie ³)	Viscosidad dinámica μ (lb/pie s)
60	1.9380	2.3440*10 ⁻⁵
68	1.9364	2.0984*10 ⁻⁵
70	1.9360	2.0370*10 ⁻⁵

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La fila indicada con 68°F se utiliza el método de interpolación lineal para obtener el valor de 68°F debido a que en la Tabla del anexo no se encuentra determinado.

El cambio de temperatura en el agua hace que la densidad cambie linealmente, al igual que la viscosidad dinámica, en este análisis se asume que no hay cambios de temperatura en el tiempo. La densidad se expresa en slugs donde 1 slug es igual a la masa que se desplaza a 1 pie por segundo cuando se ejerce una fuerza de 1 libra sobre ella (lb s²/ pie).

Por lo tanto, el número de Reynolds en la tubería de acero galvanizado se calcula como sigue;

$$Re = \frac{1.9364 \text{ slug/pie}^3 (2.5986 \text{ pies/s})(1.049 \text{ pulgadas}) \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}{6.73 * 10^{-4} \text{ lb/pie s}}$$

$$Re = 20,962.15$$

Es necesario conocer el factor de fricción dado por la tubería de acero galvanizado, la rugosidad del acero galvanizado según la Tabla No. 1 es $5 * 10^{-4}$ pie. El factor de fricción depende de un término denominado rugosidad relativa, este es simplemente la relación entre la rugosidad y el diámetro interior de la tubería,

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = \frac{5 * 10^{-4} \text{ pie}}{1.049 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}$$

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = 5.72 * 10^{-3}$$

El factor de fricción sigue la ecuación No. 7, despejando para f se obtiene:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_i}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

Sustituyendo valores se obtiene que el factor de fricción en la tubería de acero galvanizado de 1 pulgada es:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{20,962.15} + \left(\frac{5.72 * 10^{-3}}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

$$f \cong 0.0351$$

Seguidamente, se calcula la pérdida de carga en el tramo según la Ecuación No. 14

A continuación, se muestra un resumen de los accesorios instalados en el tramo de entrada según la configuración de tubería 1 y sus coeficientes de pérdida de carga K_L unitario y total (instalado más de uno). El cálculo de los accesorios se hizo anteriormente en la sección

Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia o rozamiento "K" de los accesorios del sistema de tuberías.

Tabla No. 16: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie, bronce	9.66	9.66
4	Codos 90 HG 1"	0.69	2.76
3	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	4.14
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención, bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo, bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
1	Reductor tipo buje HG 1"- 3/4" (reducción)	0.30	0.30
Total			61.72

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La longitud total de la tubería de acero galvanizado es 15.64 pies.

Se hace uso de la Ecuación No. 14 para conocer la pérdida de carga en el tramo de entrada, por lo tanto;

$$h_{L,entradaHG} = \frac{\left(2.60 \frac{\text{pies}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2}\right)} \left(0.0351 * \frac{15.64 \text{ pies}}{1.049 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)} + 61.72 \text{ pies} \right)$$

$$h_{L,entradaHG} = 7.13 \text{ pies}$$

b. Cálculo de pérdida de carga en tubería de tramo recto de PVC. Continuando con el cálculo de la pérdida de carga total en la configuración de tubería 1, es necesario analizar ahora la pérdida de carga en el tramo recto de la configuración, el tramo recto es de tubería de PVC de ¾ pulgada cédula 40.

Este análisis es similar al anterior y sigue el mismo procedimiento, las diferencias recaen en el cambio de diámetro nominal por lo tanto hay cambios de velocidad del fluido en la tubería, el material es ahora PVC y, por lo tanto, el factor de fricción es menor y hay menor cantidad de accesorios.

El área para la tubería del tramo recto de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada es:

$$A = \frac{\pi}{4}(D_i)^2$$

La tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada tiene un diámetro interior (D_i) igual a 0.804 pulgadas según la Tabla No. 3, por lo tanto, el área es:

$$A = \frac{\pi}{4}(0.804 \text{ pulgadas})^2$$

$$A = 0.508 \text{ pulgadas}^2$$

El área será expresada en pies^2 para facilitar los cálculos, tal como sigue

$$A = 0.508 \text{ pulgadas}^2 \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)^2 = 3.53 * 10^{-3} \text{ pies}^2$$

Continuando con el caudal de 7 GPM propuesto:

Conversión de *GPM* a pie^3/s :

1 galón (US) tiene 0.13368 pies^3

Por lo tanto;

$$7 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left(\frac{0.13368 \text{ pies}^3}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}$$

Despejando la Ecuación No. 14 para obtener velocidad del fluido V ;

$$V = Q/A$$

Por lo tanto;

$$V = (0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}) / (3.53 * 10^{-3} \text{ pies}^2)$$

$$V = 4.42 \text{ pies/s}$$

Los cambios de temperatura del fluido en la tubería de PVC no son significativos para este estudio, por lo tanto, se conservan las propiedades del fluido a la temperatura indicada de 68°F.

Se calcula el número de Reynolds con la Ecuación No. 1 que representa si el flujo es turbulento. Se utilizan las propiedades del agua a la temperatura indicada, viscosidad dinámica y densidad.

El número de Reynolds en la tubería de PVC se calcula como sigue;

$$Re = \frac{1.9364 \text{ slug/pie}^3 (4.42 \text{ pies/s})(0.804 \text{ pulgadas}) \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}{6.73 * 10^{-4} \text{ lb/pie s}}$$

$$Re = 27,349.87$$

Es necesario conocer el factor de fricción dado por la tubería de PVC de ¾ pulgada, la rugosidad del acero galvanizado según la Tabla No. 1 es $5 * 10^{-5}$ pie. A continuación, se presenta el cálculo de la rugosidad relativa,

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = \frac{5 * 10^{-5} \text{ pie}}{0.804 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}$$

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = 7.46 * 10^{-4}$$

El factor de fricción sigue la ecuación No. 7, despejando para f se obtiene:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_i}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

Sustituyendo valores se obtiene que el factor de fricción en la tubería de PVC de ¾ pulgada es:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{27,349.87} + \left(\frac{7.46 * 10^{-4}}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

$$f \cong 0.0255$$

Seguidamente, se calcula la pérdida de carga en el tramo según la Ecuación No. 14

A continuación, se muestra un resumen de los accesorios instalados en el tramo recto de PVC según la configuración de tubería 1 y sus coeficientes de pérdida de carga K_L unitario y total (instalado más de uno). El cálculo de los accesorios se hizo anteriormente en la sección *Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia o rozamiento "K" de los accesorios del sistema de tuberías*. Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Tabla No. 17: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo recto

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo recto			
Cantidad	Accesorio	K_L unitario (pies)	K_L total (pies)
8	Adaptador macho PVC 3/4"	0.025	0.2
2	Unión universal PVC 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención Bronce 3/4 "	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) PVC 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola 3/4"	3.75	3.75
Total			6.25

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La longitud total de la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada es 4.88 pies.

Se hace uso de la Ecuación No. 14 para conocer la pérdida de carga en el tramo recto de PVC, por lo tanto;

$$h_{L,rectoPVC} = \frac{\left(4.42 \frac{\text{pies}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2}\right)} \left(0.0255 \frac{4.88 \text{ pies}}{0.804 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)} + 6.25 \text{ pies} \right)$$

$$h_{L,rectoPVC} = 2.46 \text{ pies}$$

c. Cálculo de pérdida de carga en tubería de tramo salida. El tramo de salida se compone de dos diferentes materiales de tubería, una de acero galvanizado con accesorios tipo tee y seguidamente se deriva a una tubería de PVC para luego descargar al depósito. Es necesario hacer el análisis de pérdida de carga en cada una de las tuberías debido a que estas tienen especificaciones diferentes.

1) Tramo de salida con tubería de acero galvanizado. El cálculo de la pérdida de carga total en la configuración de tubería 1 sigue con el análisis de la pérdida de carga en tramo de salida de acero galvanizado de 1 pulgada, cédula 40 y la adición de accesorios en el tramo.

Este análisis es similar al anterior y sigue el mismo procedimiento, las diferencias recaen en el cambio de diámetro nominal por lo tanto hay cambios de velocidad del fluido en la tubería.

El área para la tubería del tramo recto de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada es:

$$A = \frac{\pi}{4} (D_i)^2$$

La tubería de acero galvanizado de 1 pulgada tiene un diámetro interior (D_i) igual a 1.049 pulgadas según la Tabla No. 3, por lo tanto, el área es:

$$A = \frac{\pi}{4} (1.049 \text{ pulgadas})^2$$

$$A = 0.864 \text{ pulgadas}^2$$

El área será expresada en pies^2 para facilitar los cálculos, tal como sigue

$$A = 0.864 \text{ pulgadas}^2 \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)^2 = 6.00 * 10^{-3} \text{ pies}^2$$

Continuando con el caudal de 7 GPM propuesto:

Conversión de GPM a pie^3/s :

1 galón (US) tiene 0.13368 pies^3

Por lo tanto;

$$7 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left(\frac{0.13368 \text{ pies}^3}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 0.0156 \text{ pie}^3/s$$

Despejando la Ecuación No. 14 para obtener velocidad del fluido V ;

$$V = Q/A$$

Por lo tanto;

$$V = (0.0156 \text{ pie}^3/s) / (6.00 * 10^{-3} \text{ pies}^2)$$

$$V = 2.60 \text{ pies/s}$$

Los cambios de temperatura del fluido en la tubería de acero galvanizado no son significativos para este estudio, por lo tanto, se conservan las propiedades del fluido a la temperatura indicada de 68°F.

Se calcula el número de Reynolds con la Ecuación No. 1 que representa si el flujo es turbulento. Se utilizan las propiedades del agua a la temperatura indicada, viscosidad dinámica y densidad.

El número de Reynolds en la tubería de acero galvanizado de 1 pulgada se calcula como sigue;

$$Re = \frac{1.9364 \text{ slug/pie}^3 (2.60 \text{ pies/s}) (1.049 \text{ pulgadas}) \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)}{6.73 * 10^{-4} \text{ lb/pie s}}$$

$$Re = 20,962.15$$

Es necesario conocer el factor de fricción dado por la tubería de acero galvanizado de 1 pulgada, la rugosidad del acero galvanizado según la Tabla No. 3 es $5 * 10^{-4}$ pie. A continuación, se presenta el cálculo de la rugosidad relativa,

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = \frac{5 * 10^{-4} \text{ pie}}{1.049 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)}$$

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = 5.72 * 10^{-3}$$

El factor de fricción sigue la ecuación No. 7, despejando para f se obtiene:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_i}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

Sustituyendo valores se obtiene que el factor de fricción en la tubería de acero galvanizado de 1 pulgada es:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{20,962.15} + \left(\frac{5.72 * 10^{-3}}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

$$f \cong 0.0351$$

Seguidamente, se calcula la pérdida de carga en el tramo según la Ecuación No. 14

A continuación, se muestra un resumen de los accesorios instalados en el tramo de salida de acero galvanizado según la configuración de tubería 1 y sus coeficientes de pérdida de carga K_L unitario y total (instalado más de uno). El cálculo de los accesorios se hizo anteriormente en la sección *Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia o rozamiento "K" de los accesorios del sistema de tuberías*. Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Tabla No. 18: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida con tubería de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de HG			
Cantidad	Accesorio	K_L unitario (pies)	K_L total (pies)
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
5	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	2.3
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			4.03

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La longitud total de la tubería de acero galvanizado de 1 pulgada es 2.33 pies.

Se hace uso de la Ecuación No. 14 para conocer la pérdida de carga en el tramo de salida de acero galvanizado de 1 pulgada, por lo tanto;

$$h_{L,HG} = \frac{\left(2.60 \frac{\text{pies}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2}\right)} \left(0.0351 \frac{2.33 \text{ pies}}{1.049 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)} + 4.03 \text{ pies} \right)$$

$$h_{L,\text{salidaHG}} = 0.63 \text{ pies}$$

2) Tramo de salida con tubería de PVC. Luego del tramo de salida de acero galvanizado se conecta el tramo de salida con tubería de PVC con el objetivo variar la complejidad de encontrar

factores de pérdidas de carga variando el material y especificaciones, por último, se analiza la pérdida de carga en el tramo de salida de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada de la configuración de tubería 1.

Este análisis es similar al anterior y sigue el mismo procedimiento, las diferencias recaen en el cambio de material, ahora es ahora PVC y por lo tanto el factor de fricción es menor y hay menor cantidad de accesorios.

El área para la tubería del tramo recto de PVC de 1 pulgada es:

$$A = \frac{\pi}{4}(D_i)^2$$

La tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada tiene un diámetro interior (D_i) igual a 1.029 pulgadas según la Tabla No. 3, por lo tanto, el área es:

$$A = \frac{\pi}{4}(1.029 \text{ pulgadas})^2$$

$$A = 0.831 \text{ pulgadas}^2$$

El área será expresada en pies^2 para facilitar los cálculos, tal como sigue

$$A = 0.831 \text{ pulgadas}^2 \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}} \right)^2 = 5.78 * 10^{-3} \text{ pies}^2$$

Continuando con el caudal de 7 GPM propuesto:

Conversión de *GPM* a pie^3/s :

1 galón (US) tiene 0.13368 pies^3

Por lo tanto;

$$7 \frac{\text{gal}}{\text{min}} \left(\frac{0.13368 \text{ pies}^3}{1 \text{ gal}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \right) = 0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}$$

Despejando la Ecuación No. 14 para obtener velocidad del fluido V ;

$$V = Q/A$$

Por lo tanto;

$$V = (0.0156 \text{ pie}^3/\text{s}) / (5.78 * 10^{-3} \text{ pies}^2)$$

$$V = 2.70 \text{ pies/s}$$

Los cambios de temperatura del fluido en la tubería de PVC no son significativos para estudio, por lo tanto, se conservan las propiedades del fluido a la temperatura indicada de 68°F.

Se calcula el número de Reynolds con la Ecuación No. 1 que representa si el flujo es turbulento. Se utilizan las propiedades del agua a la temperatura indicada, viscosidad dinámica y densidad.

El número de Reynolds en la tubería de PVC se calcula como sigue;

$$Re = \frac{1.9364 \text{ slug/pie}^3 (2.70 \text{ pies/s})(1.029 \text{ pulgadas}) \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}{6.73 * 10^{-4} \text{ lb/pie s}}$$

$$Re = 21,369.58$$

Es necesario conocer el factor de fricción dado por la tubería de PVC de 1 pulgada, la rugosidad del acero galvanizado según la Tabla No. 1 es $5 * 10^{-5}$ pie. A continuación, se presenta el cálculo de la rugosidad relativa,

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = \frac{5 * 10^{-5} \text{ pie}}{1.029 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)}$$

$$\frac{\varepsilon}{D_i} = 5.83 * 10^{-4}$$

El factor de fricción sigue la ecuación No. 7, despejando para f se obtiene:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{Re} + \left(\frac{\varepsilon/D_i}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

Sustituyendo valores se obtiene que el factor de fricción en la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada es:

$$f \cong \left(\frac{1}{-1.8 \log \left(\frac{6.9}{21,369.58} + \left(\frac{5.83 * 10^{-4}}{3.7} \right)^{1.11} \right)} \right)^2$$

$$f \cong 0.0264$$

Seguidamente, se calcula la pérdida de carga en el tramo según la Ecuación No. 14

A continuación, se muestra un resumen de los accesorios instalados en el tramo recto de PVC según la configuración de tubería 1 y sus coeficientes de pérdida de carga K_L unitario y total (instalado más de uno). El cálculo de los accesorios se hizo anteriormente en la sección *Desarrollo y cálculo de coeficientes de resistencia o rozamiento "K" de los accesorios del sistema de tuberías*. Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada.

Tabla No. 19: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida con tubería PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios de tramo de salida PVC			
Cantidad	Accesorio	K_L unitario (pies)	K_L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión Universal PVC 1"	0.023	0.023
1	Salida a depósito	1	1
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

La longitud total de la tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ pulgada es 2.15 pies.

Se hace uso de la Ecuación No. 14 para conocer la pérdida de carga en el tramo recto de PVC, por lo tanto;

$$h_{L,salidaPVC} = \frac{\left(2.70 \frac{\text{pies}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2}\right)} \left(0.0264 \frac{2.15 \text{ pies}}{1.029 \text{ pulgadas} \left(\frac{1 \text{ pie}}{12 \text{ pulgadas}}\right)} + 7.49 \text{ pies} \right)$$

$$h_{L,salidaPVC} = 0.92 \text{ pies}$$

d. Pérdida de carga total de configuración de tubería 1. Se conocen todas las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 1, se hace la sumatoria de todas ellas para obtener la pérdida de carga total de la configuración de tubería 1:

$$h_{L,Total} = h_{L,entradaHG} + h_{L,rectoPVC} + h_{L,salidaHG} + h_{L,salidaPVC}$$

$$h_{L,Total} = (7.13 + 2.46 + 0.63 + 0.92) \text{ pies} = 11.14 \text{ pies}$$

e. Resumen de cálculos de pérdida de carga de configuración de tubería 1. Resolviendo con el mismo procedimiento anteriormente descrito, se hacen los cálculos para todo el sistema de la configuración de tubería 1 variando el caudal entregado por la bomba centrífuga.

Tabla No. 20: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 1

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.15
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.59
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.32
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.34
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.65
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.25
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.13
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.30
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	11.77
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	14.52
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	17.55
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	18.36

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 21: Pérdida de carga en tramo recto de configuración de tubería 1

Caudal		TRAMO RECTO			
		PVC 3/4" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.6319	3907.12	0.04129192	0.06
2	0.0045	1.2639	7814.25	0.03391321	0.22
3	0.0067	1.8958	11721.37	0.03061020	0.47
4	0.0089	2.5278	15628.50	0.02862751	0.83
5	0.0111	3.1597	19535.62	0.02727027	1.28
6	0.0134	3.7916	23442.75	0.02626814	1.82
7	0.0156	4.4236	27349.87	0.02549071	2.46
8	0.0178	5.0555	31257.00	0.02486614	3.20
9	0.0201	5.6875	35164.12	0.02435111	4.03
10	0.0223	6.3194	39071.25	0.02391773	4.95
11	0.0245	6.9513	42978.37	0.02354709	5.98
11.25	0.0251	7.1093	43955.16	0.02346259	6.24

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 22: Pérdida de carga en tramo de salida de configuración de tubería 1

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
GPM	pies ³ /s	Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
		V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.014	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.054	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.119	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.209	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.324	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.464	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.628	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.818	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	1.032	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	1.271	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	1.535	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	1.604	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 1 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 23: Pérdida de carga total, configuración de tubería 1

GPM	h _L total (pies)
0	0
1	0.24
2	0.94
3	2.09
4	3.68
5	5.72
6	8.21
7	11.15
8	14.52
9	18.35
10	22.2
11	27.33
11.25	28.58

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

f. Curva de sistema de configuración de tubería 1. Con el objetivo de encontrar el punto de operación del equipo, se debe conocer primero la curva del sistema, esta se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados.

La curva del sistema muestra o relaciona la altura según el caudal de operación.

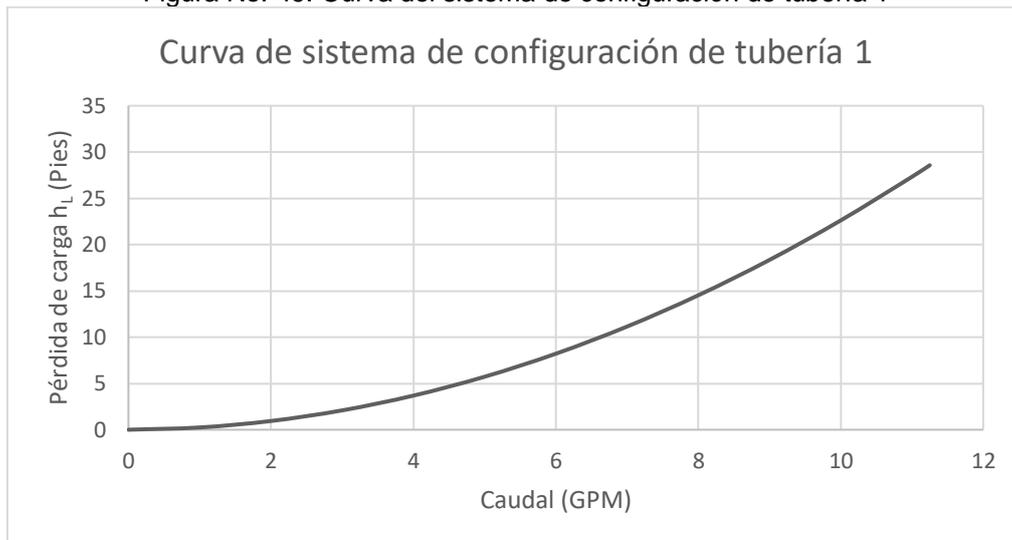
Tabla No. 24: Caudal vs. pérdida de carga total de configuración de tubería 1

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.24
2	0.94
3	2.09
4	3.68
5	5.72
6	8.21
7	11.15
8	14.52
9	18.35
10	22.2
11	27.33
11.25	28.58

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se muestra la curva del sistema de la configuración de tubería 1, en la medida que el caudal sea mayor, las pérdidas entre ambos puntos también lo serán y, por lo tanto, la energía piezométrica disponible en el punto más lejano a este será menor.

Figura No. 49: Curva del sistema de configuración de tubería 1



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

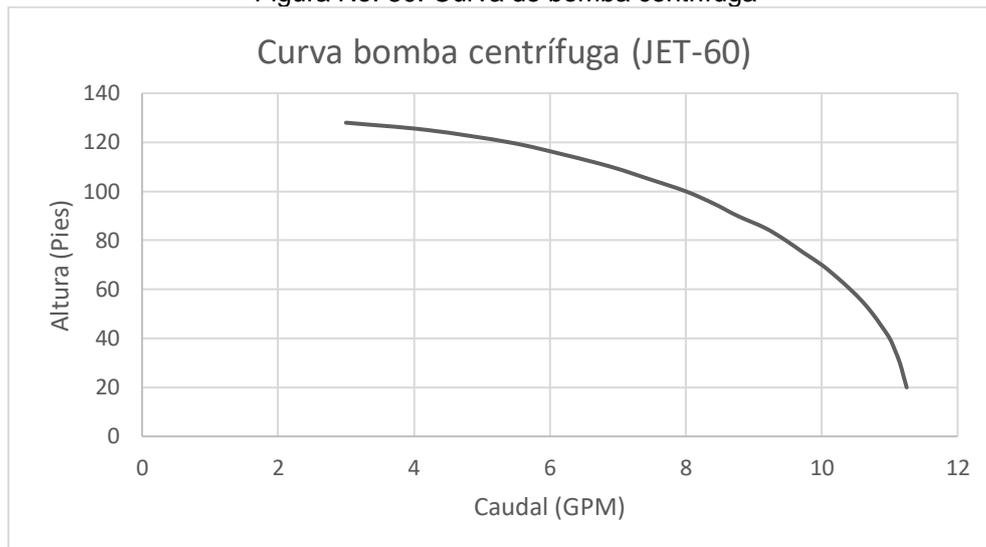
g. Curva de operación de bomba centrífuga. La curva de operación de la bomba centrífuga se muestra a continuación:

Tabla No. 25: Caudal vs. Altura de bomba centrífuga

Q (GPM)	Altura (Pies)
3	128
4.20	125
5.40	120
6.20	115
6.90	110
7.46	105
8	100
8.41	95
8.76	90
9.17	85
9.47	80
9.73	75
10	70
10.22	65
10.42	60
10.60	55
10.75	50
10.88	45
11	40
11.08	35
11.15	30
11.20	25
11.25	20

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

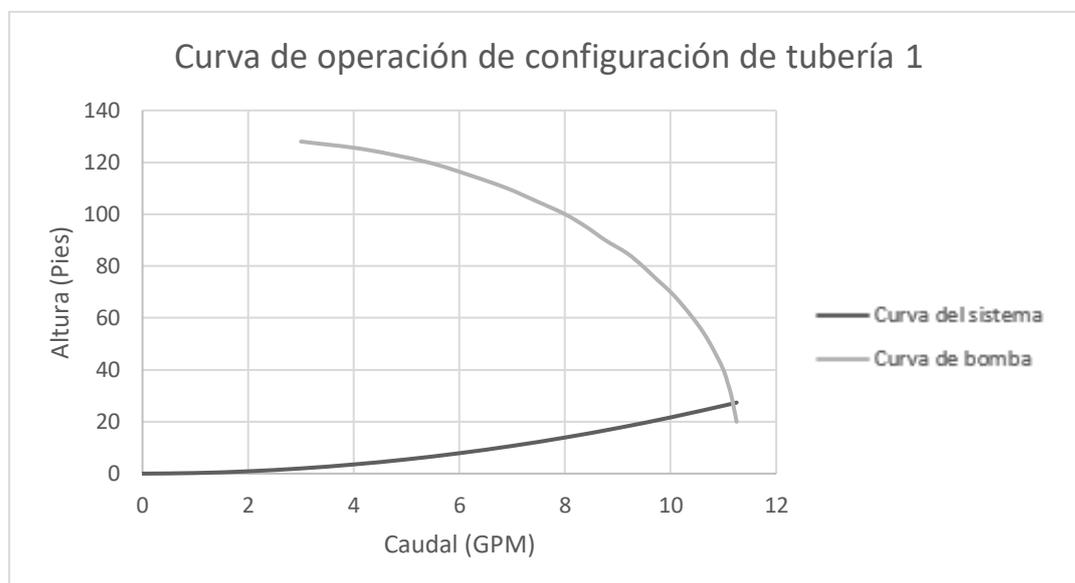
Figura No. 50: Curva de bomba centrífuga



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

h. Curva de operación de configuración de tubería 1. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 1.

Figura No. 51: Curva de operación de configuración de tubería 1



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra a 27 pies (8.23 metros) y 11.18 GPM a litros por segundo;

$$11.18 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.71 \text{ litros/s}$$

La eficiencia de la bomba en este punto es:

Ecuación No. 17: Eficiencia de bomba centrífuga

$$\eta = \frac{QHS}{75P}$$

Fuente: (Mataix, 1982)

Donde:

η : eficiencia de bomba

Q : caudal (litros/s)

H : altura, pérdida de carga en operación (m)

S : gravedad específica (1 agua limpia)

P : potencia (HP)

Aplicando la Ecuación No. 16 se obtiene;

$$\eta = \frac{0.71 \text{ litros/s } (8.23 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

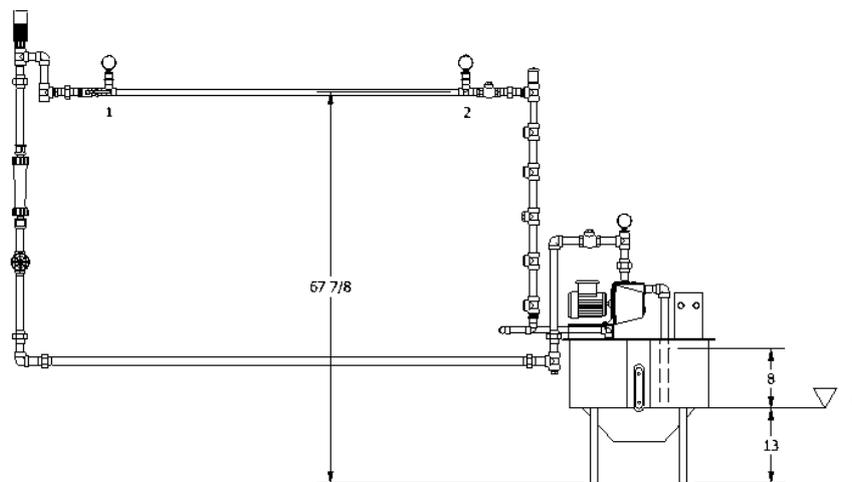
$$\eta = 15.5\%$$

Eficiencia baja debido a condiciones del sistema.

i. Cambio de presión en el tramo recto de configuración de tubería 1. La pérdida de carga total de la configuración 1 fue determinada en la sección anterior, la pérdida de carga equivale a 9.60 pies con un caudal propuesto de 7 GPM, el sistema muestra dos manómetros para conocer la presión en puntos específicos y determinar si hay o no un cambio de presión, en esta configuración en particular se está analizando el cambio de presión en el tramo recto de PVC.

A continuación, se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 52: Altura de tubería de configuración de tubería 1



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se utiliza la Ecuación de energía de flujo estacionario en términos de cargas o cabezas para determinar la presión en los manómetros ubicados en el tramo recto de tubería PVC de la configuración de tubería 1. Por lo tanto,

Ecuación No. 18: Ecuación de energía de flujo estacionario aplicado al sistema de tuberías

$$\frac{P_A}{\rho g} + \frac{V_A^2}{2g} + Z_A + h_{bomba} - h_L = \frac{P_B}{\rho g} + \frac{V_B^2}{2g} + Z_B$$

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Donde:

$\frac{P_A}{\rho g}$: carga de presión, (pies)

$\frac{V_A^2}{2g}$: carga de velocidad, (pies)

Z_A : altura, (pies)

h_{bomba} : carga o cabeza de bomba, (pies)

h_L : pérdida de carga, (pies)

Subíndices A, B: puntos específicos de análisis

El procedimiento que se adopta para conocer la presión en cada manómetro de este sistema o configuración es:

Se determina la presión en el manómetro 1 desde el punto de origen "0" hasta donde se encuentra ubicado el manómetro en el punto "1" mostrado en la Figura No. 51. Se toma en cuenta que, para conocer la presión en este punto se incluye la pérdida de carga en la tubería de entrada, carga de bomba, diferencias de altura, y carga de velocidad según la Ecuación No. 18. El punto de referencia es tomado desde la tubería de succión de la bomba.

$$\frac{P_0}{\rho g} + \frac{V_0^2}{2g} + Z_0 + h_{bomba} = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{L,entradaHG}$$

Despejando para P_1 y dividiendo entre 12^2 para obtener PSI, se obtiene lo siguiente:

$$P_1 = \frac{\rho g \left(h_{bomba} - \frac{P_0}{\rho g} - \frac{V_1^2}{2g} - Z_1 - h_{L,entradaHG} \right)}{12^2}$$

Donde P_0 es la presión en el punto de referencia, es decir en la succión de la bomba, por lo tanto

$$P_0 = \rho g h_{bomba@7GPM}$$

$$P_0 = \frac{\left(1.9364 \frac{\text{slugs}}{\text{pies}^2} \right) \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2} \right) \left(\frac{8 \text{ pulg}}{12 \text{ pulg}} \right) \text{pies}}{12^2}$$

$$P_0 = 0.29 \text{ PSI}$$

La presión en el manómetro ubicado en la posición 1 del tramo recto de tubería de PVC es (tomando en cuenta la pérdida de presión en el flotador del rotámetro [0.70 PSI]):

$$P_1 = \frac{\left(1.9364 \frac{\text{slugs}}{\text{pies}^2} \right) \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2} \right) \left(109 \text{ pies} - \frac{0.29 \text{ PSI} \left(\frac{12 \text{ pulg}}{1 \text{ pie}} \right)^2}{\left(1.9364 \frac{\text{slugs}}{\text{pies}^2} \right) \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2} \right)} - \frac{\left(2.60 \frac{\text{pies}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2} \right)} - 4.57 \text{ pies} - 7.13 \text{ pies} \right)}{12^2} - 0.70$$

$$P_1 = 41.10 \text{ PSI}$$

Ahora se determina la presión en el manómetro 2 ubicado en el punto "2", conociendo previamente la presión en el manómetro 1, para este análisis no hay diferencia de altura entre el punto 1 y 2, la carga de la bomba ya está implícita en el procedimiento anterior (en el siguiente análisis no se incluye), la carga de velocidad entre ambos puntos es la misma por lo tanto no se incluye, según la Ecuación No. 16 y referencia la Figura No. 48. La ecuación queda como sigue:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{L,rectoPVC}$$

Despejando para P_2 y dividiendo la pérdida de carga del tramo recto de PVC entre 12^2 para obtener PSI, se obtiene lo siguiente:

$$P_2 = P_1 - \left[\left(\frac{h_{L,rectoPVC} \rho g}{12^2} \right) \right] - 0.70 \text{ PSI}$$

$$P_2 = 41.10 \text{ PSI} - \left[\frac{(2.46 \text{ pies}) \left(1.9364 \frac{\text{slugs}}{\text{pies}^2} \right) \left(32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2} \right)}{12^2} \right] - 0.70 \text{ PSI}$$

$$P_2 = 39.33 \text{ PSI}$$

Conociendo la presión individual de la presión en el manómetro 1 y 2 se hace el cálculo del cambio de presión que existe entre los dos puntos de la configuración de tubería 1:

$$\Delta P_1 = P_1 - P_2$$

$$\Delta P_1 = 41.10 \text{ PSI} - 39.33 \text{ PSI}$$

$$\Delta P_1 = 1.77 \text{ PSI}$$

El cambio de presión es mínima y aceptable debido que solamente se presentan pérdidas mayores en el tramo recto de tubería de PVC.

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de PVC y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Tabla No. 26: Presiones esperadas y cambio de presión en configuración de tubería 1

Caudal GPM	Manómetro 1 P ₁ (PSI)	Manómetro 2 P ₂ (PSI)	Cambio de presión (PSI)
0	0	0	0
1	52.39	51.66	0.72
2	52.20	51.40	0.79
3	51.87	50.97	0.90
4	50.34	49.29	1.06
5	48.11	46.86	1.25
6	45.06	43.57	1.49
7	41.10	39.33	1.77
8	30.61	28.53	2.08
9	47.29	44.84	2.44
10	20.96	18.12	2.85
11	6.64	3.35	3.29

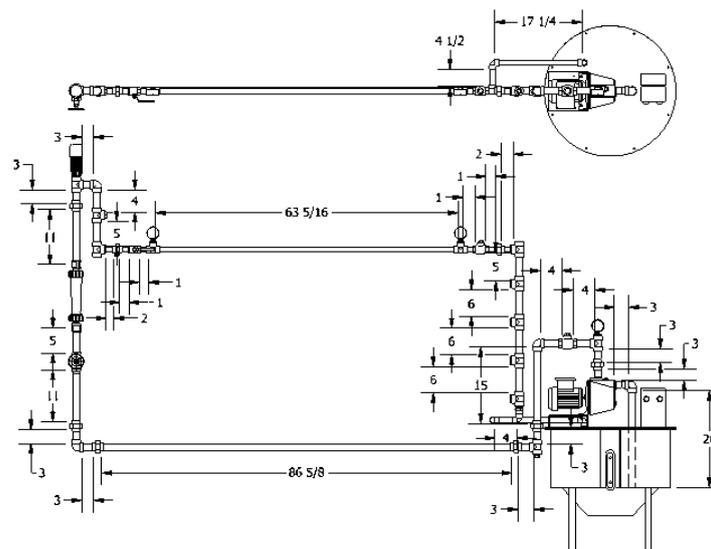
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

4. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 2.

Resolviendo todo el sistema de la configuración de tubería 2 con el mismo procedimiento anteriormente descrito se obtiene el siguiente resumen.

A continuación, se muestra la siguiente figura de la configuración de tubería 2 y sus dimensiones en pulgadas:

Figura No. 53: Dimensiones de longitudes en configuración de tubería 2



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de cada una de las longitudes de tuberías respectivas y semejantes y se obtiene la siguiente tabla.

Tabla No. 27: Longitudes de tubería en configuración de tubería 2

Longitudes de tubería	Pies
Longitud total tubería HG 1" C40	16.05
Longitud total tubería HG 3/4" C40	5.94
Longitud total tubería HG 1" C40	1.92
Longitud total tubería PVC 1" C40	2.15

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a. Coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en el sistema. Se hace el cálculo de los coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en la configuración y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla No. 28: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie	9.66	9.66
4	Codos 90 HG 1"	0.69	2.76
1	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	0.46
4	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	5.52
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
1	Reductor tipo buje HG 1"- 3/4"	0.30	0.30
Total			63.56

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 29: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo recto

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo recto			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Unión universal HG 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención HG 3/4"	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) HG 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola HG 3/4"	3.75	3.75
Total			6.05

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 30: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida con tubería de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida (HG)			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
4	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	1.84
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			3.57

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 31: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida con tubería PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida (PVC)			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión universal PVC 1"	0.023	0.023
1	Salida a depósito	1	1
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- b. Pérdida de carga total de configuración de tubería 2. Se presenta a continuación las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 2.

Tabla No. 32: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 2

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.16
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.61
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.36
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.41
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.76
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.40
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.34
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.58
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	12.11
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	14.94
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	18.07
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	18.90

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 33: Pérdida de carga en tramo recto de configuración de tubería 2

Caudal		TRAMO RECTO			
		Acero galvanizado 3/4" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (Pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2352.28	0.05330958	0.02
2	0.0045	0.7424	4704.57	0.04533011	0.09
3	0.0067	1.1137	7056.85	0.04216084	0.19
4	0.0089	1.4849	9409.13	0.04042281	0.33
5	0.0111	1.8561	11761.42	0.03931696	0.51
6	0.0134	2.2273	14113.70	0.03854891	0.72
7	0.0156	2.5986	16465.98	0.03798341	0.98
8	0.0178	2.9698	18818.26	0.03754924	1.27
9	0.0201	3.3410	21170.55	0.03720520	1.61
10	0.0223	3.7122	23522.83	0.03692575	1.98
11	0.0245	4.0835	25875.11	0.03669420	2.39
11.25	0.0251	4.1763	26463.18	0.03664238	2.50

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 34: Pérdida de carga en tramo de salida de configuración de tubería 2

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
		Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.01	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.04	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.09	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.15	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.23	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.34	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.46	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.59	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	0.75	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	0.92	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	1.12	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	1.17	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 2 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 35: Pérdida de carga total, configuración de tubería 2

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.21
2	0.81
3	1.81
4	3.19
5	4.97
6	7.14
7	9.70
8	12.65
9	15.99
10	19.72
11	23.84
11.25	24.93

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

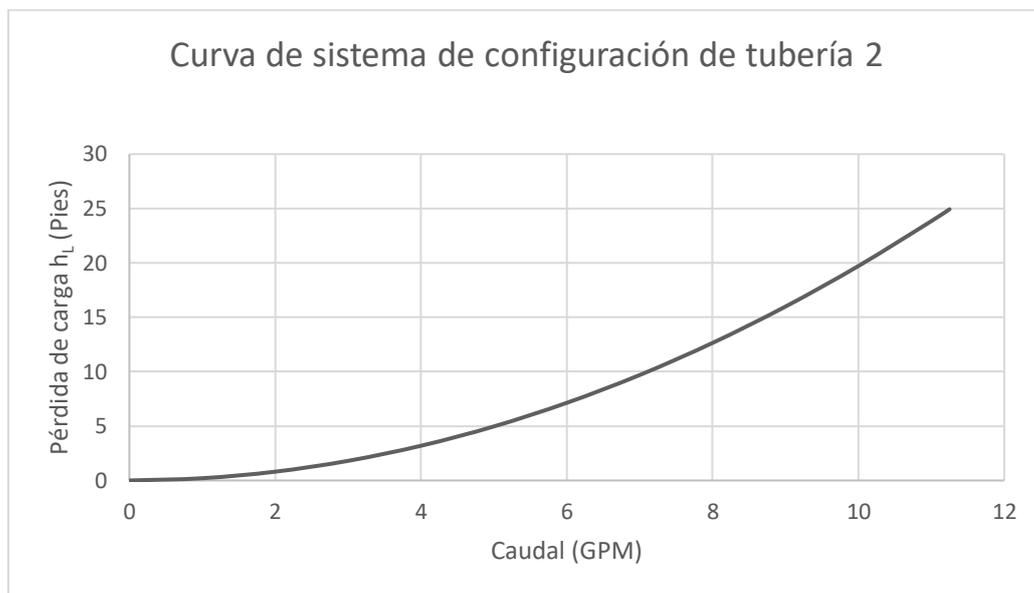
c. Curva del sistema de configuración de tubería 2. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema de configuración de tubería 2:

Tabla No. 36: Caudal vs. pérdida de carga de configuración de tubería 2

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.21
2	0.81
3	1.81
4	3.19
5	4.97
6	7.14
7	9.70
8	12.65
9	15.99
10	19.72
11	23.84
11.25	24.93

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

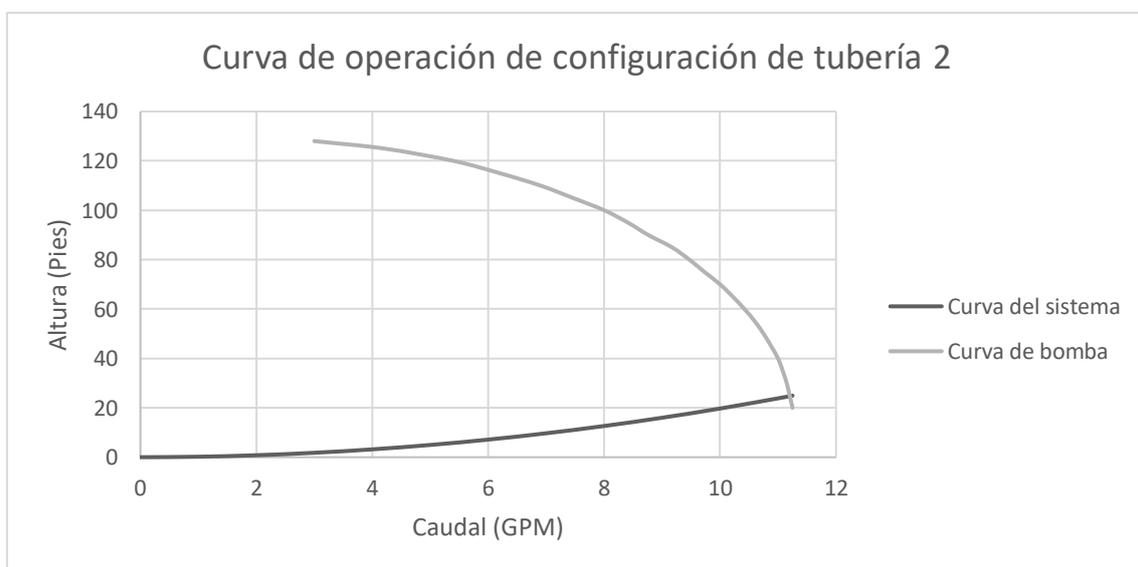
Figura No. 54: Curva de sistema de configuración de tubería 2



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

d. Curva de operación de configuración de tubería 2. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 2.

Figura No. 55: Curva de operación de configuración de tubería 2



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra a 24 pies (7.32 metros) y 11.21 GPM
GPM a litros por segundo;

$$11.21 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.71 \text{ litros/s}$$

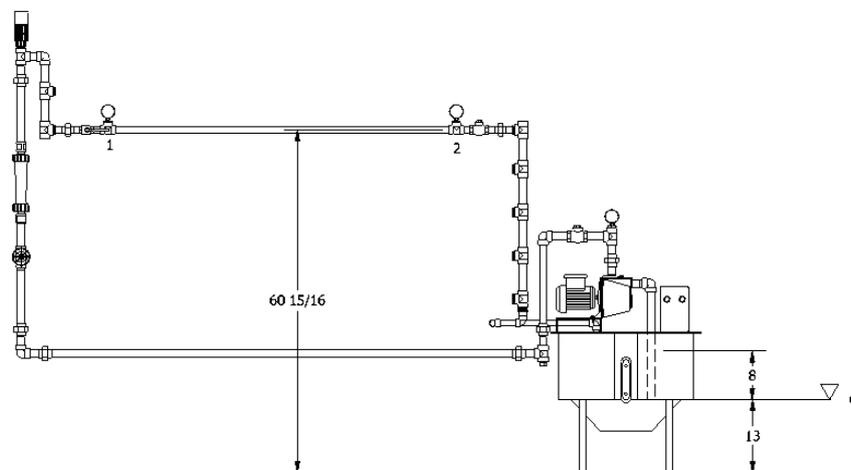
La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.71 \text{ litros/s (7.32 metros)}(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 13.9\%$$

e. Cambio de presión en el tramo recto de configuración de tubería 2. A continuación, se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 56: Altura de tubería de configuración de tubería 2



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de acero galvanizado y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Se hace la sumatoria de cada una de las longitudes de tuberías respectivas y semejantes y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 38: Longitudes de tubería en configuración de tubería 3

Longitudes de tuberías	Pies
Longitud total tubería HG 1"	16.47
Longitud total tubería cobre rígido tipo M 3/4"	5.88
Longitud total tubería HG 1"	1.50
Longitud total tubería PVC 1"	2.15

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a. Coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en el sistema. Se hace el cálculo de los coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en la configuración y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla No. 39: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie	9.66	9.66
4	Codos 90 HG 1"	0.69	2.76
2	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	0.92
4	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	5.52
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
1	Reductor tipo buje HG 1"- 3/4"	0.30	0.30
Total			64.02

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 40: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo recto

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo recto			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Unión universal cobre 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención cobre 3/4"	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) cobre 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola cobre 3/4"	3.75	3.75
6	Adaptador macho cobre 3/4"	0.025	0.15
Total			6.20

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 41: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida HG			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
3	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	1.38
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			3.11

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 42: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida PVC			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión universal PVC 1"	0.023	0.02
1	Salida a depósito	1	1.00
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- b. Pérdida de carga total de configuración de tubería 3. Se presenta a continuación las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 3.

Tabla No. 43: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 3

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.16
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.62
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.37
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.43
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.79
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.45
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.41
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.66
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	12.22
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	15.08
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	18.23
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	19.07

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 44: Pérdida de carga en tramo recto de configuración de tubería 3

Caudal		TRAMO RECTO			
		Cobre rígido tipo M 3/4"			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.6211	3873.40	0.04087863	0.06
2	0.0045	1.2422	7746.80	0.03323682	0.22
3	0.0067	1.8632	11620.20	0.02973174	0.47
4	0.0089	2.4843	15493.61	0.02757754	0.82
5	0.0111	3.1054	19367.01	0.02606876	1.27
6	0.0134	3.7265	23240.41	0.02492976	1.80
7	0.0156	4.3475	27113.81	0.02402694	2.43
8	0.0178	4.9686	30987.21	0.02328637	3.15
9	0.0201	5.5897	34860.61	0.02266322	3.96
10	0.0223	6.2108	38734.01	0.02212850	4.87
11	0.0245	6.8319	42607.41	0.02166244	5.86
11.25	0.0251	6.9871	43575.76	0.02155492	6.12

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 45: Pérdida de carga en tramo de salida de configuración de tubería 3

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
		Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.01	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.03	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.07	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.13	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.20	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.29	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.39	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.51	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	0.64	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	0.79	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	0.96	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	1.00	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 3 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 46: Pérdida de carga total, configuración de tubería 3

GPM	h _L total (pies)
0	0
1	0.24
2	0.94
3	2.09
4	3.69
5	5.73
6	8.22
7	11.15
8	14.53
9	18.35
10	22.61
11	27.31
11.25	28.56

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

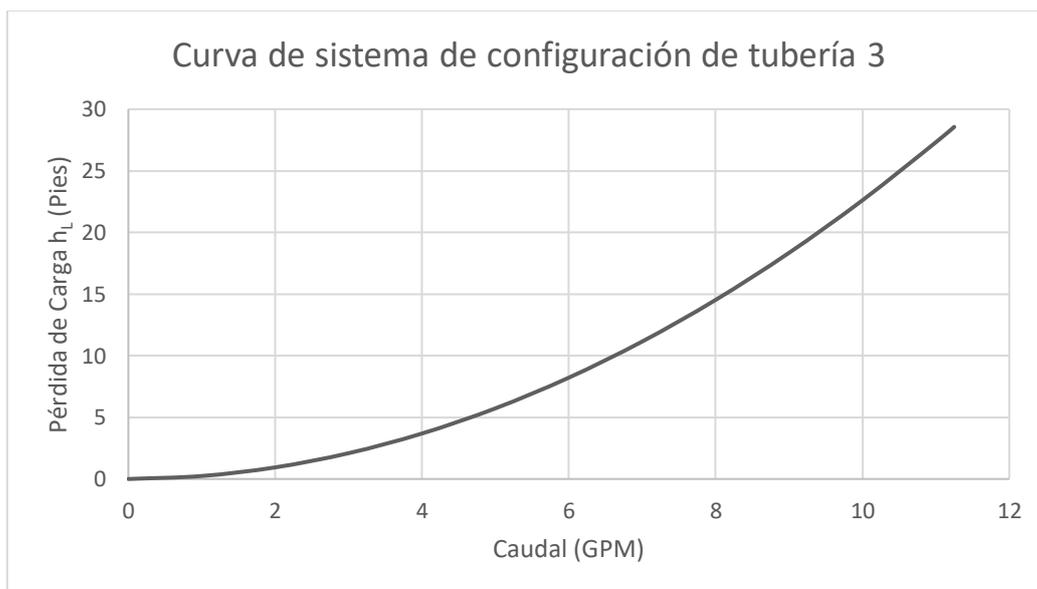
c. Curva del sistema de configuración de tubería 3. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema de configuración de tubería 3:

Tabla No. 47: Caudal vs. pérdida de carga de configuración de tubería 3

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.24
2	0.94
3	2.09
4	3.69
5	5.73
6	8.22
7	11.15
8	14.53
9	18.35
10	22.61
11	27.31
11.25	28.56

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

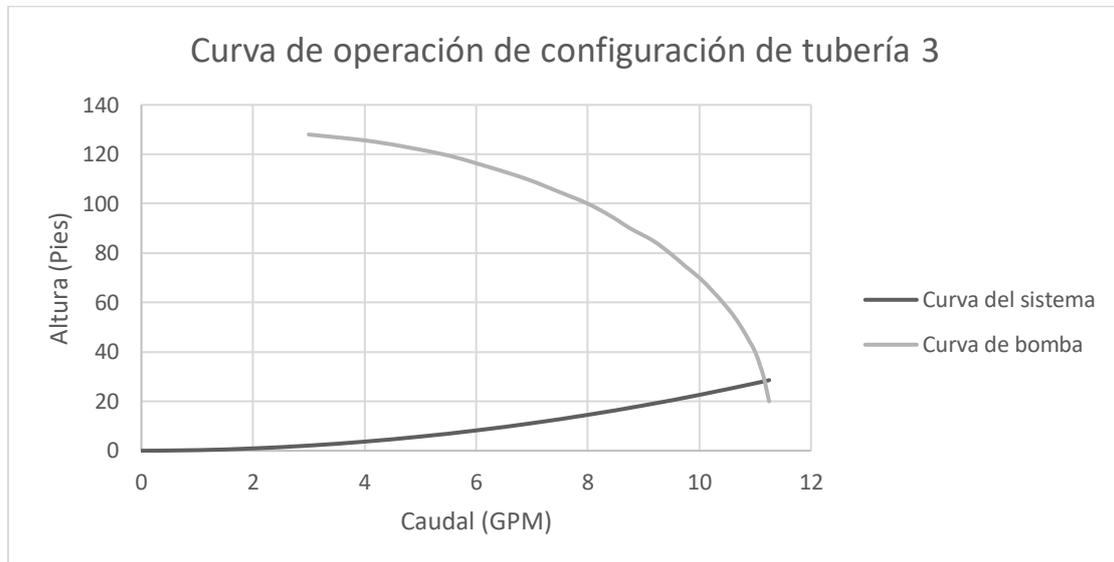
Figura No. 58: Curva de sistema de configuración de tubería 3



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

d. Curva de operación de configuración de tubería 3. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 3.

Figura No. 59: Curva de operación de configuración de tubería 3



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra es 27.5 pies (8.38 metros) y 11.21 GPM a litros por segundo;

$$11.21 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.71 \text{ litros/s}$$

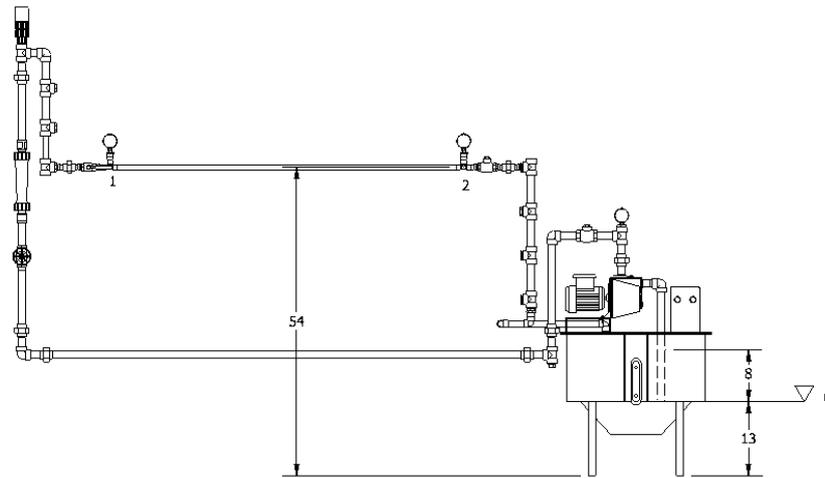
La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.71 \text{ litros/s} (8.38 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 15.9\%$$

e. Cambio de presión en el tramo recto de configuración de tubería 3. A continuación, se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 60: Altura de tubería de configuración de tubería 3



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de cobre rígido tipo M y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Tabla No. 48: Presiones esperadas y cambio de presión en configuración de tubería 3

Caudal GPM	Manómetro 1 P_1 (PSI)	Manómetro 2 P_2 (PSI)	Cambio de presión (PSI)
0	0	0	0
1	52.88	52.16	0.73
2	52.68	51.89	0.79
3	52.35	51.44	0.91
4	51.55	50.49	1.06
5	48.55	47.30	1.25
6	45.47	43.99	1.48
7	41.47	39.72	1.75
8	36.59	34.52	2.07
9	29.83	27.42	2.42
10	21.22	18.41	2.81
11	6.84	3.60	3.24

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 50: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie	9.66	9.66
4	Codos 90 HG 1"	0.69	2.76
3	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	1.38
4	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	5.52
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
2	Reductor tipo buje HG 1"- 3/4"	0.30	0.59
Total			64.78

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 51: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de accesorios

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo accesorios			
Cantidad	Accesorio	KL unitario (Pies)	KL total (Pies)
8	Adaptador macho PVC 3/4"	0.025	0.2
2	Unión universal PVC 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención PVC 3/4"	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) PVC 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola PVC 3/4"	3.75	3.75
6	Codo 45 PVC 3/4"	0.4	2.4
6	Codo 90 PVC 3/4"	0.75	4.5
Total			13.15

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 52: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida HG			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	0.92
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			2.65

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 53: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida PVC			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión Universal PVC 1"	0.023	0.02
1	Salida a depósito	1	1
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- b. Pérdida de carga total de configuración de tubería 4. Se presenta a continuación las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 4.

Tabla No. 54: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 4

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.16
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.62
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.39
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.47
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.84
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.52
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.51
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.80
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	12.39
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	15.28
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	18.48
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	19.33

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 55: Pérdida de carga en tramo recto de configuración de tubería 4

Caudal		TRAMO ACCESORIOS			
		PVC 3/4" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (Pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.6319	3907.12	0.04129192	0.10
2	0.0045	1.2639	7814.25	0.03391321	0.39
3	0.0067	1.8958	11721.37	0.03061020	0.86
4	0.0089	2.5278	15628.50	0.02862751	1.51
5	0.0111	3.1597	19535.62	0.02727027	2.34
6	0.0134	3.7916	23442.75	0.02626814	3.35
7	0.0156	4.4236	27349.87	0.02549071	4.54
8	0.0178	5.0555	31257.00	0.02486614	5.92
9	0.0201	5.6875	35164.12	0.02435111	7.47
10	0.0223	6.3194	39071.25	0.02391773	9.21
11	0.0245	6.9513	42978.37	0.02354709	11.12
11.25	0.0251	7.1093	43955.16	0.02346259	11.63

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 56: Pérdida de carga en tramo de salida de configuración de tubería 4

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
GPM	pies ³ /s	Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
		V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.01	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.03	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.06	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.11	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.16	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.24	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.32	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.42	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	0.53	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	0.65	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	0.79	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	0.82	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 4 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 57: Pérdida de carga total, configuración de tubería 4

GPM	h _L total (pies)
0	0
1	0.29
2	1.11
3	2.48
4	4.38
5	6.82
6	9.79
7	13.30
8	17.33
9	21.91
10	27.01
11	32.65
11.25	34.14

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

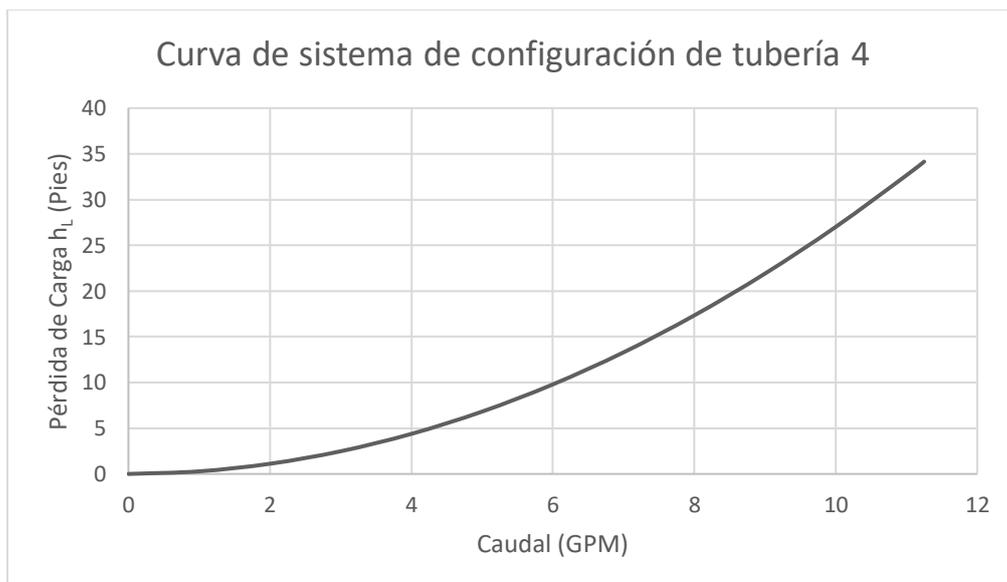
c. Curva de sistema de configuración de tubería 4. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema de configuración de tubería 4:

Tabla No. 58: Caudal vs. pérdida de carga de configuración de tubería 4

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.29
2	1.11
3	2.48
4	4.38
5	6.82
6	9.79
7	13.30
8	17.33
9	21.91
10	27.01
11	32.65
11.25	34.14

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

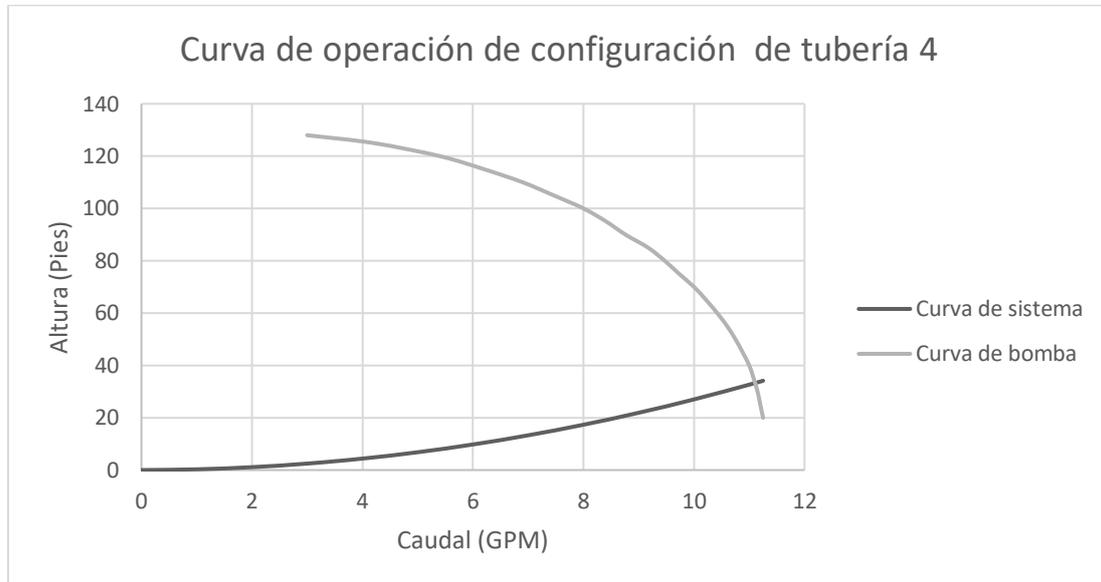
Figura No. 62: Curva de sistema de configuración de tubería 4



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

d. Curva de operación de configuración de tubería 4. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 4.

Figura No. 63: Curva de operación de configuración de tubería 4



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra es 33 pies (10.05 metros) y 11.10 GPM a litros por segundo;

$$11.20 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.70 \text{ litros/s}$$

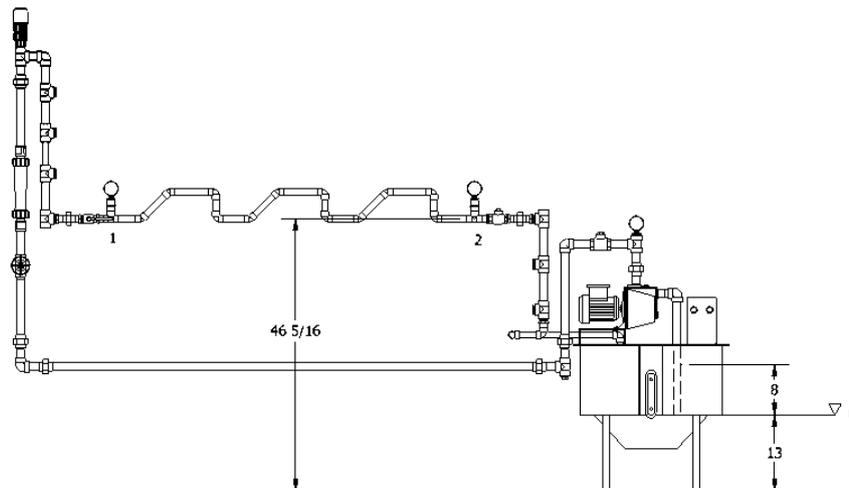
La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.70 \text{ litros/s} (10.05 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 18.8\%$$

e. Cambio de presión en el tramo de accesorios de configuración de tubería 4. A continuación, se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 64: Altura de tubería de configuración de tubería 4



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de PVC y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Tabla No. 59: Presiones esperadas y cambio de presión en configuración de tubería 4

Caudal	Manómetro 1	Manómetro 2	Cambio de presión
GPM	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	(PSI)
0	0	0	0
1	53.16	52.42	0.74
2	52.96	52.09	0.87
3	52.62	51.55	1.07
4	51.07	49.71	1.35
5	48.80	47.09	1.71
6	45.72	43.57	2.15
7	41.71	39.04	2.67
8	36.81	33.54	3.26
9	30.04	26.10	3.94
10	21.41	16.72	4.69
11	7.01	1.50	5.51

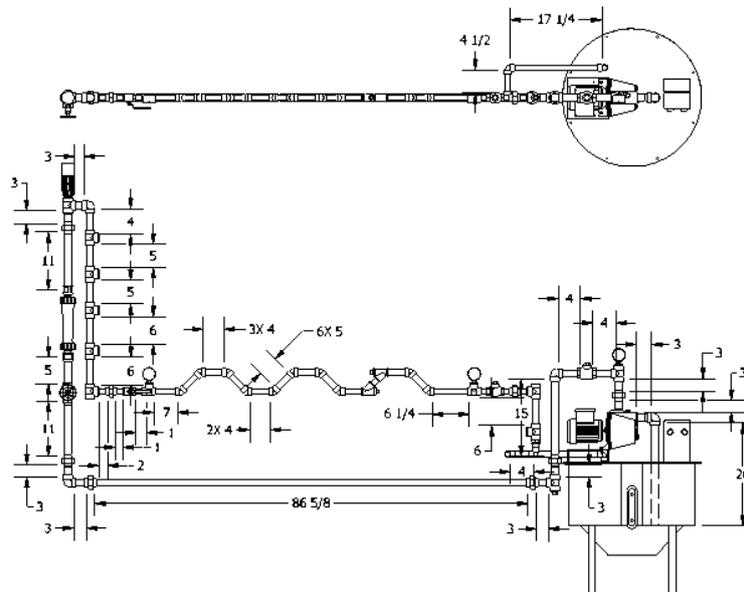
Fuente: (Elaboración propia, 2014)

7. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 5.

Resolviendo todo el sistema de la configuración de tubería 5 con el mismo procedimiento anteriormente descrito se obtiene el siguiente resumen.

A continuación, se muestra la siguiente figura de la configuración de tubería 5 y sus dimensiones en pulgadas:

Figura No. 65: Dimensiones de longitudes en configuración de tubería 5



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de cada una de las longitudes de tuberías respectivas y semejantes y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 60: Longitudes de tubería en configuración de tubería 5

Longitudes de tuberías	Pies
Longitud total tubería HG 1"	17.47
Longitud total tubería HG 1"	17.47
Longitud total tubería HG 3/4" C40	5.52
Longitud total tubería HG 1"	0.50
Longitud total tubería PVC 1"	2.15

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a. Coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en el sistema. Se hace la sumatoria de cada una de las longitudes de tuberías respectivas y semejantes y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 61: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie	9.66	9.66
4	Codos 90 HG 1"	0.69	2.76
4	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	1.84
3	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	4.14
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
2	Reductor tipo buje HG 1" - 3/4"	0.30	0.59
Total			63.86

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 62: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de accesorios

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo accesorios			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Unión universal HG 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención HG 3/4"	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) HG 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola HG 3/4"	3.75	3.75
10	Codo 45 HG 3/4"	0.4	4
1	Yee 45 (tramo recto-derivación) HG 3/4"	0.5	0.5
1	Yee 45 (tramo derivación-recto) HG 3/4"	2.75	2.75
Total			13.3

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 63: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida HG			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	0.92
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			2.65

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 64: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida PVC			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión Universal PVC 1"	0.023	0.02
1	Salida a depósito	1	1.00
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- b. Pérdida de carga total de configuración de tubería 5. Se presenta a continuación las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 5.

Tabla No. 65: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 5

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.16
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.62
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.38
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.44
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.80
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.47
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.43
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.70
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	12.26
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	15.13
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	18.29
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	19.13

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 66: Pérdida de carga en tramo de accesorios de configuración de tubería 5

Caudal		TRAMO ACCESORIOS			
		Acero galvanizado 3/4" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (Pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.6319	3907.12	0.04129192	0.10
2	0.0045	1.2639	7814.25	0.03391321	0.40
3	0.0067	1.8958	11721.37	0.03061020	0.88
4	0.0089	2.5278	15628.50	0.02862751	1.55
5	0.0111	3.1597	19535.62	0.02727027	2.41
6	0.0134	3.7916	23442.75	0.02626814	3.45
7	0.0156	4.4236	27349.87	0.02549071	4.68
8	0.0178	5.0555	31257.00	0.02486614	6.09
9	0.0201	5.6875	35164.12	0.02435111	7.69
10	0.0223	6.3194	39071.25	0.02391773	9.47
11	0.0245	6.9513	42978.37	0.02354709	11.44
11.25	0.0251	7.1093	43955.16	0.02346259	11.96

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 67: Pérdida de carga en tramo de salida de configuración de tubería 5

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
		Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.01	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.02	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.06	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.10	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.15	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.22	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.30	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.39	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	0.49	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	0.61	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	0.74	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	0.77	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 5 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 68: Pérdida de carga total, configuración de tubería 5

GPM	h _L total (pies)
0	0
1	0.29
2	1.12
3	2.49
4	4.40
5	6.84
6	9.82
7	13.33
8	17.38
9	21.96
10	27.08
11	32.73
11.25	34.22

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

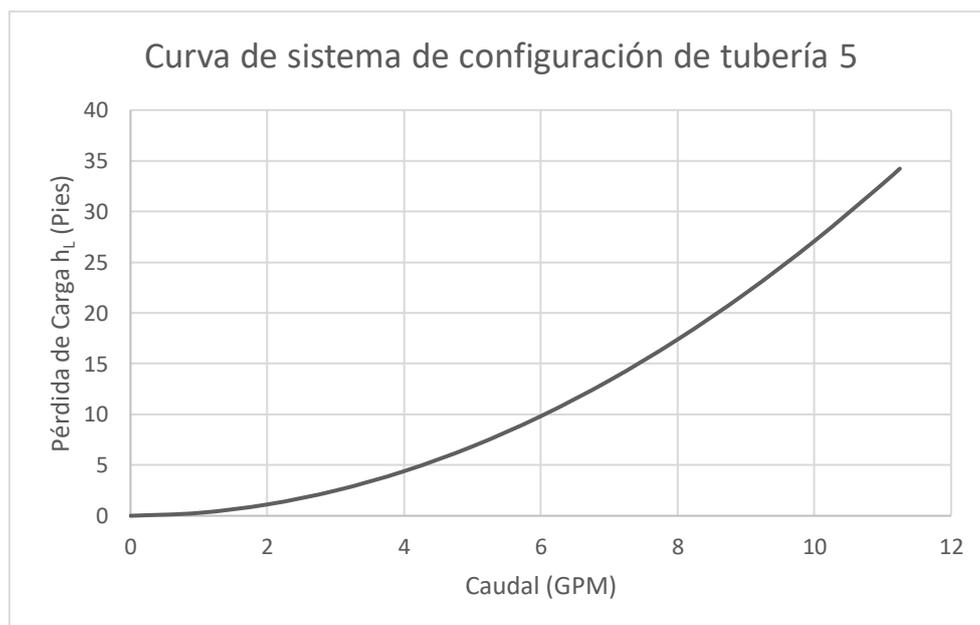
c. Curva de sistema de configuración de tubería 5. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema de configuración de tubería 5:

Tabla No. 69: Caudal vs. pérdida de carga de configuración de tubería 5

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.29
2	1.12
3	2.49
4	4.40
5	6.84
6	9.82
7	13.33
8	17.38
9	21.96
10	27.08
11	32.73
11.25	34.22

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

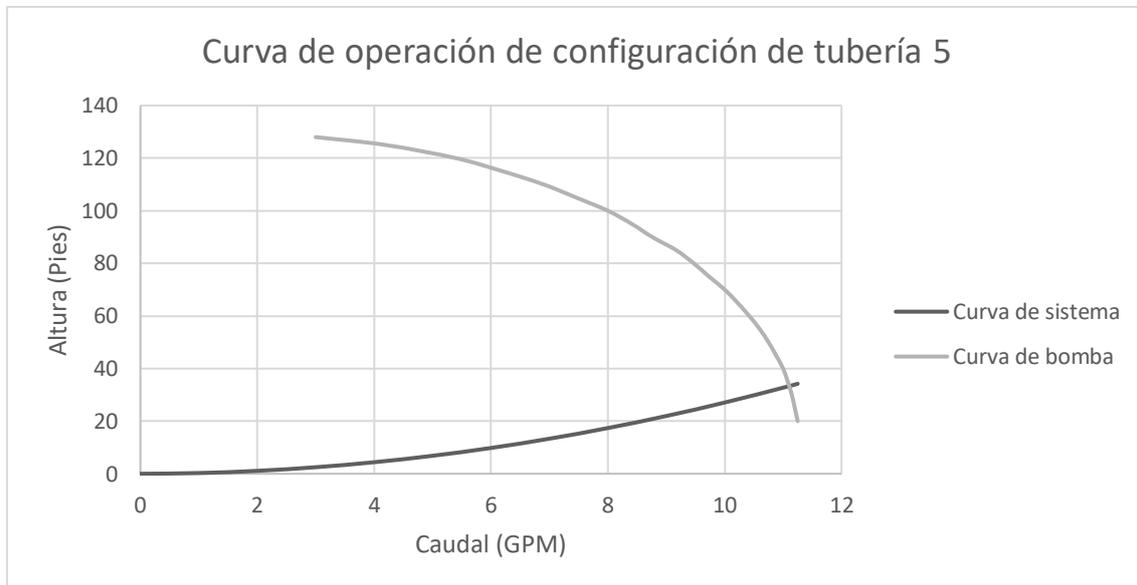
Figura No. 66: Curva de sistema de configuración de tubería 5



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

d. Curva de operación de configuración de tubería 5. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 5.

Figura No. 67: Curva de operación de configuración de tubería 5



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra es 33.5 pies (10.21 metros) y 11.15 GPM a litros por segundo;

$$11.15 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.70 \text{ litros/s}$$

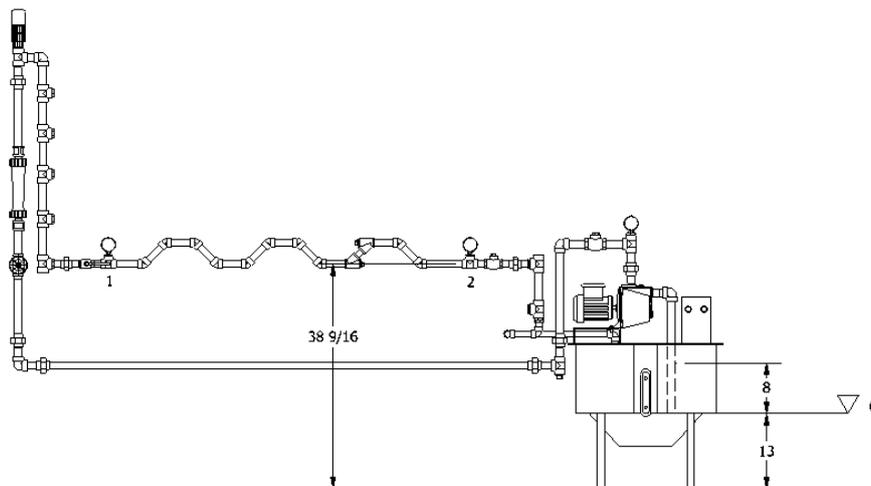
La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.70 \text{ litros/s} (10.21 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 19.1\%$$

e. Cambio de presión en el tramo de accesorios de configuración de tubería 5. A continuación, se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 68: Altura de tubería de configuración de tubería 5



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de acero galvanizado y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Tabla No. 70: Presiones esperadas y cambio de presión en configuración de tubería 5

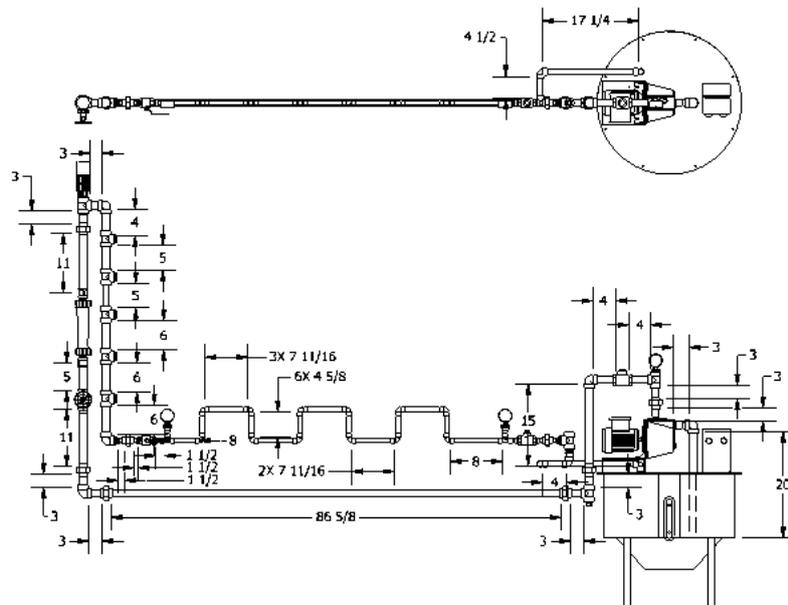
Caudal GPM	Manómetro 1 P ₁ (PSI)	Manómetro 2 P ₂ (PSI)	Cambio de presión (PSI)
0	0	0	0
1	53.44	52.70	0.74
2	53.24	52.37	0.87
3	52.91	51.82	1.08
4	51.36	49.98	1.37
5	49.10	47.36	1.74
6	46.02	43.83	2.19
7	42.02	39.30	2.73
8	37.13	33.79	3.34
9	30.37	26.35	4.03
10	21.76	16.96	4.80
11	7.38	1.72	5.65

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

8. Resumen y análisis de pérdidas de carga en configuración de tubería 6.

Se hace el cálculo de los coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en la configuración y se muestran en la siguiente tabla:

Figura No. 69: Dimensiones de longitudes en configuración de tubería 6



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de cada una de las longitudes de tuberías respectivas y semejantes y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 71: Longitudes de tubería en configuración de tubería 6

Longitudes de tuberías	Pies
Longitud total tubería HG 1"	17.97
Longitud total tubería cobre rígido tipo M 3/4"	7.60
Longitud total tubería HG 1"	0.00
Longitud total tubería PVC 1"	2.15

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

a. Coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en el sistema. Se hace el cálculo de los coeficientes de resistencia de todos los accesorios instalados en la configuración y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla No. 72: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de entrada			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Succión depósito	0.78	0.78
1	Válvula de pie	9.66	9.66
5	Codos 90° HG 1"	0.69	3.45
2	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	2.76
5	Tee (tramo recto) HG 1"	0.46	2.3
2	Adaptador hembra (copla) HG 1"	0.023	0.046
6	Unión Universal HG 1"	0.023	0.138
1	Válvula retención Bronce 1"	1.15	1.15
1	Válvula globo Bronce 1"	7.82	7.82
1	Rotámetro policarbonato	34.93	34.93
2	Reductor tipo buje HG 1"- 3/4"	0.30	0.59
Total			63.63

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 73: Coeficientes de resistencia de accesorios de tramo de accesorios

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de accesorios			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
2	Unión universal cobre tipo M 3/4"	0.025	0.05
1	Válvula de retención cobre tipo M 3/4"	1.25	1.25
2	Tee (tramo recto) cobre tipo M 3/4"	0.5	1
1	Válvula de bola cobre tipo M 3/4"	3.75	3.75
10	Codo 45 cobre tipo M 3/4"	0.4	4
Total			10.05

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 74: Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida de acero galvanizado

Coeficientes de resistencia de accesorios en tramo de salida HG			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Tee (tramo de derivación) HG 1"	1.38	1.38
1	Reductor tipo buje HG 1-3/4" (expansión)	0.35	0.35
Total			1.73

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 75: Coeficientes de resistencia de accesorios de tramo de salida de PVC

Coeficientes de resistencia de accesorios tramo de salida (PVC)			
Cantidad	Accesorio	K _L unitario (pies)	K _L total (pies)
1	Válvula de bola PVC 1"	3.45	3.45
4	Codos 90 PVC 1"	0.69	2.76
1	Adaptador macho PVC 1"	0.26	0.26
1	Unión universal PVC 1"	0.023	0.023
1	Salida a depósito	1	1
Total			7.49

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- b. Pérdida de carga total de configuración de tubería 6. Se presenta a continuación las pérdidas de carga en cada uno de los tramos que conforman la configuración de tubería 6.

Tabla No. 76: Pérdida de carga en tramo de entrada de configuración de tubería 6

Caudal		TRAMO DE ENTRADA			
		Acero galvanizado 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.16
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.62
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	1.38
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	2.44
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	3.80
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	5.47
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	7.43
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	9.69
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	12.26
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	15.12
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	18.28
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	19.12

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 77: Pérdida de carga en tramo de accesorios de configuración de tubería 6

Caudal		TRAMO ACCESORIOS			
		COBRE RÍGIDO TIPO M 3/4"			
GPM	pies ³ /s	V (pies/s)	Re	f	h _L (pies)
0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.6211	3873.40	0.04087863	0.09
2	0.0045	1.2422	7746.80	0.03323682	0.33
3	0.0067	1.8632	11620.20	0.02973174	0.72
4	0.0089	2.4843	15493.61	0.02757754	1.26
5	0.0111	3.1054	19367.01	0.02606876	1.94
6	0.0134	3.7265	23240.41	0.02492976	2.77
7	0.0156	4.3475	27113.81	0.02402694	3.74
8	0.0178	4.9686	30987.21	0.02328637	4.86
9	0.0201	5.5897	34860.61	0.02266322	6.11
10	0.0223	6.2108	38734.01	0.02212850	7.51
11	0.0245	6.8319	42607.41	0.02166244	9.05
11.25	0.0251	6.9871	43575.76	0.02155492	9.46

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 78: Pérdida de carga en tramo de accesorios de configuración de tubería 6

Caudal		TRAMO DE SALIDA							
		Acero galvanizado 1" C40				PVC 1" C40			
GPM	pies ³ /s	V	Re	f	h _L	V	Re	f	h _L
		(pies/s)			(pies)	(pies/s)			(pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.3712	2994.59	0.04883830	0.00	0.3858	3052.80	0.04447109	0.020
2	0.0045	0.7424	5989.19	0.04175347	0.01	0.7716	6105.59	0.03609062	0.078
3	0.0067	1.1137	8983.78	0.03891391	0.03	1.1574	9158.39	0.03233313	0.173
4	0.0089	1.4849	11978.37	0.03734943	0.06	1.5432	12211.19	0.03006608	0.305
5	0.0111	1.8561	14972.97	0.03635107	0.09	1.9290	15263.99	0.02850459	0.474
6	0.0134	2.2273	17967.56	0.03565623	0.13	2.3148	18316.78	0.02734414	0.680
7	0.0156	2.5986	20962.15	0.03514385	0.18	2.7006	21369.58	0.02643795	0.923
8	0.0178	2.9698	23956.75	0.03474998	0.24	3.0864	24422.38	0.02570521	1.203
9	0.0201	3.3410	26951.34	0.03443758	0.30	3.4722	27475.18	0.02509714	1.520
10	0.0223	3.7122	29945.93	0.03418363	0.37	3.8580	30527.97	0.02458231	1.874
11	0.0245	4.0835	32940.53	0.03397306	0.45	4.2437	33580.77	0.02413941	2.264
11.25	0.0251	4.1763	33689.18	0.03392592	0.47	4.3402	34343.97	0.02403806	2.367

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Se hace la sumatoria de todas las pérdidas de carga en todos los tramos de la configuración de tubería 6 y se obtiene la siguiente tabla:

Tabla No. 79: Pérdida de carga total, configuración de tubería 6

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.27
2	1.04
3	2.31
4	4.07
5	6.31
6	9.05
7	12.28
8	15.99
9	20.19
10	24.87
11	30.04
11.25	31.41

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

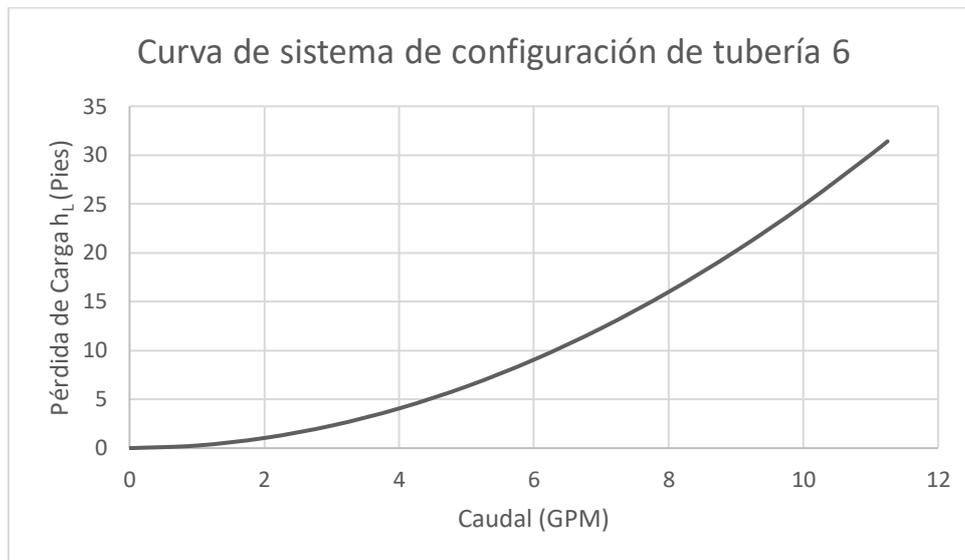
c. Curva del sistema de configuración de tubería 6. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema de configuración de tubería 6:

Tabla No. 80: Caudal vs. pérdida de carga de configuración de tubería 6

GPM	h_L total (pies)
0	0
1	0.27
2	1.04
3	2.31
4	4.07
5	6.31
6	9.05
7	12.28
8	15.99
9	20.19
10	24.87
11	30.04
11.25	31.41

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

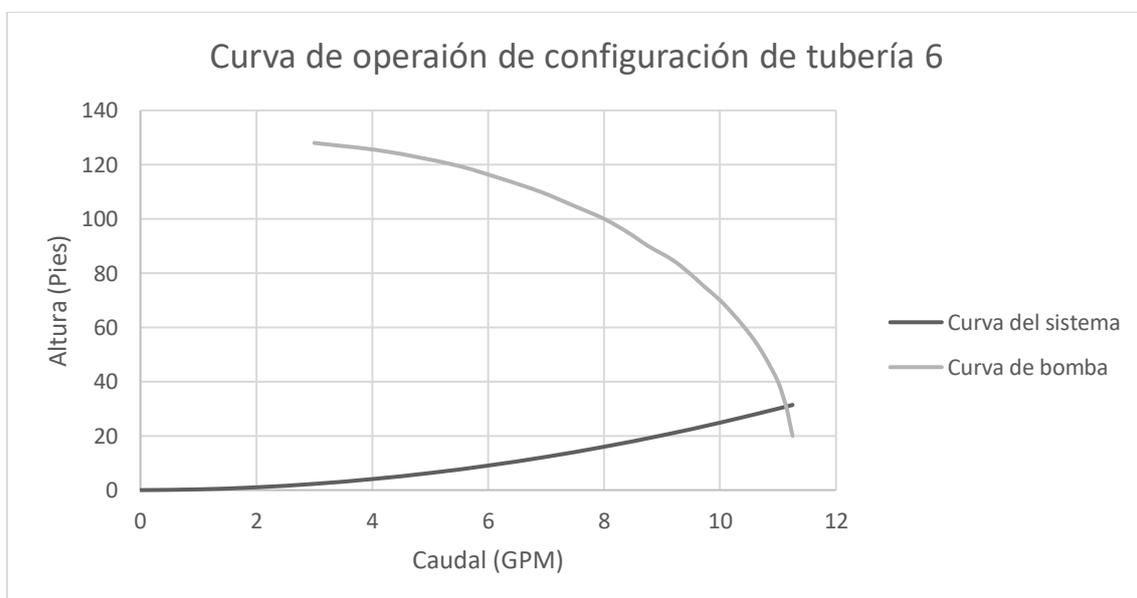
Figura No. 70: Curva de sistema de configuración de tubería 6



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

d. Curva de operación de configuración de tubería 6. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema de la configuración de tubería 6.

Figura No. 71: Curva de operación de configuración de tubería 6



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra a 30.5 pies (9.30 metros) y 11.18 GPM a litros por segundo;

$$11.18 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.71 \text{ litros/s}$$

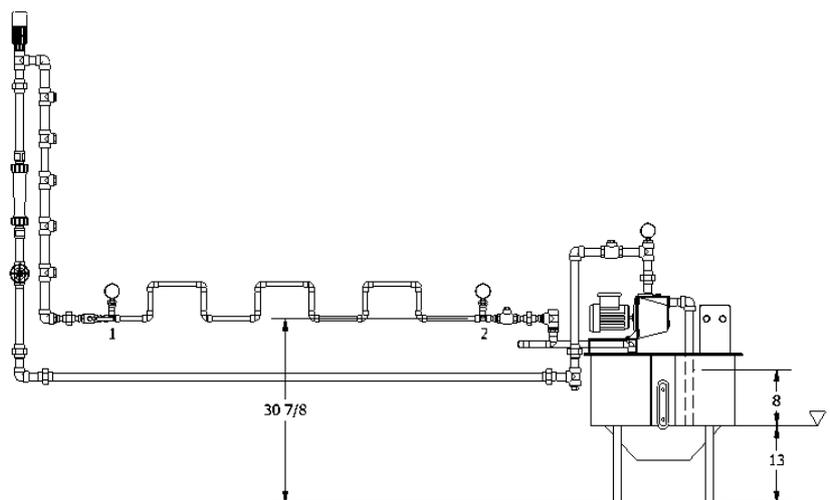
La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.71 \text{ litros/s} (9.30 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 17.6\%$$

e. Cambio de presión en el tramo de accesorios de configuración de tubería 6. A continuación se muestra las dimensiones necesarias para determinar el cambio de presión que existe entre los manómetros 1 y 2, tomando en cuenta como punto de origen el suelo.

Figura No. 72: Altura de tubería de configuración de tubería 6



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

A continuación, se presenta las presiones esperadas en los manómetros instalados en el tramo recto de tubería de acero galvanizado y la diferencia de presión entre los puntos de medición.

Tabla No. 81: Presiones esperadas y cambio de presión en configuración de tubería 6

Caudal GPM	Manómetro 1 P ₁ (PSI)	Manómetro 2 P ₂ (PSI)	Cambio de presión (PSI)
0	0	0	0
1	53.72	52.98	0.74
2	53.51	52.67	0.84
3	53.18	52.17	1.01
4	51.63	50.38	1.25
5	49.37	47.83	1.54
6	46.30	44.40	1.90
7	42.30	39.97	2.32
8	37.40	34.60	2.80
9	30.65	27.30	3.35
10	22.03	18.08	3.95
11	7.65	3.03	4.62

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

9. Resumen y análisis de pérdidas de carga en sistema completo de configuraciones de tubería. Si en el análisis se incluyen todas las configuraciones de tuberías propuestos anteriormente, es decir, todas las válvulas de bola están abiertas, el fluido pasará a través de todas las tuberías y accesorios ocasionando una pérdida de carga mucho mayor que si se hiciera un análisis individual, por ende, si se hiciera un análisis similar al anterior propuesto se obtienen resultados como lo indica la tabla siguiente:

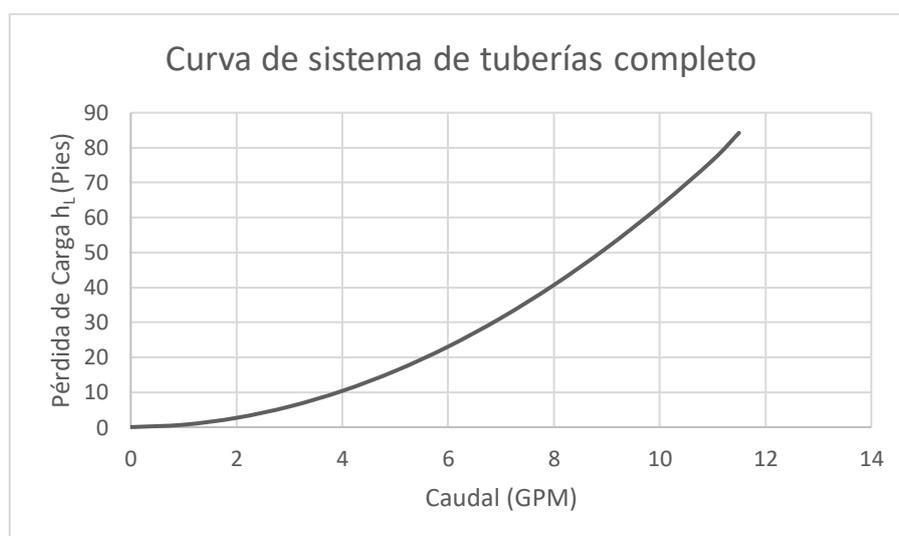
Tabla No. 82: Pérdida de carga total del banco de pruebas

Caudal		Tramo entrada	Tramo recto 1	Tramo recto 2	Tramo recto 3	Tramo accesorios4	Tramo accesorios 5	Tramo accesorios 6	Tramo salida	Pérdida total
GPM	pies ³ /s	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	h_L (pies)	$h_{L\text{ total}}$ (pies)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.0022	0.21	0.06	0.02	0.06	0.10	0.10	0.09	0.05	0.69
2	0.0045	0.84	0.22	0.09	0.22	0.39	0.40	0.33	0.19	2.66
3	0.0067	1.88	0.47	0.19	0.47	0.86	0.88	0.72	0.42	5.89
4	0.0089	3.33	0.83	0.33	0.82	1.51	1.55	1.26	0.75	10.37
5	0.0111	5.19	1.28	0.51	1.27	2.34	2.41	1.94	1.16	16.09
6	0.0134	7.46	1.82	0.72	1.80	3.35	3.45	2.77	1.67	23.05
7	0.0156	10.14	2.46	0.98	2.43	4.54	4.68	3.74	2.27	31.25
8	0.0178	13.24	3.20	1.27	3.15	5.92	6.09	4.86	2.96	40.69
9	0.0201	16.74	4.03	1.61	3.96	7.47	7.69	6.11	3.74	51.35
10	0.0223	20.65	4.95	1.98	4.87	9.21	9.47	7.51	4.61	63.26
11	0.0245	24.98	5.98	2.39	5.86	11.12	11.44	9.05	5.58	76.39
11.25	0.0256	29.72	6.24	2.50	6.12	11.63	11.96	9.46	6.64	84.25

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

- a. Curva del sistema completo. Se realiza a partir del cálculo de las pérdidas de carga que se producen en las tuberías cuando circula un determinado caudal, las pérdidas varían con el caudal, según especificaciones de tuberías y accesorios instalados. Se muestra a continuación la curva del sistema total:

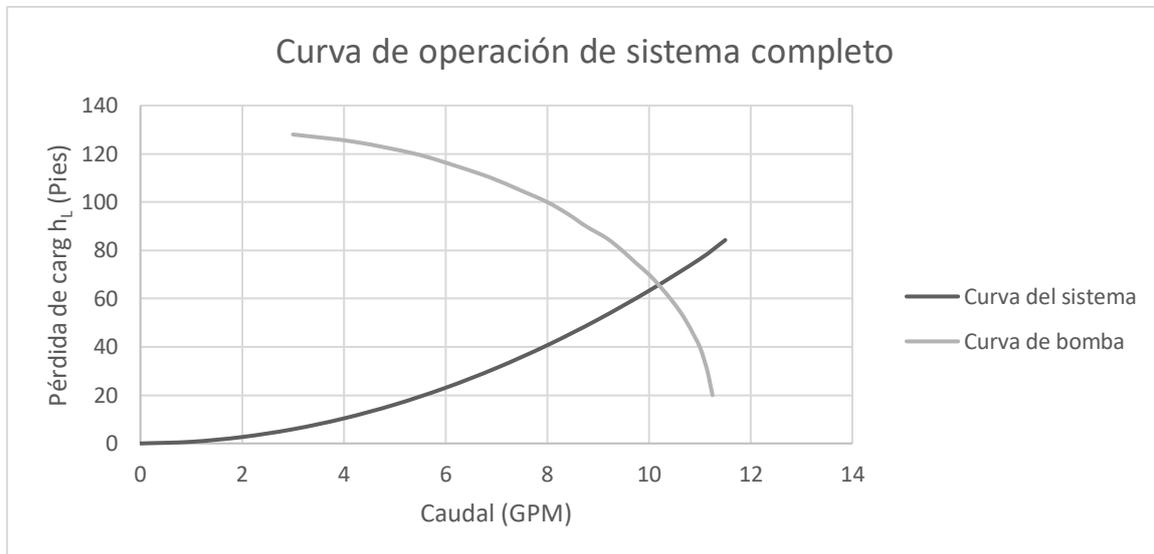
Figura No. 73: Curva del sistema de tuberías completo



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

b. Curva de operación total del sistema completo. Por último, se muestra el punto de operación de la bomba de la bomba centrífuga en función de la operación del sistema total del sistema completo:

Figura No. 74: Curva de operación del sistema completo



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

El punto de operación se encuentra a 65 pies (19.81 metros) y 10.20 GPM a litros por segundo;

$$10.20 \frac{\text{galones}}{\text{minuto}} * \frac{3.7854 \text{ litros}}{1 \text{ galón}} * \frac{1 \text{ minuto}}{60 \text{ segundos}} = 0.64 \text{ litros/s}$$

La eficiencia de la bomba en este punto es:

$$\eta = \frac{0.64 \text{ litros/s} (19.81 \text{ metros})(1)}{75 * 0.5 \text{ HP}}$$

$$\eta = 33.9\%$$

El punto de operación del sistema ha cambiado a comparación de los análisis anteriores debido a que la carga ha aumentado, es decir que las pérdidas de energía crecieron a medida que se consideró todas las tuberías y accesorios de todas las configuraciones. Por lo tanto, la inclinación de la curva ha crecido y, por lo tanto, intercepta a la curva de operación de la bomba mucho más cerca de su punto óptimo o eficiente de operación de la bomba centrífuga.

f. Comparación de presión de cada configuración de tubería.

En las tablas siguientes se hacen las anotaciones de lecturas de las presiones de los manómetros instalados de las configuraciones en funcionamiento individual y los porcentajes de error de cada uno:

Tabla No. 83: Comparación de presión en configuración 1

Configuración de tubería 1									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje de error P ₁ (%)	Porcentaje de error P ₂ (%)	Porcentaje de error ΔP (%)
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)			
2	52.20	51.40	0.79	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	51.87	50.97	0.90	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	50.34	49.29	1.06	4	4	0	92	92	100
5	48.11	46.86	1.25	7	6.5	0.5	85	86	60
6	45.06	43.57	1.49	10	9.7	0.3	78	78	80
7	41.10	39.33	1.77	13.5	13	0.5	67	67	72
8	30.61	28.53	2.08	17	16	1	44	44	52
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 84: Comparación de presión en configuración 2

Configuración de tubería 2									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje de error P ₁ (%)	Porcentaje de error P ₂ (%)	Porcentaje de error ΔP (%)
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	Diferencia de Presión (PSI)			
2	52.44	51.70	0.74	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	52.11	51.33	0.78	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	50.57	49.72	0.84	4	4	0	92	92	100
5	48.32	47.40	0.92	6	5.5	0.5	88	88	46
6	45.25	44.23	1.01	10	9.5	0.5	78	79	51
7	41.26	40.13	1.12	14	13.5	0.5	66	66	56
8	36.38	35.12	1.25	17	16	1	53	54	20
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 85: Comparación de presión en configuración 3

Configuración de tubería 3									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	de error P ₁ (%)	de error P ₂ (%)	de error ΔP (%)
2	52.68	51.89	0.79	NA	NA	NA	NA	NA	NA
3	52.35	51.44	0.91	NA	NA	NA	NA	NA	NA
4	51.55	50.49	1.06	3.3	3	0.3	94	94	72
5	48.55	47.30	1.25	6.5	6	0.5	87	87	60
6	45.47	43.99	1.48	10	10	0	78	77	100
7	41.47	39.72	1.75	13.5	13	0.5	67	67	71
8	36.59	34.52	2.07	16.5	16.5	0	55	52	100
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 86: Comparación de presión en configuración 4

Configuración de tubería 4									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje	Porcentaje	Porcentaje
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	de error P ₁ (%)	de error P ₂ (%)	de error ΔP (%)
2	52.96	52.09	0.87	2	2	0	96	96	100
3	52.62	51.55	1.07	3.5	3	0.5	93	94	53
4	51.07	49.71	1.35	5	4.8	0.2	90	90	85
5	48.80	47.09	1.71	8	7	1	84	85	42
6	45.72	43.57	2.15	11	10	1	76	77	54
7	41.71	39.04	2.67	15	14	1	64	64	63
8	36.81	33.54	3.26	18	16	2	51	52	39
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 87: Comparación de presión en configuración 5

Configuración de tubería 5									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje de error P ₁ (%)	Porcentaje de error P ₂ (%)	Porcentaje de error ΔP (%)
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)			
2	53.24	52.37	0.87	2	2	0	96	96	100
3	52.91	51.82	1.08	3	2.5	0.5	94	95	54
4	51.36	49.98	1.37	4	3.6	0.4	92	93	71
5	49.10	47.36	1.74	8	7	1	84	85	43
6	46.02	43.83	2.19	11.5	10	1.5	75	77	32
7	42.02	39.30	2.73	15	13.5	1.5	64	66	45
8	37.13	33.79	3.34	20	16.5	3.5	46	51	-5
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Tabla No. 88: Comparación de presión en configuración 5

Configuración de tubería 6									
Caudal GPM	Experimental			Teórico			Porcentaje de error P ₁ (%)	Porcentaje de error P ₂ (%)	Porcentaje de error ΔP (%)
	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)	P ₁ (PSI)	P ₂ (PSI)	ΔP (PSI)			
2	53.51	52.67	0.84	4	2	2	93	96	-137
3	53.18	52.17	1.01	5.5	3	2.5	90	94	-147
4	51.63	50.38	1.25	8	4.5	3.5	85	91	-181
5	49.37	47.83	1.54	11.5	7.5	4	77	84	-159
6	46.30	44.40	1.90	15	11	4	68	75	-111
7	42.30	39.97	2.32	20	13.5	6.5	53	66	-180
8	37.40	34.60	2.80	22	15.5	6.5	41	55	-132
9	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
10	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
11	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fuente: (Elaboración propia, 2014)

V. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS

Se ha diseñado y manufacturado un banco de pruebas de pérdidas de carga en tuberías y accesorios con el objetivo de proporcionar un módulo de aprendizaje experimental y didáctico para estudiantes del departamento de Ingeniería Mecánica. Los estudiantes pueden interactuar con sistemas de tuberías de diferentes materiales, dimensiones, especificaciones técnicas y accesorios comunes y en el cual podrán hacer cálculos oportunos de las pérdidas de energía en las configuraciones y tramos de tubería, examinar lecturas de presión en manómetros, conocer la diferencia de presión entre dos puntos específicos y comparar situaciones de cambios de caudal y presión. Con la aplicación de los conocimientos adquiridos en la parte teórica, más los conocimientos obtenidos en la práctica, el estudiante será capaz de comprender, analizar y diseñar un sistema de tuberías en serie y/o paralelo con distintos accesorios y requerimientos, seleccionar tipos de válvulas según sea la aplicación, hacer uso de codos, uniones, tes, etc. para direccionamiento y transporte del fluido, y aún más importante seleccionar adecuadamente una bomba ya sea centrífuga o de desplazamiento positivo y proveer un sistema eficiente y capaz de cumplir con los requerimientos del cliente, de producción, hogares, etc. Dichos conocimientos están orientados a lograr que los procesos de funcionamiento en la industria o cualquier aplicación sean cada vez más óptimos en cuanto a ahorro de energía, costos y de producción.

Parte del proceso de selección del sistema de bombeo, es necesario hacer un análisis exhaustivo de las pérdidas de energía en las tuberías seleccionadas, configuración de tubería y elementos instalados. Posteriormente se obtienen curvas de la variación de la pérdida de carga respecto del caudal suministrado; estos gráficos son comparados con la curva característica de la bomba a seleccionar y así establecer un punto de operación (caudal y altura) para las condiciones de diseño y alcanzar una eficiencia de bomba alta, por tal razón se debe conocer cuál es la relación existente entre el caudal conducido por las tuberías y las pérdidas de carga que se generan por la conducción del fluido, sin embargo para el banco de pruebas ya se contaba con una bomba centrífuga capaz de suministrar 11 GPM y 128 pies, y el sistema fue adaptado a ella. Las pérdidas de carga dadas por la instalación de tuberías de diferentes materiales e instalación de accesorios se representan en curvas características de cada una de las configuraciones, estas curvas representan que a medida que el caudal aumenta, las pérdidas de carga entre los puntos de análisis también aumentarán, por lo tanto, la habrá una caída de presión. Los manómetros instalados en el sistema son capaces de tomar mediciones confiables y aceptables, se logra hacer una lectura capaz de proporcionar la información aceptable al estudiante, con la cual puede hacer sus propias conclusiones acerca de las pérdidas de carga en cada configuración asignada.

En los tramos rectos de tubería variando el caudal con la apertura o cierre de la válvula de globo se demuestran cambios de presión muy bajos, entre 0.5 PSI a 1.5 PSI, en los tramos rectos de tubería las pérdidas de carga representan un 12% a 25% de la pérdida de carga total. Estas pérdidas de carga únicamente se dan debido a la fricción interna de la tubería ocasionada por la rugosidad del material, por lo tanto, el cambio de presión en tramos rectos de tubería es bajo en comparación con los tramos con accesorios, por otra parte, en tramos de tubería que tienen instalados accesorios representan cambios de presión más elevados que los tramos rectos de tubería, las presiones varían entre 1 PSI a 5 PSI, los cambios de presión en tramos con accesorios se dan por dos razones; la fricción interna de la tubería debido a la rugosidad del material y la adición de accesorios, lo cual tiene una diferencia considerable en el estudio, tales pérdidas representan un 34% a 38% de la pérdida de carga total, por lo que se valida que las pérdidas de carga son mayores en comparación a los tramos rectos. Al comparar los cambios de presión entre un tramo recto de tubería y un tramo con accesorios con las mismas especificaciones de tubería se puede notar que las pérdidas de carga se dan en cualquier sistema de tuberías y que a medida que se van agregando accesorios al sistema, válvulas de control de flujo, etc. aumentarán las pérdidas de carga.

El sistema cuenta con dos válvulas de purga de aire instaladas en las partes más altas del sistema, una en el tramo de entrada, y otra en el tramo de salida, con el objetivo de disminuir la cantidad de aire o burbujas en el interior de las tuberías, y con esto evitar la cavitación en el sistema de tuberías, sin embargo, el sistema por ser de dimensiones ajustadas al espacio concebido aún sigue existiendo una cantidad de aire apreciable. Adicionalmente se instaló una válvula de bola en el tramo de salida de PVC, al momento de apagar el sistema se debe cerrar la válvula con el objetivo de mantener lleno de agua el sistema de tuberías, evitar que exista nueva formación de burbujas y se evita también cebar la bomba continuamente.

Las curvas de operación del sistema de cada una de las configuraciones demuestran que la bomba tiene un rendimiento bajo y deficiente, la bomba está trabajando entre 12% y 17% de eficiencia en las configuraciones individuales y, hasta un máximo de 33% de eficiencia cuando se consideran todas las tuberías y accesorios instalados, esto debido a que, como se mencionó anteriormente, el sistema se adoptó a la existencia física de la bomba y no al contrario. La baja eficiencia de la bomba es debido a que se ésta suministra un caudal considerablemente bajo, lo cual se ve reflejado en los gráficos de operación de cada una de las configuraciones de tubería. Para solucionar el problema se debe considerar instalar una bomba que ofrezca mayor caudal y mayor presión, cerca de 30 GPM y 20 BAR respectivamente, para que la eficiencia de la bomba aumente a un 75%. Además, en los cálculos se considera un valor constante de consumo de potencia eléctrica, 0.5 HP, cuando en la práctica este consumo es variable y menor (entre 0.4 HP y 0.45 HP); este consumo de potencia debe ser medido con un vatímetro para asegurar el valor real de consumo de potencia y obtener un dato más preciso de la eficiencia de la bomba. Otro punto a considerar es en el tramo de entrada, en los cálculos se considera que la válvula

de globo que sirve para variar el caudal con su apertura y cierre tenga una fuente considerable de error en el coeficiente de pérdida K_L , este depende de cuan abierta está la válvula. En las fuentes de consulta solo se pueden tomar coeficientes de pérdida para este tipo de válvula como: totalmente abierta, $\frac{3}{4}$ abierta, $\frac{1}{2}$ abierta y $\frac{1}{4}$ abierta y no se tienen más detalles para porcentajes de apertura que son necesarios cuando abre o cierra la válvula de globo, además es complicado abrir o cerrar la válvula en esos porcentajes, por el contrario, si se instala un sistema de control para ordenar a la válvula abrir o cerrar de forma automática se tendrían resultados más acertados disminuyendo los porcentajes de error. Estas fuentes de error, anteriormente mencionadas, se ven reflejadas en los altos porcentajes de error, tanto de cambios de presión, como en las diferencias entre el valor teórico y valor real de presión, por lo que se invita al estudiante a analizar el sistema y darle a entender todos los detalles que debe considerar para obtener buenos resultados en los diseños de sistemas de tuberías.

Si este proyecto se tratara de una aplicación industrial; no tendría aceptación que la bomba trabaje a una baja eficiencia durante largos pasos de tiempo, 24 horas al día, 365 días al año. Esto implica que se le debe dar mantenimiento periódico debido al desgaste en los componentes internos de la bomba tales como impeler y rodamientos. Sin embargo, el banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios se considera aceptable debido a que su fin es educativo y provee al usuario un sistema de experimentación durante una práctica técnica de aproximadamente una hora de duración.

VI. CONCLUSIONES

1. El banco de pruebas para conocer pérdidas de carga en tuberías y accesorios fue diseñado, construido y analizado para proporcionar un sistema funcional, didáctico, flexible y capaz de incrementar los conocimientos a los estudiantes a través de la experimentación e interacción con las seis configuraciones de tubería del banco de pruebas.
2. La construcción y ensamble del banco de pruebas se diseñó de tal manera que pueda otorgar diferentes configuraciones de tubería de diferentes materiales y dimensiones para que el estudiante sea capaz de analizar y comparar las pérdidas de carga de las configuraciones de tubería, tramos rectos y tramos con accesorios.
3. La instalación de codos, tes, yes, válvulas permitió distribuir las configuraciones de tubería, tener más opciones de análisis y otorgó un aumento de las pérdidas de carga para que el estudiante compare entre configuraciones de tramos rectos y configuraciones con tramos de tubería con accesorios y examinar sus diferencias de presión que varían entre 0.5 PSI a 1.5 PSI para tramos rectos y 1 PSI a 5 PSI en tramos con accesorios.
4. Las pérdidas de carga en cada una de las configuraciones con tramos rectos demuestran pérdidas de carga varían entre 0.24 pies y 28.58 pies debido a que existe solamente pérdida de energía en el fluido por longitud de tubería, por otro lado, las pérdidas de carga en cada una de las configuraciones con tramos con accesorios demuestran pérdidas de carga entre 0.27 pies y 34.22 pies debido a la pérdida de energía en tubería y accesorios instalados. Esto demuestra que las pérdidas de carga son en tramos con accesorios son mayores a los tramos rectos. Si el sistema se considera como un todo, es decir, tomando en cuenta todas las configuraciones a la vez; la pérdida de carga total del sistema crece hasta un máximo de 84.25 pies.
5. Las curvas de sistema y de operación se desarrollaron para cada configuración, en cada una de estas se encuentran el punto de operación del sistema, que determina el caudal y altura de la bomba. A medida que se agregaron accesorios, longitud de tubería, cambios de material, cierre parcial de válvulas, adición de válvulas de retención, acoples etc., la pérdida de carga aumentó. En cada configuración individual la bomba funcionó de forma deficiente, entre 12% y 17 %, esto debido a que la bomba no es la adecuada al sistema ya no que suministró el caudal necesario para que el sistema funcione de forma eficiente. Para su solución debe ser instalada una bomba que suministre un caudal mayor a los 11 GPM, cerca de 30 GPM, para obtener una eficiencia cercana al 75%, con

ello mantenerse en dentro de un rango normal de operación de la bomba, entre 60% a 85% de eficiencia.

6. El manual de operación y funcionamiento del banco de pruebas se desarrolló para apoyar al uso, cuidado y al correcto aprovechamiento. Se desarrolló según las especificaciones de los elementos y equipo utilizado para que el estudiante puede dar un reconocimiento previo a la utilización del banco de pruebas, adicionalmente da apoyo a familiarizarse con el sistema de tuberías e indicaciones de funcionamiento.

VII. RECOMENDACIONES

1. Antes de efectuar cualquier acción con el banco de pruebas, se debe leer detenidamente el manual de procedimiento, con el fin de utilizar correctamente los recursos del mismo y evitar daños en el sistema.
2. Extender las configuraciones de tubería con diferentes materiales y diámetros de tubería adicionalmente colocar la mayor cantidad de accesorios posibles con la intención de tener más opciones de estudio del sistema, el banco de pruebas cuenta con espacio en la parte inferior donde se puede adoptar esta extensión. Posteriormente ajustar el tramo de entrada para la(s) nueva(s) configuración(es).
3. Sustituir manómetros del sistema con manómetros con glicerina. Los manómetros con glicerina facilitan la medición haciéndola más confiable debido a que amortigua la vibración de la aguja, actualmente se dificulta la medición debido a la vibración de la aguja de los manómetros.
4. Para evitar cavitación en la entrada de la bomba debe disminuirse los accesorios instalados previos a la entrada, una sugerencia aceptable es extender la tubería para hacer que el fluido entre suavemente en la entrada de la bomba. Otra opción es colocar una manguera con las dimensiones indicadas por la succión de la bomba reduciendo burbujas o choques del fluido en la entrada de la bomba ocasionada por la adición de accesorios. Además, purgar el aire del sistema colocando más válvulas de purga, otra forma de evitar formación de aire es extender el tramo de entrada para hacer más suave la entrada del agua a las derivaciones de las configuraciones de tubería
5. Sustituir la bomba centrífuga por una que ofrezca un caudal mayor a 11GPM, con el fin de obtener de forma más clara y apreciable las curvas de sistema y curvas de operación, además con este cambio el sistema se vuelve eficiente y debe mantenerse dentro del rango normal de operación de la bomba, cerca del 85%, tomando en cuenta para la sustitución las consideraciones de diámetro de succión y descarga de 1 pulgada.
6. Colocar rodos en la parte inferior del banco de pruebas para su fácil transporte y hacer más dinámico el sistema.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

Binder, R. C. (1956). *Fluid Mechanics*. Estados Unidos: Prentice-Hall, Inc.

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Convección interna forzada. En Y. A. Cengel, & A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa* (pág. 491). México: McGraw Hill.

Cengel, Y., & Cimbala, J. M. (2006). *Mecánica de Fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. Mexico D.F.: McGrawHill.

CRANE, D. d. (1995). Estrechamientos y Ensanchamientos. En D. d. CRANE, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías* (págs. 2-14). México: McGraw-Hill.

Hardison, T. B. (1977). *Fluid Mechanics for Technicians*. Reston, Virginia: Prentice-Hall, Inc.

Harper, G. E. (2004). Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales. En G. E. Harper, *Manual de instalaciones eléctricas residenciales e industriales* (págs. 111-112). Limusa.

International, A. (1996). *ASTM International*. Recuperado el 28 de 01 de 2014, de ASTM International: <http://www.astm.org/>

Jiménez, D. (2005). *Geometría, El encanto de la forma*. Caracas: El Nacional.

Mataix, C. (1982). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. México: Alfaomega.

McQuinston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2010). *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. México: LIMUSA.

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2002). *Fundamentals of Fluid Mechanics*. Ames, Iowa: John Wiley & Sons, Inc.

Silowash, B. (2010). *Piping Systems Manual*. New York: McGrawHill.

IX. ANEXOS

PVC Pipe Schedules

Nominal Pipe Size	DN	Outside Diameter	Schedule	Min Wall Thickness	Avg Inside Diameter	Flow Area	Flow Area	Nom. Wt./Ft.	Max. Working Pressure at 73°F
1/8	6	0.405	40	0.068	0.249	0.049	0.000338	0.051	810
		0.405	80	0.095	0.195	0.030	0.000207	0.063	1230
1/4	8	0.540	40	0.088	0.344	0.093	0.000645	0.086	780
		0.540	80	0.119	0.282	0.062	0.000434	0.105	1130
3/8	10	0.675	40	0.091	0.473	0.176	0.001220	0.115	620
		0.675	80	0.126	0.403	0.128	0.000886	0.146	920
1/2	15	0.840	40	0.109	0.602	0.285	0.001977	0.170	600
		0.840	80	0.147	0.526	0.217	0.001509	0.213	850
		0.840	120	0.170	0.480	0.181	0.001257	0.236	1010
3/4	20	1.050	40	0.113	0.804	0.508	0.003526	0.226	480
		1.050	80	0.154	0.722	0.409	0.002843	0.289	690
		1.050	120	0.170	0.690	0.374	0.002597	0.311	770
1	25	1.315	40	0.133	1.029	0.832	0.005775	0.333	450
		1.315	80	0.179	0.936	0.688	0.004778	0.424	630
		1.315	120	0.200	0.891	0.624	0.004330	0.464	720
1 1/4	32	1.660	40	0.140	1.360	1.453	0.010088	0.450	370
		1.660	80	0.191	1.255	1.237	0.008590	0.586	520
		1.660	120	0.215	1.204	1.139	0.007906	0.649	600
1 1/2	40	1.900	40	0.145	1.590	1.986	0.013789	0.537	330
		1.900	80	0.200	1.476	1.711	0.011882	0.711	470
		1.900	120	0.225	1.423	1.590	0.011044	0.787	540
2	50	2.375	40	0.154	2.047	3.291	0.022854	0.720	280
		2.375	80	0.218	1.913	2.874	0.019960	0.984	400
		2.375	120	0.250	1.845	2.674	0.018566	1.111	470
2 1/2	65	2.875	40	0.203	2.445	4.695	0.032605	1.136	300
		2.875	80	0.276	2.290	4.119	0.028602	1.500	420
		2.875	120	0.300	2.239	3.937	0.027342	1.615	470
3	80	3.500	40	0.216	3.042	7.268	0.050471	1.488	260
		3.500	80	0.300	2.864	6.442	0.044738	2.010	370

Fuente: (McQuinston, Parker, & Spidler, 2010)

Copper Tubing Schedules

Nominal Size	Outside Diameter	Schedule	Wall Thickness	Inside Diameter	Flow Area	Flow Area	Metal Area
in	in		In	In	In ²	ft ²	In ²
1/8	0.125	ACR - Annealed	0.030	0.065	0.003	0.00002	0.009
3/16	0.187	ACR - Annealed	0.030	0.127	0.013	0.00009	0.015
1/4	0.250	ACR - Annealed	0.030	0.190	0.028	0.00020	0.021
	0.375	K	0.035	0.305	0.073	0.00051	0.037
	0.375	L	0.030	0.315	0.078	0.00054	0.033
5/16	0.312	ACR - Annealed	0.032	0.248	0.048	0.00034	0.028
3/8	0.375	ACR - Annealed	0.032	0.311	0.076	0.00053	0.034
	0.375	ACR - Drawn	0.030	0.315	0.078	0.00054	0.033
	0.500	K	0.049	0.402	0.127	0.00088	0.069
	0.500	L	0.035	0.430	0.145	0.00101	0.051
	0.500	M	0.025	0.450	0.159	0.00110	0.037
1/2	0.500	ACR - Annealed	0.032	0.436	0.149	0.00104	0.047
	0.500	ACR - Drawn	0.035	0.430	0.145	0.00101	0.051
	0.625	K	0.049	0.527	0.218	0.00151	0.089
	0.625	L	0.040	0.545	0.233	0.00162	0.074
	0.625	M	0.028	0.569	0.254	0.00177	0.053
5/8	0.625	ACR - Annealed	0.035	0.555	0.242	0.00168	0.065
	0.625	ACR - Drawn	0.040	0.545	0.233	0.00162	0.074
	0.750	K	0.049	0.652	0.334	0.00232	0.108
	0.750	L	0.042	0.666	0.348	0.00242	0.093
3/4	0.750	ACR - Annealed	0.035	0.680	0.363	0.00252	0.079
	0.750	ACR - A or D	0.042	0.666	0.348	0.00242	0.093
	0.875	K	0.065	0.745	0.436	0.00303	0.165
	0.875	L	0.045	0.785	0.484	0.00336	0.117
	0.875	M	0.032	0.811	0.517	0.00359	0.085
7/8	0.875	ACR - A or D	0.045	0.785	0.484	0.00336	0.117
1	1.125	K	0.065	0.995	0.778	0.00540	0.216
	1.125	L	0.050	1.025	0.825	0.00573	0.169
	1.125	M	0.035	1.055	0.874	0.00607	0.120
1 1/8	1.125	ACR - A or D	0.050	1.025	0.825	0.00573	0.169
1 1/4	1.375	K	0.065	1.245	1.217	0.00845	0.268
	1.375	L	0.055	1.265	1.257	0.00873	0.228
	1.375	M	0.042	1.291	1.309	0.00909	0.176
	1.375	DWV	0.040	1.295	1.317	0.00915	0.168
1 3/8	1.375	ACR - A or D	0.055	1.265	1.257	0.00873	0.228
1 1/2	1.625	K	0.072	1.481	1.723	0.01196	0.351
	1.625	L	0.060	1.505	1.779	0.01235	0.295
	1.625	M	0.049	1.527	1.831	0.01272	0.243
	1.625	DWV	0.042	1.541	1.865	0.01295	0.209
1 5/8	1.625	ACR - A or D	0.060	1.505	1.779	0.01235	0.295

Fuente: (McQuinston, Parker, & Spittler, 2010)

Tamaño nominal, pulgadas	Factor de fricción, f_t	Tamaño nominal, pulgadas	Factor de fricción, f_t
$\frac{1}{2}$	0.027	4	0.017
$\frac{3}{4}$	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
$1\frac{1}{4}$	0.022	8-10	0.014
$1\frac{1}{2}$	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012
$2\frac{1}{4}$, 3	0.018		

Fuente: (McQuinston, Parker, & Spitler, 2010)

■ TABLE 8.1

Equivalent Roughness for New Pipes [From Moody (Ref. 7) and Colebrook (Ref. 8)]

Pipe	Equivalent Roughness, ϵ	
	Feet	Millimeters
Riveted steel	0.003–0.03	0.9–9.0
Concrete	0.001–0.01	0.3–3.0
Wood stave	0.0006–0.003	0.18–0.9
Cast iron	0.00085	0.26
Galvanized iron	0.0005	0.15
Commercial steel or wrought iron	0.00015	0.045
Drawn tubing	0.000005	0.0015
Plastic, glass	0.0 (smooth)	0.0 (smooth)

Fuente: (Munson, Young, & Okiishi, 2002)

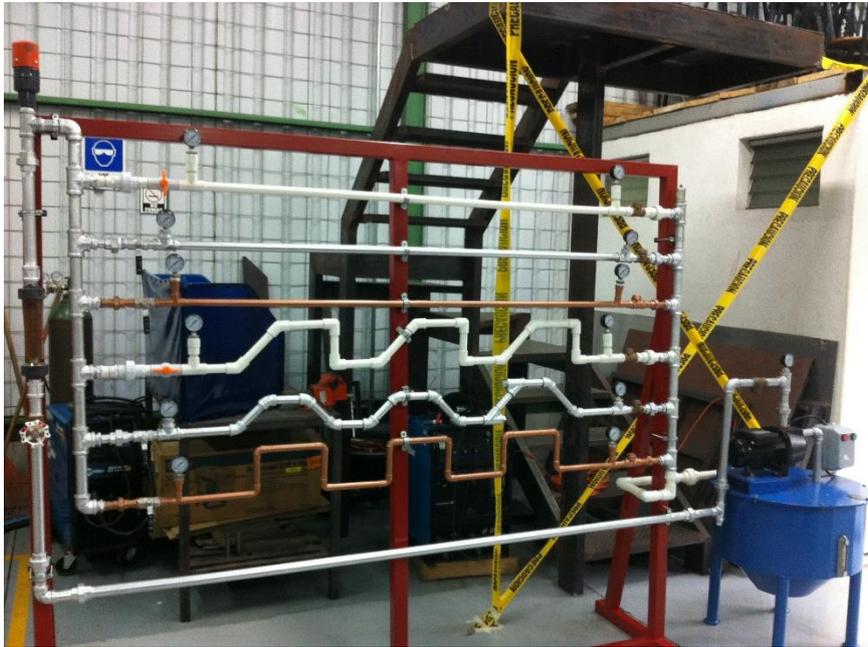
■ TABLE B.1
Physical Properties of Water (BG Units)^a

Temperature (°F)	Density, ρ (slugs/ft ³)	Specific Weight ^b , γ (lb/ft ³)	Dynamic Viscosity, μ (lb·s/ft ²)	Kinematic Viscosity, ν (ft ² /s)	Surface Tension ^c , σ (lb/ft)	Vapor Pressure, p_v [lb/in ² (abs)]	Speed of Sound ^d , c (ft/s)
32	1.940	62.42	3.732 E - 5	1.924 E - 5	5.18 E - 3	8.854 E - 2	4603
40	1.940	62.43	3.228 E - 5	1.664 E - 5	5.13 E - 3	1.217 E - 1	4672
50	1.940	62.41	2.730 E - 5	1.407 E - 5	5.09 E - 3	1.781 E - 1	4748
60	1.938	62.37	2.344 E - 5	1.210 E - 5	5.03 E - 3	2.563 E - 1	4814
70	1.936	62.30	2.037 E - 5	1.052 E - 5	4.97 E - 3	3.631 E - 1	4871
80	1.934	62.22	1.791 E - 5	9.262 E - 6	4.91 E - 3	5.069 E - 1	4819
90	1.931	62.11	1.500 E - 5	8.233 E - 6	4.86 E - 3	6.979 E - 1	4960
100	1.927	62.00	1.423 E - 5	7.383 E - 6	4.79 E - 3	9.493 E - 1	4995
120	1.918	61.71	1.164 E - 5	6.067 E - 6	4.67 E - 3	1.692 E + 0	5049
140	1.908	61.38	9.743 E - 6	5.106 E - 6	4.53 E - 3	2.888 E + 0	5091

Fuente: (Munson, Young, & Okiishi, 2002)

FOTOGRAFÍAS DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

Banco de pruebas finalizado



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Ubicación: Talle metal-mecánica



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Sistema de tuberías del banco de pruebas



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Vista de la parte izquierda del banco de pruebas



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

Vista de la parte derecha del banco de pruebas

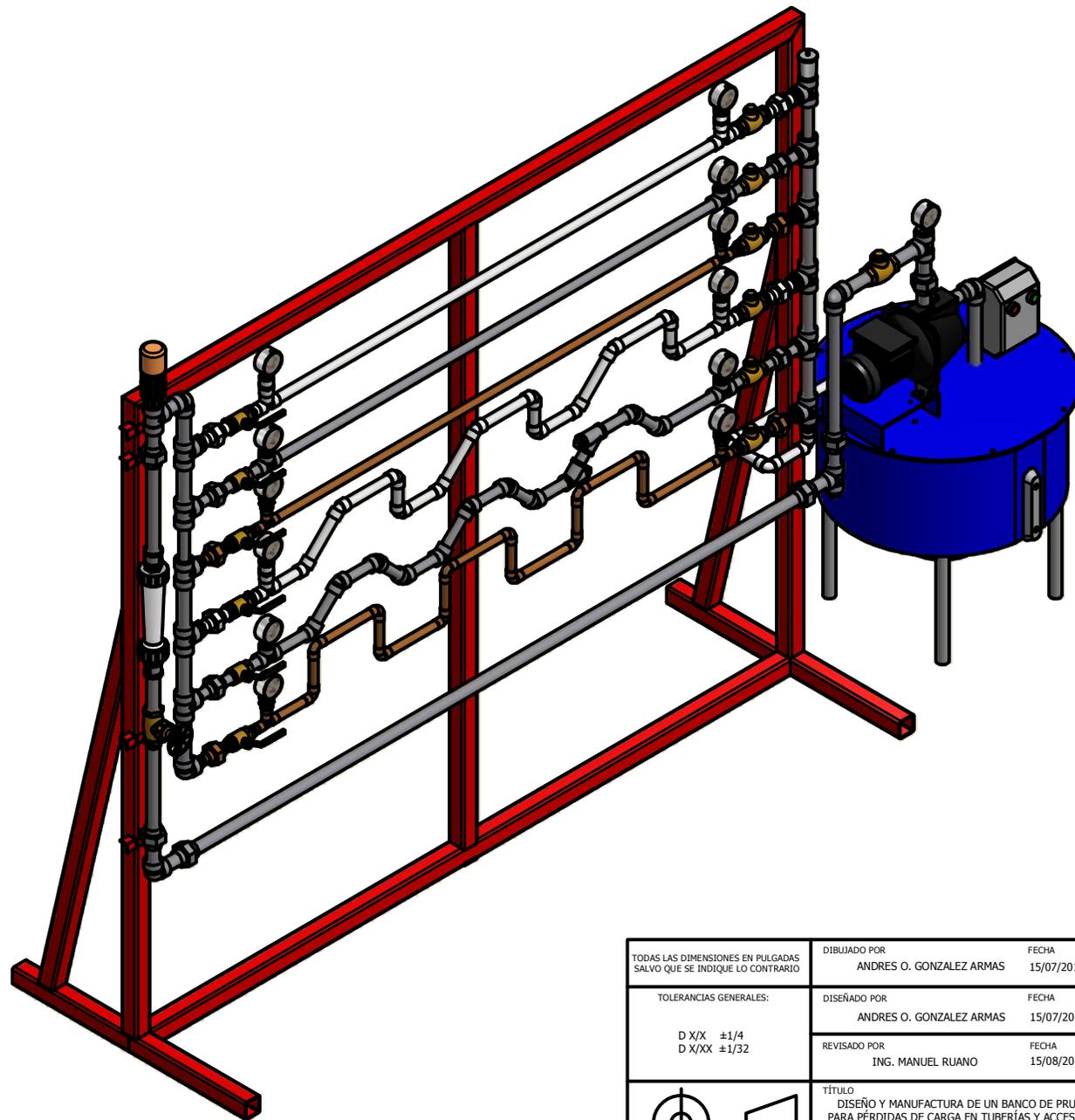


Fuente: (Elaboración propia, 2014)

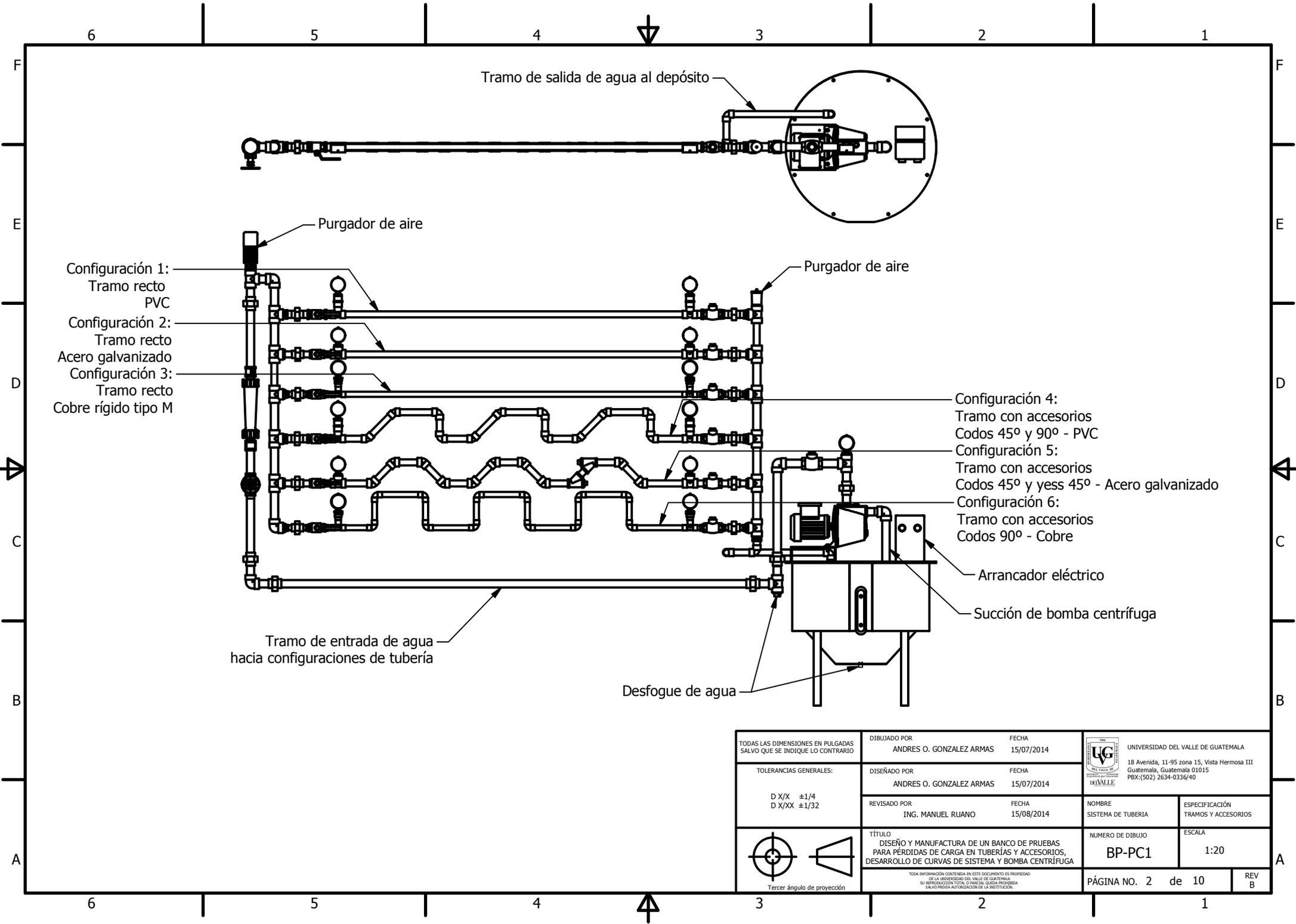
Depósito de agua, bomba y arrancador



Fuente: (Elaboración propia, 2014)

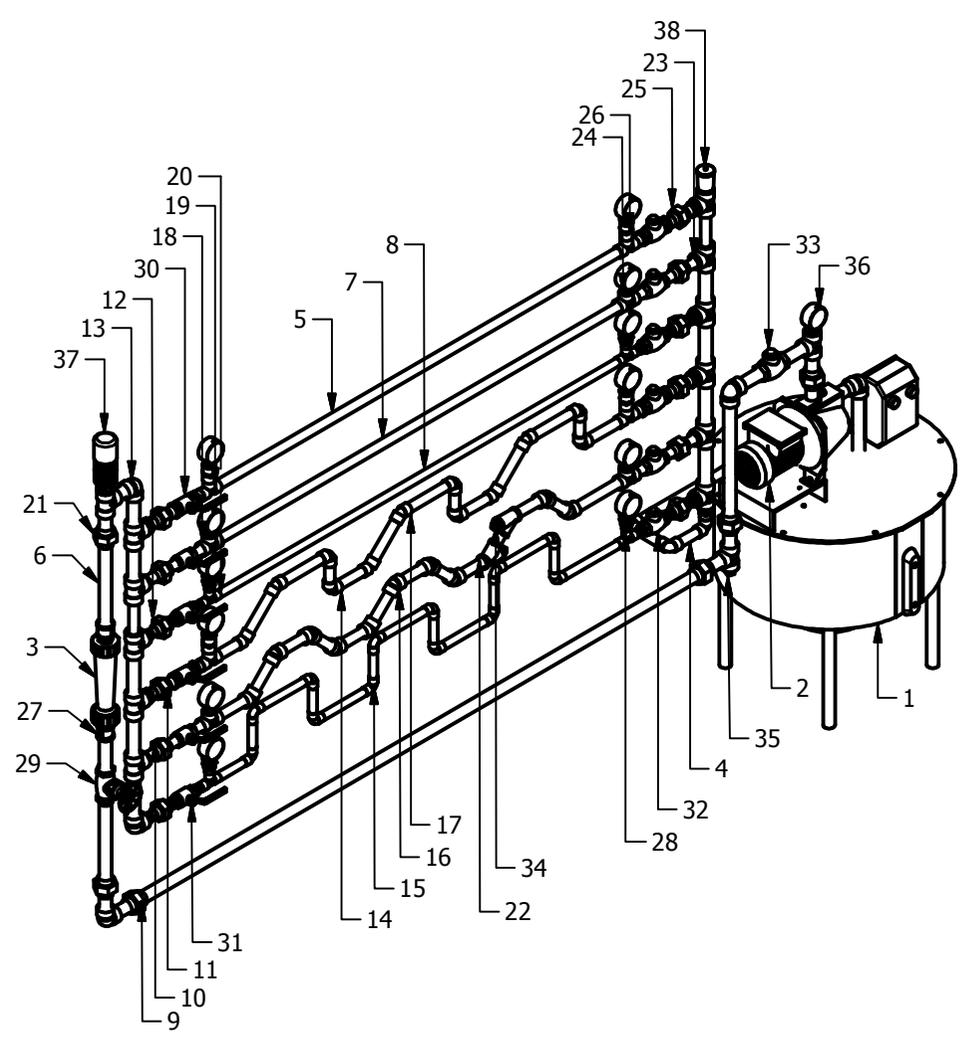


TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE DISEÑO BANCO DE PRUEBAS	ESPECIFICACIÓN ENSAMBLE
 Tercer ángulo de proyección	TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	ESCALA 1:15
<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PARA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>			PÁGINA NO. 1 de 10	REV B

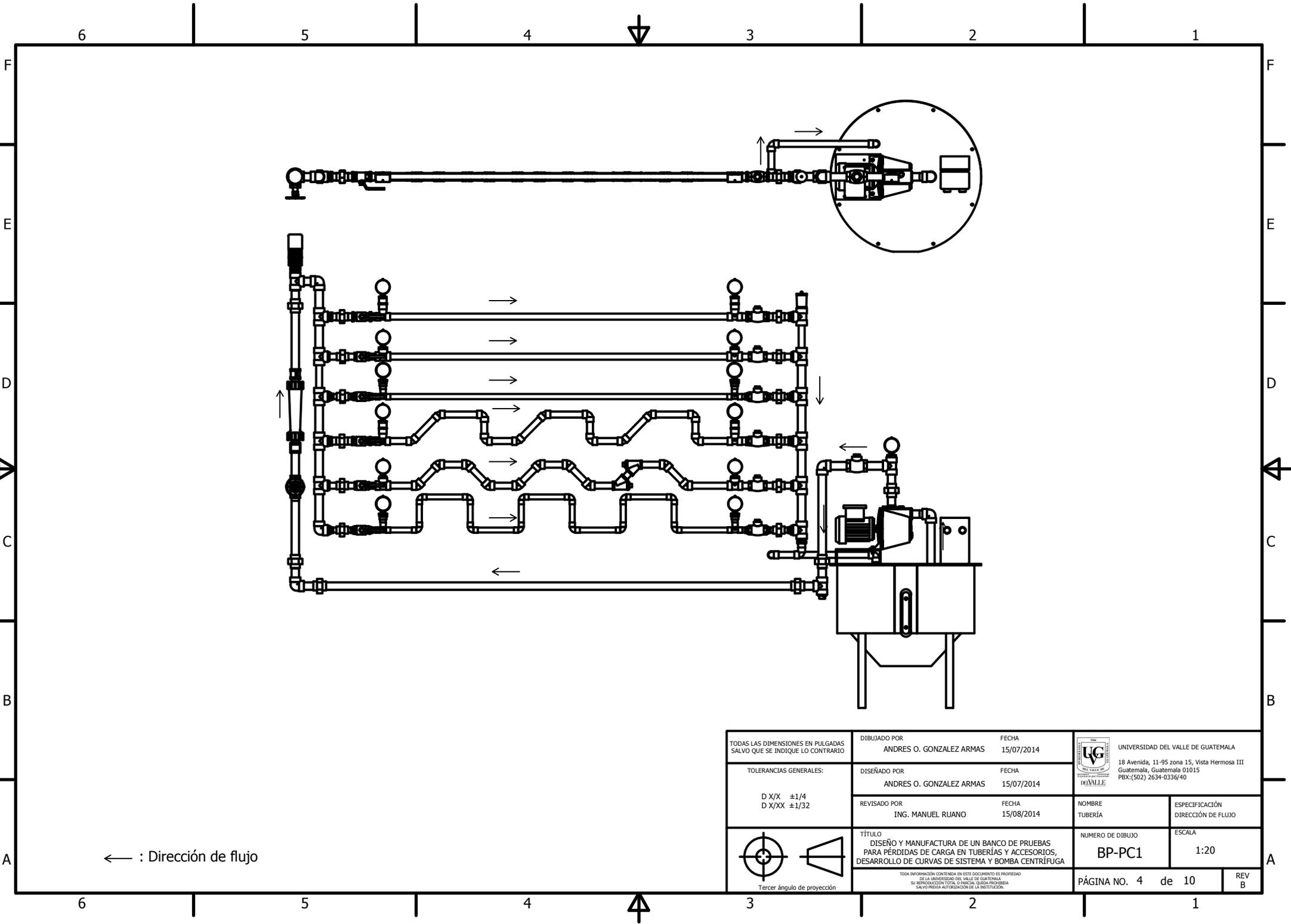


TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
 Tercer ángulo de proyección	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE SISTEMA DE TUBERIA	ESPECIFICACIÓN TRAMOS Y ACCESORIOS
	TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	ESCALA 1:20
<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL, QUEDA PROHIBIDA SALVO PRIMA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>			PÁGINA NO. 2 de 10	REV B

TABLA DE MATERIALES			
No.	Cantidad	Accesorio	Especificación
1	1	Depósito	Capacidad de 86 Litros
2	1	Bomba centrífuga	42L/min (11 GPM), 125 pies, 3450RPM, 1 pulg.
3	1	Rotámetro	Modelo LFME-13-F2, policarbonato, 0-80GPM, rosca NPT
4	29 5/8 pulg.	Tubo PVC	1 pulg. ASTM D2241
5	116 pulg.	Tubo PVC	3/4 pulg. ASTM D2241
6	215 5/8 pulg.	Tubo HG	1 pulg. ASTM A53-12
7	137 9/16 pulg.	Tubo HG	3/4 pulg. ASTM A53-12
8	161 3/4 pulg.	Tubo cobre tipo M	3/4 pulg. ASTM B88
9	6	Unión universal	1 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
10	4	Unión universal	3/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
11	4	Unión universal	3/4 pulg. PVC, liso
12	4	Unión universal	3/4 pulg. Cobre, soldable
13	5	Codo 90°	1 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
14	10	Codo 90°	3/4 pulg. PVC, liso
15	12	Codo 90°	3/4 pulg. Cobre, soldable
16	12	Codo 45°	3/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
17	6	Codo 45°	3/4 pulg. PVC, liso
18	4	Tee	3/4 pulg. Acero Galvanizado, rosca NPT
19	4	Tee	3/4 pulg. PVC, liso
20	4	Tee	3/4 pulg. Cobre, soldable
21	15	Tee	1 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
22	2	Yee	3/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
23	13	Reductor tipo buje	1 a 3/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
24	12	Reductor tipo buje	3/4 a 1/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
25	16	Adaptador macho	3/4 pulg. PVC, liso-rosca NPT
26	4	Adaptador hembra	3/4 pulg. PVC, liso
27	2	Adaptador hembra	1 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
28	4	Adaptador hembra	3/4 pulg. Cobre, soldable-rosca NPT
29	1	Válvula de globo	1 pulg. Bronce, rosca NPT
30	2	Válvula de bola	3/4 pulg. PVC, liso
31	4	Válvula de bola	3/4 pulg. Bronce, rosca NPT
32	6	Válvula de retención	3/4 pulg. Bronce, rosca NPT
33	1	Válvula de retención	1 pulg. Bronce, rosca NPT
34	2	Tapón macho	3/4 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
35	1	Tapón macho	1 pulg. Acero galvanizado, rosca NPT
36	13	Manómetro	0-60 PSI
37	1	Purgador de aire	Poliuretano
38	1	Purgador de aire	Acero

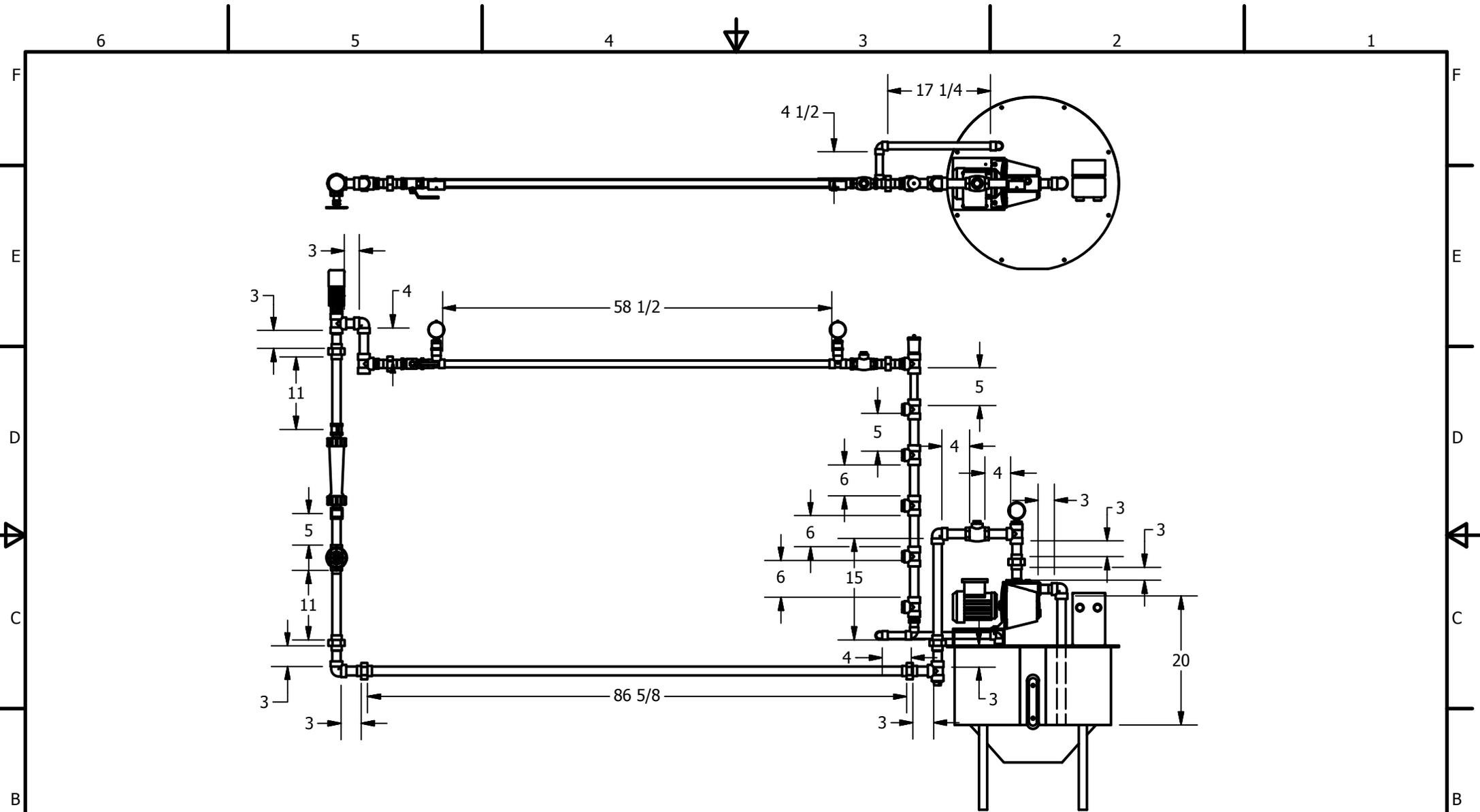


TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO		DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		FECHA 15/07/2014		 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
TOLERANCIAS GENERALES:		DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		FECHA 15/07/2014			
D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32		REVISADO POR ING. MANUEL RUANO		FECHA 15/08/2014		NOMBRE BANCO DE PRUEBAS	
 Tercer ángulo de proyección		TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA				ESPECIFICACIÓN MATERIALES	
		<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PRIMA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>				NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	
PÁGINA NO. 3 de 10						ESCALA 1:20	
							REV B

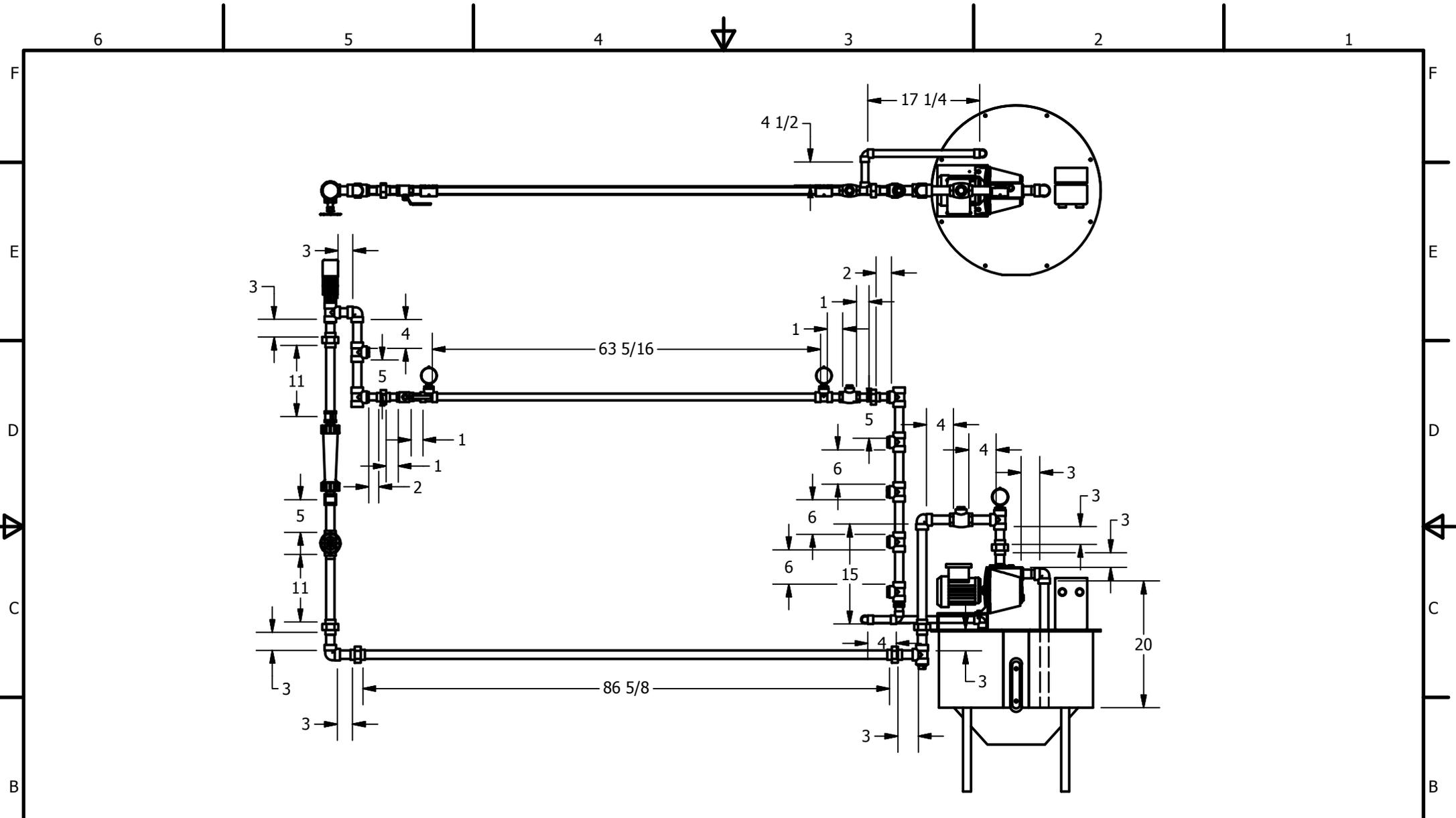


← : Dirección de flujo

TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
 Tercer ángulo de proyección	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE TUBERÍA	ESPECIFICACIÓN DIRECCIÓN DE FLUJO
	TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	ESCALA 1:20
<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL, QUEDA PROHIBIDA SALVO PARA AFILIADOS DE LA INSTITUCIÓN.</small>			PÁGINA NO. 4 de 10	REV B



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE CONFIGURACIÓN 1	ESPECIFICACIÓN TRAMO RECTO PVC 3/4" C40
	 Tercer ángulo de proyección		TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA	NUMERO DE DIBUJO BP-PC1
<small> TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PERMISO AUTORIZADO DE LA INSTITUCIÓN. </small>			ESCALA 1:20	PÁGINA NO. 5 de 10
			REV B	



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE CONFIGURACION 2	ESPECIFICACION TRAMO RECTO HG 3/4" C40
	 Tercer ángulo de proyección		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	ESCALA 1:20
<small> TODA INFORMACION CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCION TOTAL O PARCIAL, QUEDA PROHIBIDA SALVO PRIMA AUTORIZACION DE LA INSTITUCION. </small>			PÁGINA NO. 6 de 10	REV B



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III
 Guatemala, Guatemala 01015
 PBX: (502) 2634-0336/40

NOMBRE
 CONFIGURACION 2

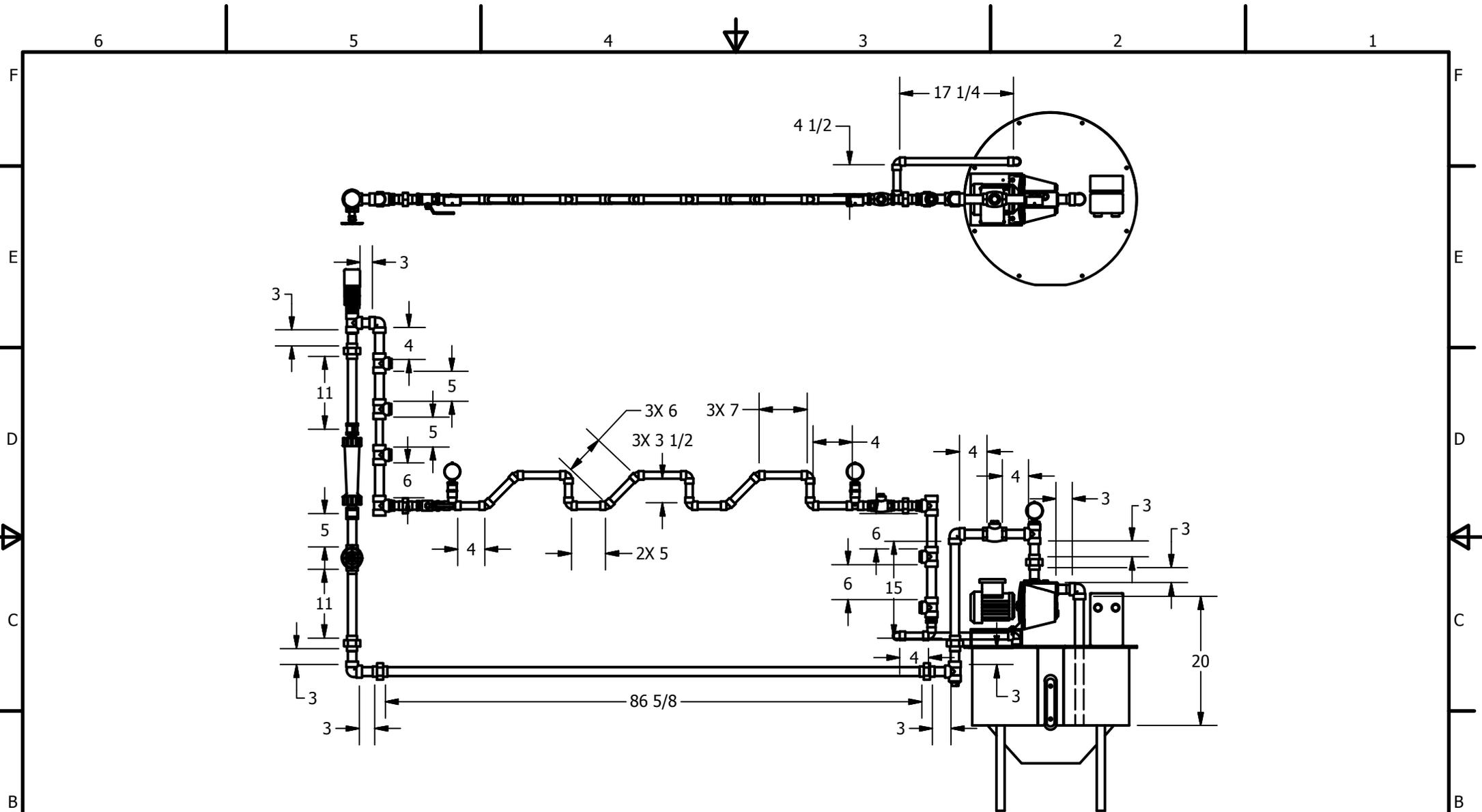
ESPECIFICACION
 TRAMO RECTO HG 3/4" C40

NUMERO DE DIBUJO
 BP-PC1

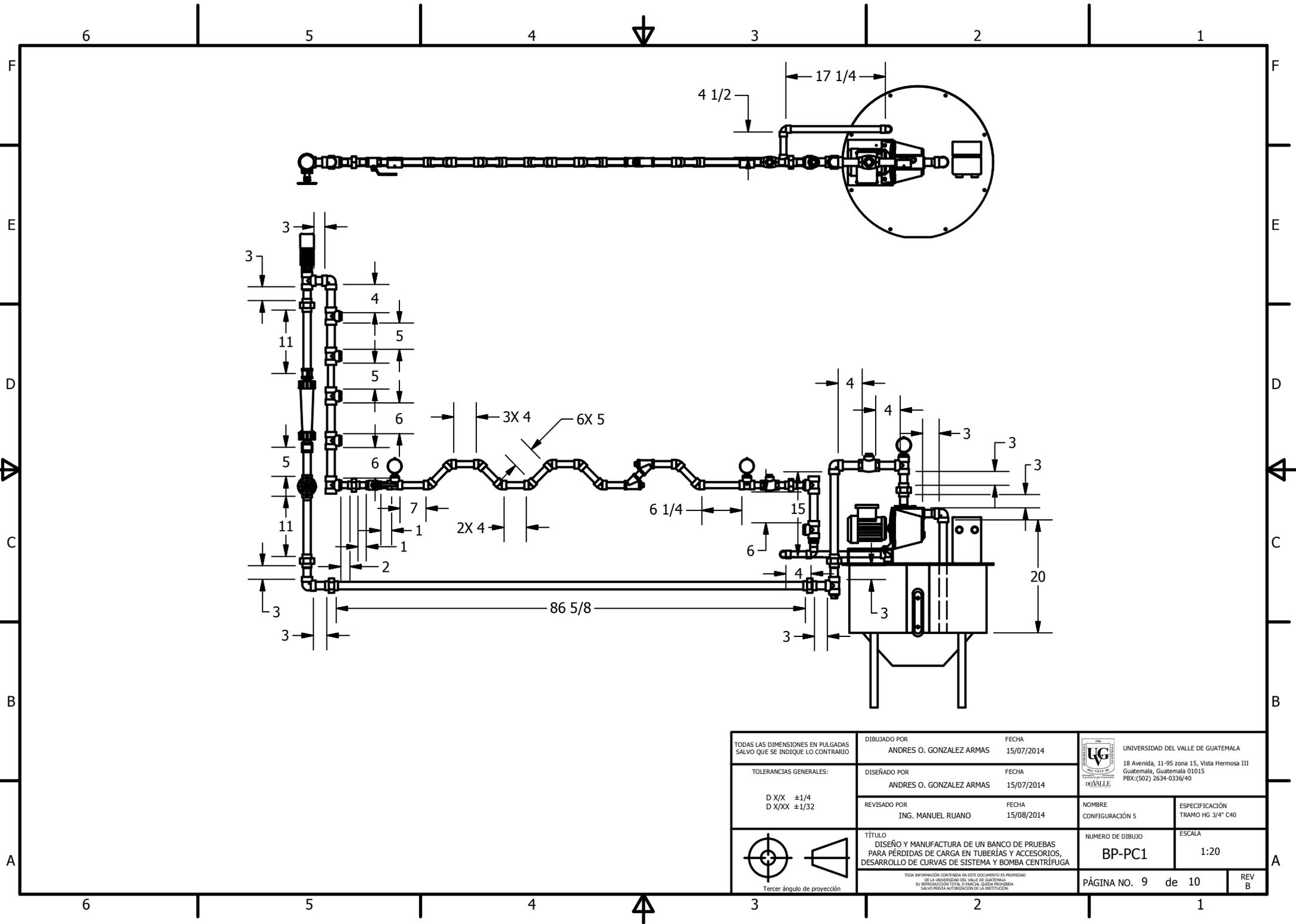
ESCALA
 1:20

PÁGINA NO. 6 de 10

REV
 B



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
 Tercer ángulo de proyección	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE CONFIGURACIÓN 4	ESPECIFICACIÓN TRAMO PVC 3/4" C40
	TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	
<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PRIMA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>			PÁGINA NO. 8 de 10	REV B



TODAS LAS DIMENSIONES EN PULGADAS SALVO QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO	DIBUJADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS	FECHA 15/07/2014	 UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA 18 Avenida, 11-95 zona 15, Vista Hermosa III Guatemala, Guatemala 01015 PBX: (502) 2634-0336/40	
	TOLERANCIAS GENERALES: D X/X ±1/4 D X/XX ±1/32	DISEÑADO POR ANDRES O. GONZALEZ ARMAS		
 Tercer ángulo de proyección	REVISADO POR ING. MANUEL RUANO	FECHA 15/08/2014	NOMBRE CONFIGURACIÓN 5	ESPECIFICACIÓN TRAMO HG 3/4" C40
	TÍTULO DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS, DESARROLLO DE CURVAS DE SISTEMA Y BOMBA CENTRÍFUGA		NUMERO DE DIBUJO BP-PC1	ESCALA 1:20
<small>TODA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA. SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL QUEDA PROHIBIDA SALVO PRIMA AUTORIZACIÓN DE LA INSTITUCIÓN.</small>			PÁGINA NO. 9 de 10	REV B

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Manual de procedimiento para práctica de laboratorio:
Pérdidas de carga en tuberías y accesorios, desarrollo de
curvas de sistema y bomba centrífuga

por
Andrés Orlando González Armas

Guatemala

2014

Manual de Procedimiento para práctica de laboratorio

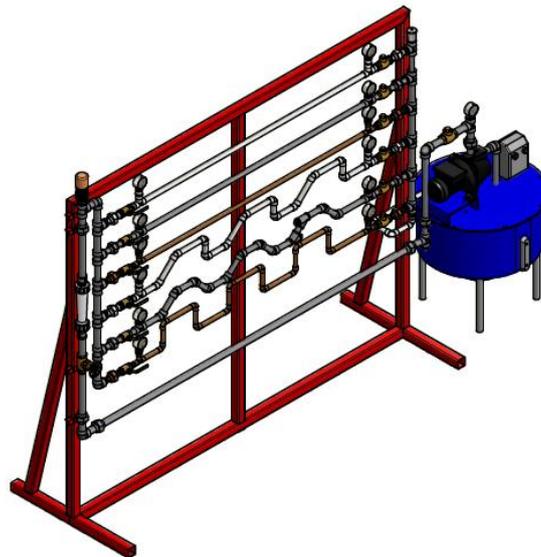
Pérdidas de carga en tubería y accesorios y desarrollo de curvas de sistema y bomba centrífuga.

Objetivos

- Determinar experimentalmente la pérdida de energía de un fluido que pasa a través de tuberías de diferentes materiales y comparar con cálculos realizados.
- Graficar curvas características de bomba centrífuga y sistema según configuración asignada.

Instalación del banco de pruebas:

Figura No. 1: Banco de pruebas para pérdidas de carga en tuberías y accesorios



Introducción teórica:

El flujo de un líquido en una tubería viene acompañado de una pérdida dada en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante (dimensiones de longitud) denominada habitualmente pérdida de carga. En el caso de tuberías horizontales, la pérdida de carga se manifiesta como una disminución de presión en el sentido del flujo.

La pérdida de carga está relacionada con variables fluido-dinámicas según sea el tipo de flujo turbulento. Además de las pérdidas de carga lineales (a lo largo de la tubería), también se producen pérdidas de carga singulares en puntos como codos, válvulas, tes, yes, etc.

Para solucionar problemas prácticos de flujos en tuberías, se aplica el principio de la energía, la ecuación de continuidad y los principios y ecuaciones de la resistencia de fluidos en tuberías cerradas.

La ecuación de energía o de Bernoulli para el movimiento de fluidos incompresibles en tubería cerrada:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_B - h_L = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2$$

Ecuación No. 1: Ecuación de energía de flujo estacionario

Donde:

$\frac{P_1}{\rho g}$: *Altura debida a Presión, (pies)*

$\frac{V_1^2}{2g}$: *Altura debida a Velocidad, (pies)*

z_1 : *Altura geométrica (pies)*

h_B : *Energía añadida al fluido por la bomba (pies)*

h_L : *Pérdidas de energía del fluido por efecto de rugosidad a lo largo de las tuberías (pies) o por presencia de accesorios, (pies)*

La resistencia al flujo y pérdida de energía se da tanto en tuberías como en accesorios como, codos, tes, yes, válvulas, que disipan energía al producir turbulencias a escala relativamente grandes. Estas pérdidas son muy comunes en la industria y su análisis es de gran importancia para llevar fluido de un lugar con requisitos mínimos de caudal y presión para diversos sistemas.

Un interés considerable en el análisis de flujo de tubería es el que causa la caída de carga, porque está directamente relacionada con la potencia necesaria para que la bomba mantenga el flujo. Esto se debe a rugosidad de tubería, longitud de tubería y accesorios que estén instalados alrededor de la red de tubería.

Pérdidas mayores o primarias

La mayor parte de la energía perdida por un sistema se asocia a la fricción en las porciones rectas de la tubería y se denomina pérdidas mayores, también conocida como pérdidas primarias.

Las pérdidas de carga ocasionada por la fricción de la tubería recta esta denominada por la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \frac{L V^2}{D_i 2g}$$

Ecuación No. 2: Pérdida de carga por fricción en tubería

Donde:

f: factor de fricción del material de la tubería

L: Longitud de tubería (pies)

D_i: Diámetro interno de la tubería (pulgada)

V: velocidad del fluido (pies/s)

g: gravedad (pies/s²)

La Ecuación No. 2 es la ecuación general de la pérdida de presión conocida también como la ecuación de Darcy.

Pérdidas menores o secundarias

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varios accesorios o distribuidores de flujo, el cual llevan el fluido de un lugar a otro. Dichos componentes interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que produce, también conocida como pérdidas secundarias.

Un método común para determinar las pérdidas de carga a través de un accesorio, es por medio del coeficiente de pérdida o resistencia, *K_L*.

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación No. 3: Pérdida de carga por accesorio

Donde:

K_L: coeficiente de resistencia según accesorio

V: velocidad del fluido (pies/s)

g: gravedad (pies/s²)

Tabla No. 1: Factor de fricción f_t

Tamaño nominal, pulgadas	Factor de fricción, f_t	Tamaño nominal, pulgadas	Factor de fricción, f_t
$\frac{1}{2}$	0.027	4	0.017
$\frac{3}{4}$	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
$1\frac{1}{4}$	0.022	8-10	0.014
$1\frac{1}{2}$	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012
$2\frac{1}{4}, 3$	0.018		

(McQuinston, Parker, & Spittler, 2010)

Las pérdidas totales de energía h_L es dada por:

$$h_L = \sum \text{pérdidas por fricción en tuberías} + \sum \text{pérdidas por accesorios}$$

Ecuación No. 4: Pérdidas de carga totales

Reconocimiento del equipo:

El banco de pruebas para pérdidas de carga en tubería y accesorios consiste en un sistema de ciclo cerrado cuyo fluido es impulsado por una bomba centrífuga marca AQUAPRO-JET60 SP de 0.5HP, con un caudal máximo de 42 Lts/min (11.25 GPM), 8 Bar, 128 pies, 3450 RPM; dicha bomba es impulsada por un motor eléctrico monofásico 120V/60Hz marca Siemens directamente acoplado a la bomba. Esta bomba se encarga de hacer circular agua desde y hacia el fluido en un circuito cerrado. Un manómetro ubicado en la bomba muestra la presión de operación de la bomba.

Se encuentran 6 ramales de tubería de diferentes materiales, acero galvanizado, cobre y PVC. Los tres primeros ramales son los principales en los cuales serán la referencia para sus mediciones. Cada uno de estos ramales cuenta con accesorios dos manómetros, uno al inicio y otro al final para lectura de mediciones.

El banco de pruebas cuenta con un depósito, la instalación funciona en circuito cerrado, de manera que la bomba aspira agua del depósito y tras hacer el recorrido por las tuberías vuelve al mismo.

Posterior a la bomba se encuentra una válvula de globo, principal válvula para el control del caudal en los ramales. La lectura del caudal la proporciona un rotámetro.

El rotámetro es marca Dwyer serie LFME-13-F2 con capacidad de medición de 20 GPM, este es un rotámetro de eje vertical. En él, un contrapeso cilíndrico puede ascender por una guía vertical, debida a la fuerza de arrastre de la corriente, hasta una altura que es proporcional al caudal circulante gracias a la forma troncocónica del conducto interno del rotámetro. Una escala graduada permite leer directamente el valor del caudal.

En cada ramal se encuentra una válvula de bola para apertura o cierre del flujo. Adicionalmente se encuentran manómetros; la pérdida de carga entre dos puntos de la instalación se mide con un manómetro al inicio y otro al final del ramal de tubería.

Características generales:

1. Configuración de tubería 1:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo recto de tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada Cédula 40.
- b. Una válvula de bola de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado y adaptadores tipo macho de PVC.

2. Configuración de tubería 2:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo recto de tubería de acero galvanizado de $\frac{3}{4}$ de pulgada Cédula 40.
- b. Una válvula de bola de bronce de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado.

3. Configuración de tubería 3:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo recto de tubería de cobre rígido tipo M de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- b. Una válvula de bola de bronce de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado y adaptadores tipo macho de cobre.

4. Configuración de tubería 4:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo de tubería de PVC con accesorios, incluyendo 6 codos de PVC a 45° y 6 codos de PVC a 90° .
- b. Una válvula de bola de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado y adaptadores tipo macho de PVC.

5. Configuración de tubería 5:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo de tubería de acero galvanizado con accesorios, incluyendo 10 codos de acero galvanizado de 45° y 2 yes de acero galvanizado de 45° .
- b. Una válvula de bola de bronce de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado.

6. Configuración de tubería 6:

Esta configuración consta de:

- a. Tramo de tubería de cobre rígido tipo M con accesorios, incluyendo 12 codos de cobre de 90° .
- b. Una válvula de bola de bronce de $\frac{3}{4}$ de pulgada.
- c. Transición de entrada y salida con reductores tipo buje de acero galvanizado y adaptadores tipo macho de cobre.

Procedimiento:

1. Debe revisar el tubo de succión que se encuentra en el interior del depósito de agua y observar si no hay ningún sólido, paño o cualquier cuerpo extraño que pueda impedir la succión de agua, si es el caso; retírelo.
2. Observe que el depósito de agua esté lo suficientemente lleno, el nivel de agua debe llegar entre cinco a diez centímetros por debajo de la tapa del depósito.
3. Todas las válvulas de bola y válvula de globo deben estar ABIERTAS.
4. Asegúrese que la bomba esté cebada y desde el panel de control presione una sola vez el botón VERDE para arrancar la bomba.
5. Espere uno a dos minutos hasta que todas las tuberías estén llenas del fluido y que este se estabilice para tomar mediciones.
6. Proceda a abrir o cerrar la válvula de globo hasta conseguir el caudal deseado (tome la lectura en el rotámetro).
7. Según asignación de configuración del ramal de tubería, proceda a cerrar lentamente las válvulas de bola de los ramales que no se tomarán mediciones, el cierre debe ser lento para evitar golpe de ariete. Únicamente deje abiertas las válvulas de los ramales en los que tomará mediciones de presión.
8. Desde el panel de control presione una sola vez el botón ROJO para apagar la bomba.
9. Redacte un informe con la información respectiva.
10. Repita el procedimiento para diferentes configuraciones.

Datos importantes a considerar:

Pérdida de carga en el rotámetro: 34.93 pies.

Pérdida de presión en el flotador del rotámetro 0.70 PSI.

Coefficiente de fricción f_t en acoples y uniones: 1

Coefficiente de fricción en válvula de bola totalmente abierta: 150.

Coefficiente de fricción en válvula de retención de disco oscilante: 50.

Datos importantes a examinar:

1. Temperatura del agua al inicio de la práctica
2. Longitudes aproximadas de todas las tuberías.
3. Cambios de sección en transiciones de tubería (reductores tipo buje).
4. Diámetros nominales de tuberías y accesorios.
5. Lectura de caudal en rotámetro
6. Lectura de presión en manómetro continuo a la bomba centrífuga
7. Lectura de presión en manómetros según la configuración asignada

En la tabla siguiente puede hacer las anotaciones respectivas de las lecturas de las presiones de los manómetros instalados según la configuración asignada.

Tabla No. 1: Lectura de presión en manómetros

Caudal	Tramo entrada	Configuración de tubería No. ____		
GPM	Manómetro bomba (PSI)	Manómetro 1 P ₁ (PSI)	Manómetro 2 P ₂ (PSI)	Diferencia de presión (PSI)
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				

Tabla No. 2: Medición de longitudes de tuberías

Longitud total tubería de acero galvanizado de 1 pulgada en la entrada
Longitud total tubería según configuración asignada (tramos centrales)
Longitud total tubería acero galvanizado de 1 pulgada en la salida
Longitud total tubería de PVC de 1 pulgada en la salida

Informe:

El informe debe incluir los siguientes puntos:

1. Hoja de presentación
2. Análisis de datos
3. Ecuaciones utilizadas en los cálculos de pérdidas de carga.
4. Curvas de sistema y curvas de operación de bomba centrífuga teórico y experimental obtenidas según configuración asignada,
5. Análisis de error y posibles fuentes de error.
6. Discusión
7. Conclusiones
8. Bibliografía

Precauciones:

1. Si se enciende la bomba, y esta no trabaja, quiere decir que:
 - a. La bomba no se encuentra cebada, haga el procedimiento adecuado para cebarla.
El cebado consiste en sacar el aire que se encuentra en el interior de la bomba y debe ser llenada en su totalidad.
Esto se realiza sacando el tapón de bronce que se encuentra en la parte superior de la carcasa de la bomba y con un embudo debe llenarse de agua. Debe roscarse lo más rápido posible para evitar que entre aire al sistema y ocasionar cavitación en el impeler de la bomba por la acumulación de aire.
 - b. La conexión eléctrica no es la adecuada.
 - c. Se encuentran funcionando equipos que restan potencia a la conexión eléctrica de la bomba.
 - d. No hay suficiente agua en el depósito y la bomba se encuentra funcionando en seco, (succión de aire), esto podría ocasionar fallas en la bomba.
 - e. Empaques dañados, proceda al cambio.
2. Mantenga cerrado el depósito de agua para evitar que partículas ajenas ingresen, éstas podrían ocasionar bloqueos, cavitación y fisuras en el impeler de la bomba.
3. Aleje la conexión eléctrica de cualquier acumulación o fuga de agua para evitar corto circuito. Esto podría ocasionar averías en la bomba y accidente.
4. Evitar cualquier distracción al usuario para evitar accidentes.
5. Verifique que el sistema esté apagado y desconectado cuando termine la práctica.