

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO HIDRÁULICO PARA
SISTEMAS DE TUBERÍAS EN SERIE, EN PARALELO Y REDES
CERRADAS”

NOMBRE

DIEGO FERNANDO SAMANIEGO BALSECA

DIRECTOR: ING. ROBERTO UNDA

QUITO, 2020

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Fernando y Fanny, quienes con su amor y comprensión siempre me han apoyado en las decisiones que he tomado tanto en lo personal como en lo estudiantil, guiándome y aconsejándome para seguir un sendero recto y ensañándome a la importancia de no rendirme para alcanzar mis metas.

A mis familiares, quienes son parte de mi vida, me han dado soporte y fortaleza en todo momento de mis estudios.

A mis amigos, con quienes he compartido mi vida estudiantil con experiencias llenas de éxitos y fracasos, además su apoyo ha sido importante para lograr culminar una etapa importante en mi vida.

Agradezco al director de tesis Ing. Roberto Unda, quien ha ayudado a culminar este trabajo de la mejor manera gracias a sus instrucciones y predisposición; también a los correctores Ing. Guillermo Flores e Ing. Servando Espín, quienes mediante sus comentarios e indicaciones oportunas hicieron posible la finalización de esta tesis.

Además, un agradecimiento especial a quienes de manera directa hizo posible la construcción de este equipo y su funcionamiento.

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

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres y familia, quienes se han preocupado de mí y me han aconsejado para seguir adelante, salir triunfante ante las adversidades que se presenten en mi camino por la vida.

Años han pasado y su sabiduría no cesa, y ahora aquí comparto un logro alcanzado con éxito, mi proyecto de tesis.

Diego Samaniego

ÍNDICE

1. CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General:	2
1.3.2 Objetivos Específicos:	2
2. CAPÍTULO: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	3
2.1 Fluido.....	3
2.1.1 Propiedades Físicas de los Fluidos	3
2.1.1.1 Densidad	3
2.1.1.2 Peso Específico	4
2.1.1.3 Viscosidad Dinámica	5
2.1.1.4 Viscosidad Cinemática	6
2.1.1.5 Tensión Superficial	6
2.1.1.6 Presión	7
2.1.1.7 Compresibilidad	9
2.1.2 Número de Reynolds.....	10
2.2 PRINCIPIOS DE ENERGÍA Y CONTINUIDAD	12
2.2.1 Ecuación general de la energía	12
2.2.2 Continuidad del flujo en tuberías	13
2.3 PÉRDIDAS.....	14
2.3.1 Pérdidas menores en accesorios	14
2.3.1.1 Coeficientes de pérdida de varios accesorios de tubería para flujo turbulento:	15
2.3.2 Pérdidas por fricción	23
2.3.2.1 Ecuación de Darcy	23
2.3.2.2 Otras Ecuaciones para el factor de fricción	24
2.3.2.2.1 Fórmula de Hazen – Williams:	24
2.3.2.2.2 Ecuación de Manning	25
2.3.2.2.3 Ecuaciones para el factor de fricción en Flujo Turbulento:	26
2.3.2.2.4 Análisis de Sistemas de Tuberías	27
2.4 Tuberías en Serie:.....	27
2.4.1 Conservación de la energía:	28
2.4.2 Conservación de la masa (continuidad):	29

2.5 Tuberías en Paralelo:	30
2.5.1 Conservación de la Energía:	31
2.5.2 Conservación de la masa (continuidad)	31
2.6 Redes Cerradas.....	32
3. CAPÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO	34
3.1 Diseño del Modelo Hidráulico	34
3.2 Construcción del modelo.....	38
3.2.1 Sistema en Malla:	38
3.2.2 Sistema en Serie:	41
3.2.3 Sistema en Paralelo:	44
3.3 Calibración y pruebas del modelo	46
3.4 Verificación del Modelo Hidráulico	46
3.5 Manual de Mantenimiento y Operación del Modelo Hidráulico	51
OPERACIÓN:	51
1.2 CIRCUITO #1 (SISTEMA EN MALLA):	51
1.2.1 Partes:	51
1.2.2 Materiales:	53
1.2.3 Procedimiento:	54
1.3 CIRCUITO #2 (SISTEMA EN SERIE):	55
1.3.1 Partes del Sistema:	55
1.3.2 Materiales:	57
1.3.3 Procedimiento:	58
1.4 CIRCUITO #3 (SISTEMA EN PARALELO):	59
1.4.1 Partes del Sistema:	59
1.4.2 Materiales:	62
1.4.3 Procedimiento:	62
MANTENIMIENTO:	63
4. CAPÍTULO: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	63
4.1 Presentación de resultados obtenidos con el modelo.....	63
4.1.1 Sistema en Malla (Caso: Abierto todas las válvulas)	63
4.1.2 Sistema en Malla (Caso: Cerrado las válvulas internas)	66
4.1.3 Sistema en Serie (Caso: Medición con piezómetros)	68
4.1.4 Sistema en Paralelo (Medición con Piezómetros)	71

4.2 Cálculos hidráulicos	73
4.2.1 Simulación de malla cerrada (caso: válvulas internas cerradas) en EPANET.....	73
4.3 Discusión de resultados.....	75
5. CAPÍTULO: PRÁCTICAS DE LABORATORIO	76
5.1 Selección de las prácticas:	76
5.1.1 Ensayo de presión en un sistema en malla abierta	76
5.1.2 Ensayo de presión en un sistema en malla cerrada	76
5.1.3 Ensayo de presión en un sistema en serie	76
5.1.4 Ensayo de presión en un sistema en paralelo	76
5.2 Diseño de la guía de Laboratorio:.....	76
1. PRINCIPALES ASPECTOS Y NORMAS PARA LOS USUARIOS DEL LABORATORIO	78
1.1 Aspectos generales de la seguridad en el laboratorio	78
1.1.1 Prácticas en el Laboratorio	78
1.1.2 Consideraciones principales de la vestimenta personal.....	78
1.2 Reglas para el comportamiento interno en el laboratorio	80
1.3 Formato para la elaboración de informes de las prácticas.....	80
2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA/SANITARIA.....	81
5.3 Validación de las Prácticas de Laboratorio	100
5.3.1 Ensayo de presión en un sistema de malla (abiertas las válvulas internas)	100
5.3.2 Ensayo de presión en un sistema de malla (cerrada las válvulas internas).....	102
5.3.3 Ensayo de presión en un sistema en serie	104
5.3.4 Ensayo de presión en un sistema en paralelo	106
6. CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	108
6.1 Conclusiones:	108
6.2 Recomendaciones:	109
BIBLIOGRAFÍA:	110
GLOSARIO:	111
ANEXOS:	111
I. TABLAS PARA EL LABORATORIO:	111
II. TABLAS DE LECTURAS EN PIEZÓMETROS:.....	113
a. Sistema en Malla (Abierta las válvulas internas).....	113
b. Sistema en Malla (Cerrada las válvulas internas)	120
c. Sistema en Serie	125
d. Sistema en Paralelo	128

II. TABLAS DE RESULTADOS	130
<i>a. Sistema en Malla (Abierta las válvulas internas)</i>	130
<i>b. Sistema en Malla (Cerrada las válvulas internas)</i>	136
<i>c. Sistema en Serie</i>	139
<i>d. Sistema en Paralelo</i>	140
III. PORCENTAJES DE ERROR ENTRE MANÓMETRO Y EPANET.....	140
<i>a. Sistema en Malla</i>	140
<i>b. Sistema en Serie</i>	141
<i>c. Sistema en Paralelo</i>	142
IV. DATOS DEL FABRICANTE DE LA BOMBA DE 1/2 HP	142

ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: Presión que actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido	8
Ilustración 2: Dirección de la presión del fluido sobre las fronteras ¡Error! Marcador no definido.	
Ilustración 3: Tubería circular.....	11
Ilustración 4: Sistema de referencia para la energía.....	13
Ilustración 5: Coeficiente de pérdida $K=0.8$	16
Ilustración 6: Coeficiente de pérdida $K=0.5$	16
Ilustración 7: Coeficiente de pérdida $K=0.03$ y $K=0.12$	17
Ilustración 8: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$	17
Ilustración 9: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$, borde agudo.	18
Ilustración 10: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$, redondeada.....	18
Ilustración 11: Coeficiente de pérdida $K=0.3$ y $K=0.9$	19
Ilustración 12: Coeficiente de pérdida $K=1.1$	19
Ilustración 13: Coeficiente de pérdida $K=0.2$	20
Ilustración 14: Coeficiente de pérdida $K=0.4$	20
Ilustración 15: Coeficiente de pérdida $K=0.2$ y $K=1.5$	21
Ilustración 16: Coeficiente de pérdida $K=1$ y $K=2$	21
Ilustración 17: Coeficiente de pérdida $K=0.2$ y $K=0.9$	22
Ilustración 18: Coeficiente de pérdida $K=0.08$	22
Ilustración 19: Sistema de tuberías en serie.....	28
Ilustración 20: Sistema de tuberías en paralelo.....	30
Ilustración 21: Sistema de red cerrada.....	32
Ilustración 22: Sistema en Malla	38
Ilustración 23: Dimensiones del Sistema en Malla	39
Ilustración 24: Sistema en Serie	41
Ilustración 25: Dimensiones del Sistema en Serie.....	42
Ilustración 26: Sistema en Paralelo	44
Ilustración 27: Dimensiones del Sistema en Paralelo	45
Ilustración 28: Esquema de partes del Sistema en Malla	51

Ilustración 29: Elementos del Sistema en Malla.....	52
Ilustración 30: Elementos del Sistema en Malla.....	53
Ilustración 31: Esquema del Sistema en Serie.....	55
Ilustración 32: Elementos del Sistema en Serie.....	56
Ilustración 33: Diseño de la Simulación Malla Cerrada en EPANET	74
Ilustración 34 : Resultados de las presiones analizadas en cada nudo	74

TABLAS

Tabla 1: Densidad de algunos fluidos	4
Tabla 2: Viscosidad Dinámica y Cinemática	6
Tabla 3: Valores de Tensión Superficial y k de líquidos a la temperatura de 20° C en contacto con el aire	7
Tabla 4: Coeficientes de Hazen-Williams	25
Tabla 5: Lecturas del nudo #1 y nudo #2 (Sistema en Malla-Caso: Abierto)	64
Tabla 6: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-2).....	64
Tabla 7: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-3).....	64
Tabla 8: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-4).....	65
Tabla 9: Lecturas del nudo #1 y nudo #6 (Sistema en Malla-Caso: Cerrado).....	66
Tabla 10: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-6).....	67
Tabla 11: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-11).....	67
Tabla 12: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-21).....	67
Tabla 13: Lecturas de los nudos #1 y #2 (Sistema en Serie).....	69
Tabla 14: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-2).....	69
Tabla 15: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-3).....	70
Tabla 16: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-4).....	70
Tabla 17: Lecturas de los nudos #1 y #2 (Sistema en Paralelo).....	71
Tabla 18: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-2).....	72
Tabla 19: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-3).....	72
Tabla 20: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-4).....	72

1. CAPÍTULO: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En los sistemas de riego es frecuente la utilización de redes abiertas, debido a que su operación es de corta duración, por lo tanto, no existe demanda de una red cerrada para el uso continuo del agua. Si se presentan problemas en un tramo en la red, se puede solucionar rápidamente cuando no se encuentre en operación.

En cuanto a las presiones, se las debe uniformizar para el área que va a dotar de agua, por lo que las redes principales serán diseñadas de tal forma que se generen circuitos. Con el tiempo la implementación de la tecnología ha permitido regular las presiones y el caudal de riego en el sector agrícola.

El sistema de red de agua potable está compuesto por dos partes: la primera, es una red encargada de la conducción del agua desde la planta de tratamiento hasta los distintos tanques de almacenamiento, que se ubiquen aguas arriba de los sectores que van a ser abastecidos posteriormente; y, la segunda, compuesta por las redes de distribución consideradas como secundarias, las que sirven para la distribución del agua hasta el usuario final (Saldarriaga J. , 2016).

1.2 Justificación

Las redes cerradas constituyen una parte importante en el estudio de la asignatura Hidráulica General. La distribución de agua potable se la realiza mediante una serie de mallas de tuberías, las cuales distribuyen el agua hacia todos los sectores de la zona del proyecto. Los sistemas de riego y de agua potable incluyen también sistemas de tuberías en serie y en paralelo.

En la disertación se construirá un sistema de red para el laboratorio, que permitirá a los estudiantes visualizar el comportamiento de una red mallada y las conexiones de tuberías en serie y paralelo, para de esta manera complementar la formación teórica recibida por los estudiantes de la facultad.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

- ❖ Construir mediante diseño un modelo hidráulico de sistemas de tuberías en serie, en paralelo y redes cerradas, para la comprobación práctica de los aspectos teóricos.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- ❖ Caracterizar las bases teóricas de modelos hidráulicos.
- ❖ Resumir los fundamentos hidráulicos de los sistemas de tuberías.
- ❖ Diseñar, construir y calibrar el modelo de laboratorio.
- ❖ Analizar los resultados obtenidos en el modelo de laboratorio y compararlos con los resultados teóricos con el software EPANET.
- ❖ Elaborar una guía de práctica de laboratorio.

1.4 Alcance

La disertación contempla el diseño y construcción del modelo de laboratorio y los ensayos sobre tuberías de PVC en serie, en paralelo y sistema de red cerrada. El funcionamiento del modelo de laboratorio se verificará con uso del software EPANET.

2. *CAPÍTULO: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA*

2.1 **Fluido**

Desde un punto de vista del comportamiento mecánico, un fluido es una sustancia que no puede resistir el esfuerzo cortante. Si este se presenta, el fluido se deforma y continuará deformándose hasta que el esfuerzo exista. En el proceso de deformación continua las distintas partes del fluido cambian de posición relativa en forma permanente; este proceso de deformación continua se la conoce como flujo. En términos sencillos el flujo es el movimiento de un fluido con respecto a un sistema inercial de coordenadas, que generalmente se halla ubicado en un contorno sólido. (Saldarriaga, 1998, pág. 1)

2.1.1 *Propiedades Físicas de los Fluidos*

2.1.1.1 *Densidad*

Es la masa de una sustancia contenida en la unidad de volumen. La densidad de un fluido se puede determinar por medio de densímetros, pero es común la utilización de las medidas de temperatura y presión para establecer la magnitud. Cuando aumenta la temperatura, la densidad disminuye en los líquidos mientras que en los gases aumenta y en el caso de aumento de presión, sucede lo mismo que con la temperatura, pero la variación es en menor grado (Duarte Agudelo, Densidad, 2008, págs. 3-4).

$$\rho = M/V \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

M: masa de la sustancia, [Kg]

V: volumen de la sustancia, [m^3 , cm^3]

ρ : densidad, [Kg/m^3 , Kg/cm^3]

<i>FLUIDO</i>	<i>TEMPERATURA °C</i>	<i>DENSIDAD Kg/m³</i>
<i>Agua</i>	0	999.87
	4	1000.00
	10	999.73
	15	999.15
	20	998.25
	25	997.12
<i>Agua de mar</i>	20	1002.00 - 1030.00
<i>Gasolina Extra</i>	20	760.00
<i>Keroseno</i>	20	792.00 - 860.00
<i>Petróleo</i>	20	760.00 - 900.00
<i>Alcohol Etilico</i>	20	790.00
<i>Mercurio</i>	20	13550.00
<i>Aire</i>	20	1.185

Tabla 1: Densidad de algunos fluidos

(Sandoval, 1993, pág. 8)

2.1.1.2 *Peso Específico*

Es el peso de una sustancia por unidad de volumen de una sustancia. Mott usa el término “Gravedad Específica”, cuando el fluido es agua pura y se encuentra en la condición de 4 °C, ya que a dicha temperatura del agua tiene su mayor densidad (Mott & Untener, 2015, pág. 11).

La gravedad específica se puede definir de dos maneras distintas:

- a.** La gravedad específica es la relación de la densidad de una sustancia sobre la densidad del agua a 4 °C (Mott & Untener, 2015, pág. 11).
- b.** La gravedad específica es la relación del peso específico de una sustancia sobre el peso específico del agua a 4 °C (Mott & Untener, 2015, pág. 11).

$$\gamma = G/V \quad \text{Ec. 2}$$

$$sg = \gamma_s / \gamma_w = \rho_s / \rho_w \quad \text{Ec.3}$$

Donde:

Donde:

γ : peso específico, [N/m³]

sg = gravedad específica

G : masa del fluido, [Kg]

γ_s = peso específico – sustancia

V : volumen del fluido, [m^3]

γ_w = peso específico – agua a 4 °C

ρ_s = densidad – sustancia

ρ_w = densidad – agua a 4 °C

- La relación entre la densidad y el peso específico es:

$$\rho = \gamma/g \text{ Ec.4}$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad, en la mayoría de los casos se la considera constante e igual a: $9,8 \text{ m/m}^2$

2.1.1.3 Viscosidad Dinámica

Propiedad de los fluidos de oponerse al desplazamiento o deslizamiento de sus partículas o capas; propiedad inversa a la fluidez. Debido a la viscosidad, el fluido se ve frenado al contacto de una pared sólida (la viscosidad de un sólido con respecto a la de un fluido se la considera infinita), por ende, la velocidad disminuye debido a la aparición de esfuerzos de corte en el fluido, que según Newton en el flujo laminar son proporcionales al gradiente de velocidad en la sección analizada, es decir: (Sandoval, 1993, pág. 9).

$$\tau = \mu * du/dn \text{ Ec.5}$$

Donde:

τ : esfuerzo de corte, [N/m^2], [Kg/m^2]

μ : coeficiente de proporcionalidad llamado viscosidad dinámica, [$Pa * s$], [$\frac{Kg * s}{m^2}$]

du/dn : gradiente de velocidad normal al sentido del flujo

“Si los fluidos satisfacen la Ec.1, se consideran fluidos newtonianos, como por ejemplo el agua y el aire se los considera así” (Sandoval, 1993, pág. 9).

2.1.1.4 Viscosidad Cinemática

“Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido” (Sandoval, 1993, pág. 10).

$$v = \mu / \rho \quad \text{Ec.6}$$

Donde:

v : Viscosidad cinemática, [m^2/s]

<i>FLUIDO</i>	T °C	μ *(10 ⁻³) Pa*s	v *(10 ⁻⁶) m²/s
<i>Agua</i>	4	1.564	1.564
	15	1.139	1.14
	20	1.008	1.01
<i>Gasolina</i>	20	1.22 a 1.26	0.83 a 0.93
<i>Keroseno</i>	20	2.52 a 3.49	2.0 a 3.0
<i>Petróleo</i>	20	32.9 a 155.6	25 a 140
<i>Alcohol</i> <i>Etílico</i>	20	1.91	1.51
<i>Mercurio</i>	20	0.008	0.11
<i>Aire</i>	20	13250	15.7

Tabla 2: Viscosidad Dinámica y Cinemática

Sandoval 1993, pág.10

2.1.1.5 Tensión Superficial

“Los fluidos en volúmenes pequeños tienden a tomar una forma esférica y a estos se los denomina gotas, su formación es obra de las fuerzas de tensión superficial que tienden a comunicar a los líquidos en dicha forma esférica” (Sandoval, 1993, pág. 11).

“La tensión superficial es perceptible en volúmenes pequeños o los que tienen contacto con superficies sólidas u otros líquidos. Esta fuerza tiene su origen en la cohesión intermolecular y la adhesión de los líquidos a los sólidos”. (Sandoval, 1993, pág. 11)

Producto de la tensión superficial es el descenso de los niveles normales de los líquidos en los tubos de pequeño diámetro, a este fenómeno se lo denomina capilaridad. En los líquidos que ascienden de su nivel normal es más representativa la adhesión molecular y en los que desciende la cohesión intermolecular (Sandoval, 1993, pág. 11).

La altura máxima de ascenso o descenso de los líquidos para tubos de cristal se determina con las siguientes fórmulas:

$$h = 4 * \sigma / \gamma * d \quad \text{Ec.7}$$

$$h = k/d \quad \text{Ec.8}$$

Donde:

σ : es el valor de la tensión superficial, para cada uno de los líquidos.

d : diámetro interior del tubo.

k : coeficiente empírico.

LÍQUIDOS	σ N/m	k mm ²
Agua	0.073	29.82
Gasolina Extra	0.02	10.58
Keroseno	0.023 a 0.032	
Petróleo	0.024 a 0.039	12.9 a 17.7
Alcohol	0.0225	11.62
Mercurio	-0.49	-14.76

Tabla 3: Valores de Tensión Superficial y k de líquidos a la temperatura de 20° C en contacto con el aire

(Sandoval, 1993, pág. 11)

2.1.1.6 Presión

“Se define como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de una sustancia, o sobre una superficie”: (Mott & Untener, 2015, pág. 9).

$$P = F/A \quad \text{Ec.9}$$

Donde:

P : presión, [N/m², Kgf/m²]

F : fuerza, [N, Kgf]

A : área, [m², cm²]

- “La presión actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un volumen pequeño de fluido” (Mott & Untener, 2015, pág. 9).
- “En un fluido confinado por fronteras sólidas, la presión actúa en forma perpendicular a la frontera” (Mott & Untener, 2015, pág. 9).

Ilustración 1: Presión que actúa sobre un volumen pequeño de fluido de modo uniforme y en todas las direcciones.

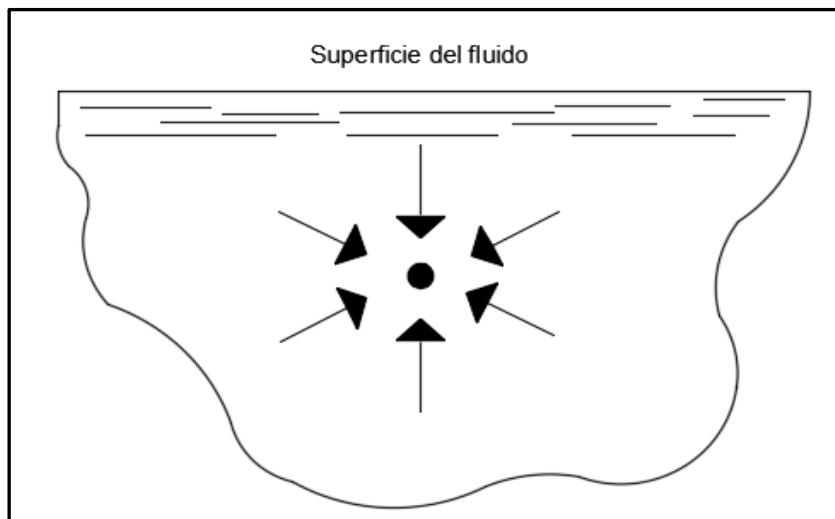


Ilustración 1: Presión que actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

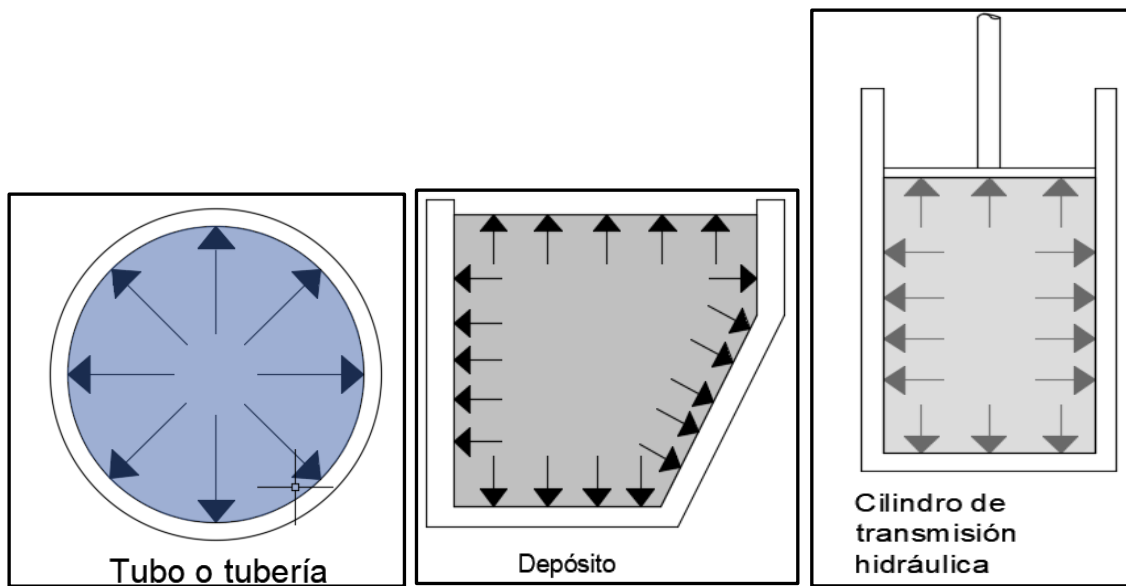


Ilustración 2: Dirección de la presión del fluido sobre las fronteras

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

2.1.1.7 Compresibilidad

La compresibilidad se refiere al cambio en el volumen de una sustancia sometida a un cambio en la presión que se ejerce sobre ella. La cantidad habitual utilizada para medir este fenómeno es el módulo de elasticidad volumétrica o, simplemente, el módulo volumétrico, E (Mott & Untener, 2015, pág. 10).

$$d_p = \frac{-K \cdot d_v}{V} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

d_p = esfuerzo unitario por compresión, [Pa]

d_v = incremento del volumen, [m³]

V = volumen inicial, [m³]

K = módulo volumétrico de elasticidad, [N/m²]

*"El signo negativo indica que a un incremento de presión le corresponde un decremento de volumen" (Sandoval, 1993, pág. 11).

*"El módulo volumétrico del agua a 15 °C es de: $K = 2 \times 10^9 \text{ Pa}$ (20000 Kg/cm^2)" (Sandoval, 1993, pág. 11).

*"Debido a que las cantidades de dv y V son las mismas el denominador de la expresión es adimensional" (Sandoval, 1993, pág. 11).

"En los líquidos la compresibilidad es muy poca, ello indica un cambio muy grande en la presión para producir un pequeño cambio de volumen" (Sandoval, 1993, pág. 11).

2.1.2 Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. Osborne Reynolds descubrió que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se denomina número de Reynolds y se expresa para un flujo interno en una tubería circular como: (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331)

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} D}{\nu} = \frac{\rho * V_{prom} D}{\mu} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

$V_{prom} = \text{velocidad de flujo promedio, [m/s]}$

$D = \text{diámetro, [m]}$

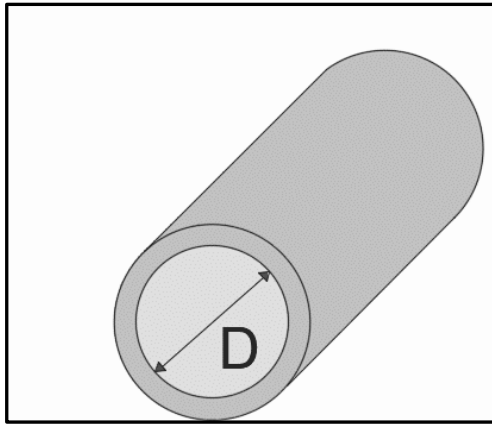
$\nu = \mu/\rho, \text{viscosidad cinemática, [m}^2/\text{s]}$

- Número de Reynolds es adimensional.
1. "A números grandes de Reynolds, las fuerzas inerciales, que son proporcionales a la densidad del fluido y al cuadrado de la velocidad del fluido, son grandes con relación con las fuerzas viscosas" (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331).
 2. "A números pequeños de Reynolds o moderados, las fuerzas viscosas son lo suficientemente grandes como para suprimir dichas fluctuaciones y mantener al fluido en línea" (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331).

- “Por lo tanto, en el primer caso se da un flujo turbulento, donde el número de Reynolds es crítico Re_{cr} y dicho valor considerado por Cengel. Y, Cimballa. J, es igual a 2300 y laminar en el segundo caso” (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331).

- Para tuberías circulares se basa en lo siguiente:

Ec. 12



$$Dh = \frac{4 * Ac}{p} = \frac{4 * (\pi * D^2 / 4)}{\pi * D}$$

Dónde:

Dh: diámetro hidráulico

Ac: área de la sección transversal

p: perímetro húmedo

Ilustración 3: Tubería circular

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

La ley de los modelos de Reynolds es válida habitualmente en estudios con modelos del flujo de fluidos en tuberías, canales de ríos, de movimiento de objetos sumergidos a través de líquidos y de movimiento relativo del aire sobre aviones, automóviles y trenes, a velocidades que no sean excesivas (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331).

El comportamiento de un fluido, con respecto a las pérdidas de energía, resulta bastante dependiente de si el flujo es laminar o turbulento; por esta razón se requiere un medio adecuado para predecir el tipo de flujo sin tener que observarlo (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331).

“Existe la posibilidad de demostrar en forma experimental y verificar de manera analítica que en un tubo redondo el carácter del flujo va a depender de cuatro variables”: (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 331)

1. densidad (ρ).
2. viscosidad (η).

3. diámetro de la tubería (D).
4. velocidad promedio del flujo (v).

Para Mott el rango de flujo laminar y turbulento es el siguiente:

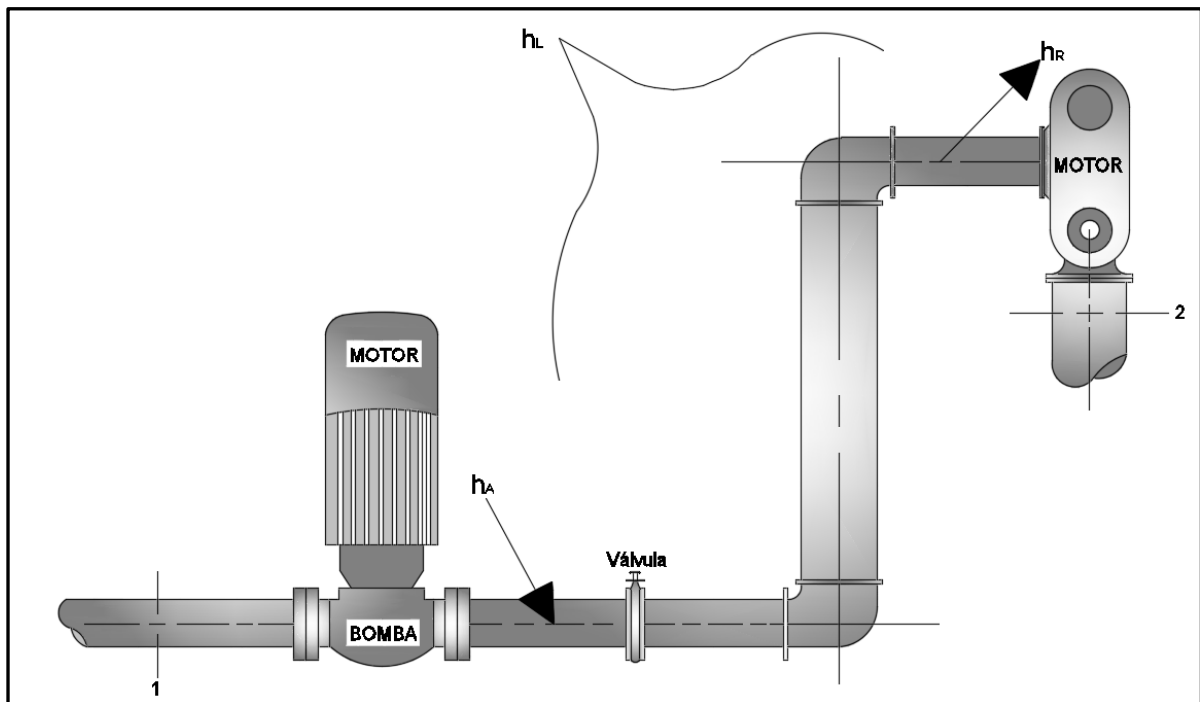
- “Si $N_R < 2000$, el flujo es laminar” (Mott & Untener, 2015, pág. 181).
- “Si $N_R > 4000$, el flujo es turbulento” (Mott & Untener, 2015, pág. 181).

2.2 PRINCIPIOS DE ENERGÍA Y CONTINUIDAD

2.2.1 Ecuación general de la energía

La ecuación general de la energía es una ampliación de la ecuación de Bernoulli, la cual permite resolver problemas en los que se produce pérdidas y ganancias de energía. La interpretación lógica de la ecuación de la energía, que se presenta en un sistema de flujo. Los términos E_1 y E_2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las 1 y 2, respectivamente.

Se muestra las respectivas ganancias, remociones y pérdidas de energía: h_A , h_R y h_L . Para un sistema de este tipo, la expresión del principio de conservación de la energía es: (Sandoval, 1993, pág. 158)



Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

“Para un Sistema de este tipo, la expresión del principio de conservación de energía es” (Sandoval, 1993, pág. 158):

$$E'_1 + h_A - h_R - h_L = E'_2 \quad \text{Ec. 13}$$

“La energía poseída por el fluido por unidad de peso es” (Sandoval, 1993, pág. 158):

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

Ec. 14

Entonces de las ecuaciones anteriores se convierte en la siguiente ecuación general de la energía:

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

Ec. 15

Donde:

h_A : energía transferida de la bomba al fluido.

h_L : energía disipada por los accesorios.

h_R : energía entregada por dispositivo externo.

γ : peso específico del fluido.

z : altura.

p : presión en el punto de análisis.

g : gravedad.

v : velocidad en la sección de circulación del fluido.

2.2.2 Continuidad del flujo en tuberías

En cualquier tubería que lleve líquido y tenga un flujo completo, dentro de los límites de error resultantes de las suposiciones relativas a que el líquido es incomprensible y la tubería no elástica, en cualquier instante dado, pasará la misma cantidad de líquido por cada sección transversal de la tubería. Este enunciado implica una continuidad de flujo y es válido incluso cuando el flujo no es estacionario, una condición que existe cuando la carga que produce la descarga es variable. Con gases, que son sumamente compresibles, sólo puede existir

continuidad en el flujo en una tubería cuando dicho flujo es estacionario. (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 181)

“Con gases, que son sumamente compresibles, sólo puede existir continuidad de flujo en una tubería cuando dicho flujo es estacionario” (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 181).

2.3 PÉRDIDAS

2.3.1 Pérdidas menores en accesorios

El fluido en un sistema de tuberías típico pasa a través de varias válvulas, flexiones, codos, en conexiones tipo T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos con sus rugosidades respectivas. Dichos accesorios interrumpen el flujo del fluido, lo que provoca pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico con tubos largos, dichas pérdidas son menores en comparación con las pérdidas por fricción en los tubos (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348).

“El flujo a través de válvulas y las uniones es muy complejo, por lo general no es lógico un análisis teórico, en consecuencia, los fabricantes de los accesorios realizan ensayos para determinar las pérdidas menores de forma experimental” (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348).

“Las pérdidas menores se expresan mediante el siguiente coeficiente de pérdidas K, también denominado coeficiente de resistencia, el cual se define de la siguiente forma”: (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348)

$$K = \frac{h_m}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \quad \text{Ec. 16}$$

$$h_m = \frac{K \cdot V^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

h_m : pérdidas menores, [m]

V : velocidad del fluido, [m/s]

g : gravedad, [m²/s]

K : coeficiente de pérdidas menores

En general el coeficiente de pérdida depende de la geometría del accesorio y del número de Reynolds, tal como el factor de fricción. Sin embargo, usualmente se supone que es independiente del número de Reynolds. Ésta es una solución razonable porque, en la práctica,

la mayoría de los flujos tienen números de Reynolds grandes y los coeficientes de pérdida tienden a ser independientes del número de Reynolds (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348).

“Las pérdidas menores también pueden ser expresadas en términos de la longitud equivalente, como se expresa a continuación”: (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348)

$$h_m = \frac{K \cdot V^2}{2 \cdot g} = f * \frac{L_{equiv}}{D} * \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 18}$$

$$L_{equiv} = \frac{K \cdot D}{f} \quad \text{Ec. 19}$$

Donde:

f: factor de fricción

D: diámetro de la tubería del accesorio

La pérdida de carga que provoca el accesorio equivale a la pérdida de carga causada por un tramo de tubería cuya longitud es L_{equiv} . Por lo tanto, la aportación de un accesorio equivale a la pérdida de carga, se puede explicar simplemente con añadir L_{equiv} a la longitud de tubería total, como se expresa a continuación: (Cengel & Cimbala, 2006, págs. 347-348)

$$h_m = \left(f * \frac{L}{D} + \sum K \right) * \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 20}$$

2.3.1.1 Coeficientes de pérdida de varios accesorios de tubería para flujo turbulento:

Nota: Los valores que se presentan a continuación de α significa que tiende al infinito.

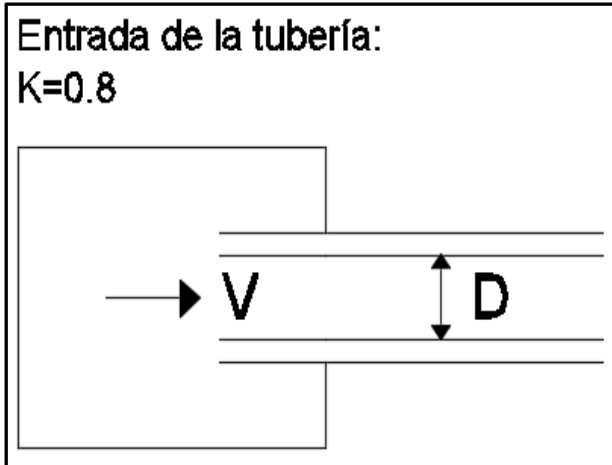


Ilustración 5: Coeficiente de pérdida $K=0.8$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

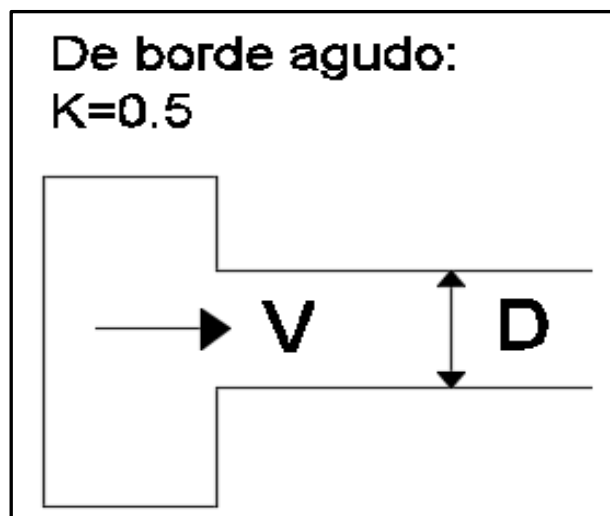


Ilustración 6: Coeficiente de pérdida $K=0.5$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

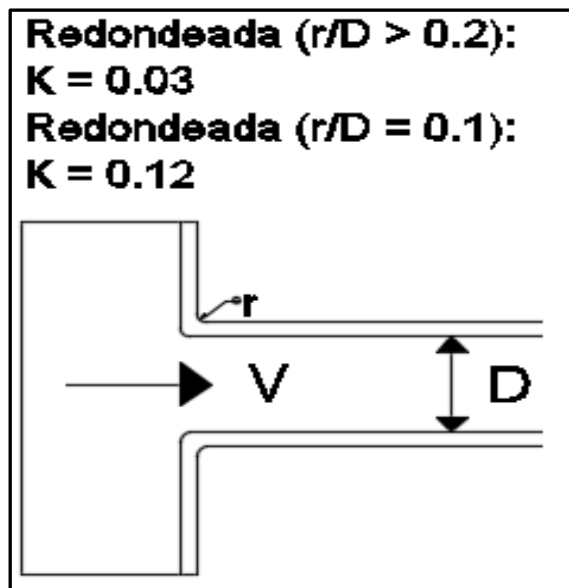


Ilustración 7: Coeficiente de pérdida $K=0.03$ y $K=0.12$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

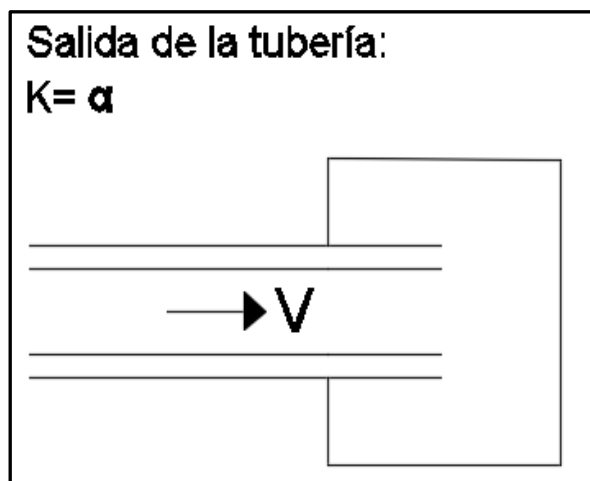


Ilustración 8: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

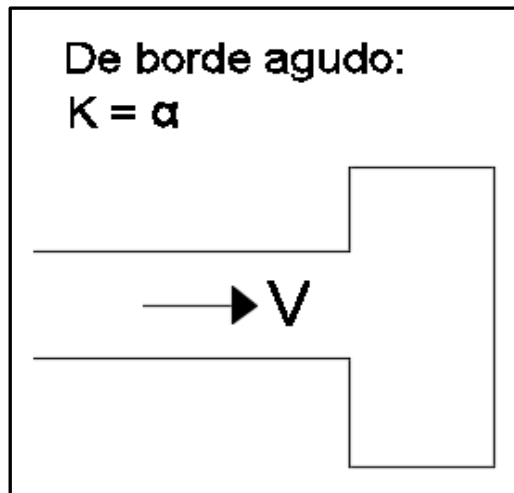


Ilustración 9: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$, borde agudo.

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

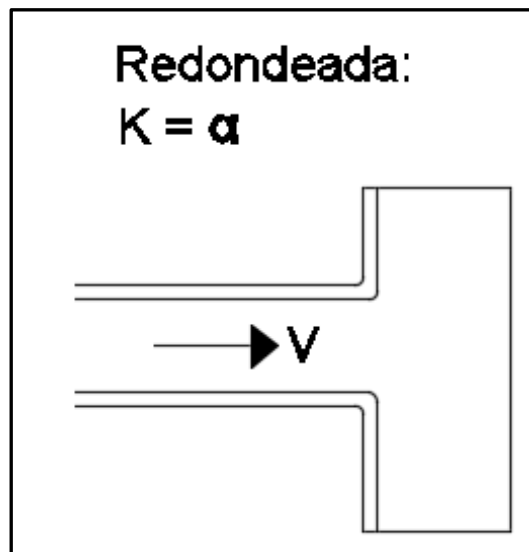


Ilustración 10: Coeficiente de pérdida $K=\alpha$, redondeada

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

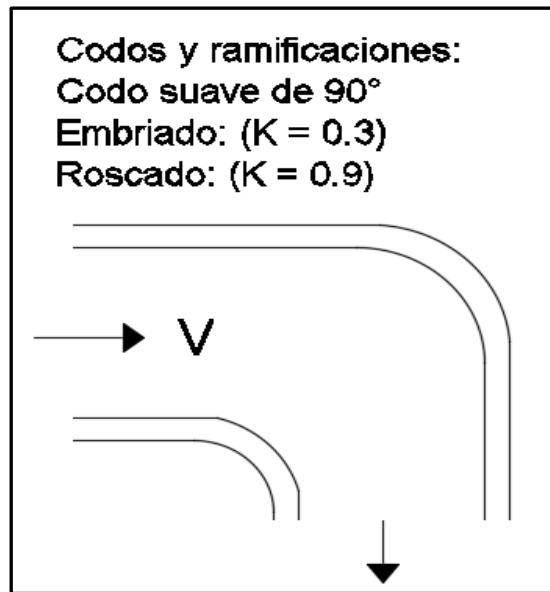


Ilustración 11: Coeficiente de pérdida K=0.3 y K=0.9

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

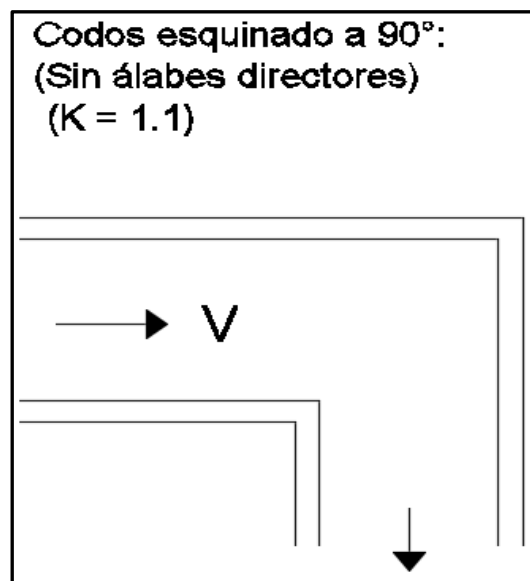


Ilustración 12: Coeficiente de pérdida K=1.1

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

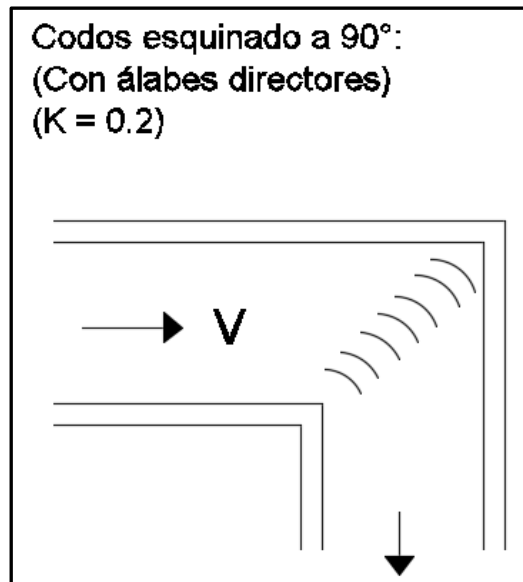


Ilustración 13: Coeficiente de pérdida K=0.2

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

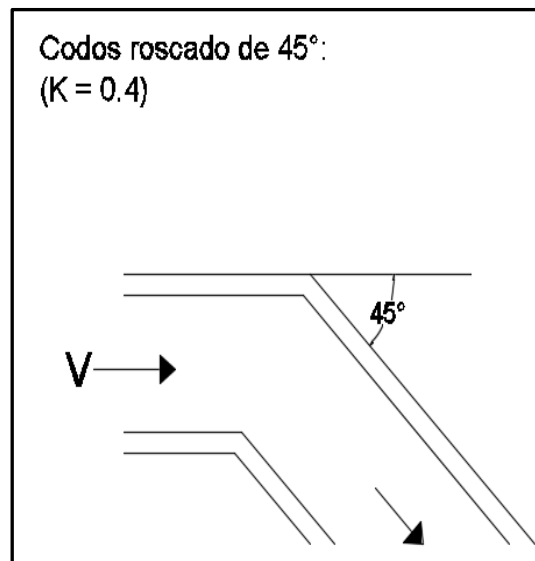


Ilustración 14: Coeficiente de pérdida K=0.4

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

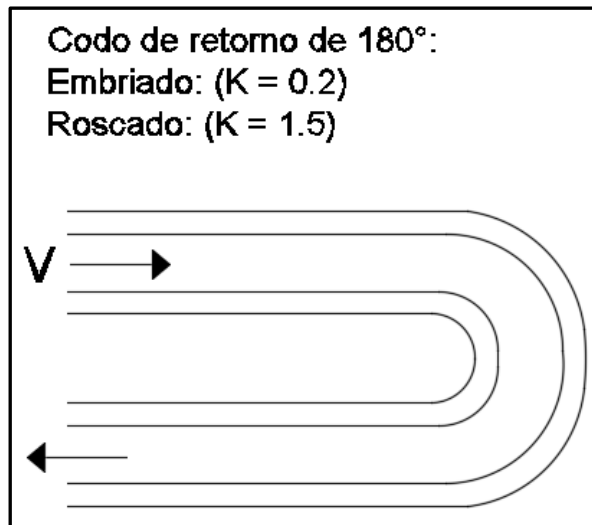


Ilustración 15: Coeficiente de pérdida K=0.2 y K=1.5

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

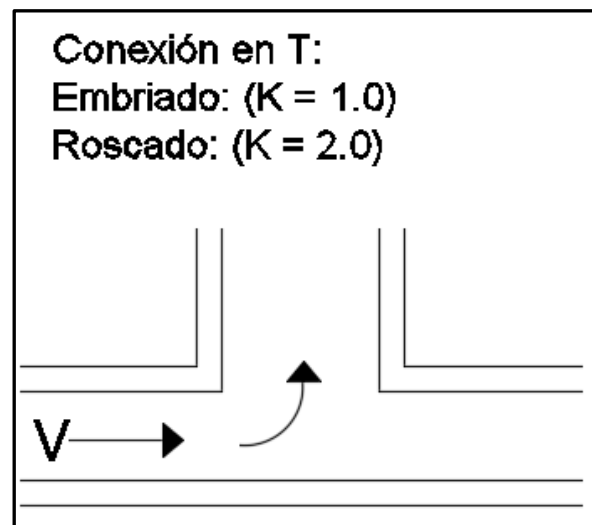


Ilustración 16: Coeficiente de pérdida K=1 y K=2

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

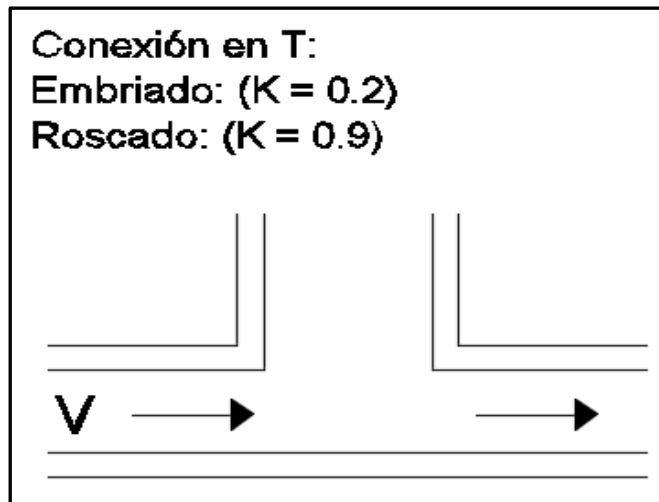


Ilustración 17: Coeficiente de pérdida $K=0.2$ y $K=0.9$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

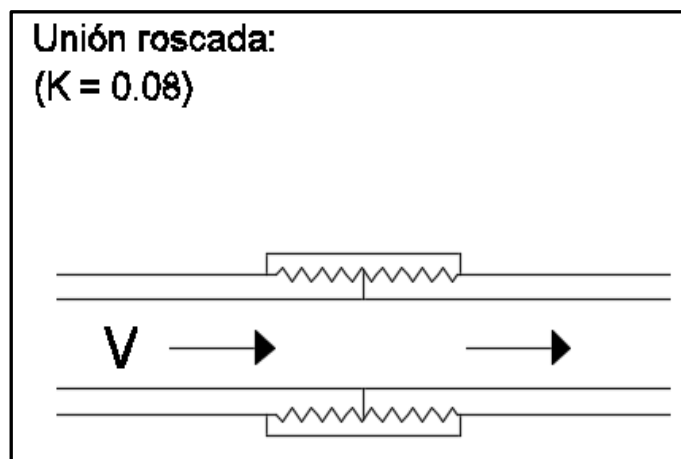


Ilustración 18: Coeficiente de pérdida $K=0.08$

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Todo sistema de conducción de fluidos requiere del acople de las estructuras que permitirán superar los problemas como cambios de pendiente, cambios de elevación, cambios de dirección, derivaciones, acoples de los sistemas de tanques de alimentación o de recibo, reguladores de caudal o de presión (válvulas). Estas estructuras se las puede denominar como “accesorios”, y al ser parte de los sistemas de conducción ocasionan una disipación local de energía denominada como: “Pérdida Local” o “Pérdida por accesorio” (Duarte Agudelo, 2008, págs. 5-34, 5-35).

“Esto obedece a que la estructura genera una caída repentina de la energía disponible del flujo precisamente en el sitio donde se encuentra el dispositivo” (Duarte Agudelo, 2008, págs. 5-34, 5-35).

2.3.2 Pérdidas por fricción

Un fluido en movimiento sufre una pérdida por fricción, que es un gasto de energía que se requiere para vencer la resistencia al flujo. La energía gastada se transforma en calor. Después de sufrir dicha transformación, no es posible, mediante los procesos naturales reconvertirla en energía útil contenida en el flujo de un fluido, por ende, con frecuencia se denomina “energía o carga pérdida”. No se debe considerar que esa pérdida se deba a la fricción de deslizamiento entre el fluido y las paredes internas del ducto, puesto que cuando fluido moja las paredes del ducto por el que circula, como sucede en general, las partículas más externas del fluido se adhieren a la pared y no tienen movimiento en relación con ella; por consiguiente, no puede haber fricción entre el ducto y el fluido (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 100).

En vez de ello se debe considerar que la pérdida se produce dentro de la misma corriente. Puede ser el resultado de la fricción entre las diversas partículas del fluido cuando se frotan unas con otras, o debido a la pérdida de energía cinética, como el resultado del impacto de las moléculas o masas que se desplazan con distintas velocidades (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 100).

Con flujo laminar, la magnitud de la pérdida de fricción es independiente del grado de aspereza del ducto. Con flujo turbulento, según Prandtl y otros, cuando el fluido moja las paredes del ducto, hay una capa del fluido adyacente a las paredes donde el flujo es laminar; sin embargo, la aspereza de la pared del ducto sí tiene efectos directos sobre la cantidad de pérdida por fricción, pues la turbulencia aumenta con el grado de aspereza (King, Wisler, & Woodburn, 1980, pág. 100).

2.3.2.1 Ecuación de Darcy

Un componente de la pérdida de energía en el fluido que fluye. Para el caso de del flujo en tuberías y tubos, la fricción es proporcional a la carga de velocidad de flujo y a la relación de la longitud sobre el diámetro de la corriente de flujo. Esto se expresa matemáticamente como la ecuación de Darcy: (Mott & Untener, 2015, pág. 233)

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad \text{Ec. 21}$$

Donde:

h_f = pérdida de energía debido a la fricción

L = longitud de la corriente de flujo, [m, ft]

D = diámetro de la tubería, [m, ft]

V = velocidad de flujo promedio, [m/s, ft/s]

f = factor de fricción, [adimensional]

La ecuación de Darcy se la puede utilizar para el cálculo de la pérdida de energía debida a la fricción en las secciones rectas y largas de tubería redonda, tanto para el flujo laminar como para el turbulento. La diferencia entre los dos flujos reside en la evaluación del factor de fricción adimensional f , para cada flujo el factor fricción son los siguientes: (Mott & Untener, 2015, pág. 233)

- **Flujo Laminar:**

$$f = \frac{64}{N_{Re}} \quad \text{Ec. 22}$$

- **Flujo Turbulento:**

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 * \left(\frac{D}{\varepsilon} \right)} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ec. 23}$$

“La relación $\frac{D}{\varepsilon}$, es la rugosidad relativa entre el diámetro de la tubería y la rugosidad del material de la tubería, dicha relación es útil para la utilización del diagrama de Moody” (Mott & Untener, 2015, pág. 233).

2.3.2.2 Otras Ecuaciones para el factor de fricción

2.3.2.2.1 Fórmula de Hazen – Williams:

Es una de las fórmulas más populares para diseñar y analizar el sistema de agua. Su aplicación se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros más grandes que 5 centímetros aproximadamente y menores a 2 metros aproximadamente. La velocidad de flujo no debe exceder de 3 m/s aproximadamente, y su uso está desarrollado a una temperatura de 16 °C del

agua, si fuese una temperatura más alta o baja da lugar a algún error. (Mott & Untener, 2015, pág. 195)

“La fórmula de Hazen – Williams se expresa de la siguiente manera”: (Mott & Untener, 2015, pág. 195)

$$V = 0.85 * C_h * R^{0.63} * s^{0.54} \quad \text{Ec. 24}$$

$$s = \frac{h_f}{L} \quad \text{Ec. 25}$$

$$h_f = 10.654 * L * \left[\frac{Q}{C_H * D^{2.63}} \right]^{1.85} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde:

V: velocidad promedio del flujo, [m/s]

C_h: coeficiente de Hazen – Williams, [adimensional]

R: radio hidráulico del conducto de flujo, [m]

s: pérdida de energía/longitud del conducto = *h_m*/L, [adimensional]

<i>Tubería</i>	Coeficiente <i>C_h</i>
<i>PVC</i>	150
<i>Fundición asfaltada</i>	140
<i>Asbesto - Cemento</i>	140
<i>Acero</i>	130 - 140
<i>Hierro Forjado</i>	130 - 140
<i>Hormigón</i>	120
<i>Acero liso</i>	120
<i>Madera</i>	120
<i>Fibra de vidrio</i>	110

Coeficientes de rugosidad de Hazen - Williams

Tabla 4: Coeficientes de Hazen-Williams

Fuente: (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 5-33)

2.3.2.2.2 Ecuación de Manning:

“Robert Manning, en 1880, obtuvo la expresión para determinar la velocidad media del agua en tuberías”: (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 5-34)

$$V = \frac{1.49}{\eta} * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{0.5} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde:

η : coeficiente de rugosidad, que depende del material

$$h_f: \frac{10.29 * L * \eta^2 * Q^2}{D^{\frac{16}{3}}}$$

2.3.2.2.3 Ecuaciones para el factor de fricción en Flujo Turbulento:

Al hacer un análisis de flujo turbulento es claro que las variables que influyen en su comportamiento son: la velocidad media de flujo [V], la viscosidad del fluido Dinámica [μ] o Cinemática [ν], la densidad del fluido [ρ], el esfuerzo de corte [σ_o], que para el caso específico de flujo de tuberías de sección transversal circular es igual al diámetro [D] del tubo y la rugosidad absoluta del tubo ϵ . En el flujo turbulento existen 5 variables, que en conjunto involucra 3 dimensiones físicas (Peso Molecular, Longitud y Tiempo). Para obtener una ecuación que relacione a dichas variables, es posible aplicar el análisis dimensional y específicamente el teorema de Pi de Buckingham: la relación entre variables se puede expresar en la forma: $F(\sigma_o, \rho, \mu, D, V, \epsilon) = 0$, por lo cual se obtendrán 3 parámetros adimensionales: (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 5-24)

$$\Pi 1 = \frac{\rho * V * D}{\mu} = Re \quad \text{Ec. 28}$$

$$\Pi 2 = \frac{\rho * V^2}{\sigma_o} = E \quad \text{Ec. 29}$$

$$\Pi 3 = \frac{\epsilon}{D} \quad \text{Ec. 30}$$

De esta forma es posible escribir que $F_2(Re, E, \frac{\epsilon}{D}) = 0$

ó que $(\rho * \mu^2 / \sigma_o) = F_3(Re, \epsilon/D)$, de lo cual resulta:

$$\sigma_o = \rho * V^2 * \left(F * \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) \right) \quad \text{Ec. 31}$$

Ecuación de Colebrook – White

“La ecuación Ec. 1 indica que el esfuerzo de corte depende del número de Reynolds Re y de la rugosidad relativa ε/D ; nótese que el esfuerzo de corte es directamente proporcionalmente a la V^2 ”. (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 5-25)

De la ecuación anterior se introduce lo siguiente:

$$h_f = \frac{L*V^2}{D*2g} * \left(8 * F \left(Re, \frac{\varepsilon}{D} \right) \right), \quad \text{Ec. 32}$$

“El término dentro del paréntesis, que depende Reynolds y de la rugosidad relativa, se denomina coeficiente o factor de fricción f , por lo que”: (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 5-25)

$$h_f = f * \frac{L*V^2}{D*2g} \quad \text{Ec. 33}$$

Ec. De Swamme – Jain

2.3.2.2.4 Análisis de Sistemas de Tuberías

“El término “Sistema de Tuberías” se lo puede definir como un conjunto de tuberías, tanques, accesorios y máquinas hidráulicas, acoplados de diversa forma con el propósito de transportar fluidos. En general los sistemas de tuberías se clasifican en”: (Duarte Agudelo, Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios, 2008, págs. 6-1)

1. Sistema de tuberías en Serie.
2. Sistema de tuberías en Paralelo.
3. Sistemas ramificados o abiertos.
4. Redes de distribución.

2.4 Tuberías en Serie:

Las tuberías en serie son dos o más tuberías distintas colocadas una a continuación de la otra, las cuales pueden diferenciarse en los diámetros o en las rugosidades o bien en ambas características físicas. En la

ilustración 19, se muestra un esquema de tuberías en serie que conectan a dos tanques. Dicho esquema se utilizará para plantear las ecuaciones que rigen en el flujo de tuberías en serie. (Saldarriaga, 1998, pág. 190)

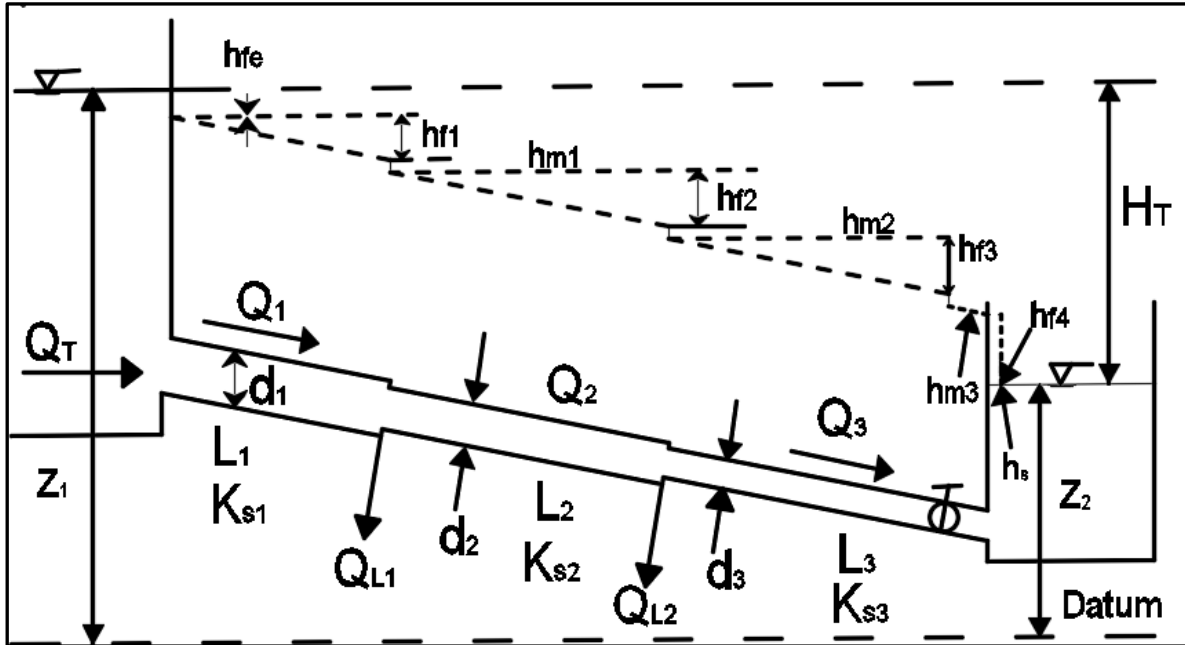


Ilustración 19: Sistema de tuberías en serie

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Considerando la Ilustración 18, se puede plantear las siguientes ecuaciones:

2.4.1 Conservación de la energía:

$$H_T = Z_1 - Z_2 = h_e + h_{f1} + h_{m1} + h_{f2} + h_{m2} + h_{f3} + h_{m3} + h_s \quad \text{Ec. 34}$$

Donde:

H_T : diferencia de nivel entre los tanques

h_e : pérdidas menores de entrada

h_{fi} : pérdidas por fricción en el tubo

h_{mi} : pérdidas menores en el accesorio

h_s : pérdidas menores por la salida

La ecuación de conservación de la energía puede generalizarse para cualquier sistema de tuberías en serie en la siguiente forma:

$$H_T = \sum_{i=1}^n h_{fi} + \sum_{i=1}^m m_i$$

Ec. 35

Donde:

n: número de tuberías que conforman la serie

m: número de accesorios que causan pérdidas menores en la serie

Si se toma en cuenta las características físicas de cada tubería de la serie, como diámetros, longitudes y rugosidades absolutas, y los coeficientes de pérdida menores de cada uno de los accesorios, la ecuación de arriba se convierte en:

$$H_T = \sum_{i=1}^n h_{fi} + \sum_{i=1}^m m_i$$

Ec. 36

2.4.2 Conservación de la masa (continuidad):

“La siguiente ecuación representa que el caudal total que pasa por el sistema es igual al que circula por cualquier tubería más todos los caudales laterales en las uniones localizadas aguas arriba de ésta. Para una serie de *n* tuberías”. (Saldarriaga, 1998, pág. 191)

$$Q_T = Q_1 = Q_2 + Q_{L1} = Q_3 + Q_{L1} + Q_{L2} \quad \text{Ec. 34}$$

De la ecuación 6 se la puede generalizar de la siguiente forma:

$$Q_T = Q_\alpha + \sum_{i=1}^{\alpha-1} Q_{Li}$$

Ec. 37

Donde:

Q_α = caudal en la tubería α de la serie *n* tuberías

“Si en las uniones no existe caudal lateral, la ecuación de conservación de la masa se simplificaría así”: (Saldarriaga, 1998, pág. 192)

$$Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3 \dots = Q_n \quad \text{Ec. 38}$$

Es decir, el caudal es igual para todos los *n* tubos de la serie.

2.5 Tuberías en Paralelo:

Las tuberías en paralelo son un conjunto de tuberías que parten de un nudo común y llegan a otro nudo también en común. En estos nudos, los caudales que pasan por cada una de las tuberías se unen. Esto quiere decir que para cada una de las tuberías en paralelo aguas arriba los caudales se encuentran unidos para luego dividirse en el nodo inicial y por último volver a unirse en el nodo final; aguas debajo de éste debe existir un caudal único (Saldarriaga, 1998, pág. 227).

En general los sistemas en paralelos se encuentran limitados de 3 a 4 tuberías. Sin embargo, es más común que estén compuestos por dos tuberías. Estas pueden tener longitudes, diámetros y accesorios distintos a la vez que pueden estar elaborados de distintos materiales (Saldarriaga, 1998, pág. 227). A partir del siguiente esquema, se plantearán las ecuaciones que gobiernan el flujo en este tipo de tuberías:

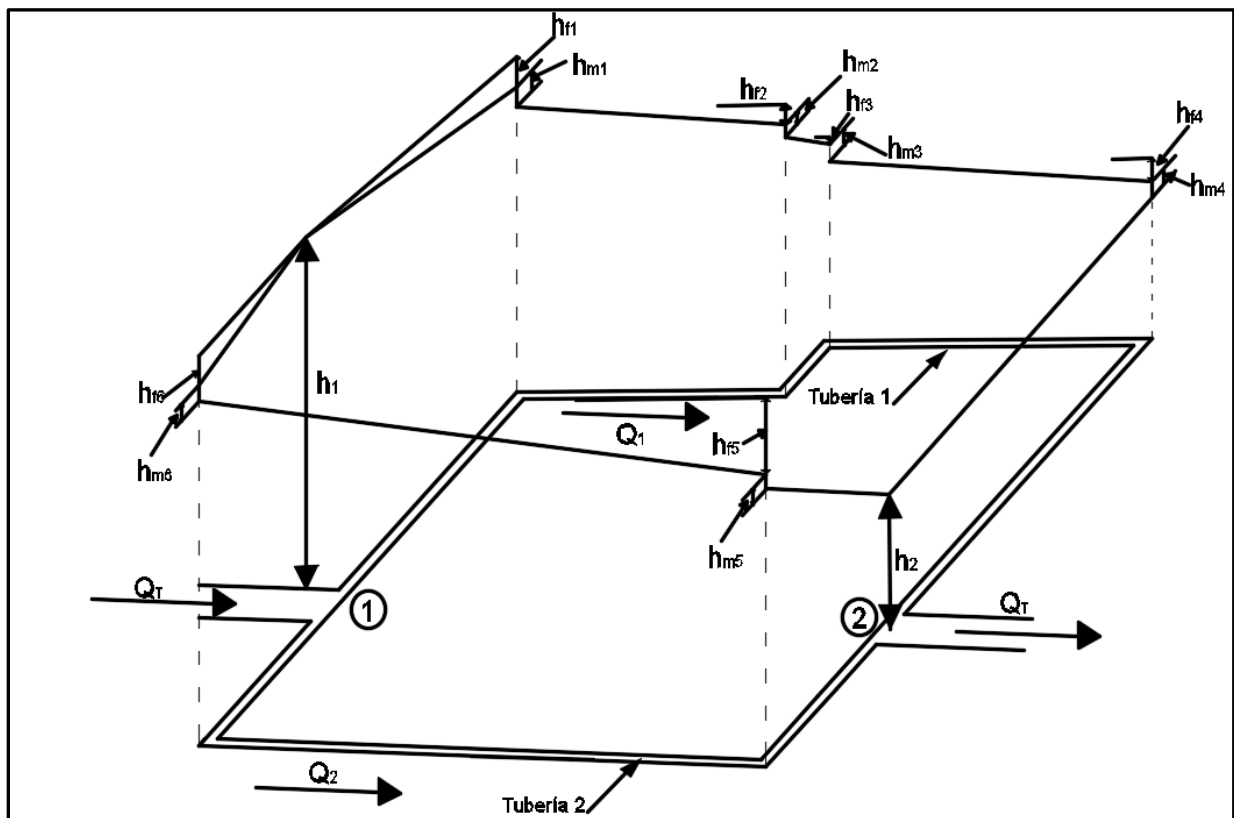


Ilustración 20: Sistema de tuberías en paralelo

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

- Las pérdidas menores de accesorios h_m y h_f de fricción, de 1 a 4 son de la tubería 1.
- Las pérdidas menores de accesorios h_m y h_f de fricción, de 5 a 6 son de la tubería 2.

A partir de la ilustración 20, se puede plantear las siguientes ecuaciones:

2.5.1 Conservación de la Energía:

$$h_1 - h_2 = H_T = h_{f1} + h_{m1} + h_{f2} + h_{m2} + h_{f3} + h_{m3} + h_{f4} + h_{m4} + h_{f5} \quad \text{Ec. 37}$$

Para la tubería 1, donde:

h_{fi} = pérdidas por fricción en el tramo de la tubería i

h_{mi} = pérdidas por accesorios en el tramo de la tubería i

H_T = diferencia total de cabeza entre los nodos
1(inicial) y 2(final)

De la ecuación 4 se puede simplificar de la siguiente forma:

$$H_T = \sum_{i=1}^n h_{fi} + \sum_{i=1}^m h_{mi}$$

Ec. 39

Donde:

n = número de tramos de la tubería 1

m = número de accesorios de la tubería 1

(Saldarriaga. 1988. Pág. 227)

Para la tubería 2, se puede plantear una ecuación similar, b:

$$H_T = \sum_{i=1}^r h_{fi} + \sum_{i=1}^s h_{mi}$$

Ec. 40

Donde:

r = número de tramos de la tubería 2

s = número de accesorios de la tubería 2

2.5.2 Conservación de la masa (continuidad)

De la ilustración 20, la ecuación de conservación de la masa, tratándose de flujo permanente es:

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

Ec. 41

2.6 Redes Cerradas

Considerada la red cerrada en la ilustración 21 y tomando en consideración que $Q_{D1}, Q_{D2}, Q_{D3}, Q_{D4}, \dots, Q_{DNU}$, son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor igual a cero en un momento dado, y que $Q_{e1}, Q_{e2}, Q_{e3}, \dots, Q_{em}$, son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación: (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

Ec.45

Donde Nu es el número de nodos que existen en la red.

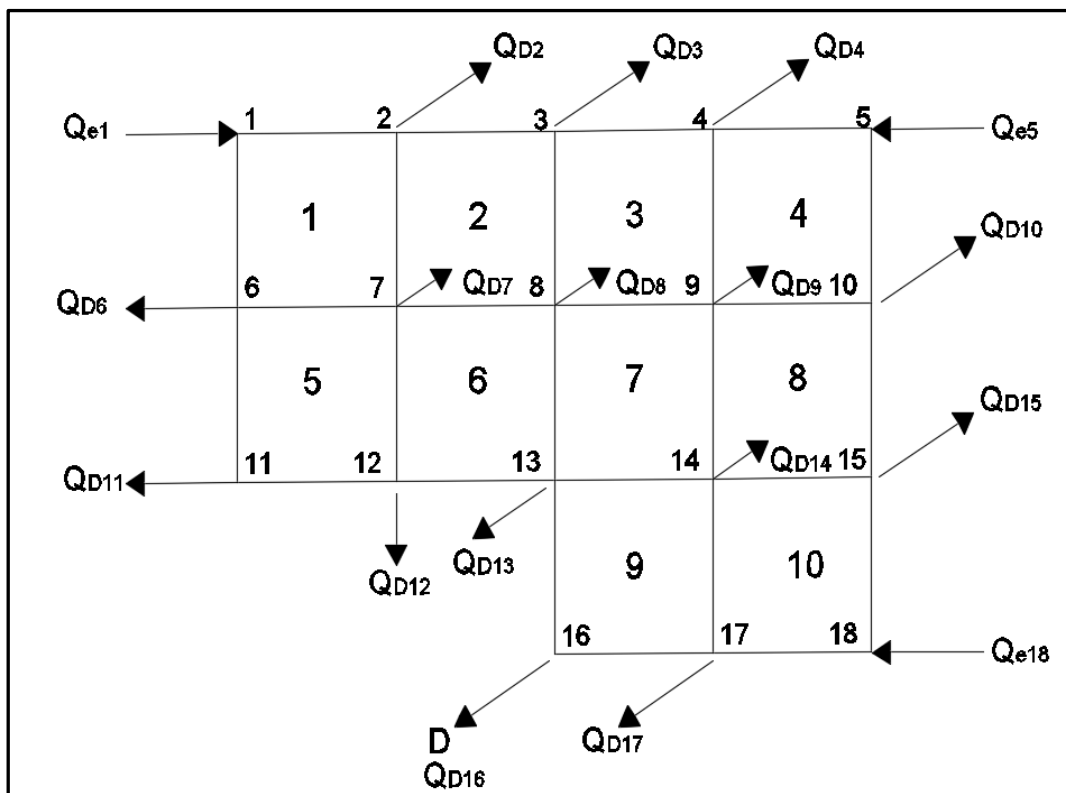


Ilustración 21: Sistema de red cerrada

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

La Ec. 45, es una ecuación de conservación de la masa, la cual puede ser establecida en cada nudo ya que, localmente se debe cumplir la conservación de la masa. Dicha expresión es la siguiente: (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

$$\sum_{j=1}^{NTi} Q_{ij} - Q_{Di} = 0$$

Ec. 46

Donde:

NTi: es el número de tubos que llegan al nodo i

Q_{ij}: representa el caudal que pasa por la tubería ij

hacia el nodo i desde el nodo j

- “Puede ser positivo si va el flujo hacia el nodo i, o negativo si sale de dicho nodo”. (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

“Para cada uno de los caudales Q_{ij} de la ecuación Ec.45 se puede plantear la siguiente ecuación de conservación de la energía entre los nodos i y j, incluyendo las pérdidas menores”: (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

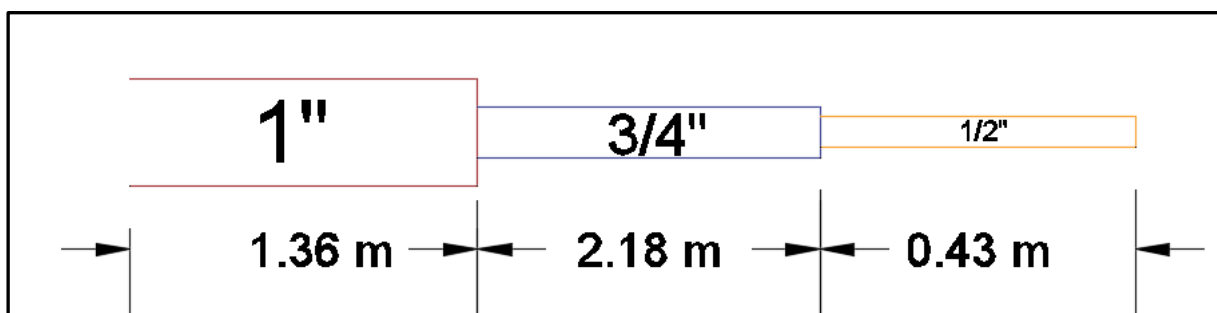
$$H_i - H_j = \sum K_{mij} * \frac{v_{ij}^2}{2 * g} + h_f$$

3. CAPÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

3.1 Diseño del Modelo Hidráulico

El sistema en malla se lo diseña a partir de la modelación en EPANET, debido a que en el modelo físico cuenta con 25 nudos de control y no se lo verifica manualmente ya que los cálculos para ello son extensos y se lo realiza por medio de iteraciones con el método de Hardy Cross.

En el caso del sistema en serie se analiza los siguientes diámetros, para observar el cambio de presión que se da en el circuito del sistema físico construido, de la siguiente manera se realiza el esquema del sistema para su análisis:



Esquema del Sistema en Serie

Posteriormente del esquema establecido del sistema en serie, se realiza los siguiente cálculos para determinar el caudal y la potencia de la bomba requerida para el sistema en serie:

1. Considerando las lecturas proporcionadas por los piezómetros ubicados en los nudos 1 y 9, además la temperatura del agua en el sitio es de 15 °C.

$$\frac{\rho_1}{\gamma} = 2.454 \text{ m} \qquad \frac{\rho_9}{\gamma} = 1.955 \text{ m}$$

Punto de entrada Punto de salida

2. Se determina el área con los diámetros comerciales de cada tubería:

$$A_{1"} = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.02976 \text{ m})^2}{4} = 0.000696 \text{ m}^2$$
$$A_{3/4"} = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.02354 \text{ m})^2}{4} = 0.000435 \text{ m}^2$$

$$A_{1/2}'' = \frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\pi * (0.01831 \text{ m})^2}{4} = 0.000263 \text{ m}^2$$

3. Aplicando el principio de las tuberías en serie, el caudal que circula en cualquier sección del sistema es igual al inicio como a la salida:

$$Q = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_n$$

$$Q_1 = Q_{3/4}; \quad V_1 * (0.000696 \text{ m}^2) = V_{3/4} * (0.000435 \text{ m}^2) \quad (1)$$

$$Q_1 = Q_{1/2}; \quad V_1 * (0.000696 \text{ m}^2) = V_{1/2} * (0.000263 \text{ m}^2) \quad (2)$$

En (1):

$$V_{3/4} = V_1 * 1.6$$

En (2):

$$V_{1/2} = V_1 * 2.646$$

4. Analizando la pérdida de energía entre los dos puntos:

$$h_1 - h_9 = 2.454 \text{ m} - 1.995 \text{ m} = 0.499 \text{ m}$$

5. Considerando las pérdidas por fricción:

$$h_f = L * \left(\frac{v}{0.85 * CHW * R^{0.63}} \right)^{1.85}$$

$$h_{f1} = 1.36 * \left(\frac{v_1}{0.85 * 140 * \left(\frac{0.02976}{4} \right)^{0.63}} \right)^{1.85} = 0.0595 * V_1^{1.85}$$

$$h_{f2} = 2.18 * \left(\frac{1.6 * v_1}{0.85 * 140 * \left(\frac{0.02354}{4} \right)^{0.63}} \right)^{1.85} = 0.299 * V_1^{1.85}$$

$$h_{f3} = 0.43 * \left(\frac{2.646 * v_1}{0.85 * 140 * \left(\frac{0.01831}{4} \right)^{0.63}} \right)^{1.85} = 0.200 * V_1^{1.85}$$

6. Considerando la conservación de la energía , se tiene:

$$0.0595 * V_1^{1.85} + 0.299 * V_1^{1.85} + 0.2 * V_1^{1.85} = 0.499 \text{ m}$$

$$V_1 = 0.941 \text{ m/s}$$

$$V_{3/4} = 1.6 * 0.941 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1.506 \text{ m/s}$$

$$V_{1/2} = 2.646 * 0.941 \frac{m}{s^2} = 2.49 \text{ m/s}$$

$$Q_1 = 0.941 \frac{m}{s} * 0.000696 \text{ m}^2 = 0.000655 \frac{m^3}{s} = 0.655 \text{ l/s}$$

$$Q_{3/4} = 1.506 \frac{m}{s} * 0.000435 \text{ m}^2 = 0.000655 \frac{m^3}{s} = 0.655 \text{ l/s}$$

$$Q_{1/2} = 2.49 \frac{m}{s} * 0.000263 \text{ m}^2 = 0.000655 \frac{m^3}{s} = 0.655 \text{ l/s}$$

Con lo cual el caudal que circulará por el sistema en serie es de 0.665 l/s, además este caudal se ingresa en el modelo de EPANET como dato para correr la simulación.

7. Se estima la potencia de la bomba, la cual será instalada en el modelo:

$$P = \frac{\gamma * Q * H}{75}$$

$$P = \frac{1000 \frac{KN}{m^3} * 0.000655 \frac{m^3}{s} * 2.454 \text{ m}}{75} = 0.021432 \text{ HP}$$

Como la potencia calculada no hay disponible en el mercado, se adquiere una bomba de 1/2 HP que si existe en el mercado y va a abastecer a los tres sistemas construidos.

3.2 Construcción del modelo

3.2.1 Sistema en Malla:

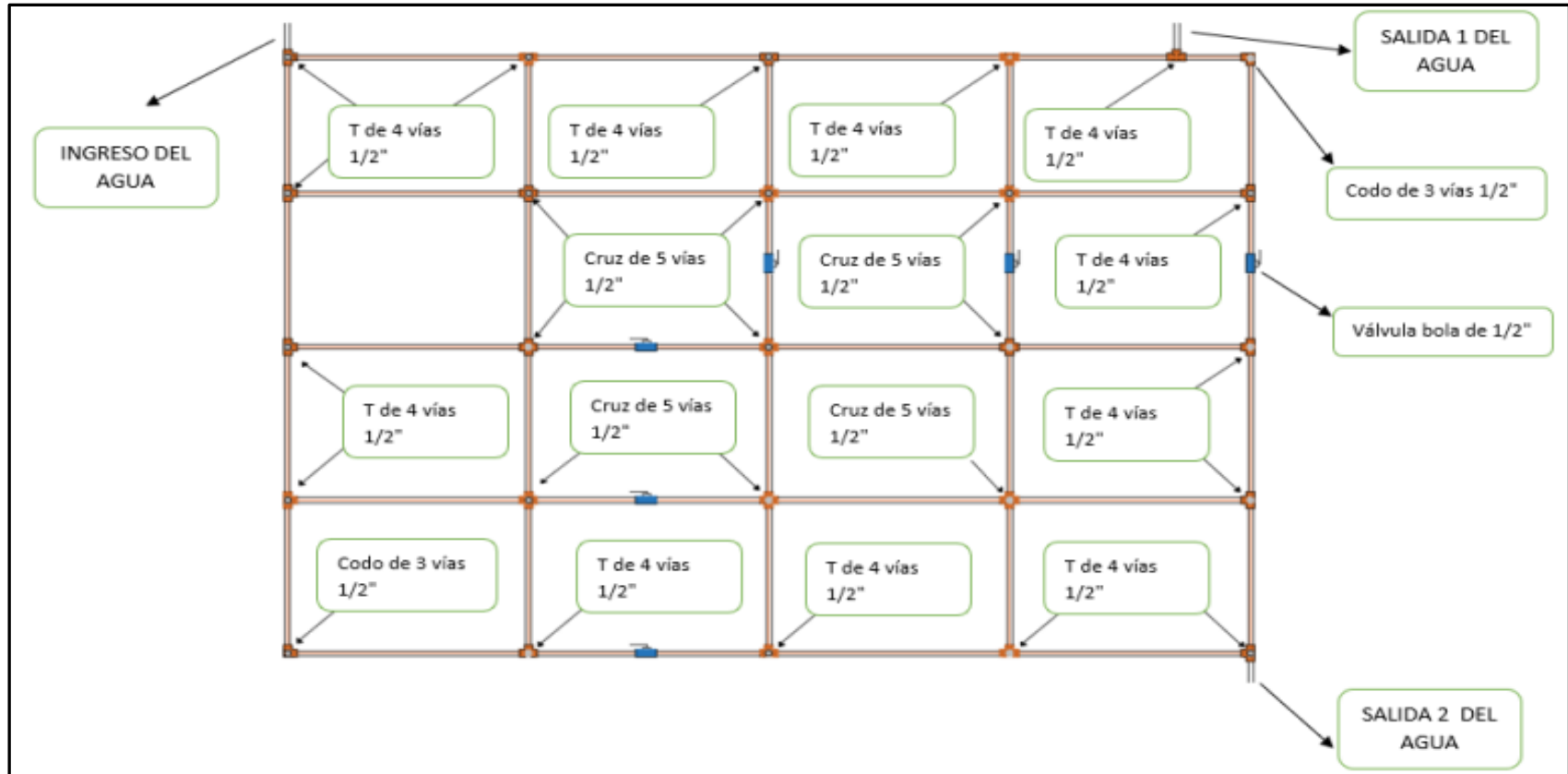


Ilustración 22: Sistema en Malla

(Vista en Planta)

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

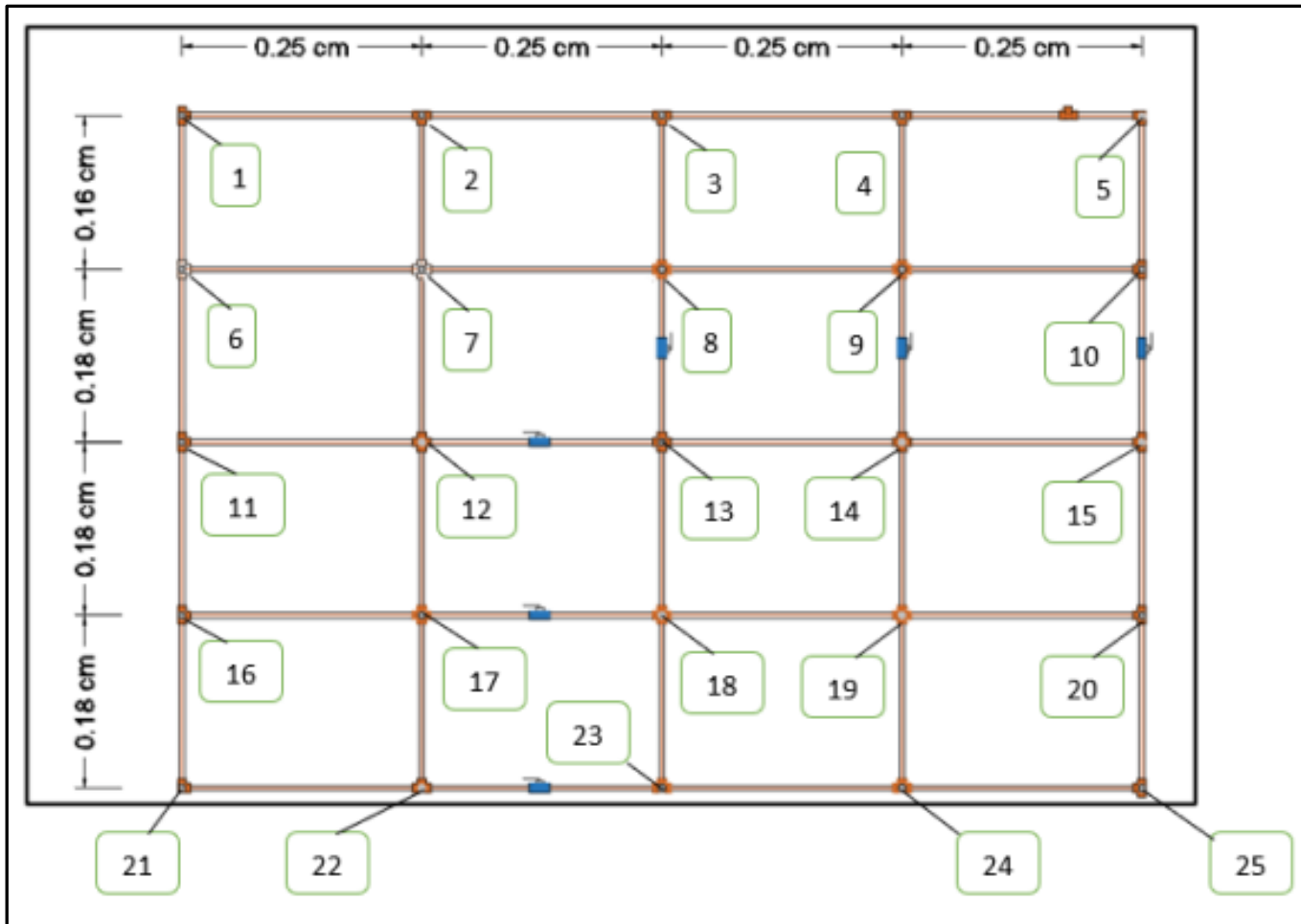


Ilustración 23: Dimensiones del Sistema en Malla y los nudos del sistema (etiqueta numérica)

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

El equipo está conformado por los siguientes elementos:

- Tubería y accesorios (codos, té, cruces y válvulas) CPVC, (1/2”).
- Tanques de almacenamiento (para succión).
- Bomba Centrífuga (1/2 HP).
- Ramales para medir la presión en los nudos.
- Líneas de descarga (incluye tanques para medición volumétrica).
- Equipo de medición:
 - ❖ Tubos Piezométricos.
 - ❖ Modelación en EPANET.

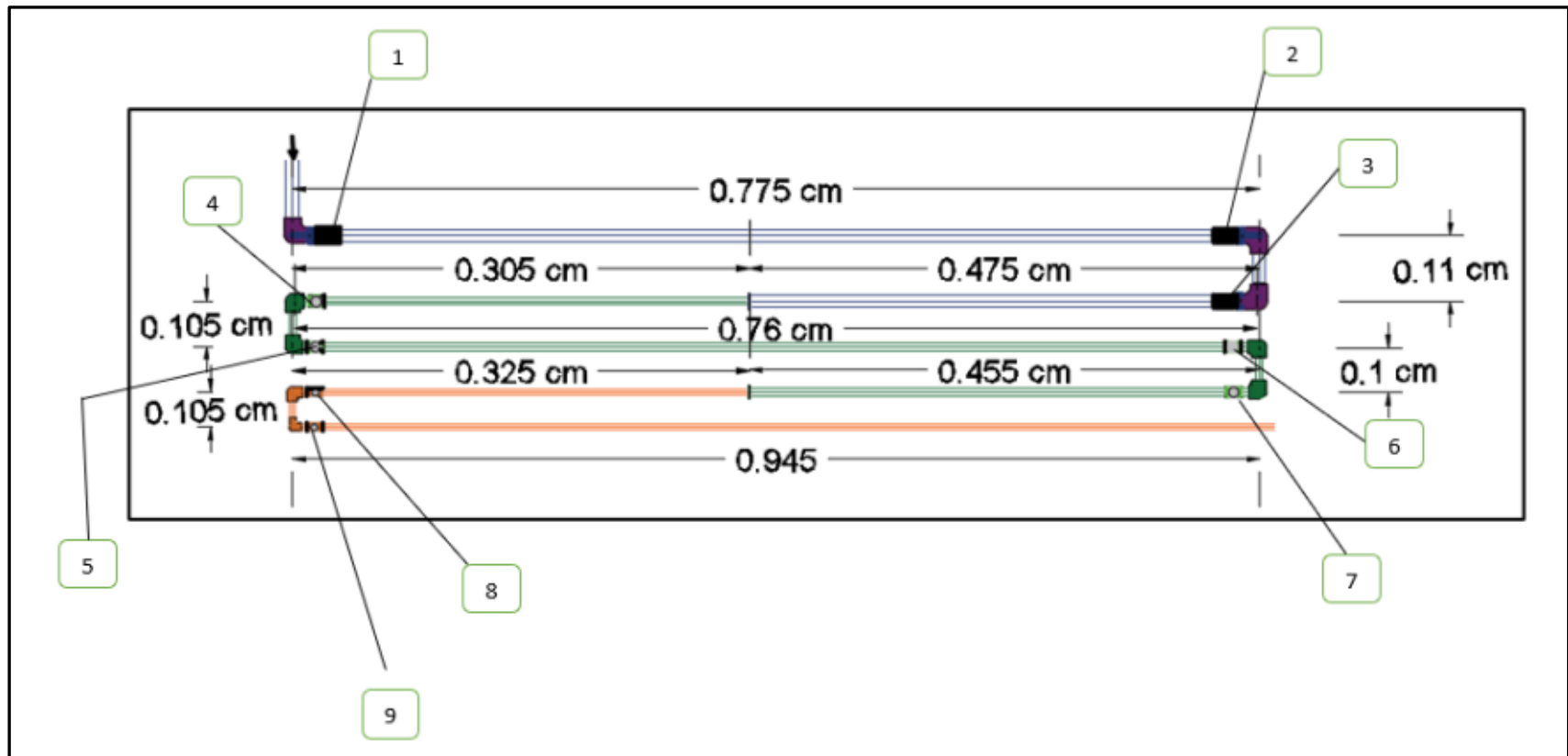


Ilustración 25: Dimensiones del Sistema en Serie y los nudos de control en el sistema (etiqueta numérica)

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

El equipo está conformado por los siguientes elementos:

- Tuberías de CPVC (1, $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de pulgada).
- Accesorios de CPVC (codos, reducciones y té).- Collarines (1 y $\frac{3}{4}$ de pulgada).
- Tanques de almacenamiento (para succión).
- Bomba Centrífuga (1/2 HP).
- Ramales para medir la presión en los nudos.
- Líneas de descarga (incluye tanques para medición volumétrica).
- Equipo de medición:
 - ❖ Tubos Piezométricos.
 - ❖ Modelación en EPANET.

3.2.3 Sistema en Paralelo:

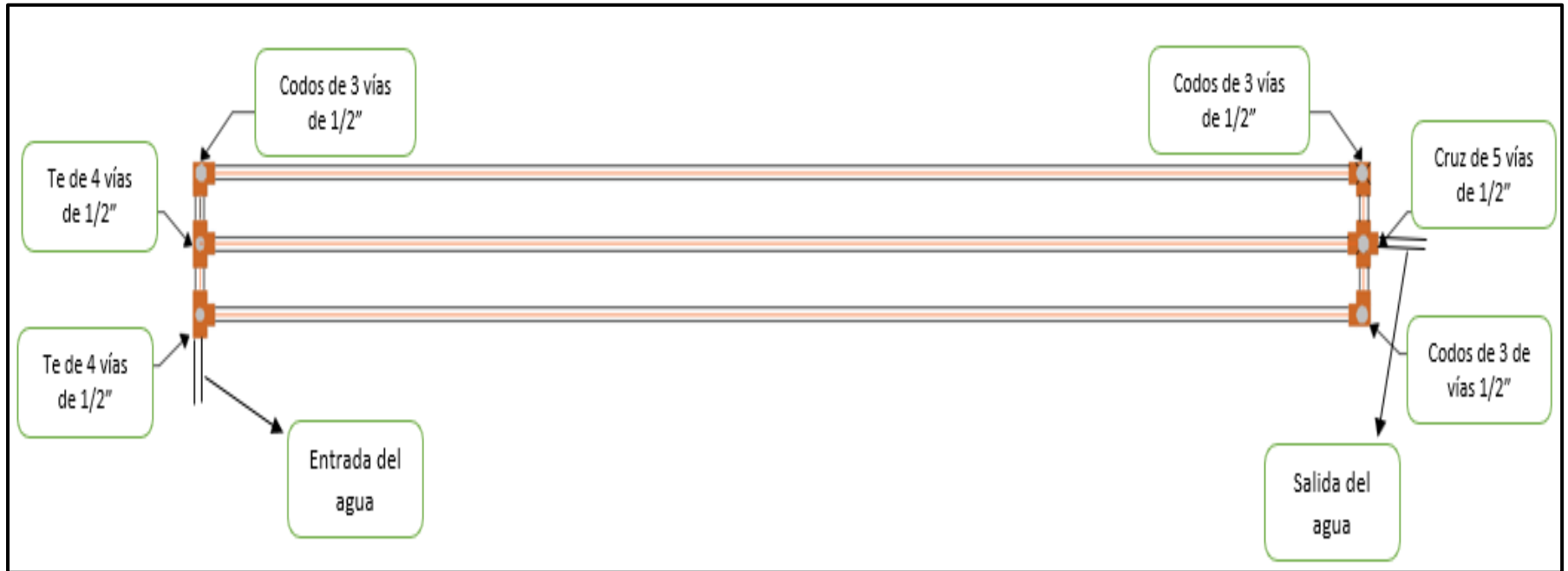


Ilustración 26: Sistema en Paralelo

(Vista en Planta)

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

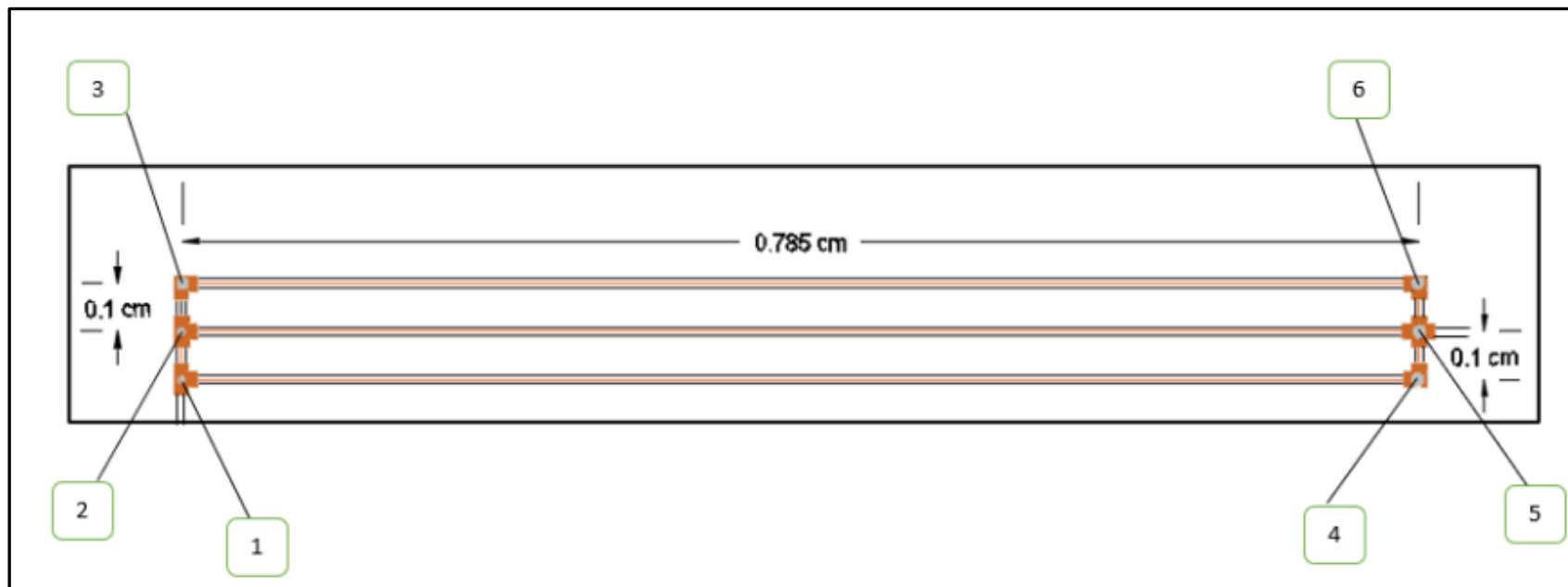


Ilustración 27: Dimensiones del Sistema en Paralelo y los nudos de control en el sistema (etiqueta numérica)

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

El equipo está conformado por los siguientes elementos:

- Tubería y accesorios (codos, cruces y válvulas) CPVC, (1/2 pulgada).
- Tanques de almacenamiento (para succión).
- Bomba Centrífuga (1/2 HP).
- Ramales para medir la presión en los nudos.
- Líneas de descarga (incluye tanques para medición volumétrica).
- Equipo de medición:
 - Tubos Piezométricos.
 - Modelación en EPANET.

3.3 Calibración y pruebas del modelo

Para la calibración del modelo se realizaron mediciones en los tres sistemas, tanto en piezómetros, manómetros y EPANET, donde se han comparado los resultados de cada sistema en el capítulo 4 se observa los resultados de los porcentajes de error obtenidos por cada sistema de medición.

En el caso de los piezómetros se realizó la regulación del caudal de ingreso mediante la graduación de la apertura de las válvulas bola y de compuerta con la finalidad de reducir el porcentaje de error; en el caso de la válvula de compuerta se ha realizado de dos a tres vueltas de cierre para la regulación del caudal.

3.4 Verificación del Modelo Hidráulico

Para la verificación del modelo se realizará la simulación en el software de EPANET con los datos obtenidos en cada nudo de los sistemas en malla, serie y paralelo; considerando principalmente el volumen de cada tanque y el tiempo que tarda en estabilizarse el caudal que circula por cada uno de ellos.

A continuación, se presenta los esquemas que se ha utilizado para la simulación en EPANET de cada sistema:

1. Sistema en Malla (Abiertas las válvulas internas)

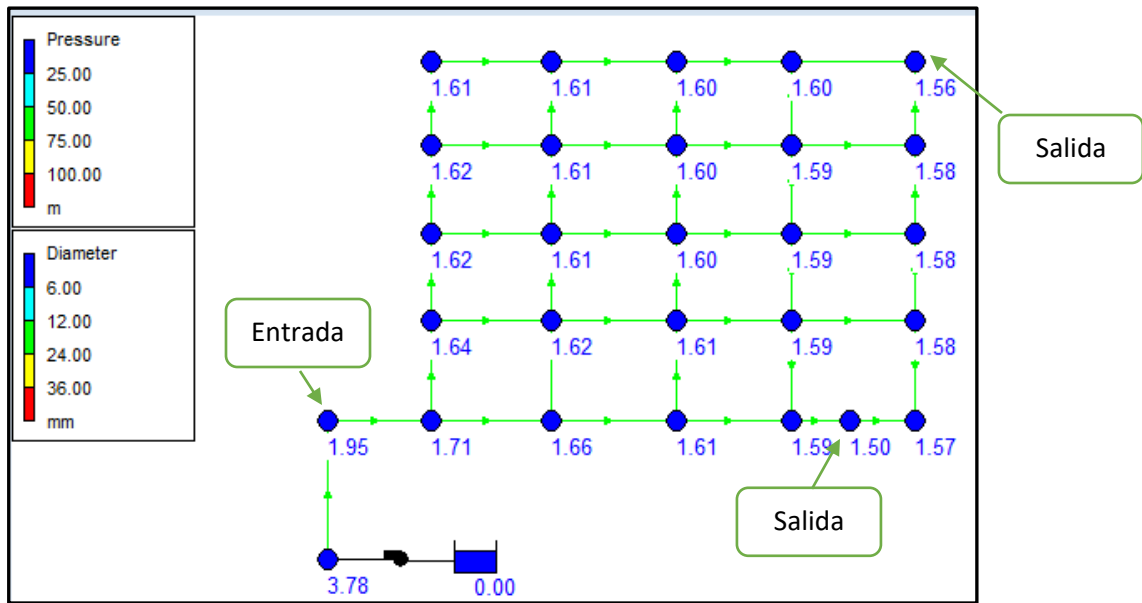


Ilustración 28: Resultado de simulación en Malla Abierta

En la ilustración 28 se observa los resultados del esquema de la malla abierta, colocando una tubería de 12.7 mm equivalente a 1/2 pulgada en todo el sistema, además se corrió con una demanda base de 0.28 litros/segundo en el ingreso, la cual se obtuvo de la división entre el volumen promedio de los dos tanques y el tiempo en que tardo estabilizarse los dos tanques, además en las dos salidas de desfogeo se colocó una demanda base de 0.14, con un coeficiente de Hazen Williams de 140.

2. Sistema en Malla (Cerradas las válvulas internas)

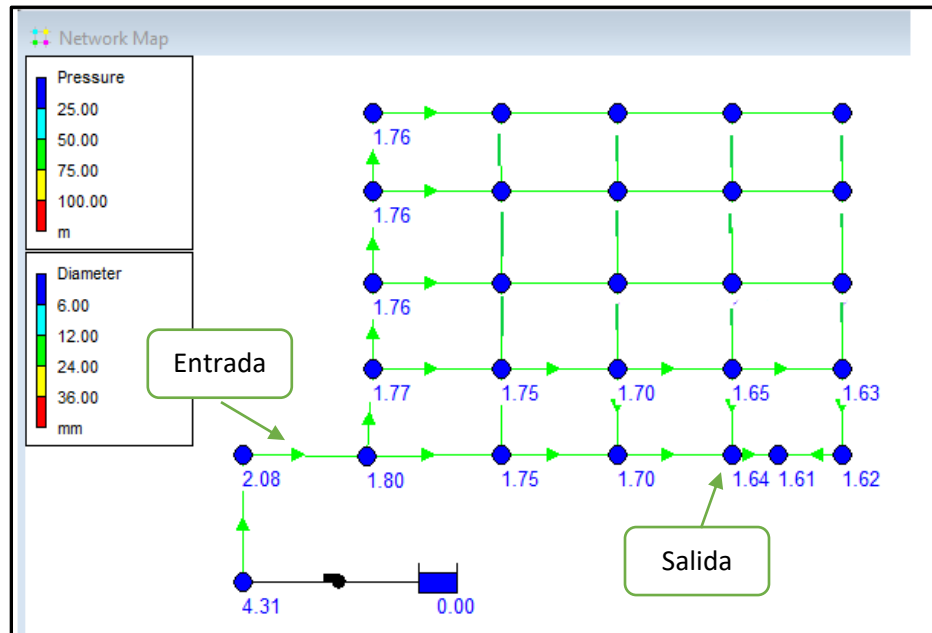


Ilustración 29: Resultados del Sistema en Malla Carrada las válvulas internas

En la ilustración 29 se observa los resultados del esquema de la malla cerrada las válvulas internas, colocando una tubería de 12.7 mm equivalente a 1/2 pulgada en todo el sistema, además se corrió con una demanda base de 0.34 litros/segundo en el ingreso y salida del sistema; con una regulación de la válvula de compuerta ubicada antes del ingreso al sistema, dando dos giros de apertura de la válvula ya que previamente esta debe estar cerrada completamente, la demanda se obtuvo de la división entre el volumen promedio de los dos tanques y el tiempo en que tardo estabilizarse los dos tanques, además, con un coeficiente de Hazen Williams de 140.

3. Sistema en Serie

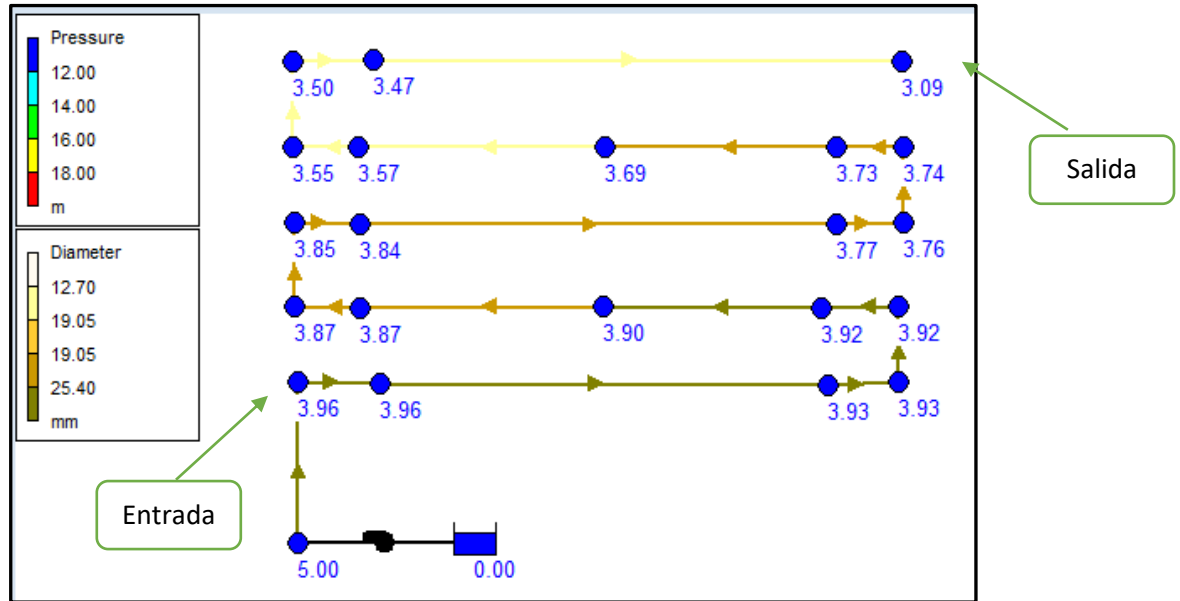


Ilustración 30: Resultado del Sistema en Serie

En la ilustración 30 se observa los resultados del esquema del sistema en serie, colocando una tubería al inicio de 25.4 mm equivalente a 1 pulgada, se reduce el siguiente tramo a 19.05 mm equivalente a 3/4 de pulgada y en el tramo final con reducción a 12.7 mm equivalente a 1/2 pulgada, además se corrió con una demanda base de 0.667 litros/segundo; con una regulación de la válvula de compuerta ubicada antes del ingreso al sistema en malla, dando dos giros y 1/4 de vuelta adicional; la válvula del sistema en serie se abrirá a 45° para regular el caudal de circulación por el sistema. La demanda se obtuvo de la división entre el volumen promedio de los tres tanques y el tiempo en que tardó estabilizarse los tres tanques, además, con un coeficiente de Hazen Williams de 140.

4. Sistema en Paralelo

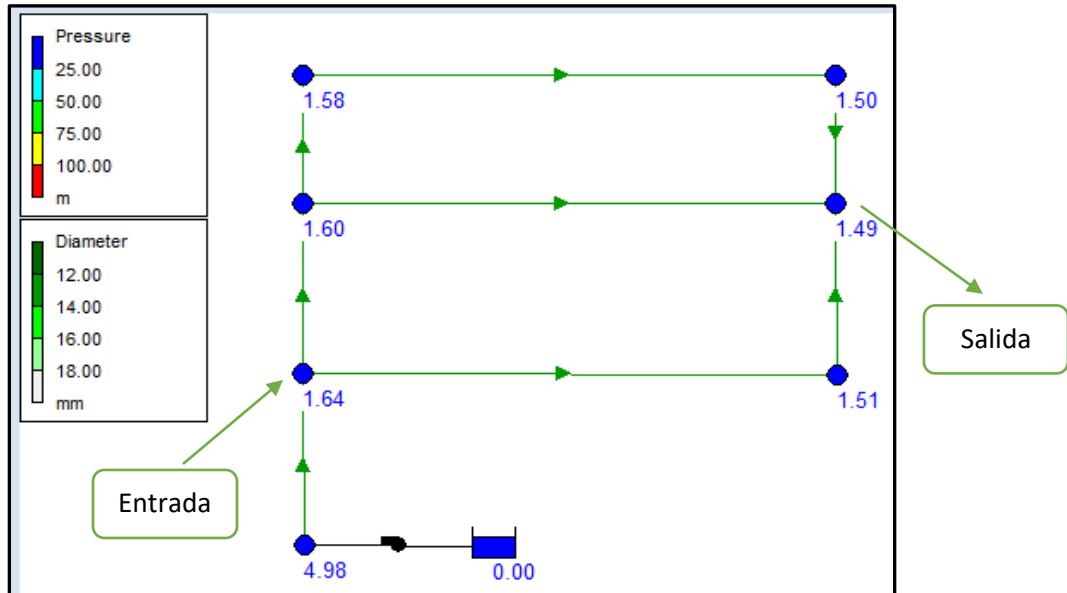


Ilustración 31: Resultados del Sistema en Paralelo

En la ilustración 31 se observa los resultados del esquema del sistema en paralelo, colocando una tubería de 12.7 mm equivalente a 1/2 pulgada en todo el sistema, además se corrió con una demanda base de 0.406 litros/segundo; con una regulación de la válvula de compuerta ubicada antes del ingreso al sistema, dando tres vueltas de la válvula de compuerta. La demanda se obtuvo de la división entre el volumen promedio de los tres tanques y el tiempo en que tardo estabilizarse los tres tanques, además, con un coeficiente de Hazen Williams de 140.

3.5 Manual de Mantenimiento y Operación del Modelo Hidráulico

MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DEL MODELO

OPERACIÓN:

1.1 INTRODUCCIÓN:

El equipo diseñado y construido que se presentará a continuación se encuentra conformado por tres sistemas de tuberías que son: en malla, serie y paralelo, con el cual se podrá determinar las presiones que se generan en estos sistemas en una escala pequeña y así poder identificar qué es lo que sucede dentro de los mismos con la regulación del flujo en cada uno de los sistemas.

1.2 CIRCUITO #1 (SISTEMA EN MALLA):

1.2.1 Partes:

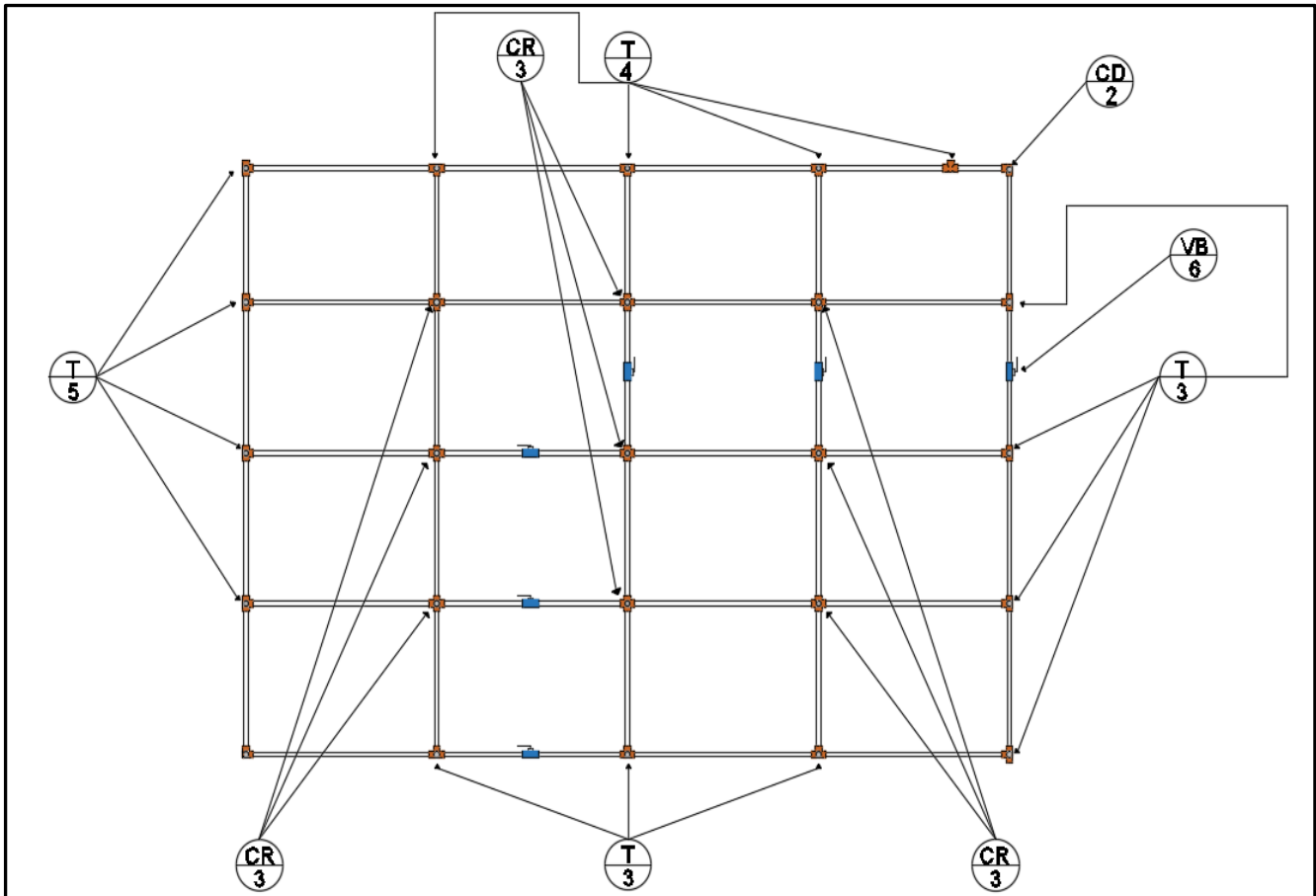


Ilustración 28: Esquema de partes del Sistema en Malla

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

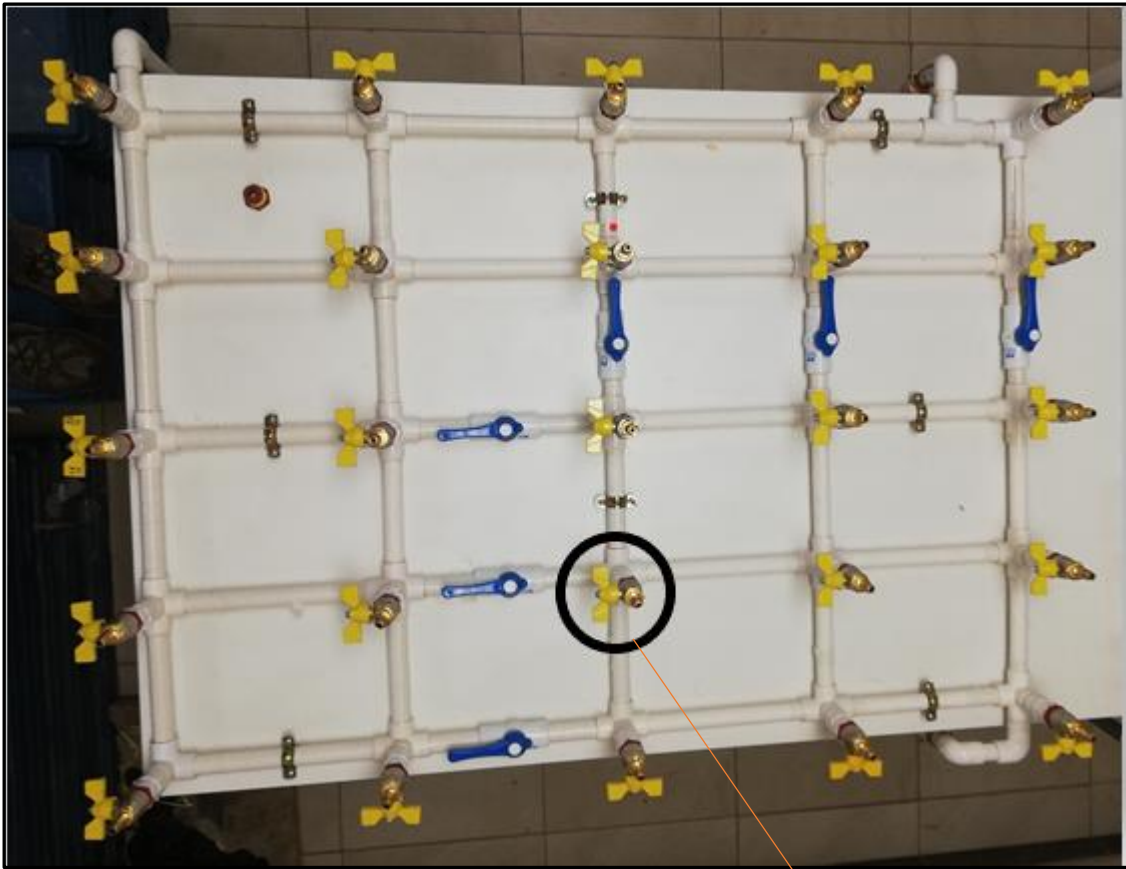


Ilustración 29: Elementos del Sistema en Malla

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Mini Válvula (25)



Ilustración 30: Elementos del Sistema en Malla

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Válvula de compuerta de
1/2 "
(2 giros para controlar el
flujo)

Bomba Centrífuga (1/2 HP)

Válvula Bola de 1/2", circuito
#1 (en sentido horizontal para
habilitar)

1.2.2 Materiales:

- Tubería de CPVC de 1/2 pulgada.
- Válvulas bola de 1/2 pulgada.
- Mini Válvulas de 1/4 pulgada.
- Reductores de 1/2 a 1/4 CPVC.
- Codos de CPVC de 3 vías.
- Tés de CPVC de 4 vías.
- Cruces de CPVC de 5 vías.
- Tanque de: Abastecimiento y Desfogue.

1.2.3 Procedimiento:

1. Verificar que la válvula del Circuito #1 se encuentre abierta, las de los otros circuitos cerrados y la válvula de compuerta debe estar cerrada con dos vueltas completas.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
4. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
5. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
6. Medir el volumen en los dos tanques de abastecimiento y auxiliar #3; realizar a su vez la toma del tiempo que tarda el fluido en estabilizarse en los tanques.
7. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.
8. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
9. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.
10. En el caso del sistema en malla cerrado las válvulas internas, se debe previamente cerrar la válvula de compuerta y posteriormente encender la bomba, a continuación, abrir las mini válvulas con los tubos piezométricos colocados sobre estos, finalmente abrir la válvula de compuerta hasta regular el paso del fluido hasta poder realizar las mediciones en los tubos piezométricos.

1.3 CIRCUITO #2 (SISTEMA EN SERIE):

1.3.1 Partes del Sistema:

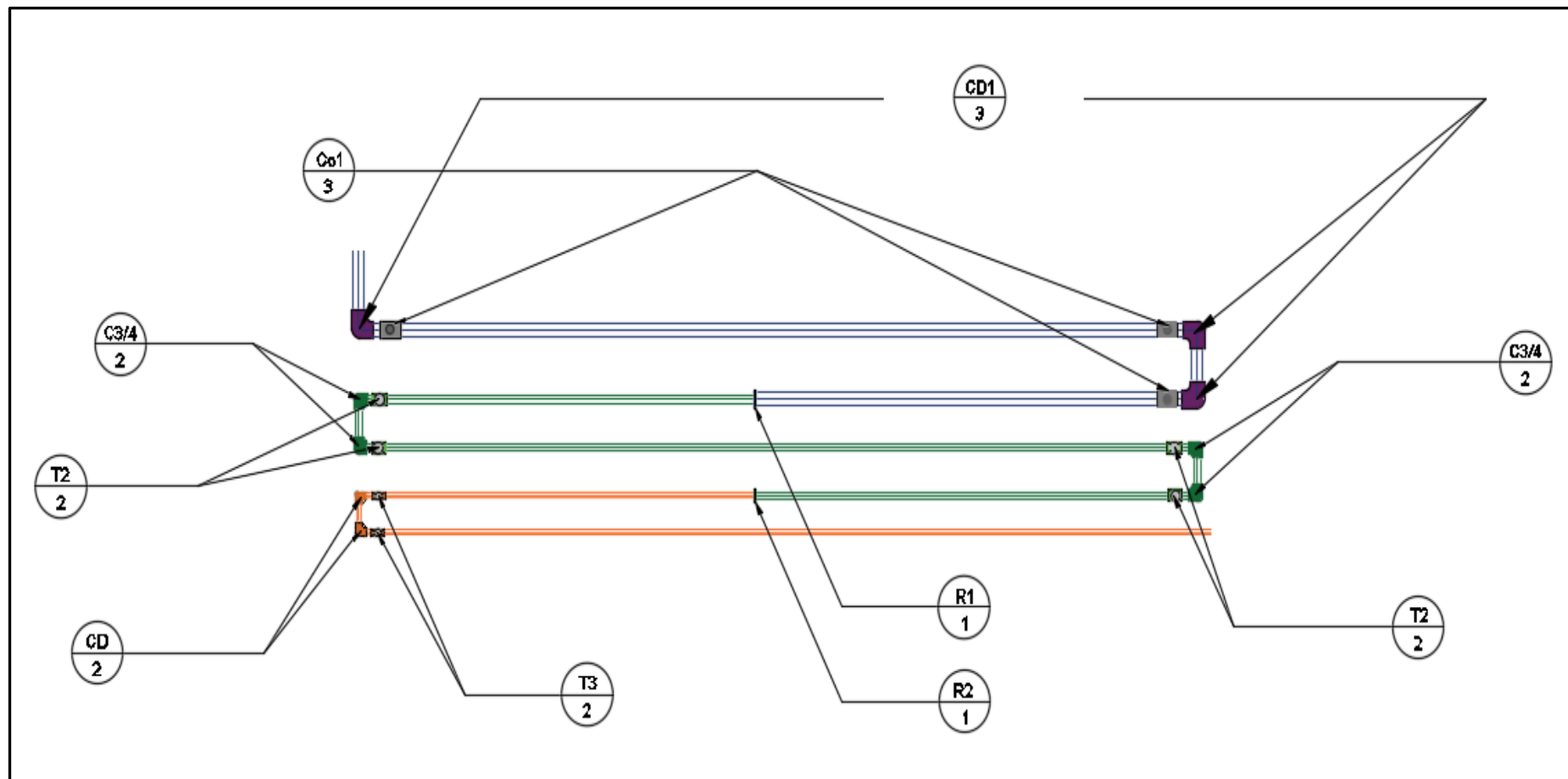


Ilustración 31: Esquema del Sistema en Serie

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

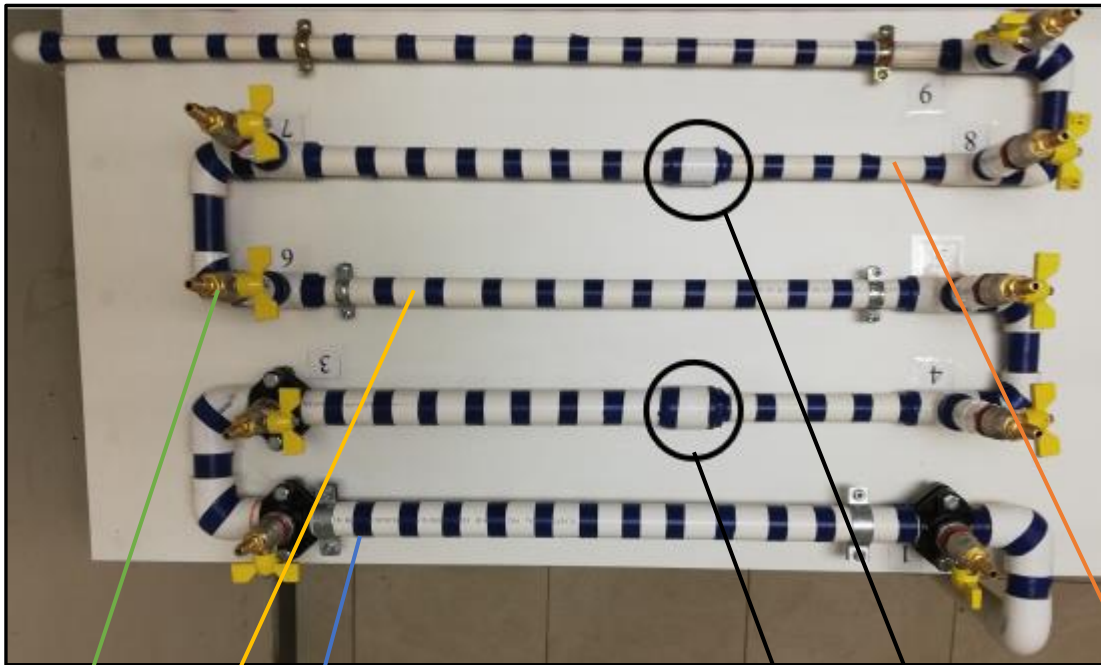


Ilustración 32: Elementos del Sistema en Serie

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Tubería de 1/2"

Reducción de 3/4" a 1/2"

Reducción de 1" a 3/4"

Tubería de 1"

Tubería de 3/4"

9 Mini Válvulas



Ilustración 33: Elementos del Sistema en Serie

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

Válvula Bola de 1",
circuito #2 (a 45° debe
estar abierta)

Válvula de compuerta de
1/2 "
(1 giros y 1/4 de vuelta,
para regular el flujo)

Válvula Bola de 1/2", circuito
#1 (abierta completamente)

1.3.2 Materiales:

- Tubería de CPVC 1".
- Tubería de CPVC 3/4".
- Tubería de CPVC 1/2".

- Collarines de 1" a 1/2".
- Tés de 3/4".
- Tés de 1/2 de 3 vías".
- Reductor de 1" a 3/4".
- Reductor de 3/4" a 1/2".
- Reductores de 1/2" a 1/4".
- Tanque de: Abastecimiento y Desfogue.

1.3.3 Procedimiento:

1. Verificar que la válvula del Circuito #2 se encuentre abierta a 45 ° y tanto la válvula bola del circuito #1 como la válvula de compuerta con una vuelta y 1/4 adicional para regular el flujo por el sistema en malla.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
4. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
5. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
6. Medir el volumen en los tanques y el tiempo que tarda el fluido en estabilizarse en los tanques.
7. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.
8. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
9. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.

1.4 CIRCUITO #3 (SISTEMA EN PARALELO):

1.4.1 Partes del Sistema:

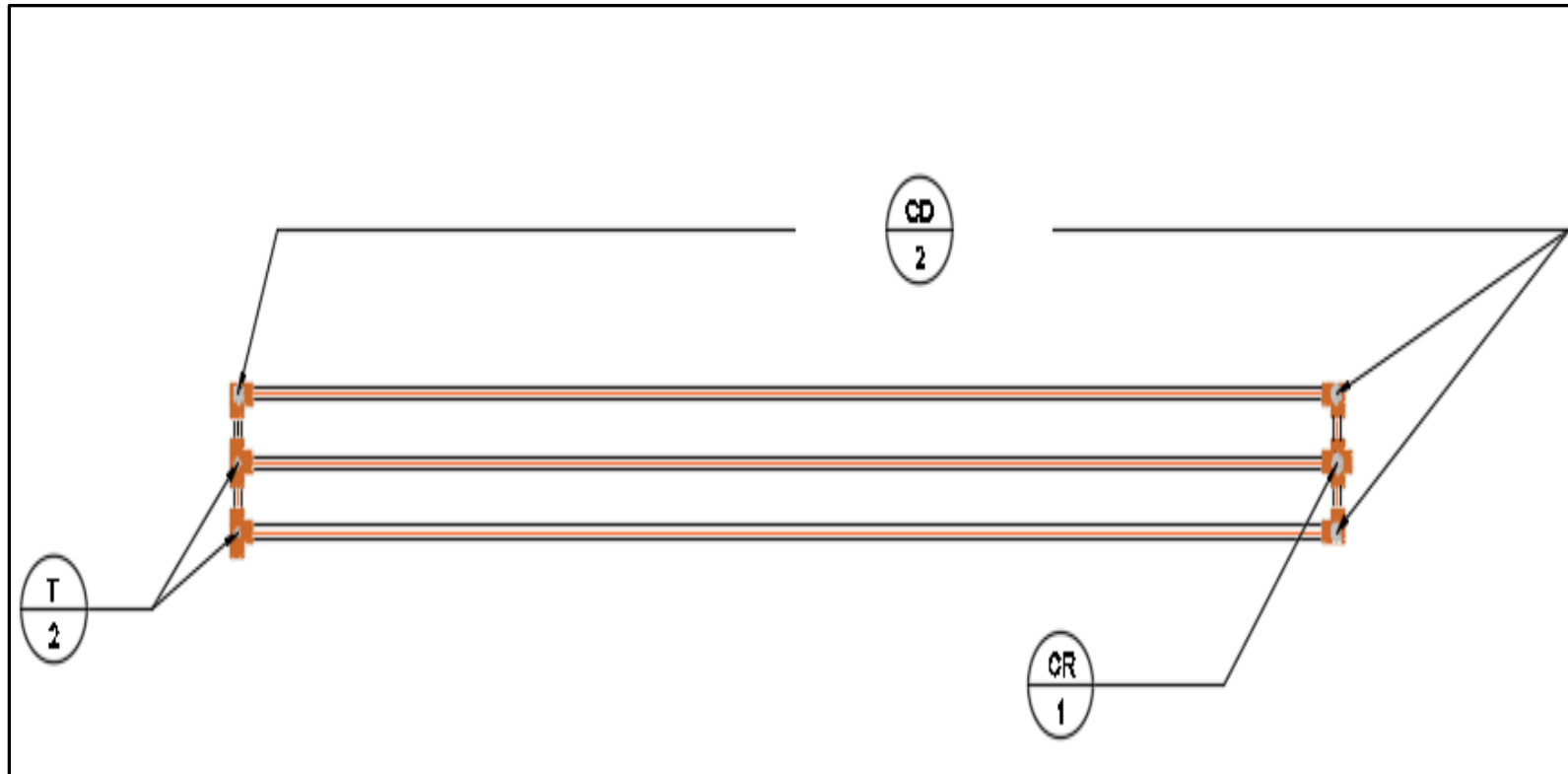
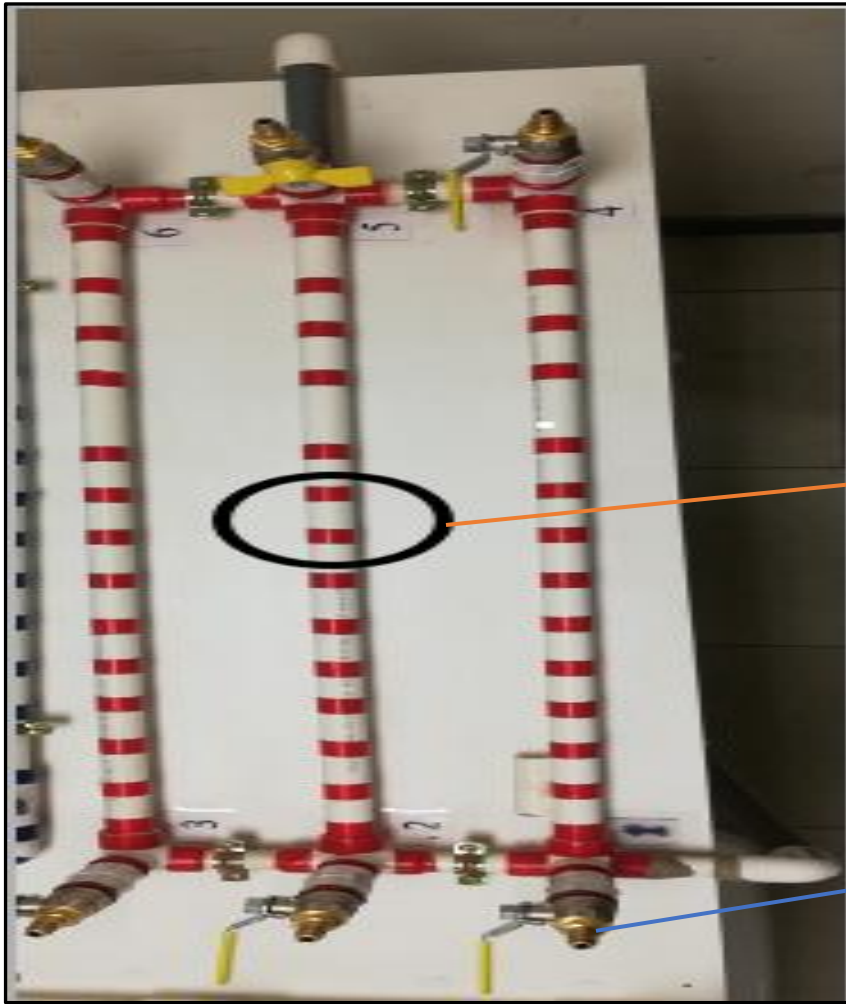


Ilustración 34: Esquema del Sistema en Paralelo

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)



Tubería de 1/2", todo el sistema

6 Mini Válvulas

Ilustración 35: Elementos del Sistema en Paralelo

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)



Válvula de compuerta de 1/2", circuito #1 (una vuelta completa y medio giro adicional)

Válvula Bola de 1/2", circuito #3 (abierto completamente)

Válvula Bola de 1/2", circuito #3 (a 45° grados abierto)

Ilustración 36: Elementos del Sistema en Paralelo

Fuente: (Samaniego Balseca, 2019)

1.4.2 Materiales:

- Tubería de CPVC 1/2".
- Collarines de 1" a 1/2".
- Té de 1/2" de 3 vías.
- Codos de 1/2" de 3 vías.
- Cruz de 1/2" de 5 vías.
- Tanque de: Abastecimiento y Desfogue.

1.4.3 Procedimiento:

1. Verificar que la válvula del Circuito #3 se encuentre abierta y de los otros circuitos cerrados, además verificar las dos válvulas de los tanques se encuentren habilitadas en sentido horizontal.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Medir el caudal en los tres tanques.
4. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
5. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
6. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
7. Medir el caudal en los tanques.
8. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.
9. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
10. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.

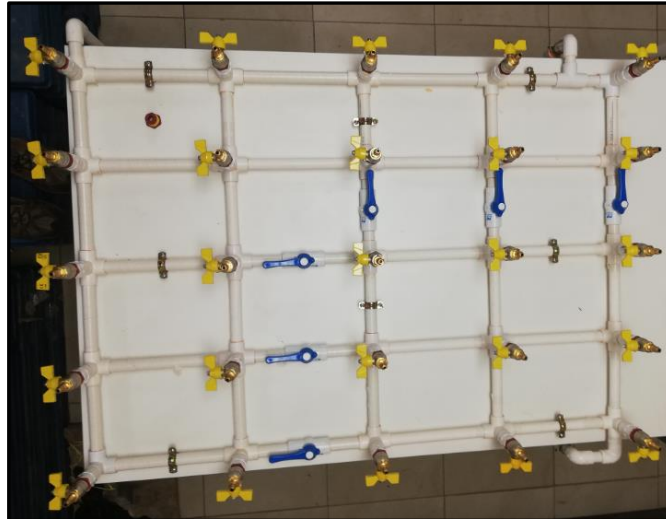
MANTENIMIENTO:

Ver el anexo que compete a la hoja del fabricante:

4. CAPÍTULO: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados obtenidos con el modelo

4.1.1 Sistema en Malla (Caso: Válvulas abiertas)



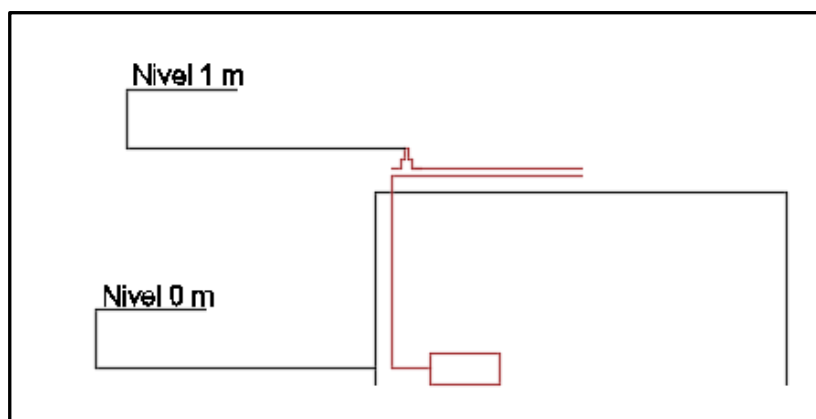
Sistema con las válvulas abiertas

Los resultados presentados a continuación son las mediciones expresadas en m.c.a y realizadas en cada uno de los nudos del sistema, con los tubos piezométricos:

CIRCUITO1	
MALLA ABIERTA	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
0.245	0.19
0.249	0.199
0.254	0.193
0.243	0.19
0.245	0.189
0.244	0.19
0.244	0.189
0.242	0.188
0.246	0.19
0.25	0.191
0.253	0.193
0.25	0.191
0.241	0.192
0.243	0.194
0.248	0.192
0.243	0.191
0.249	0.193

Tabla 5: Lecturas del nudo #1 y nudo #2 (Sistema en Malla-Caso: Abierto)

Fuente: (Balseca, 2019)



Perfil del modelo para los niveles de referencia considerados de las alturas

Esquema del perfil lateral donde se indica la consideración del 1 metro para sumar en la altura total con la lectura de los tubos piezométricos. Este esquema se utilizará como guía para el resto de los sistemas en la celda de Δ ALTURA.

Por el tamaño de la tabla se presentará a continuación las tablas resumen de los 25 nudos analizados del Sistema en Malla, incluyendo el porcentaje de error comparando con el software EPANET:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 2		
0.254	0.199	1	1.254	1.199	1.55	1.5	19.097%	20.067%
MÍN	MÍN							
0.241	0.188	1	1.241	1.188			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 2 EPANET)
							19.935%	20.800%

Tabla 6: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-2)

Fuente: (Balseca)

Nudo 1-3 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 3 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 3		
0.251	0.139	1	1.251	1.139	1.55	1.45	19.290%	21.448%
MÍN	MÍN							
0.241	0.13	1	1.241	1.13			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 3 EPANET)
							19.935%	22.069%

Tabla 7: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-3)

Fuente: (Balseca)

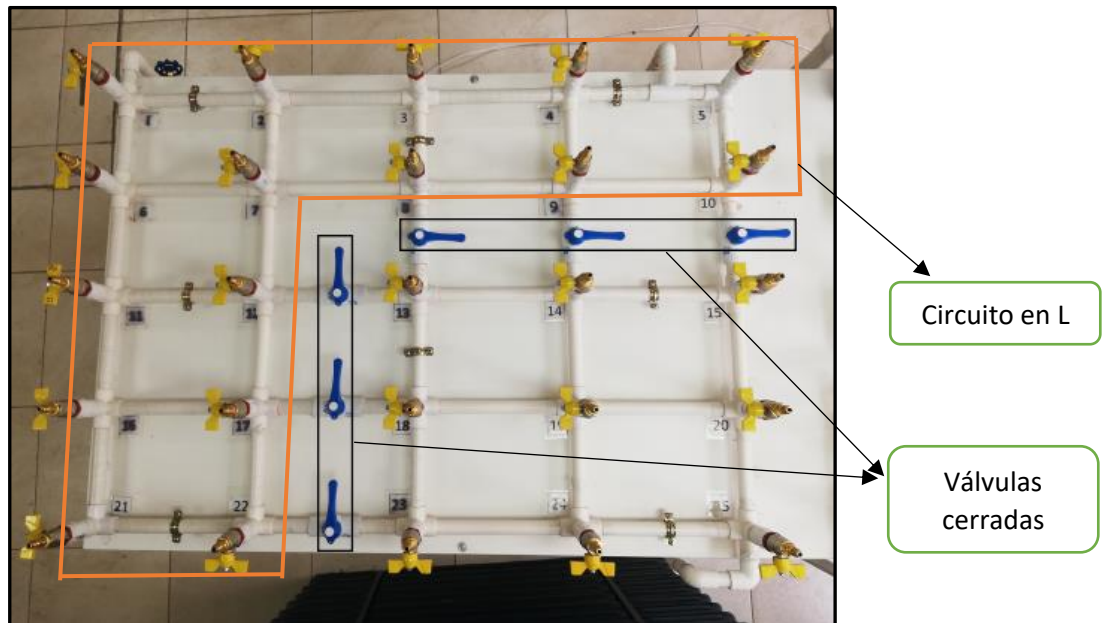
Nudo 1-4 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 4 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 4 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 4		
0.251	0.111	1	1.251	1.111	1.55	1.43	19.290%	22.308%
MÍN	MÍN							
0.241	0.107	1	1.241	1.107			19.935%	22.587%

Tabla 8: Porcentaje de error entre Piezómetro y EPANET (Nudos 1-4)

De la tabla 5 se obtiene los valores máximos y mínimos como se muestra en la tabla 6 de cada piezómetro que se ha realizado las lecturas, a continuación, se tiene un Δ ALTURA que igual a 1 m.c.a, que se considera la altura desde el eje de la bomba hacia la punta de la mini válvula donde se inserta la manguera del piezómetro, posteriormente se suman tanto la lectura del piezómetro con el Δ, obteniendo así la altura total; se procede a realizar el esquema del sistema #1 en EPANET y se coloca en el diseño el caudal obtenido en la práctica, con lo que se obtiene en la simulación la presión que se ejerce en los nudos del modelo real. Se procede a la comparación de la siguiente manera: $\% \text{ de error} = \frac{|\text{valor real} - \text{valor aproximado}|}{\text{valor real}}$, donde el valor real es considerado el del EPANET y el aproximado es la lectura en el piezómetro dando así los porcentajes que se observan en las tablas en la parte superior.

El resto de las tablas de resumen y lecturas se encuentran en el ANEXO

4.1.2 Sistema en Malla (Caso: Válvulas internas cerradas)



Posición de las válvulas cerradas y circuito en L

En este caso se ha inhabilitado las 6 válvulas internas del circuito en malla, dando como resultado un circuito en L y reduciendo un punto de salida del sistema. Los resultados de las lecturas se presentan a continuación:

CIRCUITO1	
MALLA CERRADA (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO6
(m.c.a)	(m.c.a)
0.863	0.863
0.864	0.86
0.861	0.857
0.865	0.859
0.862	0.86
0.864	0.862
0.866	0.856
0.863	0.857
0.864	0.859
0.861	0.857
0.865	0.859
0.862	0.86
0.864	0.862
0.866	0.856
0.863	0.86
0.864	0.859
0.861	0.857

Tabla 9: Lecturas del nudo #1 y nudo #6 (Sistema en Malla-Caso: Cerrado)

Fuente: (Balseca, 2019)

Por el tamaño de la tabla se presentará a continuación las tablas resumen de los 16 nudos analizados del Sistema en Malla Cerrada, incluyendo el porcentaje de error comparando con el software EPANET:

Nudo 1-6 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 6 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 6 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 6		
0.866	0.863	1	1.866	1.863	1.8	1.77	3.667%	5.254%
MÍN	MÍN							
0.861	0.851	1	1.861	1.851				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							3.389%	4.576%

Tabla 10: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-6)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-11 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 11 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 11 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 11		
0.844	0.873	1	1.844	1.873	1.8	1.76	2.444%	6.420%
MÍN	MÍN							
0.832	0.862	1	1.832	1.862				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							1.778%	5.795%

Tabla 11: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-11)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-21 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 21 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 21 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 21		
0.937	0.988	1	1.937	1.988	1.8	1.76	7.611%	12.955%
MÍN	MÍN							
0.922	0.972	1	1.922	1.972				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							6.778%	12.045%

Tabla 12: Porcentaje de error entre el Piezómetro y EPANET (Nudos 1-21)

Fuente: (Balseca, 2019)

De la tabla 9 se obtiene los valores máximos y mínimos y en la tabla 10 se analiza los datos máximos y mínimos de cada piezómetro que se ha realizado las lecturas, a continuación, se tiene un Δ ALTURA que igual a 1 m.c.a, que se considera la altura desde el eje de la bomba

hacia la punta de la mini válvula donde se inserta la manguera del piezómetro, posteriormente se suman tanto la lectura del piezómetro con el Δ , obteniendo así la altura total; se procede a realizar el esquema del sistema #1 en EPANET y se coloca en el diseño el caudal obtenido en la práctica, con lo que se obtiene en la simulación la presión que se ejerce en los nudos del modelo real. Se procede a la comparación de la siguiente manera: $\% \text{ de error} = \frac{|\text{valor real} - \text{valor aproximado}|}{\text{valor real}}$, donde el valor real es considerado el del EPANET y el aproximado es la lectura en el piezómetro dando así los porcentajes que se observan en las tablas 10 hasta la 12.

El resto de las tablas resumen y de lecturas se encuentran en el ANEXO

4.1.3 Sistema en Serie (Caso: Medición con piezómetros)



Sistema en serie



Piezómetros

En el sistema en serie, está constituido por tuberías de distinto diámetro, iniciando con 1 pulgada y haciendo transición en ciertos a $\frac{3}{4}$ hasta llegar al final con $\frac{1}{2}$ pulgada. Dicho sistema cuenta con 9 puntos de control que se encuentran a una distancia corta de los nudos; por medio de collarines se ha podido colocar los puntos de control en la tubería de 1 pulgada y de $\frac{3}{4}$ de pulgada.

A continuación, se presenta los resultados de las lecturas realizadas con los piezómetros:

CIRCUITO2	
SISTEMA EN SERIE (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
1.344	1.334
1.342	1.331
1.349	1.338
1.347	1.342
1.346	1.344
1.349	1.34
1.349	1.342
1.347	1.337
1.348	1.334
1.35	1.337
1.354	1.335
1.357	1.343
1.358	1.341
1.354	1.334
1.349	1.336
1.354	1.333
1.349	1.333
1.355	1.34
1.357	1.337
1.354	1.338

Tabla 13: Lecturas de los nudos #1 y #2 (Sistema en Serie)

Fuente: (Balseca, 2019)

Por el tamaño de la tabla se presentará a continuación las tablas resumen de los 9 nudos analizados del Sistema en Serie, incluyendo el porcentaje de error comparando con el software EPANET:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 2		
1.358	1.349	1	2.358	2.349	3.96	3.93	40.455%	40.229%
MÍN	MÍN							
1.342	1.331	1	2.342	2.331			40.859%	40.687%

Tabla 14: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-2)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-3 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 3 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 3		
1.332	1.299	1	2.332	2.299	3.96	3.92	41.111%	41.352%
MÍN	MÍN							
1.325	1.291	1	2.325	2.291				
							41.288%	41.556%

Tabla 15: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-3)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-4 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 4 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 4 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 4		
1.361	1.239	1	2.361	2.239	3.96	3.87	40.379%	42.145%
MÍN	MÍN							
1.352	1.231	1	2.352	2.231				
							40.606%	42.351%

Tabla 16: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-4)

Fuente: (Balseca, 2019)

De la tabla 13 se obtiene los valores máximos y mínimos; como se muestra en la tabla 15 de cada piezómetro que se ha realizado las lecturas, a continuación, se tiene un Δ ALTURA que igual a 1 m.c.a, que se considera la altura desde el eje de la bomba hacia la punta de la mini válvula donde se inserta la manguera del piezómetro, posteriormente se suman tanto la lectura del piezómetro con el Δ, obteniendo así la altura total; se procede a realizar el esquema del sistema #2 en EPANET y se coloca en el diseño el caudal obtenido en la práctica, con lo que se obtiene en la simulación la presión que se ejerce en los nudos del modelo real. Se procede a la comparación de la siguiente manera: $\% \text{ de error} = \frac{|\text{valor real} - \text{valor aproximado}|}{\text{valor real}}$, donde el valor real es considerado el del EPANET y el aproximado es la lectura en el piezómetro dando así los porcentajes que se observan en las tablas 14 hasta la 16.

El resto de las tablas de resumen y de lecturas se encuentran en el ANEXO

4.1.4 Sistema en Paralelo (Medición con Piezómetros)



Sistema en Paralelo



Piezómetros

En este caso se ha realizado las mediciones en los 6 nudos del sistema con la utilización de los tubos piezométricos, a continuación, se presenta las lecturas realizadas:

CIRCUITO3	
SISTEMA EN SERIE (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
0.852	0.866
0.853	0.864
0.857	0.865
0.853	0.866
0.852	0.864
0.851	0.867
0.856	0.869
0.857	0.868
0.853	0.864
0.852	0.867
0.855	0.867
0.857	0.868
0.852	0.869
0.854	0.867
0.851	0.868
0.852	0.868
0.854	0.867
0.853	0.868

Tabla 17: Lecturas de los nudos #1 y #2 (Sistema en Paralelo)

Fuente: (Balseca, 2019)

Por el tamaño de la tabla se presentará a continuación las tablas resumen de los 6 nudos analizados del Sistema en Paralelo, incluyendo el porcentaje de error comparando con el software EPANET:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 2		
0.857	0.869	1	1.857	1.869	1.64	1.6	13.232%	16.813%
MÍN	MÍN							
0.851	0.864	1	1.851	1.864			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 2 EPANET)
							12.866%	16.500%

Tabla 18: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-2)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-3 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 3 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 3		
0.863	0.902	1	1.863	1.902	1.64	1.58	13.598%	20.380%
MÍN	MÍN							
0.854	0.895	1	1.854	1.895			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 3 EPANET)
							13.049%	19.937%

Tabla 19: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-3)

Fuente: (Balseca, 2019)

Nudo 1-4 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 4 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 4 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 4		
0.859	0.839	1	1.859	1.839	1.64	1.51	13.354%	21.788%
MÍN	MÍN							
0.852	0.834	1	1.852	1.834			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 3 EPANET)
							12.927%	21.457%

Tabla 20: Porcentaje de error entre el Piezómetro y el EPANET (Nudos 1-4)

Fuente: (Balseca, 2019)

De la tabla 17 se obtiene los valores máximos y mínimos; como se muestra en la tabla 18 de cada piezómetro que se ha realizado las lecturas, a continuación, se tiene un Δ ALTURA que igual a 1 m.c.a, que se considera la altura desde el eje de la bomba hacia la punta de la mini válvula donde se inserta la manguera del piezómetro, posteriormente se suman tanto la lectura del piezómetro con el Δ , obteniendo así la altura total; se procede a realizar el esquema del sistema #3 en EPANET y se coloca en el diseño el caudal obtenido en la práctica, con lo que se obtiene en la simulación la presión que se ejerce en los nudos del modelo real. Se procede a

la comparación de la siguiente manera: $\% \text{ de error} = \frac{|\text{valor real} - \text{valor aproximado}|}{\text{valor real}}$, donde el valor real es considerado el del EPANET y el aproximado es la lectura en el piezómetro dando así los porcentajes que se observan en las tablas 18 hasta la 20.

El resto de las tablas de resumen y de lecturas se encuentran en el ANEXO

4.2 Cálculos hidráulicos

4.2.1 Simulación de malla cerrada (caso: válvulas internas cerradas) en EPANET

En la simulación de la malla cerrada las válvulas internas, presentada a continuación se realizó las siguientes consideraciones:

1. Antes de los nudos de control 13, 18, 23, en el siguiente sentido de izquierda a derecha se hallarán cerradas y en los nudos 13, 14 y 15 en sentido de arriba hacia abajo tomando en consideración la entrada al sistema como la parte superior, serán inhabilitadas las válvulas.
2. Se utilizó un coeficiente de Hazen Williams de 140 .
3. Los nudos analizados son 16 en total.
4. El caudal de ingreso es el mismo caudal de salida, considerando este caudal medido en laboratorio de 0.34 litros/segundo.
5. Se reguló en el modelo el flujo con la válvula de compuerta con 1 giro y 1/4 de vuelta adicional, considerando en este caso que la válvula se va dando giros de apertura ya que al inicio se encuentra cerrada completamente.
6. La circulación del caudal recorrerá un circuito en forma de “L”, que se presenta a continuación: decisión

del sistema en malla y además de la habilitación de los tres tanques con la finalidad de hallar el error más pequeño posible al momento de comparar los dos sistemas de medición. Se comprueba así, en este modelo que no hay posibilidad de utilizar EPANET con Hazen Williams para tuberías con diámetros inferiores a 2”.

Debido a los porcentajes altos de error en medición que se produjeron al realizar la comparación entre los resultados de los nudos en la simulación del EPANET y en el modelo físico con los manómetros, considero que no se tome en consideración realizar la comparación entre estos dos sistemas de medición. Estos resultados se encuentran en la parte de anexos para su verificación.

5. CAPÍTULO: PRÁCTICAS DE LABORATORIO

5.1 Selección de las prácticas:

5.1.1 Ensayo de presión en un sistema en malla abierta

Este ensayo tiene como objetivo medir la presión en cualquiera de los 25 nudos ubicados en el sistema, mediante dos tipos de medición con piezómetros y simulación con EPANET, con lo cual determinar el caudal y el porcentaje de error existente entre los dos tipos de medición.

5.1.2 Ensayo de presión en un sistema en malla cerrada

Este ensayo tiene como objetivo medir la presión en cualquiera de los 16 nudos ubicados en el sistema en malla con un tramo de circulación cerrado por válvulas internas; determinar así la presión que circula por el circuito mediante los tres sistemas de medición de piezómetros, manómetros y simulación en EPANET, con lo cual determinar el porcentaje de error entre los tres tipos de medición.

5.1.3 Ensayo de presión en un sistema en serie

La finalidad del ensayo es medir la presión en los 9 nudos que está conformado el sistema, de tal forma obtener el caudal de circulación por circuito en serie y obtener el porcentaje de error entre los tres sistemas de medición de piezómetros, manómetros y simulación en EPANET.

5.1.4 Ensayo de presión en un sistema en paralelo

La finalidad del ensayo es medir la presión en los 6 nudos que está conformado el sistema, de tal forma obtener el caudal de circulación por circuito en paralelo y obtener el porcentaje de error entre los tres sistemas de medición de piezómetros, manómetros y simulación en EPANET.

5.2 Diseño de la guía de Laboratorio:



Pontificia Universidad
Católica del Ecuador

FACULTAD DE
INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

LABORATORIO DE
HIDRÁULICA

GUÍA DE
PRÁCTICAS DE
LABORATORIO

1. PRINCIPALES ASPECTOS Y NORMAS PARA LOS USUARIOS DEL LABORATORIO

1.1 Aspectos generales de la seguridad en el laboratorio

1.1.1 Prácticas en el Laboratorio

Objetivo: Dar a conocer a los estudiantes, el uso adecuado del equipo en el laboratorio para el desarrollo de sus prácticas.

- 1) Para el ingreso y salida de los estudiantes, lo realizarán por el acceso determinado por el laboratorio y en el horario establecido por el ingeniero a cargo, de tal manera que se ocupe el tiempo estipulado para la realización de la práctica.
- 2) Previo al ingreso del laboratorio, el estudiante deberá portar un mandil o el overol, además de los implementos necesarios como guantes, franela y gafas, según sea el caso.
- 3) El responsable del área entregará: el área, el equipo e instrumentales al ingeniero o estudiante designado por el mismo; quien reciba los equipos, deberá verificar el estado, limpieza y el registro de la práctica, posteriormente se firmará por el ingeniero y los estudiantes.
- 4) Al culminar la práctica, el estudiante verificará el estado del modelo, el área y se colocará los equipos de medición en un solo sitio.
- 5) En caso de que el responsable del área delegada observa algún daño o se halla sin limpieza en el equipo, inmediatamente deberá reportar al ingeniero responsable de la práctica.

1.1.2 Consideraciones principales de la vestimenta personal

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



- Botas con punta de acero.



➤ Guantes de caucho.



➤ Franela.



➤ Gafas.



1.2 Reglas para el comportamiento interno en el laboratorio

- I. El estudiante deberá ingresar al laboratorio con los materiales requeridos a la práctica y la vestimenta adecuada.
- II. Ingresar al laboratorio con el docente a cargo de forma ordenada y puntual.
- III. Se permitirá el uso celulares para el caso exclusivo del uso del cronómetro.
- IV. Prohibido ingresar con alimentos en el área de laboratorio.

1.3 Formato para la elaboración de informes de las prácticas

Nota: Los informes deberán ser entregados a mano con buena caligrafía y excelente ortografía; en hojas a cuadros y no a espacio seguido. En el informe los títulos deberán tener un color y el contenido otro color.

1. CARÁTULA:

Pontificia Universidad Católica del Ecuador

Facultad de Ingeniería

Escuela Civil

Laboratorio de Hidráulica/Sanitaria

Grupo N°. _____

Práctica N°. _____

Alumnos: (Registrar los integrantes pertenecientes al grupo designado, en orden alfabético y se resaltará el nombre del estudiante del informe).

Ensayo: (Nombre del o los ensayos realizados)

Fecha de preparación: _____

Fecha de realización: _____

Fecha de entrega: _____

2. INTRODUCCIÓN:

Se deberá colocar una idea general del o de los temas tratados en el informe y se deberá dividir para cada ensayo realizado.

3. MARCO TEÓRICO:

Incluir la parte teórica de los temas tratados.

4. MATERIALES:

Una breve descripción de los materiales y equipos utilizados para los ensayos.

5. PROCEDIMIENTO:

Una síntesis del procedimiento ejecutado para la realización de los ensayos y enfocándose en lo más primordial de la práctica.

6. RESULTADOS:

De forma coherente y lógica, se explicará los fundamentos de las operaciones y se realizará la aplicación de las fórmulas a los datos obtenidos en la práctica.

Los datos obtenidos en el laboratorio no podrán ser modificados bajo ningún concepto.

Los resultados finales deberán ser presentados en tablas de forma ordenada para la presentación del informe.

7. CONCLUSIONES:

Las conclusiones deberán ser técnicas que contrasten con los registros que se tiene en el informe con trabajos similares.

8. RECOMENDACIONES:

Las recomendaciones deberán ser acordes a un mejoramiento para el desarrollo de las prácticas a futuro. Como referencia se podrán basar en trabajos similares que sean una contribución.

9. REFERENCIAS CONSULTADAS:

Considerar la referenciarían con las normas APA vigentes, indicando las fuentes bibliográficas y normas utilizadas para la elaboración del informe.

10. ANEXOS:

Las hojas de registro de los datos obtenidos en el laboratorio.

Lo que el estudiante considere necesario como respaldo para la entrega de su informe.

2. PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE HIDRÁULICA/SANITARIA

2.1. PRÁCTICA 1

ENSAYO DE PRESIÓN EN UN SISTEMA DE MALLA (VÁLVULAS INTERNAS ABIERTAS)

RESUMEN

Se determina el caudal de circulación y el porcentaje de error existente entre los dos sistemas de medición (piezómetros y simulación en EPANET).

1. TEMA: SISTEMA EN MALLA (VÁLVULAS INTERNAS ABIERTAS)

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Generales:

- Determinar el porcentaje de error existente entre los sistemas de medición (piezómetros y EPANET), en cualquier nudo del trayecto del sistema.

2.2. Objetivo Específico:

- Simular en el EPANET el sistema en malla con los datos reales del sistema e ingresar correctamente los datos como el caudal, densidades y el método de cálculo a utilizar (Hazen Williams), obtenidos en el modelo físico.

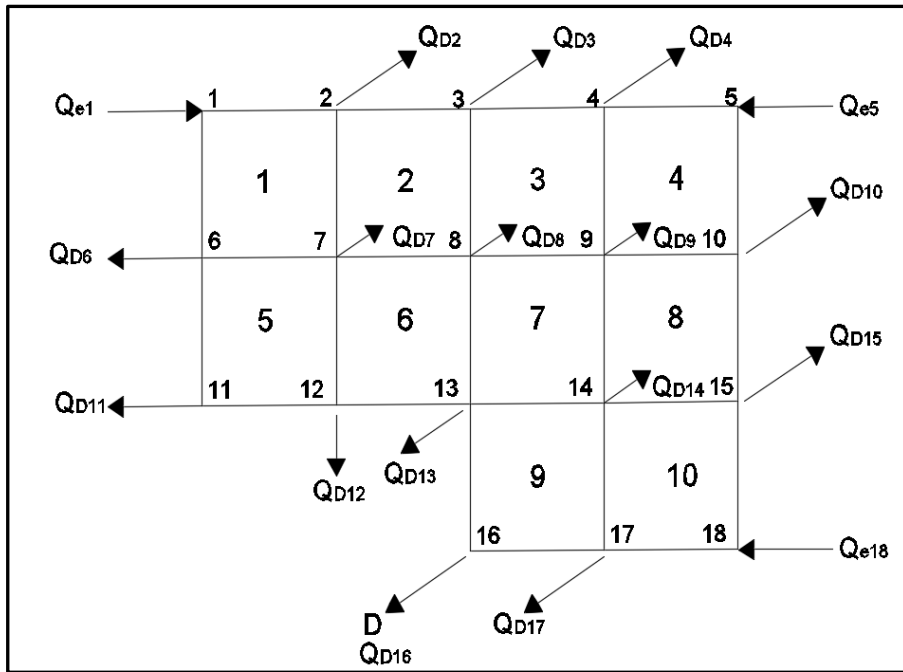
3. MARCO TEÓRICO

Malla Cerrada

Considerada la red cerrada en la siguiente ilustración, tomando en consideración que Q_{D1} , Q_{D2} , Q_{D3} , Q_{D4}, \dots , Q_{DNU} , son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor igual a cero en un momento dado, y que Q_{e1} , Q_{e2} , Q_{e3}, \dots , Q_{em} , son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación: (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

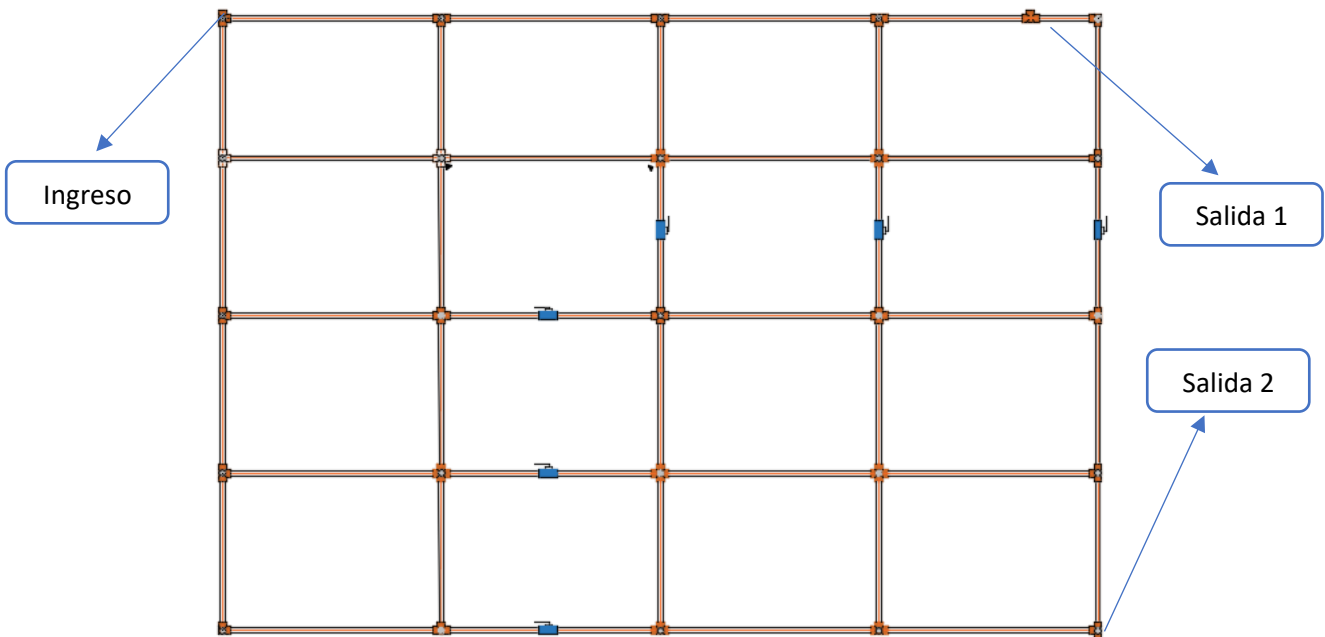
$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

Donde Nu es el número de nodos que existen en la red.



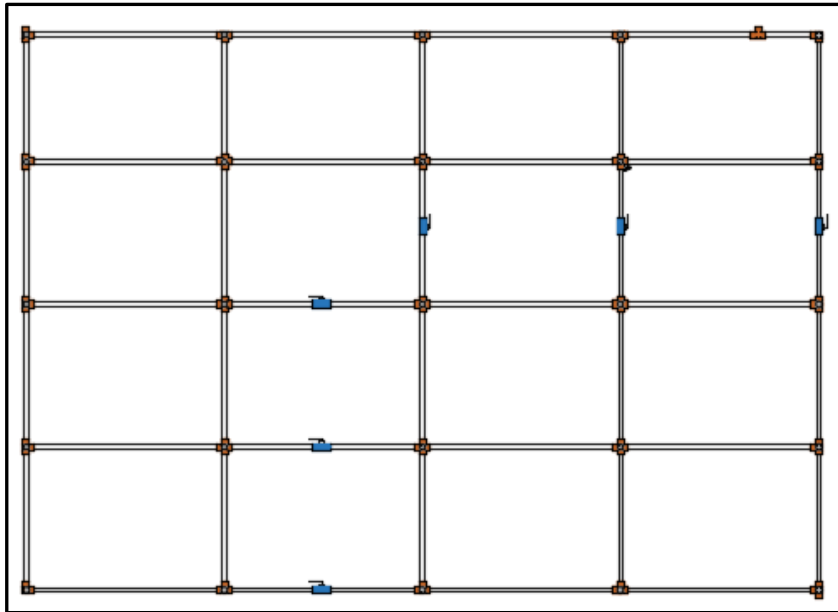
Ilustración

En el caso de este ensayo el esquema de la malla las válvulas internas es el siguiente:



4. MATERIALES Y EQUIPO

- Mesa de tuberías y accesorios.
- Para la práctica se utilizará el sistema #1 (caso: válvulas internas abiertas)



- Flexómetro.
- Piezómetro.
- EPANET (software).

5. PROCEDIMIENTO

1. Verificar que la válvula del Circuito #1 se encuentre abierta, las de los otros circuitos cerrados y la válvula de compuerta debe estar cerrada con dos vueltas completas.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
4. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
5. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
6. Medir el volumen en los dos tanques de abastecimiento y auxiliar #3; realizar a su vez la toma del tiempo que tarda el fluido en estabilizarse en los tanques.
7. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.

8. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
9. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.
10. Ver el manual de mantenimiento y operación para las imágenes del modelo.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar el caudal de circulación en el tanque #1 y #3 (promedio), con $Q = V/t$.

Donde:

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

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

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

2. Simulación en EPANET

Tomar las medidas del sistema y recrearlo en el software, considerando que los cálculos se realizarán con Hazen Williams y el coeficiente utilizado es 140 para CPVC. Utilizar una altura para los nudos de 0.97 metros.

3. Calcular el porcentaje de error entre los sistemas de medición (piezómetros y EPANET), con $\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$.

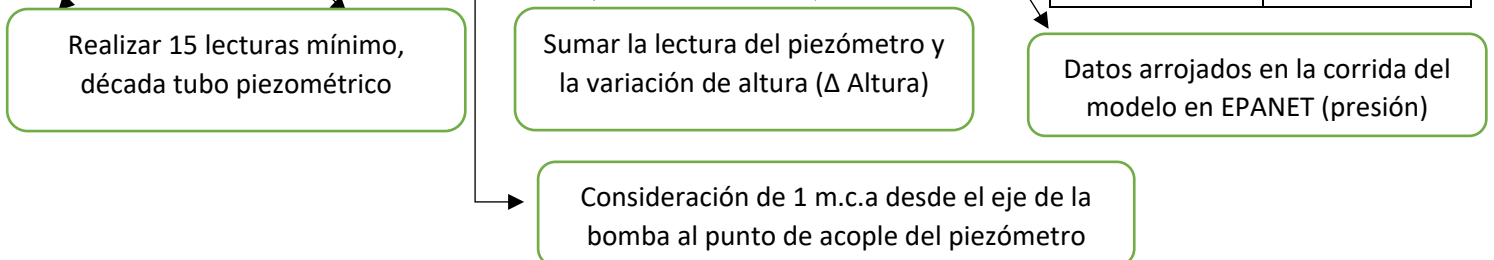
Donde:

Valor aproximado: valor obtenido de los tubos piezométricos

Valor exacto: valor obtenido del software

4. Tabla de Resultados

Nudo # - # (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO # EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo #	Nudo #	cálculo	cálculo
Lectura	Lectura	1	Suma	Suma			ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO # EPANET)	ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO # EPANET)
MÍN	MÍN						cálculo	cálculo
Lectura	Lectura	1	Suma	Suma				



7. CONCLUSIONES

Se colocará conclusiones acorde a los resultados obtenidos entre los dos tipos de medición de presión en el sistema.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones en cuanto a los sistemas de medición.

9. BIBLIOGRAFÍA

Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de tuberías y abastecimiento de aguas, redes*. Bogota, Colombia: Alfa Omega.

Arturo, R. F. (2003). *Los modelos hidráulicos como herramientas valiosas de diseño hidráulico*. Lima, Perú: Aguilar.

10. ANEXOS

Las hojas de registro de los datos obtenidos en el laboratorio. (Ver en el anexo)

Lo que el estudiante considere necesario como respaldo para la entrega de su informe.

2.2 PRÁCTICA 2

ENSAYO DE PRESIÓN EN UN SISTEMA DE MALLA (VÁLVULAS INTERNAS CERRADAS)

RESUMEN

Se determina el caudal de circulación y el porcentaje de error existente entre los tres sistemas de medición (piezómetros, manómetros y simulación en EPANET).

1. TEMA: SISTEMA EN MALLA

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Generales:

- Determinar el porcentaje de error entre los dos sistemas de medición (piezómetros, simulación en EPANET), en cualquier nudo del trayecto del sistema.

2.2. Objetivo Específico:

- Simular en el EPANET el sistema en malla con los datos reales del sistema e ingresar correctamente los datos como el caudal, densidades y el método de cálculo a utilizar (Hazen Williams), obtenidos en el modelo físico.

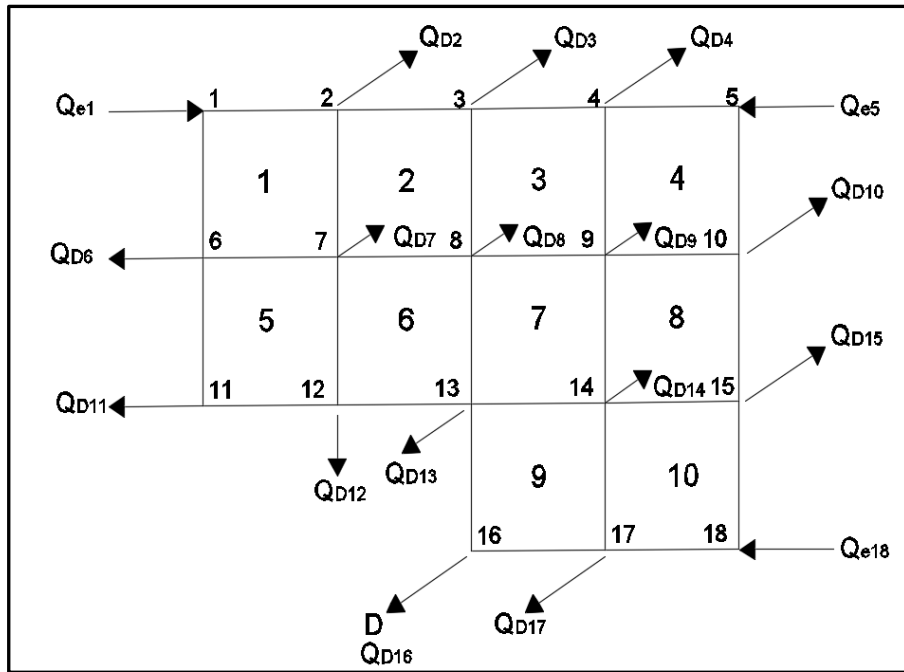
3. MARCO TEÓRICO

Red Cerrada

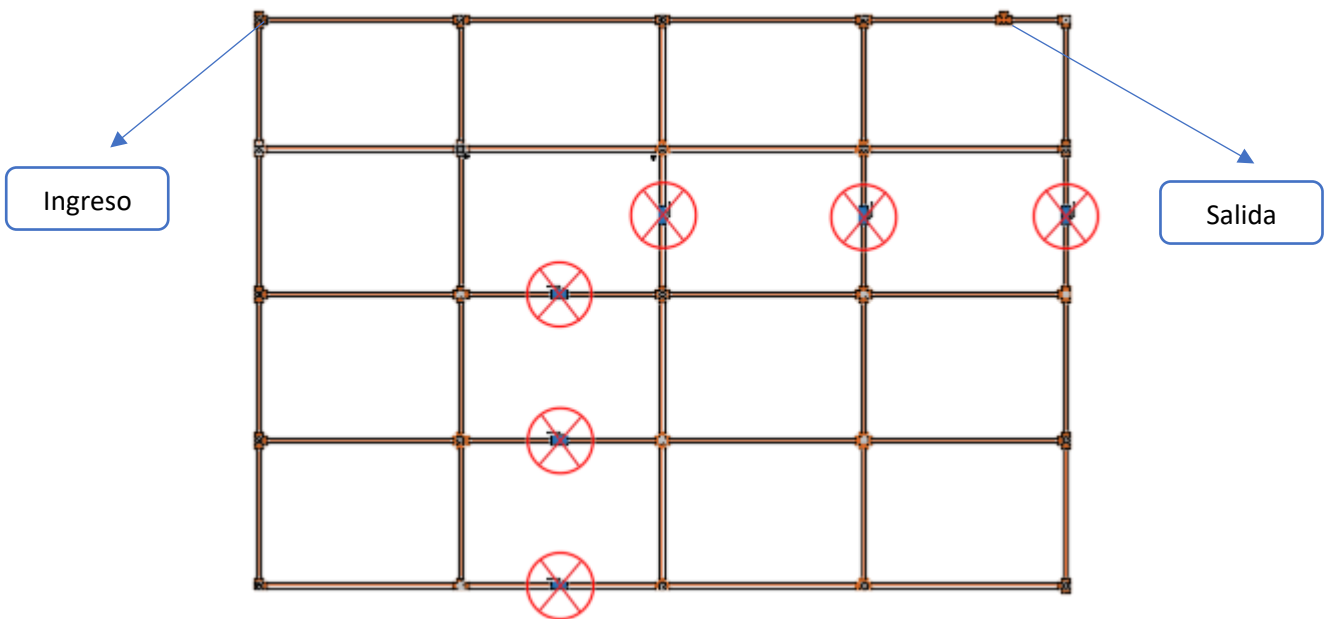
Considerada la red cerrada en la siguiente Fig. 9, tomando en consideración que Q_{D1} , Q_{D2} , Q_{D3} , Q_{D4} , ..., Q_{DNU} , son los caudales consumidos en cada uno de los nodos, algunos de los cuales podrían tener un valor igual a cero en un momento dado, y que Q_{e1} , Q_{e2} , Q_{e3} , ..., Q_{em} , son los caudales que alimentan la red de distribución, se puede establecer la siguiente ecuación: (Saldarriaga, 1998, pág. 296)

$$\sum_{i=1}^m Q_e = \sum_{i=1}^{Nu} Q_D$$

Donde Nu es el número de nodos que existen en la red.



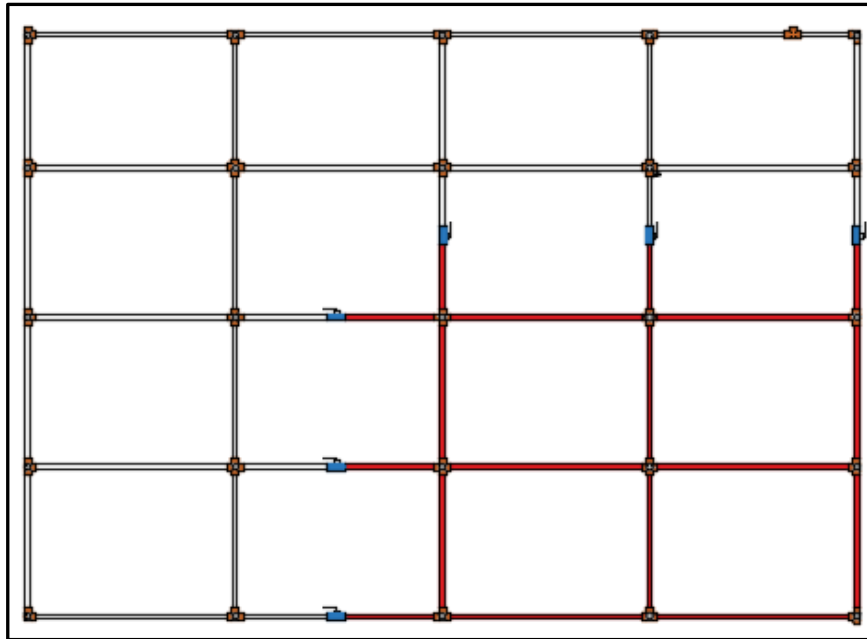
En el caso de este ensayo el esquema de la malla cerrada las válvulas internas es el siguiente:



Se inhabilita las seis válvulas, con lo cual el análisis se realizará en un circuito en forma de L con 16 nudos.

4. MATERIALES Y EQUIPO

- Mesa de tuberías y accesorios.
- Para la práctica se utilizará el sistema #1 (caso: válvulas internas cerradas)



- Flexómetro.
- Piezómetro.
- EPANET (software).

5. PROCEDIMIENTO

1. Verificar que la válvula del Circuito #1 se encuentre abierta, las de los otros circuitos cerrados y la válvula de compuerta debe estar cerrada con dos vueltas completas.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
4. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se establezca a un cierto nivel.
5. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
6. Medir el volumen en los dos tanques de abastecimiento y auxiliar #3; realizar a su vez la toma del tiempo que tarda el fluido en estabilizarse en los tanques.
7. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.

8. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
9. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.
10. En el caso del sistema en malla cerrado las válvulas internas, se debe previamente cerrar la válvula de compuerta y posteriormente encender la bomba, a continuación, abrir las mini válvulas con los tubos piezométricos colocados sobre estos, finalmente abrir la válvula de compuerta hasta regular el paso del fluido hasta poder realizar las mediciones en los tubos piezométricos.
11. Revisar el manual de mantenimiento y operación para detalles del modelo físico.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar el caudal de circulación en el tanque #1 y #3 (promedio), con $Q = V/t$.

Donde:

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

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

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

2. Simulación en EPANET

Tomar las medidas del sistema y recrearlo en el software, considerando que los cálculos se realizarán con Hazen Williams y el coeficiente utilizado es 140 para CPVC. Utilizar una altura para los nudos de 0.97 metros.

3. Calcular el porcentaje de error entre los sistemas de medición (piezómetros y EPANET), con $\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$.

Donde:

*Valor aproximado: valor obtenido de los tubos piezométricos/
manómetros*

Valor exacto: valor obtenido del software

4. Tabla de Resultados

Nudo # - # (Sistema Abierto)								
PIEZOMETRO 1	PIEZOMETRO 2	Δ ALTURA	PRESION PIEZÓMETRO 1	PRESION PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESION MAXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 2 PRESION MAXIMA-NUDO # EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo #	Nudo #		
Lectura	Lectura	1	Suma	Suma			cálculo	cálculo
MIN	MIN						ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 1 PRESION MINIMA-NUDO # EPANET)	ERROR NUDO # (PIEZÓMETRO 2 PRESION MINIMA-NUDO # EPANET)
Lectura	Lectura	1	Suma	Suma			cálculo	cálculo

Realizar 15 lecturas mínimo, década tubo piezométrico

Sumar la lectura del piezómetro y la variación de altura (Δ Altura)

Datos arrojados en la corrida del modelo en EPANET (presión)

Consideración de 1 m.c.a desde el eje de la bomba al punto de acople del piezómetro

7. CONCLUSIONES

Se colocará conclusiones acorde a los resultados obtenidos entre los tres tipos de medición de presión en el sistema.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones en cuanto a los sistemas de medición.

9. BIBLIOGRAFÍA

Duarte Agudelo, A. (2008). Pérdida de Energía ocasionada por accesorios. In A. Duarte Agudelo, *Hidráulica General*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Mott, R., & Untener, J. (2015). Peso Específico. In R. Mott, & J. Untener, *Mecánica de Fluidos*. México DF: Progreso.

10. ANEXOS

Las hojas de registro de los datos obtenidos en el laboratorio. (Ver en el anexo)

Lo que el estudiante considere necesario como respaldo para la entrega de su informe.

2.3 PRÁCTICA 3

ENSAYO DE PRESIÓN EN UN SISTEMA EN SERIE

RESUMEN

Se determina el caudal de circulación y el porcentaje de error existente entre los tres sistemas de medición (piezómetros, manómetros y simulación en EPANET).

1. TEMA: SISTEMA EN MALLA

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Generales:

- Determinar el porcentaje de error entre los dos sistemas de medición (piezómetros y simulación en EPANET), en cualquier nudo del trayecto del sistema.

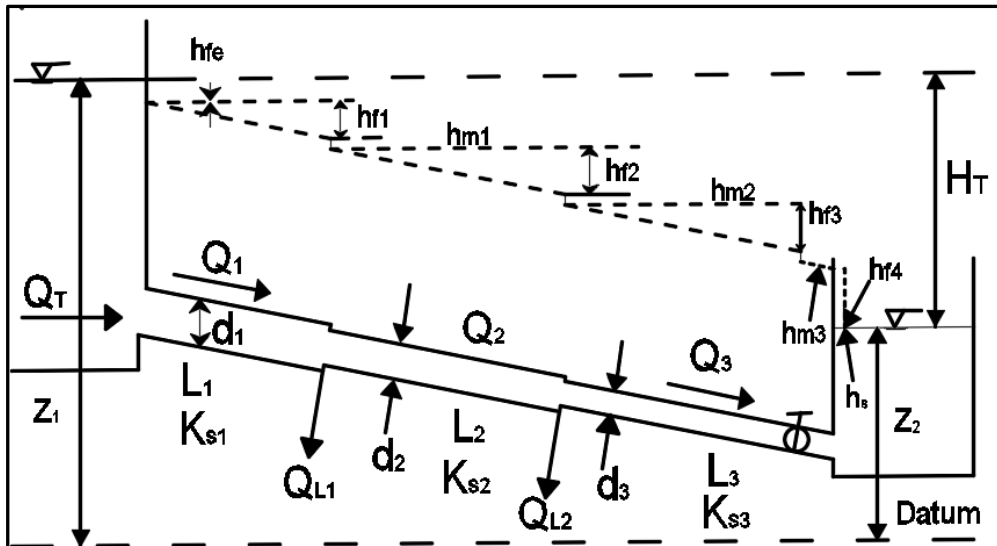
2.2. Objetivo Específico:

- Simular en el EPANET el sistema en malla con los datos reales del sistema e ingresar correctamente los datos como el caudal, densidades y el método de cálculo a utilizar (Hazen Williams), obtenidos en el modelo físico.

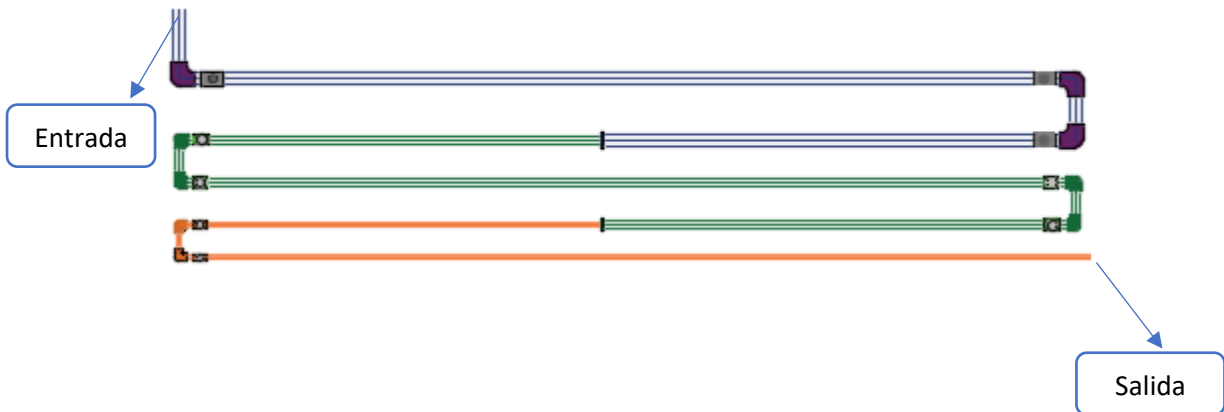
3. MARCO TEÓRICO

Tuberías en Serie

Las tuberías en serie son dos o más tuberías distintas colocadas una a continuación de la otra, las cuales pueden diferenciarse en los diámetros o en las rugosidades o bien en ambas características físicas. En el siguiente esquema Fig. 3, se muestra un esquema de tuberías en serie que conectan a dos tanques. Dicho esquema se utilizará para plantear las ecuaciones que rigen en el flujo de tuberías en serie. (Saldarriaga, 1998, pág. 190)



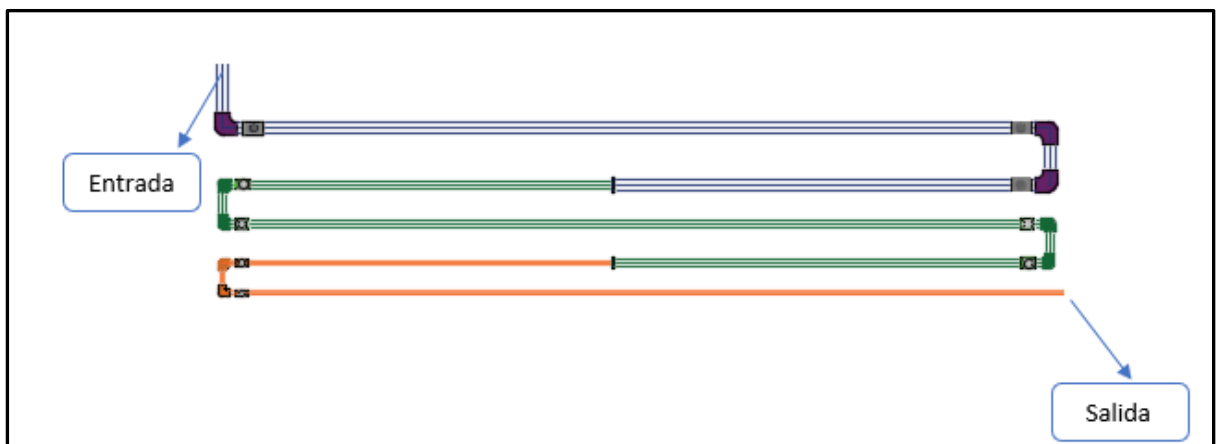
A continuación, se presenta el esquema del sistema en serie del modelo:



La tubería de color morado es de 1 pulgada, la verde es de 3/4 de pulgada y termina con la café de 1/2 pulgada.

4. MATERIALES Y EQUIPO

- Mesa de tuberías y accesorios.
- Para la práctica se utilizará el sistema #2



- Flexómetro.

- Piezómetro.
- EPANET (software).

5. PROCEDIMIENTO

1. Verificar que la válvula del Circuito #2 se encuentre abierta a 45 ° y tanto la válvula bola del circuito #1 como la válvula de compuerta con una vuelta y 1/4 adicional para regular el flujo por el sistema en malla.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
4. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
5. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
6. Medir el volumen en los tanques y el tiempo que tarda el fluido en estabilizarse en los tanques.
7. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.
8. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
9. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.
10. Revisar el manual de mantenimiento y operación para detalles del modelo físico.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar el caudal de circulación en el tanque #1, #2 y #3 (promedio), con $Q = V/t$.

Donde:

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

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

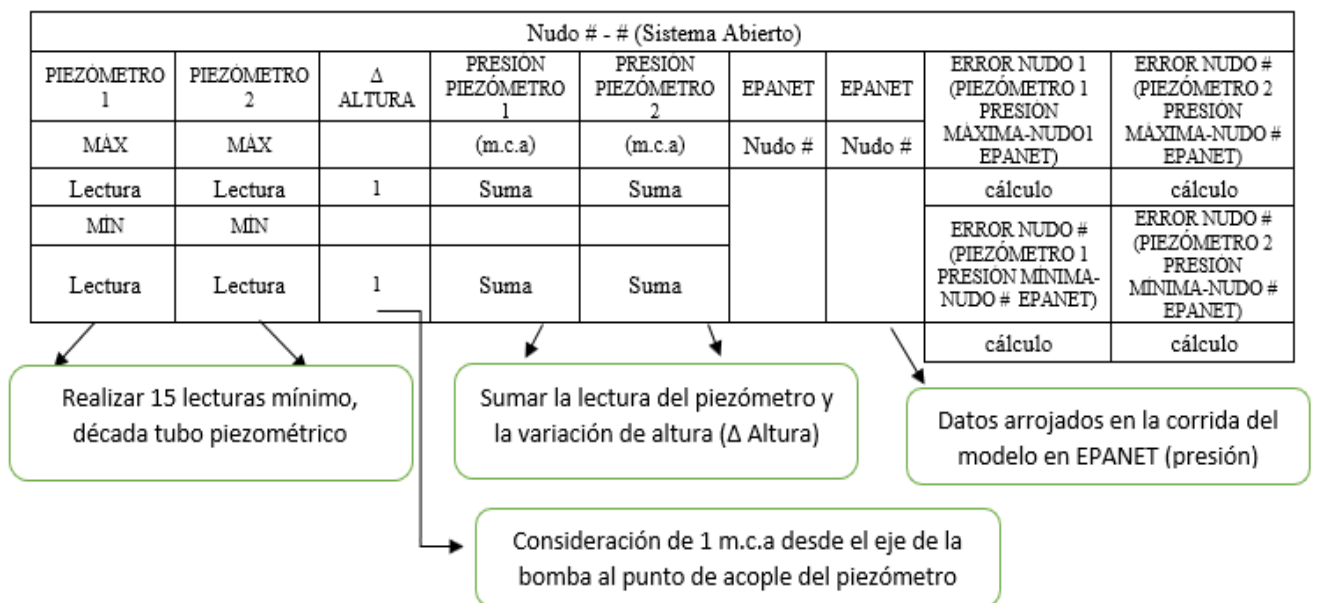
$$t = \text{Tiempo(s)}$$

2. Simulación en EPANET

Tomar las medidas del sistema y recrearlo en el software, considerando que los cálculos se realizarán con Hazen Williams y el coeficiente utilizado es 140 para CPVC. Utilizar una altura para los nudos de 0.97 metros.

3. Calcular el porcentaje de error entre los sistemas de medición (piezómetros y EPANET), con $\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$.

4. Tabla de Resultados



7. CONCLUSIONES

Se colocará conclusiones acorde a los resultados obtenidos entre los tres tipos de medición de presión en el sistema.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones en cuanto a los sistemas de medición.

9. BIBLIOGRAFÍA

King, H., Wisler, C., & Woodburn, J. (1980). Número de Reynolds. In H. King, C. Wisler, & J. Woodburn. México DF: Trillas S.A.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Pérdidas Menores. In Y. Cengel, & J. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*. México DF, México: Litografía Ingramex.

10. ANEXOS

Las hojas de registro de los datos obtenidos en el laboratorio. (Ver en el anexo)

Lo que el estudiante considere necesario como respaldo para la entrega de su informe.

2.4 PRÁCTICA 4

ENSAYO DE PRESIÓN EN UN SISTEMA EN PARALELO

RESUMEN

Se determina el caudal de circulación y el porcentaje de error existente entre los dos sistemas de medición (piezómetros y simulación en EPANET).

1. TEMA: SISTEMA EN MALLA

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Generales:

- Determinar el porcentaje de error entre los dos sistemas de medición (piezómetros, manómetros y simulación en EPANET), en cualquier nudo del trayecto del sistema.

2.2. Objetivo Específico:

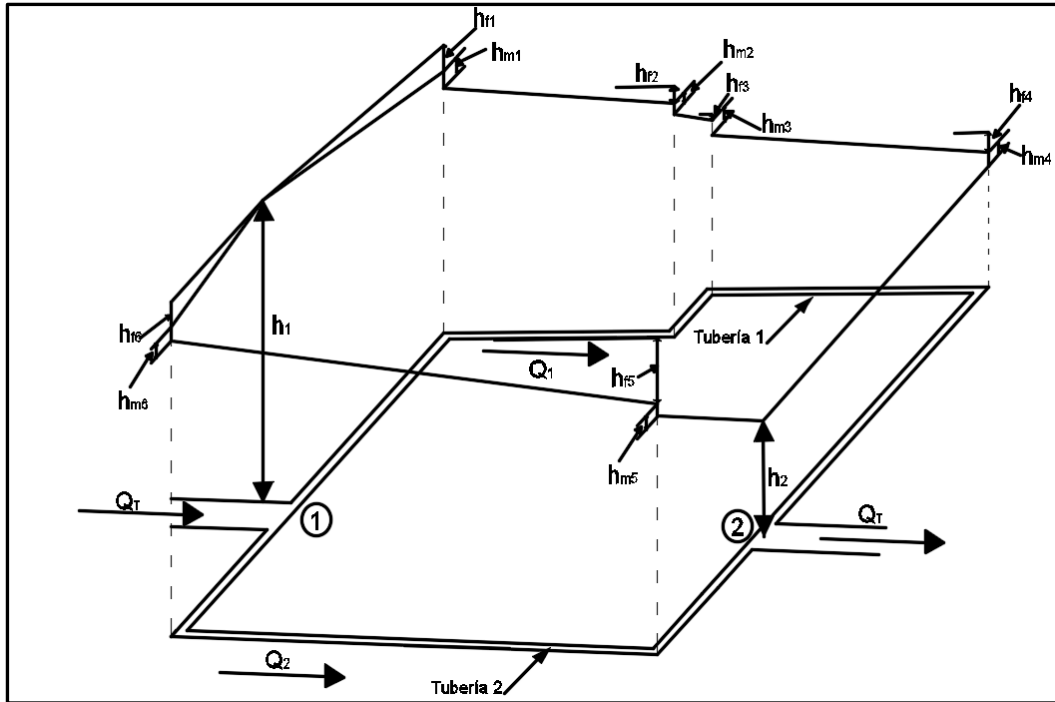
- Simular en el EPANET el sistema en malla con los datos reales del sistema e ingresar correctamente los datos como el caudal, densidades y el método de cálculo a utilizar (Hazen Williams), obtenidos en el modelo físico.

3. MARCO TEÓRICO

Tuberías en Paralelo

Las tuberías en paralelo son un conjunto de tuberías que parten de un nodo común y llegan a otro nodo también en común. En estos nodos, los caudales que pasan por cada una de las tuberías se unen. Esto quiere decir que para cada una de las tuberías en paralelo aguas arriba los caudales se encuentran unidos para luego dividirse en el nodo inicial y por último volver a unirse en el nodo final; aguas debajo de éste debe existir un caudal único. (Saldarriaga, 1998, pág. 227)

En general los sistemas en paralelos se encuentran limitados de 3 a 4 tuberías. Sin embargo, es más común que estén compuestos por dos tuberías. Estas pueden tener longitudes, diámetros y accesorios distintos a la vez que pueden estar elaborados de distintos materiales. (Saldarriaga, 1998, pág. 227) A partir del siguiente esquema, se plantearán las ecuaciones que gobiernan el flujo en este tipo de tuberías:

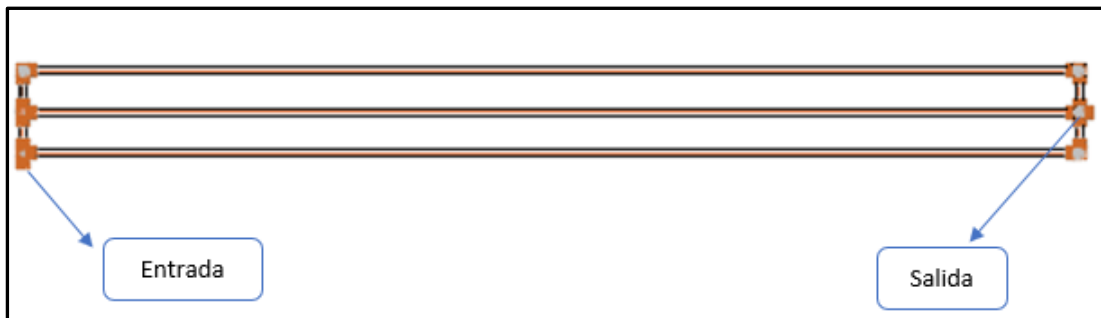


A continuación, se presenta el esquema que se utilizó para la práctica en el sistema en paralelo:



4. MATERIALES Y EQUIPO

- Mesa de tuberías y accesorios.
- Para la práctica se utilizará el sistema #2



- Flexómetro.
- Piezómetro.
- EPANET (software).

5. PROCEDIMIENTO

1. Verificar que la válvula del Circuito #3 se encuentre abierta y de los otros circuitos cerrados, además verificar las dos válvulas de los tanques se encuentren habilitadas en sentido horizontal.
2. Conectar el enchufe en el tomacorriente.
3. Medir el caudal en los tres tanques.
4. Encender la bomba mediante el interruptor y esperar la circulación del caudal por el sistema por completo.
5. Conectar el sistema de medición de presión en las Mini Válvulas ubicadas en los nudos del sistema, con las mangueras de los piezómetros. Posteriormente se procede a la apertura de la Mini Válvula y dejar que se llene en el caso de los tubos piezométricos, cerrar antes del desbordamiento de los tubos piezométricos, después abrir nuevamente las válvulas para que el agua descienda y se estabilice a un cierto nivel.
6. Registro de las lecturas, considerando que el nivel cero es donde termina la cinta métrica colocada y las lecturas se realizan de abajo hacia arriba.
7. Medir el caudal en los tanques.
8. Apagar la bomba por medio del interruptor, desconectar el enchufe de la tomacorriente y regresar el cable al sitio.
9. Sacar los sistemas de medición de las Mini Válvulas y verificar si existe agua internamente, si existe residuo, abrir nuevamente las Mini Válvulas y dejar que el residuo baje hacia la tubería.
10. Secar la superficie del sistema si se ha derramado el agua sobre esta.
11. Revisar el manual de mantenimiento y operación para detalles del modelo físico.

6. CÁLCULO DE RESULTADOS

1. Determinar el caudal de circulación en el tanque #1 y #3 (promedio), con $Q = V/t$.

Donde:

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

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

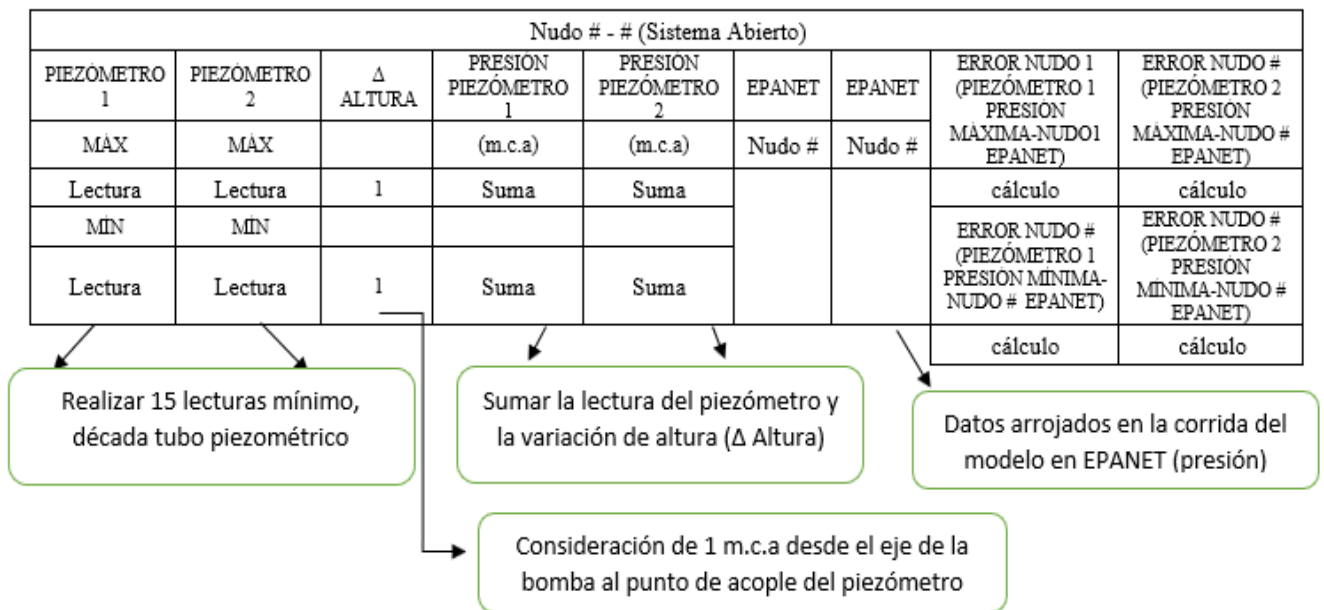
$t = \text{Tiempo(s)}$

2. Simulación en EPANET

Tomar las medidas del sistema y recrearlo en el software, considerando que los cálculos se realizarán con Hazen Williams y el coeficiente utilizado es 140 para CPVC. Utilizar una altura para los nudos de 0.97 metros.

3. Calcular el porcentaje de error entre los sistemas de medición (piezómetros y EPANET), con $\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$.

4. Tabla de Resultados



7. CONCLUSIONES

Se colocará conclusiones acorde a los resultados obtenidos entre los tres tipos de medición de presión en el sistema.

8. RECOMENDACIONES

Recomendaciones en cuanto a los sistemas de medición.

9. BIBLIOGRAFÍA

King, H., Wisler, C., & Woodburn, J. (1980). Número de Reynolds. In H. King, C. Wisler, & J. Woodburn. México DF: Trillas S.A.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Pérdidas Menores. In Y. Cengel, & J. Cimbala, *Mecánica de Fluidos*. México DF, México: Litografía Ingramex.

10. ANEXOS

Las hojas de registro de los datos obtenidos en el laboratorio. (Ver en el anexo)
 Lo que el estudiante considere necesario como respaldo para la entrega de su informe.

5.3 Validación de las Prácticas de Laboratorio

5.3.1 Ensayo de presión en un sistema de malla (válvulas internas abiertas)

1.- Caudal:

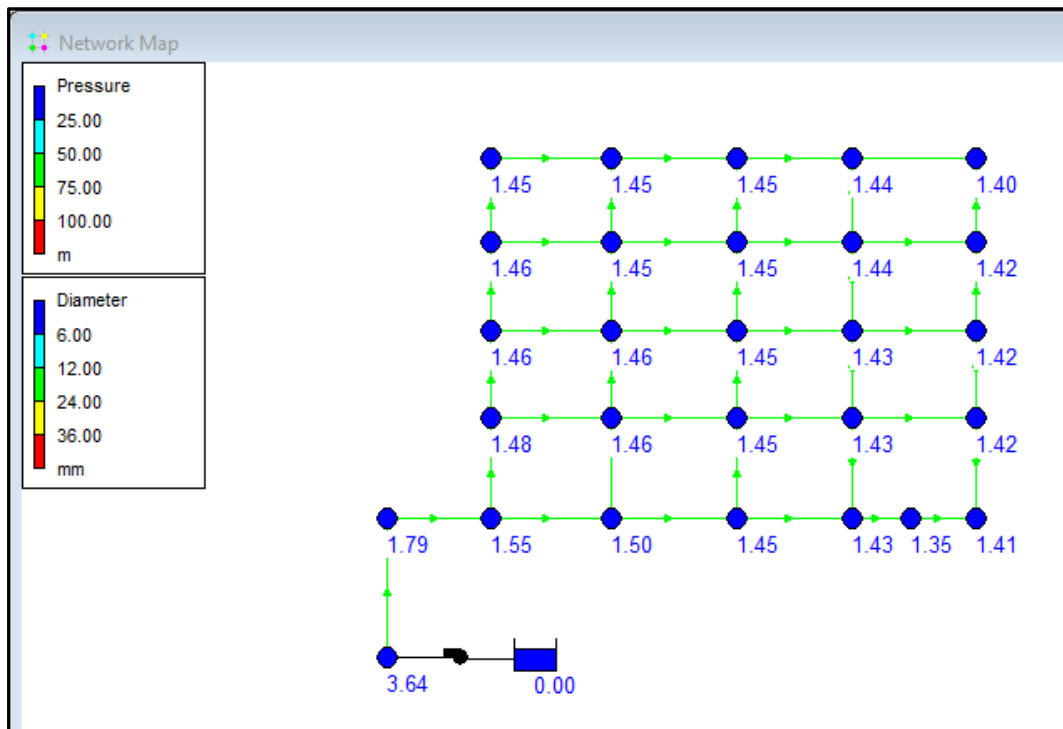
$$Q = V/t$$

$$Q = \frac{(24.33 + 31.17)l}{100 \text{ seg}}$$

Se realiza el volumen promedio entre las lecturas de los tanques

$$Q = \frac{28l}{100 \text{ seg}} = 0.28 \frac{l}{s}$$

2.- Simulación en EPANET:



3.- Cálculos del porcentaje de error:

3.1.- Lecturas:

CIRCUITO1	
MALLA ABIERTA	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
0.245	0.19
0.249	0.199
0.254	0.193
0.243	0.19
0.245	0.189
0.244	0.19
0.244	0.189
0.242	0.188
0.246	0.19
0.25	0.191
0.253	0.193
0.25	0.191
0.241	0.192
0.243	0.194
0.248	0.192
0.243	0.191
0.249	0.193
0.25	0.189
0.254	0.191
0.245	0.189
0.248	0.194
0.247	0.189
0.249	0.193
0.248	0.19
0.252	0.191

3.2.- Porcentaje de error:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 2		
0.254	0.199	1	1.254	1.199	1.55	1.5	19.097%	20.067%
MÍN	MÍN							
0.241	0.188	1	1.241	1.188			19.935%	20.800%

$$\%error = \frac{|Valor aproximado - Valor exacto|}{Valor exacto} * 100$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ máx-nudo1\ EPANET} = \frac{|1.254 - 1.55|}{1.55} * 100 = 19.097\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ mín-nudo1\ EPANET} = \frac{|1.241 - 1.55|}{1.55} * 100 = 19,935\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ máx-nudo2\ EPANET} = \frac{|1.199 - 1.5|}{1.5} * 100 = 20.067\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ mín-nudo2\ EPANET} = \frac{|1.188 - 1.5|}{1.5} * 100 = 20.8\%$$

5.3.2 Ensayo de presión en un sistema de malla (válvulas internas cerradas)

1.- Caudal:

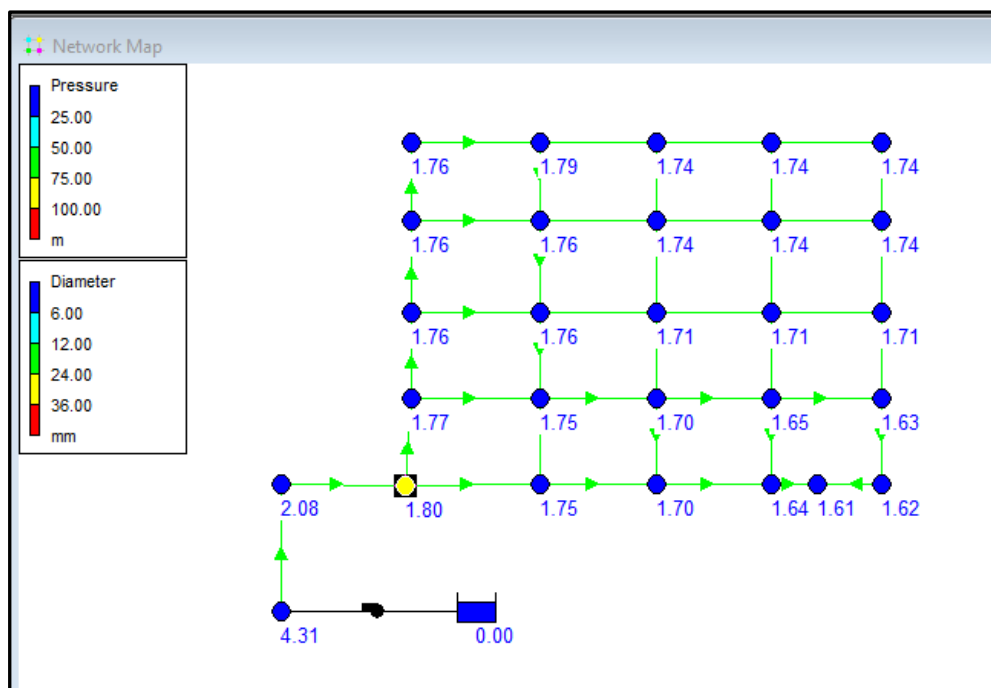
$$Q = V/t$$

$$Q = \frac{(27.67 + 27.33)l}{80\ seg}$$

Se realiza el volumen promedio entre las lecturas de los tanques

$$Q = \frac{27.5l}{80\ seg} = 0.34 \frac{l}{s}$$

2.- Simulación en EPANET:



3.- Cálculos del porcentaje de error:

3.1.- Lecturas:

CIRCUITO1	
MALLA CERRADA (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO6
(m.c.a)	(m.c.a)
0.863	0.863
0.864	0.86
0.861	0.857
0.865	0.859
0.862	0.86
0.864	0.862
0.866	0.856
0.863	0.857
0.864	0.859
0.861	0.857
0.865	0.859
0.862	0.86
0.864	0.862
0.866	0.856
0.863	0.86
0.864	0.859
0.861	0.857
0.865	0.859
0.862	0.86
0.861	0.862
0.865	0.86
0.862	0.858
0.864	0.859
0.866	0.856
0.863	0.851

3.2.- Porcentaje de error:

Nudo 1-6 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 6 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 6 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 6		
0.866	0.863	1	1.866	1.863	1.8	1.77	3.667%	5.254%
MÍN	MÍN							
0.861	0.851	1	1.861	1.851				
							3.389%	4.576%

$$\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ máx-nudo1\ EPANET} = \frac{|1.866 - 1.8|}{1.8} * 100 = 3.667\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ mín-nudo1\ EPANET} = \frac{|1.861 - 1.8|}{1.8} * 100 = 3.389\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ máx-nudo\ 6\ EPANET} = \frac{|1.861 - 1.77|}{1.77} * 100 = 5.254\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ mín-nudo\ 6\ EPANET} = \frac{|1.851 - 1.77|}{1.77} * 100 = 4.576\%$$

5.3.3 Ensayo de presión en un sistema en serie

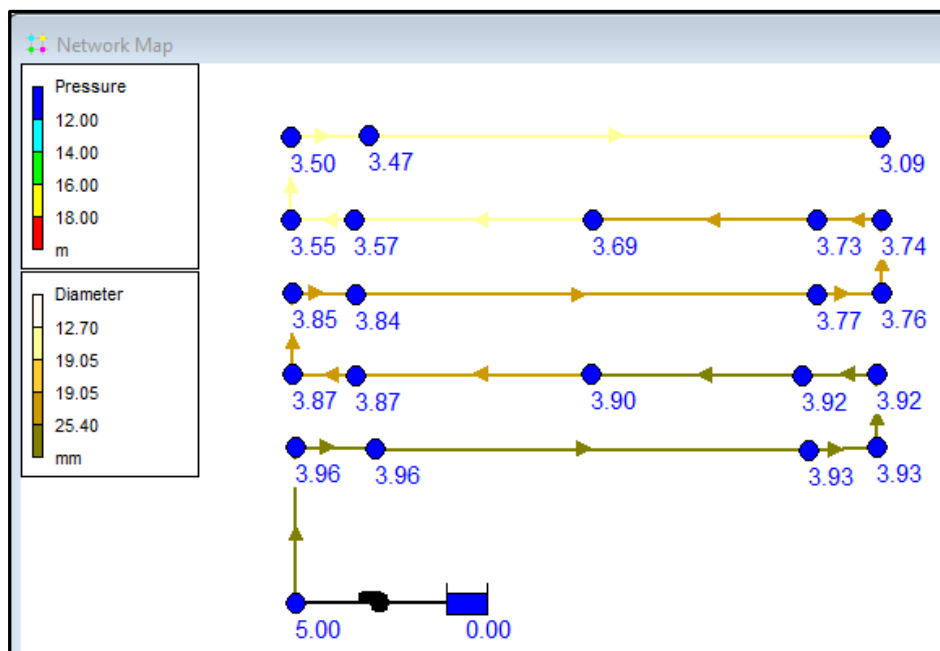
1.- Caudal:

$$Q = V/t$$

$$Q = \frac{26l}{39\ seg}$$

$$Q = 0.667\ l/s$$

2.- Simulación en EPANET:



3.- Cálculos del porcentaje de error:

3.1.- Lecturas:

CIRCUITO2	
SISTEMA EN SERIE (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
1.344	1.334
1.342	1.331
1.349	1.338
1.347	1.342
1.346	1.344
1.349	1.34
1.349	1.342
1.347	1.337
1.348	1.334
1.35	1.337
1.354	1.335
1.357	1.343
1.358	1.341
1.354	1.334
1.349	1.336
1.354	1.333
1.349	1.333
1.355	1.34
1.357	1.337
1.354	1.338
1.348	1.334
1.351	1.332
1.354	1.331
1.349	1.334
1.352	1.338
1.347	1.346
1.353	1.349

3.2.- Porcentaje de error:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 2		
1.358	1.349	1	2.358	2.349	3.96	3.93	40.455%	40.229%
MÍN	MÍN							
1.342	1.331	1	2.342	2.331			40.859%	40.687%

$$\%error = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exacto|}{Valor\ exacto} * 100$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ máx-nudo1\ EPANET} = \frac{|2.358 - 3.96|}{3.96} * 100 = 40.455\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ mín-nudo1\ EPANET} = \frac{|2.342 - 3.96|}{3.96} * 100 = 40.859\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ máx-nudo2\ EPANET} = \frac{|2.349 - 3.93|}{3.93} * 100 = 40.229\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ mín-nudo2\ EPANET} = \frac{|2.331 - 3.93|}{3.93} * 100 = 40.687\%$$

5.3.4 Ensayo de presión en un sistema en paralelo

1.- Caudal:

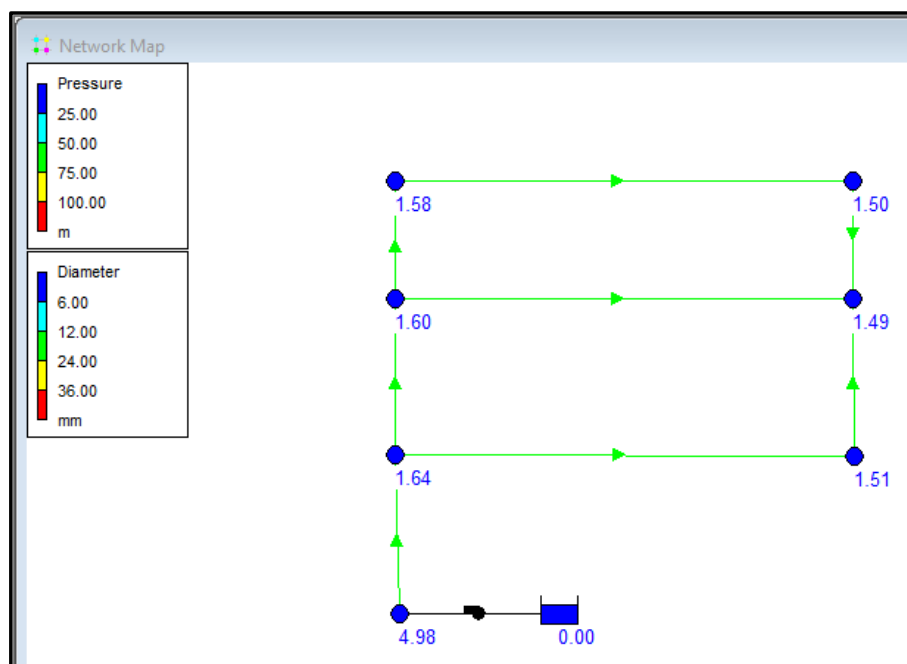
$$Q = V/t$$

$$Q = \frac{(24.34 + 28.25 + 26.61)l}{65\ seg}$$

Se realiza el volumen promedio entre las lecturas de los 3 tanques

$$Q = 0.406 \frac{l}{s}$$

2.- Simulación en EPANET:



3.- Cálculos del porcentaje de error:

3.1.- Lecturas:

CIRCUITO3	
SISTEMA EN SERIE (PIEZÓMETRO)	
NUDO1	NUDO2
(m.c.a)	(m.c.a)
0.852	0.866
0.853	0.864
0.857	0.865
0.853	0.866
0.852	0.864
0.851	0.867
0.856	0.869
0.857	0.868
0.853	0.864
0.852	0.867
0.855	0.867
0.857	0.868
0.852	0.869
0.854	0.867
0.851	0.868
0.852	0.868
0.854	0.867
0.853	0.868
0.852	0.866
0.854	0.864
0.853	0.865
0.851	0.868
0.853	0.868
0.855	0.869
0.852	0.868

3.2.- Porcentaje de error:

Nudo 1-2 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 2		
0.857	0.869	1	1.857	1.869	1.64	1.6	13.232%	16.813%
MÍN	MÍN							
0.851	0.864	1	1.851	1.864			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 2 EPANET)
							12.866%	16.500%

$$\%error = \frac{|Valor aproximado - Valor exacto|}{Valor exacto} * 100$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ máx-nudo1\ EPANET} = \frac{|1.64 - 1.857|}{1.64} * 100 = 13.232\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro1\ mín-nudo\ 1\ EPANET} = \frac{|1.64 - 1.851|}{1.64} * 100 = 12.866\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ máx-nudo\ 2\ EPANET} = \frac{|1.6 - 1.851|}{1.6} * 100 = 16.813\%$$

$$\%error_{presión\ piezómetro2\ mín-nudo2\ EPANET} = \frac{|1.6 - 1.864|}{1.6} * 100 = 16.5\%$$

6. CAPÍTULO: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones:

- Se ha logrado diseñar el prototipo por medio de la verificación con el sistema en serie y construir un equipo cuyo funcionamiento servirá para realizar comparaciones de presiones en sistemas independientes de malla, en serie y en paralelo. En cada sistema se ha realizado un análisis comparativo del porcentaje de error en las lecturas que se toma en los piezómetros y los datos en los nudos que arroja el EPANET, esto con la finalidad de comparar el porcentaje de error existente entre las diferencias de cada sistema de medición.
- La caracterización de las bases teóricas de los sistemas en malla, serie y paralelo se las ha podido plasmar en el equipo, donde se observa que las pérdidas de carga se incrementan proporcionalmente al caudal de ingreso en cada sección de tubería analizada, principalmente en el sistema en serie.
- La regulación del ingreso del caudal a los sistemas permite dos cosas, la primera controlar el desbordamiento del caudal en los tubos piezométricos en los tres sistemas y en el caso del sistema en serie y paralelo se controla el desbordamiento en los tanques auxiliares, la segunda es la presión que se ejerce en cada uno de los nudos de control.
- En cuanto a los resultados obtenidos en el sistema en malla, tanto en el caso de abiertas y cerradas las válvulas, se observa que para el primer caso existe un mayor porcentaje de error debido a que en las lecturas en los piezómetros comparada con las lecturas en los nudos en el EPANET existe una diferencia desde los 0.305 m.c.a hasta 0.427 m.c.a, mientras que en el segundo caso (malla cerrada) existe una diferencia desde los 0.044 m.c.a hasta 0.3 m.c.a. Debido a la regulación del caudal y a que en el segundo caso se analizan 16 nudos y no 25 como en el primer caso.

- En el caso del sistema en serie, se halla los mayores porcentajes de error a comparación de los sistemas en malla y paralelo, debido a que no se pudo representar en el EPANET las condiciones en las cuales se coloca el modelo físico para la práctica; en este caso la diferencia más alta es de 1.577 m.c.a y la menor es de 1.498 m.c.a, además en este sistema se trabaja con el caudal límite de la bomba que es de 0.667 l/s.
- En el sistema en paralelo sucede lo mismo que en el sistema en malla (cerrada las válvulas) la diferencia de lecturas entre los piezómetros y el EPANET, el más alto es de 0.421 m.c.a y el más bajo es de 0.212 m.c.a, esto se debe a la regulación del caudal en el sistema.
- En el sistema en serie, luego de las pruebas realizadas, se pudo identificar que existe una dispersión considerable en los porcentajes de error, debido a que los diámetros utilizados no cumplen para las condiciones de utilizar el método de Hazen Williams en el EPANET, inclusive utilizando el método de Darcy en la misma herramienta, por lo tanto, no se debe utilizar el software para tuberías de corta longitud.
- Dado que los porcentajes de error entre el EPANET y los manómetros es alto, no se los ha colocado las tablas para realizar su análisis, debido a la regulación de ingreso del caudal a cada uno de los sistemas, la presión medida en los manómetros es baja; por lo tanto, concluyo que se deberá realizar únicamente la comparación de las mediciones entre manómetros y piezómetros.

6.2 Recomendaciones:

- Considerar los ejes de referencia estipulados en la guía de laboratorio con la finalidad de evitar porcentajes altos de error al momento de comparar los resultados obtenidos con los sistemas de medición piezométricos, manómetros y simulación en EPANET.
- Para evitar lecturas erróneas, se deberá dejar que en cada sistema recorra el caudal en aproximadamente 2 minutos por lo menos y posteriormente iniciar las mediciones.
- Revisar con anterioridad el funcionamiento de cada sistema, para evitar desbordamiento del caudal en el tanque auxiliar #1 debido a la no apertura de la válvula que conecta este tanque tanto al de abastecimiento como al tanque auxiliar #3.
- En el sistema en serie se deberá analizar únicamente en el modelo físico y no comparar con cualquier software, ya que se puede obtener diversos resultados, aplicando diversas condiciones y no sólo la analizada en esta tesis.
- Recomiendo para este modelo constituido por los tres sistemas , no utilizar este software del EPANET para analizar los resultados arrojados por sistemas que contengan tuberías de corta longitud.

BIBLIOGRAFÍA:

- Balseca, D. F. (2019). *Tablas de Lecturas*. Quito: Autoria Propia.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). Pérdidas Menores. En Y. Cengel, & J. Cimbala, *Mecánica de Fluidos* (pág. 736). México DF, México: Litografía Ingramex.
- Duarte Agudelo, A. (2008). Densidad. En A. Duarte Agudelo, *Hidráulica General* (págs. 3-4). Bogotá: UNIDAD DE PUBLICACIONES, Universidad Nacional de Colombia.
- Duarte Agudelo, A. (2008). Pérdida de Energía ocasionada por accesorios. En A. Duarte Agudelo, *Hidráulica General* (pág. 750). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Duarte Agudelo, A. (2008). Pérdidas de Energía ocasionada por accesorios. En A. Duarte Agudelo, *Hidráulica General* (pág. 750). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- King, H., Wisler, C., & Woodburn, J. (1980). Número de Reynolds. En H. King, C. Wisler, & J. Woodburn, *Hidráulica* (pág. 331). México DF: Trillas S.A.
- Mott, R., & Untener, J. (2015). Peso Específico. En R. Mott, & J. Untener, *Mecánica de Fluidos* (pág. 11). México DF: Progreso.
- Saldarriaga, J. (1998). Definición de Fluido. En J. Saldarriaga, *Hidráulica de Tuberías* (pág. 1). Bogotá: D´VINNI EDITORIAL LTDA.
- Samaniego Balseca, D. F. (2019). *Gráficas* . Quito: Autoria Propia.
- Sandoval, R. (1993). Densidad de algunos fluidos. En R. Sandoval, *Principios de la Hidráulica* (pág. 8). Quito: Alfaomega.

GLOSARIO:

- **T:** te de 4 vías de CPVC de 1/2".
- **CR:** cruz de 5 vías de CPVC de 1/2".
- **VB:** válvula bola de CPVC de 1/2".
- **CD:** codo de 3 vías de CPVC de 1/2".
- **CD1:** codo de 2 vías de CPVC de 1".
- **C3/4:** codo de 2 vías de CPVC de 3/4".
- **Co1:** collarín de 1" con reducción a 1/2".
- **T2:** t de CPVC de 3/4".
- **T3:** t de CPVC de 1/2".
- **R1:** Reducción de 1" a 3/4" de CPVC.
- **R2:** reducción de 3/4" a 1/2" de CPVC.
- **m.c.a:** metro de columna de agua.

ANEXOS:

I. TABLAS PARA EL LABORATORIO:

# de Lectura	Lecturas del Piezómetro 1	Lecturas del Piezómetro 2
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		

Tanques	Volumen	Tiempo de aforo	Caudal Q
Descripción	(L)	(s)	(L/s)
Abastecimiento			
Auxiliar # 1			
Auxiliar # 2			

Nudo	Tramo	Longitud	Nudo	Tramo	Longitud
1			15		
	1-2			15-16	
2			16		
	2-3			16-17	
3			17		
	3-4			17-18	
4			18		
	4-5			18-19	
5			19		
	5-6			19-20	
6			20		
	6-7			20-21	
7			21		
	7-8			21-22	
8			22		
	8-9			22-23	
9			23		
	9-10			23-24	
10			24		
	10-11			24-25	
11			25		
	11-12				
12					
	12-13				
13					
	13-14				
14					

TUBERÍA ESPECIAL: RIVAL			
NORMA REFERENCIA: ASTM D - 1785			
ESPECIFICACIONES (CÉDULA 40)			
Diámetro Nominal		Espesor Promedio	Diámetro sin espesor
in	mm	mm	mm
1/2	21.34	3.03	18.31
3/4	26.67	3.13	23.54
1	33.4	3.64	29.76

II. TABLAS DE LECTURAS EN PIEZÓMETROS:

a. Sistema en Malla (Abierta las válvulas internas)

NUDO1	NUDO3	NUDO1	NUDO4	NUDO1	NUDO5
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.243	0.135	0.243	0.109	0.241	0.098
0.247	0.134	0.247	0.107	0.238	0.101
0.251	0.135	0.251	0.108	0.235	0.099
0.246	0.133	0.246	0.11	0.237	0.103
0.248	0.134	0.248	0.108	0.236	0.097
0.25	0.133	0.25	0.109	0.234	0.101
0.245	0.135	0.245	0.109	0.236	0.103
0.242	0.136	0.242	0.108	0.237	0.099
0.246	0.132	0.246	0.11	0.239	0.097
0.25	0.134	0.25	0.107	0.236	0.102
0.247	0.137	0.247	0.109	0.238	0.098
0.25	0.132	0.25	0.109	0.237	0.102
0.244	0.13	0.244	0.106	0.235	0.096
0.241	0.135	0.241	0.109	0.24	0.1
0.246	0.132	0.246	0.109	0.236	0.103
0.243	0.136	0.243	0.11	0.238	0.098
0.249	0.134	0.249	0.108	0.235	0.1
0.244	0.132	0.244	0.11	0.236	0.098
0.247	0.136	0.247	0.108	0.234	0.101
0.25	0.131	0.25	0.11	0.235	0.097
0.248	0.135	0.248	0.106	0.239	0.099
0.246	0.133	0.246	0.108	0.236	0.104
0.248	0.139	0.248	0.11	0.236	0.098
0.243	0.132	0.243	0.111	0.234	0.101
0.247	0.137	0.247	0.107	0.243	0.097

NUDO1	NUDO6		NUDO1	NUDO7		NUDO1	NUDO8
(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)
0.238	0.214		0.242	0.174		0.234	0.123
0.244	0.207		0.236	0.177		0.236	0.126
0.237	0.211		0.238	0.171		0.238	0.128
0.239	0.208		0.234	0.176		0.234	0.134
0.236	0.205		0.237	0.182		0.237	0.13
0.234	0.209		0.244	0.176		0.243	0.125
0.236	0.213		0.239	0.176		0.239	0.127
0.237	0.216		0.236	0.176		0.237	0.124
0.242	0.21		0.234	0.179		0.236	0.128
0.238	0.208		0.236	0.18		0.236	0.126
0.236	0.209		0.237	0.176		0.237	0.13
0.237	0.212		0.242	0.174		0.242	0.127
0.243	0.207		0.238	0.176		0.245	0.132
0.24	0.213		0.236	0.178		0.238	0.128
0.236	0.206		0.237	0.18		0.236	0.133
0.238	0.208		0.243	0.175		0.233	0.126
0.236	0.212		0.24	0.173		0.237	0.123
0.241	0.215		0.236	0.178		0.239	0.125
0.238	0.211		0.236	0.176		0.236	0.128
0.246	0.207		0.234	0.177		0.242	0.132
0.242	0.209		0.237	0.181		0.238	0.127
0.237	0.208		0.243	0.179		0.238	0.131
0.239	0.213		0.238	0.176		0.236	0.129
0.244	0.216		0.235	0.173		0.241	0.126
0.238	0.209		0.24	0.177		0.237	0.127

NUDO1	NUDO9		NUDO1	NUDO10		NUDO1	NUDO11
(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)
0.232	0.109		0.427	0.235		0.245	0.218
0.235	0.107		0.429	0.227		0.249	0.216
0.238	0.108		0.427	0.229		0.244	0.219
0.234	0.11		0.43	0.227		0.247	0.221
0.237	0.108		0.428	0.226		0.251	0.218
0.243	0.109		0.427	0.234		0.248	0.22
0.239	0.109		0.429	0.236		0.249	0.218
0.237	0.108		0.431	0.229		0.244	0.219
0.238	0.113		0.426	0.226		0.246	0.216
0.238	0.107		0.428	0.233		0.25	0.223
0.239	0.109		0.427	0.23		0.252	0.218
0.244	0.109		0.429	0.229		0.248	0.219
0.247	0.106		0.427	0.225		0.247	0.224
0.238	0.109		0.43	0.229		0.248	0.218
0.239	0.109		0.428	0.227		0.249	0.217
0.237	0.111		0.427	0.226		0.248	0.216
0.239	0.108		0.432	0.234		0.248	0.221
0.239	0.11		0.428	0.236		0.247	0.217
0.238	0.108		0.427	0.229		0.248	0.222
0.243	0.106		0.429	0.235		0.249	0.218
0.239	0.108		0.431	0.233		0.248	0.219
0.245	0.108		0.426	0.226		0.247	0.22
0.238	0.111		0.428	0.229		0.249	0.218
0.239	0.107		0.427	0.232		0.248	0.216
0.243	0.109		0.43	0.235		0.247	0.219

NUDO1	NUDO12		NUDO1	NUDO13		NUDO1	NUDO14
(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)		(m.c.a)	(m.c.a)
0.245	0.177		0.245	0.133		0.244	0.119
0.249	0.179		0.239	0.134		0.237	0.116
0.244	0.177		0.244	0.138		0.238	0.119
0.247	0.175		0.243	0.134		0.234	0.117
0.251	0.171		0.247	0.137		0.237	0.118
0.248	0.176		0.244	0.134		0.244	0.116
0.249	0.178		0.249	0.136		0.239	0.114
0.244	0.179		0.246	0.134		0.236	0.118
0.246	0.178		0.248	0.135		0.234	0.116
0.25	0.172		0.239	0.136		0.236	0.119
0.252	0.174		0.243	0.133		0.237	0.115
0.248	0.178		0.246	0.134		0.242	0.119
0.247	0.18		0.249	0.132		0.238	0.121
0.248	0.177		0.243	0.135		0.236	0.118
0.249	0.176		0.248	0.133		0.237	0.116
0.248	0.179		0.245	0.136		0.243	0.114
0.248	0.179		0.249	0.133		0.24	0.115
0.247	0.176		0.243	0.136		0.236	0.114
0.248	0.179		0.246	0.134		0.236	0.117
0.249	0.174		0.248	0.136		0.234	0.112
0.248	0.179		0.246	0.133		0.237	0.116
0.247	0.176		0.239	0.135		0.243	0.118
0.249	0.178		0.243	0.134		0.238	0.117
0.248	0.179		0.248	0.137		0.235	0.119
0.247	0.176		0.246	0.134		0.238	0.117

NUDO1	NUDO15	NUDO1	NUDO16	NUDO1	NUDO17
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.245	0.168	0.243	0.245	0.235	0.176
0.249	0.17	0.245	0.249	0.233	0.174
0.244	0.169	0.241	0.244	0.235	0.178
0.243	0.172	0.243	0.243	0.237	0.18
0.247	0.171	0.239	0.247	0.236	0.181
0.244	0.166	0.244	0.244	0.234	0.18
0.249	0.169	0.238	0.249	0.236	0.179
0.246	0.172	0.245	0.246	0.237	0.178
0.248	0.174	0.238	0.248	0.239	0.178
0.239	0.171	0.242	0.249	0.236	0.177
0.243	0.173	0.244	0.243	0.238	0.175
0.246	0.175	0.242	0.246	0.237	0.18
0.249	0.172	0.239	0.249	0.235	0.177
0.243	0.169	0.243	0.243	0.238	0.179
0.248	0.173	0.238	0.248	0.236	0.176
0.245	0.17	0.245	0.245	0.238	0.178
0.249	0.172	0.239	0.249	0.235	0.18
0.243	0.173	0.243	0.243	0.236	0.178
0.246	0.174	0.241	0.246	0.234	0.18
0.248	0.172	0.238	0.248	0.235	0.179
0.246	0.171	0.244	0.246	0.233	0.178
0.249	0.17	0.241	0.249	0.236	0.178
0.247	0.169	0.239	0.247	0.236	0.179
0.248	0.171	0.238	0.248	0.234	0.18
0.246	0.173	0.243	0.246	0.235	0.182

NUDO1	NUDO18	NUDO1	NUDO19	NUDO1	NUDO20
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.243	0.141	0.243	0.118	0.245	0.128
0.245	0.139	0.24	0.122	0.249	0.125
0.241	0.141	0.238	0.118	0.244	0.128
0.243	0.143	0.243	0.117	0.247	0.127
0.239	0.137	0.239	0.124	0.243	0.124
0.244	0.139	0.244	0.119	0.248	0.129
0.238	0.143	0.238	0.117	0.249	0.127
0.245	0.14	0.245	0.121	0.244	0.122
0.238	0.139	0.238	0.119	0.246	0.126
0.242	0.144	0.242	0.117	0.248	0.127
0.244	0.138	0.244	0.119	0.246	0.129
0.242	0.14	0.242	0.12	0.248	0.124
0.239	0.139	0.239	0.116	0.247	0.126
0.243	0.138	0.243	0.119	0.248	0.129
0.238	0.136	0.238	0.123	0.249	0.124
0.245	0.141	0.245	0.118	0.248	0.127
0.239	0.139	0.239	0.118	0.248	0.123
0.243	0.14	0.243	0.117	0.247	0.127
0.241	0.143	0.241	0.122	0.248	0.122
0.238	0.138	0.238	0.119	0.249	0.129
0.244	0.141	0.244	0.116	0.248	0.126
0.241	0.139	0.241	0.118	0.247	0.128
0.239	0.141	0.239	0.121	0.249	0.125
0.238	0.143	0.238	0.118	0.248	0.128
0.243	0.138	0.243	0.121	0.247	0.126

NUDO1	NUDO21	NUDO1	NUDO22	NUDO1	NUDO23
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.242	0.298	0.249	0.188	0.248	0.133
0.247	0.302	0.247	0.185	0.245	0.128
0.245	0.297	0.245	0.187	0.247	0.126
0.248	0.298	0.248	0.186	0.248	0.128
0.25	0.299	0.25	0.183	0.244	0.131
0.248	0.304	0.248	0.185	0.243	0.13
0.249	0.307	0.249	0.187	0.246	0.128
0.244	0.3	0.244	0.188	0.244	0.132
0.246	0.302	0.246	0.186	0.247	0.129
0.248	0.298	0.243	0.187	0.243	0.131
0.246	0.302	0.245	0.184	0.245	0.133
0.248	0.306	0.248	0.182	0.248	0.128
0.243	0.298	0.243	0.184	0.243	0.132
0.246	0.3	0.246	0.186	0.246	0.13
0.249	0.303	0.249	0.188	0.244	0.129
0.246	0.299	0.246	0.187	0.246	0.133
0.248	0.301	0.248	0.184	0.248	0.128
0.247	0.306	0.247	0.182	0.247	0.129
0.248	0.3	0.248	0.183	0.243	0.133
0.249	0.299	0.249	0.185	0.241	0.13
0.251	0.297	0.244	0.183	0.244	0.128
0.247	0.298	0.247	0.187	0.247	0.129
0.249	0.299	0.243	0.186	0.243	0.132
0.248	0.305	0.247	0.188	0.247	0.128
0.244	0.308	0.244	0.183	0.245	0.131

NUDO1	NUDO24	NUDO1	NUDO25
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.236	0.116	0.237	0.084
0.234	0.119	0.238	0.086
0.237	0.118	0.235	0.082
0.234	0.117	0.239	0.085
0.239	0.122	0.241	0.087
0.243	0.119	0.238	0.086
0.239	0.117	0.236	0.084
0.237	0.121	0.239	0.082
0.236	0.119	0.24	0.084
0.236	0.117	0.236	0.088
0.237	0.119	0.238	0.089
0.242	0.12	0.237	0.09
0.24	0.118	0.234	0.087
0.238	0.119	0.236	0.04
0.236	0.122	0.239	0.085
0.238	0.118	0.238	0.089
0.237	0.121	0.235	0.09
0.239	0.117	0.239	0.088
0.236	0.122	0.242	0.087
0.243	0.119	0.235	0.089
0.238	0.116	0.239	0.087
0.238	0.118	0.236	0.083
0.236	0.12	0.238	0.085
0.241	0.117	0.234	0.088
0.237	0.119	0.249	0.09

b. Sistema en Malla (Cerrada las válvulas internas)

NUDO1	NUDO11	NUDO1	NUDO16	NUDO1	NUDO21
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.836	0.867	0.894	0.935	0.925	0.973
0.839	0.869	0.897	0.937	0.923	0.977
0.834	0.872	0.9	0.935	0.927	0.972
0.832	0.865	0.898	0.938	0.937	0.974
0.835	0.862	0.895	0.943	0.928	0.977
0.838	0.864	0.898	0.94	0.926	0.974
0.84	0.866	0.901	0.937	0.93	0.978
0.844	0.863	0.896	0.936	0.927	0.976
0.838	0.864	0.898	0.942	0.932	0.974
0.835	0.867	0.895	0.937	0.926	0.976
0.837	0.865	0.897	0.939	0.925	0.982
0.839	0.869	0.899	0.942	0.927	0.985
0.843	0.873	0.897	0.944	0.922	0.982
0.837	0.87	0.902	0.935	0.934	0.986
0.839	0.867	0.899	0.938	0.929	0.978
0.834	0.864	0.897	0.936	0.927	0.983
0.832	0.866	0.892	0.941	0.924	0.985
0.837	0.869	0.894	0.938	0.928	0.988
0.834	0.866	0.899	0.936	0.93	0.981
0.838	0.869	0.896	0.939	0.927	0.977
0.841	0.872	0.901	0.935	0.924	0.976
0.838	0.868	0.898	0.943	0.936	0.978
0.835	0.865	0.895	0.939	0.929	0.977
0.837	0.867	0.899	0.935	0.925	0.982
0.839	0.871	0.896	0.937	0.928	0.978

NUDO1	NUDO2	NUDO1	NUDO7	NUDO1	NUDO12
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.958	0.927	0.976	0.947	1.005	1.011
0.959	0.929	0.978	0.949	1.003	1.013
0.962	0.927	0.976	0.945	1.002	1.017
0.9	0.931	0.979	0.942	1	1.015
0.964	0.934	0.98	0.939	0.998	1.017
0.957	0.928	0.983	0.937	0.996	1.019
0.959	0.93	0.985	0.938	0.999	1.016
0.962	0.927	0.982	0.94	0.997	1.018
0.959	0.929	0.984	0.943	1.002	1.022
0.96	0.933	0.98	0.947	1.004	1.02
0.962	0.93	0.982	0.949	1.003	1.018
0.958	0.934	0.978	0.946	1.005	1.019
0.959	0.928	0.976	0.944	1	1.021
0.957	0.931	0.979	0.947	0.997	1.017
0.961	0.929	0.976	0.938	0.995	1.014
0.963	0.927	0.979	0.939	0.998	1.016
0.96	0.929	0.981	0.937	0.996	1.018
0.958	0.933	0.983	0.943	1	1.015
0.96	0.931	0.98	0.946	1.003	1.017
0.963	0.928	0.977	0.949	1.005	1.014
0.961	0.929	0.979	0.945	1.001	1.012
0.964	0.932	0.978	0.943	0.998	1.013
0.96	0.927	0.98	0.939	0.996	1.016
0.958	0.929	0.983	0.937	1	1.019
0.962	0.933	0.977	0.942	0.997	1.022

NUDO1	NUDO17	NUDO1	NUDO3	NUDO1	NUDO8
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
1.005	1.048	0.964	0.732	1.037	0.803
1.008	1.05	0.962	0.728	1.039	0.806
1.007	1.053	0.961	0.728	1.037	0.804
1.009	1.055	0.963	0.727	1.038	0.806
1.012	1.057	0.965	0.729	1.039	0.806
1.014	1.059	0.966	0.731	1.041	0.803
1.011	1.056	0.96	0.728	1.038	0.807
1.013	1.058	0.959	0.73	1.039	0.809
1.008	1.055	0.964	0.728	1.037	0.806
1.006	1.053	0.963	0.726	1.035	0.807
1.01	1.048	0.965	0.731	1.04	0.808
1.009	1.046	0.963	0.73	1.038	0.804
1.007	1.049	0.966	0.734	1.039	0.802
1.008	1.054	0.963	0.73	1.042	0.803
1.007	1.057	0.965	0.728	1.045	0.806
1.005	1.053	0.966	0.733	1.044	0.803
1.008	1.056	0.961	0.728	1.046	0.807
1.01	1.059	0.96	0.731	1.04	0.809
1.011	1.055	0.959	0.728	1.037	0.806
1.013	1.053	0.962	0.731	1.038	0.807
1.014	1.051	0.965	0.73	1.036	0.808
1.012	1.047	0.966	0.729	1.041	0.806
1.008	1.05	0.96	0.732	1.044	0.803
1.009	1.052	0.959	0.729	1.04	0.807
1.006	1.055	0.955	0.73	1.038	0.809

NUDO1	NUDO4	NUDO1	NUDO9	NUDO1	NUDO5
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
1.044	0.736	1.037	0.775	0.975	0.689
1.046	0.734	1.036	0.754	0.979	0.695
1.04	0.737	1.037	0.754	0.98	0.692
1.037	0.734	1.038	0.757	0.973	0.688
1.038	0.739	1.039	0.753	0.975	0.685
1.036	0.743	1.041	0.755	0.972	0.69
1.041	0.739	1.038	0.753	0.978	0.684
1.044	0.737	1.039	0.75	0.977	0.687
1.04	0.736	1.037	0.749	0.979	0.68
1.038	0.736	1.035	0.753	0.976	0.685
1.038	0.737	1.04	0.753	0.978	0.682
1.04	0.742	1.038	0.754	0.982	0.679
1.043	0.74	1.039	0.754	0.978	0.694
1.044	0.738	1.042	0.758	0.981	0.686
1.046	0.736	1.045	0.752	0.978	0.681
1.044	0.738	1.044	0.751	0.979	0.683
1.042	0.737	1.046	0.75	0.977	0.692
1.04	0.739	1.04	0.753	0.983	0.684
1.043	0.736	1.037	0.751	0.979	0.678
1.039	0.743	1.038	0.753	0.981	0.679
1.038	0.738	1.036	0.752	0.978	0.682
1.039	0.738	1.041	0.752	0.975	0.68
1.037	0.736	1.044	0.753	0.978	0.678
1.041	0.741	1.04	0.75	0.977	0.679
1.043	0.737	1.038	0.752	0.979	0.682

NUDO1	NUDO10	NUDO1	NUDO22
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.975	0.725	1.069	1.019
0.979	0.723	1.074	1.015
0.98	0.727	1.068	1.017
0.983	0.737	1.07	1.013
0.981	0.728	1.068	1.017
0.98	0.721	1.066	1.014
0.978	0.726	1.064	1.019
0.977	0.727	1.063	1.021
0.979	0.732	1.062	1.019
0.976	0.722	1.064	1.012
0.978	0.725	1.069	1.016
0.982	0.727	1.067	1.014
0.978	0.722	1.068	1.019
0.982	0.734	1.061	1.021
0.978	0.719	1.065	1.024
0.979	0.729	1.066	1.017
0.977	0.724	1.063	1.019
0.983	0.735	1.068	1.018
0.979	0.721	1.07	1.014
0.981	0.72	1.063	1.019
0.978	0.731	1.073	1.016
0.975	0.717	1.067	1.014
0.978	0.719	1.06	1.017
0.977	0.715	1.059	1.019
0.979	0.724	1.063	1.02

c. Sistema en Serie

NUDO1	NUDO3	NUDO1	NUDO4	NUDO1	NUDO5
-------	-------	-------	-------	-------	-------

(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
1.328	1.294	1.354	1.233	1.359	1.164
1.327	1.296	1.352	1.235	1.362	1.162
1.325	1.293	1.359	1.239	1.363	1.163
1.328	1.294	1.357	1.238	1.357	1.161
1.325	1.298	1.354	1.234	1.358	1.158
1.327	1.299	1.359	1.232	1.36	1.159
1.332	1.298	1.354	1.237	1.354	1.163
1.328	1.296	1.357	1.234	1.361	1.161
1.329	1.299	1.358	1.235	1.357	1.162
1.33	1.296	1.361	1.233	1.354	1.161
1.327	1.296	1.356	1.238	1.363	1.163
1.329	1.297	1.354	1.236	1.36	1.16
1.33	1.293	1.356	1.239	1.359	1.159
1.328	1.292	1.358	1.231	1.361	1.161
1.326	1.294	1.36	1.236	1.358	1.158
1.329	1.292	1.355	1.238	1.362	1.162
1.327	1.297	1.359	1.236	1.359	1.159
1.331	1.294	1.355	1.234	1.361	1.162
1.332	1.291	1.357	1.231	1.357	1.16
1.328	1.293	1.353	1.234	1.361	1.161
1.328	1.296	1.358	1.237	1.359	1.159
1.327	1.298	1.359	1.239	1.356	1.16
1.329	1.297	1.354	1.233	1.359	1.159
1.331	1.291	1.359	1.232	1.357	1.16
1.329	1.293	1.352	1.235	1.359	1.159

NUDO1	NUDO6	NUDO1	NUDO7	NUDO1	NUDO8
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
1.326	1.122	1.297	1.058	1.457	0.986
1.329	1.118	1.302	1.053	1.459	0.989
1.325	1.119	1.296	1.055	1.458	0.98
1.328	1.12	1.298	1.053	1.457	0.984
1.326	1.118	1.299	1.056	1.455	0.985
1.327	1.128	1.304	1.054	1.459	0.987
1.332	1.13	1.302	1.057	1.458	0.958
1.328	1.128	1.3	1.053	1.457	0.987
1.329	1.132	1.302	1.051	1.462	0.989
1.33	1.129	1.298	1.054	1.46	0.986
1.327	1.131	1.302	1.056	1.458	0.988
1.329	1.129	1.306	1.053	1.459	0.992
1.328	1.131	1.298	1.057	1.457	0.988
1.326	1.131	1.3	1.051	1.458	0.993
1.328	1.133	1.304	1.054	1.461	0.987
1.326	1.13	1.299	1.056	1.457	0.989
1.327	1.126	1.302	1.051	1.458	0.991
1.332	1.128	1.304	1.053	1.457	0.988
1.328	1.13	1.301	1.055	1.455	0.989
1.329	1.124	1.299	1.052	1.459	0.991
1.328	1.122	1.297	1.057	1.458	0.988
1.327	1.126	1.298	1.053	1.457	0.985
1.329	1.13	1.299	1.05	1.455	0.988
1.331	1.131	1.303	1.052	1.459	0.987
1.333	1.133	1.301	1.057	1.462	0.989

NUDO1	NUDO9
(m.c.a)	(m.c.a)
1.454	0.955
1.453	0.953
1.454	0.954
1.452	0.949
1.45	0.952
1.452	0.949
1.449	0.951
1.451	0.949
1.447	0.954
1.448	0.955
1.451	0.952
1.453	0.951
1.447	0.95
1.448	0.947
1.451	0.949
1.453	0.951
1.448	0.95
1.452	0.952
1.447	0.95
1.451	0.952
1.448	0.955
1.447	0.953
1.449	0.948
1.452	0.952
1.454	0.948

d. Sistema en Paralelo

NUDO1	NUDO3	NUDO1	NUDO4	NUDO1	NUDO5
(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)	(m.c.a)
0.858	0.899	0.858	0.836	0.856	0.82
0.859	0.897	0.856	0.838	0.856	0.826
0.858	0.898	0.852	0.837	0.854	0.824
0.857	0.898	0.857	0.838	0.855	0.822
0.858	0.9	0.856	0.835	0.855	0.827
0.861	0.902	0.852	0.837	0.855	0.823
0.86	0.899	0.856	0.837	0.856	0.822
0.858	0.898	0.857	0.838	0.854	0.821
0.862	0.899	0.852	0.839	0.853	0.826
0.858	0.898	0.854	0.836	0.853	0.819
0.859	0.897	0.856	0.838	0.856	0.821
0.857	0.895	0.857	0.839	0.855	0.819
0.859	0.898	0.854	0.837	0.851	0.818
0.863	0.902	0.856	0.838	0.853	0.816
0.861	0.9	0.859	0.835	0.856	0.825
0.859	0.898	0.856	0.838	0.856	0.821
0.862	0.898	0.854	0.834	0.854	0.823
0.857	0.899	0.855	0.836	0.853	0.824
0.858	0.898	0.857	0.835	0.857	0.824
0.854	0.897	0.854	0.838	0.854	0.819
0.856	0.895	0.858	0.834	0.856	0.824
0.857	0.897	0.857	0.836	0.855	0.818
0.859	0.901	0.859	0.837	0.851	0.823
0.854	0.898	0.855	0.835	0.853	0.816
0.858	0.897	0.854	0.834	0.855	0.819

NUDO1	NUDO6
(m.c.a)	(m.c.a)
0.851	0.843
0.856	0.845
0.854	0.841
0.855	0.843
0.853	0.846
0.855	0.844
0.856	0.848
0.854	0.845
0.853	0.848
0.851	0.842
0.853	0.844
0.85	0.842
0.851	0.849
0.854	0.843
0.856	0.847
0.853	0.845
0.854	0.849
0.851	0.843
0.854	0.841
0.857	0.844
0.852	0.847
0.855	0.841
0.853	0.843
0.856	0.844
0.85	0.843

II. TABLAS DE RESULTADOS

a. Sistema en Malla (Abierta las válvulas internas)

Nudo 1-5 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 5 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 5		
0.243	0.104	1	1.243	1.104	1.55	1.41	19.806%	21.702%
MÍN	MÍN							
0.234	0.096	1	1.234	1.096				
							20.387%	22.270%

Nudo 1-6 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 6 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 6 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 6		
0.246	0.216	1	1.246	1.216	1.55	1.48	19.613%	17.838%
MÍN	MÍN							
0.234	0.205	1	1.234	1.205				20.387%

Nudo 1-7 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 7 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 7 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 7		
0.244	0.182	1	1.244	1.182	1.55	1.46	19.742%	19.041%
MÍN	MÍN							
0.234	0.171	1	1.234	1.171				20.387%

Nudo 1-8 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 8 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 8 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 8		
0.245	0.134	1	1.245	1.134	1.55	1.45	19.677%	21.793%
MÍN	MÍN							
0.233	0.123	1	1.233	1.123				20.452%

Nudo 1-9 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 9 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 9 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 9		
0.247	0.113	1	1.247	1.113	1.55	1.43	19.548%	22.168%
MÍN	MÍN							
0.232	0.106	1	1.232	1.106				20.516%

Nudo 1-10 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 10 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 10 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 10		
0.432	0.236	1	1.432	1.236	1.55	1.42	7.613%	12.958%
MÍN	MÍN							
0.426	0.225	1	1.426	1.225			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 10 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 10 EPANET)
							8.000%	13.732%
Nudo 1-11 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 11 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 11 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 11		
0.252	0.224	1	1.252	1.224	1.55	1.46	19.226%	16.164%
MÍN	MÍN							
0.244	0.216	1	1.244	1.216			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 11 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 11 EPANET)
							19.742%	16.712%
Nudo 1-12 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 12 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 12 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 12		
0.252	0.18	1	1.252	1.18	1.55	1.46	19.226%	19.178%
MÍN	MÍN							
0.244	0.171	1	1.244	1.171			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 12 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 12 EPANET)
							19.742%	19.795%
Nudo 1-13 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 13 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 13 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 13		
0.249	0.138	1	1.249	1.138	1.55	1.45	19.419%	21.517%
MÍN	MÍN							
0.239	0.132	1	1.239	1.132			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 13 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 13 EPANET)
							20.065%	21.931%

Nudo 1-14 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 14 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 14 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 14			
0.244	0.121	1	1.244	1.121	1.55	1.43	19.742%	21.608%	
MÍN	MÍN								
0.234	0.112	1	1.234	1.112					
							20.387%	22.238%	
Nudo 1-15 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 15 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 15 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 15			
0.249	0.175	1	1.249	1.175	1.55	1.42	19.419%	17.254%	
MÍN	MÍN								
0.239	0.166	1	1.239	1.166					
							20.065%	17.887%	
Nudo 1-16 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 16 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 16 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 16			
0.245	0.249	1	1.245	1.249	1.55	1.46	19.677%	14.452%	
MÍN	MÍN								
0.238	0.243	1	1.238	1.243					
							20.129%	14.863%	
Nudo 1-17 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 17 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 17 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 17			
0.239	0.182	1	1.239	1.182	1.55	1.45	20.065%	18.483%	
MÍN	MÍN								
0.233	0.174	1	1.233	1.174					
							20.452%	19.034%	

Nudo 1-18 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 18 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 18 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 18		
0.245	0.144	1	1.245	1.144	1.55	1.45	19.677%	21.103%
MÍN	MÍN							
0.238	0.136	1	1.238	1.136				
							20.129%	21.655%

Nudo 1-19 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 19 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 19 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 19		
0.245	0.124	1	1.245	1.124	1.55	1.44	19.677%	21.944%
MÍN	MÍN							
0.238	0.116	1	1.238	1.116				
							20.129%	22.500%

Nudo 1-20 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 20 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 20 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 20		
0.249	0.129	1	1.249	1.129	1.55	1.42	19.419%	20.493%
MÍN	MÍN							
0.243	0.122	1	1.243	1.122				
							19.806%	20.986%

Nudo 1-21 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 21 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 21 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 21		
0.251	0.308	1	1.251	1.308	1.55	1.45	19.290%	9.793%
MÍN	MÍN							
0.242	0.297	1	1.242	1.297				
							19.871%	10.552%

Nudo 1-22 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 22 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 22 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 22			
0.250	0.188	1	1.250	1.188	1.55	1.45	19.355%	18.069%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 22 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 22 EPANET)
0.243	0.182	1	1.243	1.182					
							19.806%	18.483%	
Nudo 1-23 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 23 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 23 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 23			
0.248	0.133	1	1.248	1.133	1.55	1.45	19.484%	21.862%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 23 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 23 EPANET)
0.241	0.126	1	1.241	1.126					
							19.935%	22.345%	
Nudo 1-24 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 24 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 24 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 24			
0.243	0.122	1	1.243	1.122	1.55	1.44	19.806%	22.083%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 24 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 24 EPANET)
0.234	0.116	1	1.234	1.116					
							20.387%	22.500%	
Nudo 1-25 (Sistema Abierto)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 25 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 25 EPANET)	
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 25			
0.249	0.09	1	1.249	1.09	1.55	1.4	19.419%	22.143%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 24 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 25 EPANET)
0.234	0.082	1	1.234	1.082					
							20.387%	22.714%	

b. Sistema en Malla (Cerrada las válvulas internas)

Nudo 1-21 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 21 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 21 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 21		
0.937	0.988	1	1.937	1.988	1.8	1.76	7.611%	12.955%
MÍN	MÍN							
0.922	0.972	1	1.922	1.972				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							6.778%	12.045%
Nudo 1-2 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 2 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 2 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 2		
0.964	0.934	1	1.964	1.934	1.8	1.75	9.111%	10.514%
MÍN	MÍN							
0.9	0.927	1	1.900	1.927				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							5.556%	10.114%
Nudo 1-7 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 7 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 7 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 7		
0.985	0.949	1	1.985	1.949	1.8	1.75	10.278%	11.371%
MÍN	MÍN							
0.976	0.937	1	1.976	1.937				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							9.778%	10.686%
Nudo 1-12 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 12 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 12 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 12		
1.005	1.022	1	2.005	2.022	1.8	1.76	11.389%	14.886%
MÍN	MÍN							
0.995	1.011	1	1.995	2.011				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							10.833%	14.261%

Nudo 1-17 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 17 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 17 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 17		
1.014	1.059	1	2.014	2.059	1.8	1.76	11.889%	16.989%
MÍN	MÍN							
1.005	1.046	1	2.005	2.046				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							11.389%	16.250%
Nudo 1-3 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 3 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 3 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 3		
0.966	0.734	1	1.966	1.734	1.8	1.7	9.222%	2.000%
MÍN	MÍN							
0.955	0.726	1	1.955	1.726				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							8.611%	1.529%
Nudo 1-8 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 8 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 8 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 8		
1.046	0.809	1	2.046	1.809	1.8	1.7	13.667%	6.412%
MÍN	MÍN							
1.035	0.802	1	2.035	1.802				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							13.056%	6.000%
Nudo 1-4 (Sistema Válvulas cerradas internas)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 4 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 4 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 4		
1.046	0.743	1	2.046	1.743	1.8	1.64	13.667%	6.280%
MÍN	MÍN							
1.036	0.734	1	2.036	1.734				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							13.111%	5.732%

Nudo 1-9 (Sistema Válvulas cerradas internas)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 9 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 9 EPANET)	
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 9			
1.046	0.775	1	2.046	1.775	1.8	1.65	13.667%	7.576%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 9 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 9 EPANET)
1.035	0.749	1	2.035	1.749					
							13.056%	6.000%	
Nudo 1-5 (Sistema Válvulas cerradas internas)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 5 EPANET)	
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 5			
0.983	0.695	1	1.983	1.695	1.8	1.62	10.167%	4.630%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 5 EPANET)
0.972	0.678	1	1.972	1.678					
							9.556%	3.580%	
Nudo 1-10 (Sistema Válvulas cerradas internas)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 10 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 10 EPANET)	
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 10			
0.983	0.737	1	1.983	1.737	1.8	1.63	10.167%	6.564%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 10 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 10 EPANET)
0.975	0.715	1	1.975	1.715					
							9.722%	5.215%	
Nudo 1-22 (Sistema Válvulas cerradas internas)									
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 22 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 22 EPANET)	
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 10			
1.074	1.024	1	2.074	2.024	1.8	1.79	15.222%	13.073%	
MÍN	MÍN							ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 22 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 22 EPANET)
1.059	1.012	1	2.059	2.012					
							14.389%	12.402%	

c. Sistema en Serie

Nudo 1-5 (Sistema Abierto)

PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 5 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 4		
1.363	1.164	1	2.363	2.164	3.96	3.84	40.328%	43.646%
MÍN	MÍN							
1.354	1.158	1	2.354	2.158				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							40.556%	43.802%

Nudo 1-6 (Sistema Abierto)

PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 6 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 6 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 4		
1.333	1.133	1	2.333	2.133	3.96	3.77	41.086%	43.422%
MÍN	MÍN							
1.325	1.118	1	2.325	2.118				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							41.288%	43.820%

Nudo 1-7 (Sistema Abierto)

PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 7 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 7 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 4		
1.306	1.058	1	2.306	2.058	3.96	3.73	41.768%	44.826%
MÍN	MÍN							
1.296	1.05	1	2.296	2.05				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							42.020%	45.040%

Nudo 1-8 (Sistema Abierto)

PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 8 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 8 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 8		
1.462	0.993	1	2.462	1.993	3.96	3.57	37.828%	44.174%
MÍN	MÍN							
1.455	0.958	1	2.455	1.958				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							38.005%	45.154%

Nudo 1-9 (Sistema Abierto)

PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 9 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 9 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 9		
1.454	0.955	1	2.454	1.955	3.96	3.47	38.030%	43.660%
MÍN	MÍN							
1.447	0.947	1	2.447	1.947				ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)
							38.207%	43.890%

d. Sistema en Paralelo

Nudo 1-5 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 5 EPANET)
MÁX	MÁX		(m.c.a)	(m.c.a)	Nudo 1	Nudo 5		
0.857	0.827	1	1.857	1.827	1.64	1.49	13.232%	22.617%
MÍN	MÍN							
0.851	0.816	1	1.851	1.816			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 5 EPANET)
							12.866%	21.879%

Nudo 1-6 (Sistema Abierto)								
PIEZÓMETRO 1	PIEZÓMETRO 2	Δ ALTURA	PRESIÓN PIEZÓMETRO 1	PRESIÓN PIEZÓMETRO 2	EPANET	EPANET	ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÁXIMA-NUDO 5 EPANET)
MÁX	MÁX		TOTAL	TOTAL	Nudo 1	Nudo 6		
0.857	0.849	1.08	1.937	1.929	1.64	1.5	18.110%	22.240%
MÍN	MÍN							
0.85	0.841	1.08	1.930	1.921			ERROR NUDO 1 (PIEZÓMETRO 1 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO1 EPANET)	ERROR NUDO 5 (PIEZÓMETRO 2 PRESIÓN MÍNIMA-NUDO 5 EPANET)
							17.683%	28.067%

III. PORCENTAJES DE ERROR ENTRE MANÓMETRO Y EPANET

a. Sistema en Malla

Nudo 1 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.465	1.8	26.971
Nudo 2 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.458	1.75	28.797
Nudo 3 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.183	1.7	22.129
Nudo 4 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.106	1.64	22.114
Nudo 5 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.106	1.62	23.064
Nudo 6 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.606	1.77	32.070

Nudo 7 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.479	1.75	29.403
Nudo 8 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.324	1.7	26.848
Nudo 9 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.183	1.65	24.419
Nudo 10 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.106	1.63	22.589
Nudo 11 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.535	1.77	30.183
Nudo 12 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.479	1.75	29.403
Nudo 16 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.746	1.76	35.918
Nudo 17 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.803	1.76	37.206
Nudo 21 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.810	1.76	37.363
Nudo 22 (Sistema de Válvula Cerradas)		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.817	1.79	36.455

b. Sistema en Serie

MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.106	4.61	45.675
Nudo 2		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.099	4.55	46.123
Nudo 3		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
2.099	5.53	37.949

Nudo 4		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.831	5.41	33.844
Nudo 5		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.690	5.32	31.770
Nudo 6		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.761	4.12	42.732
Nudo 7		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.690	4.03	41.939
Nudo 8		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.479	3.24	45.644
Nudo 9		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
1.197	2.63	45.520

c. Sistema en Paralelo

Nudo 1		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.64	47.235
Nudo 2		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.6	48.415
Nudo 3		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.58	49.028
Nudo 4		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.51	51.301
Nudo 5		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.49	51.990
Nudo 6		
MANÓMETRO	EPANET	% DE ERROR
0.775	1.5	51.643

IV. DATOS DEL FABRICANTE DE LA BOMBA DE 1/2 HP



PE /BR



PE A

Pompe volumetriche periferiche ad aspirazione frontale adatte a piccoli impianti domestici e per modeste applicazioni industriali; caratterizzata da un notevole rapporto tra le prestazioni offerte e la potenza richiesta.

Peripheral positive displacement pumps with frontal suction for small household systems and simple industrial applications; characterised by a considerable ratio between performance and required output.

Bombas volumétricas periféricas de aspiración frontal apropiadas para pequeñas instalaciones domésticas y para modestas aplicaciones industriales; caracterizadas por una excelente relación entre los rendimientos que ofrecen y la potencia requerida.

Pompes volumétriques périphériques à aspiration frontale, aptes aux petites installations domestiques et pour des applications industrielles légères; caractérisées par un excellent rapport entre performances offertes et puissance demandée.

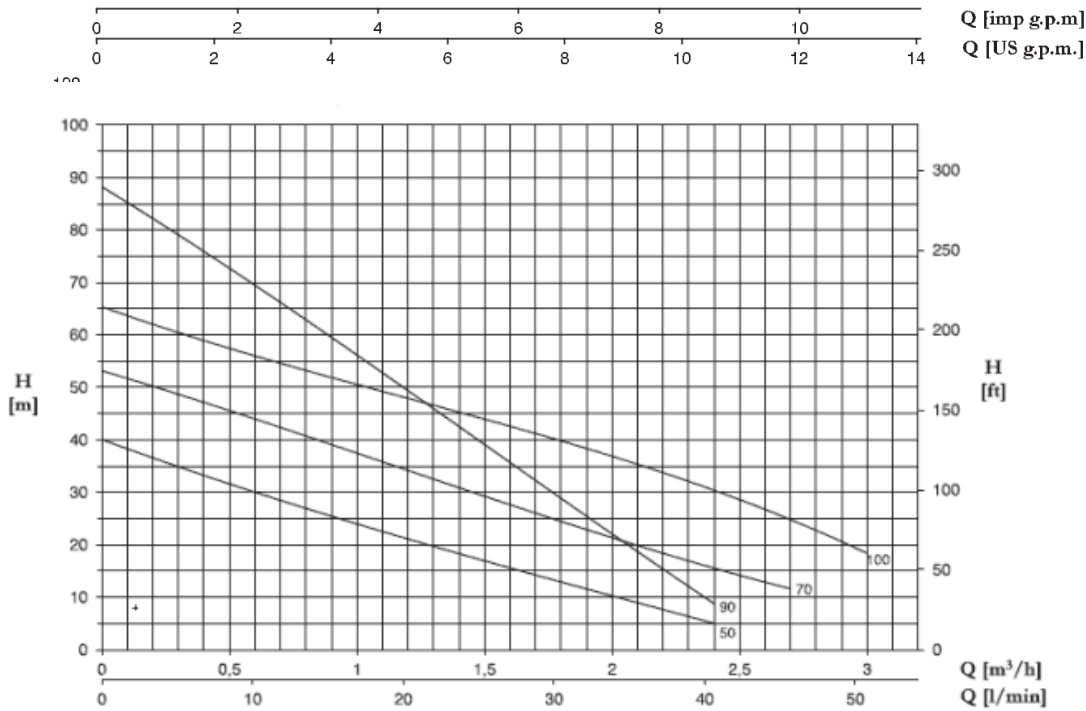
**CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE / CONSTRUCTION FEATURES
CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS / CARACTERÍSTICAS D'EXECUTION**

Corpo pompa	ghisa, bronzo (PE 50 BR)
Pump body	cast iron, bronze (PE 50 BR)
Cuerpo bomba	fundición, bronce (PE 50 BR)
Corps de pompe	fonte, bronze (PE 50 BR)
Supporto motore	ghisa, ghisa o bronzo (PE 50 BR)
Motor bracket	cast iron, cast iron or bronze (PE 50 BR)
Soporte motor	fundición, fundición o bronce (PE 50 BR)
Support moteur	fonte, fonte ou bronze (PE 50 BR)
Girante	ottone
Impeller	brass
Rodete	latón
Turbine	laiton
Tenuta meccanica	ceramica-grafite
Mechanical seal	ceramic-graphite
Sello mecánico	cerámica-grafito
Garniture mécanique	céramique-graphite
Albero motore	acciaio AISI 416
Motor shaft	stainless steel AISI 416
Eje motor	acero AISI 416
Arbre moteur	acier AISI 416
Temperatura del liquido	
Liquid temperature	0 - 90 °C
Temperatura del liquido	
Température du liquide	
Pressione di esercizio	max 6 bar (PE 50F)
Operating pressure	max 8 bar (PE 70, PE 100)
Presión de trabajo	max 9 bar (PE 90)
Pression de fonctionnement	

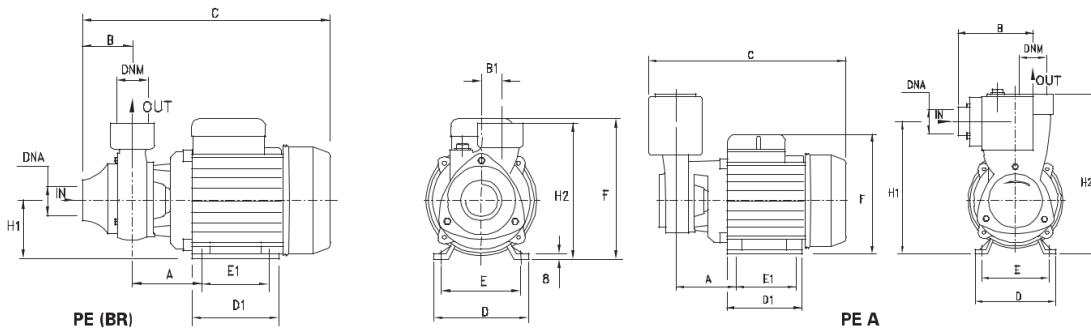
MOTORE / MOTOR / MOTOR / MOTEUR

Motore 2 poli a induzione	3~ 230/400V-50Hz
2 pole induction motor	1~ 230V-50Hz
Motor de 2 polos a inducción	con termoprotezione
Moteur à induction à 2 pôles	with thermal protection
	con protección térmica
	avec protection thermique
Classe di isolamento	
Insulation class	F
Clase de aislamiento	
Classe d'isolation	
Grado di protezione	
Protection degree	IP44
Grado de protección	
Protection	

TYPE	TRUCK		CONTAINER	
	PALLET (cm)	N° pumps	PALLET (cm)	N° pumps
PE 50F (BR)	85x110x170	198	85x110x190	220
	80x120x170	207	80x120x190	230
PE 50A PE 70A PE 100-90	80x110x170	105	85x110x190	135
			85x120x170	136
PE 70	80x120x160	171	80x120x190	190
	85x100x160	180	85x100x190	200
PE 100A	80x120x145	102	80x120x190	136



TYPE		P2		P1 (kW)		AMPERE		Q (m³/h - l/min)							
1~	3~	(HP)	(kW)	1~	3~	1~ 1x230 V 50 Hz	3~ 3x400 V 50 Hz	0	0,3	0,6	1,2	1,8	2,4	2,7	3
								0	5	10	20	30	40	45	50
H (m)															
PE 50F	PE 50F T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 50BR	PE 50BR T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 50A	PE 50A T	0,5	0,37	0,5	0,5	2,3	1	40	35	30	21	13	5	-	-
PE 70	PE 70 T	0,7	0,5	0,9	0,9	4	1,7	53,1	48,8	44,1	33,8	24,7	15,5	11,6	-
PE 70A	PE 70A T	0,7	0,5	0,9	0,9	4	1,7	53,1	48,8	44,1	33,8	24,7	15,5	11,6	-
PE 100	PE 100 T	1	0,74	1,1	1,1	5,2	2	65	61	56	48	39	31	25,1	18
PE 100A	PE 100A T	1	0,74	1,1	1,1	5,2	2	65	61	56	48	39	31	25,1	18
PE 90	PE 90 T	1	0,74	1,2	1,1	5,6	2	88,2	79,2	69,3	49,5	28,8	8,8	-	-



TYPE	DIMENSIONS (mm)													Kg			
	A	B	B1	C	D	D1	E	E1	F	H1	H2	DNA	DNM	I	L	M	
PE 50F	63	50	20	260	120	101	100	80	158	63	143	1" G	1" G	265	150	175	5,7
PE 50BR	63	50	20	260	120	101	100	80	158	63	143	1" G	1" G	265	150	175	5,7
PE 50A	63	89	20	240	120	101	100	80	158	150	184	1" G	1" G	300	170	195	6
PE 70	70	56	20	271	120	101	100	80	158	63	152,2	1" G	1" G	285	150	180	7,9
PE 70A	71,5	101	10	248	120	101	100	80	158	157	193	1" G	1" G	300	170	195	9
PE 100	71,5	50	20	294	135	112	112	90	172	71	160	1" G	1" G	300	170	195	9,5
PE 100A	71,5	101	10	271	135	112	112	90	172	165	201	1" G	1" G	290	170	230	10,5
PE 90	74,5	50	19	286	135	112	112	90	172	71	158	1" G	1" G	310	185	195	10,5