

DISEÑO, ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE SIMULACIÓN DE
CONDUCCIÓN Y REDES SENCILLAS COMO SUSTENTO DE LABORATORIO
DE COMPROBACIÓN DE PRINCIPIOS BÁSICOS HIDRÁULICOS.

ANDRES ODERIS GONZALEZ MONCADA
OMAR STIVEN PINEDA TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2021

DISEÑO, ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE SIMULACIÓN DE
CONDUCCIÓN Y REDES SENCILLAS COMO SUSTENTO DE LABORATORIO
DE COMPROBACIÓN DE PRINCIPIOS BÁSICOS HIDRÁULICOS.

ANDRES ODERIS GONZALEZ MONCADA
OMAR STIVEN PINEDA TORRES

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Civil

Director:
MARIO GARCIA SOLANO
Ingeniero Civil. MSc

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2021

DEDICADORA

A mis padres María Edilia Moncada y Cipriano Gonzalez, por su apoyo incondicional durante todo mi proceso de formación, así mismo durante el transcurso de mi vida ya que me han hecho la persona que soy, además de inculcar en mí, los valores con los cuales he logrado llegar a este punto, Gracias.

Andrés Oderis González Moncada

DEDICATORIA

Quiero agradecer a DIOS por permitirme llegar a este punto de mi vida y dedicar este proyecto a mi padre Omar Pineda Sierra que no podrá estar presente el día de mi grado, a mi madre Gladys Torres por forjar todo lo bueno que hay en mí, y a mis hermanos Yuri Andrea y Cristian David por todo el apoyo que me han dado, GRACIAS.

Omar Stiven Pineda Torres

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1 OBJETIVOS.....	16
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....	17
2.1 EPANET	17
2.1.2 Capacidades del modelado.....	17
2.2 ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS.....	17
2.3 MÉTODO DE HARDY CROSS	19
2.3.1 Procedimiento.....	19
2.4 TUBERÍAS EN SERIE	22
2.5 TUBERÍAS EN PARALELO	24
2.6 CARGA DINÁMICA TOTAL.....	26
3 ALCANCE Y MODELOS PLANTEADOS	29
3.1 PRIMER MODELO	29
3.1.1 Redes de Distribución.....	31
3.2 SEGUNDO MODELO	35
3.3 SISTEMA DE AFORO DE CAUDALES.....	36
4 PRÁCTICAS PROPUESTAS	38
4.1 CAUDALES EN TRAMOS DE UNA RED ABIERTA.....	38
4.2 CAUDALES EN TRAMOS DE UN CIRCUITO O MALLA.	40
4.3 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS EN EMISORES (K).	44
4.4 COEFICIENTE DE HAZEN - WILLIAMS (C).....	47
4.5 CURVA DE BOMBEO.....	48

4.6 COTA PIEZOMÉTRICA Y PRESIÓN.....	48
4.7 TUBERÍA EQUIVALENTE (SERIE)	52
4.8 TUBERÍA EQUIVALENTE (PARALELO)	54
5 PRESUPUESTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS	56
5.1 MANO DE OBRA.....	56
5.2 MATERIALES	56
6 CONCLUSIONES	57
REFERENCIAS	59
BIBLIOGRAFIA.....	61
ANEXOS.	62

LISTA ILUSTRACIONES

Pág.

Ilustración 1. Esquema de método de Cross.....	20
Ilustración 2. Curva característica de la bomba.	26
Ilustración 3. Sistema bomba-tanques representado en el software Revit.	27
Ilustración 4. Conducción con derivaciones.	30
Ilustración 5. Redes de derivación (primer modelo).	31
Ilustración 6. Conversión de planteamiento teórico a modelo experimental.	32
Ilustración 7. Esquema primer modelo software Revit.	33
Ilustración 8 Primer modelo en software Revit.	33
Ilustración 9. Segundo modelo en el software Revit.....	35
Ilustración 10. Caudalímetro de orificios diseñado en el software Revit.	37
Ilustración 11. Configuración de primer modelo en el software Excel.	38
Ilustración 12. Distribución de válvulas y nodos segundo modelo en el software Excel.....	42
Ilustración 13. Esquema de una red de distribución abierta.	62
Ilustración 14. Diámetros y longitudes establecidas en el modelo.....	63
Ilustración 15. Esquema de una red de distribución cerrada.	64
Ilustración 16. Diámetros y longitudes establecidas en el segundo esquema.	64
Ilustración 17. Señalamiento del esquema planteado al modelo diseñado.	65
Ilustración 18. Representación de los casos a, b y c respectivamente.	66
Ilustración 19. Curva característica de la bomba.	67
Ilustración 20. Sistema bomba-tanques representado en el software Revit.	69
Ilustración 21. Representación del segundo modelo con los tramos de refuerzo. .	71
Ilustración 22. Flujo del agua en el caudalímetro.	73
Ilustración 23. Correlación altura vs caudal de $\frac{3}{4}$ de pulgada.	75
Ilustración 24. Correlación altura vs caudal de $\frac{1}{2}$ de pulgada.	76
Ilustración 25. Ejemplo de esquema utilizado.	77
Ilustración 26. Correlación entre C y Nr.	80

SIMULACIONES EN EL SOFTWARE EPANET

	Pág.
Simulación Epanet 1. Caudales en redes abiertas en software Epanet.	39
Simulación Epanet 2. Diámetros en tuberías y Demandas en los nodos en el software Epanet.....	41
Simulación Epanet 3.Caudales en ruta en el software Epanet.	44
Simulación Epanet 4.Demanda en nodos primer modelo en el software Epanet. .	45
Simulación Epanet 5.Presión en nodos primer modelo en el software Epanet.....	46
Simulación Epanet 6. Demanda en los nodos primer modelo en el software	49
Simulación Epanet 7. Cotas del modelo en el software Epanet.	50
Simulación Epanet 8. Diámetros primer modelo en el software Epanet.	51
Simulación Epanet 9. Diámetros primer modelo.	53
Simulación Epanet 10. Longitudes primer modelo en el software Epanet.	53
Simulación Epanet 11. Respuestas del taller planteado en el software Epanet, demanda en nodos y caudal en tramos.	63
Simulación Epanet 12. Resultados obtenidos del modelo planteado (ilustración 17) en el software Epanet.	65
Simulación Epanet 13. Caudal bombeado a los dos tanques en el software Epanet.	68
Simulación Epanet 14. Caudal entrante al tanque superior.....	70
Simulación Epanet 15. Resultados obtenidos del modelo planteado (ilustración 18) en el software Epanet.	70
Simulación Epanet 16. Segundo modelo desarrollado en el software Epanet sin los tramos de refuerzo.....	72
Simulación Epanet 17. Segundo modelo desarrollado en el software Epanet con los tramos de refuerzo.	72

HOJAS DE CALCULO EXCEL

	Pág.
Hoja de cálculo 1. Valores de caudal para redes abiertas en el software Excel. ...	40
Hoja de cálculo 2. Diámetros equivalentes en el software Excel.	42
Hoja de cálculo 3. Proceso de cálculo en Excel.	43
Hoja de cálculo 4. Cota piezométrica y presión en el software Excel.	52
Hoja de cálculo 5. Diámetro equivalente en serie en el software Excel.	54
Hoja de cálculo 6. Diámetro equivalente en paralelo en el software Excel.	55
Hoja de cálculo 7. Curvas de bombeo En el software Excel.	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Correlación altura vs caudal de $\frac{3}{4}$ de pulgada.	74
Tabla 2. Correlación altura vs caudal orificios de $\frac{1}{2}$ pulgada.	75
Tabla 3. Coeficiente C constante.	78
Tabla 4. Caudales mediante tuberías paralelas ecuación 42.	78
Tabla 5. Coeficiente C corregido.	79
Tabla 6. Valores de Chw para diferentes diámetros.	80
Tabla 7 Precios de mano de obra y los materiales para la construcción del primer modelo. Elaboración propia.	81
Tabla 8. Mano de obra para la construcción de los modelos. Elaboración propia.	83
Tabla 9 Precios de los materiales para la construcción del segundo modelo.	84

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ejemplo de las practicas o laboratorios.....	62
Anexo B. Correlación que existe entre la altura (de agua) y el caudal, para el caudalímetro propuesto.....	73
Anexo C. Planteamiento para la determinación de la variación del coeficiente de Hazen-Williams.....	77
Anexo D. Presupuesto primer modelo y mano de obra.....	81
Anexo E. Presupuesto segundo modelo.....	84

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO, ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE UN SISTEMA DE SIMULACIÓN DE CONDUCCIÓN Y REDES SENCILLAS COMO SUSTENTO DE LABORATORIO DE COMPROBACIÓN DE PRINCIPIOS BÁSICOS HIDRÁULICOS. *

AUTORES: ANDRES ODERIS GONZÁLEZ MONCADA, OMAR STIVEN PINEDA TORRES. **

PALABRAS CLAVE: Epanet, laboratorio, modelo, cota piezométrica, hoja de cálculo, Excel.

Este documento expone la representación conceptual de dos modelos hidráulicos que trabajan bajo flujo a presión, diseñados para corroborar principios hidráulicos estudiados en las redes de acueductos. Se plantean diferentes situaciones de estudio que se podrán llevar a cabo en cada uno de los modelos, situaciones como: Cota piezométrica y presión sobre nodos, caudales en tramos de un circuito o malla, curvas de bombeo, eficiencia de bombas, flujo en tuberías equivalente en serie y flujo en tuberías equivalente en paralelo, coeficiente de pérdidas en emisores (K), coeficiente de Hazen - Williams (C). Cada uno de los casos es modelado en el software Epanet con el fin de hacer una comparación teórica con los resultados previamente calculados en el software Excel mediante una hoja de cálculo programada aplicando los conceptos presentados y estudiados en la materia de acueductos y alcantarillados. Adicionalmente, presenta el presupuesto de los materiales requeridos como tuberías, medidores, válvulas entre otros, incluyendo la mano de obra necesaria para la construcción de los modelos en el laboratorio de hidráulica (edificio 28 de la Universidad industrial de Santander). Teniendo en cuenta lo mencionado se presentarán adicionalmente los respectivos planos elaborados en el software de modelamiento Revit que se encontrará en los anexos de este documento, junto a algunos ejercicios propuestos que servirán como base para el planteamiento de diferentes prácticas de estudio que se plantean.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Mario García Solano, ingeniero civil. MSc

ABSTRACT

TITLE: DESIGN, ANALYSIS AND MODELING OF A SIMULATION SYSTEM OF CONDUCTION AND SIMPLE NETWORKS AS A LABORATORY SUPPORT FOR TESTING BASIC HYDRAULIC PRINCIPLES.

AUTHOR: ANDRES ODERIS GONZÁLEZ MONCADA, OMAR STIVEN PINEDA TORRES.

KEY WORDS: Epanet, laboratory, model, piezometric dimension, spreadsheet, Excel.

This document presents the conceptual representation of two hydraulic models that for pressurized flow, designed to corroborate hydraulic principles studied in water supply networks. Different study situations are presented that can be carried out in each of the models, such as: piezometric height and pressure on nodes, flow rates in sections of a circuit, pumping curves, pump efficiency, flow in equivalent pipes series and flow in equivalent pipes parallel, loss coefficient in emitters (K), Hazen-Williams coefficient (C). Each case is modelled in the Epanet in order is to make a theoretical comparison with the results previously calculated in Excel software through a spreadsheet program applying the concepts presented and studied in the topic of aqueducts and sewers. Additionally, a price list of the materials is presented with the required quantities such as pipes, meters, valves, etc. and the labour needed for the future implementation of the models in the hydraulics laboratory (building 28 of the Industrial University of Santander). Taking into account the aforementioned, we will additionally present the respective plans elaborated in the Revit modeling software, which will be found in the annexes of this document, together with some proposed exercises that will serve as a basis for the approach of different study practices that arise.

*Degree project

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Mario Garcia Solano, Civil Engineer. MSc.

INTRODUCCIÓN

Dentro del ámbito de la formación de ingenieros civiles, las prácticas que se realicen como complemento de la teoría vista en las diferentes asignaturas juegan un papel crucial para el desarrollo del aprendizaje, ya que afianzan los conceptos y resulta mucho más eficiente para entender los principios estudiados, además de incentivar la investigación y la innovación mediante búsqueda de nuevos métodos de análisis.

El estudio de la hidráulica es fundamental para todo profesional de la ingeniería civil, ya que es una de las principales ramas de su formación, además de contar un amplio campo de acción laboral en diferentes áreas, como aprovechamiento de los recursos naturales y construcción de infraestructuras hidráulicas. Por otro lado, los laboratorios de hidráulica desde el siglo pasado han tenido gran importancia en el desarrollo del país con obras como la represa de Chivor, acueductos como el acueducto de Bogotá entre otras. En la década de 1954, la Universidad Nacional adquiere un Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, el cual fue administrado y operado por firmas de consultoría nacionales y extranjeras contratadas directamente por el Ministerio de Obras Públicas y Transporte (hoy Ministerio de Transporte) [12]. Posteriormente, la Universidad de los Andes en 1966, con colaboración económica e intelectual de Países Bajos, inaugura el Centro de Estudios Técnicos e Investigaciones Hidráulicas (CETIH), uno de los primeros centros en el país en realizar consultorías hidráulicas, entre los proyectos que se realizaron se pueden recordar: el Canal del Dique, el río Chenche, el río Bugalagrande, la represa de Sisga, el Laguito- Cartagena, el río Bogotá, el río de Oro, el acueducto de Armenia, entre otros. Esto incentivó a otras universidades a crear sus propios laboratorios para entrar en un ámbito investigativo [3].

A nivel nacional, existen universidades que cuentan con amplios laboratorios de hidráulica (la Universidad Nacional y la Universidad de los Andes) en donde no solo se presentan prácticas de los temas principales como hidráulica de canales abiertos, hidráulica de tuberías, mecánica de fluidos, sino que además prestan los servicios

de calibraciones de manómetros, vertederos, bombas, válvulas y tanques, instalaciones y aditamentos hidráulicos-sanitarios, pruebas de presión hidrostática y aforos, entre otros. Por otro lado, los laboratorios de la Universidad Industrial de Santander están orientados hacia el estudio, experimentación y observación de fenómenos hidráulicos en conductos abiertos, para lo cual siempre se ha contado con un canal principal para pruebas, con pendiente variable, en el cual se realizan estudios sobre los distintos regímenes de flujo y fenómenos tales como resalto hidráulico, compuertas, vertederos, entre otros; además, cuenta con una extensión para realizar desarrollo futuro de flujo a presión en tuberías [13].

La Universidad Industrial de Santander cuenta con diferentes tipos de laboratorios, que permiten observar el funcionamiento de sistemas hidráulicos que trabajan bajo un régimen de flujo libre, además cuenta con un equipo en el laboratorio de mecánica de fluidos que permite analizar pérdidas por fricción en tuberías a presión, por ende, es fundamental para mejorar la formación teórico-práctica implementar nuevos equipos que permitan el análisis experimental de fenómenos hidráulicos con flujo a presión adicionales a los ya mencionados.

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar dos modelos de laboratorio de hidráulica que simulen problemas típicos (correlación entre presión y caudal) que se presentan en la enseñanza de la materia acueductos posibilitando constatar la teoría con la práctica, mediante ensayos varios, cuyos resultados se comparan con aquellos obtenidos, mediante cálculos elaborados en EPANET y EXCEL. El objetivo básico es que el estudiante llegue a tener un cabal conocimiento de los fenómenos hidráulicos que rigen las redes de acueducto y que puedan verificar la exactitud y validez de los parámetros recomendados utilizados en los cálculos eventualmente cuestionarlos, sugiriendo y realizando correcciones.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar dos modelos de laboratorio con la ayuda del software Epanet que funcionen como herramienta útil en la comprensión verificación y apreciación de principios hidráulicos básicos, inherentes a problemas típicos utilizados en la enseñanza de la materia acueductos.

Elaborar una hoja de cálculo electrónica de los modelos propuestos mediante el uso del programa Excel, para hacer un comparativo con los resultados obtenidos en el software Epanet.

Elaborar el presupuesto de la implementación de los modelos planteados, realizando la cotización de los materiales y la mano de obra requerida para la construcción de los mismos.

2 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

2.1 EPANET

2.1.1 Aplicación para el modelado de sistemas de distribución de agua potable. EPANET es una aplicación de software ampliamente utilizada para modelar sistemas de distribución de agua en redes a presión y fundamentalmente en el campo de los acueductos. Fue desarrollado como una herramienta para comprender el movimiento y fenómenos del agua potable dentro de los sistemas de distribución, y puede usarse para diferentes tipos de aplicaciones en el análisis de sistemas de distribución. Hoy en día, los ingenieros y consultores utilizan EPANET para diseñar y dimensionar nueva infraestructura hidráulica, modernizar la infraestructura existente, optimizar las operaciones de tanques y bombas, reducir el uso de energía, investigar problemas de calidad del agua y prepararse para emergencias. También se puede usar para modelar amenazas de contaminación y evaluar la resistencia a amenazas de seguridad o desastres naturales [2].

2.1.2 Capacidades del modelado. Con Epanet, los usuarios pueden realizar una simulación con período extendido del comportamiento hidráulico, además de apreciar la calidad dentro de las redes de tuberías presurizadas, que consisten en nodos (uniones), bombas, válvulas, tanques de almacenamiento, tuberías y depósitos. Se puede usar para rastrear el flujo de agua en cada tubería, la presión en cada nodo, la altura del agua en cada tanque, una concentración química, la edad del agua y el rastreo de la fuente en toda la red durante un período de simulación [2].

2.2 ECUACIÓN DE HAZEN-WILLIAMS

La ecuación de Hazen-Williams fue propuesta por Gardner Stewart William (Profesor de ingeniería civil, sanitaria e hidráulica de la universidad de Michigan) y Allen Hazen (ingeniero civil y sanitario) en el año de 1903 (ver ecuación 1). Luego

de dos años en 1905 publicaron el libro *Hydraulic Tables*, para explicar el valor C_{HW} de los diferentes materiales que se emplean para la fabricación de las tuberías tales como: acero, bronce, estaño, hierro, plomo y vidrio, bajo condiciones normales [temperatura del agua (20°C), diámetro superior a 4 pulgadas, y velocidades de flujo menores a 3 m/s] [8].

$$H_f = \frac{6.8241 * L * V^{1.851}}{(C_{HW}^{1.851} * D^{1.167})} \quad (1)$$

Expresada en función del caudal, la ecuación es:

$$H_f = \frac{10.672}{D^{4.869}} * \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.851} * L \quad (2)$$

Donde:

H_f = Pérdidas por fricción totales.

L = Longitud de las tuberías.

D = Diámetro de las tuberías.

Q =Caudal de la tubería.

C_{HW} =Coeficiente de Hazen-Williams, el cual está dado por el material y el tiempo de uso de la tubería.

Los valores que obtiene el coeficiente C_{HW} varían entre 90 y 140 según las tablas del libro *Hydraulic Tables*. Este factor va disminuyendo a medida que el tubo es usado, como lo establecen Hazen y William debido al deterioro de las tuberías o diámetros menores a 4 pulgadas, por ejemplo, un tubo de plástico nuevo puede llegar a un valor de $C_{HW}=140$, pero un tubo de plástico deteriorado presenta valores aproximados de $C_{HW} =120$.

2.3 MÉTODO DE HARDY CROSS

El método de Hardy Croos es una herramienta matemática que permite estimar los caudales que circulan por cada tubería dentro de una red cerrada, esto se logra mediante una iteración sucesiva, se debe previamente conocer variables como diámetros y longitudes de cada uno de los tramos que componen la red de la malla analizada. El procedimiento desarrollado en 1935 por Hardy Croos (1885-1959), está basado en la ley de conservación de energía y el estudio de pérdidas de carga hidráulica en las redes cerradas, donde la suma de los caudales en los nodos debe ser igual cero (ley de conservación de masa) y la suma de las pérdidas totales en cada malla de la red debe ser cero [4].

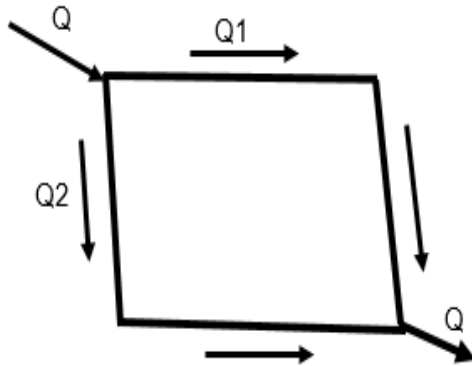
Para hallar las pérdidas por carga se puede utilizar cualquiera de las ecuaciones propuestas a través de los años como lo son la de Darcy Weisbach, Chezy-Kutter entre otras. Este documento se trabajará con la fórmula planteada anteriormente (Hazen-Williams), que conlleva a cálculos más sencillos dado que toma el valor C_{Hw} constante.

2.3.1 Procedimiento. Conocidos tanto los diámetros como las longitudes de las tuberías que componen la red.

- El primer paso es asumir caudales tentativos que circulan por los tramos, teniendo en cuenta que la suma algebraica de los caudales entrantes y salientes en los nudos debe ser cero, generalmente se da un sistema de signos en el cual los caudales que circulan en sentido horario son positivos y los que circulan en sentido anti-horario negativos.

$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i = 0 \quad (3)$$

Ilustración 1. Esquema de método de Cross.



Fuente: Ilustración tomada de Cálculo de redes malladas sección 1 [4].

Posteriormente se debe verificar que la sumatoria de pérdidas de carga hidráulica en la red sea cero (ver ecuación 4).

$$H_{f1} + H_{f2} + \dots + H_{fi} = 0 \quad (4)$$

Donde las pérdidas pueden ser determinadas por distintos métodos, en este documento se usará la ecuación empírica propuesta por Hazen-Williams (ver ecuación 2).

Si se cumplen las condiciones planteadas significa que los caudales propuestos son los que efectivamente circulan por los tramos, de lo contrario se debe realizar una corrección a los caudales.

Para realizar la corrección a los caudales se introduce un Δq (caudal de corrección), que permite ya sea sumar o restar caudal de los tramos hasta que se cumpla que la suma de pérdidas de carga hidráulica en la red sea cero. Para determinar este caudal se debe aplicar el siguiente procedimiento.

Dado que la suma de las pérdidas no es igual a cero, se debe cambiar los caudales Q_1 y Q_2 por medio del Δq (caudal de corrección) y verificar lo siguiente (ver ecuación 5):

$$\sum H_f = 0 \quad (5)$$

$$H_{f1} + H_{f2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{Sí, } H_f = a * Q^2 \quad (7)$$

Entonces (ver ecuaciones 8 y 9).

$$a_1 * (Q_1 + \Delta q)^2 + a_2(Q_2 + \Delta q)^2 = 0 \quad (8)$$

$$a_1 * (Q_1^2 + 2. Q_1. \Delta q + \Delta q^2) + a_2(Q_2^2 + 2. Q_2. \Delta q + \Delta q^2) \quad (9)$$

Despreciando Δq^2 por ser relativamente pequeño con respecto a Q_1 y Q_2 entonces se obtiene (Ver ecuaciones 10,11,12,13):

$$a_1 * (Q_1^2 + 2. Q_1. \Delta q) + a_2(Q_2^2 + 2. Q_2. \Delta q) \quad (10)$$

$$a_1. Q_1^2 + 2. a_1. Q_1. \Delta q + a_2. Q_2^2 + 2. Q_2. a_2. \Delta q = 0 \quad (11)$$

$$\Delta q = - \frac{a_2. Q_2^2 + a_1. Q_1^2}{2(a_1. Q_1 + a_2. Q_2)} \quad (12)$$

Realizando la siguiente operación:

$$\Delta q = -\frac{a_2 \cdot Q_2^2 + a_1 \cdot Q_1^2}{2 \left(a_1 \cdot \frac{Q_1^2}{Q_1} + a_2 \cdot \frac{Q_2^2}{Q_2} \right)} \quad (13)$$

Como la expresión $a \cdot Q^2$ representa las pérdidas por carga hidráulica se obtiene la ecuación 14, que se puede expresar de manera general y sirve para resolver cualquier sistema sin importar el número de redes que contenga el mismo.

$$\Delta q = -\frac{\sum H_f}{2 \sum \frac{H_f}{Q}} \quad (14)$$

Este será el caudal que se debe adicionar o disminuir a los caudales en ruta para que se cumplan las ecuaciones propuestas, para este caso quedaría de la siguiente manera:

$$Q_1 \text{ Corregido} = Q_1 + \Delta q \quad Q_2 \text{ corregido} = Q_2 - \Delta q$$

Se debe hacer un proceso iterativo hasta que $\Delta q = 0$ o próximo a este [9].

2.4 TUBERÍAS EN SERIE

En la práctica las conducciones están constituidas por lo menos de dos tuberías de distinto diámetro, una continuación de la otra. Una herramienta muy útil en la solución de este tipo de problemas es el concepto de tuberías equivalentes, en el cual se postula que un sistema de tuberías es equivalente a otro si con el mismo caudal producen pérdidas iguales. En tal sentido se puede, por ejemplo, tener un sistema compuesto por un tramo de diámetro (D_1) con una longitud (L_1) el cual continúa con un tramo de diámetro (D_2) y una longitud (L_2) [5].

Se pregunta entonces, ¿cuál sería el diámetro equivalente (**De**) de una única tubería que equivalga a una serie de tuberías?, o dado un diámetro calculado no comercial, ¿cuáles serán los diámetros comerciales que lo reemplazan y que longitud debe tener cada uno de ellos? Se estará hablando entonces de un sistema de tuberías en serie y la solución del problema se encuentra a partir del enunciado del principio de las tuberías equivalentes.

Partiendo de la ecuación de Darcy (ver ecuación 15), se despeja la expresión necesaria para determinar la tubería equivalente en serie.

$$H_f = K \cdot L \left(\frac{Q^2}{D^5} \right) \quad (15)$$

Donde:

H_f = Pérdidas por fricción totales.

L = Longitud de la tubería.

D = Diámetro de la tubería.

Q = Caudal de la tubería.

K = Coeficiente de rugosidad de Darcy.

Debe ser igual a la suma de las tuberías que componen el sistema representadas igualmente por la suma de las pérdidas parciales.

$$H_{f1} = K \cdot L_1 \left(\frac{Q^2}{De_1^5} \right) \quad (16)$$

$$H_{f2} = K \cdot L_2 \left(\frac{Q^2}{De_2^5} \right) \quad (17)$$

Igualando (ver ecuación 19):

$$H_f = H_{f1} + H_{f2} \quad (18)$$

$$KL \left(\frac{Q^2}{De^5} \right) = K \cdot L_1 \left(\frac{Q^2}{De_1^5} \right) + K \cdot L_2 \left(\frac{Q^2}{De_2^5} \right) \quad (19)$$

Siendo el material de las tuberías el mismo y el caudal que circula también, los factores K (coeficiente de fricción) y Q (caudal) se pueden eliminar de la ecuación 20.

$$\left(\frac{L}{De^5} \right) = \left(\frac{L_1}{D_1^5} \right) + \left(\frac{L_2}{D_2^5} \right) \quad (20)$$

Para un número indefinido de conductos en serie, se puede expresar la ecuación 21:

$$\left(\frac{L}{De^5} \right) = \sum \left(\frac{L_i}{D_i^5} \right) \quad (21)$$

Expresión que corresponde a la relación que debe cumplir el conducto equivalente con el diámetro (**De**) y la longitud (**L**).

2.5 TUBERÍAS EN PARALELO

En redes de tuberías se puede presentar a menudo sistemas en paralelo donde se puede reemplazar la configuración establecida por una sola tubería que realice el mismo trabajo de los tramos que se encuentran en paralelo, para esto se usa la herramienta presentada a continuación.

Como la suma del caudal transportado por el sistema de tuberías en paralelo debe ser igual al caudal transportado por el tubo equivalente [5], se tiene que (ver ecuación 22):

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (22)$$

De forma general tenemos la ecuación 23.

$$Q_e = \sum Q_i \quad (23)$$

Donde Q según la ecuación de Darcy es (ver ecuación 25):

$$H_f = K \cdot L \frac{Q^2}{D^5} \Rightarrow \quad (24)$$

$$Q = H_f^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{D^{\frac{5}{2}}}{(K \cdot L)^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow \quad (25)$$

Entonces (ver ecuación 26).

$$H_{fe}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{De^{\frac{5}{2}}}{(K \cdot L)^{\frac{1}{2}}} = \sum H_{fi}^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{Di^{\frac{5}{2}}}{(K \cdot Li)^{\frac{1}{2}}} \quad (26)$$

Como en este sistema se sabe que todos los tramos empiezan y terminan en el mismo punto se considera que todas las pérdidas serán iguales, además el coeficiente (K) por ser el mismo material se considera igual, por lo que se obtiene la ecuación 27.

$$\frac{De^{\frac{5}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} = \sum \frac{Di^{\frac{5}{2}}}{Li^{\frac{1}{2}}} \quad (27)$$

2.6 CARGA DINÁMICA TOTAL

La carga dinámica total o altura dinámica total se define como la suma entre: Diferencia de altura entre tanques, la altura dinámica de succión y la altura dinámica de impulsión (ver ecuación 28), [6].

$$HDT = \Delta H + H_{fs} + H_{fi} \quad (28)$$

Donde:

HDT = Carga dinámica total.

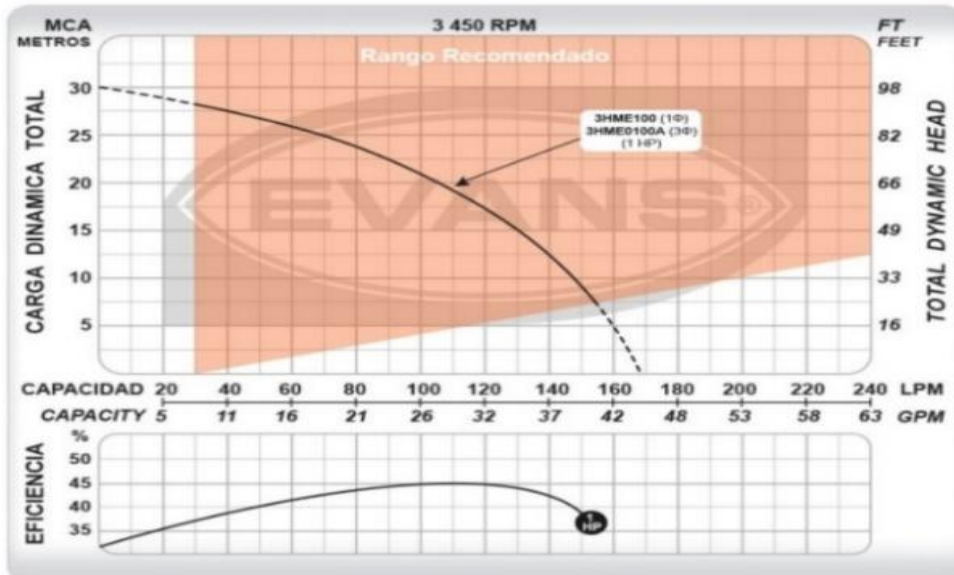
ΔH = Diferencia entre altura de tanques.

H_{fs} = Altura dinámica de succión.

H_{fi} = Altura dinámica de impulsión.

Dado un Caudal (Q) ¿Cuál es la altura dinámica total a la cual se puede transportar el agua? Para ello se observa la curva característica de la bomba empleada, las bombas hidráulicas dentro de sus especificaciones técnicas contienen normalmente una gráfica llamada curva característica (ver ilustración 2). Esta representa la cantidad de caudal que puede transportar la bomba a una altura específica.

Ilustración 2. Curva característica de la bomba.



Fuente: Ficha técnica bomba 1 Hp Evans [7].

La ecuación con la cual se representa tiene la siguiente forma (ver ecuación 29):

$$HDT = H_0 - \frac{K \cdot Q^2}{n^2} \quad (29)$$

Donde:

HDT= Carga dinámica total.

H₀= Altura dinámica de la bomba a válvula cerrada.

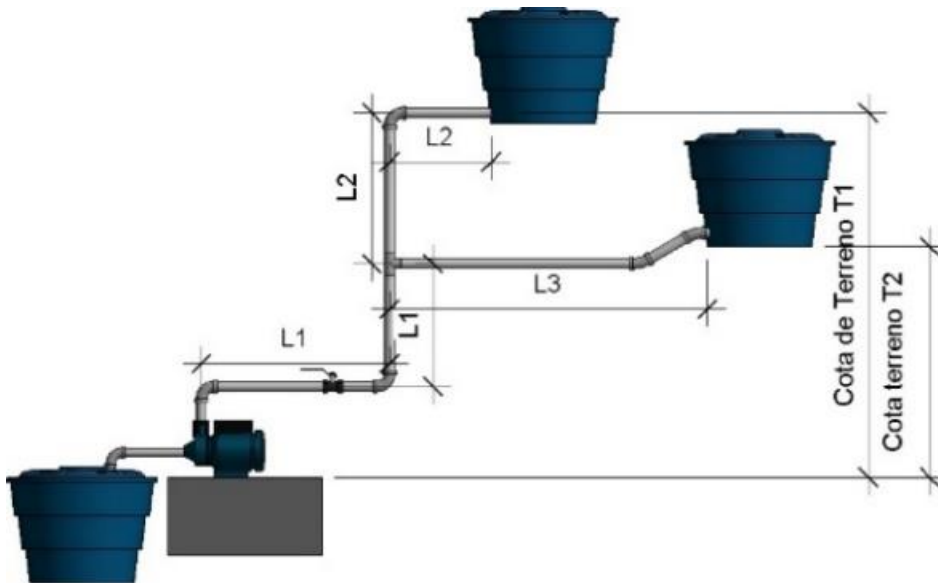
K= Constante característica de la bomba.

Q= Caudal expulsado por la bomba.

n= Cantidad de bombas empleadas.

Utilizando la ecuación de curva característica se puede determinar teóricamente la cantidad de caudal que transportará la bomba a dos tanques elevados (ver ilustración 3).

Ilustración 3. Sistema bomba-tanques representado en el software Revit.



Primero se asume un caudal de salida de la bomba para tener un valor de HDT, posteriormente se calculan las pérdidas totales (H_{fo}) generadas en la tubería desde

la salida de la bomba hasta el punto de bifurcación (L1), consecuentemente se restan las pérdidas a el valor de HDT (ver ecuación 30).

$$HDT - H_{fo} = P_o \quad (30)$$

De este modo se obtiene el valor de la cota piezométrica (Po) en el nodo que une las tres tuberías o el punto de bifurcación, posteriormente con este valor y la cota de terreno de cada tanque se hallan las pérdidas generadas desde el punto de unión de las tuberías a cada uno de los tanques (ver ecuaciones 31 y 32).

$$P_o - \text{Cota de terreno } T_1 = H_{f1} \quad (31)$$

$$P_o - \text{Cota de terreno } T_2 = H_{f2} \quad (32)$$

Por último, teniendo las dimensiones de la tubería que conecta a cada tanque se determina el caudal, despejando de la ecuación 31 y 32.

$$H_{f1} = \frac{10,672}{D_2^{4,869}} * \left(\frac{Q_2}{C_{HW}} \right)^{1,852} * L_2 \quad (33)$$

$$H_{f2} = \frac{10,672}{D_3^{4,869}} * \left(\frac{Q_3}{C_{HW}} \right)^{1,852} * L_3 \quad (34)$$

El valor del caudal (Q₂ y Q₃) expresa la cantidad de caudal que recibirá cada tanque, para rectificar esta respuesta se debe sumar estos dos caudales y este dar como resultado el caudal asumido en la ecuación de carga dinámica (HDT), si esto no se cumple se debe repetir todo el proceso utilizando como nuevo caudal asumido el hallado (sumando Q₂ y Q₃), este proceso se realizará tantas veces como lo requiera, hasta obtener la misma respuesta en los dos casos, y de esta manera cumplir con el principio de continuidad de masa [6].

3 ALCANCE Y MODELOS PLANTEADOS

Formular dos modelos que permitan una mayor comprensión de problemas típicos distribución de agua como complemento a la teoría incluida en la asignatura de acueductos y alcantarillados. El alcance en la formulación es. Mediante algunas herramientas de cálculo como Epanet y Excel diseñar dos modelos para laboratorio indicando los tipos de estudio que podrían ser llevados a cabo en ellos para posteriormente obtener un presupuesto general del valor de materiales y mano de obra para su construcción.

3.1 PRIMER MODELO

Un caso muy común en acueductos que sirven a varias comunidades es en el cual se tiene un sistema de tuberías en serie conectando a dos tanques, siendo el segundo tanque denominado comúnmente de “compensación” que se ubica a diferente nivel del principal, dependiendo de la demanda de los nodos puede recibir o aportar agua en función de las presiones en los nodos. Lo que se pide determinar en el planteamiento del modelo es el caudal que se transporta en cada uno de los tramos.

Se parte del hecho de que la suma de pérdidas de las tuberías es igual a la diferencia de altura de los tanques, analizando el fenómeno se entenderá que el caudal en la realidad se ajustará a la energía disponible que está representada por dicha diferencia de altura (ver ecuación 35).

$$\sum \Delta H_f = \sum \left(\frac{10.672}{D^{4.869}} \right) \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1.851} (L) \quad (35)$$

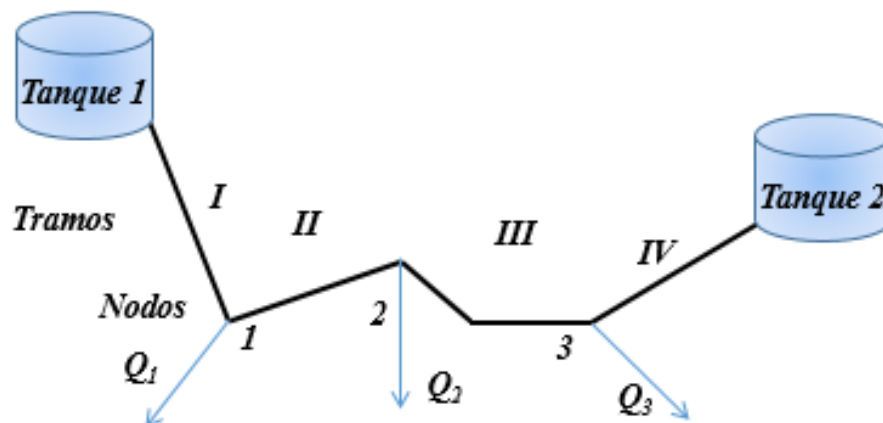
Si se despeja el caudal, ya que este es constante a lo largo del tramo entonces (ver ecuación 36):

$$Q = \left(\frac{H_f}{L} * \frac{D^{4.869}}{10.672} \right)^{\frac{1}{1.851}} * C_{HW} \quad (36)$$

En este caso, de algunos puntos de la tubería es necesario retirar un determinado caudal que se supone alimenta una red de distribución pasando por un tanque de almacenamiento, por ejemplo, como es el caso de acueductos regionales. Entonces en la ecuación 35, los términos de la sumatoria tendrán un valor de caudal diferente y el problema se complica, pero puede ser fácilmente solucionado con ayuda de la ecuación de continuidad aplicada en cada uno de los nodos.

Se procede suponiendo el primer caudal del tramo que sale del tanque izquierdo (Ver ilustración 4) y los de los tramos secuenciales deducidos por ecuación de continuidad en los nodos. A continuación, se itera el valor supuesto hasta que se satisfaga la ecuación.

Ilustración 4. Conducción con derivaciones.



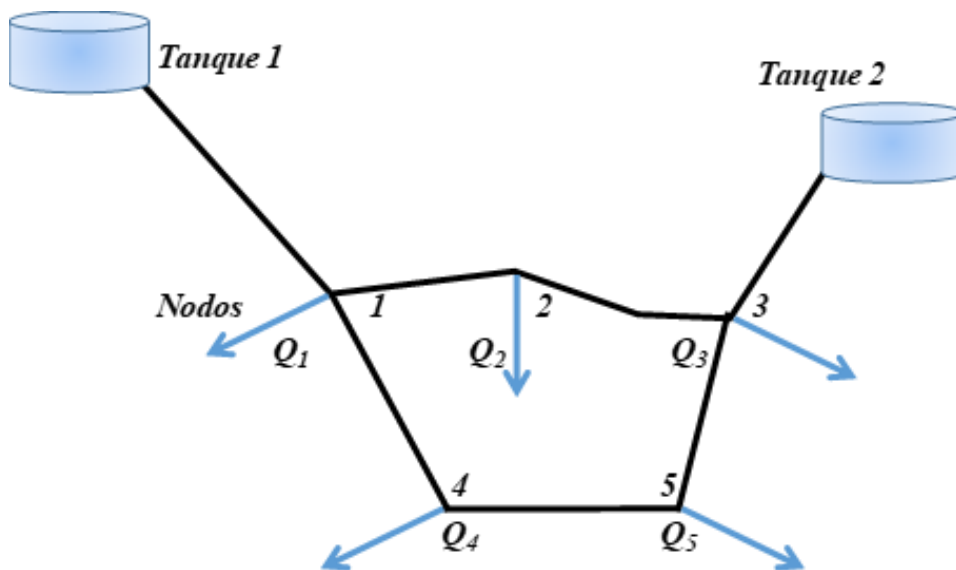
El algoritmo se plantea como se describe a continuación haciendo uso de aproximaciones sucesivas partiendo de un valor inicial de cálculo inicial supuesto:

- 1- Suponer un caudal inicial saliendo a partir del tanque de mayor altura.

- 2- Calcular los demás caudales en cada uno de los tramos por la ecuación de continuidad.
- 3- Verificar si se cumple la ecuación 35.
- 4- Si no se cumple volver al paso 1 iterando sucesivamente hasta hallar la solución.

3.1.1 Redes de Distribución. Agregando una malla de tuberías adicionales, tal como se representa (ver ilustración 5) en dos de los nodos de salida el problema adquiere rasgos más interesantes configurándose en uno de mallas alimentado por dos tanques. Con tal idea pueden proponerse variadas prácticas de laboratorio que en forma sencilla llevaran al estudiante a comprender los principios de hidráulica que sustentan la solución de estos ejercicios en la vida profesional.

Ilustración 5. Redes de derivación (primer modelo).



De la siguiente manera (ver ilustración 6) se plantea el modelo que recoge los dos anteriores planteamientos, además de ilustrar su respectiva modelación en el software Revit (ver ilustración 7 y 8).

Ilustración 6. Conversión de planteamiento teórico a modelo experimental.

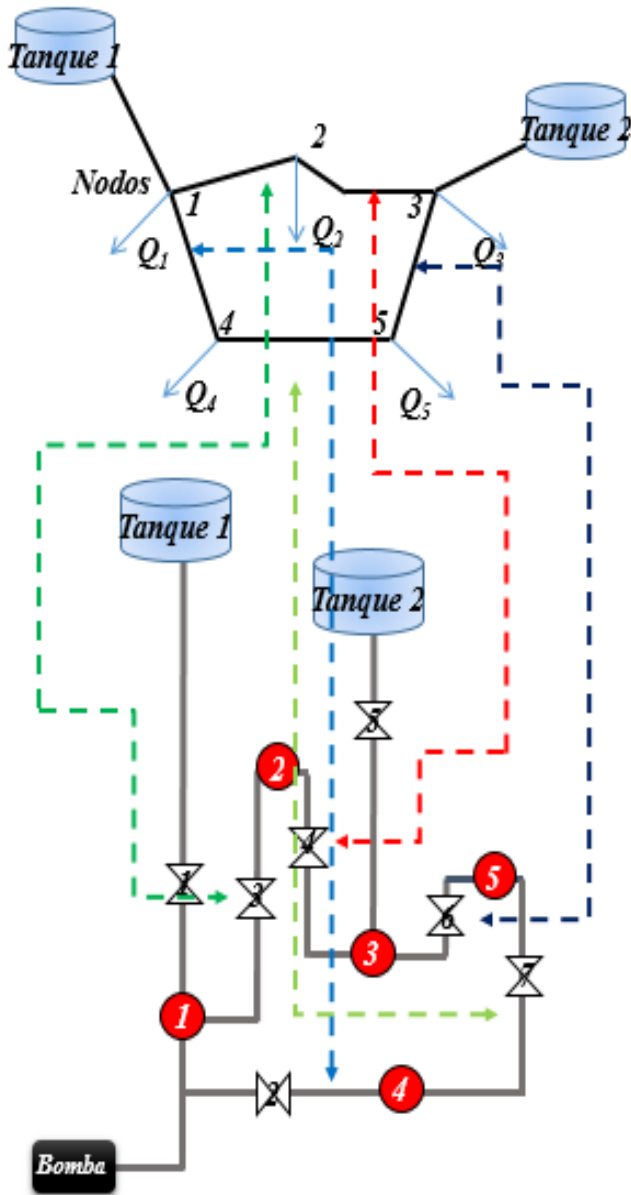
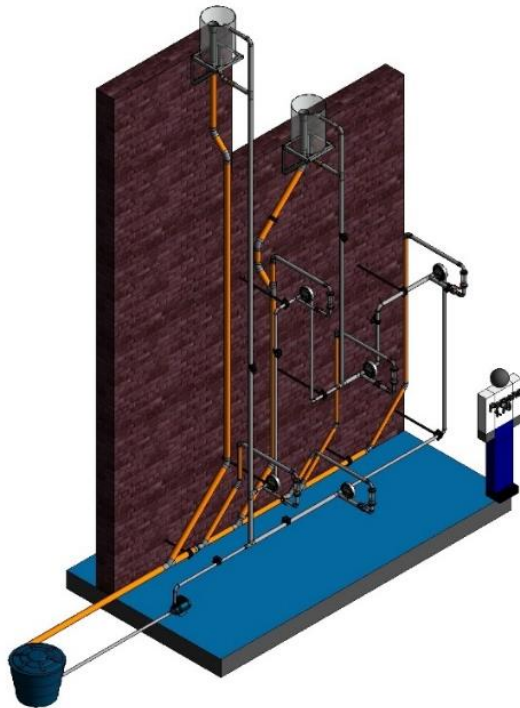


Ilustración 7. Esquema primer modelo software Revit.



Ilustración 8 Primer modelo en software Revit.



Para el primer modelo (ver ilustración 8) se planteó un sistema que permita reconocer las diferentes presiones y cómo varían estas con respecto a la cota del terreno. Para esto el modelo consta de 5 nodos en los cuales será posible medir el caudal y la presión, mediante rotámetros y manómetros (digitales), respectivamente. Además, cuenta con una bomba de 1 Hp de potencia y dos tanques elevados que permitirá un flujo constante en el sistema, también cuenta con varias válvulas que permitirán cortar el flujo a tramos de tuberías específicos para generar diferentes situaciones de estudio como:

- 1- Dados los caudales en los nodos determinar experimental y analíticamente los caudales en cada uno de los tramos y sentido de los flujos.
- 2- Conocidas las cotas piezométricas en los nodos determinar los caudales en nodos y tramos.
- 3- Midiendo caudales y presiones en los nodos determinar analíticamente las constantes de las válvulas parcialmente abiertas, de acuerdo a la expresión básica (ver ecuación 37).

$$Q = K\sqrt{P}. \quad (37)$$

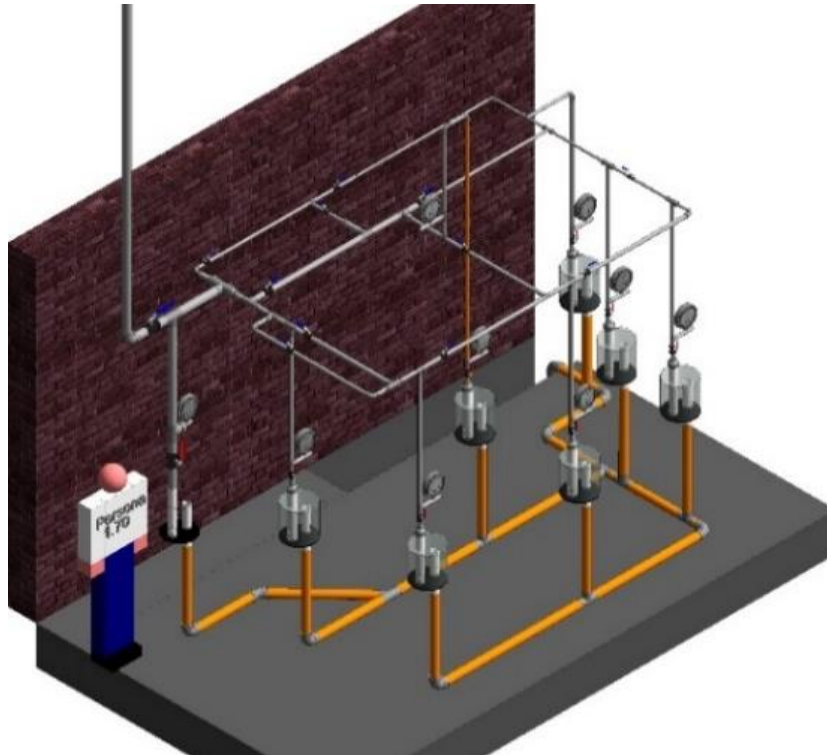
- 4- Determinar curvas de bombeo graduando el caudal, simultáneamente determinando a través del manómetro el valor (**HDT**) y el caudal que llega al tanque, se determina un punto de la gráfica de curva de bombeo.
- 5- Bombeo a dos tanques de diferente altura, verificando el caudal que cada uno recibe.

Para observar un taller desarrollado (ver anexo A).

3.2 SEGUNDO MODELO

El segundo modelo simula una pequeña red en malla que consta de dos circuitos con 8 nodos, cada nodo cuenta con un sistema para medir presión (manómetro) y medir caudal (caudalímetro) (ver ilustración 9), el caudalímetro implementado es un diseño propuesto por el director de este proyecto, el cual consta de dos tubos, uno de entrada y distribución uniforme y uno de salida con orificios que permite aforar el caudal en función de la cabeza sobre los mismos. Ambos se encuentran de un tanque cilíndrico, en el que se medirá la altura para determinación del caudal (ver ilustración 10).

Ilustración 9. Segundo modelo en el software Revit.



En la ilustración 9 las dimensiones horizontales del modelo están reducidas, por lo cual no guarda proporciones reales, esto para facilitar su visualización, para ver dimensiones reales consultar planos del modelo.

El modelo está diseñado para poder medir y recrear situaciones tales como: sistemas de tubería en serie y paralelo, coeficiente de Hazen-Williams (C_{HW}),

caudales presentes en una malla o red de distribución cerrada. El sistema hidráulico funciona utilizando el tanque existente en el laboratorio de hidráulica de la Universidad industrial de Santander ubicado aproximadamente a 15 metros de altura, lo cual permitirá al sistema tener la suficiente presión para realizar todas las prácticas presentadas en el inciso 4 (prácticas propuestas).

3.3 SISTEMA DE AFORO DE CAUDALES.

Utilizando el sistema de medición planteado por el director del proyecto el cual está basado en el principio de caudal a través de orificios se pueden medir estos con la ecuación 38. [1].

$$Q = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (38)$$

Donde:

C_d= Coeficiente de descarga (para orificios circulares y en este caso se asume un valor de 0,6).

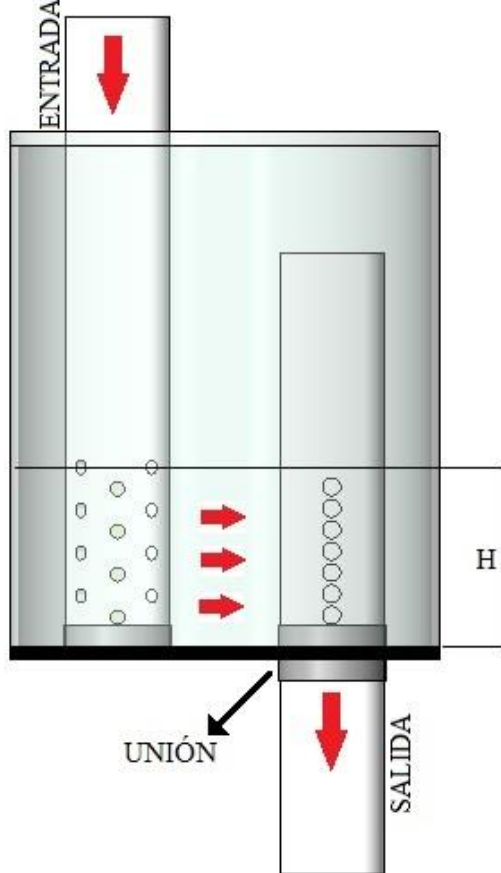
A= Área de los orificios.

g = Gravedad (9.81 m/s²).

H= Altura del nivel del agua desde el orificio.

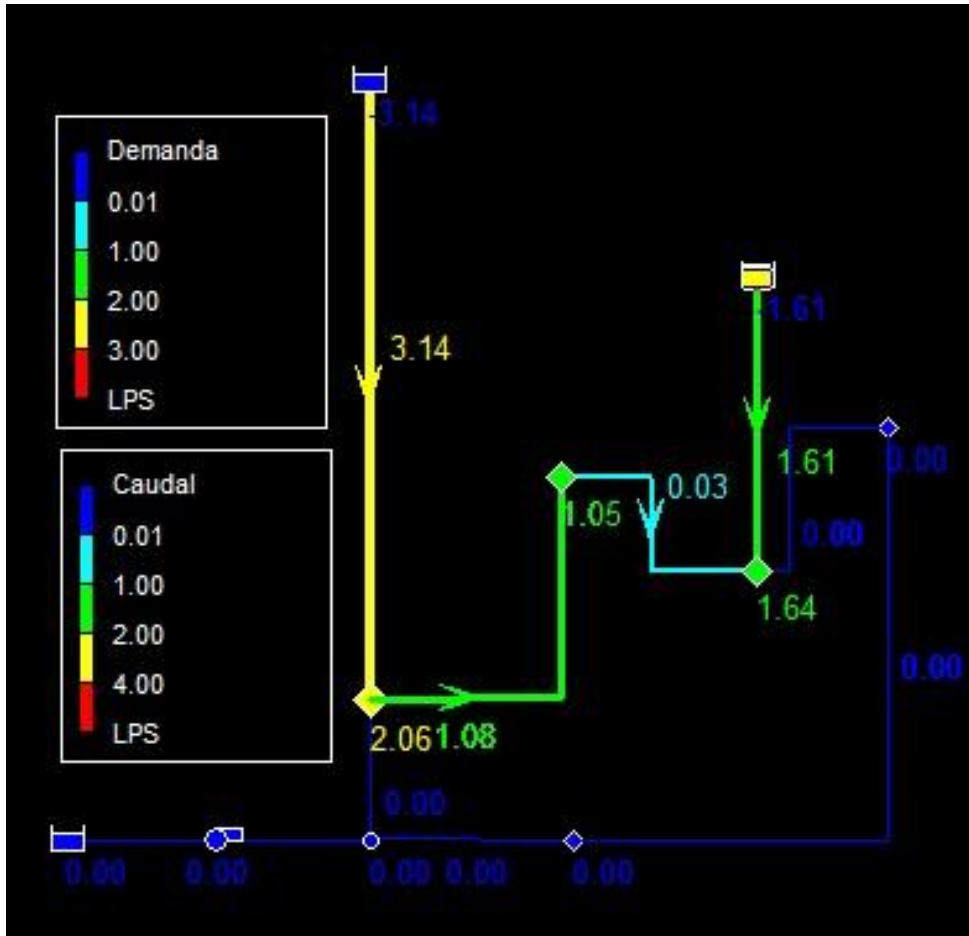
Debido a que cada orificio tiene una altura diferente se debe calcular el caudal que circula en cada uno por aparte, para posteriormente hallar un caudal total, estos orificios tienen un diámetro que puede cambiarse reemplazando la tubería de medición de acuerdo a la cantidad de caudal necesario a medir (ver anexo B).

Ilustración 10. Caudalímetro de orificios diseñado en el software Revit.



Para hallar el caudal total que está circulando por el medidor se debe sumar el caudal de cada uno de los orificios sumergidos con diferentes alturas, si se estandariza el caudal que pasa generando una correlación entre la altura del agua y la cantidad de orificios sumergidos se puede medir con mayor rapidez los caudales (ver anexo B).

Simulación Epanet 1. Caudales en redes abiertas en software Epanet.



Posteriormente se compara los resultados obtenidos en el software Epanet con la hoja de cálculo realizada en Excel donde se obtuvo los siguientes resultados:

Hoja de cálculo 1. Valores de caudal para redes abiertas en el software Excel.

Caudal (Lps)	Longitud (m)	Diámetro (pul)	Diámetro (m)	Tramo	Cota Inicial	Cota Final (m)	Perdidas unitarias	Perdidas Totales	Velocidad (m/s)
3.1407	5.8	1 1/2	0.0381	T1-1	7	1.1	0.2859	1.6580	2.75
1.081	2.6	1	0.0254	1-2	1.1	3.5	0.2859	0.7434	2.13
0.033	2.05	1	0.0254	2-3	3.5	1.9	0.0004	0.0009	0.06
-1.61	4.85	1 1/2	0.0381	3-T2	1.9	5	-0.0829	-0.4023	-1.41

C (H-W)	K constates		
120	1	1	1

Diferencia de Cotas	Sumatoria de Perdidas
2	2.000

ITERACIÓN

	Editar
	No Editar

Nodo 1 (Q salida)	Nodo 2 (Q salida)	Nodo 3 (Q salida)
2.060	1.05	1.642
Cotas Piezométrica	Cotas Piezométrica	Cotas Piezométrica
5.342	4.60	4.598
Presión	Presión	Presión
4.242	1.099	2.698

El resultado obtenido en la hoja de cálculo se da mediante el siguiente concepto. La sumatoria de las pérdidas totales en la red debe ser equivalente a la diferencia de cotas entre los tanques existentes, se inicia colocando un valor cualquiera en el caudal que sale del tanque 1 hacia el nodo 1, se calculan las pérdidas unitarias y totales generadas por el tramo de tubería, posteriormente para calcular el siguiente caudal en ruta (del nodo 1 a nodo 2) se resta el caudal que venía del tanque 1 con el caudal que sale del nodo 1 [este valor en función de la presión generada en el nodo ($Q=K*(Presión)^{1/2}$)], y así sucesivamente en los siguientes nodos hasta obtener las pérdidas totales de cada tramo de tubería.

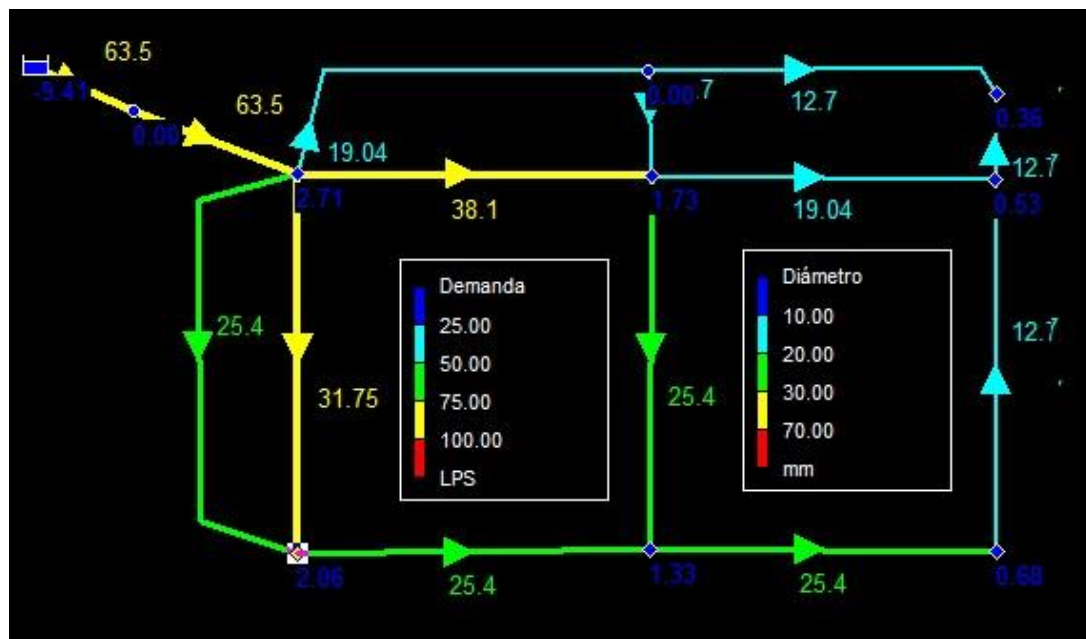
4.2 CAUDALES EN TRAMOS DE UN CIRCUITO O MALLA.

El objetivo fundamental del modelo de dos mallas es familiarizar al estudiante con los diversos problemas que se pueden plantear y que se presentan en la vida real propias de este tipo de sistemas. Se instruirá al estudiante a plantearse a sí mismo cuestiones y preguntas acerca de lo que sucede en la red haciendo las múltiples

variantes bajo las cuales puede trabajar esta. El mismo usuario podrá tener la libertad de crear múltiples preguntas típicas del tipo “*what if*” que manejan algunos programas de computación. Por ejemplo, haciendo uso del segundo modelo al tener todas las válvulas abiertas se crea la siguiente situación (ver simulación Epanet 2), tal que al establecer los caudales o presiones en nodos se puede estudiar el sistema como una malla o circuito cuya solución acude al método de Cross. El estudiante podrá determinar y corroborar experimentalmente los caudales en ruta de las dos mallas planteadas para el segundo modelo, para esto deberá seguir el siguiente procedimiento.

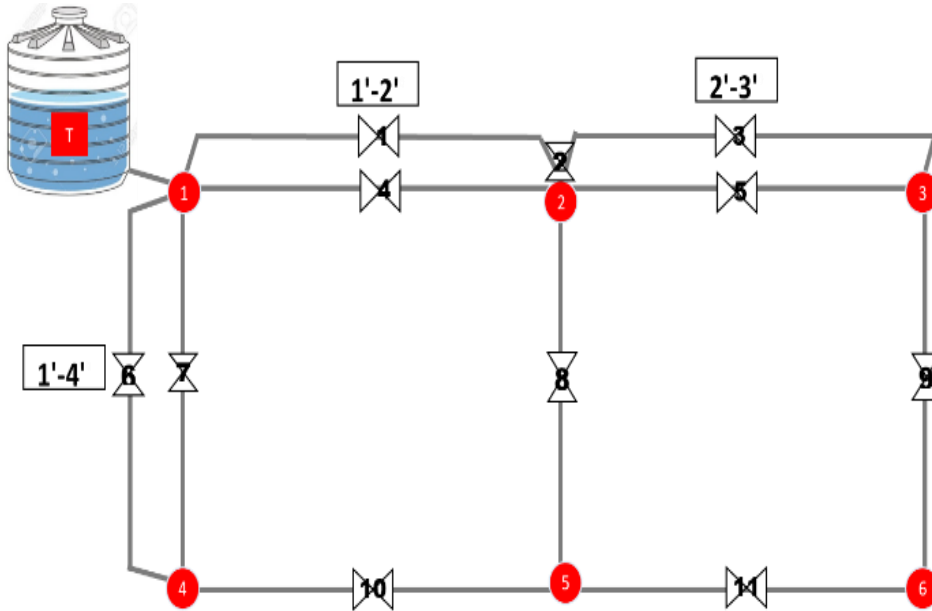
- Como se indica en el método de Cross se debe conocer las pérdidas del sistema, para ello se recurre a la ecuación planteada por Hazen-Williams en donde se debe asumir el caudal inicial de circulación en los tramos de tal forma que este cumpla con las demandas en las salidas, además de los diámetros de la tubería.

Simulación Epanet 2. Diámetros en tuberías y Demandas en los nodos en el software Epanet.



- Utilizando las herramientas electrónicas propuestas se determinan los diámetros de las tuberías equivalentes entre los tramos 1'-2', 2'-3' y 1'-4' (ver ilustración 12) de esta manera se consigue reducir el número de cálculos.

Ilustración 12. Distribución de válvulas y nodos segundo modelo en el software Excel.



Hoja de cálculo 2. Diámetros equivalentes en el software Excel.

Calculo de diámetros equivalentes en paralelo 1-4			Calculo de diámetros equivalentes en paralelo 2-3		
$\frac{De^5}{Le^2} = \sum_{i=1}^n \frac{Di^5}{Li^2}$			$\frac{De^5}{Le^2} = \sum_{i=1}^n \frac{Di^5}{Li^2}$		
TUBERIA 1	LONGITUD (L1)	12 m	TUBERIA 1	LONGITUD (L1)	10 m
	DIAMETRO (D1)	25,4 mm		DIAMETRO (D1)	12,7 mm
TUBERIA 2	LONGITUD (L2)	10 m	TUBERIA 2	LONGITUD (L2)	10 m
	DIAMETRO (D2)	31,75 mm		DIAMETRO (D2)	19,08 mm
Le		10 m	Le		10 m
De		37,6 mm	De		21,6 mm
De		1,48 plg	De		0,85 plg

Calculo de diámetros equivalentes en paralelo 1-2		
$\frac{De^5}{Le^2} = \sum_{i=1}^n \frac{Di^5}{Li^2}$		
TUBERIA 1	LONGITUD (L1)	11 m
	DIAMETRO (D1)	19,04 mm
TUBERIA 2	LONGITUD (L2)	10 m
	DIAMETRO (D2)	38,1 mm
Le		10 m
De		40,5 mm
De		1,60 plg

- Como el método de Cross requiere un proceso iterativo se plantea que sea programado en la hoja de Excel con lo cual se tiene que al presionar el botón “start” (ver Hoja de cálculo 3) la hoja ejecuta una iteración, para conseguir valores óptimos, se debe iterar hasta que DQI y DQII sean cero (DQI y DQII representan la diferencia existente entre los valores reales de circulación y los asumidos). Para utilizar este método se debe tener valores básicos como diámetros, longitudes y demanda total del sistema.

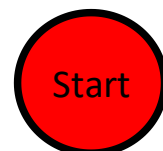
Hoja de cálculo 3. Proceso de cálculo en Excel.

TRAMO	LONGITUD (m)	CAUDAL (LPS)	DM (plg)	DM REAL (plg)	Hf (m)	Hf/Q	Q+DQ (LPS)	V real (m/s)
T-1	16	9,4	2,5	2,5	2,87			2,97
1-2	10	3,60	1,5	1,6	2,66	738,24	3,60	2,77
2-5	10	1,03	0,8	1	2,59	2511,41	1,03	2,04
5-4	10	-1,01	0,8	1	-2,50	2472,38	-1,01	-2,00
4-1	10	-3,08	1,4	1,5	-2,73	886,31	-3,08	-2,70
SUMA					0,01	6608,35		
2-3	10	0,82	0,7	0,85	3,70	4534,89	0,82	2,23
3-6	10	0,04	0,2	0,5	0,15	4155,76	0,04	0,28
6-5	10	-0,69	0,7	1	-1,25	1792,68	-0,69	-1,37
5-2	10	-1,03	0,8	1	-2,59	2511,41	-1,03	-2,04
SUMA					0,01	12994,75		

DQI	0,00	0,00
DQII	0,00	0,00

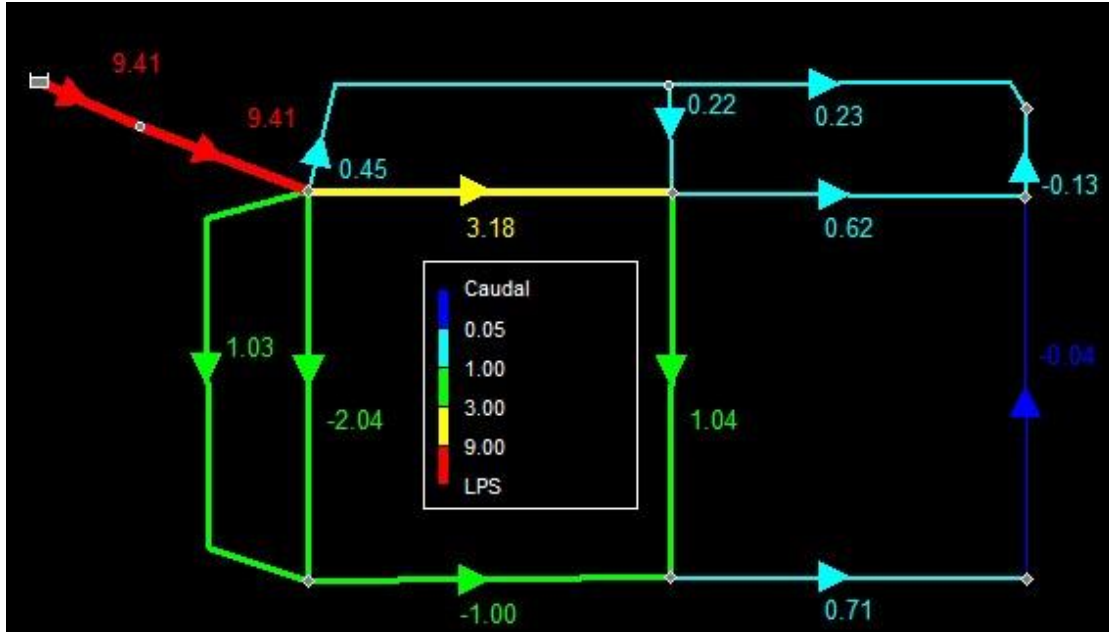
LPS
LPS

TRAMO	Q (LPS)	Q (m3/s)
T_1	9,40	0,0094
1_2	3,60	0,003597136
2_3	0,82	0,000815477
1_4	3,08	0,003082864
2_5	1,03	0,001031659
3_6	0,04	3,54766E-05
4_5	1,01	0,001012864
5_6	0,69	0,000694523



- Para finalizar se hace la verificación del método de Cross mediante el modelo experimental y el software Epanet.

Simulación Epanet 3. Caudales en ruta en el software Epanet.



Como se observa si se suma los caudales de las redes en paralelo 1'-2', 2'-3' y 1'-4' (ver ilustración 12) se obtiene los caudales que fueron calculados con los diámetros de las tuberías equivalentes. Además, se observa una diferencia entre los datos obtenidos con Excel y Epanet esto puede deberse a la mayor capacidad del software Epanet.

Con esta práctica el estudiante podrá hacer uso del método de Cross y de las metodologías de diámetros equivalentes para afianzar estos conceptos.

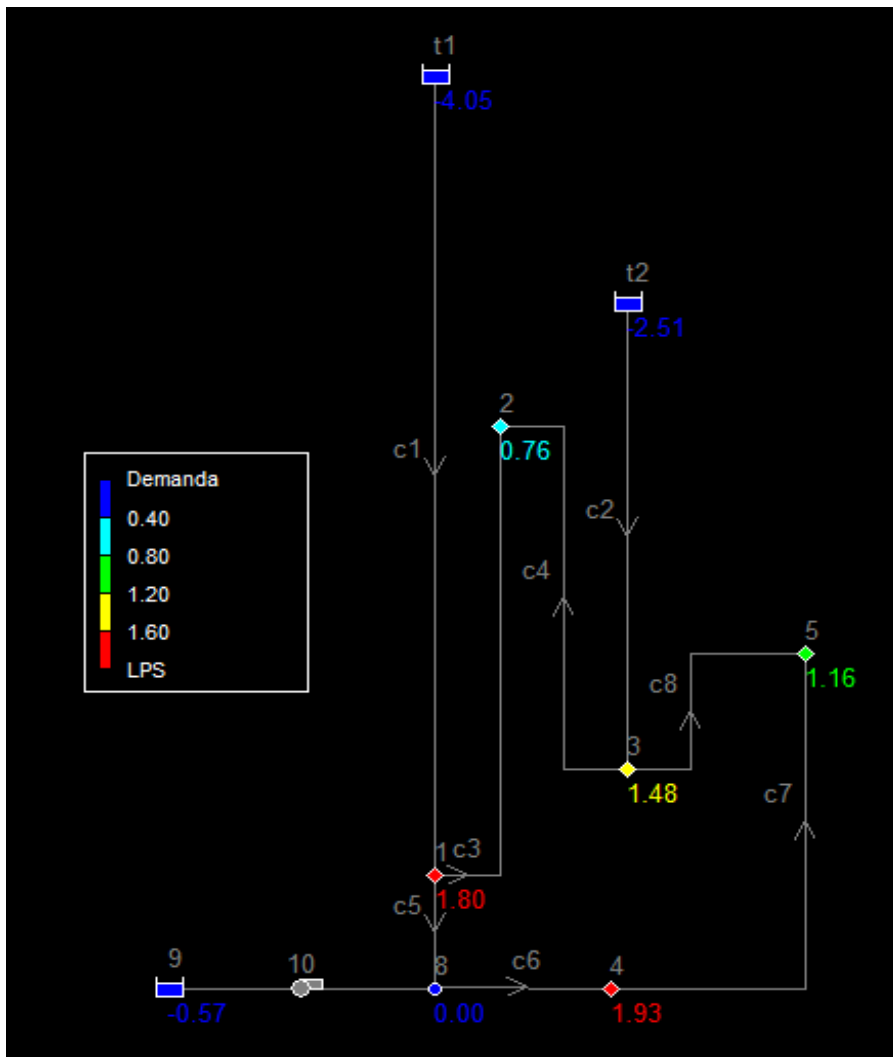
4.3 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS EN EMISORES (K).

Colocando en funcionamiento el primer modelo para posteriormente medir caudales y presiones en los nodos, el estudiante podrá determinar analíticamente las constantes de las válvulas parcialmente abiertas, de acuerdo a la ecuación 39.

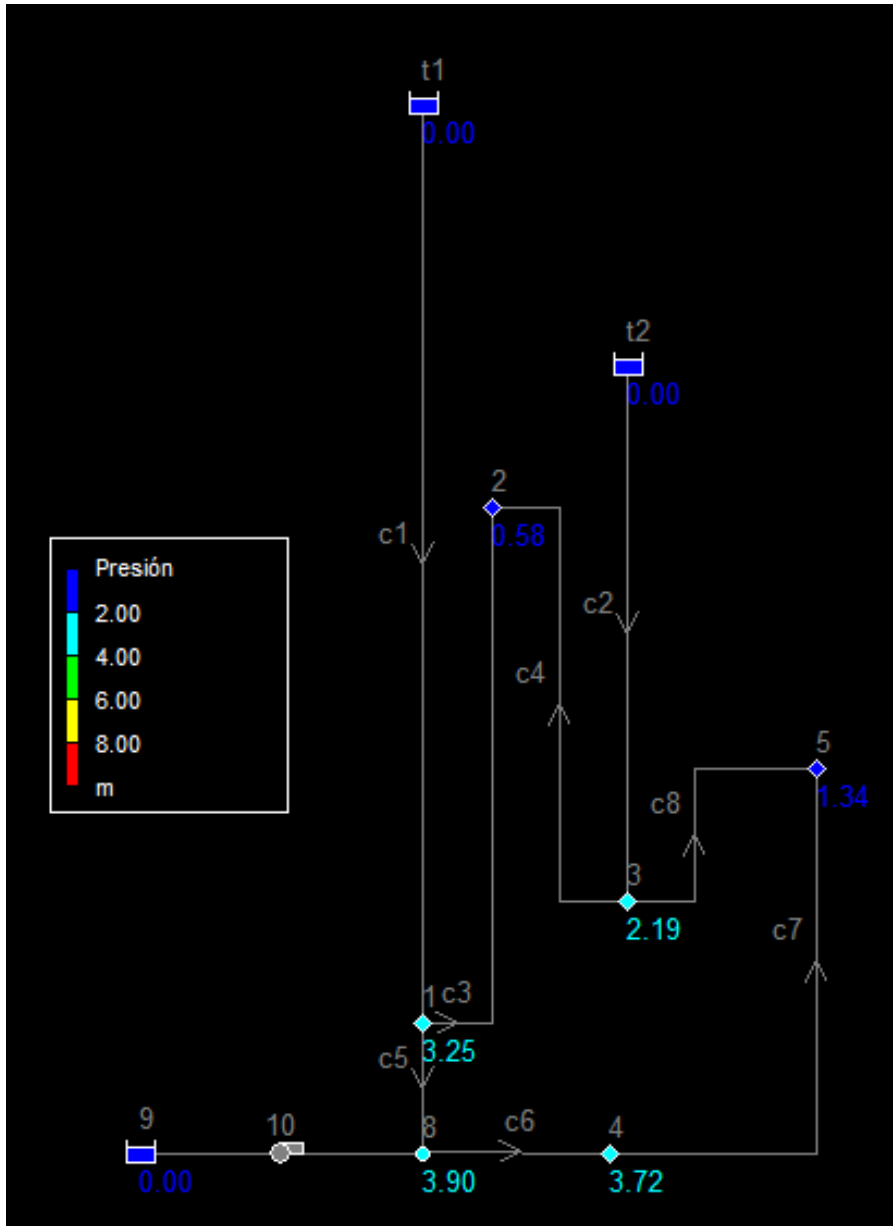
$$Q = K\sqrt{P} \quad (39)$$

De esta manera si se miden los caudales y presiones se encuentra la respuesta del modelo (ver simulación Epanet 4).

Simulación Epanet 4. Demanda en nodos primer modelo en el software Epanet.



Simulación Epanet 5. Presión en nodos primer modelo en el software Epanet.



Si se toma el nodo 1 en el cual es posible medir tanto caudal de salida como presión, se puede hallar el coeficiente de los emisores K por medio de la ecuación 40 si ($Q_1=1,8$ Lps. $P_1=3,25$ m).

$$K = \frac{Q}{\sqrt{P}} = \frac{1,8}{\sqrt{3,25}} = 0,998 \approx 1 \quad (40)$$

En la práctica es posible variar la apertura de las válvulas de salida de tal manera que el caudal cambie y por lo tanto el coeficiente emisor también, consiguiendo así establecer una relación entre el ángulo de abertura de las válvulas con el coeficiente emisor K, registrando a una apertura de la llave en (30°, 45°, 60° y 90°).

4.4 COEFICIENTE DE HAZEN - WILLIAMS (C).

Para esta práctica se elige el segundo modelo (ver ilustración 12), se establece un caudal constante en los nodos y se observan experimentalmente las presiones en los nodos generada en el sistema, con estos datos y aplicando la ecuación de Hazen-William se puede calcular el valor de coeficiente de rugosidad (C_{Hw} o C).

Mediante la ecuación 41.

$$H_f = \frac{10.672}{D^{4.869}} * \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.851} * L \quad (41)$$

Donde:

Q= Es el caudal determinado por el método de Cross para cada línea de tubería.

D= Diámetro de cada línea de tubería

L= Longitud de cada tubería.

H_f = Pérdidas de energía producidas por fricción en las líneas.

Para determinar estas pérdidas se deben medir la presión en los nodos y determinar la cota piezométrica en cada uno, esta pérdida será igual a la diferencia que existe entre la cota piezométrica del nodo inicial y el nodo final de cada tramo.

Para finalizar, conociendo todas las variables que intervienen en la ecuación se puede determinar el coeficiente (C) en cada tramo despejando de la ecuación planteada, para posteriormente determinar un coeficiente C promedio para todo el sistema. (Ver Anexo C).

4.5 CURVA DE BOMBEO.

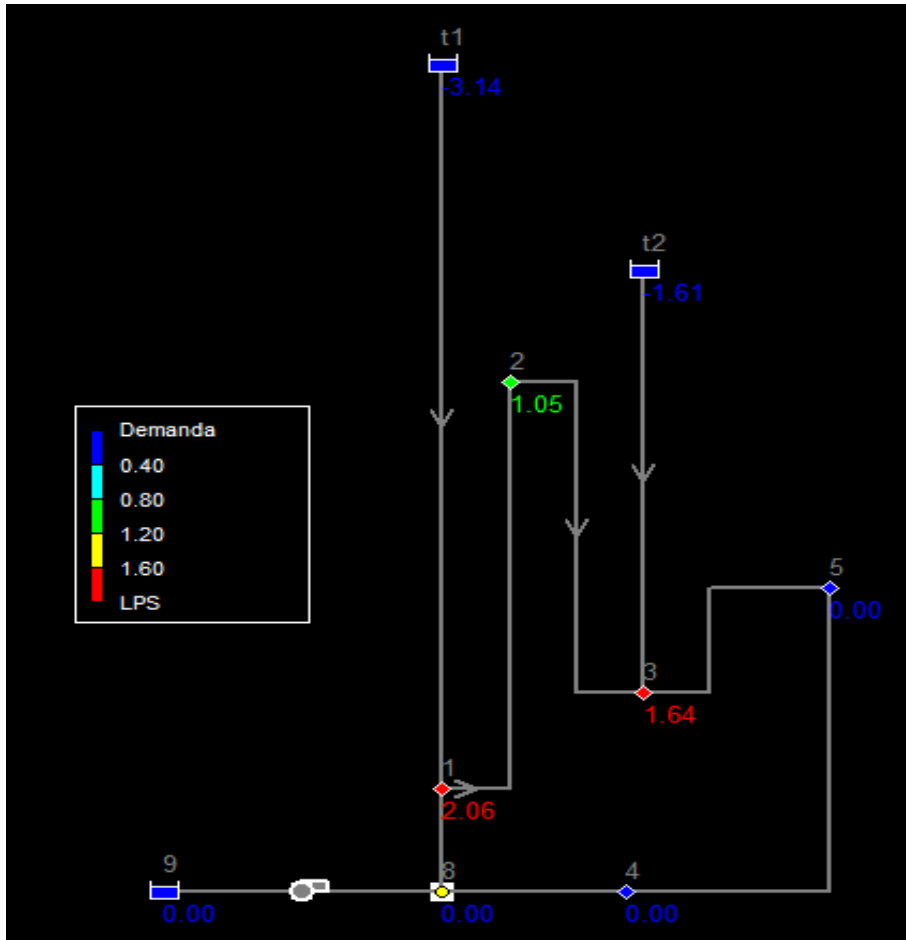
Para determinar la curva de bombeo se debe cerrar las válvulas 2, 3, 4, 5, 6 y 7, de esta manera se genera un sistema que permite regular el caudal que la bomba transporta al tanque 1 (ver ilustración 11), se comienza con la válvula totalmente cerrada y tomando nota de la presión ejercida en el nodo 1, con ayuda del manómetro ubicado en esta posición, posteriormente se abre la válvula y con cada cambio se toma lectura del caudal entrante en el tanque 1 y la presión registrada por el manómetro, esta presión es definida como **HDT**, con los datos obtenidos se gráfica y se obtiene la curva de bombeo, la cual se debe comparar con la curva presentada por el fabricante de la bomba, calcular el porcentaje de error para luego concluir razones por las cuales se presentan estas discrepancias en los resultados obtenidos (ver anexo 1).

4.6 COTA PIEZOMÉTRICA Y PRESIÓN.

Esta práctica permitirá al estudiante familiarizarse y diferenciar entre cota piezométrica y presión, conceptos fundamentales en el estudio de la hidráulica.

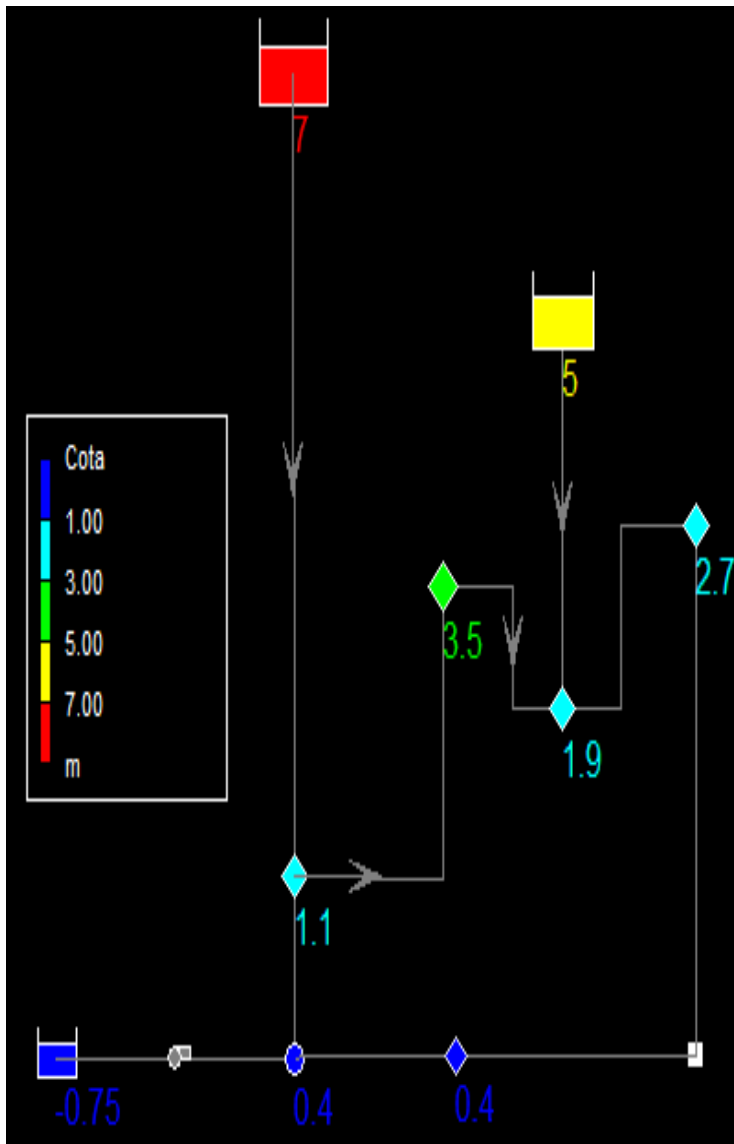
Dada una red de distribución que conecta el tanque 1 y el tanque 2 en el primer modelo, mediante los nodos 1, 2 y 3 en los cuales se conoce los caudales de salida, se puede determinar la cota piezométrica y la presión en este nodo (ver simulación en Epanet 6).

Simulación Epanet 6. Demanda en los nodos primer modelo en el software.

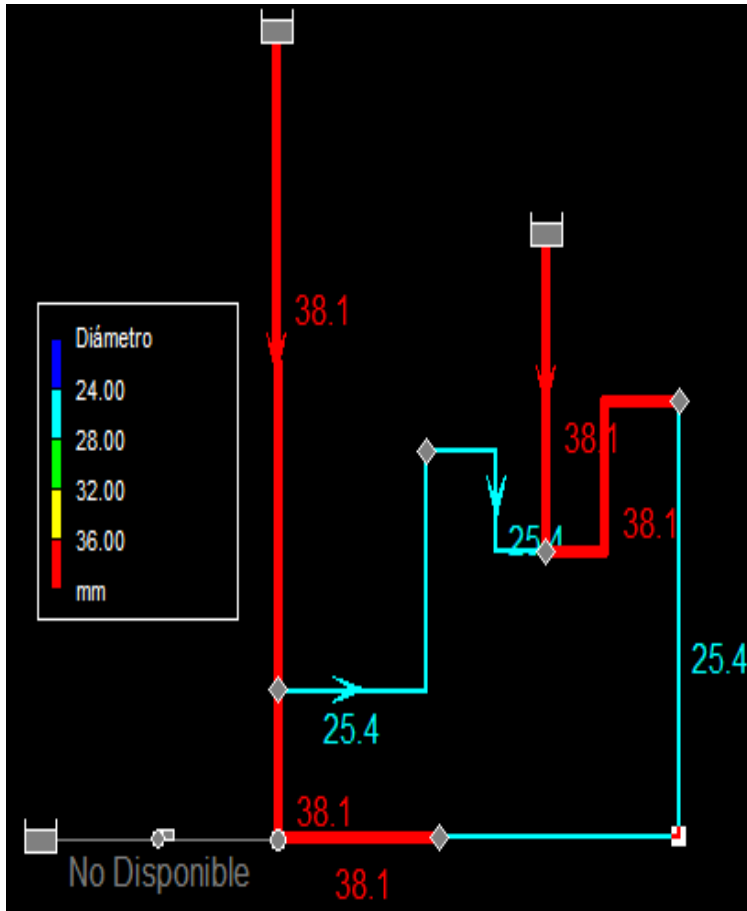


Además de esto se debe conocer tanto la cota de terreno (ver simulación Epanet 7), como el diámetro de las tuberías que componen el sistema (ver simulación Epanet 8).

Simulación Epanet 7. Cotas del modelo en el software Epanet.



Simulación Epanet 8. Diámetros primer modelo en el software Epanet.



Obteniendo estos datos y mediante el uso de las ecuaciones de **Hazen-Williams** se puede determinar las pérdidas de energía que se dan durante el trayecto y de esta manera determinar la cota piezométrica, que es la energía inicial menos las pérdidas en el tramo. Donde la energía inicial está representada por la elevación del tanque 1.

Si se representa este procedimiento mediante una hoja de Excel se tiene (ver Hoja de cálculo 4).

Hoja de cálculo 4. Cota piezométrica y presión en el software Excel.

Caudal (Lps)	Longitud (m)	Diámetro (pul)	Diámetro (m)	Tramo	Cota Inicial	Cota Final (m)	Perdidas unitarias	Perdidas Totales	Velocidad (m/s)
3.1407	5.8	1 1/2	0.0381	T1-1	7	1.1	0.2859	1.6580	2.75
1.081	2.6	1	0.0254	1-2	1.1	3.5	0.2859	0.7434	2.13
0.033	2.05	1	0.0254	2-3	3.5	1.9	0.0004	0.0009	0.06
-1.61	4.85	1 1/2	0.0381	3-T2	1.9	5	-0.0829	-0.4023	-1.41

C (H-W)	K constates		
120	1	1	1

Diferencia de Cotas	Sumatoria de Perdidas
2	2.000

ITERACIÓN

	Editar
	No Editar

Nodo 1 (Q salida)	Nodo 2 (Q salida)	Nodo 3 (Q salida)
2.060	1.05	1.642
Cotas Piezométrica	Cotas Piezométrica	Cotas Piezométrica
5.342	4.60	4.598
Presión	Presión	Presión
4.242	1.099	2.698

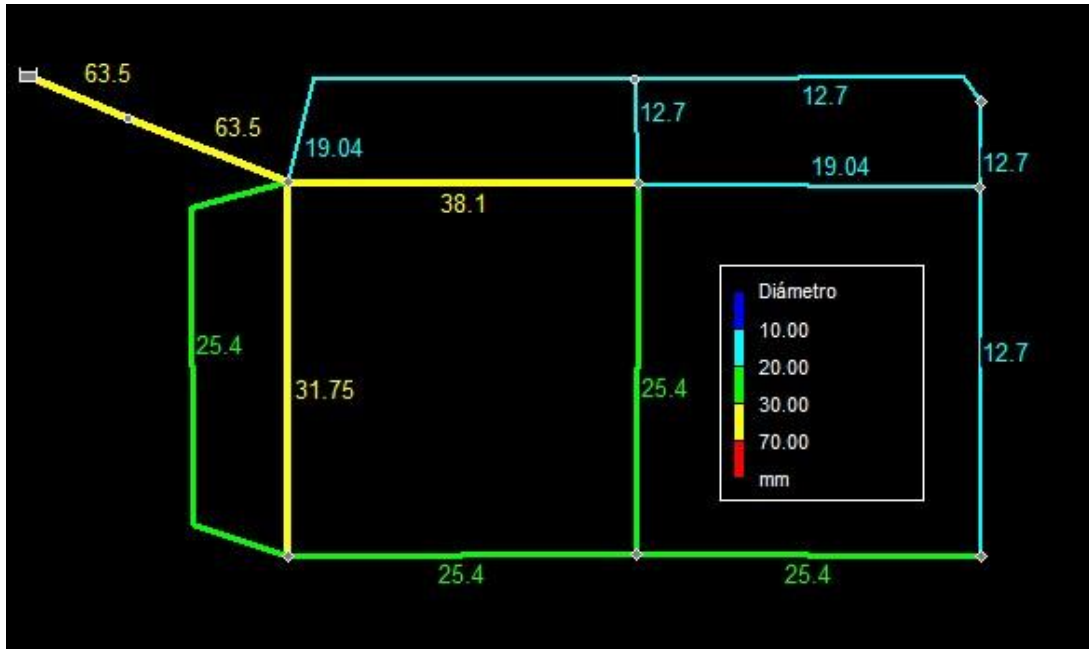
Conociendo la cota piezométrica que representa la presión del líquido por encima de un datum geodésico, se puede hallar la presión, que es la diferencia entre la cota piezométrica y la cota del terreno.

4.7 TUBERÍA EQUIVALENTE (SERIE).

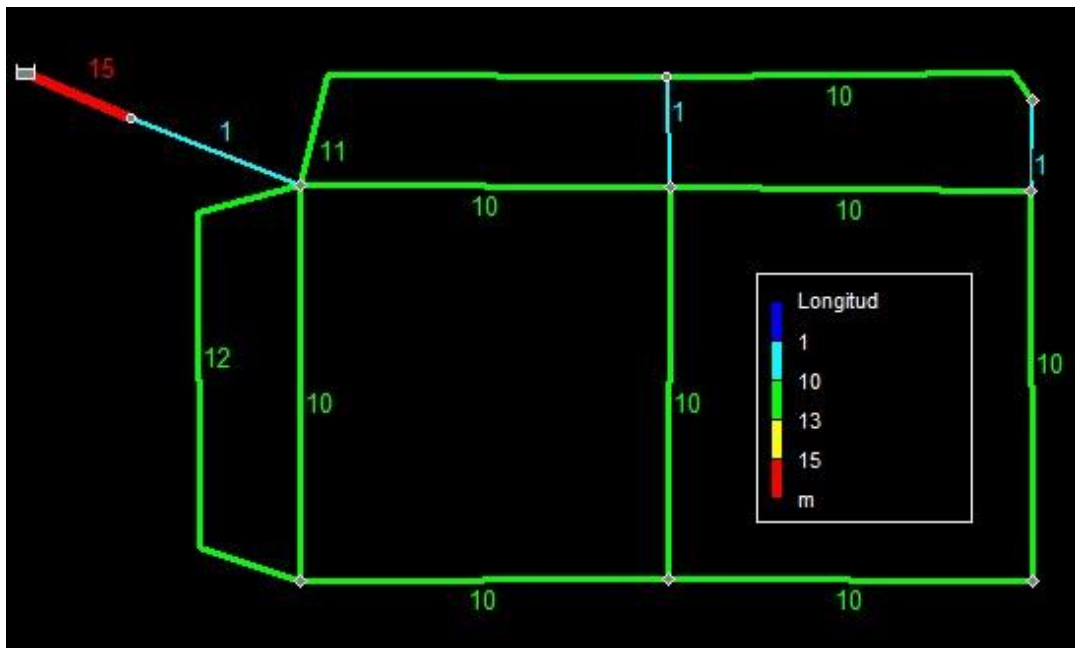
Haciendo uso del modelo 2 cerrando las válvulas (1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11), (ver ilustración 12) se puede conseguir dos tramos de tubería en serie, que son aquellos que se encuentran en los tramos principales y auxiliares de 1-2 y 1'-2', 2-3 y 2'-3'.

Para realizar la estimación de las tuberías en serie se cuenta con las ecuaciones planteadas en párrafos anteriores además de conocerse las dimensiones de las tuberías existentes (ver simulación Epanet 9 y 10).

Simulación Epanet 9. Diámetros primer modelo.



Simulación Epanet 10. Longitudes primer modelo en el software Epanet.



Haciendo uso del software apropiado, en este caso hojas de Excel, se puede determinar el diámetro equivalente en serie para los tramos 1-2, 1'-2' y 2-3,2'-3' (ver ilustración 12).

Hoja de cálculo 5. Diámetro equivalente en serie en el software Excel.

Calculo de diámetros equivalentes en serie		
$\frac{Le}{De^5} = \sum_{i=1}^n \frac{Li}{Di^5}$		
TUBERIA 1	LONGITUD (L1)	10 m
	DIAMETRO (D1)	38,1 mm
TUBERIA 2	LONGITUD (L2)	10 m
	DIAMETRO (D2)	19,04 mm
Le		20 m
De		21,7 mm
De		0,9 plg

4.8 TUBERÍA EQUIVALENTE (PARALELO).

Usando el modelo 2 (ver ilustración 12), se pueden hacer prácticas de tuberías equivalentes en paralelo con los tramos de 1-2, 2-3 y 1-4, consiguiendo que el estudiante conozca de primera mano la aplicación del método de cálculo de tuberías en paralelo. Para ello se debe conocer las longitudes y diámetros de las tuberías que componen la red (ver simulación Epanet 9 y 10).

Haciendo uso del software (Excel) se tiene que el diámetro equivalente del tramo 1-2 es.

Hoja de cálculo 6. Diámetro equivalente en paralelo en el software Excel.

Calculo de diámetros equivalentes en paralelo 1-2		
$\frac{De^{\frac{5}{2}}}{Le^{\frac{1}{2}}} = \sum_{i=1}^n \frac{Di^{\frac{5}{2}}}{Li^{\frac{1}{2}}}$		
TUBERIA 1	LONGITUD (L1)	11 m
	DIAMETRO (D1)	19,04 mm
TUBERIA 2	LONGITUD (L2)	10 m
	DIAMETRO (D2)	38,1 mm
Le		10 m
De		40,5 mm
De		1,60 plg

Mediante este proceso se puede buscar que los estudiantes en las practicas entiendan el concepto de diseñar diversos sistemas con diferentes diámetros pero que tengan perdidas iguales al modelo original.

5 PRESUPUESTO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS

5.1 MANO DE OBRA

Dentro de la implementación de los modelos propuestos está definida la mano de obra, donde se establece un estimado del tiempo que podría tardar la construcción de los modelos (15 días para cada modelo). Se emplean valores acordes a lo reglamentado en el mercado laboral. Como se ve en el anexo 5 y 6, el coste de la mano de obra para cada equipo ronda los 2'300.000 de pesos Colombianos.

5.2 MATERIALES

Para la elaboración de los modelos se tomaron precios de referencia para el año 2020, estos precios son susceptibles a cambios que pueden ser producidos por variaciones en el mercado, calidad y proveedores que distribuyen tanto equipo como accesorios requeridos para la construcción de las propuestas. Bajo estas consideraciones se tiene que el coste de los materiales es de aproximadamente 5'800.000 para el primer modelo y de 7'100.000 para el segundo modelo de pesos Colombianos (ver anexos D).

6 CONCLUSIONES

Los modelos planteados en este documento pueden ser usados para el estudio de redes bajo presión y el análisis de diferentes conceptos y metodologías, de tal forma que cada modelo por aparte puede satisfacer diferentes ámbitos de estudio definido según el fin de la investigación realizada, dentro de los diferentes conceptos que se pueden estudiar están: caudales en redes abiertas, caudales en tramos de un circuito o malla, coeficiente de pérdidas en emisores (K), coeficiente de Hazen.-Williams (C_{HW}), curvas de bombeo, cota piezométrica y presión, sistemas de tuberías (serie y paralelo). Además, permite plantear otros tipos de estudio según lo requiera el investigador al poder proponer diferentes configuraciones de los sistemas que llevaran a diferentes respuestas con posibilidad de análisis.

Mediante los modelos computacionales planteados tanto en Epanet como en Excel el estudiante podrá comparar los resultados presentados de manera práctica y discutir la precisión, exactitud, diferencias, similitudes y posibles fuentes de error que llevaron a obtener variedad de respuestas en un mismo análisis, de este modo el alumno podrá observar la aplicación de las ecuaciones, procedimientos y razonamientos vistos en los diferentes temas de la asignatura para afianzar con las practicas el conocimiento adquirido.

El costo de los materiales, dispositivos y mano de obra requerida para la construcción de los modelos en el laboratorio de hidráulica es aproximadamente de \$17.500.000 pesos, valor que no es persistente debido a factores de variación en el mercado, incluso los implementos establecidos en el documento no son inmutables, llegando a ser sustituidos por otros similares en funcionamiento, pero diferentes en precio o marca obtenidos por optimización de costos que no están disponibles actualmente.

La implementación de los modelos traerá a la comunidad estudiantil un mayor campo de estudio de la hidráulica y fomentará en los estudiantes y docentes la investigación en dicho campo, donde podrán ver que tanto en el primer modelo como en el segundo se puede hacer un análisis de conceptos similares, y también cuentan con características que hacen posible el análisis de conceptos puntuales para cada modelo esto buscando incrementar las posibilidades en cuanto a los tipos de investigación que se realizarán en los modelos.

Como se observa en los modelos de las prácticas planteadas en este documento existe una variación en cuanto a los resultados obtenidos entre el software Epanet y Excel, además se espera que esta variación esté presente en el modelo práctico ya que cada uno de los análisis no tienen en consideración las diferentes variables que pueden afectar las diferentes respuestas. Por otro lado, se sabe que cada software tiene capacidades diferentes y están programados de forma distinta lo que podría llevar a la diferencia en las soluciones que se da a cada uno de los planteamientos.

Se espera que este proyecto pueda ser llevado a la realidad en un tiempo no muy lejano y sea empleado para realizar el objetivo principal de este proyecto que es dar una herramienta a los estudiantes para entender y afianzar los conceptos aprendidos en esta rama de la ingeniería civil.

REFERENCIAS

- [1] ABADIA MENDEZ, Yeris Alexander. SANCHEZ MORA, Emily Andrea. SERRANOS MARIN, Juan David. Optimización, del diseño de equipo hidráulico para el ensayo de laboratorio orificios de caída libre, Trabajo de grado Ingeniería Civil. Cundinamarca. Corporación Universitaria Minuto de Dios. Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Civil. 2015 P42.
- [2] AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS, Manual del usuario en línea Epanet versión 2.2. EPANET. Mayo de 2020.. [En línea] Disponible en: <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [3] CAMACHO SALGADO, Laura. CETIH: Historia contada a tres voces, Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes, (edición 35), pp. 117-120, 2011. doi: <https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=http://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/viewFile/156/108>
- [4] CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL AGUA. Cálculo de redes malladas sección 1. Universidad de Salamanca. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cidta.usal.es/cursos/redes//modulos/libros/unidad%204/malladas.PDF>
- [5] CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL AGUA. Sistema complejo de tuberías - Unidad 4. Universidad de Salamanca. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://cidta.usal.es/cursos/hidraulica/modulos/documentos/Unidad%204/u4c1s1.pdf>.
- [6] CORCHO ROMERO, Freddy; DUQUE SERNA, Jorge Ignacio. Bombas y estaciones de bombeo, Acueductos Teoría y Diseño. Medellín, Colombia. Departamento de Publicaciones. Universidad de Medellín. pp. 491-492. (1997).

[7] EVANS, Especificación técnicas bomba domestica 1 HP. 3HME100. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.evans.com.co/producto/bomba-domestica-1-hp-3hme100/> [Accedido: 23-12-2020].

[8] FLECHAS HERNÁNDEZ, Rafael Alejandro. Efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach vs la ecuación de Hazen-Williams sobre los costos de diseño optimizados en acueductos, teniendo en cuenta la rugosidad de las tuberías del gradiente hidráulico y temperatura. Trabajo de grado Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. Universidad de los Andes. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2010.

[9] GARCÍA SOLANO, Mario. Fundamentos de Acueductos. Material de la Clase Acueductos y Alcantarillados. UIS. Esc. Ing Civil. 2020.

[10] ORTIZ FLORES, Ramiro. Hidráulica, generación de energía. Ediciones de la U. 2011 [En línea]. Disponible en: <http://bibliotecavirtual.uis.edu.co:2168/?il=5493&pg=54>

[11] PAVCO WANIN, lista de precios septiembre 2019, pp. 6-8, 2019. [En línea]. Disponible en <https://pavcowavin.com.co/lista-de-precios> [Accedido: 23-12-2020].

[12] UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, Departamento de ingeniería Civil y Agrícola Facultad de ingeniería. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/a/unal.edu.co/dica/laboratorios/hidraulica> [Accedido: 23-12-2020].

[13] UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. Recursos del programa académico de ingeniería civil laboratorios. [En línea]. Disponible en: <https://www.uis.edu.co/webUIS/es/academia/facultades/fisicoMecanicas/escuelas/ingenieriaCivil/programasAcademicos/ingenieriaCivil/recursos.jsp> [Accedido: 23-12-2020].

BIBLIOGRAFIA

GARCÍA SOLANO, Mario. Fundamentos de Acueductos. Material de la Clase Acueductos y Alcantarillados. UIS. Esc. Ing Civil. 2020.

LEWIS A. ROSSMAN. "Epanet 2 Manual de Usuario". Environmental Protection Agency. [En línea]. Disponible en: https://epanet.es/wp-content/uploads/2012/10/EPANET_Manual_Usuario.pdf . [Accedido: 19-10-2020].

PAVCO WANIN, Manual técnico tubosistemas PRESIÓN PVC, febrero 2020 [En línea]. Disponible en: <https://pavcowavin.com.co/download/10> [Accedido: 23-12-2020].

SIMPSON, A.R. "Comparing the Q-equations and Todini-Pilati formulation for solving the water distribution system equations." *Water Distribution System Analysis (WDSA) 2010*, Tucson, Arizona, USA, 12-15 September (2010).

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA, Escuela Profesional de Ingeniería Civil "Diseño de una Red de Abastecimiento de agua – Método del Gradiente Hidráulico" Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado Profesor: Ing. Joel Oré Iwanaga.

ANEXOS.

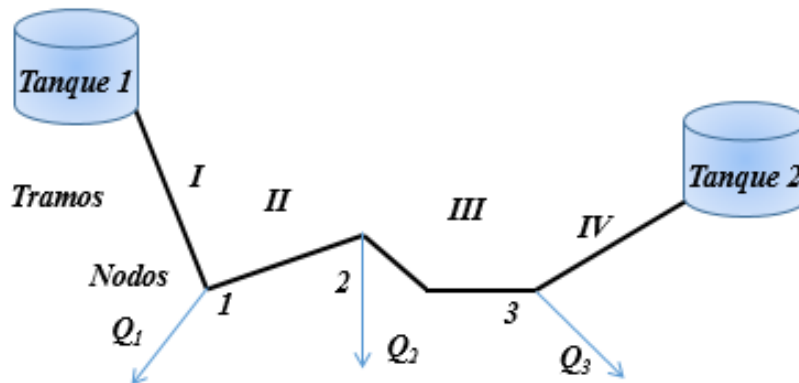
Anexo A. Ejemplo de las practicas o laboratorios.

A continuación, se presentan talleres que el estudiante puede realizar en los modelos construidos (esto complementado las practicas propuestas).

Anexo A1. Primer modelo.

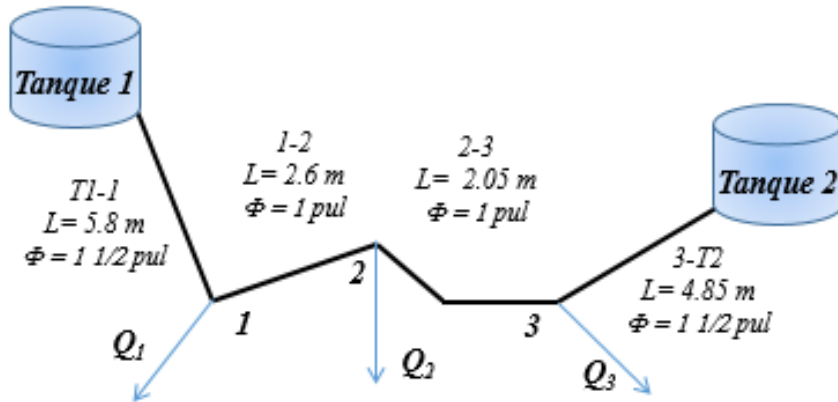
1- ¿Cuáles son los caudales en los nodos en el sistema para el siguiente esquema de trabajo? (ver ilustración 13).

Ilustración 13. Esquema de una red de distribución abierta.

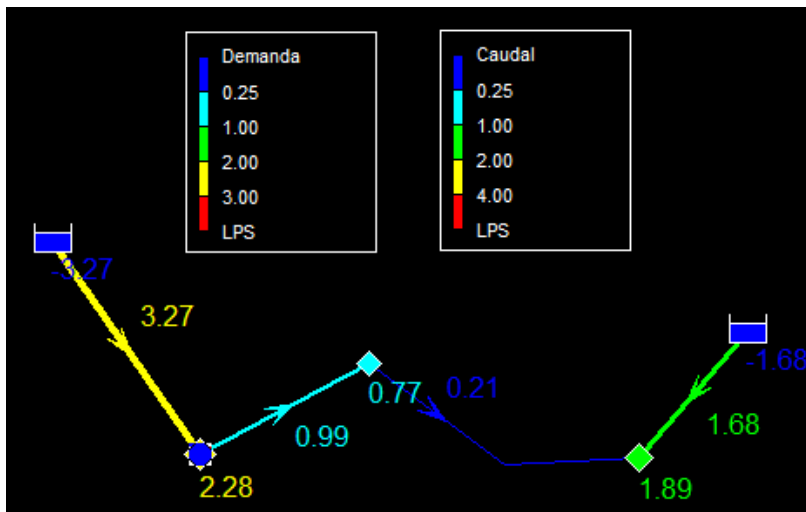


Estableciendo las longitudes y los diámetros a los tramos de la red de distribución presentada (ver ilustración 14) se procede a calcular los caudales en los nodos utilizando el software Epanet (ver simulación en Epanet 11).

Ilustración 14. Diámetros y longitudes establecidas en el modelo.

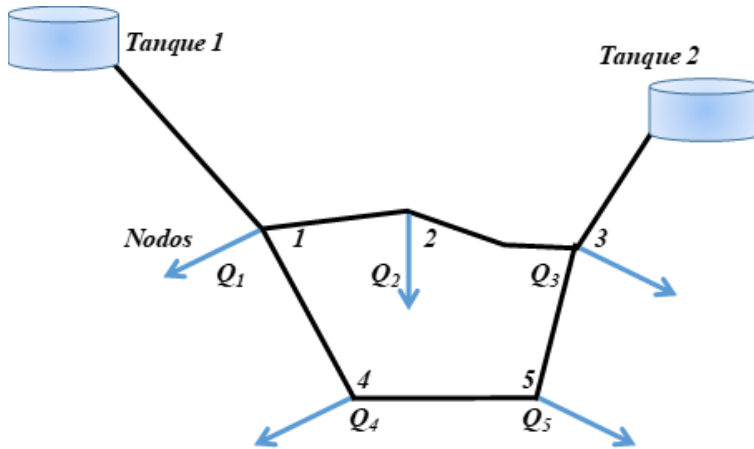


Simulación Epanet 11. Respuestas del taller planteado en el software Epanet, demanda en nodos y caudal en tramos.



2- ¿Qué caudales presenta en los nodos el siguiente esquema planteado? (ver ilustración 15).

Ilustración 15. Esquema de una red de distribución cerrada.



Estableciendo las siguientes longitudes y diámetros a los tramos (ver ilustración 16) se procede a calcular los caudales en los nodos, utilizando el software Epanet (ver Simulación en Epanet 12), teniendo en cuenta la configuración realizada para el modelo (ver ilustración 17).

Ilustración 16. Diámetros y longitudes establecidas en el segundo esquema.

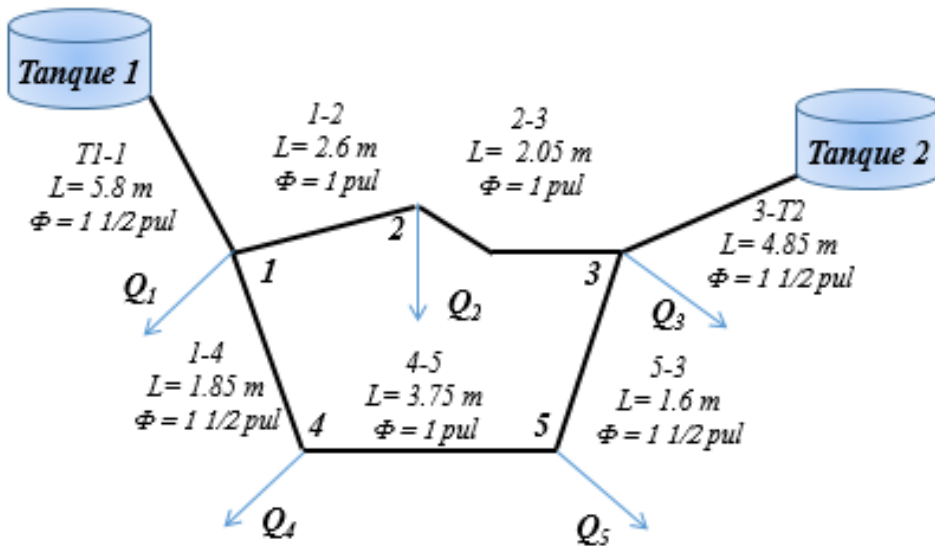
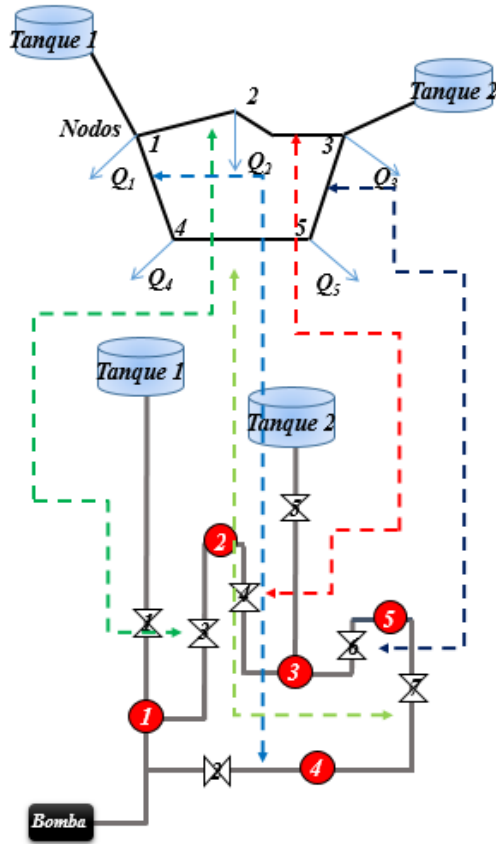
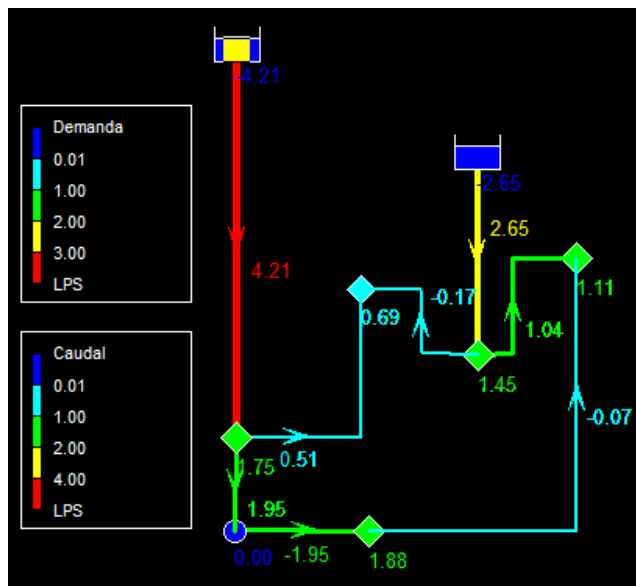


Ilustración 17. Señalamiento del esquema planteado al modelo diseñado.

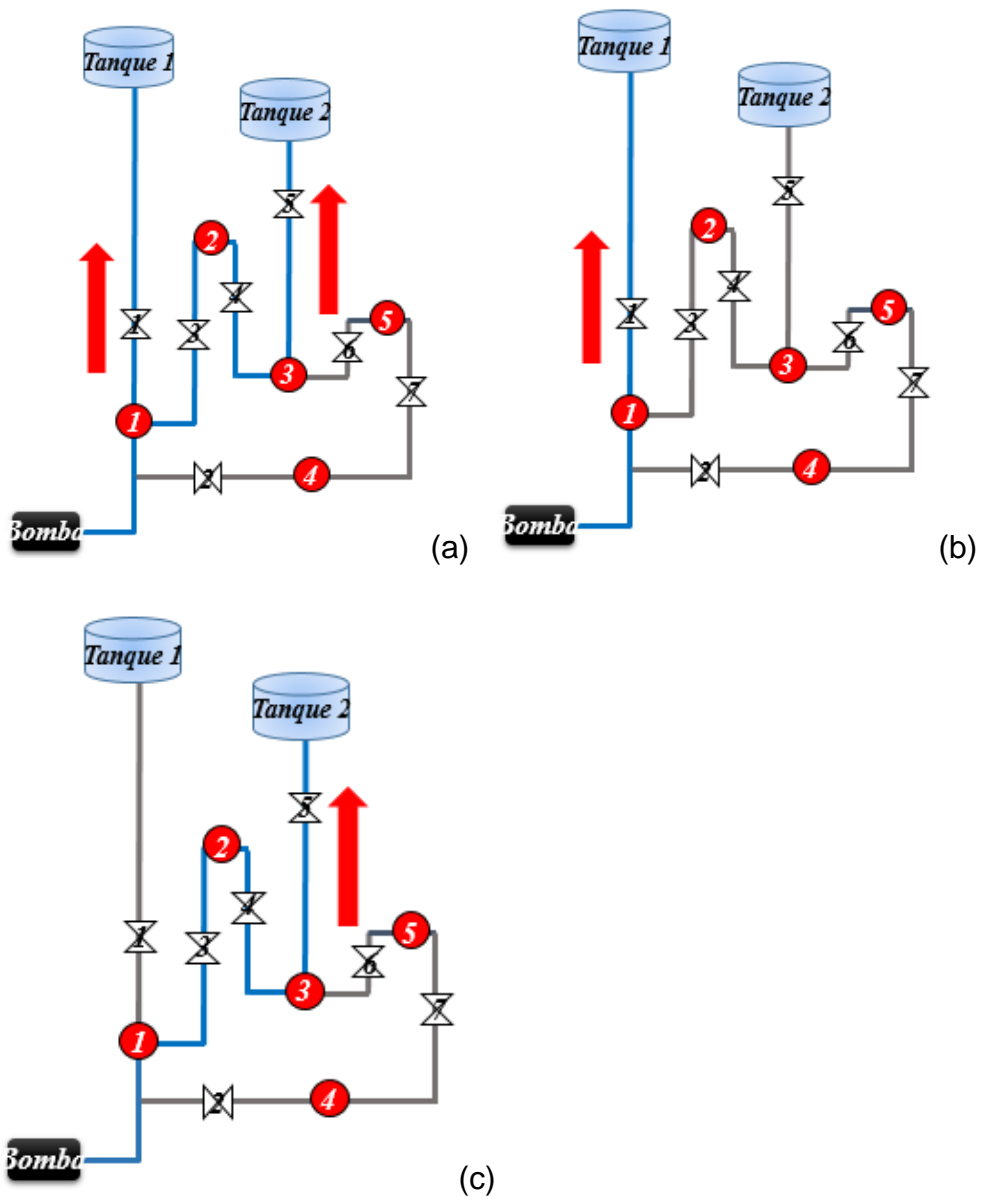


Simulación Epanet 12. Resultados obtenidos del modelo planteado (ilustración 17) en el software Epanet.



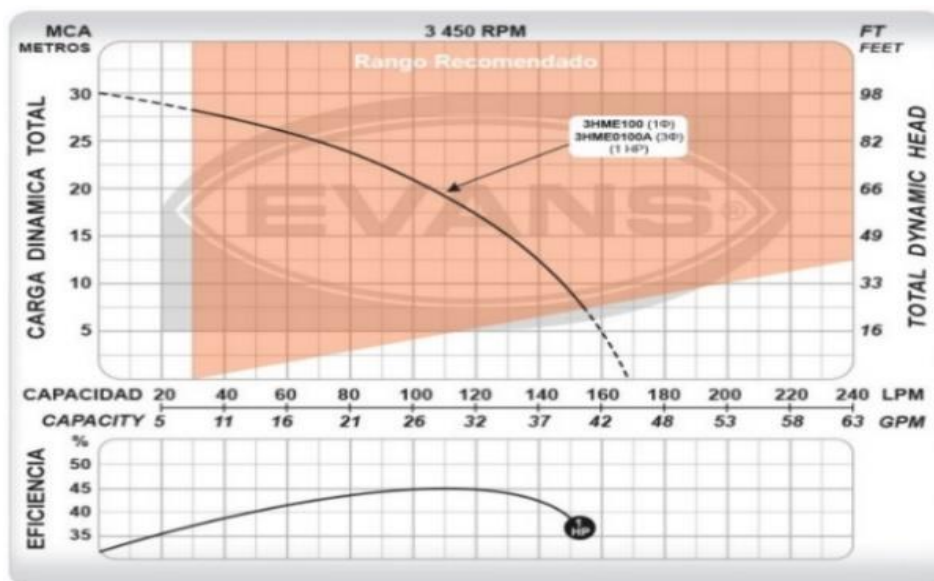
- 3- ¿Cuáles son los caudales de bombeo que llegan a los tanques en los siguientes casos?
- Los dos tanques se encuentran abiertos (Que caudal recibe cada tanque).
 - El tanque que se encuentra a mayor altura si el tanque inferior está cerrado.
 - El tanque que se encuentra a menor altura si el tanque superior está cerrado.

Ilustración 18. Representación de los casos a, b y c respectivamente.



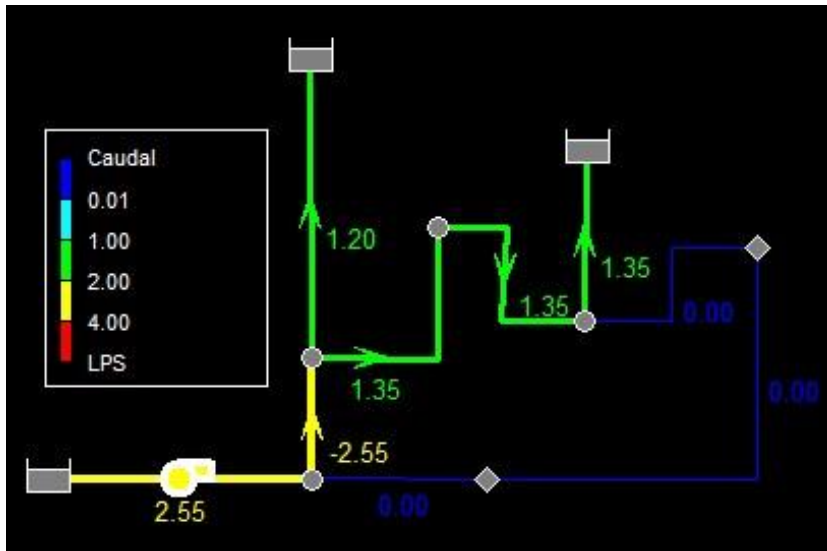
Este laboratorio (caso a) se da por medio de un arreglo de válvulas del primer modelo (ver ilustración 18) cerrando las válvulas 2, 6 y 7 queda un sistema en el cual la bomba transporta el agua hacia los dos tanques, midiendo el caudal que recibe cada uno se puede determinar la capacidad de la bomba comparándola con la curva característica que presenta (ver ilustración 19) simulando la situación en Epanet se obtiene los siguientes resultados (ver simulación Epanet 13):

Ilustración 19. Curva característica de la bomba.



Fuente: Ficha técnica bomba 1 Hp Evans [7].

Simulación Epanet 13. Caudal bombeado a los dos tanques en el software Epanet.



Luego, utilizando la hoja programa en Excel se obtienen las siguientes respuestas (ver Hoja de cálculo 7):

Hoja de cálculo 7. Curvas de bombeo En el software Excel.

Q1 INICIAL	0.002570824	m3/s
	2.571	Lps

Q1 Salida	0.0025708	m3/s
	2.571	Lps

HDT	7.413382262	m
------------	-------------	---

Q2	0.0012358	m3/s
	1.2358	Lps

φ1	Bomba -Nodo 1	1.5	pul
φ2	Nodo 1 - Tanque 1	1.5	pul
φ3	Nodo 2 - Tanque 2	1.124	pul

Q3	0.001335	m3/s
	1.3350	Lps

L1	Bomba -Nodo 1	0.6	m
L2	Nodo 1 - Tanque 1	5.8	m
L3	Nodo 1 - Tanque 2	9.5	m

Cota tanque 1	7	m
Cota tanque 2	5	m

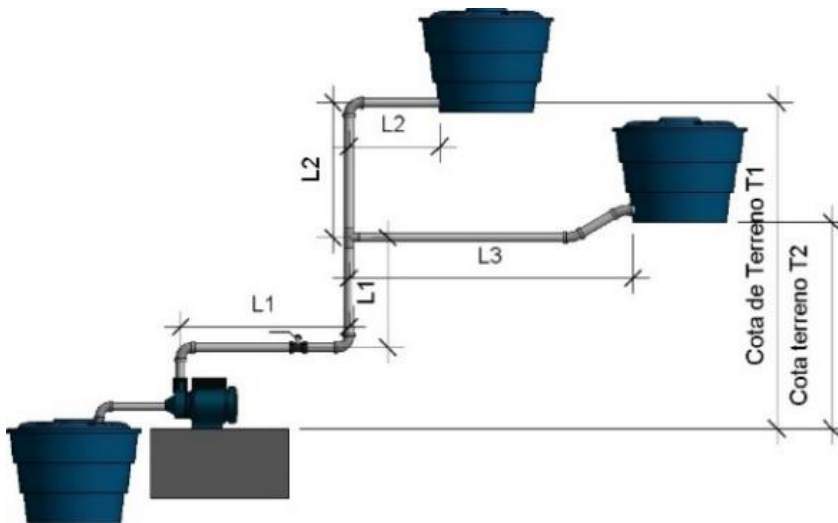
ITERACIÓN

Hfo	0.118	m
Hf1	0.295	m
Hf2	2.295	m
Po	7.295	m

Editar
No Editar

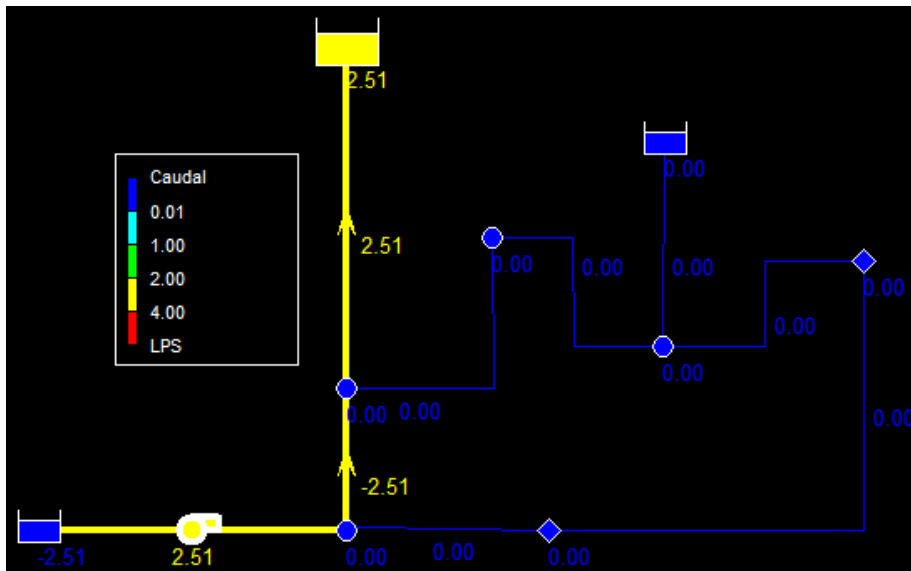
Para esta hoja de cálculo se aplicaron las ecuaciones de bombas donde se tiene el término (HDT) que representa la carga dinámica total dada por la bomba empleada, para este valor se asume un caudal de salida de la bomba, a este factor (HDT) se le restan las pérdidas presentes en la tubería que se encuentra instalada desde la salida de la bomba hasta el nodo de bifurcación, esto da como resultado la cota piezométrica en el nodo 1 (ver simulación Epanet 3), ahora a esta cota se le resta la cota de terreno de cada tanque lo cual da como resultado las pérdidas totales presentes en esos nodos (T_1 y T_2 ver ilustración 20), teniendo este valor de pérdidas y las dimensiones de la tubería se aplica la ecuación de Hazen-Williams donde la única incógnita será el caudal transportado en los tramos presentes desde el nodo 1 hasta los tanques (Q_2 y Q_3), para comprobar este resultado la suma del caudal 2 y caudal 3 debe ser igual al caudal asumido en la salida de la bomba.

Ilustración 20. Sistema bomba-tanques representado en el software Revit.

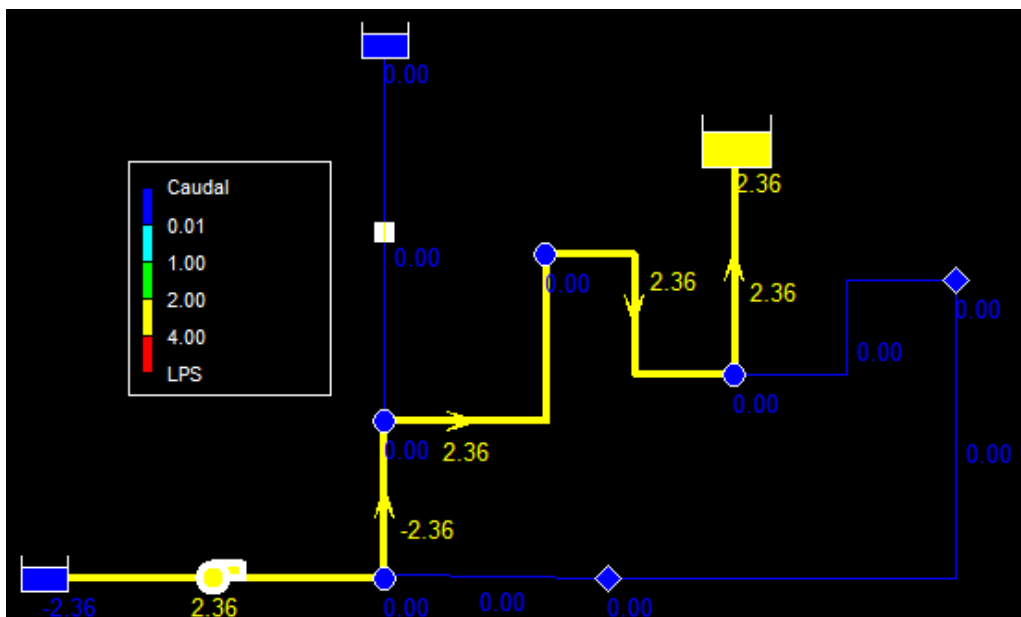


Para resolverlos los casos (b y c) se emplea el software Epanet y se tiene como resultado lo siguiente (ver simulación en Epanet 14 y 15).

Simulación Epanet 14. Caudal entrante al tanque superior.



Simulación Epanet 15. Resultados obtenidos del modelo planteado (ilustración 18) en el software Epanet.

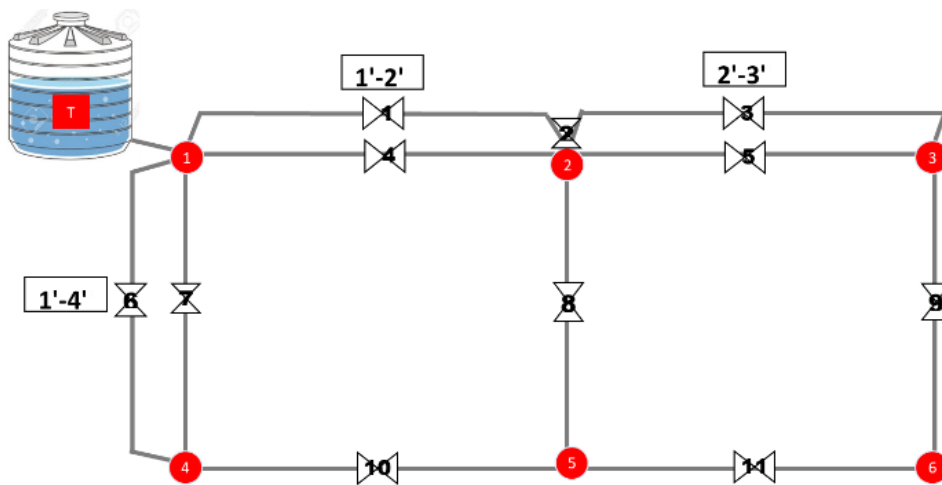


Anexo A2. Segundo Modelo.

1- Cuáles son los caudales en los nodos para los siguientes casos (ver ilustración 21):

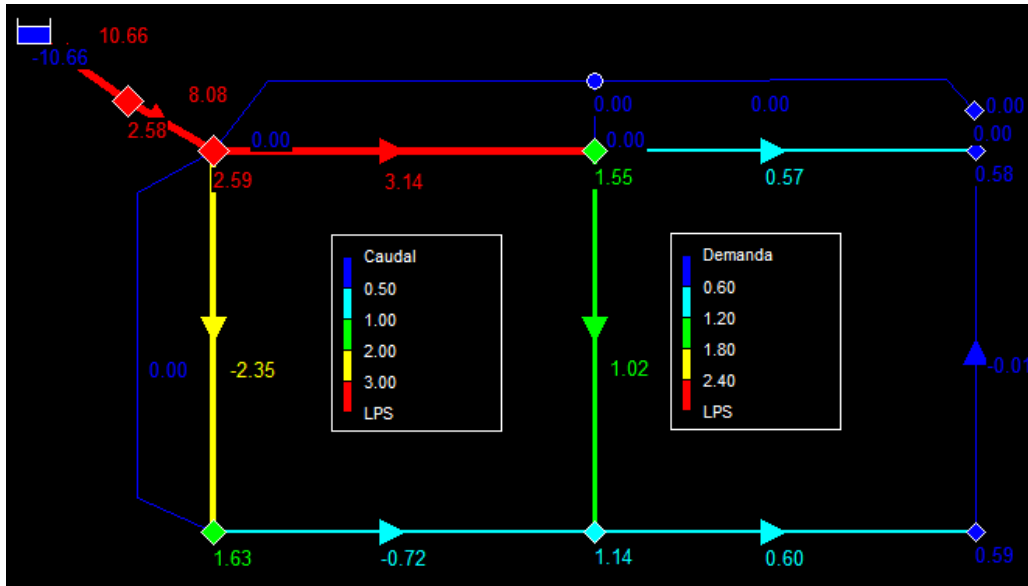
- Con la red sin utilizar los tramos de refuerzo (1'-4', 1'-2', 2'-3').
- Con la red utilizando los tramos de refuerzo (1'-4', 1'-2', 2'-3').

Ilustración 21. Representación del segundo modelo con los tramos de refuerzo.

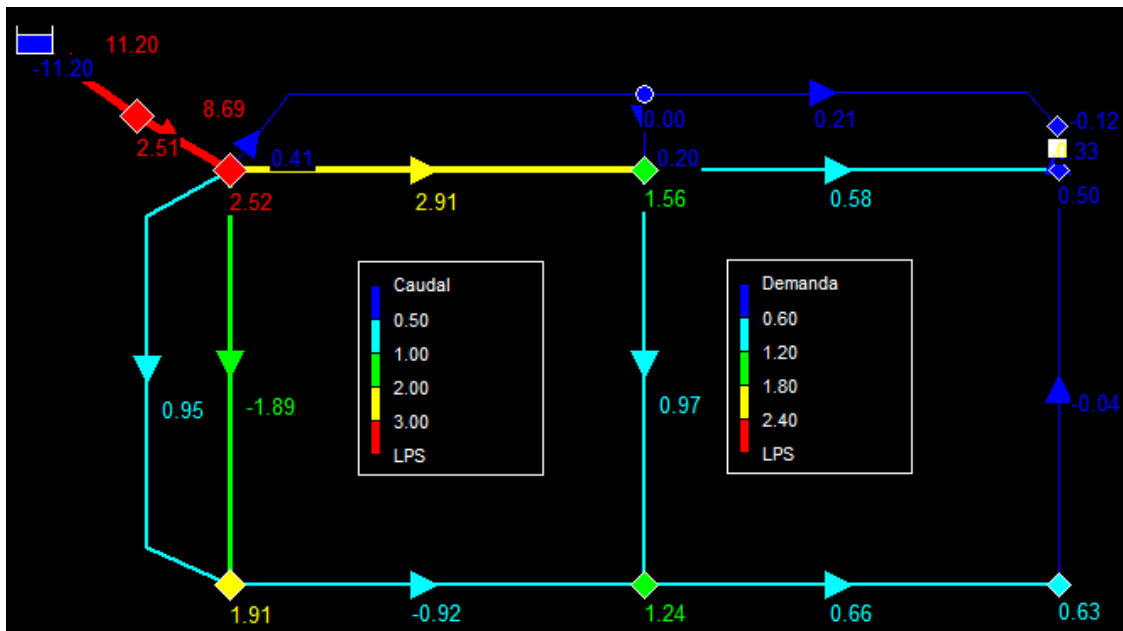


La solución a los incisos a y b se puede ver en las simulaciones 16 y 17 de Epanet respectivamente, donde el modelo es planteado y resuelto en el software Epanet.

Simulación Epanet 16. Segundo modelo desarrollado en el software Epanet sin los tramos de refuerzo.



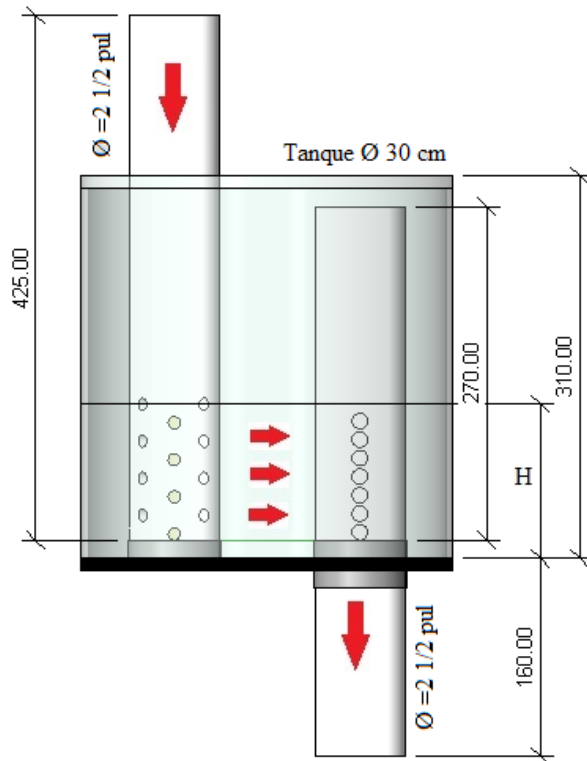
Simulación Epanet 17. Segundo modelo desarrollado en el software Epanet con los tramos de refuerzo.



Anexo B. Correlación que existe entre la altura (de agua) y el caudal, para el caudalímetro propuesto.

La unión que se observa en la figura (ver ilustración 22) no se encuentra soldada en la parte superior con el tubo de medición ya que esto facilita el cambio de tuberías de diferentes dimensiones de orificios, con el fin de poder medir diferentes rangos de caudales.

Ilustración 22. Flujo del agua en el caudalímetro.

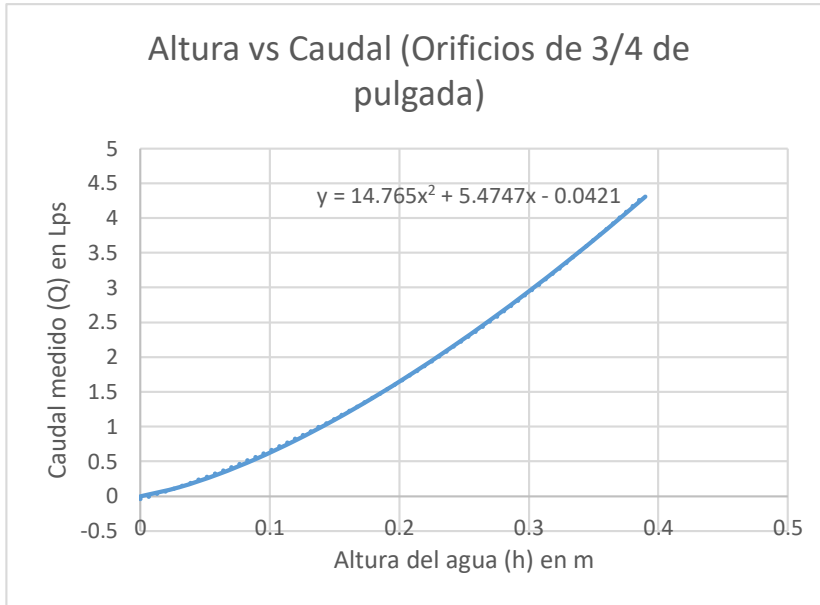


Caudal en orificios con diámetro de ¾ de pulgada

Tabla 1. Correlación altura vs caudal de ¾ de pulgada.

Diámetro	Separación		
0.75		Pul	
0.019	0.03	m	
H orificios (m)	Vel. orificios (m/s)	Q Orificio (Lps)	Q total (Lps)
0	0.00	0.00	0
0.03	0.46	0.13	0.13
0.06	0.65	0.19	0.32
0.09	0.80	0.23	0.54
0.12	0.92	0.26	0.81
0.15	1.03	0.29	1.10
0.18	1.13	0.32	1.42
0.21	1.22	0.35	1.77
0.24	1.30	0.37	2.14
0.27	1.38	0.39	2.53
0.3	1.46	0.41	2.95
0.33	1.53	0.44	3.38
0.36	1.59	0.45	3.84
0.39	1.66	0.47	4.31

Ilustración 23. Correlación altura vs caudal de ¾ de pulgada.



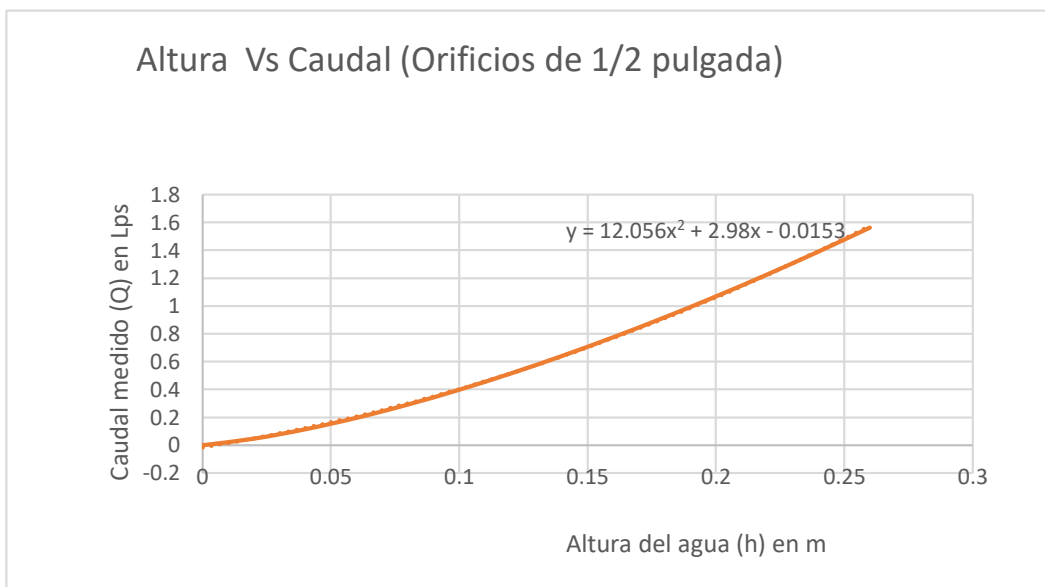
Caudal en orificios de ½ pulgada

Tabla 2. Correlación altura vs caudal orificios de 1/2 pulgada.

Diámetro	Separación		
0.5		Pul	
0.013	0.02	m	
H orificios (m)	Vel. orificios (m/s)	Q Orificio (Lps)	Q total (Lps)
0	0.00	0.00	0
0.02	0.38	0.05	0.05
0.04	0.53	0.07	0.11
0.06	0.65	0.08	0.20
0.08	0.75	0.10	0.29
0.1	0.84	0.11	0.40
0.12	0.92	0.12	0.52

0.14	0.99	0.13	0.64
0.16	1.06	0.13	0.78
0.18	1.13	0.14	0.92
0.2	1.19	0.15	1.07
0.22	1.25	0.16	1.23
0.24	1.30	0.16	1.39

Ilustración 24. Correlación altura vs caudal de ½ de pulgada.



Las curvas aquí presentadas son solo ejemplos ilustrativos, las curvas reales serán las utilizadas una vez construido y calibrado el modelo del caudalímetro, labor realizada en el laboratorio como práctica adicional comparando los resultados con las formas de cálculo aquí presentadas.

Anexo C. Planteamiento para la determinación de la variación del coeficiente de Hazen-Williams.

En relación a la fórmula de Hazen-Williams, de uso extendido, se postula que el coeficiente de pérdidas C_{HW} , es constante para un rango relativamente amplio de diámetros, se plantea la forma experimental de determinarlo y a partir de ahí y dada la formulación a continuación planteada, determinar el mismo para los diferentes diámetros [13].

De la teoría de diámetros equivalentes en paralelo se deriva que la relación de tuberías que transportan un determinado caudal entre dos depósitos, obedece a la expresión planteada en la ecuación (42).

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^{2.425} * \left[\frac{L_1}{L_2} \right]^{0.5405} \quad (42)$$

Una forma de verificar si esto es correcto es plantear algunos cálculos, de los cuales se puede obtener una mejor aproximación al uso de esta ecuación de la hidráulica de flujo a presión en tuberías.

Obsérvese el siguiente ejemplo desarrollado en Excel, que sin pretender dejar solucionado el tema en forma definitiva si arroja algunas luces que ayudaran en este aspecto de la hidráulica.

Observando un ejemplo tomado al azar,

Ilustración 25. Ejemplo de esquema utilizado.

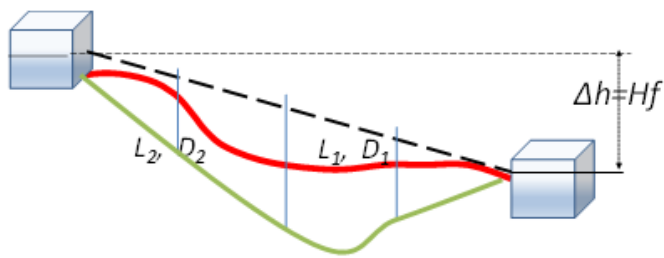


Tabla 3. Coeficiente C constante.

	D		Hf	L	hf	Q	NR	Vel
C_{Hw}	Pul	mts	mts	mts	m/m	Lps	-	m/s
120	24	0.61	140	6000	0.023	1196		4.10
120	3	0.08	140	6000	0.023	5.0	84285	1.11

Y el resultado del caudal Q_1 es de 7.716 según la tabla de cálculo 4.

Tabla 4. Caudales mediante tuberías paralelas ecuación 42.

Relación D_1/D_2	8
Relación L_1/D_2	1
$(D_1/D_2)^{2.425} \cdot (L_1/L_2)^{0.5405}$	154.9
Q	1202.8
Q_1	7.716
Q_2	1195
Verificación	1202.75

Sin embargo, según lo ya anotado en la tabla de cálculo Tabla 3 es 5.0 Lps, lo cual quiere decir que la ecuación de relación de caudales falla y eso solo puede atribuirse a que el valor de C_{Hw} no es constante como se postula normalmente, sino que de acuerdo a los principios hidráulicos conocidos guarda relación con el Numero de Reynolds (Nr). Al no eliminarse el C_{Hw} se plantea la expresión que muestra el valor de C_{Hw} relativos a diámetro y caudal (ecuación 43 y 44). Se concluye que el coeficiente no es constante y no puede ser eliminado en la ecuación correspondiente.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{C_1}{C_2} \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^{2.425} * \left[\frac{L_1}{L_2} \right]^{0.5405} \quad (43)$$

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^{2.425} * \left[\frac{L_1}{L_2} \right]^{0.5405} \quad (44)$$

Elaborando una serie de cálculos para que esta igualdad o diferencia entre la relación y el cálculo correcto se cumpla, debe encontrarse el coeficiente expresado entre las variables C_{HW} , obteniéndose los valores que aparecen en la siguiente tabla, y que ajustan el valor de los caudales para cumplir con la relación de igualdad. Debe estar presente en esa relación de caudales la relación de los coeficientes, que no se elimina por no ser constantes, y cuyos resultados se presentan en función de Nr en forma tabulada y gráfica. En el fondo la ecuación correcta no es la 1 sino la 2.

Utilizando la herramienta Buscar Objetivo cambiando o iterando el valor de (C_{HW} o C) a partir de la igualación de los caudales (diferentes inicialmente 5 vs. 7.7) se obtiene después de la respectiva iteración un valor de 183.1 para C_{HW} .

Tabla 5. Coeficiente C corregido.

	D		Hf	L	hf	Q	NR	Velocidad
C_{HW}	Pul	mts	mts	mts	m/m	Lps	-	m/s
120	24	0.61	140	6000	0.023	1196		4.10
183.18	3	0.08	140	6000	0.023	7.7	128661	1.69

Calculando para cada uno de los diámetros el valor de C_{HW} de tal forma que se ajuste a la ecuación correcta que incluye los valores de C_{HW} :

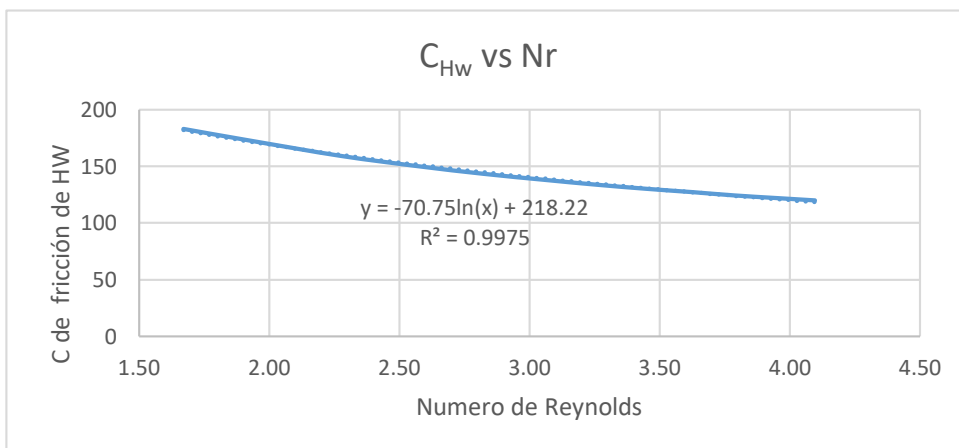
Los resultados se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Valores de Chw para diferentes diámetros.

c	D		Hf	L	hf	Q	NR	Vel
	Pul	mts	mts	mts	m/m	Lps		m/s
183.2	3	0.08	140	6000	0.023	7.6	127267	1.67
173.3	4	0.10	140	6000	0.023	15.5	194521	1.91
159.4	6	0.15	140	6000	0.023	41.5	346428	2.27
150.3	8	0.20	140	6000	0.023	83.3	522014	2.57
143.5	10	0.25	140	6000	0.023	143.0	716966	2.82
138.3	12	0.30	140	6000	0.023	222.6	930041	3.05
133.9	14	0.36	140	6000	0.023	323.3	1157594	3.26
130.3	16	0.41	140	6000	0.023	447.0	1400307	3.45
127.3	18	0.46	140	6000	0.023	595.2	1657543	3.63
124.4	20	0.51	140	6000	0.023	767.3	1923192	3.79
122.1	22	0.56	140	6000	0.023	967.6	2204809	3.95
120	24	0.61	140	6000	0.023	1195.5	2496988	4.10

La ilustración 26 representa los valores de C_{HW} en función de los Nr variando los diámetros y caudales para un mismo gradiente de energía disponible (en este caso 2.33%). Es necesario decir que al variar el valor de gradiente los valores de Nr también cambiarían y no se puede en consecuencia generalizar la expresión. Este último aspecto fue revisado con los cambios específicos en la hoja de cálculo y los resultados no incidieron en los valores relativos de C_{HW1} con respecto a C_{HW2} .

Ilustración 26. Correlación entre C y Nr.



Anexo D. Presupuesto primer modelo y mano de obra.

Dentro de este anexo esta presentado el presupuesto requerido para la elaboración del primer modelo expuesto en el documento, incluye los materiales necesarios y la mano de obra, las cantidades aquí presentadas son tomadas del modelo creado en el software Revit y los valores unitarios tomados de distribuidores como Pavco [12], Evans [9] y Amazon.

Tabla 7 Precios de mano de obra y los materiales para la construcción del primer modelo. Elaboración propia.

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 25.4 mmø - (1 pul)	Metros	13	\$ 4,453	\$ 57,885
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 31.75 mmø - (1 1/4 pul)	Metros	3	\$ 8,020	\$ 20,050
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Metros	16	\$ 10,472	\$ 167,552
Tubería para desagüe 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Metros	6	\$ 9,000	\$ 54,000
Tubería para desagüe 50.8mmø -(2 pul)	Metros	2	\$ 11,159	\$ 22,318
Tubería para desagüe 63.5 mmø -(2 1/2 pul)	Metros	15	\$ 25,833	\$ 387,495
Válvula check horizontal-vertical en Bronce 63.5 mmø -(2 1/2 pul)	Unidad	2	\$ 49,000	\$ 98,000
Válvula Bola 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	3	\$ 14,912	\$ 44,736
Válvula Bola 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Unidad	3	\$ 26,845	\$ 80,535
Válvula Bola 50.8 mmø -(2 pul)	Unidad	4	\$ 40,806	\$ 163,224
Codo de 90 grados 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	17	\$ 1,860	\$ 31,620
Codo de 90 grados 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Unidad	2	\$ 6,674	\$ 13,348
Codo de 45 grados 38.1 mmø -(1 1/2 pul) desagüe	Unidad	13	\$ 3,017	\$ 39,221
Codo de 45 grados 80 mmø -(3 pul) desagüe	Unidad	8	\$ 7,866	\$ 62,928
Bujes Soldados 31.75 mmø (1 1/4 pul) - 25.4 mmø (1 pul)	Unidad	4	\$ 2,202	\$ 8,808

Bujes Soldados 38.1 mmø (1 1/2 pul) - 25.4 mmø (1 pul)	Unidad	9	\$ 3,597	\$ 32,373
Bujes Soldados- (sanitarios - desagüe) 38.1 mmø (1 1/2 pul) - 31.75 mmø (1 1/4 pul)	Unidad	2	\$ 3,597	\$ 7,194
Bujes Soldados-50.8 mmø (2 pul) - 25.4 mmø (1/2 pul)	Unidad	1	\$ 5,196	\$ 5,196
Bujes Soldados-(sanitarios-desagüe) 50.8 mmø (2 pul) - 38.1 mmø (1 1/2 pul)	Unidad	5	\$ 2,392	\$ 11,960
Bujes Soldados (sanitarios-desagüe) 80 mmø (3 pul) - 50.8 mmø (2 pul)	Unidad	3	\$ 5,192	\$ 15,576
Tees 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	2	\$ 2,589	\$ 5,178
Tees 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Unidad	8	\$ 8,776	\$ 70,208
Yees sanitarias 50.4 mmø -(2 pul)	Unidad	3	\$ 7,014	\$ 21,042
Yees sanitarias 80 mmø -(3 pul)	Unidad	3	\$ 14,400	\$ 43,200
Bomba 25.4 mmø -(1 pul succión)-25.4 mmø -(1 pul impulsión)	Unidad	1	\$ 527,000	\$ 527,000
Limpiador removedor 760 gr	Unidad	1	\$ 45,447	\$ 45,447
Soldamax pvc LOW VOC 1/8 Gal	Unidad	1	\$ 48,704	\$ 48,704
Cinta Sellante Premium para roscas 12mmx12m	Unidad	2	\$ 2,233	\$ 4,466
Tanque Acrílico 40 cmø x 50 cm alto	Unidad	2	\$ 250,000	\$ 500,000
Manómetros (3600 psi) 6.35 mmø - (1/4 pul)	Unidad	5	\$ 236,000	\$ 1,180,000
Rotámetros 25.4 mmø -(1 pul)	Unidad	5	\$ 406,696	\$ 2,033,480
			\$	\$
			COSTO	5,802,744

Tabla 8. Mano de obra para la construcción de los modelos.

MANO DE OBRA		
Nombre	Oficial (Plomero)	Ayudante
Precio parcial mes	\$ 1,500,000.00	\$ 980,657.00
Días trabajo/mes	20	20
Jornal parcial	\$ 75,000.00	\$ 49,032.85
Factor prestacional	0.85	0.85
Precio mes total	\$ 2,775,000.00	\$ 1,814,215.45
Jornal total	\$ 138,750.00	\$ 90,710.77
Valor hora	\$ 17,343.75	\$ 11,338.85
Tiempo a trabajar (meses)	0.5	0.5
Total, Valor	1387500	907107.725
COSTO	\$ 2,294,608	

COSTO TOTAL	\$ 8,097,351
--------------------	---------------------

Anexo E. Presupuesto segundo modelo.

Este anexo contiene el presupuesto de los materiales requeridos para la construcción del segundo modelo descrito en el documento, las cantidades aquí presentadas son tomadas del modelo creado en el software Revit y los valores unitarios tomados de distribuidores como Pavco [12] y Amazon.

Tabla 9 Precios de los materiales para la construcción del segundo modelo.

NOMBRE	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Tubo (RDE 9 - 500 psi) 12.7 mmø - (1/2 pul)	Metros	21	\$ 3,589	\$ 75,362
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 19.08 mmø - (3/4 pul)	Metros	20	\$ 3,173	\$ 63,546
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 25.4 mmø - (1 pul)	Metros	47	\$ 4,453	\$ 209,275
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 31.75 mmø - (1 1/4 pul)	Metros	11	\$ 8,020	\$ 88,222
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Metros	13	\$ 10,472	\$ 136,138
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 50.8 mmø -(2 pul)	Metros	4	\$ 16,059	\$ 64,236
Tubo (RDE 21 - 200 psi) 63.5 mmø -(2 1/2 pul)	Metros	10	\$ 26,026	\$ 260,255
Tubo (Sanitario - Desagüe) 76.2 mmø - (3 pul)	Metros	59	\$ 16,668	\$ 983,383
Válvula Bola 12.7 mmø - (1/2 pul)	Unidad	3	\$ 8,052	\$ 24,156
Válvula Bola 19.08 mmø - (3/4 pul)	Unidad	3	\$ 11,125	\$ 33,375
Válvula Bola 25.4 mmø -(1 pul)	Unidad	4	\$ 14,912	\$ 59,648
Válvula Bola 31.75 mmø -(1 pul)	Unidad	1	\$ 18,689	\$ 18,689
Válvula Bola 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Unidad	9	\$ 26,845	\$ 241,605
Válvula Bola 50.8 mmø -(2 pul)	Unidad	2	\$ 40,806	\$ 81,612
Codo (Sanitario - Desagüe) de 45 grados 76.2 mmø - (3 pul)	Unidad	1	\$ 7,866	\$ 7,866
Codo de 90 grados 12.7 mmø - (1/2 pul)	Unidad	2	\$ 595	\$ 1,190
Codo de 90 grados 19.04 mmø - (3/4 pul)	Unidad	2	\$ 1,570	\$ 3,140
Codo de 90 grados 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	4	\$ 1,860	\$ 7,440
Codo de 90 grados 63.5 mmø -(2 1/2 pul)	Unidad	2	\$ 31,497	\$ 62,994

Codo (Sanitario - Desagüe) de 90 grados 76.2 mmø -(3 pul)	Unidad	8	\$ 7,082	\$ 56,656
Tapones Soldados 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	2	\$ 1,139	\$ 2,278
Tapones Soldados 38.1 mmø - (1 1/2 pul)	Unidad	6	\$ 3,569	\$ 21,414
Tapones Soldados 50.8 mmø - (2 pul)	Unidad	1	\$ 5,672	\$ 5,672
Bujes Soldados 19.05 mmø (3/4 pul) - 12.7 mmø (1/2 pul)	Unidad	5	\$ 576	\$ 2,880
Bujes Soldados 25.4 mmø (1 pul) - 12.7 mmø (1/2 pul)	Unidad	7	\$ 1,146	\$ 8,022
Bujes Soldados 25.4 mmø (1 pul) - 19.05 mmø (3/4 pul)	Unidad	1	\$ 1,146	\$ 1,146
Bujes Soldados 31.75 mmø (1 1/4 pul) - 25.4 mmø (1 pul)	Unidad	3	\$ 2,202	\$ 6,606
Bujes Soldados 38.1 mmø (1 1/2 pul) - 19.05 mmø (3/4 pul)	Unidad	3	\$ 3,397	\$ 10,191
Bujes Soldados 38.1 mmø (1 1/2 pul) - 25.4 mmø (1 pul)	Unidad	7	\$ 3,397	\$ 23,779
Bujes Soldados 38.1 mmø (1 1/2 pul) - 31.75 mmø (1 1/4 pul)	Unidad	2	\$ 3,397	\$ 6,794
Bujes Soldados 50.8 mmø (2 pul) - 38.1 mmø (1 1/2 pul)	Unidad	2	\$ 5,196	\$ 10,392
Bujes Soldados 50.8 mmø (2 pul) - 25.4 mmø (1 pul)	Unidad	1	\$ 5,196	\$ 5,196
Bujes Soldados 63.5 mmø (2 1/2 pul) - 38.1 mmø (1 1/2 pul)	Unidad	6	\$ 13,031	\$ 78,186
Bujes Soldados 63.5 mmø (2 1/2 pul) - 50.8 mmø (2 pul)	Unidad	3	\$ 12,238	\$ 36,714
Bujes Soldados (Sanitario - Desagüe) 76.2 mmø (3 pul) - 63.5 mmø (2 1/2 pul)	Unidad	8	\$ 18,710	\$ 149,680
Tees 19.08 mmø - (3/4 pul)	Unidad	3	\$ 1,324	\$ 3,972
Tees 25.4 mmø - (1 pul)	Unidad	6	\$ 2,589	\$ 15,534
Tees 31.75 mmø - (1 1/4 pul)	Unidad	3	\$ 6,685	\$ 20,055
Tees 38.1 mmø -(1 1/2 pul)	Unidad	10	\$ 8,776	\$ 87,760
Tees 50.8 mmø - (2 pul)	Unidad	3	\$ 13,974	\$ 41,922
Tees (Sanitario - Desagüe) 76.2 mmø - (3 pul)	Unidad	6	\$ 7,827	\$ 46,962
Yees (Sanitario - Desagüe) 76.2 mmø - (3 pul)	Unidad	1	\$ 14,407	\$ 14,407
Limpiador removedor 760 gr	Unidad	1	\$ 45,447	\$ 45,447
Soldamax pvc LOW VOC 1/8 Gal	Unidad	1	\$ 48,704	\$ 48,704

Cinta Sellante Premium para roscas 12mmx12m	Unidad	2	\$ 2,233	\$ 4,466
Manómetros (3600 psi)	Unidad	8	\$ 236,000	\$ 1,888,000
Caudalímetro (Tanque Acrílico 30 cmø x 35 cm alto)	Unidad	8	\$ 250,000	\$ 2,000,000
Mano de obra (Explicada en la tabla 8)	-	-	-	\$ 2,294,608
			COSTO TOTAL	\$ 9,359,575