



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A  
ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**

**Selvin Mahomed Fuentes Vásquez**

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A  
ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**SELVIN MAHOMED FUENTES VASQUEZ**

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

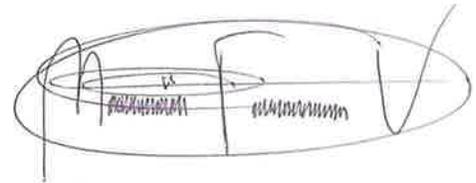
DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Fernando Amílcar Boiton Velásquez
EXAMINADOR	Ing. Claudio César Castañón Contreras
EXAMINADOR	Ing. Marco Antonio García Díaz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 16 abril de 2012.

A handwritten signature in black ink, enclosed within a hand-drawn oval border. The signature is cursive and appears to read 'Selvin Mahomed Fuentes Vásquez'.

**Selvin Mahomed Fuentes Vásquez**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 6 de noviembre de 2013

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Selvin Mahomed Fuentes Vásquez, quien se identifica con carné No. 2006-11119, titulado CONSTRUCCION Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A ESCALA DE CONDUCCION DE AGUA POTABLE, después de haber hecho las correcciones necesarias lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

*"ID y Enseñad a Todos"*

LUIS M SANDOVAL MENDOZA

INGENIERO CIVIL

Colegiado No. 6496

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496



**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala,  
25 de febrero de 2014

Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director Escuela Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos

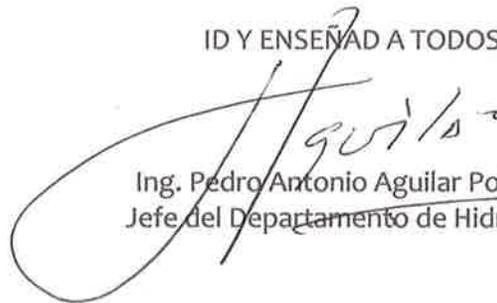
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Selvin Mahomed Fuentes Vásquez, quien contó con la asesoría del Ing. Msc. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y representa un aporte para el departamento y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Selvin Mahomed Fuentes Vásquez, titulado **CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, marzo 2014.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **CONSTRUCCIÓN Y APLICACIÓN DE UN SISTEMA A ESCALA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE**, presentado por el estudiante universitario: **Selvin Mahomed Fuentes Vásquez** autoriza la impresión del mismo.

**IMPRÍMASE.**

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
Decano



Guatemala, marzo de 2014

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Mis padres** José Ernesto Fuentes Jordán y Liana Nicté Vásquez Paz, por darme la vida, por su dedicación, apoyo, paciencia y amor. Infinitas gracias por todo, este triunfo es de ustedes.
- Mis hermanos** Luddyn Adolfo y Willy Ariel Fuentes Vásquez, por ser parte importante en mi vida y apoyarme siempre.
- Mis tíos** Estuardo, Mahomed, Samara y Mayary Vásquez Paz, por el apoyo y el cariño, que Dios los siga bendiciendo.
- Mis amigos** Por el apoyo y amistad brindada en todo momento.
- Mi familia** Por todo el cariño y apoyo durante mi vida y a lo largo de mi carrera.
- Mis compañeros** Por el apoyo brindado en mi carrera y su amistad.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Dios</b>	Por ser creador, darme la vida y fuerza a lo largo de mi carrera.
<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por ser mi casa de estudios y los momentos vividos en ella.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por formarme académicamente, en especial a la Escuela de Ingeniería Civil.
<b>Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza</b>	Por su amistad y asesoría para el presente trabajo de graduación.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Por su apoyo durante mi carrera.
<b>Todas las personas</b>	Por brindarme la ayuda para la elaboración del presente trabajo de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XI
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1.    CONCEPTOS BÁSICOS DE FLUIDOS .....	1
1.1.    Ecuación de la energía o ecuación de Bernoulli.....	1
1.2.    Líneas de carga total y carga piezométrica .....	5
1.3.    Pérdidas de carga .....	7
1.4.    Flujo laminar y flujo turbulento.....	8
1.5.    Fórmulas para el cálculo de la pérdida de energía.....	12
1.5.1.    Fórmula de Darcy-Weisbach .....	12
1.5.2.    Fórmula de Hazen-Williams.....	16
1.6.    Pérdidas de energía en accesorios .....	17
1.7.    Ejemplo de aplicación.....	19
2.    SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE FLUJO EN TUBERÍAS.....	23
2.1.    Tipos de sistemas de conducción de flujo en tuberías .....	23
2.1.1.    Líneas por gravedad.....	23
2.1.2.    Líneas por bombeo.....	25
2.1.2.1.    Sobrepresión por golpe de ariete en sistemas de bombeo.....	28
2.1.2.2.    Medidas generales para verificar el golpe de ariete .....	29

2.2.	Obras de arte utilizadas en una línea de conducción por gravedad .....	31
2.2.1.	Caja rompepresión .....	31
2.2.2.	Pasos aéreos y de zanjones .....	34
2.2.3.	Caja distribuidora de caudal .....	35
2.2.4.	Cajas unificadoras de caudal .....	36
2.2.5.	Cajas para válvulas .....	37
2.2.6.	Ejemplo de diseño de obras de arte .....	38
2.3.	Válvulas.....	42
2.3.1.	De aire.....	43
2.3.2.	De limpieza.....	45
2.3.3.	De compuerta.....	46
2.3.4.	De alivio.....	47
2.3.5.	De globo .....	48
2.3.6.	De retención.....	49
2.3.7.	De cuadro.....	50
2.3.8.	De bola.....	51
3.	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD.....	53
3.1.	Construcción de un sistema de conducción por gravedad .....	53
3.1.1.	Dimensionamiento.....	54
3.1.2.	Ubicación de las obras de arte .....	57
3.2.	Aplicación del modelo en los distintos sistemas de conducción y deducción de la fórmula experimental para el cálculo de las pérdidas de energía.....	58
3.2.1.	Conducción por gravedad .....	58
3.2.2.	Conducción por gravedad con sifón .....	64
3.2.3.	Conducción con caja rompepresión intermedia.....	72
3.2.4.	Calibración de la caja distribuidora de caudales .....	79

3.2.5.	Conducción con caja distribuidora de caudales.....	96
3.3.	Instructivo para la operación del modelo de línea de conducción .....	105
3.3.1.	Conducción por gravedad simple .....	105
3.3.2.	Conducción por gravedad con sifón invertido .....	105
3.3.3.	Conducción con caja rompepresión intermedia ....	106
3.3.4.	Conducción con caja distribuidora de caudales....	107
CONCLUSIONES .....		109
RECOMENDACIONES .....		111
BIBLIOGRAFÍA .....		113



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1.	Energía de flujo. ....	1
2.	Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga total.....	4
3.	Línea de energía o carga total y línea piezométrica.....	6
4.	Inyección de tinta para flujo laminar, de transición y turbulento. ....	9
5.	Experimento real de inyección de tinta en tubería. ....	10
6.	Rugosidad de pared de conducto (exagerada). ....	14
7.	Diagrama de Moody. ....	15
8.	Pérdida de energía en un accesorio (válvula). ....	19
9.	Esquema de problema de aplicación. ....	20
10.	Esquema de una línea de conducción por gravedad. ....	25
11.	Conducción forzada en un sistema de bombeo. ....	27
12.	Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula: $c$ es la velocidad de propagación de la onda y $v$ la velocidad del fluido. La tubería se dilata (o se contrae) al avanzar la onda de presión.....	29
13.	Pozo de oscilación.....	30
14.	Cámara de aire comprimido. ....	30
15.	Línea piezométrica sin colocar caja rompedpresión. ....	31
16.	Línea piezométrica al colocar caja rompedpresión. ....	32
17.	Planta y corte de una caja rompedpresión. ....	33
18.	Construcción de caja rompedpresión en Perú. ....	33
19.	Paso aéreo en un río.....	34
20.	Paso de zanjón. ....	35

21.	Planta y corte de una caja distribuidora de caudales.....	36
22.	Planta de una caja unificadora de caudales. ....	37
23.	Caja para una válvula de compuerta. ....	37
24.	Cotas de línea de conducción de agua en problema de aplicación. ....	38
25.	Cota de colocación de la caja rompresión en problema de aplicación.....	39
26.	Línea de presiones y cotas piezométricas en problema de aplicación.....	42
27.	Ubicación de la válvula de aire o ventosa y detalle de la válvula.....	44
28.	Sección de válvula de aire. ....	44
29.	Ubicación de la válvula de limpieza. ....	45
30.	Válvula de limpieza. ....	46
31.	Válvula de compuerta. ....	47
32.	Válvula de compuerta de acero inoxidable. ....	47
33.	Válvula de alivio.....	48
34.	Válvula de globo. ....	49
35.	Válvula de retención. ....	50
36.	Válvula de cuadro. ....	51
37.	Válvula de bola. ....	52
38.	Dimensionamiento del sistema de tuberías completo (medidas en metros) .....	55
39.	Planta y sección de caja distribuidora de caudales (medidas en centímetros).....	55
40.	Tanque elevado y caja distribuidora de caudales. ....	56
41.	Tanque inferior y caja distribuidora con sifón invertido. ....	56
42.	Vista de la caja distribuidora de caudales.....	57
43.	Válvula reguladora de sistema a escala de conducción. ....	58
44.	Esquema de conducción por gravedad simple. ....	59
45.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2.....	60

46.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3. ....	60
47.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 3-4. ....	61
48.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía con la pérdida total contra la energía cinética. ....	61
49.	Gráfica de comparación de caudales. ....	63
50.	Línea piezométrica en conducción simple. ....	64
51.	Esquema de conducción por gravedad con sifón. ....	65
52.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2. ....	66
53.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3. ....	67
54.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 3-4. ....	67
55.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 4-5. ....	68
56.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 5-6. ....	68
57.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía con la pérdida total contra la ecuación cinética. ....	69
58.	Comparación del caudal observado y el generado. ....	71
59.	Línea piezométrica de conducción con sifón. ....	71
60.	Esquema de la conducción por gravedad con caja rompepresión intermedia. ....	72
61.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2. ....	73
62.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3. ....	74
63.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo CRP-4. ....	74
64.	Pérdida de energía contra energía cinética tramo 4-5. ....	75
65.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo 1-3. ...	75
66.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo CRP-5. ....	77
67.	Comparación de los caudales observado y los generados en el tramo 1-3 y CRP-5. ....	78
68.	Línea piezométrica en la conducción con caja rompepresión. ....	79
69.	Vista lateral de caja distribuidora de caudales. ....	80

70.	Vista en planta de caja distribuidora de caudales. ....	80
71.	Vista de vertederos en caja distribuidora de caudales. ....	81
72.	Cierre de válvula reguladora. ....	81
73.	Llenado de tanque inferior. ....	82
74.	Rebalse del sistema. ....	82
75.	Piezómetro de caja distribuidora de caudales. ....	83
76.	Válvulas de las tuberías que salen de vertederos. ....	84
77.	Válvula reguladora que se encuentra antes de la caja. ....	84
78.	Tabla de piezómetros del sistema de conducción. ....	85
79.	Aforo volumétrico con recipiente de 3 lts. ....	86
80.	Variación del tirante de agua que cae en un vertedero. ....	87
81.	Datos y cálculos de la calibración de la caja distribuidora de caudales, vertedero de 45°. ....	88
82.	Curva de descarga para el vertedero de 45° para caudal teórico y observado. ....	89
83.	Correlación entre el caudal real y el caudal teórico. ....	89
84.	Comparación de caudal real observado, con ecuación experimental y ecuación corregida. ....	91
85.	Curva de descarga para el vertedero de 30° para caudal teórico y observado. ....	92
86.	Correlación entre el caudal real y el caudal teórico. ....	93
87.	Comparación de caudal real observado, con ecuación experimental y ecuación corregida. ....	95
88.	Esquema de conducción con caja distribuidora de caudales. ....	96
89.	Pérdida de energía en tramo 1-2 contra energía cinética en tramo 1-3. ....	98
90.	Pérdida de energía en tramo 2-3 contra energía cinética en tramo 1-3. ....	98

91.	Pérdida de energía en tramo crp-4 contra energía cinética en tramo crp-5.....	99
92.	Pérdida de energía en tramo 4-5 contra energía cinética en tramo crp-5. ....	99
93.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo 1-3..	100
94.	Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo crp-5. ....	101
95.	Comparación de caudales observado, generado en vertederos y con ecuación deducida.....	103
96.	Comparación de caudales observado y generado con vertedero y ecuación deducida. ....	104
97.	Línea piezométrica en conducción con una caja distribuidora de caudales.....	104

## TABLAS

I.	Valores de diseño de la rugosidad de tubería. ....	14
II.	Datos y cálculos en la conducción por gravedad simple. ....	59
III.	Comparación de caudales.....	63
IV.	Datos y cálculos de la conducción por gravedad con sifón. ....	65
V.	Comparación de caudales.....	70
VI.	Datos y cálculos de la conducción con caja rompepresión. ....	73
VII.	Comparación de caudal observado, con ecuación experimental y ecuación corregida.....	90
VIII.	Datos y cálculos de la calibración de la caja distribuidora de caudales para el vertedero de 30° .....	92
IX.	Comparación de caudal observado, con ecuación experimental y con ecuación corregida. ....	94
X.	Datos y cálculos de conducción con caja distribuidora de caudales. ...	97

XI.	Comparación de caudales observados y generados con vertederos y ecuación deducida en el tramo 1-3. ....	102
XII.	Comparación de caudales observado y generado con vertedero y ecuación deducida en vertedero de 30° en el tramo de CRP-5. ....	103

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>g</b>	Aceleración de la gravedad
<b>h</b>	Altura de carga, altura o carga de presión
<b>A</b>	Área
<b>CDT</b>	Carga dinámica total
<b>CE</b>	Carga estática
<b>Q</b>	Caudal
<b><i>f</i></b>	Coefficiente de fricción de Darcy
<b>c</b>	Coefficiente de Hazen-Williams
<b>R</b>	Correlación lineal
<b>D</b>	Diámetro
<b>Ec</b>	Energía cinética
<b>L</b>	Longitud
<b>Re</b>	Número de Reynolds
<b>Hf,hf</b>	Pérdida de carga (head friction, por siglas en ingles)
<b>Π</b>	Pi
<b>t</b>	Tiempo
<b>V</b>	Velocidad, volumen



## GLOSARIO

<b>Aforo</b>	Medición de la cantidad de fluido en determinado tiempo.
<b>Carga</b>	Es una elevación de superficie del fluido, expresada en unidades de longitud.
<b>Caudal</b>	Cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.
<b>Coeficiente</b>	Factor multiplicativo vinculado a ciertos elementos matemáticos.
<b>Diámetro</b>	Línea recta que pasa por el centro del círculo y termina en ambos extremos de la circunferencia.
<b>Energía cinética</b>	Energía que posee un fluido debido a la velocidad.
<b>Fluido</b>	Sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una sollicitación o tensión tangencial, sin importar la longitud de ésta.
<b>Flujo</b>	Movimiento de una sustancia líquida o gaseosa.

<b>Ingeniería</b>	Aplicación de los conocimientos científicos a la invención, perfeccionamiento y utilización de técnica industrial en todas las ramas.
<b>Piezómetro</b>	Instrumento que mide la presión de un fluido en un punto.
<b>Presión</b>	Magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie.
<b>Teorema de Bernoulli</b>	Energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme que permanece constante a lo largo de la trayectoria.
<b>Tirante</b>	Altura de la superficie libre que alcanza un fluido estático o dinámico.
<b>Válvula</b>	Dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza móvil que abre, cierra u obstruye en forma parcial o total uno o más orificios o conductos.
<b>Vertedero</b>	Estructura hidráulica destinada a permitir el paso libre o controlado, de un fluido.
<b>Volumen</b>	Cantidad de espacio que ocupa un cuerpo.

## RESUMEN

Ante la importancia para el estudiante de ingeniería civil del conocimiento y la visualización real de un sistema de conducción de agua, en este trabajo de graduación se presentan los componentes y las distintas obras de arte que contiene y facilitan la conducción.

Se construyó un modelo a escala de una conducción de agua potable real y las obras de arte. Se realizaron cuatro diferentes ensayos: conducción por gravedad simple, conducción con sifón invertido, con caja rompepresión intermedia y con caja distribuidora de caudales. Estos prototipos sirven para determinar ecuaciones deducidas a partir de los resultados observados, comparándolos con resultados teóricos y generados a través de gráficas y ecuaciones para los diferentes ensayos de cada modelo.

En el análisis del modelo de la caja rompepresión se tomaron los dos tramos del sistema por separado y se analizaron de igual manera; en los cuales se compararon caudales generados en los dos tramos con los caudales reales observados.

Se calibró la caja distribuidora de caudales para cada uno de los vertederos, uno de  $30^\circ$  y uno de  $45^\circ$  de abertura, obteniendo una ecuación deducida para cada uno de ellos. Además se compararon los resultados con las fórmulas teóricas encontradas para vertederos de pared delgada.



# OBJETIVOS

## General

Construir un modelo de un sistema de conducción de agua, que contenga las obras de arte básicas que permitan observar el funcionamiento de un sistema real.

## Específicos

1. Diseñar una caja rompepresión y una caja distribuidora de caudales y analizar el comportamiento de las mismas.
2. Comparar los resultados de las ecuaciones teóricas, con presiones, caudales y resultados observados mediante los ensayos realizados en el modelo.
3. Corroborar por medio de los ensayos y análisis realizados que los modelos propuestos cumplan con las expectativas deseadas y sean seguros para la utilización.
4. Elaborar un manual técnico en donde se encuentre toda la información necesaria para el diseño, uso, funcionamiento, etc., de sistemas de conducción de agua potable.



## INTRODUCCIÓN

En el Área de Ingeniería Sanitaria e Hidráulica se estudia el funcionamiento de un sistema de tuberías para conducir agua potable por gravedad; un medio muy común de llevar agua a comunidades y otros lugares dada la topografía accidentada del país.

Un sistema de conducción de agua potable por gravedad es un conjunto de estructuras para llevar el agua desde la captación de la misma hasta el tanque de almacenamiento. Se dice sistema por gravedad porque el agua cae por el propio peso, desde la captación al reservorio y de allí a las conexiones domiciliarias.

Un sistema de conducción está compuesto de tuberías, válvulas y algunas estructuras llamadas obras de arte, los cuales sirven para el control y manejo adecuado en la conducción de flujo de agua del mismo sistema. Cada componente desempeña una función, la cual necesita de un diseño hidráulico.

Si se pretende suministrar agua potable a una comunidad se requiere llevar a cabo una serie de obras hidráulicas para la captación, el sistema de purificación y desinfección del agua, la conducción, el almacenamiento y la distribución.

El trabajo de graduación “Construcción y aplicación de un sistema a escala de conducción de agua potable” pretende crear un modelo a escala de un sistema de conducción típico, en donde se muestren las diferentes obras de arte básicas que lo compongan.



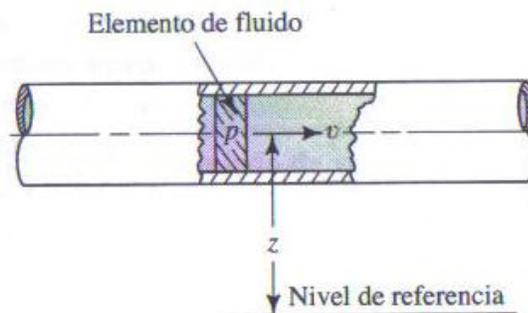
# 1. CONCEPTOS BÁSICOS DE FLUIDOS

## 1.1. Ecuación de la energía o ecuación de Bernoulli

La ecuación de la energía también denominada ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli, expuesta por Daniel Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido en movimiento en un conducto o tubería. Describe un fluido ideal en un conducto cerrado, en el que la energía permanece constante a lo largo del recorrido y consta de tres componentes o tipos de energía:

- Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.
- Energía de presión o de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.
- Potencial o gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.

Figura 1. **Energía de flujo**



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 166.

A continuación se presenta la ecuación de Bernoulli con los términos correspondientes expresada en longitudes:

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma} + Z = \text{constante}$$

Donde intervienen los parámetros siguientes:

V = velocidad del fluido en la sección considerada

$\gamma$  = peso específico del fluido

P = presión a lo largo de la línea de corriente

g = aceleración de la gravedad

Z = altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia

La ecuación de Bernoulli toma en cuenta los cambios de elevación, carga de presión y carga de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no hay pérdidas o adiciones de energía entre los dos puntos, por lo que la carga permanece constante. Por lo tanto, se deben tomar en cuenta los siguientes supuestos:

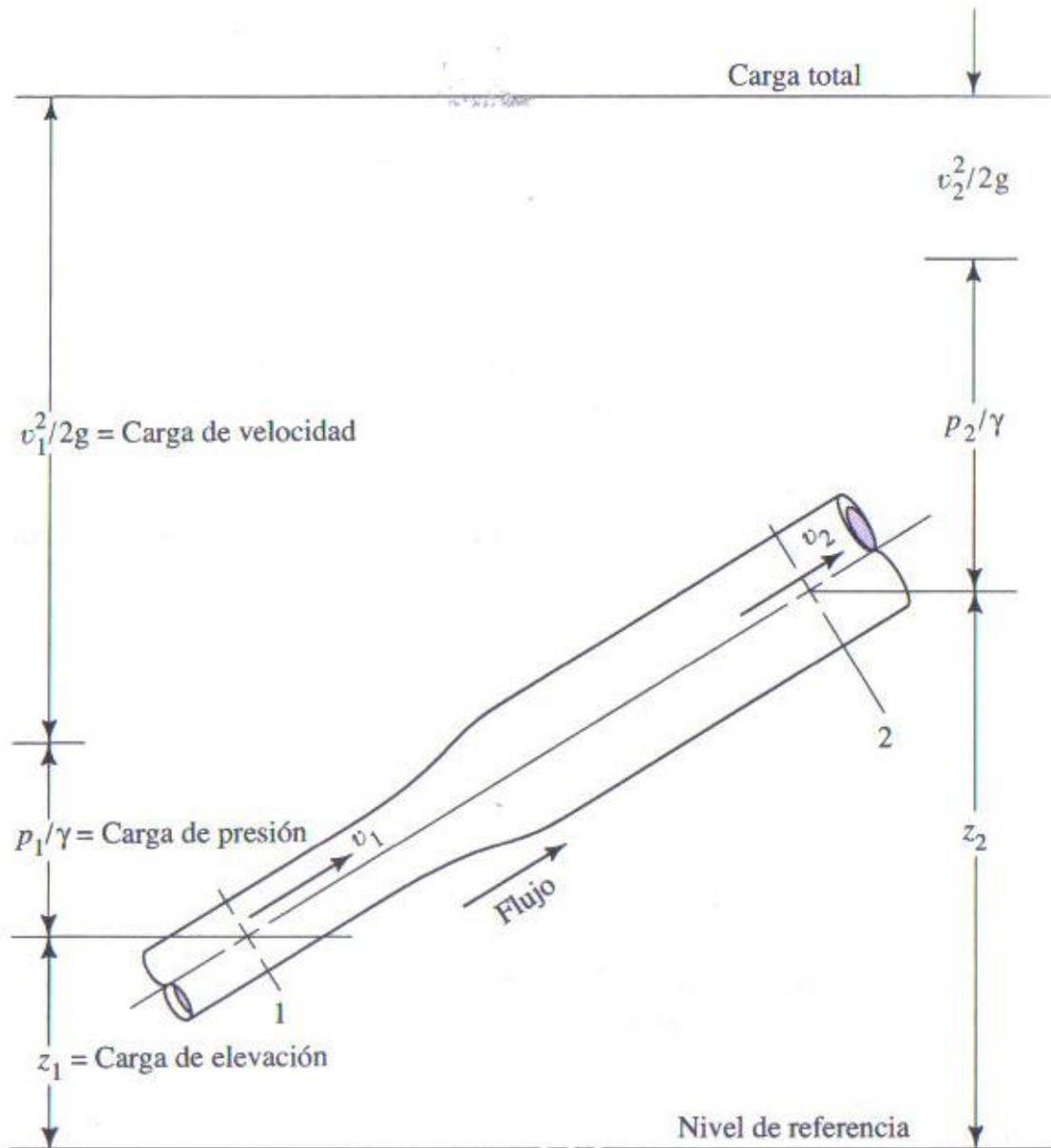
- Viscosidad (fricción interna) = 0. Es decir, se considera que la línea de corriente sobre la cual se aplica se encuentra en una zona no viscosa del fluido.
- Caudal constante.
- Flujo incompresible, donde  $\rho$  es constante.
- La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente o en un flujo irrotacional.

Cada término de la ecuación resulta de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido. Por lo anterior, cada término de la

ecuación de Bernoulli es una forma de la energía que posee el fluido, por unidad de peso del mismo que se mueve en el sistema.

La unidad de cada término es energía por unidad de peso y la unidad de fuerza o peso aparece tanto en el denominador como en el numerador y por ello puede cancelarse. La unidad resultante es de longitud y se interpreta como una altura, como es común en hidráulica expresar la energía, que a la vez representa diferentes formas de energía. En la ecuación de Bernoulli los términos suelen llamarse alturas de velocidad, de presión y de cabezal hidráulico.

Figura 2. **Carga de presión, carga de elevación, carga de velocidad y carga total**



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. p. 166.

## 1.2. Líneas de carga total y carga piezométrica

Si la presión arriba de la superficie libre del fluido es diferente de la presión ambiental fuera del área es necesario hacer un cambio en el procedimiento, entonces se da el concepto de carga piezométrica, donde la presión real sobre el fluido  $p_a$  se convierte en una profundidad equivalente de dicho fluido  $h_a$ , lo cual crearía la misma presión:

$$h_a = \frac{p_a}{\gamma}$$

La línea de carga referente a una tubería es el lugar geométrico de los puntos representativos de las tres cargas; de velocidad, de presión y de posición. La línea piezométrica corresponde a las alturas a las que el líquido subiría en piezómetros instalados a lo largo de la misma: es la línea de las presiones. Las dos líneas están separadas del valor correspondiente al término  $V^2/2g$ , esto es, energía cinética o carga de velocidad. Si el diámetro del tubo fuese constante, la velocidad del líquido será constante y las dos líneas serán paralelas.

La línea piezométrica es la línea que une los puntos hasta los que el líquido podría ascender si se insertan tubos piezométricos en distintos lugares a lo largo de la tubería o canal abierto. Es una medida de la altura de presión hidrostática disponible en dichos puntos. En un sistema de tubos está formada por el lugar geométrico de los puntos localizado a una distancia  $p/\gamma$  sobre el centro del tubo  $p/\gamma+z$  sobre un nivel de referencia seleccionado, el líquido de un tubo piezométrico se eleva hasta la línea piezométrica.

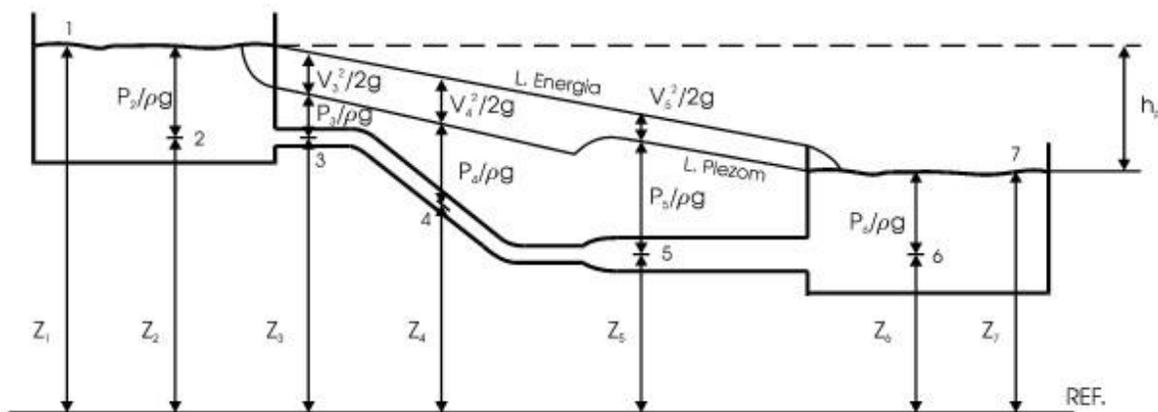
La línea de energía está formada por el lugar geométrico de los puntos localizados a una distancia  $V^2/2g$  sobre la línea piezométrica, o la

distancia  $V^2/2g + p/\gamma + z$  sobre el nivel de referencia: el líquido en un tubo pitot se eleva hasta la línea de energía.

La altura piezométrica es la altura que marcaría un tubo piezométrico conectado verticalmente en un punto de un fluido. Dicha altura es equivalente a la presión del fluido en el punto donde está conectado el tubo piezométrico.

La línea de energía también es llamada línea de carga total. La energía total del flujo en cualquier sección, con respecto de un plano de referencia determinado es la suma de la altura geométrica o de elevación  $Z$ , la altura piezométrica o de carga,  $y$ , y la altura cinética o de presión dinámica  $V^2/2g$ . La variación de la energía total de una sección a otra se representa por una línea denominada de carga o de energía y también gradiente de energía. En ausencia de pérdidas de energía, la línea de carga se mantendrá horizontal, aún cuando podría variar la distribución relativa de la energía entre las alturas geométrica, piezométrica y cinética. Sin embargo, en todos los casos reales se producen pérdidas de energía de rozamiento y la línea de carga resultante es inclinada.

Figura 3. Línea de energía o carga total y línea piezométrica



Fuente: [http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/\\_publicaciones/Libros/LibroSistemasdeBombeo/](http://www.unioviado.es/Areas/Mecanica.Fluidos/investigacion/_publicaciones/Libros/LibroSistemasdeBombeo/). Consulta: junio de 2012.

### 1.3. Pérdidas de carga

El flujo de un líquido en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía, que suele expresarse en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante, que se denomina pérdida de carga y que tiene dimensiones de longitud. La pérdida de carga que tiene lugar en una conducción representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de la misma por efecto del rozamiento.

En otras palabras es la pérdida de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las contiene.

Las pérdidas de carga pueden ser continuas a lo largo de conductos regulares y accidentales o localizadas, debido a entradas y salidas de las tuberías, a un cambio de sección, codos, válvulas, etc.

Las pérdidas de cargas localizadas se detallarán mas adelante como pérdidas de energía en accesorios.

Pérdida de carga en un conducto regular:

Si el flujo es uniforme, es decir, que la sección es constante y por lo tanto la velocidad también es constante, el principio de Bernoulli, entre dos puntos puede escribirse de la siguiente forma:

$$E_1 = E_2 + h_f$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f$$

#### 1.4. Flujo laminar y flujo turbulento

- Flujo laminar: ordenado en donde las partículas se mueven en capas o láminas paralelamente unas sobre otras. Se mueve en capas o láminas con solamente un intercambio molecular de las cantidades de movimiento, este es perfectamente ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse, si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales como, por ejemplo, la glicerina en un tubo de sección circular.

En este flujo las capas no se mezclan entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular. Se dice que este flujo es aerodinámico. En el flujo aerodinámico, cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente.

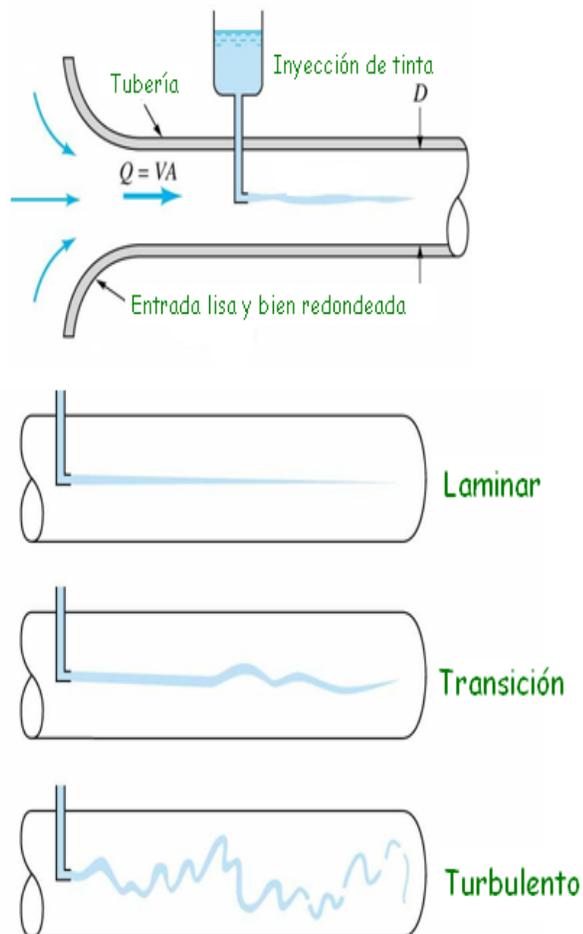
La pérdida de energía es proporcional a la velocidad media. El perfil de velocidades tiene forma de una parábola, donde la velocidad máxima se encuentra en el eje del tubo y la velocidad es igual a cero en la pared del tubo.

- Flujo turbulento: se llama flujo turbulento o corriente turbulenta al movimiento de un fluido que se da en forma caótica y al azar, en el que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos aperiódicos, como por ejemplo el agua en un canal de gran pendiente. Debido a esto, la trayectoria de una partícula se puede predecir hasta una cierta escala, a partir de la cual la trayectoria de la misma es impredecible, más precisamente caótica.

- Flujo de transición: alterna entre laminar y turbulento. Estos dependen del valor del número de Reynolds.

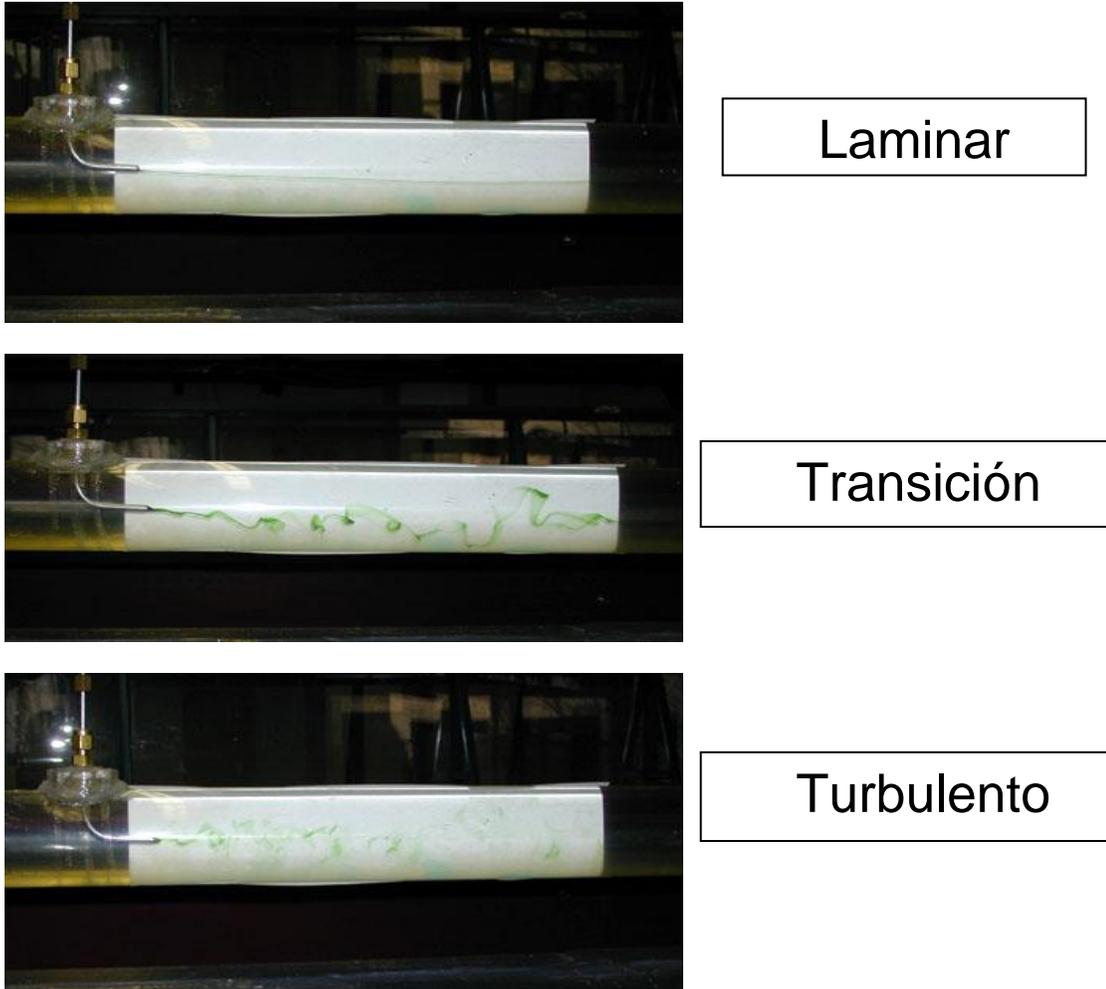
El siguiente es un experimento de inyección de tinta en el centro de la tubería para una mejor visualización de los tipos de flujo:

Figura 4. **Inyección de tinta para flujo laminar, de transición y turbulento**



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Presentación número de Reynolds*. Diapositiva 5.

Figura 5. Experimento real de inyección de tinta en tubería



Fuente: SANDOVAL, Luis. *Presentación número de Reynolds*. Diapositiva 5.

Para estudiar el problema de la resistencia al flujo resulta necesario volver a la clasificación inicial de los flujos laminar y turbulento. Osborne Reynolds (1883) con base en los experimentos fue el primero que propuso el criterio para distinguir ambos tipos de flujo mediante el número cuyo nombre posee, el cual permite evaluar la preponderancia de las fuerzas viscosas sobre las de inercia.

En el caso de un conducto cilíndrico a presión, el número de Reynolds se define así:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

Donde:

V= velocidad media

D= diámetro del conducto

$\nu$ = viscosidad cinemática del fluido

Para determinar si el flujo es turbulento o laminar se utiliza el número de Reynolds de la siguiente forma:

- Para valores de Reynolds  $\leq 2\,000$  el flujo se mantiene estacionario y se comporta como si estuviera formado por láminas delgadas, que interactúan sólo en función de los esfuerzos tangenciales existentes. Por eso a este flujo se le llama flujo laminar. El colorante introducido en el flujo se mueve siguiendo una delgada línea paralela a las paredes del tubo.
- Para valores de  $2\,000 \leq \text{Reynolds} \leq 4\,000$  la línea del colorante pierde estabilidad formando pequeñas ondulaciones variables en el tiempo, manteniéndose sin embargo delgada. Este régimen se denomina de transición.
- Para valores de Reynolds  $\geq 4\,000$  después de un pequeño tramo inicial con oscilaciones variables, el colorante tiende a difundirse en todo el flujo. Este régimen es llamado turbulento, es decir, caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional.

## 1.5. Fórmulas para el cálculo de la pérdida de energía

La pérdida de carga que tiene lugar en una conducción representa la pérdida de energía de un flujo hidráulico a lo largo de la misma por efecto del rozamiento. Es importante, para este trabajo, la utilización y conocimiento de fórmulas para el cálculo. A continuación las principales fórmulas empíricas empleadas en el cálculo de la pérdida de carga que tiene lugar en tuberías.

Todas las fórmulas dadas a continuación se derivan del modelo físico:

$$hf = k \frac{V^2}{2g}$$

El cual establece que la pérdida de energía por fricción es directamente proporcional a la energía cinética del flujo.

### 1.5.1. Fórmula de Darcy-Weisbach

Una de las fórmulas más exactas para cálculos hidráulicos es la de Darcy-Weisbach. Sin embargo, por la complejidad en el cálculo del coeficiente  $f$  de fricción ha caído en desuso en el caso de conducción de agua. Aun así, se puede utilizar para el cálculo de la pérdida de carga en tuberías de fundición. La fórmula original es:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g}$$

En función del caudal la expresión queda de la siguiente forma:

$$h_f = 0,0826 * f * \frac{Q^2}{D^5} * L$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de carga debida a la fricción

$f$  = factor de fricción de Darcy

$L$  = longitud de la tubería

$D$  = diámetro de la tubería

$V$  = velocidad media del fluido

$g$  = aceleración de la gravedad:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

El factor de fricción ( $f$ ) es adimensional y es función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa de la tubería, parámetro que da idea de la magnitud de las asperezas de su superficie interior. A continuación las fórmulas para cada tipo de flujo:

- Flujo laminar:

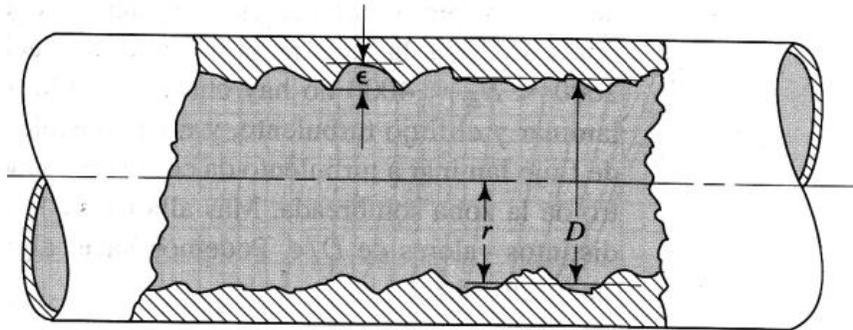
$$f = \frac{64}{Re}$$

- Flujo turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = \left( -2 \log \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Figura 6. **Rugosidad de pared de conducto (exagerada)**



Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. p.240.

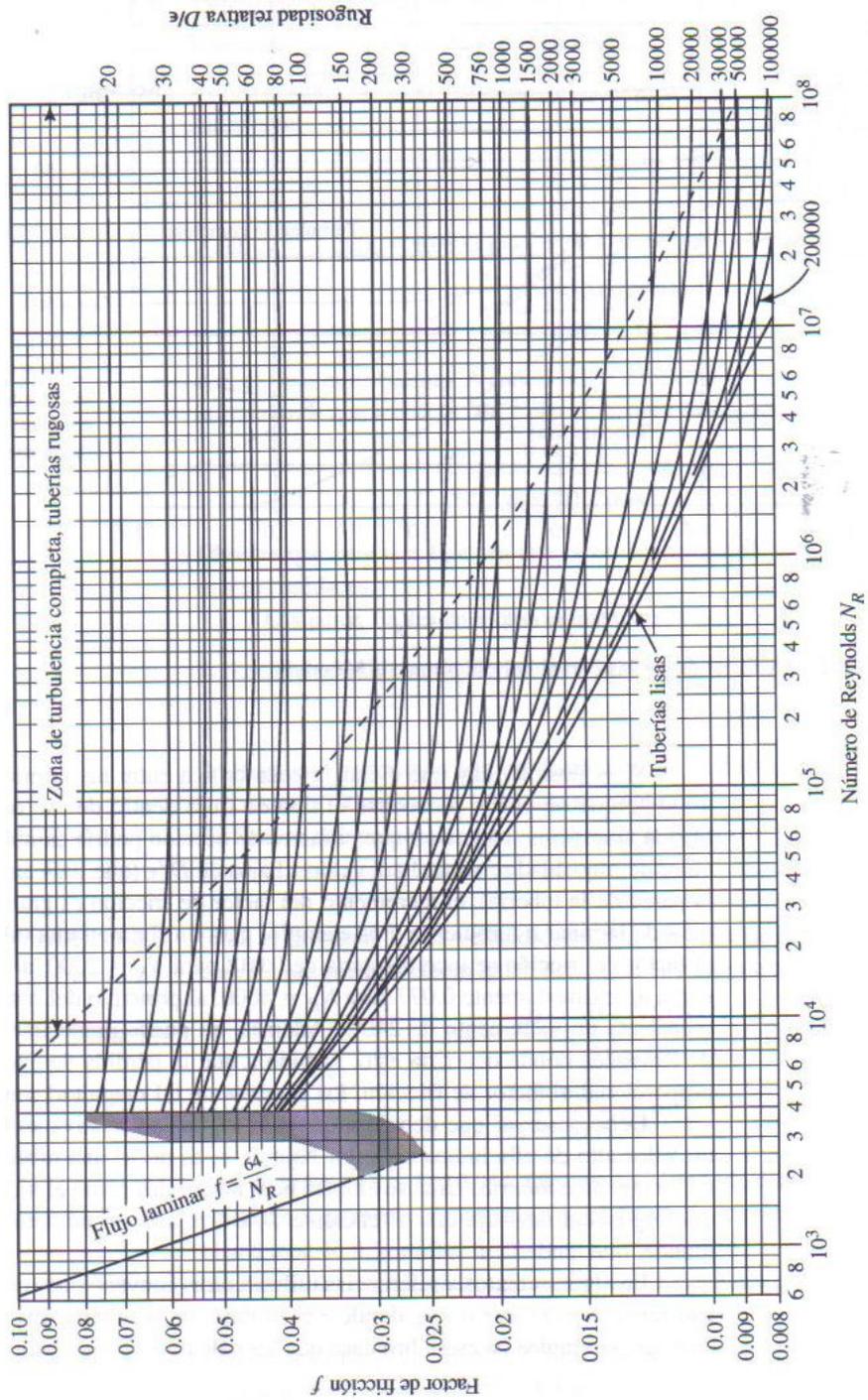
Tabla I. **Valores de diseño de la rugosidad de tubería**

Material	Rugosidad $\epsilon$ (m)	Rugosidad $\epsilon$ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3.0 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-6}$
Tubo extruido; cobre, latón y acero	$1.5 \times 10^{-6}$	$5.0 \times 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4.6 \times 10^{-5}$	$1.5 \times 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1.5 \times 10^{-4}$	$5.0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, recubierto	$1.2 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-4}$
Hierro dúctil, no recubierto	$2.4 \times 10^{-4}$	$8.0 \times 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1.2 \times 10^{-4}$	$4.0 \times 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \times 10^{-3}$	$6.0 \times 10^{-3}$

Fuente: MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. p. 240.

Otro de los métodos más utilizados para evaluar el factor de fricción emplea el Diagrama de Moody como se muestra en la figura 5. El diagrama muestra la gráfica del factor de fricción  $f$  contra el número de Reynolds  $Re$ , con una serie de curvas paramétricas relacionadas con la rugosidad relativa  $D/\epsilon$ .

Figura 7. Diagrama de Moody



Fuente: WILEY, Jhon. *Mecánica de fluidos*. p. 284.

### 1.5.2. Fórmula de Hazen-Williams

Esta ecuación es una de las más populares para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. El uso se limita al flujo de agua en tuberías con diámetros mayores a 2 pulg y menores de 6 pies; donde la velocidad no excede de 10 pies/s, y a temperatura de 60 °F (15,6 °C). Si se emplea a temperaturas más altas o bajas ocasionaría cierto error.

La fórmula de Hazen-Williams es específica en cuanto a las unidades. En el sistema tradicional de Estados Unidos adopta la siguiente forma:

$$v = 1,32 C_h R^{0,63} s^{0,54}$$

Donde:

$v$  = velocidad promedio del flujo (pies/s)

$C_h$  = coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

$R$  = radio hidráulico del conducto del flujo (pies)

$s$  = relación  $h_L/L$ : pérdida de energía/longitud del conducto (pies/pies)

El uso del radio hidráulico en la fórmula permite la aplicación a secciones no circulares. Para las secciones circulares se emplea  $R=D/4$ . El coeficiente  $C_h$  solo depende de la condición de la superficie de la tubería o conducto.

En unidades del Sistema Internacional, la fórmula de Hazen-Williams es:

$$v = 0,85 C_h R^{0,63} s^{0,54}$$

Donde:

$v$  = velocidad promedio del flujo (m/s)

$C_h$  = coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

$R$  = radio hidráulico del conducto del flujo (m)

$s$  = relación  $h_L/L$ : pérdida de energía/longitud del conducto (m/m)

A continuación se presenta una fórmula que involucra el Sistema Internacional y el Sistema Inglés para una facilidad en el cálculo y las condiciones de aplicación:

$$hf = \frac{1743,811 Q^{1,85} L}{C^{1,85} D^{4,87}}$$

Donde:

$hf$  = pérdida de energía (m)

$Q$  = caudal (l/s)

$L$  = longitud (m)

$C$  = coeficiente de Hazen-Williams (adimensional)

$D$  = diámetro de la tubería (pulg)

## 1.6. Pérdidas de energía en accesorios

Las tuberías de conducción que se utilizan en la práctica están compuestas, generalmente por tramos rectos de tuberías y accesorios, tales como válvulas, codos, tees, reductores de diámetros, etc., permitiendo que el sistema se adapte a la geometría horizontal y vertical de la instalación. Estos accesorios, al igual que los tramos de tubería, también producen pérdidas de

energía. Tal tipo de pérdida se conoce como pérdida menor o pérdida localizada. La magnitud depende del tipo de accesorio y se expresa como una parte de la energía cinética provocada por la velocidad en el sitio donde encuentra instalado el accesorio. La fórmula general de pérdida menor es:

$$h_{facc} = K \frac{V^2}{2g}$$

Donde:

$h_{facc}$  = pérdida de energía de un accesorio

K= coeficiente de pérdida del accesorio

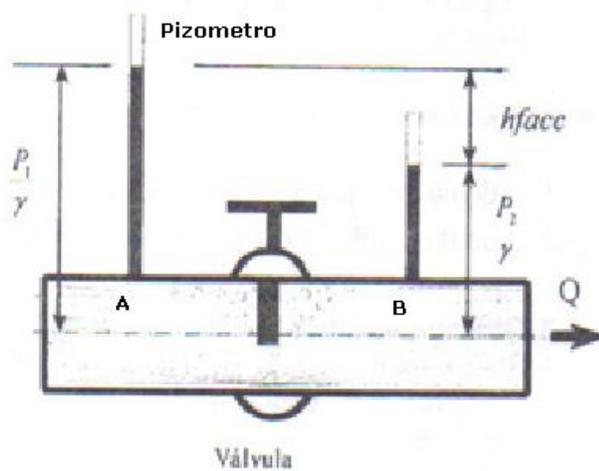
V= velocidad media

g= aceleración de la gravedad

Se dispone de muchas clases de válvulas y acoplamientos (accesorios) de distintos fabricantes, para cumplir las especificaciones de las instalaciones de sistemas de circulación de fluidos. Las válvulas se emplean para controlar la cantidad de fluido; pueden ser de globo, ángulo, compuerta, mariposa, cualquiera de varios tipos de válvulas de verificación y muchas más.

El coeficiente de pérdida K es un parámetro adimensional, que depende de la geometría del accesorio y del número de Reynolds, el valor se determina experimentalmente y puede encontrarse en tablas, gráficas o nomogramas disponibles en manuales de hidráulica.

Figura 8. **Pérdida de energía en un accesorio (válvula)**



Fuente: SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. p.128.

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\gamma} + Z_A = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + h_{facc}$$

$$\frac{P_A}{\gamma} = \frac{P_B}{\gamma} + h_{f_{A-B}}$$

$$h_{f_{A-B}} = \frac{P_A}{\gamma} - \frac{P_B}{\gamma}$$

### 1.7. Ejemplo de aplicación

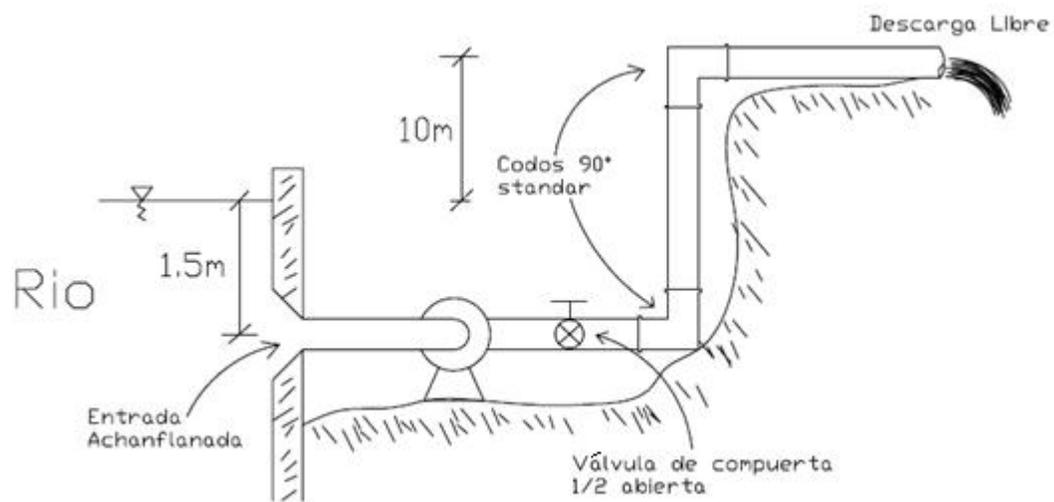
Se bombea agua muy fría (viscosidad:  $1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$ ) desde un río hasta una obra de construcción para enfriar unas barrenadoras de roca por medio del sistema mostrado. El flujo necesario es 10 l/s. Las tuberías de succión y de descarga son de hierro galvanizado y ambas tienen un diámetro de 7,5 cm, la longitud de la tubería de succión es de 10 m. y la longitud de la tubería de

descarga es de 70 m. para las condiciones de funcionamiento anteriores, determinar:

- La potencia necesaria para operar la bomba en kilowatt, si la eficiencia de esta es de 70 %.
- La presión a la salida de la bomba en kilopascal.

Considerar pérdidas por fricción y localizadas.

Figura 9. **Esquema de problema de aplicación**



Fuente: elaboración propia, con programa de Paint.

$$H_B = (Z_1 - Z_2) + \frac{V_2^2}{2g} + hf_{suc} + hf_{des} + (hL_{ent} + hL_{val} + 2hL_{codos})$$

Donde:

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} hl_{val} = f(160) \frac{V^2}{2g}$$

$$hl_{ent} = 0,25 \frac{V^2}{2g} hl_{codo} = f(30) \frac{V^2}{2g}$$

$$V = \frac{0,01 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi}{4} (0,075)^2} = 2,263 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \frac{V^2}{2g} = \frac{\left(\frac{2,263\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{2 \left(\frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 0,261\text{m}$$

$$N_R = \frac{VD}{\nu} = \frac{2,263\text{m/s} * 0,075\text{m}}{1,52 * 10^{-6}\text{m/s}^2} = 111\ 661 \quad \implies f = 0,025$$

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{1,5 * 10^{-4}\text{m}}{0,075\text{m}} = 0,002$$

Determinando las pérdidas:

$$hf_{suc} = 0,025 * \frac{10\text{m}}{0,075\text{m}} * 0,261\text{m} = 0,87\text{m}$$

$$hf_{suc} = 0,025 * \frac{70\text{m}}{0,075\text{m}} * 0,261\text{m} = 6,09\text{m}$$

$$hf_{total} = \sum hf = 6,96\text{m}$$

$$hl_{ent} = 0,25 * 0,261\text{m} = 0,0653\text{m}$$

$$hl_{ent} = 0,25 * 160 * 0,261\text{m} = 1,044\text{m}$$

$$h_{l_{ent}} = 0,25 * 30 * 0,261 \text{ m} = 0,196\text{m}$$

$$H_B = 10 + 0,261 + 6,96 + (0,0653 + 1,044 + 0,196 * 2)$$

$$H_B = 18,722\text{m}$$

$$POT = 9,81\text{KN/m}^3(0,01\text{m}^3/\text{s})(18,722\text{m}) = 1,84\text{KW}$$

- POT. Electrica =  $\frac{1,84}{70\%} = 2,63\text{KW}$

$$Z_1 + H_B = \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} + hf_{suc} + h_{l_{ent}}$$

$$1,5 + 18,722 = \frac{P_s}{9,81} + 0,261 + 0,87 + 0,0653$$

$$P_s = 186,64 \text{ kPa}$$

## **2. SISTEMAS DE CONDUCCIÓN DE FLUJO EN TUBERÍAS**

### **2.1. Tipos de sistemas de conducción de flujo en tuberías**

Dentro de un sistema de abastecimiento de agua se le llama línea de conducción, al conjunto integrado por tuberías y dispositivos de control, que permiten el transporte del agua en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión desde la fuente de abastecimiento hasta el sitio donde será distribuida.

#### **2.1.1. Líneas por gravedad**

Es el tramo de tubería y de pequeñas estructuras que conducen el agua desde la captación hasta el reservorio. Por medio de ella, el agua es transportada aprovechando la energía potencial debido a una diferencia de nivel positiva entre el inicio y el fin del trayecto de la tubería.

El diseño está sujeto a la topografía donde se trata de seguir la secuencia del terreno. Para el diseño de una línea de conducción se requiere de un plano topográfico, mostrando plantas y elevaciones. Para lo que es necesario definir mediante una selección de alternativas, la ruta sobre la que se efectuará el trazo de la línea.

Los datos generales a recabar para el diseño de una línea de conducción son:

- La localización de las fuentes de abastecimiento y las descargas

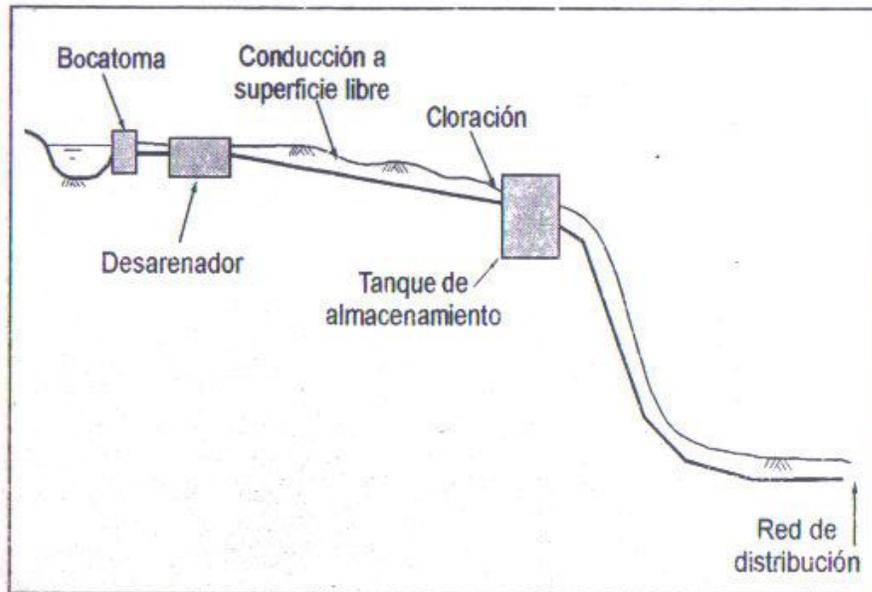
- El clima
- Los medios de comunicación al lugar
- Usos del agua

Además debe tomarse en cuenta el caudal a transportar, así como el tipo de tubería a utilizar. La selección de materiales de tubería para cualquier aplicación debe basarse en las recomendaciones de códigos aplicables, estándares dimensionales y especificaciones de material establecidas. Sin embargo, el ingeniero diseñador debe considerar también los requerimientos de servicio y parámetros tales como: resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, facilidad de instalación, costo y vida útil. El criterio económico estará determinado por el tipo de tubería, el diámetro y el espesor.

En el caso de tuberías sujetas a la presión de la gravedad se pueden presentar dos situaciones:

- Donde la diferencia de alturas apenas es suficiente, para proporcionar una presión adecuada para el funcionamiento, el problema consiste en conservar la energía usando tubos de diámetros grandes para tener mínimas pérdidas de carga por fricción y evitar bombeo de auxilio.
- Cuando la diferencia de altura entre la fuente de abastecimiento y la ubicación del sitio a abastecer, es tal que la presión proporcionada es mayor a la requerida, el problema radica en reducir las ganancias de presión, lo cual se logra seleccionando tuberías de diámetros más pequeños.

Figura 10. **Esquema de una línea de conducción por gravedad**



Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 28.

Para el diseño de líneas de conducción por gravedad se deben determinar las longitudes y los diámetros para ajustar las pérdidas a las alturas disponibles. Además, tomar en cuenta que hay que combinar dos diámetros diferentes, uno grande y el otro menor, para lograr que las pérdidas sean iguales a las alturas disponibles. Para ello hay que determinar cuál es la longitud de tubería para cada uno de ellos.

### 2.1.2. Líneas por bombeo

Cuando las condiciones de terreno o el gasto necesario del suministro de agua no permiten el diseño de la línea de conducción por gravedad se utiliza el bombeo, teniendo dos variantes:

La primera es utilización de bombas, más el almacenamiento de cierta cantidad de agua. El exceso de agua se deposita en un tanque durante los períodos de bajo consumo y durante los períodos de alto consumo el agua almacenada se utiliza para aumentar la suministrada por la bomba. Este sistema permite obtener un rendimiento uniforme en las bombas y, por lo tanto es económico.

La segunda es la utilización de bombas sin almacenamiento, en este caso las bombas introducen agua directamente en la tubería sin otra salida que la del agua realmente consumida. Siendo el sistema menos deseable, ya que una avería en la fuente de energía ocasionaría una interrupción completa en el suministro de agua.

La carga dinámica total de una bomba es igual a la suma de la carga estática (CE) y las pérdidas de carga en la tubería de succión y de descarga tanto por fricción como en los accesorios (CD):

$$CDT = CE + \sum hf + \sum hl$$

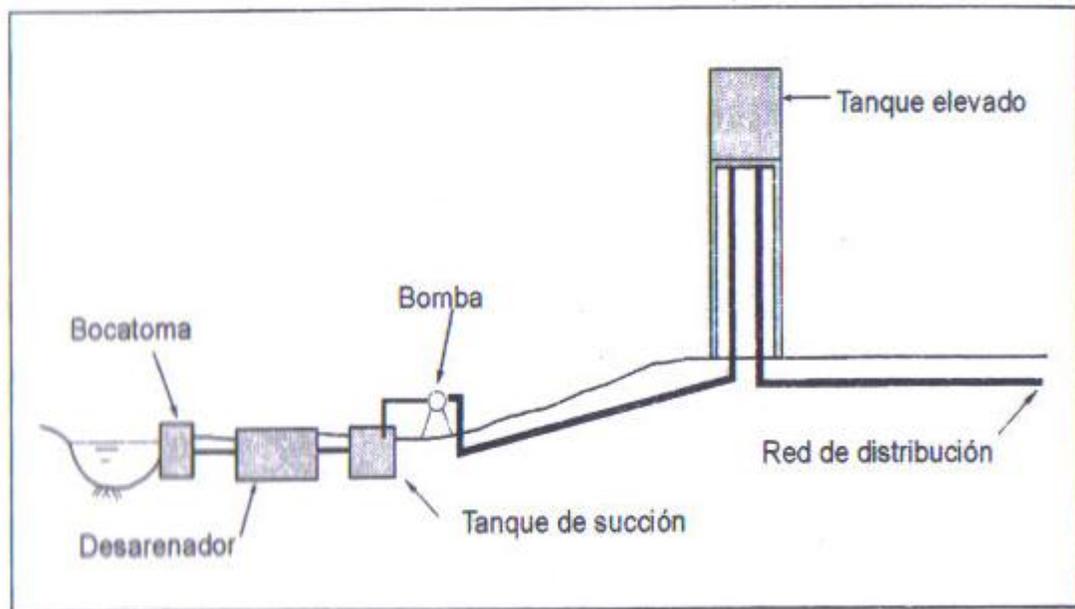
Para el caso de líneas de conducción por bombeo es necesario obtener el diámetro económico, no obstante, el diámetro calculado seguramente no será comercial, por lo tanto, se aconseja utilizarlo como un dato aproximado donde la solución final debe obtenerse con un procedimiento directo, proponiendo repetidas veces el diámetro del tubo y calculando enseguida la carga H requerida de la bomba.

La solución para la determinación del diámetro se decide por condiciones económicas a partir de hacer mínimos el costo de la tubería y la colocación (inversión inicial), así como, el costo correspondiente a la energía para el

bombeo (operación), los demás costos de la conducción no intervienen en el análisis por no ser función del diámetro.

Conforme el diámetro seleccionado sea menor, disminuye el costo de la tubería y la colocación, pero se incrementan las pérdidas de carga y con ello el costo de bombeo, al requerir bombas de carga elevada con mayores consumos de energía. Ocurriría lo contrario si se incrementa el diámetro, ya que la pérdida será pequeña y por ende el costo de energía sería bajo, pero el costo de la tubería sería alto. Por lo anterior, se requiere determinar el diámetro  $D$  que haga mínima la suma de los costos de inversión inicial y de operación antes mencionados.

Figura 11. **Conducción forzada en un sistema de bombeo**



Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 29.

### **2.1.2.1. Sobrepresión por golpe de ariete en sistemas de bombeo**

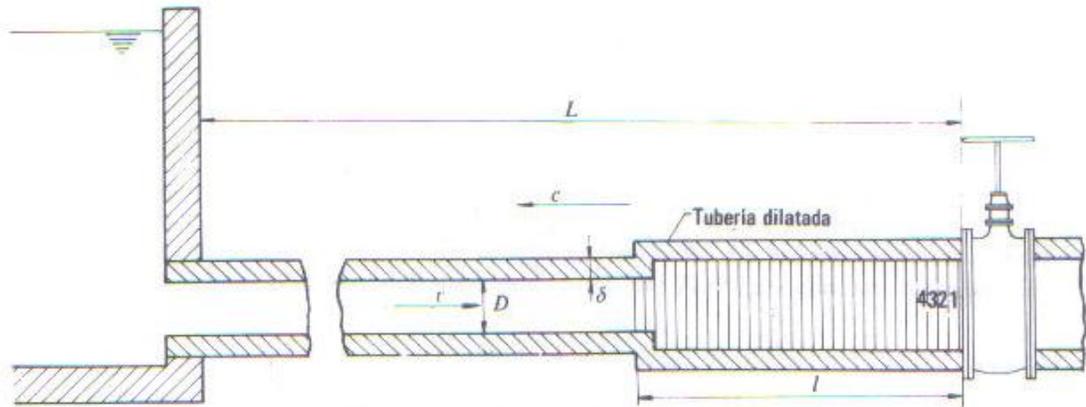
Debido a la magnitud e importancia de la conducción es importante tener en cuenta el efecto de este fenómeno en la tubería.

Se denomina golpe de ariete al efecto de choque violento o sobrepresión súbita producido sobre las paredes del conducto forzado, al modificarse de manera instantánea el movimiento del fluido, como puede ocurrir en el caso del cierre repentino de una válvula.

Al cerrarse por completo instantáneamente una válvula, en ella se origina una onda de presión que se propaga con velocidad  $c$  (ver figura), la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad  $v$  del fluido: se ha creado una onda elástica, es decir, una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse y así sucesivamente; originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda.

Es necesario verificar que la tubería sea capaz de soportar esta sobrepresión, sumando la altura de bombeo más la sobrepresión, la que debe de ser menor a la de trabajo de la tubería.

Figura 12. **Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula:  $c$  es la velocidad de propagación de la onda y  $v$  la velocidad del fluido. La tubería se dilata (o se contrae) al avanzar la onda de presión**



Fuente: MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas*. p. 312.

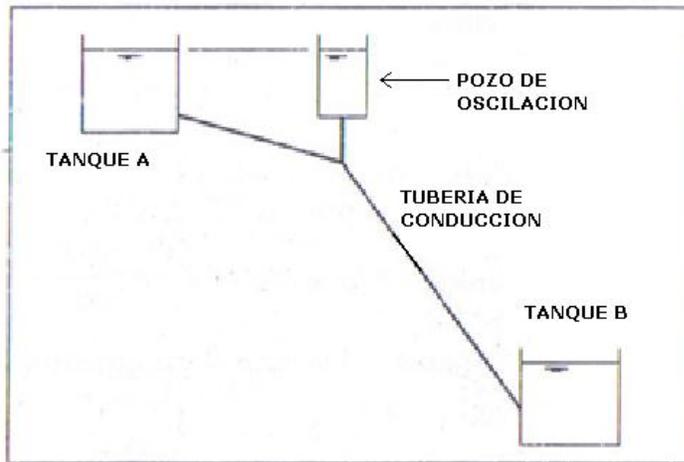
### 2.1.2.2. Medidas generales para verificar el golpe de ariete

Pueden tomarse varias medidas, entre las cuales las más indicadas son las que no requieren equipos especializados, ya que en el caso de acueductos rurales no es fácil la labor de mantenimiento de estos aparatos. Las más importantes son:

- Limitar velocidades entre 0,6 y 2,0 m/s.
- Cerrar lentamente las válvulas mediante la colocación de un volante de gran diámetro.
- Emplear válvulas especiales contra el golpe de ariete como lo es la válvula de alivio.
- Aumentar el espesor de pared del tubo.

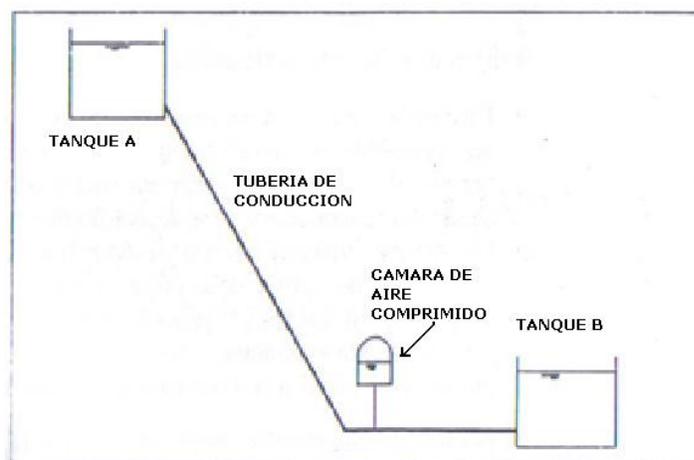
- Construir pozos de oscilación o cámaras de aire comprimido como las indicadas en las figuras.

Figura 13. **Pozo de oscilación**



Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 236.

Figura 14. **Cámara de aire comprimido**



Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 236.

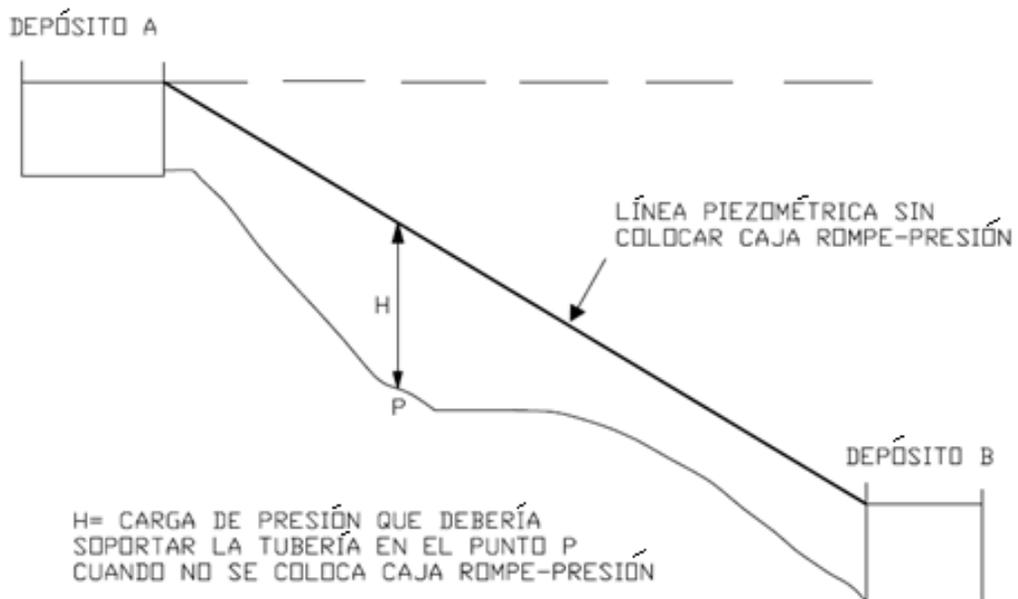
## 2.2. Obras de arte utilizadas en una línea de conducción por gravedad

Las obras de arte se utilizan en conducción de agua potable para facilitar el manejo del sistema. A continuación se muestran las diferentes obras de arte utilizadas en líneas de conducción por gravedad.

### 2.2.1. Caja rompepresión

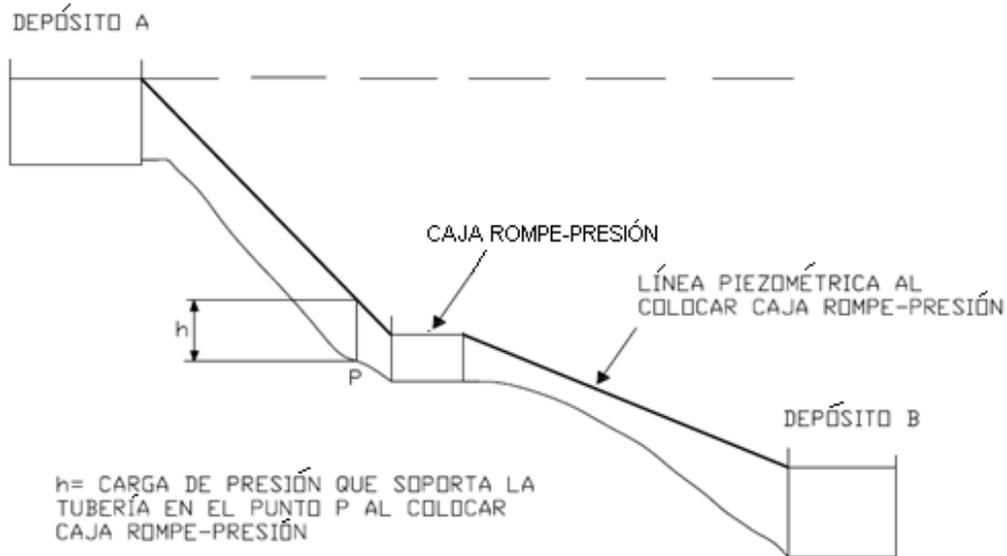
Si en el perfil aparecen depresiones muy profundas puede ser económico colocar depósitos intermedios llamadas cajas rompepresión, que tienen por objeto fragmentar la línea piezométrica, reducir la altura de presión y establecer un nuevo nivel estático que dará lugar a tuberías de menor espesor y por consiguiente, de menor costo.

Figura 15. Línea piezométrica sin colocar caja rompepresión



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Figura 16. **Línea piezométrica al colocar caja rompepresión**



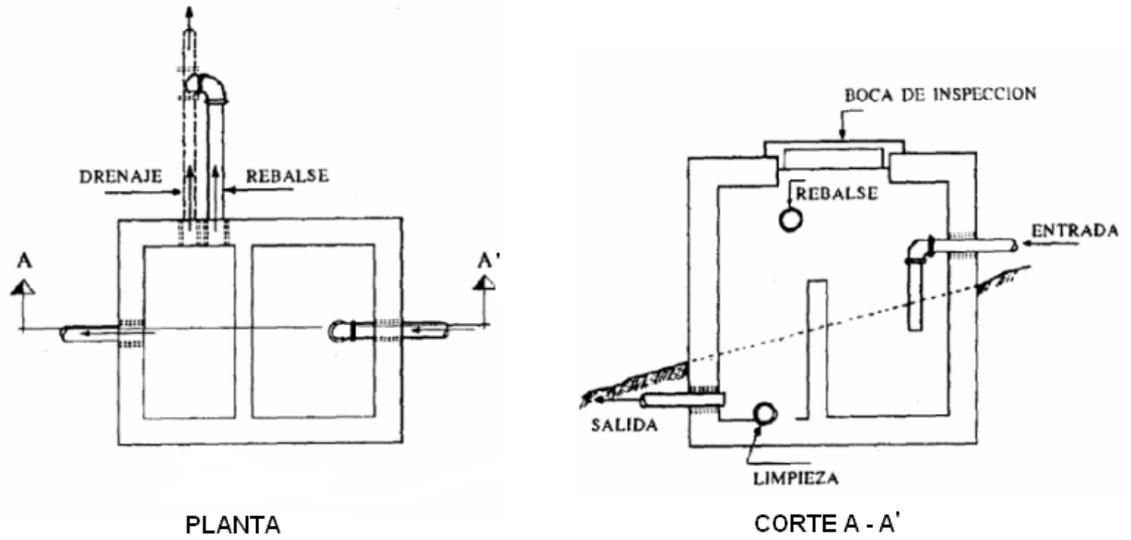
Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Cuando el tramo de tubería se secciona por medio de la caja rompepresión, cada fracción trabajará con una carga acorde con la presión de trabajo de la tubería que se emplee.

La localización de las cajas está regida por la presión de trabajo de la tubería que se vaya a instalar. Consta de una caja para una válvula de compuerta y la caja para romper la presión que generalmente se construye con una capacidad de un metro cúbico.

En varios casos donde la fuente de abastecimiento a aprovechar se encuentra en manantiales que afloran en las montañas, la presión estática muchas veces excede la presión de trabajo de la tubería y es necesario colocar una o varias cajas rompepresión.

Figura 17. **Planta y corte de una caja rompepresión**



Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 96-97.

Figura 18. **Construcción de caja rompepresión en Perú**



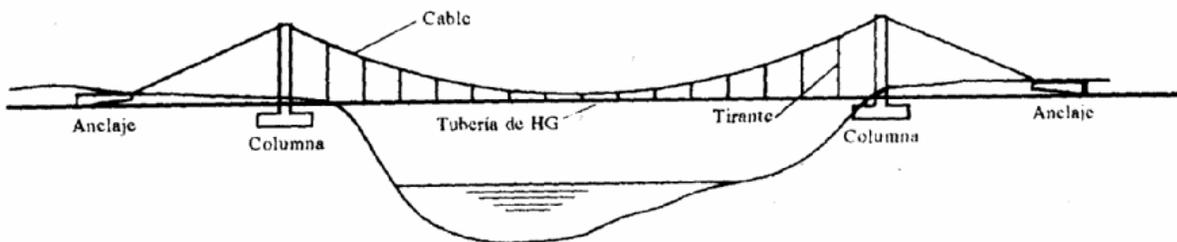
Fuente: <http://www.fcpa.org.pe/mostrarPublicacion.php?id=69>. Consulta: noviembre de 2012.

### 2.2.2. Pasos aéreos y de zanjones

Esta obra de arte es utilizada cuando es necesario salvar una depresión del terreno o atravesar un río.

El diseño de los pasos aéreos se hace por medio de un puente colgante, con torres de concreto armado o columnas, como se muestra en la figura, cable de acero y muertos de concreto ciclópeo (elementos de gran tamaño generalmente enterrados en el suelo que sirven como anclaje), en dicho puente se coloca la tubería para atravesar el río o depresión de terreno.

Figura 19. Paso aéreo en un río.

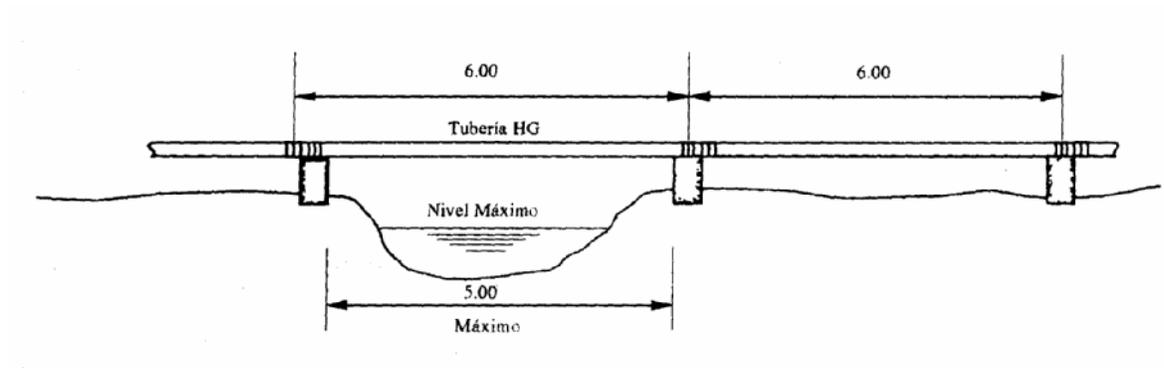


Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 97.

Si la depresión de terreno no es muy grande, la tubería puede atravesar por medio de un paso de zanjón, como se muestra en la siguiente figura.

El paso de zanjón es más simple que el paso aéreo, ya que solo consta de torres de concreto armado o columnas ancladas al suelo donde pasa la tubería encima de ellas. Solo se permite un ancho máximo de río o depresión de terreno de 5 metros para utilizar esta obra de arte.

Figura 20. Paso de zanjón



Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 98.

### 2.2.3. Caja distribuidora de caudal

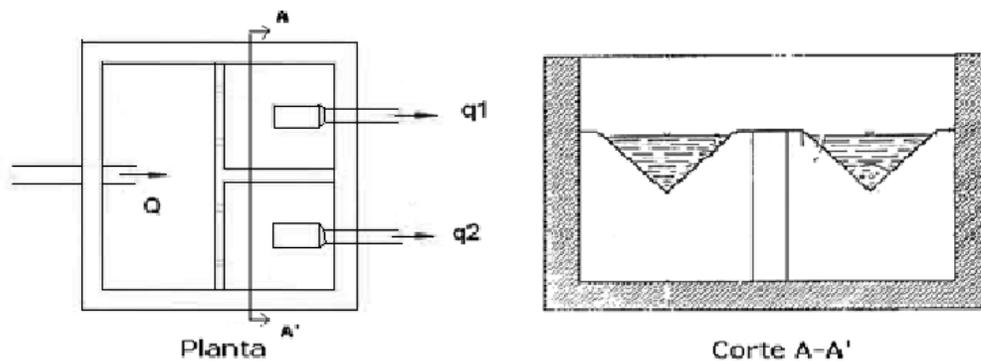
En ocasiones se utiliza un mismo sistema de abastecimiento para surtir a varias comunidades, o una sola comunidad muy dispersa que se puede dividir en varios sectores. En estos casos es necesario utilizar una caja distribuidora de caudales.

La caja distribuidora de caudales es un tanque que distribuye el agua proporcionalmente a la población de varios sectores o comunidades. De acuerdo con el número de sectores o comunidades en las que se va a distribuir el caudal, así será el número de vertederos, por lo que saldrán los caudales, que se conducirán directamente hacia los tanques de distribución de los sectores o comunidades por servir.

Poseen cámaras, divididas por una pantalla en la que se instalan los vertederos que son los que distribuyen el agua. Los vertederos de esta pueden ser de muesca en V o rectangulares y dependiendo de las dimensiones de cada

vertedero estos derivan caudales distintos. El diseño es simple, debido a que el ancho del vertedero será proporcional al caudal que se necesita obtener.

Figura 21. **Planta y corte de una caja distribuidora de caudales**



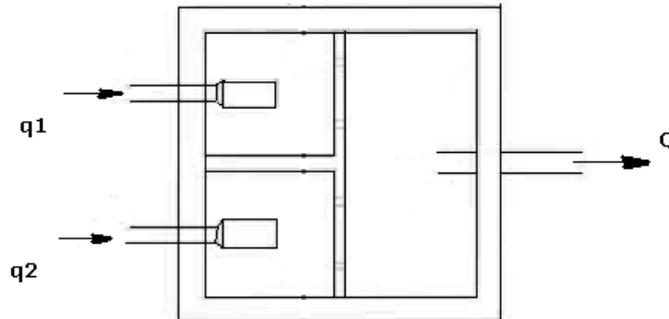
Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

#### 2.2.4. **Cajas unificadoras de caudal**

Al contrario de la caja distribuidora de caudales, como el nombre lo indica, esta obra de arte unifica o recolecta dos o más caudales previamente captados, formando uno solo, como se observa en la figura.

La capacidad y diseño dependerá del número de fuentes a reunir y del caudal de cada uno de ellas.

Figura 22. **Planta de una caja unificadora de caudales**

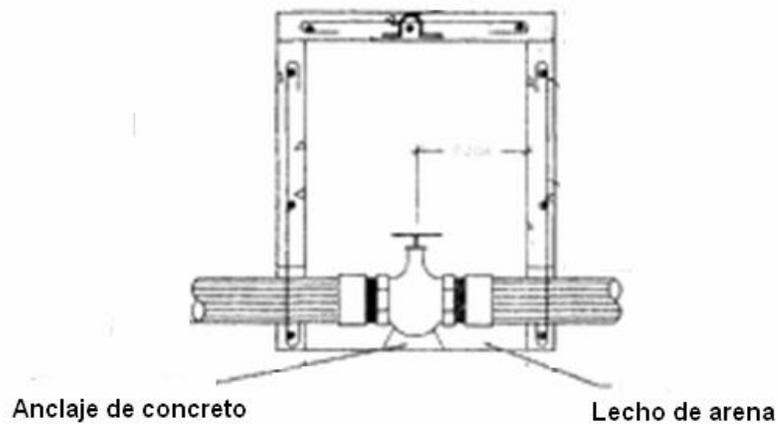


Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### 2.2.5. **Cajas para válvulas**

Son cajas de concreto reforzado o mampostería como se muestra en la figura, con las respectivas tapaderas para el control y limpieza. Estas sirven para proteger cualquier válvula que sea necesario instalar en el sistema.

Figura 23. **Caja para una válvula de compuerta**

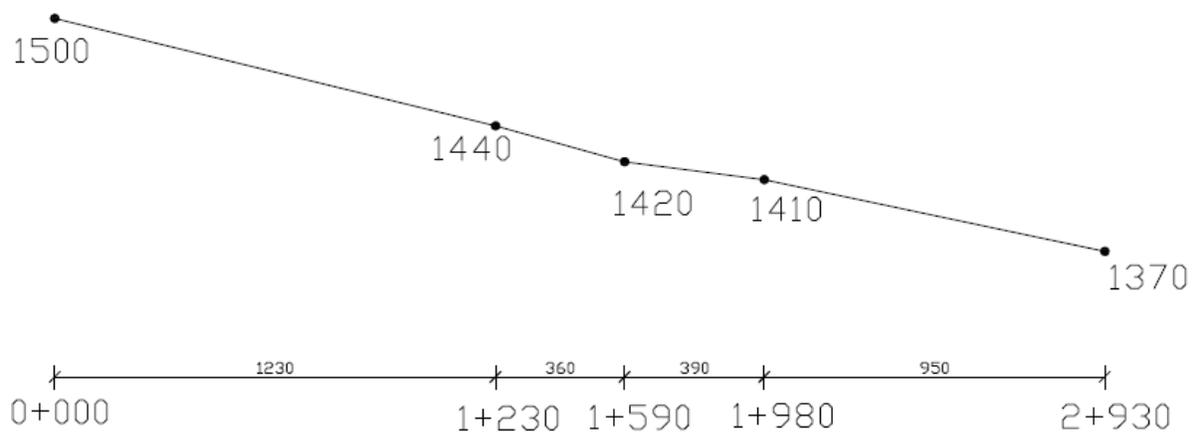


Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 98.

### 2.2.6. Ejemplo de diseño de obras de arte

Diseñar la línea de conducción por gravedad que se muestra en la figura para una fuente de abastecimiento de 18 l/s, utilizando tubería PVC de 160 psi. Utilizar el coeficiente c de Hazen-Williams de 150 para PVC. Además dibujar las líneas de presiones y encontrar las cotas piezométricas.

Figura 24. **Cotas de línea de conducción de agua en problema de aplicación**

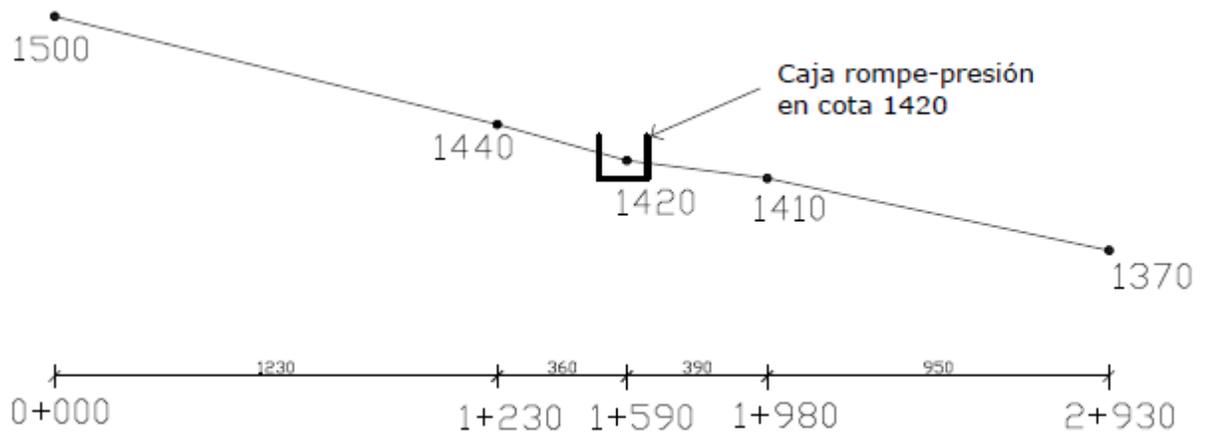


Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Revisar altura:  $H = 1500 - 1370 = 130 > 112$  m. c. a

La altura sobrepasa la presión que soporta la tubería de 160 psi que es aproximadamente de 112 metros, por lo tanto se debe colocar una caja rompresión en una cota conocida de la línea de conducción.

Figura 25. **Cota de colocación de la caja rompe presión en problema de aplicación**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Revisar alturas de C.R.P.:

$$H = 1500 - 1420 = 80 < 112m \quad \text{si cumple}$$

$$H = 1420 - 1370 = 50 < 112m \quad \text{si cumple}$$

De cota 1500 a C.R.P (cota 1420):

Encontrar diámetros:

$$D = \left( \frac{1\,743,811 * L * Q^{1,85}}{C^{1,87} * H} \right)^{1/4,87}$$

$$L_1 = 1\,230 + 360 = 1\,590 \quad \Rightarrow \quad L = L_1 * \% \text{ pendiente} = 1\,590 * 1,05 = 1\,669,5$$

$$D = \left( \frac{1\,743,811 * 1\,669,5 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 80} \right)^{1/4,87} = 3,86 \Rightarrow \text{utilizar diámetros de 3" y 4"}$$

Determinar pérdidas:

$$hf = \frac{1\,743,811 * L * Q^{1,85}}{C^{1,87} * D^{4,87}}$$

$$hf_{4"} = \frac{1\,743,811 * 1\,669,5 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 4^{4,87}} = 67,38 \text{ m}$$

$$hf_{3"} = \frac{1\,743,811 * 1\,669,5 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 3^{4,87}} = 273,52 \text{ m}$$

Encontrar longitudes:

$$L_2 = L * \frac{H - hf_4}{hf_3 - hf_4} = \frac{80 - 67,38}{273,52 - 6,38} = 102,21 \text{ m}$$

$$L_1 = L - L_2 = 1\,669,5 - 102,21 = 1\,567,29 \text{ m}$$

$$\sum L = 102,21 + 1\,567,21 = 1\,669,5 \text{ m}$$

Determinar pérdidas reales:

$$hf_{4"} = \frac{1\,743,811 * 1\,567,29 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 4^{4,87}} = 63,26 \text{ m}$$

$$hf_{3"} = \frac{1\,743,811 * 102,21 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 3^{4,87}} = 16,75 \text{ m}$$

$$\sum hf = 63,26 + 16,75 = 80 \text{ m}$$

Tramo de C.R.P (cota 1420) a cota 1370:

Encontrar diámetros:

$$L_1 = 2\,930 - 1\,590 = 1\,340 \Rightarrow L = L_1 * \% \text{ desperdicio} = 1\,340 * 1,05 = 1\,407 \text{ m}$$

$$D = \left( \frac{1\,743,811 * 1\,407 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 50} \right)^{1/4,87} = 4,11 \Rightarrow \text{utilizar diámetros de 4" y 5"}$$

Determinar pérdidas:

$$hf_5'' = \frac{1\,743,811 * 1\,407 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 5^{4,87}} = 19,16 \text{ m}$$

$$hf_4'' = \frac{1\,743,811 * 1\,407 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 4^{4,87}} = 56,79 \text{ m}$$

Encontrar longitudes:

$$L_2 = L * \frac{H - hf_5}{hf_4 - hf_5} = \frac{50 - 19,16}{56,79 - 19,16} = 1\,153,12 \text{ m}$$

$$L_1 = L - L_2 = 1\,407 - 1\,153,12 = 253,88 \text{ m}$$

$$\sum L = 1\,153,12 + 253,88 = 1\,407 \text{ m}$$

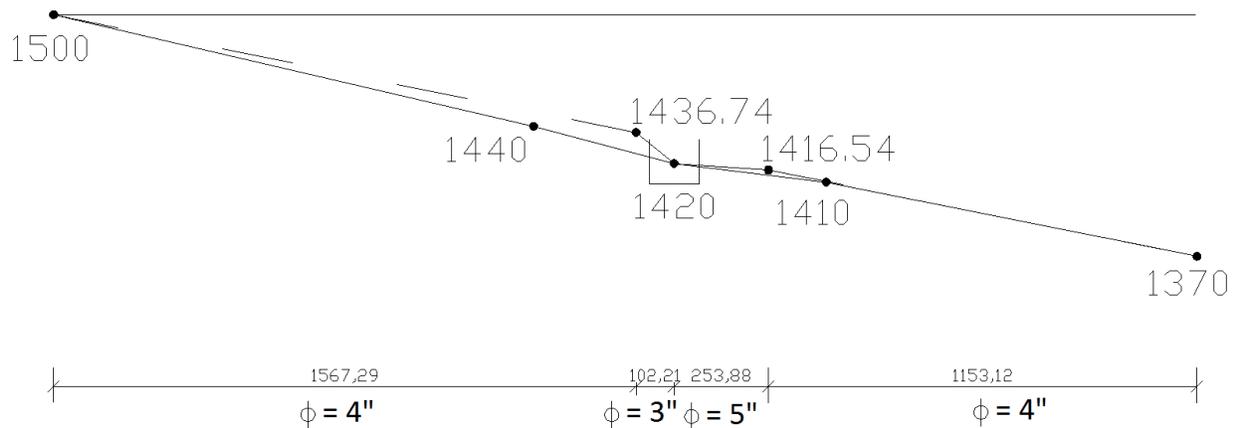
Determinar pérdidas reales:

$$hf_{4"} = \frac{1\,743,811 * 253,88 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 5^{4,87}} = 3,46 \text{ m}$$

$$hf_{3"} = \frac{1\,743,811 * 1\,153,12 * 18^{1,85}}{150^{1,87} * 4^{4,87}} = 46,54 \text{ m}$$

$$\sum hf = 3,46 + 46,54 = 50 \text{ m}$$

Figura 26. **Línea de presiones y cotas piezométricas en problema de aplicación**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### 2.3. Válvulas

Una válvula se puede definir como un instrumento que permite a un fluido ser dirigido en diferentes direcciones, con este se puede iniciar, regular o detener la circulación de un fluido por medio de una pieza movable que cierra total o parcialmente un conducto o varios. Una válvula es capaz de abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de

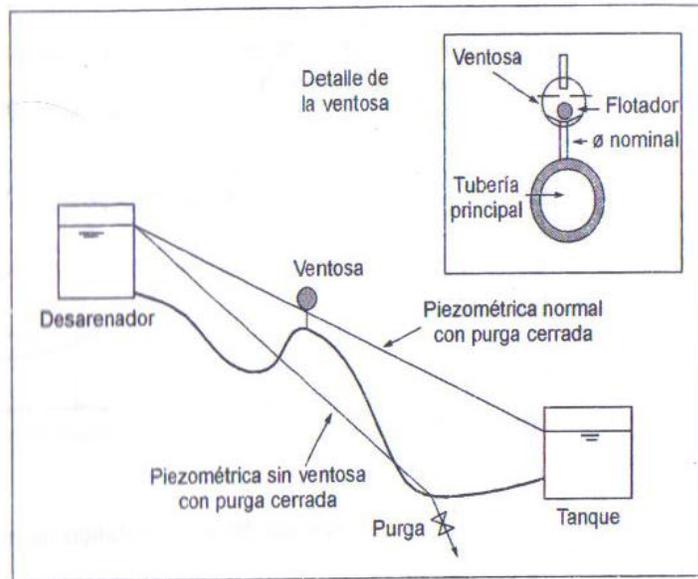
líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Existen varios tipos de válvulas, entre los cuales están:

### **2.3.1. De aire**

Son válvulas de expulsión y admisión de aire también llamadas ventosas, de funcionamiento automático, que deben ubicarse en los puntos altos de la conducción, siempre que la presión en dicho punto no sea muy alta o sea menor que la presión atmosférica. El acceso de aire en una tubería se produce cuando se inicia bruscamente la salida del agua, como en el caso de una ruptura, de no contarse con una válvula de aire, pueden producirse presiones negativas dentro de la misma y se puede llegar a romper la tubería si es de PVC, o a colapsarse si es de acero.

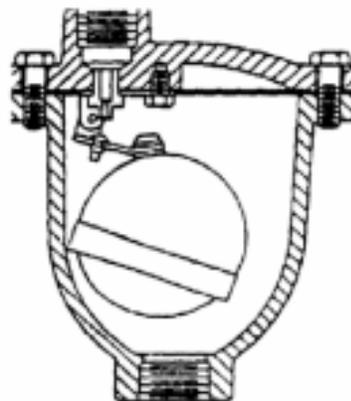
Estas válvulas tienen varias funciones: expeler el aire contenido dentro de la tubería durante el llenado; expulsar el aire que tiende a acumularse en los puntos altos; admitir aire en el caso de operación de una válvula de purga que pueda crear presiones negativas en la tubería (ver figura).

Figura 27. **Ubicación de la válvula de aire o ventosa y detalle de la válvula**



Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 211.

Figura 28. **Sección de válvula de aire**



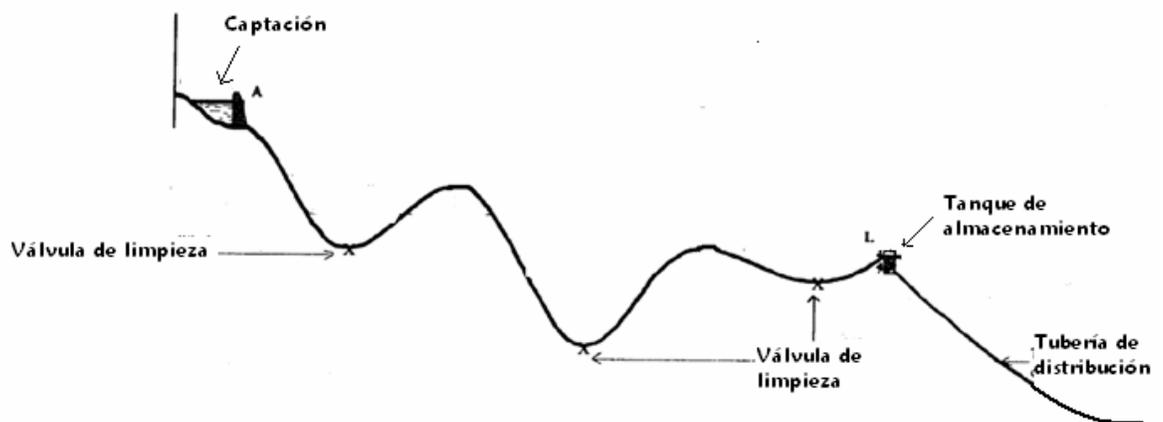
Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 149.

### 2.3.2. De limpieza

Este tipo de válvula se instala lateralmente, en todos los puntos bajos del trazado (no deben ubicarse en tramos planos), como se indica en la figura, donde haya posibilidad de obstrucción de la sección del flujo por acumulación de sedimentos que ingresaron en la tubería, facilitando así la limpieza de la misma.

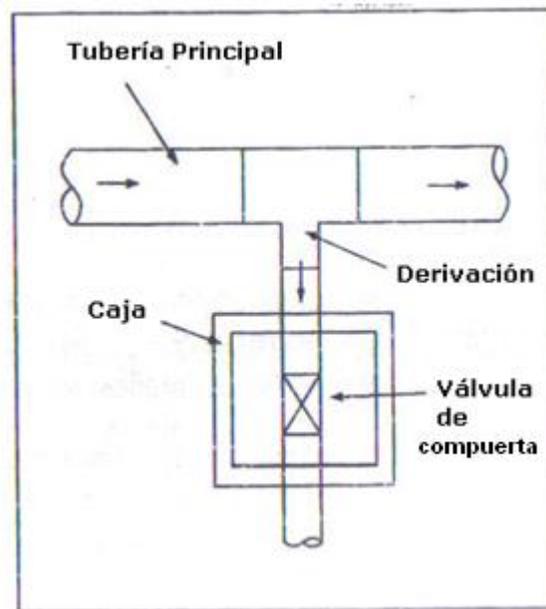
La derivación se hace por medio de una te cuyo diámetro mínimo es de 2" (5cm). Si la velocidad de salida es muy alta debe considerarse la colocación de una estructura de disipación de energía.

Figura 29. Ubicación de la válvula de limpieza



Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 151.

Figura 30. **Válvula de limpieza**



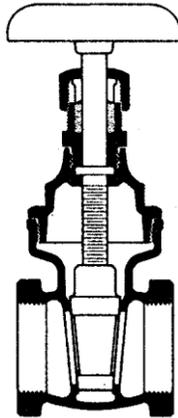
Fuente: LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. p. 210.

### 2.3.3. De compuerta

Además de las válvulas vistas anteriormente, se deberían instalar válvulas de compuerta al comienzo y al final de la conducción, en un diámetro igual al de la tubería. Estas abren y cierran completamente el flujo de agua en un sistema de conducción y es incorrecto utilizarlas para regular el flujo. Estas válvulas pueden ser de hierro fundido, bronce o plástico.

En sistemas de acueductos de gran tamaño, además de las válvulas inicial y final, deberán colocarse válvulas intermedias espaciadas como máximo cada 1 000 m, cuyo diámetro puede ser menor al de la tubería hasta en un 20 %, en el cual se deberá verificar la cavitación producida para altas velocidades.

Figura 31. **Válvula de compuerta**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>.

Consulta: noviembre de 2012.

Figura 32. **Válvula de compuerta de acero inoxidable**



Fuente: <http://empacaduras.site11.com/valvulas.php>. Consulta: noviembre de 2012.

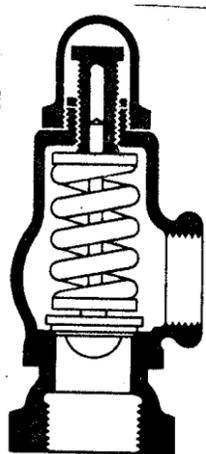
#### **2.3.4. De alivio**

También llamadas válvulas de seguridad son válvulas que se abren cuando se supera una presión predeterminada, disminuyendo así la presión y descargando el agua al sistema de alcantarillado o drenaje natural. Son útiles

para reducir la presión debido al golpe de ariete o por una inadecuada operación del sistema. Esta válvula se abre con lentitud conforme va aumentando la presión para regularla. Una válvula de alivio es de acción automática para tener regulación automática de la presión.

Las válvulas de seguridad se pueden encontrar en instalaciones industriales, comerciales y domésticas. En general son obligatorias en las instalaciones en las que circulen o se mantengan fluidos sometidos a cambios de presión y/o temperatura.

Figura 33. **Válvula de alivio**



Fuente: AGUILAR RUIZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de ingeniería sanitaria 1*. p. 153.

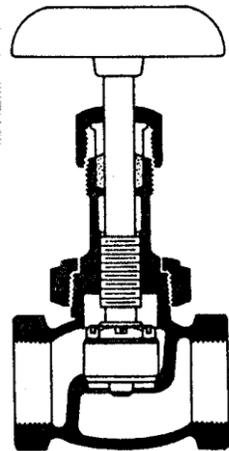
### **2.3.5. De globo**

Una válvula de globo es de vueltas múltiples, en la cual el cierre se logra por medio de un disco o tapón que cierra o corta el paso del fluido en un asiento que suele estar paralelo con la circulación en la tubería. Se utiliza para la estrangulación o regulación de circulación de fluido.

Las válvulas de globo se emplean para:

- Regular el caudal
- Estrangulación o regulación de circulación
- Corte positivo de gases o aire
- Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación

Figura 34. **Válvula de globo**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>.

Consulta: noviembre de 2012.

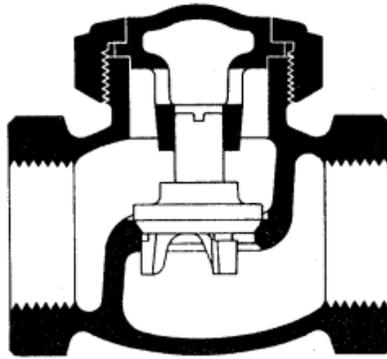
### **2.3.6. De retención**

Es similar a la válvula de globo, excepto que el disco se eleva con la presión normal de la tubería y se cierra por gravedad y la circulación inversa. La circulación del líquido en el sentido deseado abre la válvula y al invertirse la circulación, se cierra. La diferencia de presiones entre la entrada y la salida hace que la válvula esté abierta o cerrada.

La válvula de retención es recomendada para:

- Cuando hay cambios frecuentes de circulación en la tubería.
- Para uso con válvulas de globo y angulares.
- Para uso cuando la caída de presión a través de la válvula no es problema.

Figura 35. **Válvula de retención**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>.

Consulta: noviembre de 2012.

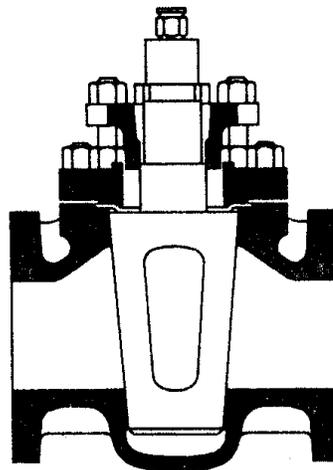
### **2.3.7. De cuadro**

También llamada válvula de macho. La válvula de macho es de  $\frac{1}{4}$  de vuelta; controla la circulación por medio de un macho cilíndrico o cónico que tiene un agujero en el centro, puede mover de la posición abierta a la cerrada mediante un giro de  $90^\circ$ . Este tipo de válvulas, de cierre rápido son apropiadas para una operación esporádica como válvula de control para líneas secundarias.

La válvula de cuadro es recomendada para:

- Servicio con apertura total o cierre total
- Accionamiento frecuente
- Baja caída de presión a través de la válvula
- Resistencia mínima a la circulación
- Cantidad mínima de fluido atrapado en la tubería

Figura 36. **Válvula de cuadro**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>.

Consulta: noviembre de 2012.

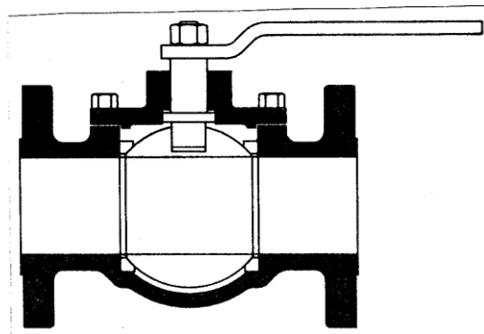
### **2.3.8. De bola**

Las válvulas de bola son de  $\frac{1}{4}$  de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola  $90^\circ$  y cierra el conducto.

La válvula de bola es recomendada para:

- Servicio de conducción y corte, sin estrangulación
- Cuando se requiere apertura rápida
- Para temperaturas moderadas
- Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación

Figura 37. **Válvula de bola**



Fuente: <http://www.monografias.com/trabajos11/valvus/valvus.shtml>.

Consulta: noviembre de 2012.

### **3. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN POR GRAVEDAD**

#### **3.1. Construcción de un sistema de conducción por gravedad**

La construcción del sistema consiste en un conjunto de tuberías utilizando PVC de ½ pulg de diámetro, de 315 psi. Está dotado de una bomba de ½ HP de potencia, para alimentar un tanque elevado, el cual suministrará flujo al sistema por gravedad.

En la parte de abajo se colocó otro tanque en donde succiona el agua la bomba y en el cual llega la tubería de conducción y el rebalse del tanque elevado. Dicho rebalse sirve para mantener una altura constante en el tanque elevado y un flujo constante en el sistema. Tanto la tubería de la bomba y la de rebalse son de 1 pulg de diámetro.

Los tanques, tanto elevado como superficial, son de plástico y el rebalse un embudo del mismo material.

El modelo consta de 4 tipos de sistemas a analizar:

- Conducción por gravedad
- Conducción por gravedad con sifón invertido
- Conducción con caja rompedpresión intermedia
- Conducción con caja distribuidora de caudales

La caja rompedora de presión está formada por una lámina de 1 mm de grosor, soldada por los lados y sellada para evitar fugas en ella. Se utilizó la misma caja para la caja distribuidora de caudales, donde el medio cuenta con los dos vertederos (ver detalle de caja). La tubería que entra y sale de la caja fue sellada con cemento de contacto y silicón para evitar fugas y darle rigidez a la conexión.

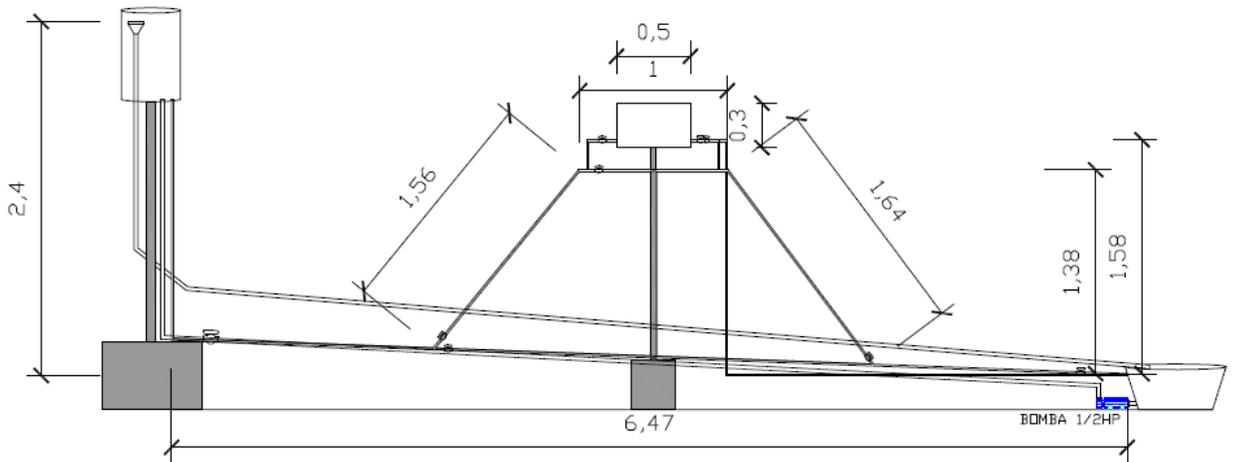
Se colocaron piezómetros a ciertas distancias para visualizar y analizar la línea piezométrica. Los piezómetros son de manguera de 3/16 de diámetro, transparente, para observar el agua en ellos. Las conexiones entre piezómetros y tubería son puntas de manguera con rosca, posteriormente sellados con silicón.

Se cuenta con un tablero, con una escala en milímetros, de dos metros de largo donde se colocaron los piezómetros, para hacer las lecturas correspondientes. Elaborado de madera e impreso en papel bond y luego emplastado para la protección.

### **3.1.1. Dimensionamiento**

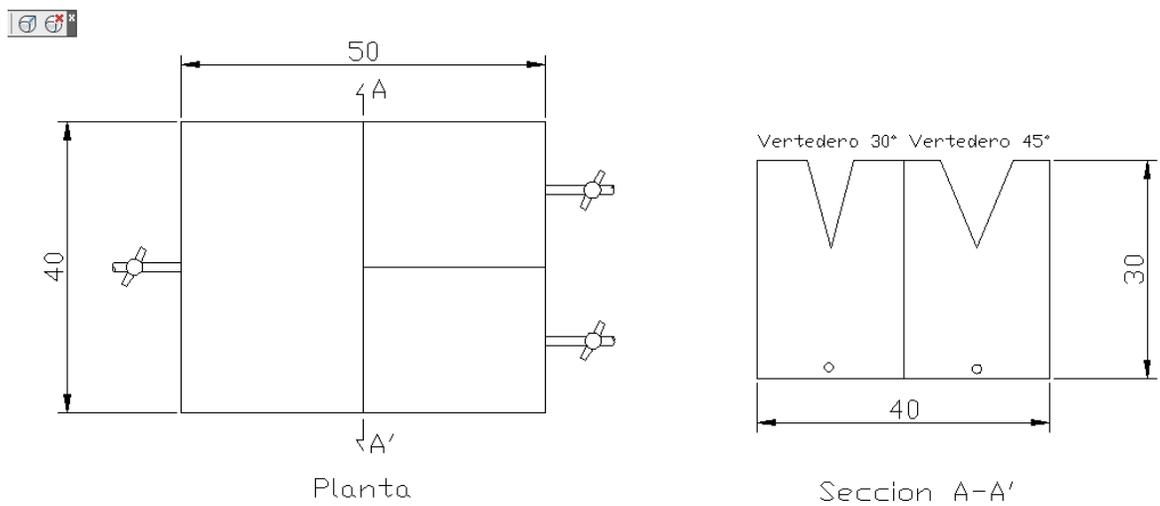
A continuación se muestra en las figuras el dimensionamiento del modelo, así como el de la caja distribuidora de caudales con los respectivos vertederos.

**Figura 38. Dimensionamiento del sistema de tuberías completo (medidas en metros)**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

**Figura 39. Planta y sección de caja distribuidora de caudales (medidas en centímetros)**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Figura 40. **Tanque elevado y caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Figura 41. **Tanque inferior y caja distribuidora con sifón invertido.**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

### 3.1.2. Ubicación de las obras de arte

La caja rompedora también se le da uso de caja distribuidora de caudales se encuentra ubicada en el centro del sistema y a una altura por debajo del tanque elevado. Además se encuentra en la parte alta del sifón invertido.

Figura 42. **Vista de la caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

La válvula reguladora se encuentra antes del tanque inferior, a 20 cms del mismo. Esta llave sirve para regular el caudal en el sistema y variar las alturas en los piezómetros.

Figura 43. **Válvula reguladora de sistema a escala de conducción**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

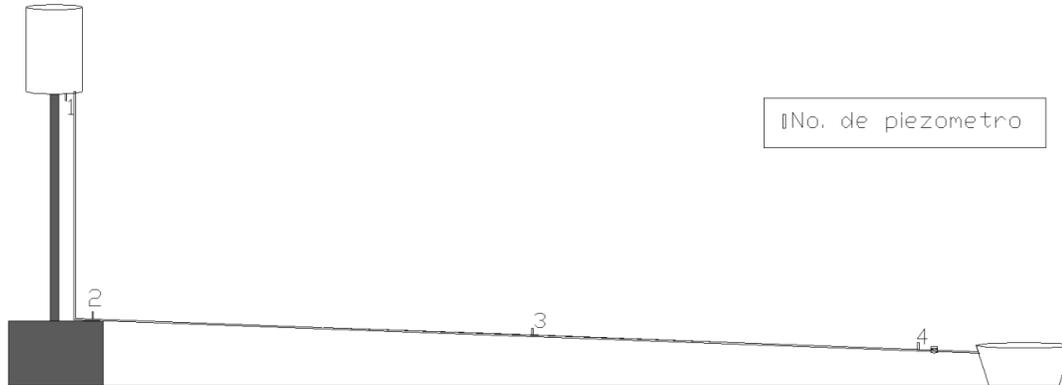
### **3.2. Aplicación del modelo en los distintos sistemas de conducción y deducción de la fórmula experimental para el cálculo de las pérdidas de energía**

Se presenta el modelo con los distintos sistemas de conducción a experimentar, la deducción de la fórmula experimental para encontrar las pérdidas de energía para cada modelo propuesto.

#### **3.2.1. Conducción por gravedad**

Este es el modelo más sencillo de analizar la conducción, desde el tanque elevado hasta un punto antes del tanque más bajo, en ese tramo hay cuatro piezómetros a lo largo de la tubería.

Figura 44. Esquema de conducción por gravedad simple



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Datos:

Volumen de aforo: 3 lts.

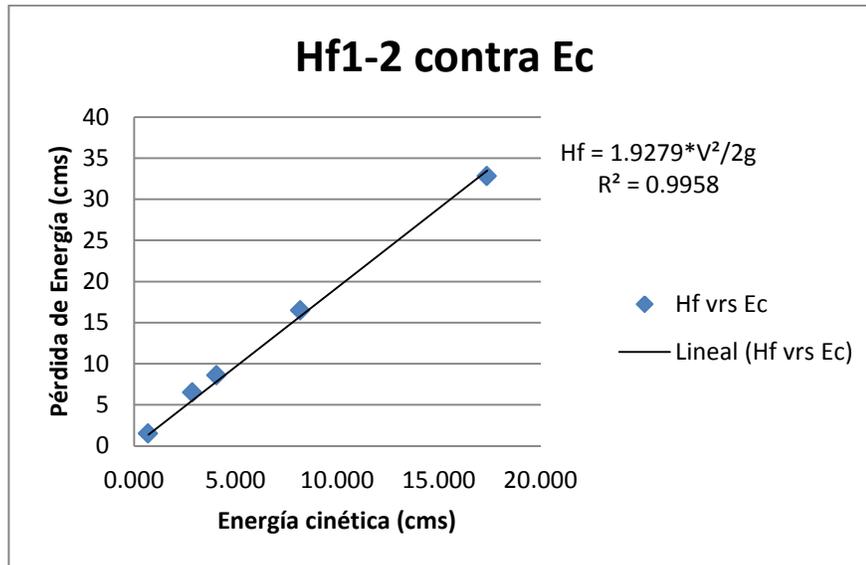
Tabla II. Datos y cálculos en la conducción por gravedad simple.

ITEM	ALTURA DE PIEZÓMETROS (CM)				TIEMPO DE LLENADO (SEG)			CAUDALES OBSERVADOS (CM <sup>3</sup> /S)		
	h1	h2	h3	h4	t1	t2	t3	Q1	Q2	Q3
1	103,7	102,2	100,8	99,2	63,94	63,66	63,47	46,92	47,13	47,27
2	103,7	97,2	92,2	87,1	31,25	31,5	31,8	96,00	95,24	94,34
3	103,7	95,1	88,6	82,1	26,78	26,47	26,34	112,02	113,34	113,90
4	103,7	87,2	74,8	62,5	18,82	18,78	18,47	159,40	159,74	162,43
5	103,7	70,9	47,3	24,3	12,72	12,91	12,86	235,85	232,38	233,28

ITEM	CAUDAL PROMEDIO (CM <sup>3</sup> /S)	PÉRDIDAS DE ENERGÍA PARCIALES (CM)				VELOCIDAD (CM/S)	ENERGÍA CINÉTICA (CM)	CAUDAL GENERADO (CM <sup>3</sup> /S)
		hf12	hf23	hf34	hf14			
1	47,10	1,5	1,4	1,6	4,5	37,184	0,705	54,85
2	95,19	6,5	5	5,1	16,6	75,146	2,878	105,35
3	113,08	8,6	6,5	6,5	21,6	89,270	4,062	120,17
4	160,52	16,5	12,4	12,3	41,2	126,720	8,184	165,97
5	233,84	32,8	23,6	23	79,4	184,593	17,367	230,41

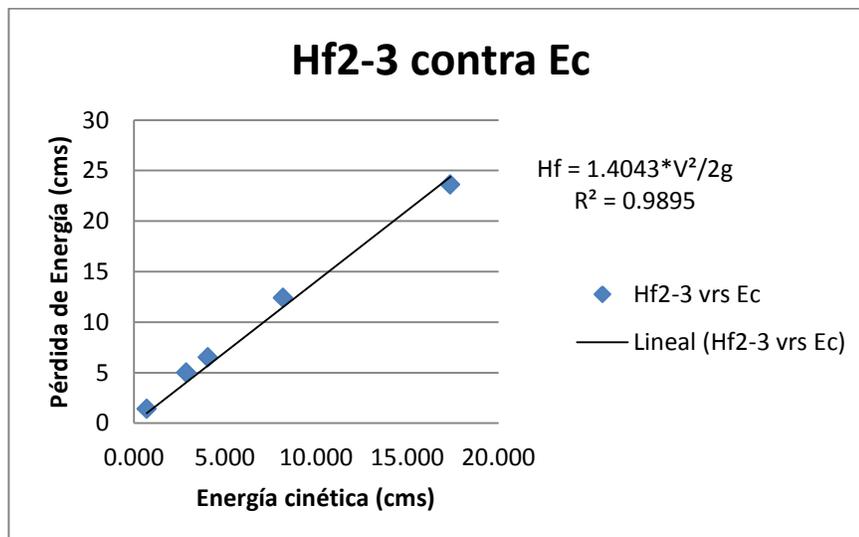
Fuente: elaboración propia.

Figura 45. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2



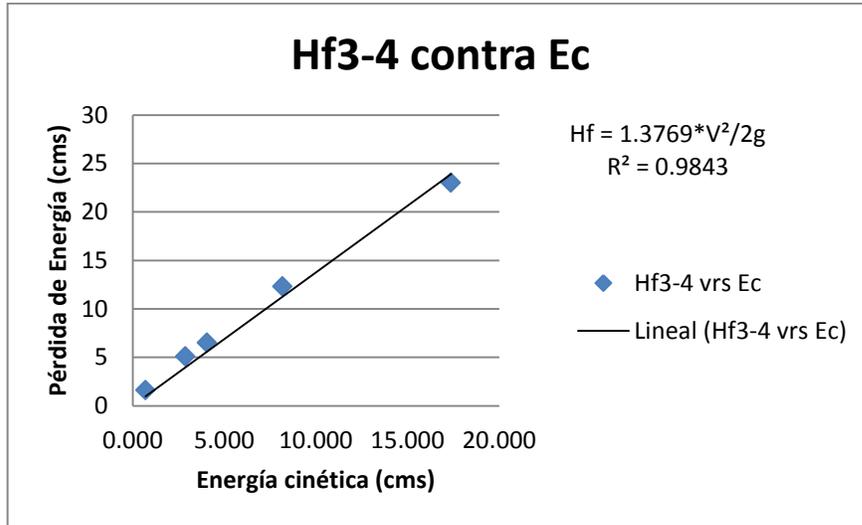
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3



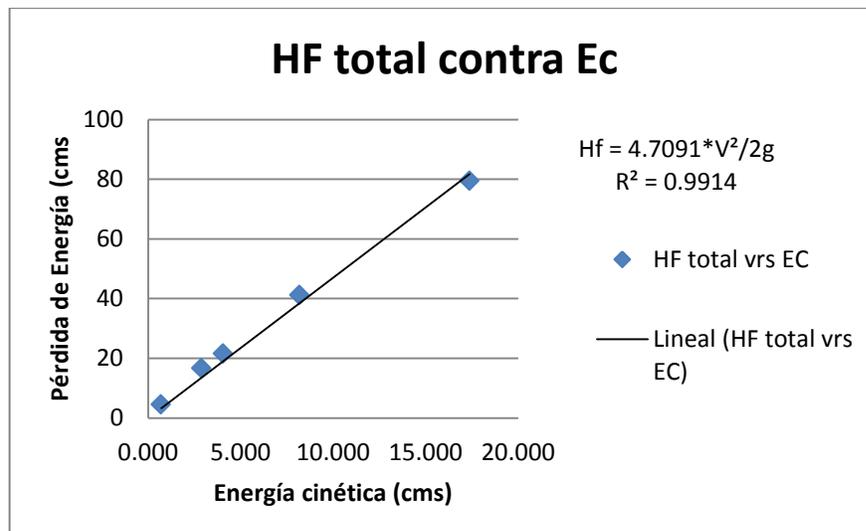
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 3-4



Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Obtención de la ecuación de la pérdida de energía con la pérdida total contra la energía cinética



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado:

$$Hf_{\text{total}} = 4,7091 * EC$$

$$Hf_{\text{total}} = 4,7091 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$Hf_{\text{total}} = 4,7091 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{\text{total}} = 4,7091 * \frac{Q^2}{2 * 981 * \left(\frac{\pi}{4} * (1,27)^2\right)^2}$$

$$Hf_{\text{total}} = 0,0014881 * Q^2$$

$$Q_{\text{generado}} = 25,923 * \sqrt{Hf_{\text{total}}}$$

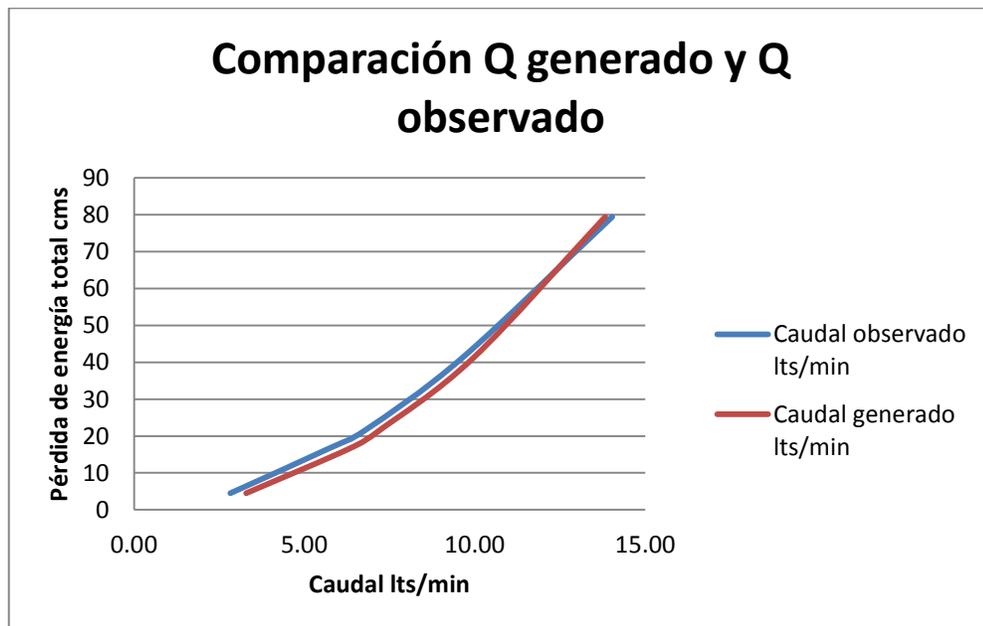
Comparación de caudales observado y generado en lts/min:

Tabla III. **Comparación de caudales**

Caudales en lts/min	
Q observado	Q generado
2,83	3,29
5,71	6,32
6,79	7,21
9,63	9,96
14,03	13,82

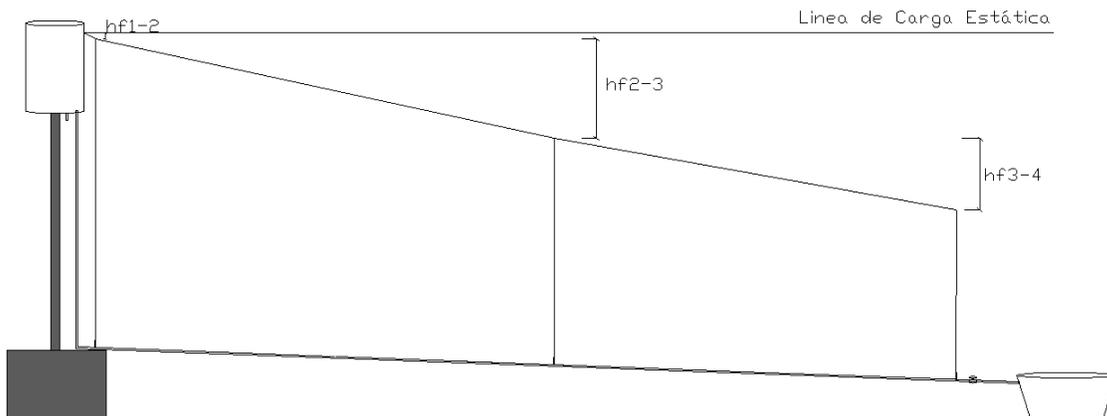
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. **Gráfica de comparación de caudales**



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. **Línea piezométrica en conducción simple**

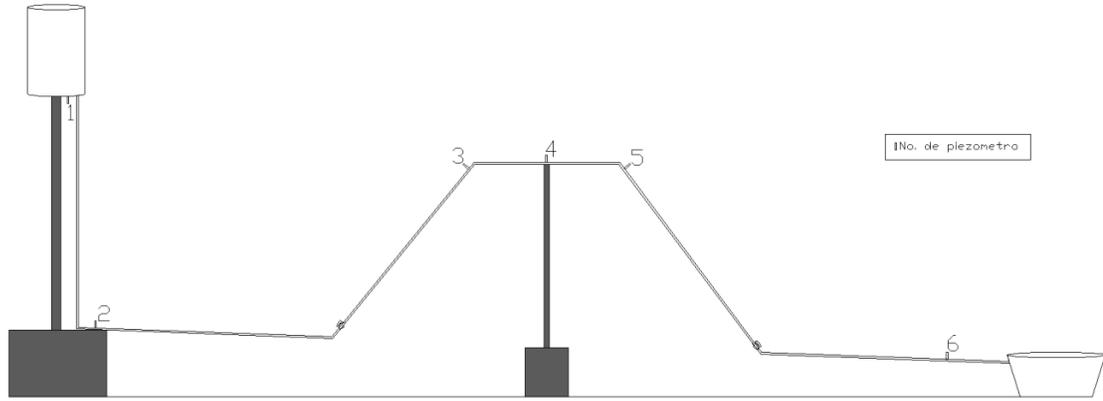


Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### 3.2.2. **Conducción por gravedad con sifón**

Este sistema de conducción por gravedad contiene un sifón en la parte media, como se muestra en la figura, que tiene seis piezómetros para el análisis. Este modelo es típico en los lugares de boca-costera del país, donde hay hondonadas.

Figura 51. Esquema de conducción por gravedad con sifón



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Datos:

Volumen de aforo= 3 lts

Tabla IV. Datos y cálculos de la conducción por gravedad con sifón

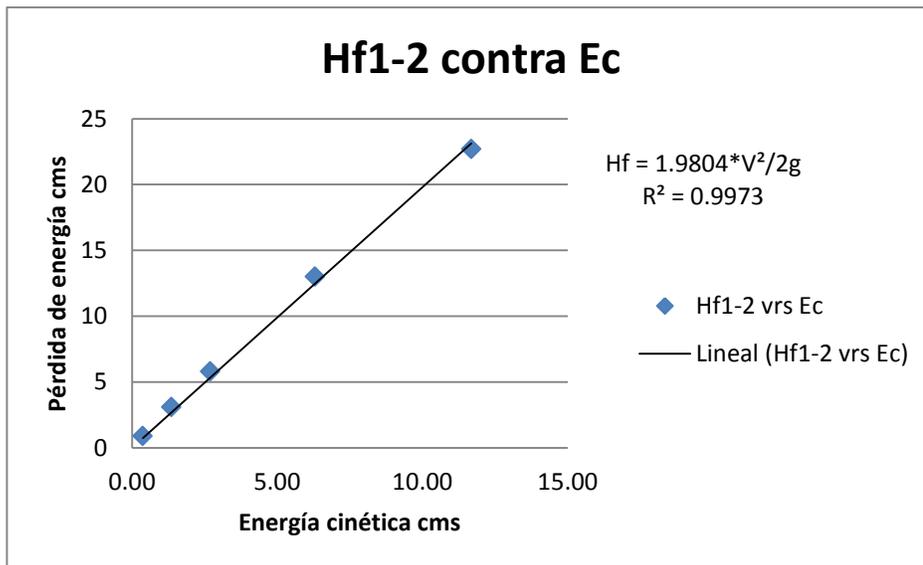
item	ALTURA DE PIEZÓMETROS (CM)						TIEMPO DE LLENADO (SEG)			CAUDALES OBSERVADOS CM <sup>3</sup> /S		
	h1	h2	h3	h4	h5	h6	t1	t2	t3	Q1	Q2	Q3
1	103,7	102,8	101,6	101,2	101	100,3	87,74	86,87	87,02	34,19	34,53	34,47
2	103,7	100,6	97	95,8	95,1	91,7	45,94	45,75	45,72	65,30	65,57	65,62
3	103,7	97,9	91,1	88,6	86,8	80,5	32,78	32,5	32,47	91,52	92,31	92,39
4	103,7	90,7	76,5	70,6	67	53,6	21,52	21,28	21,07	139,41	140,98	142,38
5	103,7	81	56,1	46,5	40	16,4	15,56	15,75	15,62	192,80	190,48	192,06

Continuación de la tabla IV.

item	CAUDAL PROMEDIO CM³/S	PÉRDIDAS DE ENERGÍA PARCIALES (CM)						VELOCIDAD (CM/S)	ENERGÍA CINÉTICA (CM)	CAUDAL GENERADO (CM³/S)
		hf12	hf23	hf34	hf45	hf56	hf16			
1	34,40	0,9	1,2	0,4	0,2	0,7	3,4	27,16	0,38	37,54
2	65,50	3,1	3,6	1,2	0,7	3,4	12	51,70	1,36	70,53
3	92,07	5,8	6,8	2,5	1,8	6,3	23,2	72,68	2,69	98,07
4	140,92	13	14,2	5,9	3,6	13,4	50,1	111,25	6,31	144,11
5	191,78	22,7	24,9	9,6	6,5	23,6	87,3	151,39	11,68	190,23

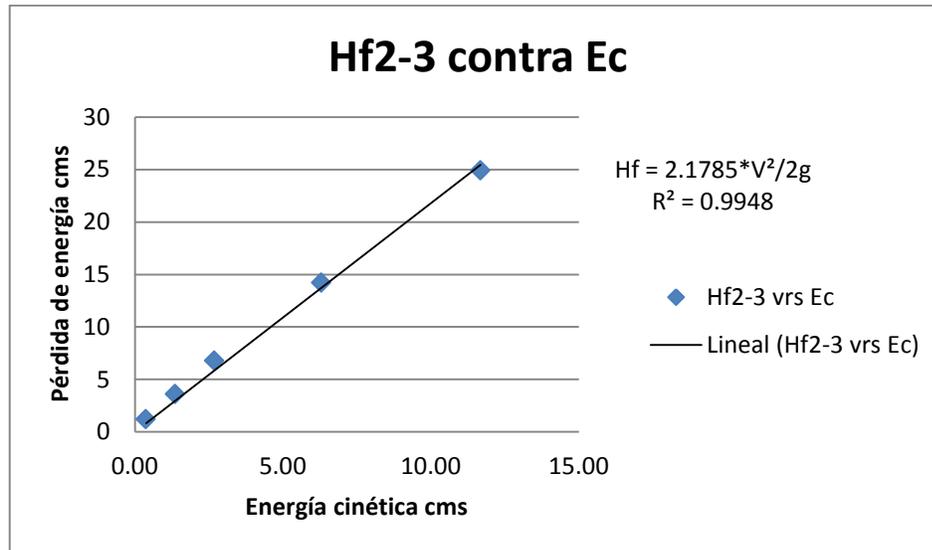
Fuente: elaboración propia.

Figura 52. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2



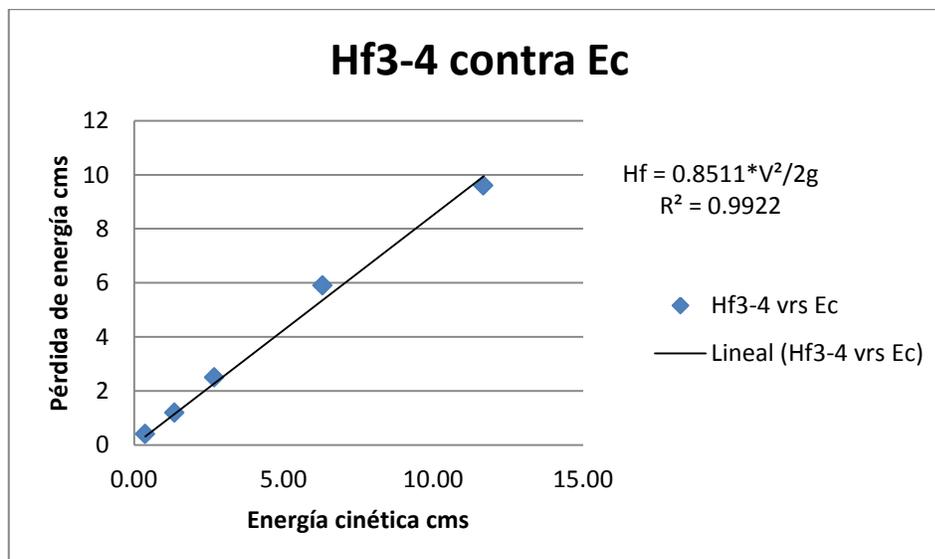
Fuente: elaboración propia.

Figura 53. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3



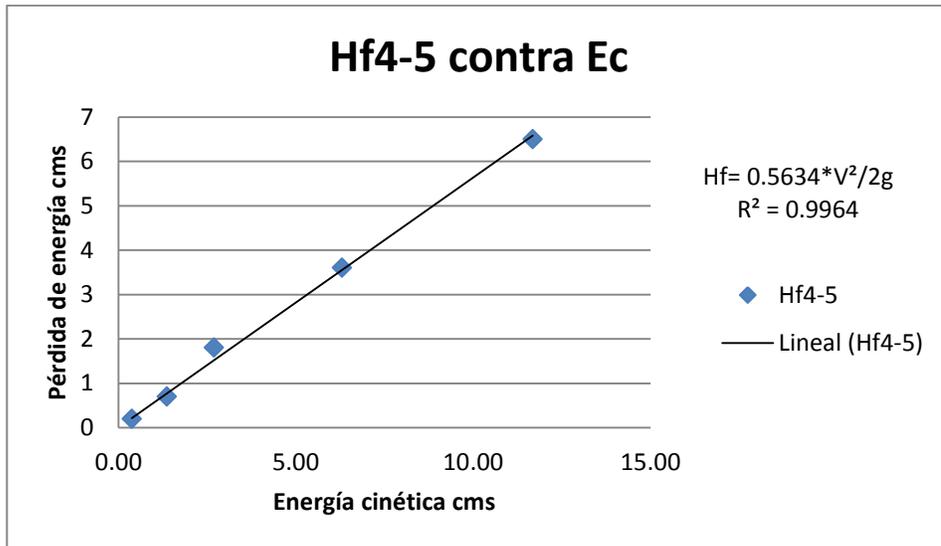
Fuente: elaboración propia.

Figura 54. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 3-4



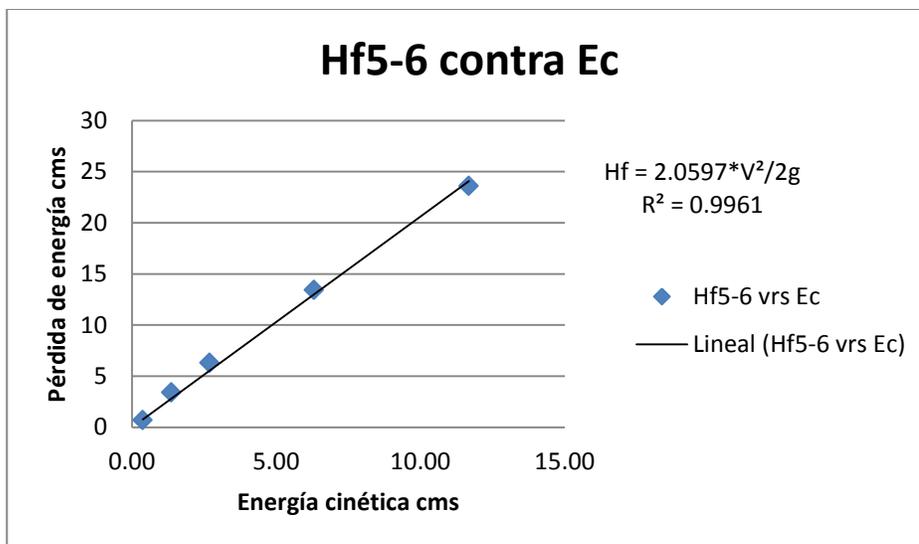
Fuente: elaboración propia.

Figura 55. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 4-5



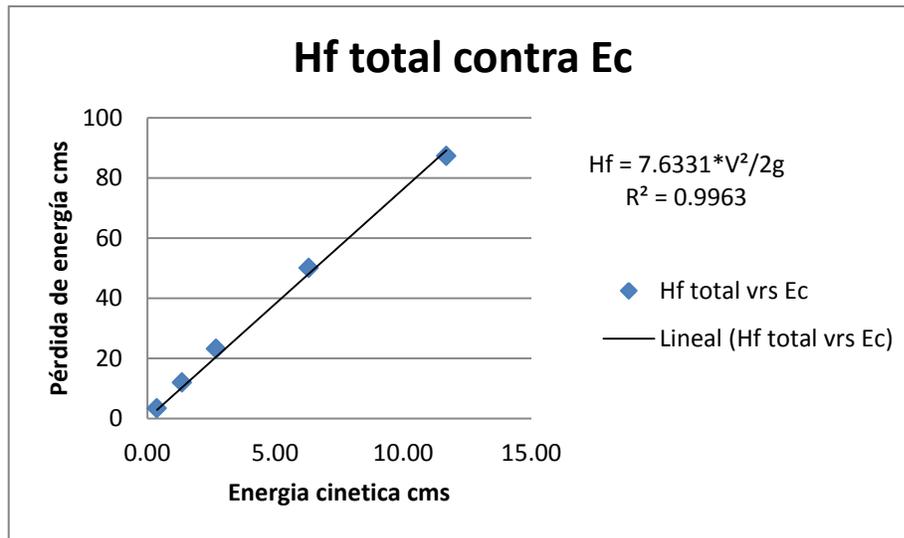
Fuente: elaboración propia.

Figura 56. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 5-6



Fuente: elaboración propia.

Figura 57. **Obtención de la ecuación de la pérdida de energía con la pérdida total contra la ecuación cinética**



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado:

$$Hf_{total} = 7,6331 * EC$$

$$Hf_{total} = 7,6331 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$Hf_{total} = 7,6331 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{\text{total}} = 7,6331 * \frac{Q^2}{2 * 981 * \left(\frac{\pi}{4} * (1,27)^2\right)^2}$$

$$Hf_{\text{total}} = 0,002412 * Q^2$$

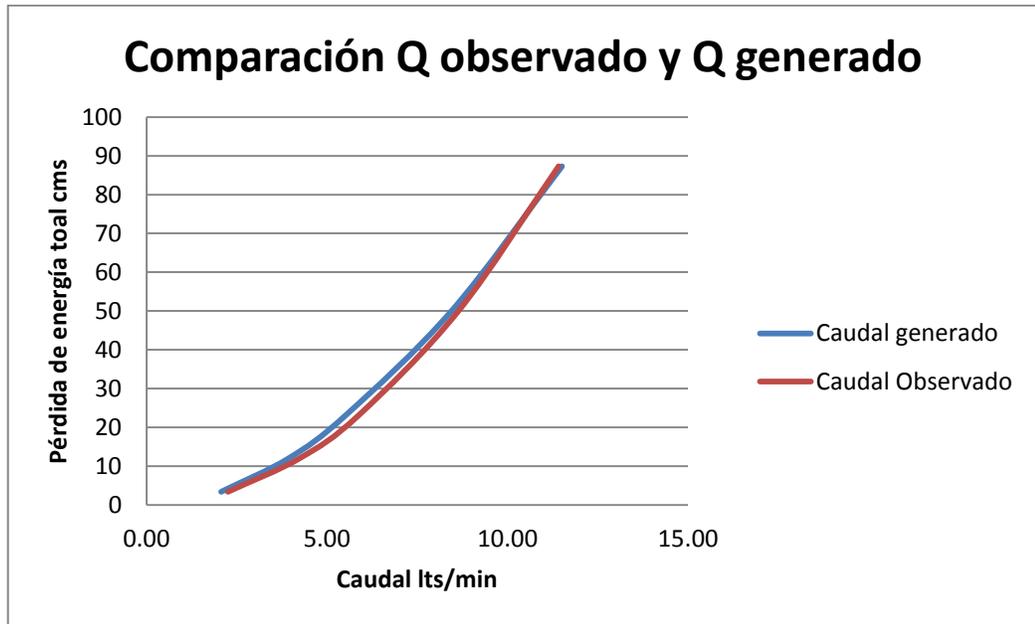
$$Q_{\text{generado}} = 20,36 * \sqrt{Hf_{\text{total}}}$$

Tabla V. **Comparación de caudales**

Caudales lts/min	
Q observado	Q generado
2,06	2,25
3,93	4,23
5,52	5,88
8,46	8,65
11,51	11,41

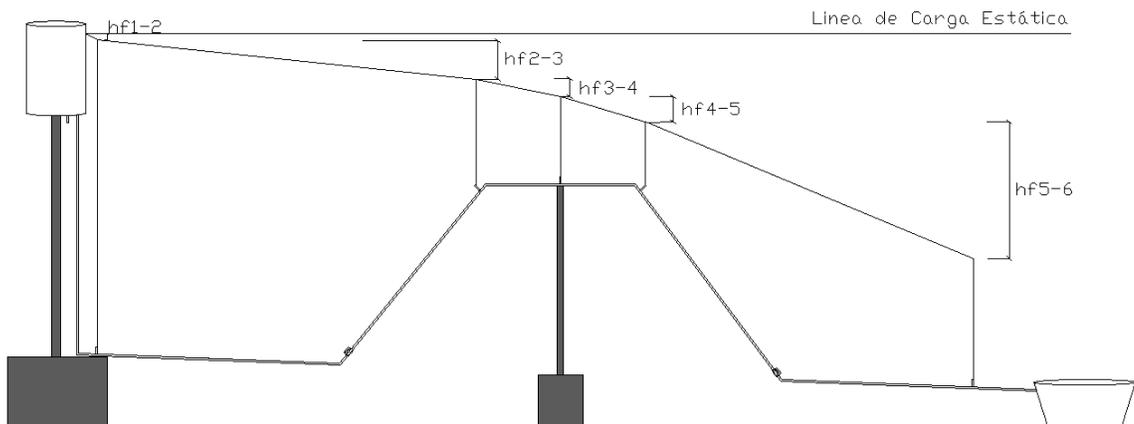
Fuente: elaboración propia.

Figura 58. Comparación del caudal observado y el generado



Fuente: elaboración propia.

Figura 59. Línea piezométrica de conducción con sifón

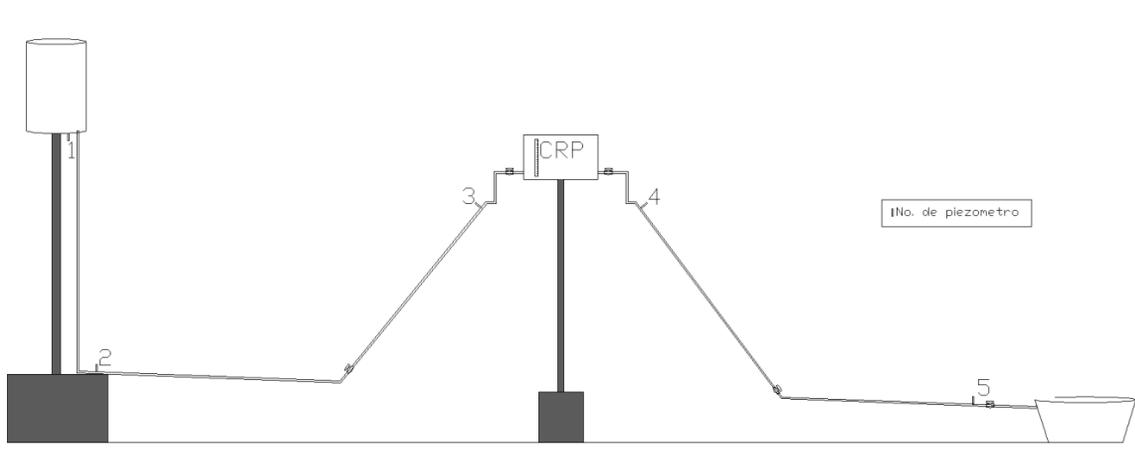


Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### 3.2.3. Conducción con caja rompedresión intermedia

En este sistema se modeló la conducción por gravedad con una caja rompedresión en la parte intermedia del sistema, este modelo tiene 6 piezómetros, incluyendo el que lleva la caja rompedresión, para medir la altura del tirante de agua.

Figura 60. Esquema de la conducción por gravedad con caja rompedresión intermedia



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Datos:

Volumen de aforo= 3 lts

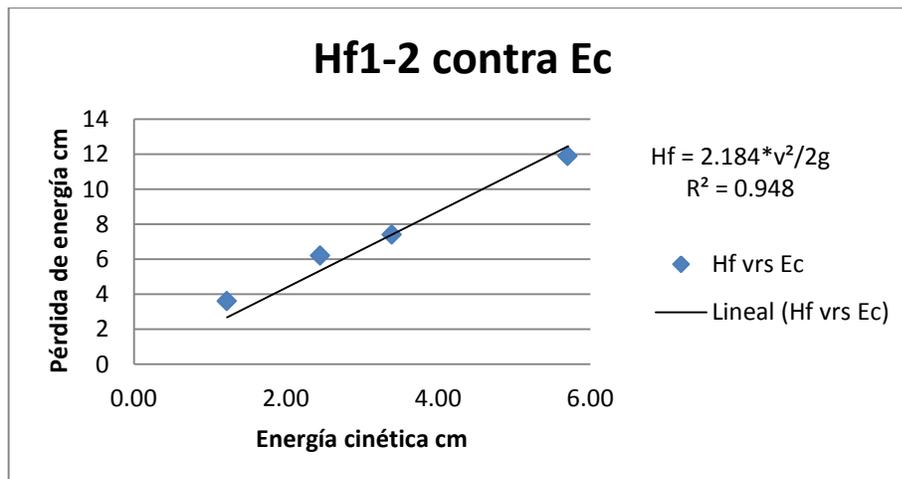
Tabla VI. **Datos y cálculos de la conducción con caja rompedresión**

Item	Altura de piezómetro (cms)						Tiempos de llenado (seg)			Caudal promedio (cms <sup>3</sup> /s)
	h1	h2	h3	Elevación CRP	h4	h5	t1	t2	t3	
1	203,5	191,6	178,5	146,8	48,7	6,4	22,74	21,91	22,53	134,002
2	203,5	196,1	188,1	146,7	75,8	44,9	28,82	28,95	29,32	103,347
3	203,5	197,3	192,4	146,6	98,1	76,3	34,91	33,6	33,94	87,871
4	203,5	199,9	197,6	146,5	120,5	110,7	48,08	48,43	48,42	62,100

Item	Pérdidas totales (cms)				Pérdida total 1-3 (cms)	Pérdida total crp-5 (cms)	Velocidad (cms/s)	Energía Cinética (cms)=V <sup>2</sup> /2g	Caudal generado en tramo 1-3	Caudal generado en tramo crp-5
	hf1-2	hf2-3	hfCRP-4	hf4-5						
1	11,9	13,1	98,1	42,3	25	140,4	105,8	5,70	133,05	129,33
2	7,4	8	70,9	30,9	15,4	101,8	81,6	3,39	104,43	110,13
3	6,2	4,9	48,5	21,8	11,1	70,3	69,4	2,45	88,66	91,52
4	3,6	2,3	26	9,8	5,9	35,8	49,0	1,22	64,64	65,31

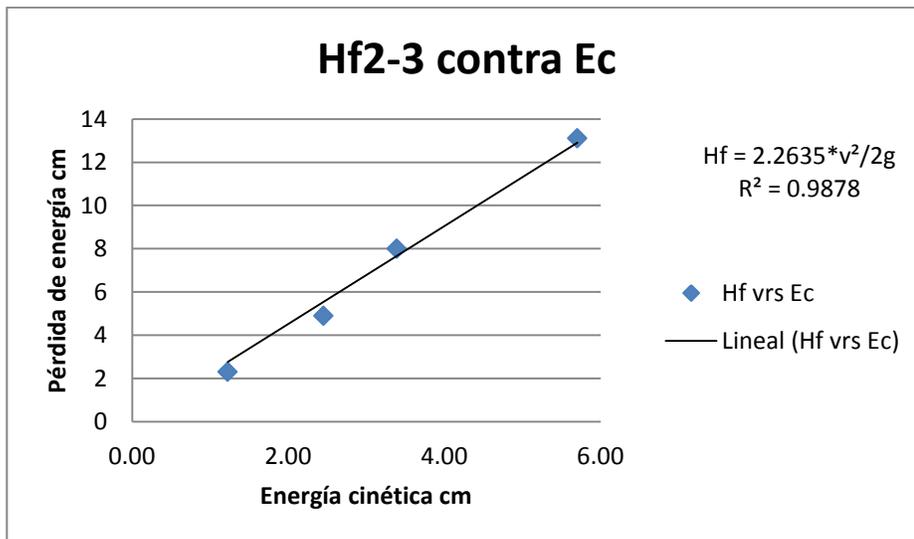
Fuente: elaboración propia.

Figura 61. **Pérdida de energía contra energía cinética tramo 1-2**



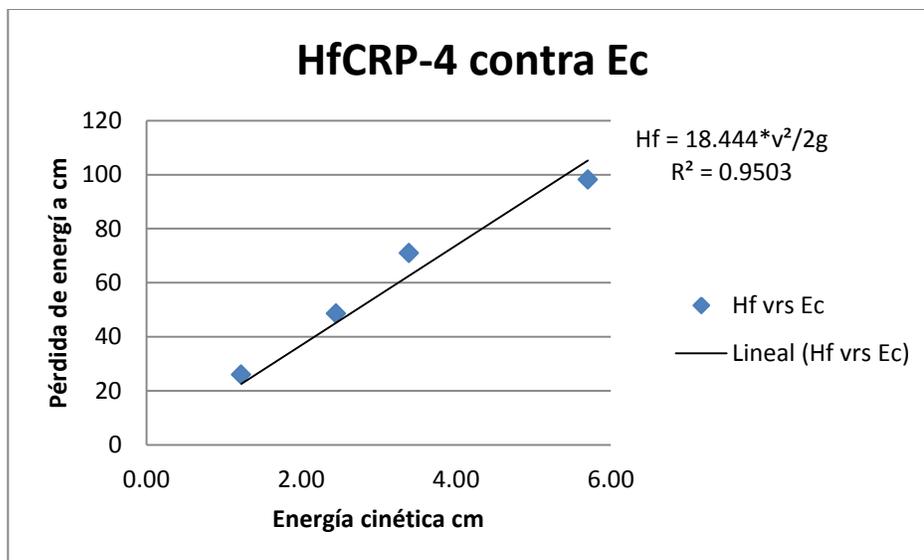
Fuente: elaboración propia.

Figura 62. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 2-3



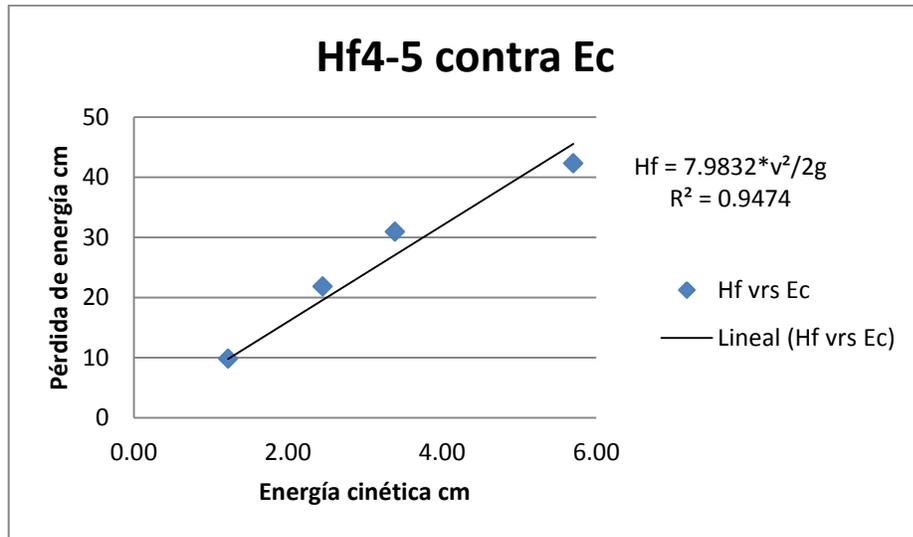
Fuente: elaboración propia.

Figura 63. Pérdida de energía contra energía cinética tramo CRP-4



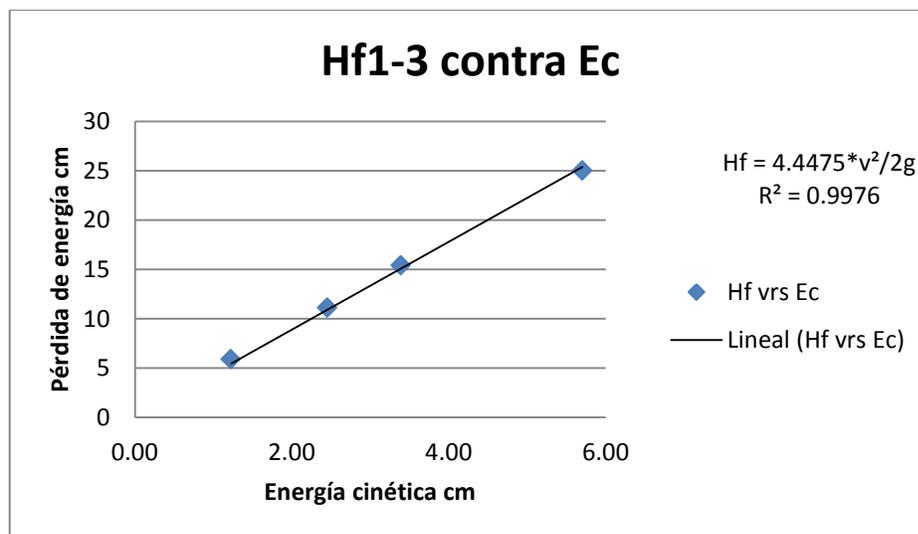
Fuente: elaboración propia.

Figura 64. Pérdida de energía contra energía cinética tramo 4-5



Fuente: elaboración propia.

Figura 65. Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo 1-3



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado para el tramo 1 a 3:

$$Hf_{\text{total}} = 4,4475 * EC$$

$$Hf_{\text{total}} = 4,4475 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

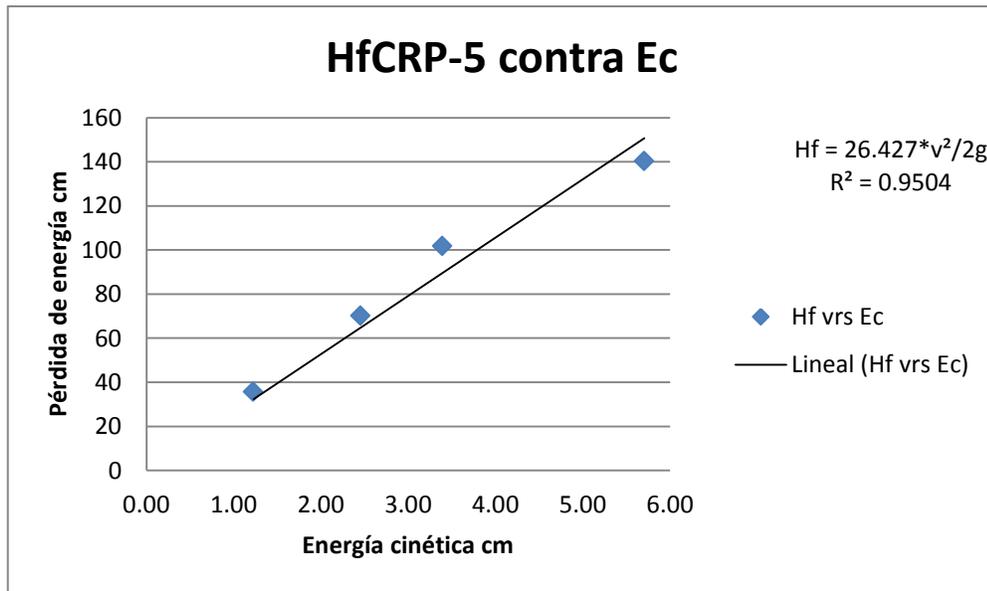
$$Hf_{1-3} = 4,4475 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{1-3} = 4,4475 * \frac{Q^2}{2 * 981 * \left(\frac{\pi}{4} * (1,27)^2\right)^2}$$

$$Hf_{1-3} = 0,0014054 * Q^2$$

$$Q_{\text{generado}} = 26,67 * \sqrt{Hf_{1-3}}$$

Figura 66. **Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo CRP-5**



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado para el tramo CRP a 5:

$$H_{f_{total}} = 26,427 * EC$$

$$H_{f_{total}} = 26,427 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

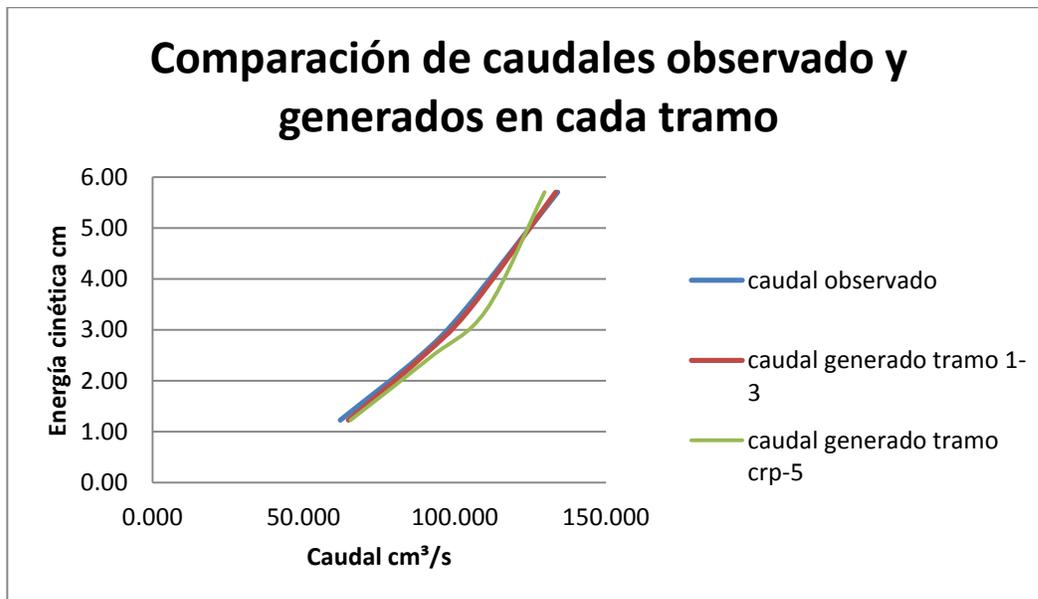
$$Hf_{crp-5} = 26,427 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{crp-5} = 26,427 * \frac{Q^2}{2 * 981 * (\frac{\pi}{4} * (1,27)^2)}$$

$$Hf_{crp-5} = 0,008351 * Q^2$$

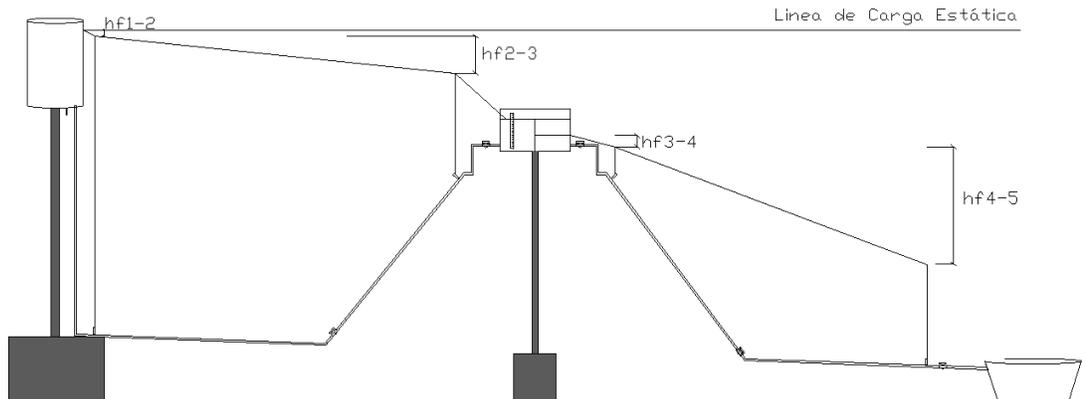
$$Q_{generado} = 10,943 * \sqrt{Hf_{crp-5}}$$

Figura 67. **Comparación de los caudales observado y los generados en el tramo 1-3 y CRP-5**



Fuente: elaboración propia.

Figura 68. **Línea piezométrica en la conducción con caja rompepresión**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### 3.2.4. **Calibración de la caja distribuidora de caudales**

La caja distribuidora de caudales tiene dos vertederos de pared delgada, de sección triangular, uno de  $30^\circ$  de apertura y el otro de  $45^\circ$ . Tiene dimensiones de  $50 \times 40 \times 30$  cm. Contiene un piezómetro paralelo a la caja para hacer las lecturas correspondientes de las alturas.

Figura 69. **Vista lateral de caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Figura 70. **Vista en planta de caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Figura 71. **Vista de vertederos en caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Pasos para la calibración de la caja distribuidora de caudales

- Cerrar la válvula reguladora y las otras que no pertenezcan al sistema de conducción con caja distribuidora de caudales.

Figura 72. **Cierre de válvula reguladora**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Llenar de agua el tanque inferior, al estar completamente lleno encender la bomba para alimentar al superior y seguir llenando el inferior.

Figura 73. **Llenado de tanque inferior**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Cuando el rebalse envíe agua, esperar que la caja distribuidora de caudales se llene también y dejar de suministrar agua al tanque.

Figura 74. **Rebalse del sistema**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Dejar que el agua en la caja llegue a los vértices de los vertederos y tomar la lectura en el piezómetro de la caja de cada uno, para obtener la altura inicial de cada vertedero.

Figura 75. **Piezómetro de caja distribuidora de caudales**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Cerrar completamente la válvula de uno de los vertederos y dejar abierto el otro vertedero a calibrar. Dejar que el sistema se estabilice.

Figura 76. **Válvulas de las tuberías que salen de vertederos**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Regular el caudal con la válvula reguladora, la que se encuentra antes de la caja y tomar nota de la altura en el piezómetro de la caja.

Figura 77. **Válvula reguladora que se encuentra antes de la caja**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Tomar nota de los piezómetros a lo largo de la línea de conducción.

Figura 78. **Tabla de piezómetros del sistema de conducción**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Aforar con el método volumétrico para un volumen conocido, 3 veces para una mejor exactitud en el caudal.

Figura 79. **Aforo volumétrico con recipiente de 3 lts**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Hacer el mismo procedimiento para diferentes aberturas en la válvula reguladora antes de la caja y tomar nota de los piezómetros de la línea y el de la caja, así como los tiempos del aforo volumétrico.

Figura 80. **Variación del tirante de agua que cae en un vertedero**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

- Repetir los pasos anteriores para el otro vertedero, con el fin de calibrarlo de igual manera.
- Trasladar los datos a las tablas de cálculos y calibrar los vertederos. Comparar los caudales con resultados de caudales teóricos.

## Vertedero de 45°

Datos:

Volumen de aforo = 3 litros

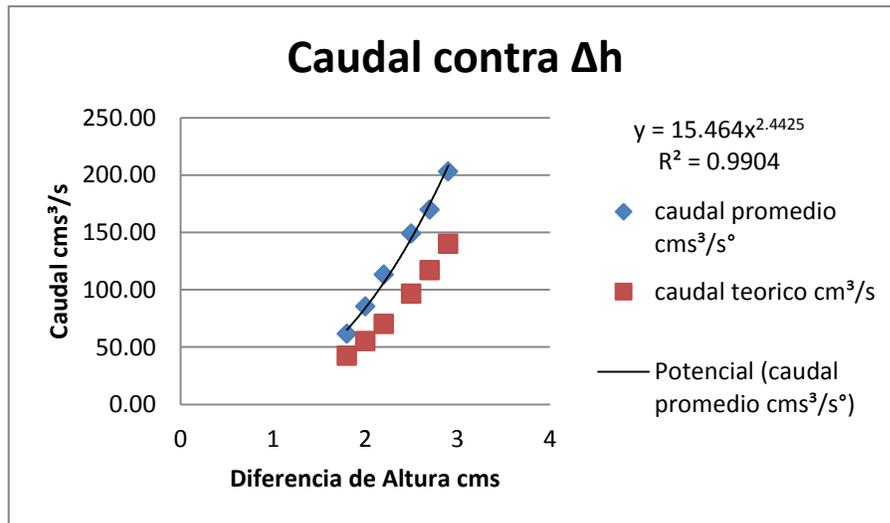
Altura inicial de tirante de agua = 18,2 cm

**Figura 81. Datos y cálculos de la calibración de la caja distribuidora de caudales, vertedero de 45°**

Item	Altura Agua (cms)	Tiempos de llenado (seg)			Caudales (cms <sup>3</sup> /s)			Caudal Promedio (cms <sup>3</sup> /s)	Diferencia de altura (cms)	Caudal teórico (cms <sup>3</sup> /s)
		t1	t2	t3	Q1	Q2	Q3			
1	20	48,53	49,63	48,12	61,82	60,45	62,34	61,54	1,8	42,54
2	20,2	35,78	34,97	34,56	83,85	85,79	86,81	85,48	2	55,35
3	20,4	25,78	26,56	27,19	116,37	112,95	110,33	113,22	2,2	70,25
4	20,7	19,88	19,82	20,75	150,91	151,36	144,58	148,95	2,5	96,70
5	20,9	17,64	17,86	17,47	170,07	167,97	171,72	169,92	2,7	117,22
6	21,1	14,72	14,84	14,72	203,80	202,16	203,80	203,26	2,9	140,14

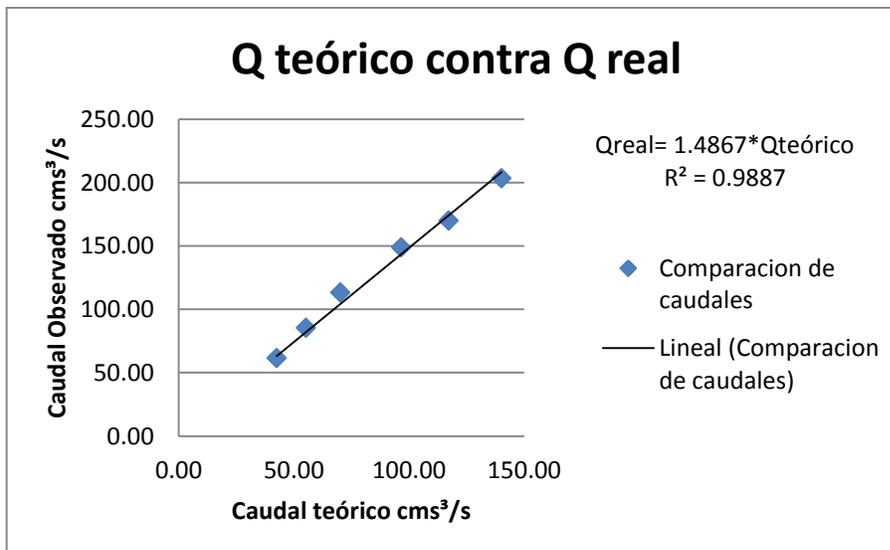
Fuente: elaboración propia.

Figura 82. **Curva de descarga para el vertedero de 45° para caudal teórico y observado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 83. **Correlación entre el caudal real y el caudal teórico**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Comparación de caudal observado, con ecuación experimental y ecuación corregida**

Ecuación experimental:  $Q_{ee} = 15,46 * \Delta h^{2,442}$

Caudal teórico:  $Q_t = 9,7853 * \Delta h^{2,5}$  de trabajo de graduación  
 Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de  
 aguas residuales, Luis Eduardo Portillo España, p. 36.

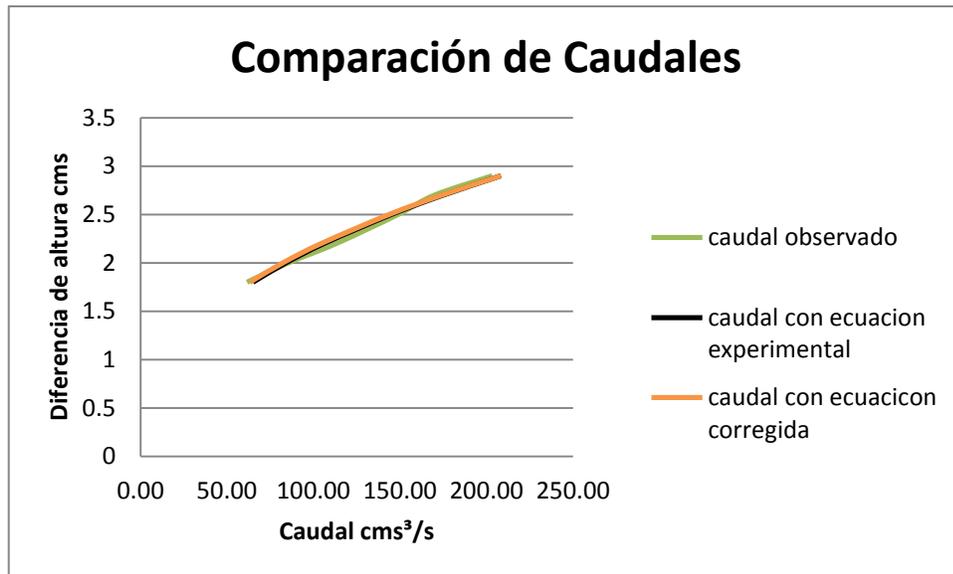
Ecuación corregida:  $Q_{ec} = 1,4867 * (Q_{teórico})$

$$Q_{ec} = 1,4867 * (9,7853 * \Delta h^{2,5})$$

<b>Caudal observado cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal con ecuación experimental cm<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal con ecuación corregida cm<sup>3</sup>/s</b>
61,54	64,99	63,24
85,48	84,06	82,29
113,22	106,09	104,44
148,95	144,97	143,76
169,92	174,96	174,26
203,26	208,32	208,35

Fuente: elaboración propia.

Figura 84. **Comparación de caudal real observado, con ecuación experimental y ecuación corregida**



Fuente: elaboración propia.

Vertedero de  $30^\circ$

Datos:

Volumen de aforo = 3 litros

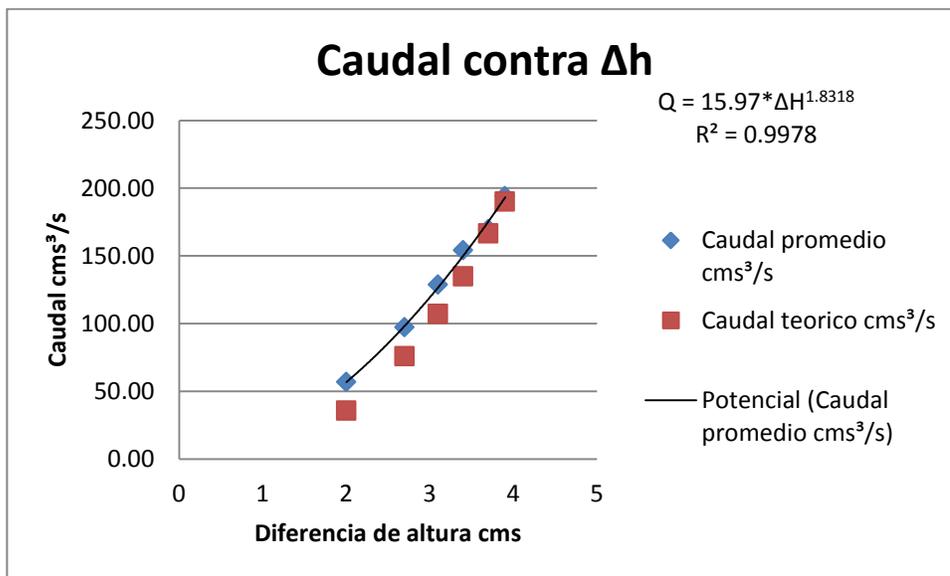
Altura inicial de tirante de agua = 17,6 cms

Tabla VIII. **Datos y cálculos de la calibración de la caja distribuidora de caudales para el vertedero de 30°**

Item	Altura Agua (cms)	Tiempos de llenado (seg)			Caudales (cms <sup>3</sup> /s)			Caudal Promedio (cms <sup>3</sup> /s)	Diferencia de altura (cms)	Caudal teórico (cms <sup>3</sup> /s)
		t1	t2	t3	Q1	Q2	Q3			
1	19,6	52,51	52,82	53,21	57,13	56,80	56,38	56,77	2	35,81
2	20,3	30,65	30,83	31	97,88	97,31	96,77	97,32	2,7	75,83
3	20,7	23,11	22,98	23,77	129,81	130,55	126,21	128,86	3,1	107,10
4	21	19,66	19,22	19,47	152,59	156,09	154,08	154,25	3,4	134,93
5	21,3	17,44	17,99	17,61	172,02	166,76	170,36	169,71	3,7	166,69
6	21,5	15,52	15,45	15,38	193,30	194,17	195,06	194,18	3,9	190,14

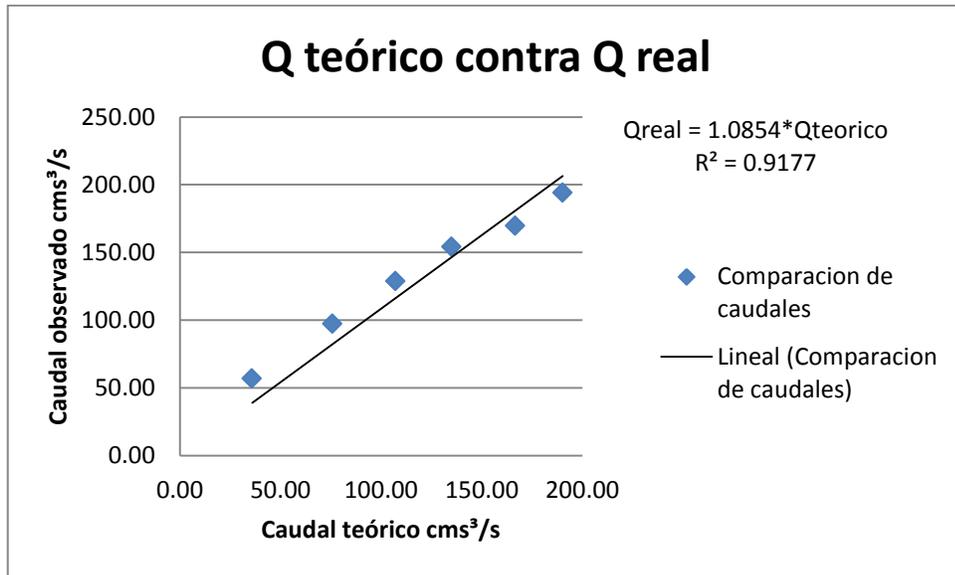
Fuente: elaboración propia.

Figura 85. **Curva de descarga para el vertedero de 30° para caudal teórico y observado**



Fuente: elaboración propia.

Figura 86. **Correlación entre el caudal real y el caudal teórico**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Comparación de caudal observado, con ecuación experimental y con ecuación corregida**

Ecuación experimental:  $Q_{ee} = 15,97 * \Delta h^{1,8318}$

Caudal teórico:  $Q_t = 6,33 * \Delta h^{2,5}$  de trabajo de graduación  
 Calibración de vertederos de pared delgada para plantas de tratamiento de  
 aguas residuales, Luis Eduardo Portillo España, p. 36.

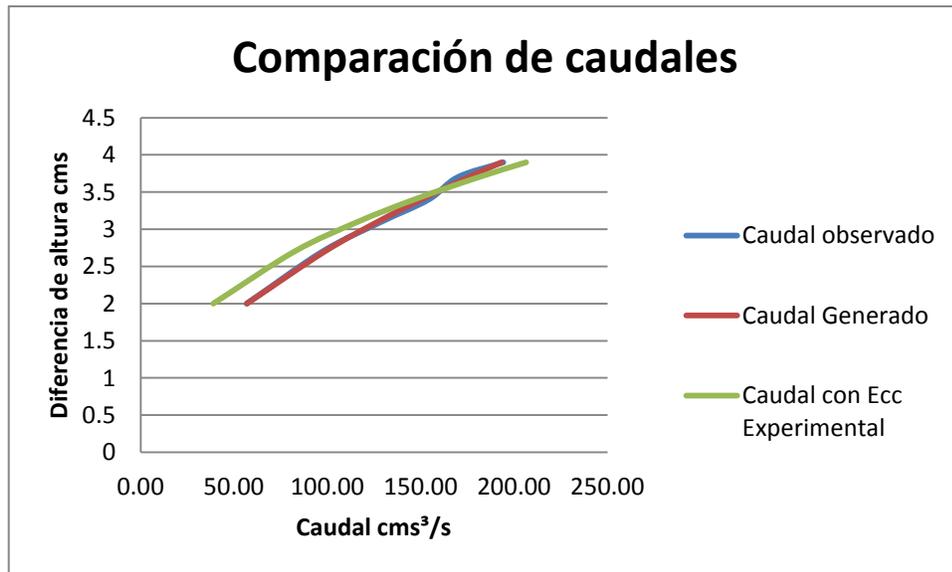
Ecuación corregida:  $Q_{ec} = 1,0854 * (Q_{teórico})$

$$Q_{ec} = 1,0854 * (6,33 * \Delta h^{2,5})$$

<b>Caudal observado cm³/s</b>	<b>Caudal con ecuación experimental cm³/s</b>	<b>Caudal con ecuación corregida cm³/s</b>
56,77	56,85	38,87
97,32	98,51	82,30
128,86	126,88	116,25
154,25	150,27	146,45
169,71	175,44	180,92
194,18	193,20	206,37

Fuente: elaboración propia.

Figura 87. **Comparación de caudal real observado, con ecuación experimental y ecuación corregida**

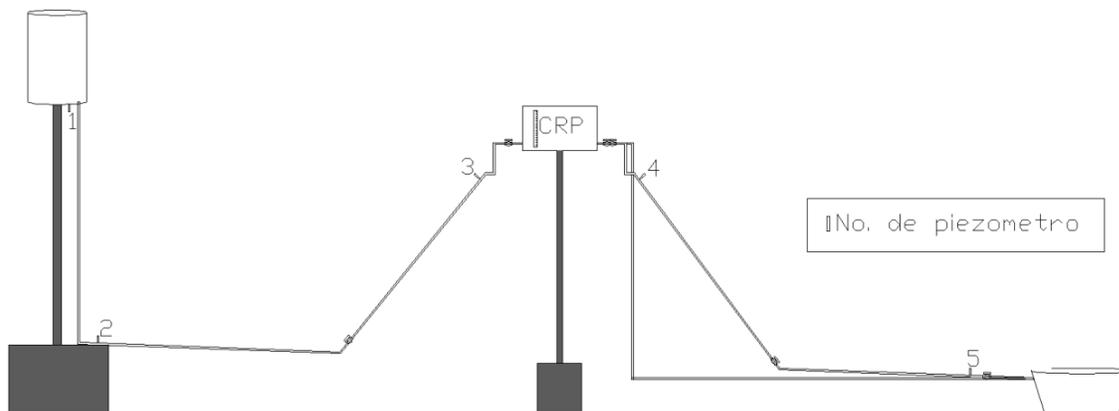


Fuente: elaboración propia.

### 3.2.5. Conducción con caja distribuidora de caudales

En este sistema se utilizó la misma caja que se usó para la rompepresión, con la diferencia que en este se utilizan los dos vertederos y se afora en las dos tuberías que salen de la caja, para la medición de la distribución del caudal.

Figura 88. Esquema de conducción con caja distribuidora de caudales



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

Datos:

Volumen de Aforo= 3lts

Tabla X. **Datos y cálculos de conducción con caja distribuidora de caudales**

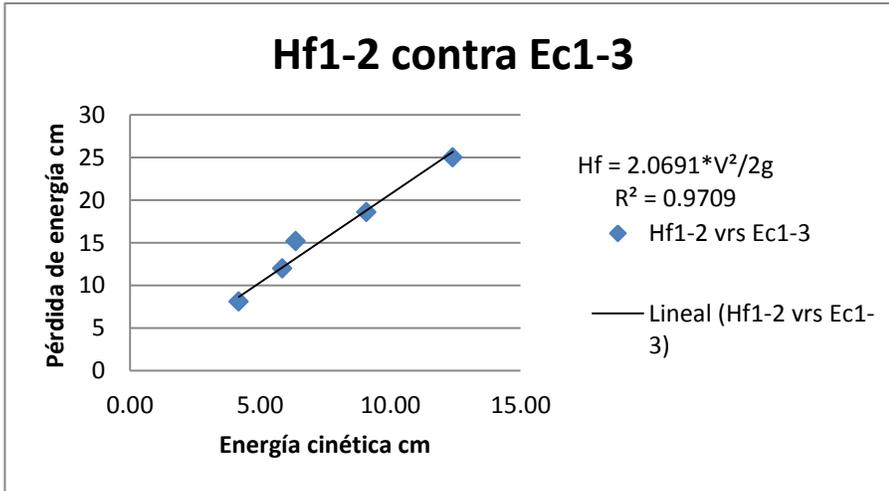
Item	Altura de piezómetros						Pérdidas de energía					
	h1	h2	h3	hcrp	h4	h5	hf1-2	hf2-3	hf1-3	hfcrp-4	hf4-5	hfcrp-5
1	203,5	195,4	186,8	145,1	135,2	109,6	8,1	8,6	16,7	9,9	25,6	35,5
2	203,5	191,5	180,8	145,3	133,5	104,3	12	10,7	22,7	11,8	29,2	41
3	203,5	188,3	172,6	145,4	131,7	93,9	15,2	15,7	30,9	13,7	37,8	51,5
4	203,5	184,9	165,4	145,6	127,2	79,6	18,6	19,5	38,1	18,4	47,6	66
5	203,5	178,5	152,2	145,7	120,8	58,7	25	26,3	51,3	24,9	62,1	87

Item	Tiempos de llenado Vertedero 30°			Tiempos de llenado Vertedero 45°			Caudales Observados cm <sup>3</sup> /s		Caudales generados cm <sup>3</sup> /s	
	t1	t2	t3	t1	t2	t3	Qv30°	Qv45°	Qv30°	Qv45°
1	50,52	51,5	50,53	53,53	54,03	53,89	59,00	55,75	51,75	48,74
2	47,38	47,14	47,17	41,53	41,47	41,64	63,52	72,21	62,17	64,99
3	44,78	43,25	44,62	40,34	40,72	40,94	67,86	73,77	67,69	74,16
4	39,41	39,07	39,28	32,37	32,28	32,43	76,43	92,71	79,39	94,70
5	35,44	34,94	35,02	26,69	26,71	26,83	85,39	112,18	85,56	106,09

Item	Velocidad 1-3 (cms/s)	Velocidad crp-5 (cms/s)	Energía Cinética 1-3 (cms)	Energía Cinética crp-5 (cms)
1	90,58	46,58	4,18	1,11
2	107,14	50,14	5,85	1,28
3	111,81	53,57	6,37	1,46
4	133,52	60,33	9,09	1,86
5	155,96	67,41	12,40	2,32

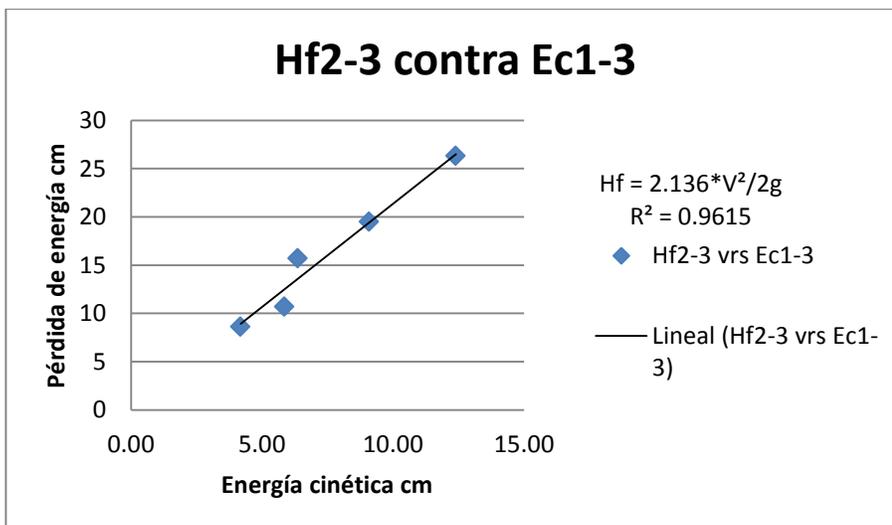
Fuente: elaboración propia.

Figura 89. Pérdida de energía en tramo 1-2 contra energía cinética en tramo 1-3



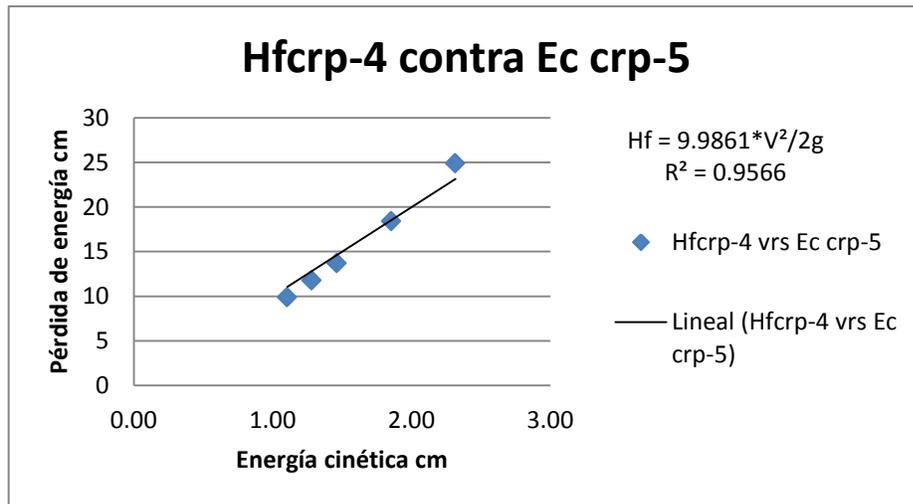
Fuente: elaboración propia.

Figura 90. Pérdida de energía en tramo 2-3 contra energía cinética en tramo 1-3



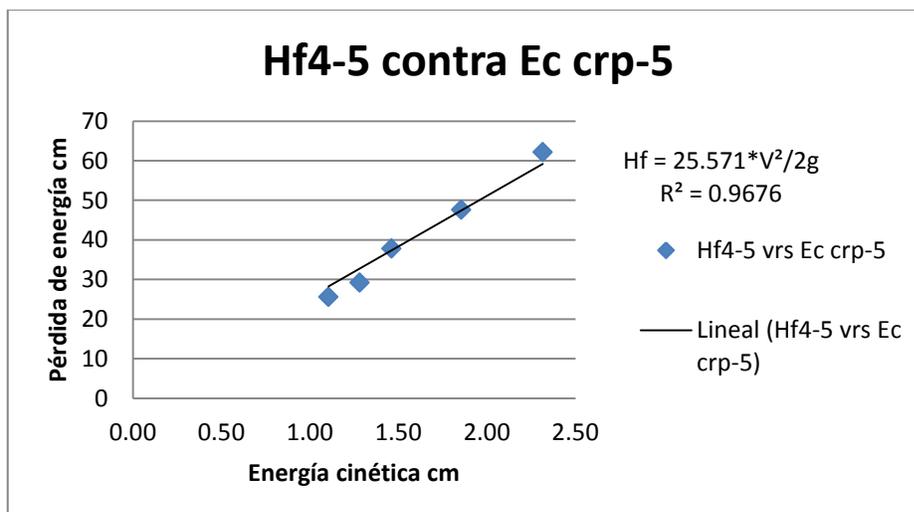
Fuente: elaboración propia.

Figura 91. **Pérdida de energía en tramo crp-4 contra energía cinética en tramo crp-5**



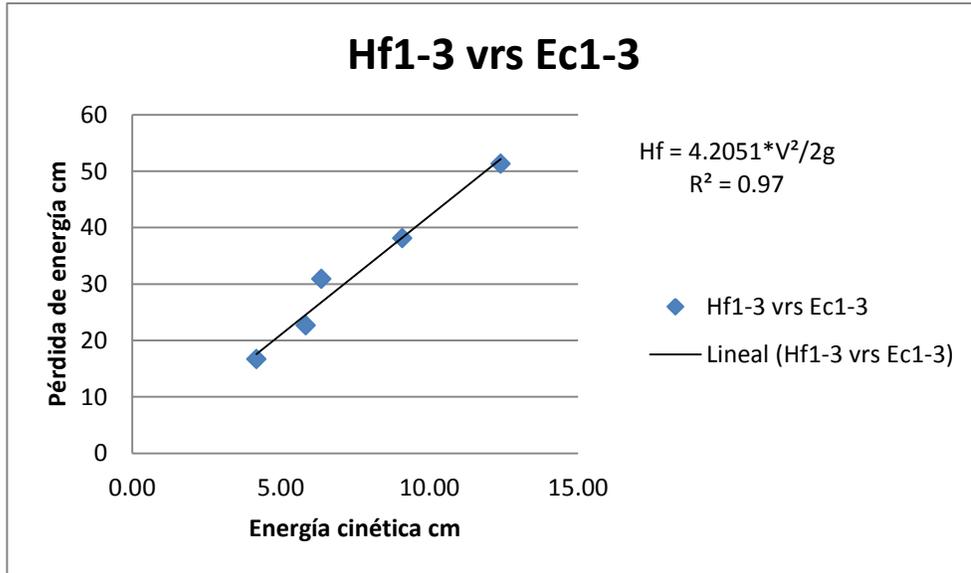
Fuente: elaboración propia.

Figura 92. **Pérdida de energía en tramo 4-5 contra energía cinética en tramo crp-5**



Fuente: elaboración propia.

Figura 93. **Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo 1-3**



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado para el tramo 1 a 3:

$$H_{f_{total}} = 4,2051 * EC$$

$$H_{f_{total}} = 4,2051 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

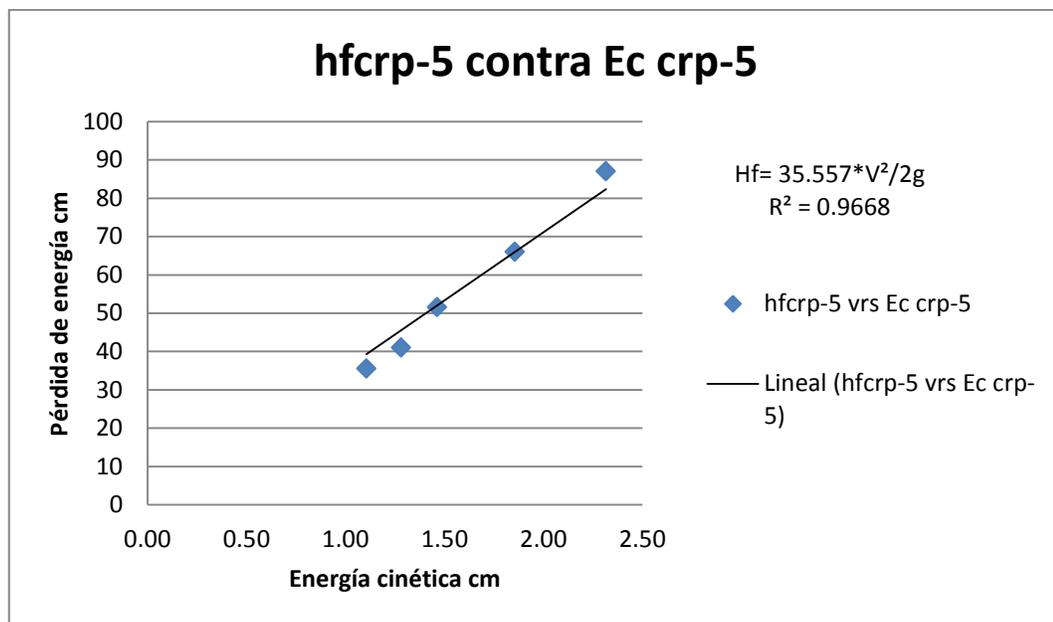
$$H_{f_{1-3}} = 4,2051 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{1-3} = 4,5051 * \frac{Q^2}{2 * 981 * \left(\frac{\pi}{4} * (1,27)^2\right)^2}$$

$$Hf_{1-3} = 0,001329 * Q^2$$

$$Q_{\text{generado}} = 27,43 * \sqrt{Hf_{1-3}}$$

Figura 94. **Obtención de la ecuación de la pérdida de energía en el tramo crp-5**



Fuente: elaboración propia.

Deducción de la fórmula del caudal generado para el tramo CRP a 5:

$$Hf_{\text{total}} = 35,557 * EC$$

$$Hf_{\text{total}} = 35,557 * \frac{V^2}{2g}$$

Como:

$$V = \frac{Q}{A} \quad g = 981 \text{ cm/s}^2$$

$$Hf_{\text{crp-5}} = 35,557 * \frac{Q^2}{2 * 981 * A^2}$$

$$Hf_{\text{crp-5}} = 35,557 * \frac{Q^2}{2 * 981 * \left(\frac{\pi}{4} * (1,27)^2\right)^2}$$

$$Hf_{\text{crp-5}} = 0,01124 * Q^2$$

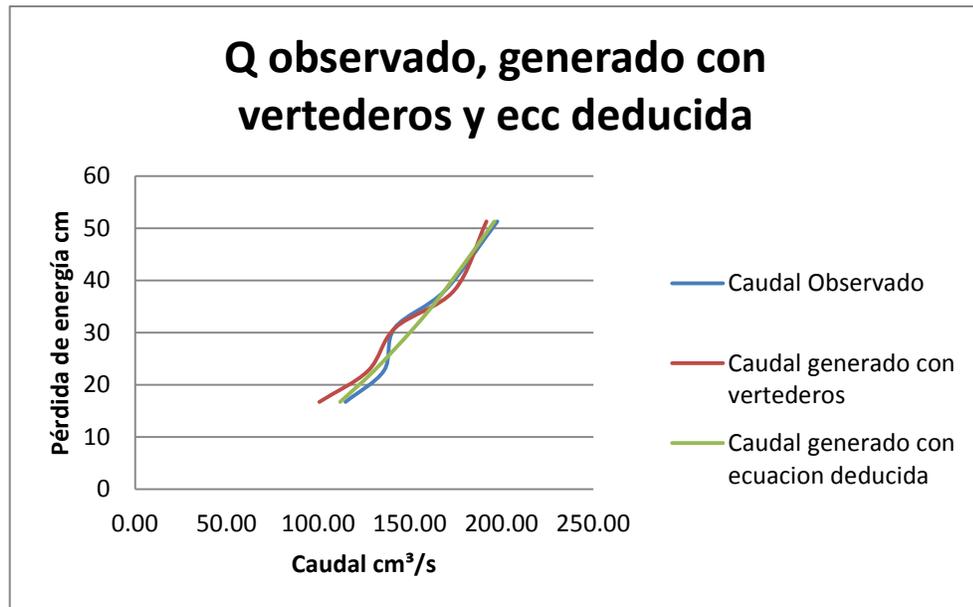
$$Q_{\text{generado}} = 9,434 * \sqrt{Hf_{\text{crp-5}}}$$

Tabla XI. **Comparación de caudales observados y generados con vertederos y ecuación deducida en el tramo 1-3**

Caudal observado (cm³/s)	Caudal total generado en los vertederos (cm³/s)	Caudal generado con ecuación deducida (cm³/s)
114,75	100,49	111,82
135,73	127,15	130,37
141,64	141,86	152,10
169,13	174,09	168,90
197,57	191,65	195,98

Fuente: elaboración propia.

Figura 95. **Comparación de caudales observado, generado en vertederos y con ecuación deducida**



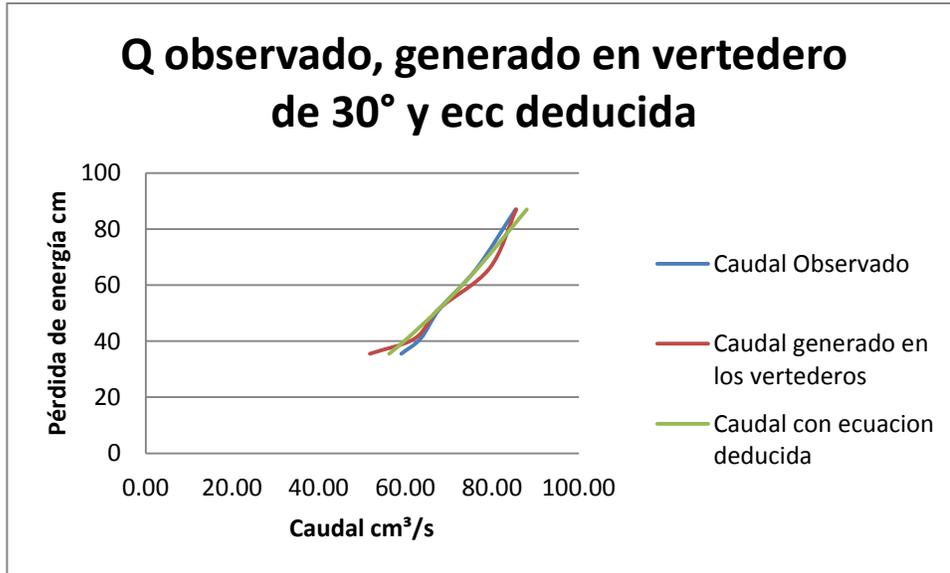
Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Comparación de caudales observado y generado con vertedero y ecuación deducida en vertedero de 30° en el tramo de CRP-5**

Caudal observado vertedero de 30° (cm³/s)	Caudal generado vertedero de 30° (cm³/s)	Caudal ecuacion deducida vertedero de 30°(cm³/s)
59,00	51,75	56,21
63,52	62,17	60,41
67,86	67,69	67,70
76,43	79,39	76,64
85,39	85,56	87,99

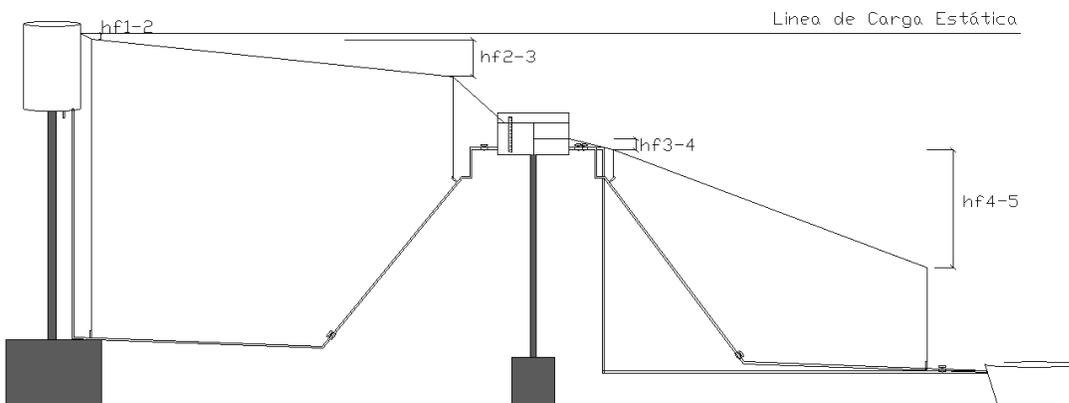
Fuente: elaboración propia.

Figura 96. **Comparación de caudales observado y generado con vertedero y ecuación deducida**



Fuente: elaboración propia

Figura 97. **Línea piezométrica en conducción con una caja distribidora de caudales**



Fuente: elaboración propia, con programa de Autocad.

### **3.3. Instructivo para la operación del modelo de línea de conducción**

Se detalla un instructivo para la correcta operación del modelo de los diferentes sistemas propuestos de la línea de conducción.

#### **3.3.1. Conducción por gravedad simple**

- Cerrar la válvula reguladora del caudal que se encuentra en la parte inferior del sistema y abrir las llaves del sistema de conducción simple y cerrar las otras llaves.
- Llenar de agua el tanque inferior.
- Encender la bomba para alimentar al tanque elevado y seguir llenando el tanque inferior para que los dos queden totalmente llenos, hasta que el rebalse envíe agua de regreso al tanque inferior.
- Abrir la válvula reguladora y proceder a regular el caudal, para hacer las pruebas correspondientes.
- Tomar la lectura de los piezómetros en el tablero teniendo en cuenta la ubicación de los mismos.
- Medir el caudal que circula en el sistema por el método volumétrico, 3 veces para una mejor exactitud en los cálculos.
- Trasladar los datos a las fórmulas deducidas para encontrar los caudales generados y compararlos con los caudales obtenidos.

#### **3.3.2. Conducción por gravedad con sifón invertido**

- Cerrar la válvula reguladora del caudal que se encuentra en la parte inferior del sistema y abrir las llaves del sistema de conducción con sifón invertido y cerrar las otras llaves.
- Llenar de agua el tanque inferior.

- Encender la bomba para alimentar al tanque elevado y seguir llenando el tanque inferior para que los dos queden totalmente llenos, hasta que el rebalse envíe agua de regreso al tanque inferior.
- Abrir la válvula reguladora y proceder a regular el caudal, para hacer las pruebas correspondientes.
- Tomar la lectura de los piezómetros en el tablero, teniendo en cuenta la ubicación de los mismos.
- Medir el caudal que circula en el sistema por el método volumétrico, 3 veces para una mejor exactitud en los cálculos.
- Trasladar los datos a las fórmulas deducidas para encontrar los caudales generados y compararlos con los caudales obtenidos.

### **3.3.3. Conducción con caja rompepresión intermedia**

- Cerrar la válvula reguladora del caudal que se encuentra en la parte inferior del sistema y cerrar las demás.
- Llenar de agua el tanque inferior.
- Encender la bomba para alimentar al tanque elevado y seguir llenando el tanque inferior para que los dos queden totalmente llenos, hasta que el rebalse envíe agua de regreso al tanque inferior.
- Abrir las llaves para el sistema de la caja rompepresión, cerrando la llave del vertedero de 45°, para que quede en funcionamiento únicamente el de 30° y seguir llenando de agua para llenar la caja rompepresión.
- Con las llaves reguladoras, que se encuentran antes de la caja y antes del tanque inferior, proceder a regular el caudal para hacer las pruebas correspondientes.
- Tomar la lectura de los piezómetros en el tablero, teniendo en cuenta la ubicación de los mismos.

- Medir el caudal que circula en el sistema por el método volumétrico, 3 veces para una mejor exactitud en los cálculos.
- Trasladar los datos a las fórmulas deducidas para encontrar los caudales generados y compararlos con los caudales obtenidos.

#### **3.3.4. Conducción con caja distribuidora de caudales**

- Cerrar la válvula reguladora del caudal que se encuentra en la parte inferior del sistema y cerrar las demás.
- Llenar de agua el tanque inferior.
- Encender la bomba para alimentar al tanque elevado y seguir llenando el tanque inferior para que los dos queden totalmente llenos, hasta que el rebalse envíe agua de regreso al tanque inferior.
- Abrir las llaves para el sistema de la caja distribuidora de caudales abriendo también las llaves para los dos vertederos de 30° y 45° y seguir llenando de agua para llenar la caja distribuidora.
- Con las llaves reguladoras, que se encuentran antes de la caja y antes del tanque inferior, proceder a regular el caudal para hacer las pruebas correspondientes.
- Tomar la lectura de los piezómetros en el tablero teniendo en cuenta la ubicación de los mismos.
- Medir el caudal que circula en el sistema por el método volumétrico, 3 veces para cada vertedero para una mejor exactitud en los cálculos.
- Trasladar los datos a las fórmulas deducidas para encontrar los caudales generados y compararlos con los caudales obtenidos.



## CONCLUSIONES

1. El comportamiento en el modelo corresponde con el esperado en los diferentes sistemas según la ecuación de la energía, ya que los caudales generados a través de las ecuaciones deducidas son similares a los caudales observados, teniendo un mínimo de diferencia entre ellos debido a los errores en las mediciones y aproximaciones en los cálculos.
2. No se pudo considerar el tanque inferior en el análisis de la línea piezométrica, ya que la llave reguladora, que se encuentra al final del sistema provoca presión negativa debido a la obstrucción en ella.
3. Se lograron modelar los diferentes sistemas y observar la variación en la línea piezométrica al aumentar o disminuir el caudal, con la llave reguladora al final del sistema.
4. La caja rompedor de presión del sistema también cumple la función de caja distribuidora de caudales, según el sistema que se quiera simular y se observa que para ambos casos la línea piezométrica cae al nivel de la superficie libre de la caja.
5. En la caja distribuidora de caudales se lograron calibrar los dos vertederos, de  $30^\circ$  y  $45^\circ$ , obteniendo la ecuación de descarga en función del tirante para cada uno de ellos. Esto se realizó colocando un piezómetro en la caja para determinar la carga sobre el vértice de cada vertedero.

6. Se elaboró un instructivo para cada sistema modelado el cual servirá al estudiante del curso de Ingeniería Sanitaria 1 para realizar ensayos y observar físicamente, a escala, el comportamiento de la línea piezométrica en cada sistema de conducción.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario que al realizar las pruebas se verifique que no existan fugas en el sistema, para evitar alteraciones y errores en los datos obtenidos.
2. Es importante esperar que tanto el tanque inferior como el tanque elevado estén llenos completamente, para garantizar el flujo permanente en el sistema.
3. Al operar cualquiera de los modelos se debe estrangular la llave reguladora y abrir las llaves correctas, para cada sistema a aplicar.
4. Los piezómetros deben estar completamente llenos de agua, por lo que previo a las pruebas se debe extraer el aire que estos tengan.
5. Es necesario mantener limpio el sistema evitando el ingreso de sólidos para evitar que no se deteriore la bomba y que no ingresen a las tuberías y que obstruyan la toma de los piezómetros.
6. Al terminar de utilizar el sistema de tuberías se debe vaciar completamente el agua de los tanques y de la caja, esto debido a que al dejar agua se crea oscurecimiento en los piezómetros y proliferan los zancudos.
7. Dar a conocer este trabajo a los estudiantes del curso de Ingeniería Sanitaria 1, e implementar los ensayos como práctica en el mismo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. AGUILAR RUÍZ, Pedro. *Apuntes sobre el curso de Ingeniería Sanitaria I*. Trabajo de graduación de Ing. Civil, Universidad de San Carlos, Facultad de Ingeniería, 2007. 170 p.
2. DE AZEVEDO NETTO, J.M.; ACOSTA A., Guillermo. *Manual de hidráulica*. México: HARLA, 1975. 578 p.
3. FRANZINI, Joseph; FINNEMORE, John. *Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería*. 9a ed. España: McGraw-Hill, 1999. 503 p.
4. LOPEZ CUALLA, Ricardo Alfredo. *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*. 2a ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. 388 p.
5. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. 6a ed. Estados Unidos: Pearson Educación, 2006. 626 p.
6. SALDARRIAGA, Juan. *Hidráulica de tuberías*. Colombia: Alfaomega, 2007. 690 p.