



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

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE  
HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA**

**Guillermo Ismael Meza González**

Asesorado por el Ing. Luis Eduardo Portillo España

Guatemala, mayo de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE  
HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**GUILLERMO ISMAEL MEZA GONZÁLEZ**

ASESORADO POR EL ING. LUIS EDUARDO PORTILLO ESPAÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, MAYO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Hernández
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## **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:

### **ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 22 de octubre de 2017.



**Guillermo Ismael Meza González**

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS



DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 28 de enero de 2019

Dr. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Facultad de Ingeniería  
Estimado ingeniero:

Espero tenga éxitos en sus labores diarias. Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Guillermo Ismael Meza González, quien se identifica con Registro Académico 2014-43725 y CUI No. 3055 61774 0301, titulado ***ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA*** y haber hecho las correcciones necesarias al mismo, lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

*“ID y Enseñad a Todos”*



Ing. Luis Eduardo Portillo España  
Colegiado No. 11697  
Docente Departamento de Hidráulica

**LUIS E. PORTILLO ESPAÑA**  
INGENIERO CIVIL  
Colegiado No. 11697



Guatemala, 22 de Marzo de 2019

Ingeniero

Hugo Leonel Montenegro Franco

Director Escuela de Ingeniería Civil

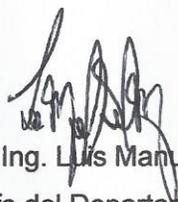
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero

Le informo que he revisado el trabajo de graduación titulado “ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA”, desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Guillermo Ismael Meza González, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Eduardo Portillo España.

Considero que este trabajo está bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos doy mi aprobación al mismo, solicitando darle el tramite respectivo.

Sin otro particular, me despido atentamente.



Dr C. Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza  
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC





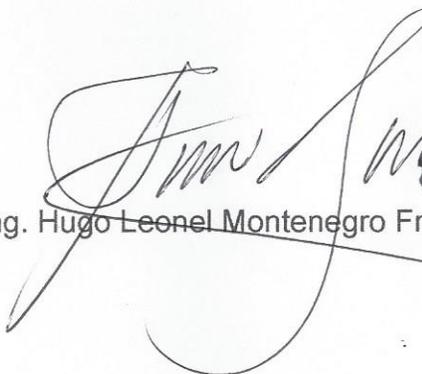
**USAC**  
TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
FACULTAD DE INGENIERÍA

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

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Eduardo Portillo España y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza al trabajo de graduación del estudiante Guillermo Ismael Meza González, ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, mayo 2019

/mrm.



*Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua*

Universidad de San Carlos  
De Guatemala

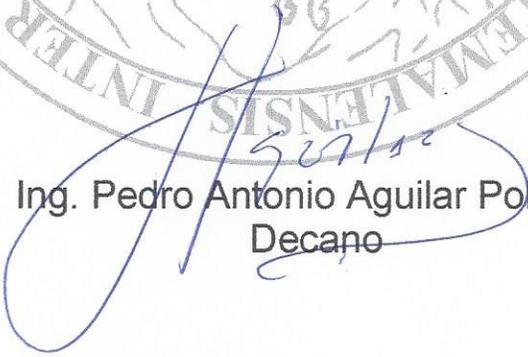


Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG.257-2019

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 del trabajo de graduación titulado: **"ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO ARTESANAL CON DIÁMETRO DE UNA PULGADA"** presentado por el estudiante: **Guillermo Ismael Meza González** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, mayo de 2019

/echm



## **ACTO QUE DEDICO A:**

<b>Dios</b>	Por su presencia en cada momento de mi vida y darme las fuerzas para alcanzar mis metas.
<b>Mis padres</b>	Por su incondicional apoyo y lecciones de vida que me han forjado en el hombre que soy hoy en día.
<b>Mis hermanos</b>	Por ser mis compañeros de vida y brindarme motivación para superarme cada día.
<b>Mis tías</b>	Por ser una segunda figura materna en mi vida y apoyarme en cada momento que lo necesité.
<b>Mis primos</b>	Por haberme otorgado su amor y aprecio en cada momento vivido.
<b>Mis abuelos</b>	(q. e. p. d), por hacer de los pocos momentos compartidos, enseñanzas de vida imborrables.
<b>Mis compañeros</b>	Por su apoyo dentro y fuera de las aulas, compartiendo experiencias inolvidables como personas y estudiantes.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por albergarme dentro de sus aulas de estudio, brindándome el conocimiento para convertirme en un profesional.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por ser mi segundo hogar durante mi etapa de estudiante, enriqueciéndome de conocimientos para mi formación como profesional de ingeniería.
<b>Mi asesor</b>	Ing. Luis Eduardo Portillo España, por compartir su tiempo y conocimiento para alcanzar este triunfo académico.
<b>Laboratorio De Hidráulica</b>	Por abrirme las puertas para realizar los ensayos necesarios y recopilar datos necesarios para realizar este proyecto de graduación.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XIII
GLOSARIO .....	XV
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS .....	XIX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
1. PROPIEDADES GENERALES DE LOS FLUIDOS .....	1
1.1. Descripción de un fluido .....	1
1.2. Característica de los fluidos .....	1
1.2.1. Densidad .....	1
1.2.2. Densidad relativa .....	2
1.2.3. Peso específico .....	2
1.2.4. Viscosidad .....	3
1.2.5. Compresibilidad .....	3
1.2.6. Tensión superficial .....	4
1.2.7. Presión absoluta y relativa .....	5
1.2.8. Presión .....	6
1.2.9. Fluidez .....	6
1.3. El principio de Pascal .....	6
1.3.1. La presión atmosférica .....	7
1.4. Definición del golpe de ariete .....	7
1.4.1. Descripción del fenómeno de ariete .....	9
1.4.2. Condiciones físicas e hidráulicas a considerar en el golpe de ariete .....	9

1.4.2.1.	Velocidad de propagación de ondas de velocidad y presión.....	10
1.4.3.	Periodo de la tubería .....	11
1.4.4.	Tiempo de cierre.....	12
1.4.4.1.	Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula.....	13
1.5.	¿Qué es un ariete hidráulico?.....	14
1.5.1.1.	causas del golpe de ariete .....	16
1.5.2.	Funcionamiento del ariete hidráulico.....	17
2.	GENERALIDADES DE UN ARIETE HIDRÁULICO.....	19
2.1.	Bombas de golpe de ariete .....	19
2.2.	Reseña histórica .....	20
2.3.	Definición de bomba de ariete .....	21
2.3.1.	Características de bomba de ariete .....	21
2.4.	Descripción del trabajo de un ariete hidráulico.....	22
2.5.	Mantenimiento de una bomba de ariete hidráulico.....	23
2.6.	Alcances y limitaciones de un ariete hidráulico .....	24
3.	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ARIETE HIDRÁULICO .....	27
3.1.	Descripción de sus componentes .....	27
3.1.1.	Componentes estructurales de bombeo .....	27
3.1.2.	Componentes hidráulicos de bombeo.....	28
3.2.	Cualidades de diseño.....	28
3.3.	Componentes constructivos de un ariete hidráulico.....	29
3.3.1.	Cámara de aire .....	29
3.3.2.	Válvula de cheque antiretorno.....	30
3.3.3.	Tubería de captación o alimentación .....	31
3.3.4.	Tubería de descarga.....	31

3.3.5.	Válvula de pie (pichacha) .....	32
3.4.	Proceso de ensamblaje de piezas .....	33
3.4.1.	Pasos para la modificación de la válvula de pie estilo pichacha .....	34
3.4.2.	Descripción detallada de metodología para construcción del ariete hidráulico. ....	35
3.5.	Espacios necesarios para la bomba de ariete hidráulico .....	38
3.6.	Materiales y herramientas necesarias para la construcción del ariete hidráulico .....	39
3.7.	Pruebas de bombeo .....	40
3.7.1.	Sistema de bombeo de ariete.....	41
3.8.	Ensayo de pérdida de fricción F dentro de la manguera .....	42
3.9.	Medidas de seguridad para el ensamblaje y ensayos.....	44
3.9.1.	Uso de medidas de seguridad industrial para los ensayos realizados en laboratorio.....	44
3.9.2.	Medidas de seguridad para el ensamblaje de la bomba de ariete hidráulico y la estructura. ....	44
4.	DISPOSICIONES FINALES DEL TRABAJO DEL ARIETE HIDRÁULICO .....	47
4.1.	Consideraciones.....	47
4.2.	Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 1.5 metros descarga.....	47
4.2.1.	Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,0 metros descarga .....	49
4.2.2.	Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,50 metros descarga .....	50
4.3.	Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,0 metros descarga.....	52

4.3.1.	Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,50 metros descarga.....	54
4.3.2.	Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.....	55
4.3.3.	Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.....	56
4.4.	Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 2,5 metros descarga.....	58
4.4.1.	Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.....	60
4.4.2.	Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.....	61
4.4.3.	Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.....	63
4.4.4.	Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga.....	64
4.5.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.....	66
4.5.1.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.....	68
4.5.2.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.....	69
4.5.3.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga.....	70
4.5.4.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga.....	72
4.5.5.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga.....	73

4.5.6.	Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga .....	74
4.6.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.....	77
4.6.1.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga .....	78
4.6.2.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga .....	79
4.6.3.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga .....	80
4.6.4.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga .....	82
4.6.5.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,0 metros descarga .....	83
4.6.6.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,50 metros descarga .....	84
4.6.7.	Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 7,0 metros descarga .....	86
4.7.	Resumen de caudales otorgados .....	88
4.7.1.	Gráficas resumen de caudales otorgados a alturas de descarga .....	89
4.7.2.	Curva de selección de altura de alimentación para otorgar un caudal.....	94
4.8.	Factor de fricción en manguera de descarga .....	95
4.8.1.	Tiempo de aforo y caudales otorgados (2 metros de manguera).....	95
4.8.2.	Cálculo de factor F para manguera de descarga (2 metros).....	97
4.9.	Cálculo de pérdida de fricción F para la tubería de descarga ..	98

4.10.	Presión a la entrada y salida de la bomba.....	100
4.11.	Gráfico aumento de presión vs relación descarga- alimentación .....	104
4.12.	Cálculo de constante K del resorte .....	104
4.13.	Costos asociados para la construcción de la bomba de ariete hidráulico.....	105
4.13.1.	Costo de materiales para ensayos experimentales .....	106
4.13.2.	Costo de fabricación .....	106
4.13.3.	Costo de instalación .....	108
CONCLUSIONES.....		109
RECOMENDACIONES .....		111
BIBLIOGRAFÍA.....		113
APÉNDICES .....		115

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Determinación de viscosidad.....	3
2.	Compresibilidad en un fluido .....	4
3.	Tensión superficial.....	5
4.	Sobrepresión debida al cierre de una válvula .....	8
5.	Representación golpe de ariete.....	9
6.	Chimenea de equilibrio .....	14
7.	Representación esquemática del golpe de ariete .....	15
8.	Diseño del <i>pulser pump</i> de John Whitehurst.....	20
9.	Diseño del <i>belier hydraulique</i> de los hermanos Montgolfier .....	21
10.	Componentes ariete hidráulico.....	29
11.	Esquema cámara de aire.....	30
12.	Esquema válvula de cheque.....	31
13.	Esquema de tubería de captación.....	31
14.	Esquema de tubería de descarga .....	32
15.	Esquema válvula de pie (pichacha).....	32
16.	Enumeración de piezas a utilizar para ensamblaje.....	33
17.	Esquema pruebas de bombeo.....	40
18.	Representación de equipo de bombeo montado en laboratorio .....	41
19.	Tramo de manguera dos metros para ensayo de factor de pérdida de fricción F .....	42
20.	Caída de presión en la tubería de dos metros de longitud .....	43
21.	Manómetro medidor de presión marcando 1,5 PSI.....	52
22.	Manómetro medidor de presión marcando 2,10 PSI.....	58

23.	Manómetro medidor de presión marcando 3,00 PSI .....	66
24.	Manómetro medidor de presión marcando 3,60 PSI .....	76
25.	Manómetro medidor de presión marcando 5,0 PSI .....	88
26.	Caudal vs descarga (entrada 1 metro) .....	89
27.	Descarga vs caudal (entrada 1 metro) .....	90
28.	Caudal vs descarga (entrada 1,5 metros) .....	90
29.	Descarga vs caudal (entrada 1,5 metros) .....	91
30.	Caudal vs descarga (entrada 2,0 metros) .....	91
31.	Descarga vs caudal (entrada 2,0 metros) .....	92
32.	Caudal vs descarga (entrada 2,5 metros) .....	92
33.	Descarga vs caudal (entrada 2,5 metros) .....	93
34.	Caudal vs descarga (entrada 3,0 metros) .....	93
35.	Descarga vs caudal (entrada 3,0 metros) .....	94
36.	Curva de interpolación para selección de altura .....	94
37.	Factor F vs energía cinética .....	98
38.	Caudal vs pérdida de fricción F .....	100
39.	Aumento de presión vs descarga – alimentación .....	104
40.	Constante K del resorte .....	105

## TABLAS

I.	Listado de piezas a utilizar para el ensamblaje de la bomba de ariete hidráulico .....	34
II.	Herramientas utilizadas en el proceso .....	39
III.	Materiales utilizados en el proceso constructivo .....	39
IV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	48
V.	Caudales calculados.....	48
VI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	49
VII.	Caudales calculados.....	49

VIII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	50
IX.	Caudales calculados.....	51
X.	Tiempos obtenidos en aforo .....	53
XI.	Caudales calculados.....	53
XII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	54
XIII.	Caudales calculados.....	54
XIV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	55
XV.	Caudales calculados.....	56
XVI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	56
XVII.	Caudales calculados.....	57
XVIII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	59
XIX.	Caudales calculados.....	59
XX.	Tiempos obtenidos en aforo .....	60
XXI.	Caudales calculados.....	61
XXII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	62
XXIII.	Caudales calculados.....	62
XXIV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	63
XXV.	Caudales calculados.....	64
XXVI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	64
XXVII.	Caudales calculados.....	65
XXVIII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	67
XXIX.	Caudales calculados.....	67
XXX.	Tiempos obtenidos en aforo .....	68
XXXI.	Caudales calculados.....	69
XXXII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	69
XXXIII.	Caudales calculados.....	70
XXXIV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	71
XXXV.	Caudales calculados.....	71
XXXVI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	72

XXXVII.	Caudales calculados.....	73
XXXVIII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	73
XXXIX.	Caudales calculados.....	74
XL.	Tiempos obtenidos en aforo .....	75
XLI.	Caudales calculados.....	75
XLII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	77
XLIII.	Caudales calculados.....	77
XLIV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	78
XLV.	Caudales calculados.....	79
XLVI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	79
XLVII.	Caudales calculados.....	80
XLVIII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	81
XLIX.	Caudales calculados.....	81
L.	Tiempos obtenidos en aforo .....	82
LI.	Caudales calculados.....	83
LII.	Tiempos obtenidos en aforo .....	83
LIII.	Caudales calculados.....	84
LIV.	Tiempos obtenidos en aforo .....	85
LV.	Caudales calculados.....	85
LVI.	Tiempos obtenidos en aforo .....	86
LVII.	Caudales calculados.....	87
LVIII.	Resumen de caudales (L/seg).....	89
LIX.	Tiempo de aforo y caudales otorgados (2 metros de manguera) .....	95
LX.	Cálculo de factor F para tramo de dos metros .....	97
LXI.	Resumen de factores de fricción para cada caudal real .....	99
LXII.	Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli .	101
LXIII.	Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli .	102
LXIV.	Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli .	102
LXV.	Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli .	103

LXVI.	Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli .	103
LXVII.	Recolección de datos para constante K.....	105
LXVIII.	Costos de materiales para ensayos experimentales.....	106
LXIX.	Costos de materiales para construcción de bomba de ariete .....	107



## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
°C	Grado centígrado
HP	Horse Power (Caballos de fuerza)
±	Incerteza
PSI	Lb/plg <sup>2</sup>
L/min	Litros sobre minutos
L/seg	Litros sobre segundos
≤	Mayor igual
m	Metro
mts	Metros
mm	Milímetro
MCA	Metro columna de agua
No.	Número
%	Porcentaje
”	Pulgadas



## GLOSARIO

<b>Aforo</b>	Determinación del volumen de agua que fluye por un sitio en un determinado tiempo.
<b>Agua subterránea</b>	Agua del suelo que se encuentra en la zona de saturación y que alimenta pozos, manantiales y escorrentía subterránea.
<b>Altura de abastecimiento</b>	Es la altura donde entra el agua y baja directamente a la bomba de ariete, siendo esta como mínimo un metro de caída.
<b>Altura de descarga</b>	Es la altura por encima del nivel de entrada de agua por la cual eleva un caudal la bomba, siendo un máximo de 3,5 metros por encima de la entrada de agua.
<b>Caballos de Fuerza</b>	Esta es la base y el término utilizado para medir la potencia. Se requiere un caballo de fuerza para levantar 33 000 libras. a un pie de altura en un minuto o 550 libras aun pie de altura en un segundo.
<b>Cámara</b>	Compartimiento almacenador para un elemento hidráulico.

<b>Caudal</b>	Volumen de fluido que circula en un tiempo determinado.
<b>Depósito</b>	Recipiente para mantener un suministro de fluido de trabajo de un sistema hidráulico.
<b>Eficiencia</b>	Es la relación entre la salida y la entrada, esta puede ser volumen, potencia, energía y se mide por porcentaje.
<b>Flujo</b>	Es producido por la bomba que suministra el fluido.
<b>MCA</b>	Metro columna de agua
<b>Potencia</b>	Trabajo por unidad de tiempo se expresa en HP o KW.
<b>Presión</b>	Fuerza por unidad de área. Se expresa en PSI. Es creada por la restricción de flujo. La presión ejercida en un recipiente es la misma en todas las direcciones.
<b>Válvula de cheque</b>	Válvula que permite el flujo en un solo sentido.
<b>Válvula de pie</b>	Válvula que genera el golpe de ariete necesario.
<b>Velocidad</b>	Es la rapidez de movimiento del flujo en la línea.
<b>Volumen</b>	Tamaño de espacio de la cámara, se mide en unidades cúbicas.

## RESUMEN

En Guatemala hay muchas comunidades rurales que no cuentan con recursos y servicios básicos como el agua; la bomba de ariete hidráulico se reconoce como una solución muy viable de abastecimiento de este recurso, por tal razón, la presente investigación pretende servir como guía para utilizar un ariete hidráulico, desde su uso y mantenimiento básico, análisis de costos, eficiencia y caudal otorgado a distintas alturas, para que sirva de guía en comunidades que deseen utilizarlo.

Considerando que esta construcción es de bajo costo y fácil instalación, se convierte en una solución idónea para diversas comunidades guatemaltecas. El proceso de construcción de un ariete, es muy práctico, por lo que los pobladores de las comunidades que deseen utilizarlo lo pueden hacer mediante el uso de esta guía.

El ariete hidráulico se diseña con seis componentes básicos que son: la tubería de alimentación, el paso de agua, la válvula de pie o pichacha pulsadora, la cámara de aire, el sistema de descarga y la base en la que se ubica. Además, se describe el procedimiento detallado del armado de la bomba y las piezas a modificar.

En el diámetro analizado de una pulgada se puede bombear agua a distintas alturas logrando una muy buena cantidad de caudal y de golpe constante provocado por la válvula de pie provocadora del ariete.

Mediante el análisis de laboratorio se logró una recopilación de datos importantes para poder calcular un caudal máximo otorgado por la bomba según la altura de la entrada del agua, donde se realizaron ensayos a las alturas de 1,0, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0 y 3,5 metros logrando bombear agua con un caudal constante hasta 4 metros por encima de la entrada del agua.

Se considera que una bomba es eficiente cuando su porcentaje de eficiencia está por encima del 50 %, en el sistema de ariete utilizado donde solo se hace uso de energía potencial y no eléctrica otorgando una eficiencia de 60,08 % con una potencia de 0,158 HP haciendo el sistema más viable para su uso en áreas rurales.

# OBJETIVOS

## General

Analizar el funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada.

## Específicos

1. Determinar el caudal que es posible elevar mediante una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada.
2. Determinar la eficiencia energética en el aumento de la carga de presión de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada.
3. Determinar la relación que existe entre la altura de la descarga y la fuente de alimentación.
4. Elaborar un documento que sirva de guía para la correcta instalación y funcionamiento de un ariete hidráulico.



## INTRODUCCIÓN

La bomba de ariete hidráulico utiliza el fenómeno del golpe de ariete para elevar a diferentes alturas el agua, según sea el diámetro; utilizando únicamente energía potencial gravitacional. Utilizando este tipo de tecnología es posible ayudar a las comunidades suburbanas y al área rural de nuestro país, ya que muchas veces no cuentan con los recursos necesarios, tanto económicos como eléctricos, para poder abastecerse de agua, mas sin embargo, en algunas ocasiones tienen diferentes nacimientos de agua, por lo cual solo es necesario un sistema de recolección o transporte de este recurso vital para los seres humanos.

El ariete hidráulico es un dispositivo de bombeo de agua que no utiliza energía eléctrica ni ningún tipo de combustible, ya que trabaja con el principio del golpe de ariete. Este dispositivo es muy económico en la fabricación y en su funcionamiento, porque puede construirse con accesorios de tubería. Una vez puesto en operación requiere solo de inspección periódica ya que el ariete hidráulico es automático; además, puede bombear agua las 24 horas.

El presente trabajo de graduación titulado *Análisis del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulica artesanal con diámetro de una pulgada*, tiene como objetivo dar a conocer y fomentar el uso de la bomba de ariete como un sistema alternativo para el transporte de agua, mediante el aprovechamiento de los recursos naturales disponibles en su entorno y dar a conocer una información básica para la construcción de este sistema, para que se presente el ariete hidráulico y así poder elevar el agua a una mayor altura, haciéndolo con bajo costo, sin utilizar electricidad, sin alto costo de mantenimiento y tampoco contaminación al medio ambiente.



# 1. PROPIEDADES GENERALES DE LOS FLUIDOS

## 1.1. Descripción de un fluido

“Se denomina fluido a un tipo de medio continuo formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas solo hay una fuerza de atracción débil. La propiedad definitoria es que los fluidos pueden cambiar de forma sin que aparezcan en su seno fuerzas restituidas tendentes a recuperar la forma "original".<sup>1</sup>.

“Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre si por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen”.<sup>2</sup>

## 1.2. Característica de los fluidos

A continuación, se describen las características de los fluidos.

### 1.2.1. Densidad

“Es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia. La densidad media es la razón entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa”.<sup>3</sup>

---

<sup>1</sup> MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 23.

<sup>2</sup> *Ibíd.*

<sup>3</sup> *Ibíd.*

$$\rho = \frac{m}{V}$$

### 1.2.2. Densidad relativa

La densidad relativa de una sustancia es la relación existente entre su densidad y la de otra sustancia de referencia; en consecuencia, es una magnitud adimensional (sin unidades).

Donde  $\rho_r$  es la densidad relativa,  $\rho$  es la densidad de la sustancia, y  $\rho_0$  es la densidad de referencia o absoluta.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_0}$$

### 1.2.3. Peso específico

Se le conoce como peso específico a la relación que hay entre el peso de una sustancia y su propio volumen.

Su expresión de cálculo es:

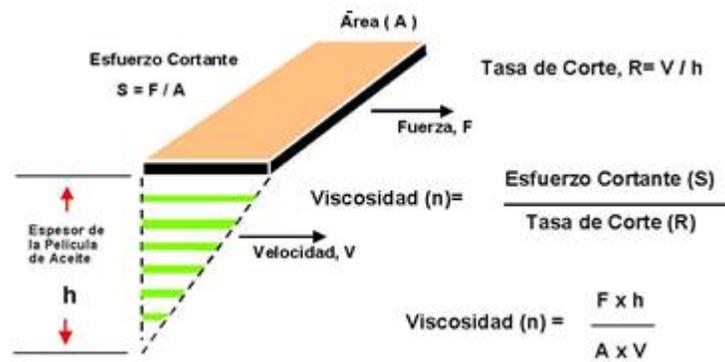
$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$

### 1.2.4. Viscosidad

La viscosidad que se genera en los gases es mucho menor que en los líquidos. La viscosidad logra que la velocidad de deformación aumente las tensiones en el seno del medio continuo. Esta propiedad acerca a los fluidos viscosos a los sólidos visco elásticos.

La viscosidad solamente se manifiesta en líquidos en constante movimiento; se ha definido la viscosidad como la relación que existe entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Esta viscosidad recibe como nombre viscosidad absoluta o viscosidad dinámica.

Figura 1. Determinación de viscosidad



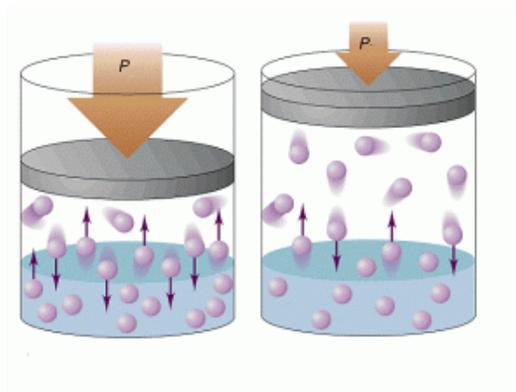
Fuente: elaboración propia.

### 1.2.5. Compresibilidad

Todos los fluidos son compresibles en cierto grado. No obstante, los líquidos son altamente incompresibles a diferencia de los gases que son altamente compresibles. Sin embargo, la compresibilidad no diferencia a los

fluidos de los sólidos, ya que la compresibilidad de los sólidos es similar a la de los líquidos.

Figura 2. **Compresibilidad en un fluido**



Fuente: elaboración propia.

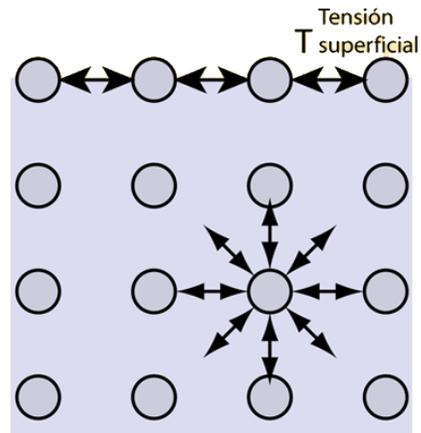
### 1.2.6. **Tensión superficial**

Es un proceso de los fluidos que depende de su tensión superficial, la cual a su vez, depende de la cohesión del líquido y que le confiere la capacidad de subir o bajar por un tubo capilar.

“Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que la fuerza intermolecular o cohesión intermolecular entre sus moléculas es menor que la adhesión del líquido con el material del tubo; es decir, es un líquido que moja. El líquido sigue subiendo hasta que la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena el tubo. Este es el caso del agua”.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de fluidos*, p. 18.

Figura 3. **Tensión superficial**



Fuente: elaboración propia.

### 1.2.7. **Presión absoluta y relativa**

“En determinadas aplicaciones la presión se mide no como la presión absoluta sino como la presión por encima de la presión atmosférica, denominándose presión relativa, presión normal, presión de Gauge o manométrica. Consecuentemente, la presión absoluta es la presión atmosférica ( $P_a$ ) más la presión manométrica ( $P_m$ ) (presión que se mide con el manómetro)”.<sup>5</sup>

$$P_{ab} = P_a + P_m$$

<sup>5</sup> POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de fluidos*, p. 18.

### 1.2.8. Presión

“Es la magnitud escalar que relaciona la fuerza con la superficie sobre la cual actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la superficie. Cuando sobre una superficie plana de área A se aplica una fuerza normal F de manera uniforme, la presión P viene dada de la siguiente forma”.<sup>6</sup>

$$p = \frac{F}{A}$$

### 1.2.9. Fluides

La fluides es una característica de los líquidos o gases que les concede la habilidad de poder pasar por cualquier agujero por más pequeño que sea, siempre que se encuentre a un mismo nivel o un nivel inferior del recipiente en el que se encuentren (el líquido), a diferencia del restante estado de agregación conocido como sólido.

Un fluido puede adquirir una deformación arbitrariamente grande sin necesidad de ejercer una tensión mecánica, dado que en los líquidos la tensión mecánica o presión en el seno del fluido depende esencialmente de la velocidad de la deformación no de la deformación en sí misma a diferencia de los sólidos que tienen memoria de forma y experimentan tensiones tanto más grandes cuanto más se alejan de la forma original, es decir, en un sólido la tensión está relacionada primordialmente con el grado de deformación.<sup>7</sup>

## 1.3. El principio de Pascal

La presión aplicada en un punto de un líquido contenido en un recipiente se transmite con el mismo valor a cada una de las partes del mismo.

---

<sup>6</sup> POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de fluidos*, p. 20.

<sup>7</sup> *Ibíd.*

El principio de Pascal puede describirse como una consecuencia de la ecuación fundamental de la hidrostática y de la característica de incompresibilidad de los líquidos. En estos fluidos la densidad es constante, de modo que de acuerdo con la ecuación  $p = \gamma + \rho \cdot g \cdot h$ , si se aumenta la presión en la superficie libre, por ejemplo, la presión en el fondo ha de aumentar en la misma medida, ya que  $\rho \cdot g \cdot h$  no varía al no hacerlo  $h$ .

La prensa hidráulica constituye la aplicación fundamental del principio de Pascal. Consiste, en esencia, en dos cilindros de diferente sección comunicados entre sí, y cuyo interior está completamente lleno de un líquido que puede ser agua o aceite. Dos émbolos de secciones diferentes se ajustan, respectivamente, en cada uno de los dos cilindros, de modo que estén en contacto con el líquido. Cuando sobre el émbolo de menor sección se ejerce una fuerza  $F$ , la presión que se origina en el líquido en contacto con el se transmite íntegramente y de forma instantánea

### **1.3.1. La presión atmosférica**

La presión hidrostática en los líquidos asociada al peso de unas capas de líquido sobre otras, las grandes masas gaseosas pueden dar lugar a presiones considerables debidas a su propio peso. Tal es el caso de la atmósfera. La presión del aire sobre los objetos contenidos en su seno se denomina presión atmosférica. La ley de variación de la presión atmosférica con la altura es mucho más complicada que la descrita por la ecuación fundamental de la hidrostática.<sup>8</sup>

### **1.4. Definición del golpe de ariete**

Se denomina golpe de ariete al choque que se produce sobre las paredes de un conducto forzado cuando el movimiento del líquido es modificado bruscamente. En otras palabras, consiste en la sobrepresión que las tuberías reciben al cerrarse o abrirse bruscamente una válvula o al ponerse en marcha o

---

<sup>8</sup> MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. p. 21.

detenerse una máquina hidráulica. El golpe de ariete puede ser positivo o negativo de acuerdo a la forma en que se produzca. Cuando se cierra súbitamente una válvula se presenta un golpe de ariete positivo. El golpe de ariete negativo ocurre al efectuarse la apertura brusca de la válvula.

El fenómeno de golpe de ariete se presenta en forma de una onda oscilatoria que viaja a lo largo de la tubería. El primer pico que registra esa onda corresponde a la sobreelevación máxima y tiene la misma magnitud para el golpe de ariete positivo y para el negativo.

En el caso del cierre de una válvula, la fuerza viva con que el agua estaba animada se convertiría en trabajo, (figura 4) determinando en las paredes de la tubería presiones superiores a la carga inicial.

Figura 4. **Sobrepresión debida al cierre de una válvula**



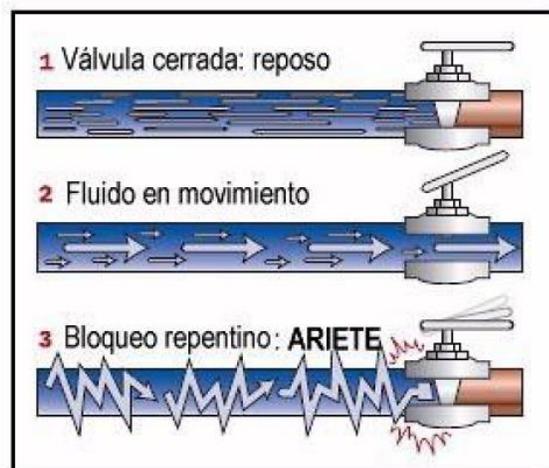
Fuente: AZEVEDO, J. M.; ACOSTA A., Guillermo. *Manual de hidráulica*. p. 292.

Si  $t_c = 0$ , se produce el cierre instantáneo y considerando que el agua fuese incompresible y la tubería no fuese elástica, la sobrepresión tendría un valor infinito. En la práctica, el cierre siempre lleva algún tiempo, por pequeño que sea y la energía que va a absorberse se transforma en esfuerzos de compresión del agua y deformación de las paredes de la tubería.

### 1.4.1. Descripción del fenómeno de ariete

Con el objetivo de analizar el fenómeno físicamente, el caso del *cierre instantáneo del obturador*, el que, a pesar de ser una abstracción teórica, posibilita una más fácil comprensión del problema. Se dice que el cierre instantáneo es una abstracción, porque los órganos de cierre, por rápido que actúen siempre demandarían un tiempo para completar la obturación del caudal. Ello, no obstante, en la realidad práctica se produce cierres que pueden adaptarse a ese criterio y que como se estudiará, no son deseables puesto que, como se adelantó, pueden producir sobrepresiones máximas. Un conducto de diámetro  $D$  y longitud  $L$ , conectado a un embalse de capacidad infinita inclinado, para mayor generalidad.<sup>9</sup>

Figura 5. Representación golpe de ariete



Fuente: SORIANO RULL, Albert. *Suministro, distribución y evacuación interior de agua sanitaria*. p. 20.

### 1.4.2. Condiciones físicas e hidráulicas a considerar en el golpe de ariete

Dado que se requiere un análisis extenso para la determinación del fenómeno de ondas de presión, mediante la metodología expuesta en el

<sup>9</sup> POTTER, Merle C. y WIGGERT, David C. *Mecánica de fluidos*, p. 20.

presente capítulo, es posible obtener, en forma práctica y científica, la estimación del efecto de sobrepresión originado por cambios en la velocidad del fluido.

#### 1.4.2.1. Velocidad de propagación de ondas de velocidad y presión

El estudio del golpe de ariete fue hecho en primer lugar por Joukowski, mientras que la solución completa del problema fue dada por Allievi. Joukowski también fue el primero en desarrollar una expresión para el cálculo de la velocidad de onda (celeridad), en función de los parámetros de la instalación. La celeridad (C) es entonces la velocidad de propagación de la onda elástica (de presión), a través del agua contenida en la tubería, por lo que su ecuación de dimensiones es  $L \cdot T^{-1}$ . Su valor se determina a partir de la ecuación de continuidad y depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del fluido. En definitiva:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left[\frac{K}{E}\right] \left[\frac{D}{e}\right]}}$$

Donde:

- C es la celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s]
- K es el módulo de elasticidad del fluido (módulo volumétrico), [N/m<sup>2</sup>]
- $\rho$  es la densidad del líquido, [kg/m<sup>3</sup>]

- D es el diámetro interior de la tubería, [m]
- E es el módulo de elasticidad de la tubería, [N/m<sup>2</sup>] y
- e es el espesor de la tubería, [m]

El numerador de la ecuación anterior es la celeridad de la onda elástica en el fluido. Algunos autores la denotan como  $C_0$ . Para el agua  $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$  y  $K$  (también conocido como módulo de compresibilidad) =  $2,03 \times 10^9\text{ N/m}^2$ , este valor es:

$$C_0 = \sqrt{K/\rho} \approx 1425\text{ m/s}$$

Nótese que si el material pudiera ser inelástico ( $E \rightarrow \infty$ ) y/o la tubería tuviera mucho espesor, el denominador de la ecuación de celeridad (C), sería la unidad, por lo que  $C \rightarrow C_0$ . Lógicamente en la realidad  $C < C_0$ .

### 1.4.3. Periodo de la tubería

Período o fase de la tubería es el tiempo que la onda de sobrepresión tarda en ir y volver de una extremidad a otra de la tubería (igual a  $2t_0$ ), generalmente entre la válvula de cierre y el tanque de carga. El período de la tubería está dado por la siguiente expresión:

$$T = \frac{2L}{C}$$

Donde:

- T: el período de la tubería, tiempo máximo de reflexión de la onda de sobrepresión.
- L: longitud de tubería.
- C: celeridad.

#### **1.4.4. Tiempo de cierre**

El cálculo de la sobrepresión depende del tiempo de cierre,  $t_c$  de la válvula. Con anterioridad se ha hablado de cierre instantáneo de la válvula, pero este en la práctica es gradual, con lo que la onda no presenta un frente brusco sino una rampa de mayor o menor pendiente según se tarde más o menos en cerrar. A pesar de ello, el incremento final de presión es el mismo, a no ser que haya tiempo suficiente para que las sobrepresiones iniciales viajen hasta el depósito y regresen. Por tanto, el cierre puede ser: cierre rápido o cierre lento.

Cierre rápido:  $0 < t_c < 2t_0$

La presión máxima es la misma que en el cierre instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo. Por ejemplo, en una tubería de acero de 1 000 metros de longitud, habría que cerrar la válvula en menos de 2 segundos para que existiera cierre instantáneo y se alcanzaran las presiones máximas. A partir de este tiempo, los rebotes en forma de depresión provenientes del depósito harían que el incremento de presión no fuese tan elevado.

Cierre lento:  $t_c > 2t_0$

La presión máxima es menor que en el caso precedente. Este último caso es más frecuente en la práctica. En definitiva, el tiempo de cierre es, por tanto, un factor fundamental para la reducción de la intensidad del golpe de ariete.

#### **1.4.4.1. Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula**

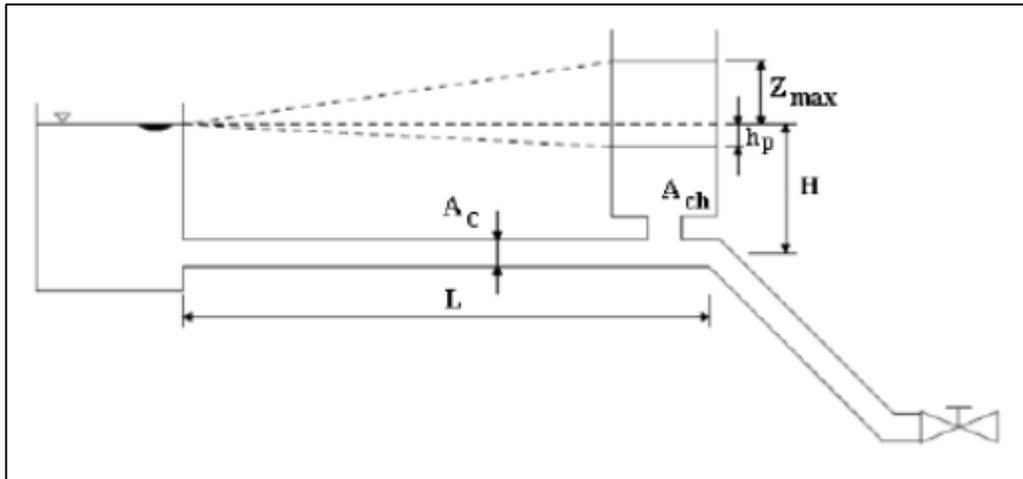
Recordando que la sobrepresión máxima ocurre cuando la maniobra es rápida, esto es, cuando  $t_c < 2t_0$  (todavía no actúa la onda de depresión). Entonces la sobrepresión máxima, en el extremo de la línea, puede ser calculada por la expresión:

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot v$$

Donde:

- $\Delta P$  = sobrepresión, [N/m<sup>2</sup>]
- $\rho$  = densidad del líquido, [kg/m<sup>3</sup>]
- $C$  = celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s]
- $v$  = velocidad del líquido, [m/s]

Figura 6. Chimenea de equilibrio



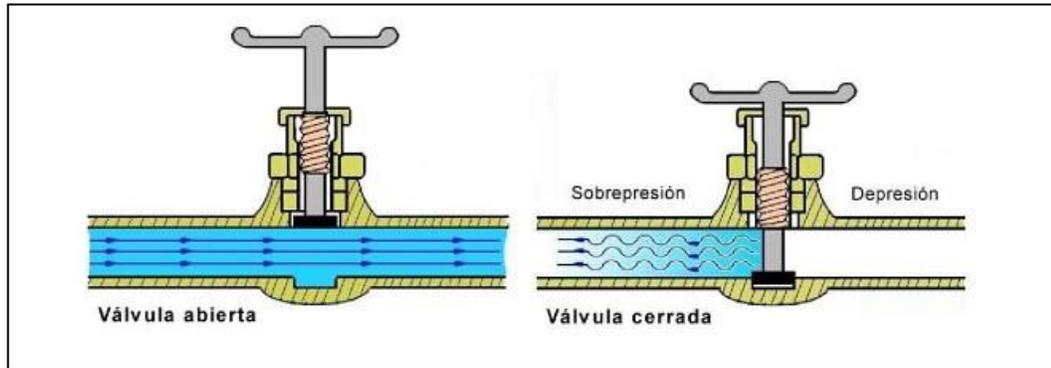
Fuente: elaboración propia.

### 1.5. ¿Qué es un ariete hidráulico?

La Física reconoce el fenómeno denominado golpe de ariete o choque hidráulico, que ocurre cuando varía bruscamente la presión de un fluido dentro de una tubería, motivado por el cierre o abertura de una llave, grifo o válvula; también puede producirse por la puesta en marcha o detención de un motor o bomba hidráulica. Durante la fluctuación brusca de la presión el líquido fluye a lo largo de la tubería a una velocidad definida como de propagación de la onda de choque.

La energía cinética, que proporciona el agua en movimiento, al ser detenida origina un aumento brusco o golpe de presión, el cual provoca deformaciones elásticas en el líquido y en las paredes de la tubería. Este fenómeno, en general, se considera indeseable y por tal razón, con frecuencia se instalan dispositivos de seguridad.

Figura 7. Representación esquemática del golpe de ariete



Fuente: SORIANO RULL, Albert. *Suministro, distribución y evacuación interior de agua sanitaria*. p. 52.

Este es un fenómeno que se produce en tuberías largas cuando se detiene abruptamente el flujo de agua que se desplaza por su interior.

Si en una tubería se coloca una llave de paso y se cierra, no todo el fluido se detiene al mismo tiempo, sino que el agua que está en el extremo cercano a la llave se detiene, mientras que el agua que circula por el resto de la tubería sigue su desplazamiento a la misma velocidad que llevaba; y en ese momento se produce una onda de choque que parte desde la llave de paso, desplazándose por el fluido en dirección opuesta a su movimiento a una velocidad cercana a la del sonido.

La onda de choque, descrita anteriormente, es la que detiene el fluido a su paso y transforma la velocidad que poseía en un aumento de presión. Cuando se origina esta onda de presión y se encuentra un depósito o un volumen grande de agua, esta se disipa; pero aún así la tubería se habrá quedado a una presión mayor que la del depósito. Ya en ese momento se genera otra onda de

choque de la misma magnitud que la primera, pero esta vez en sentido contrario, devolviendo al fluido la presión que poseía inicialmente y proporcionando una velocidad igual a la que tenía antes de que se cerrara la llave de paso, pero ahora en sentido contrario, esto se repite cíclicamente.

Normalmente se consideran ondas positivas, sin embargo, ondas negativas pueden producirse y causar daños en la tubería. Las ondas de presión, o golpe de ariete generados en un sistema de tuberías por un cambio de velocidad en un líquido en movimiento, permite conservar el momento dentro del sistema y parte, o toda la energía cinética, debe ser convertida a energía potencial para posteriormente disiparse a través de pérdidas por fricción y a través de la pared de la tubería; esto si el fluido retorna a su estado original de presión.

#### **1.5.1.1. Causas del golpe de ariete**

- El abrir y cerrar bruscamente una válvula, ya sea total o parcialmente
- Encendido y apagado de una bomba
- Cambio en la velocidad de una turbina
- Cambio en la elevación de una cisterna
- Acción de onda en la cisterna
- Superación de columnas de líquido
- Aire atrapado

Las clases de ondas pueden ser divididas en dos categorías: verdaderas y oscilatorias. La mejor manera de describir estas ondas es como condición intermedia que existen en un sistema al cambiar este de un estado a otro. El cerrado de una única válvula es un ejemplo típico. Las ondas oscilatorias son una condición que ocurre regularmente en el tiempo.

Ondas de esta clase se deben asociar con la acción de algún equipo de bombas recíprocas y válvulas reguladoras de presión. Si la frecuencia de oscilación se acerca a la frecuencia natural de resonancia armónica del sistema de tuberías, crea pequeñas ondas oscilatorias que pueden crecer rápidamente en magnitud y ser extremadamente peligrosas.

### **1.5.2. Funcionamiento del ariete hidráulico**

Con la captación de agua en la fuente se inicia el funcionamiento. Este trabaja de la siguiente manera: la válvula de impulso se mantiene abierta por su propio peso, hasta que de momento se cierra por el impulso del agua que llega de la tubería de impulsión. La columna de agua pasa de la válvula de impulso a la válvula, en la parte baja de la cámara de aire, buscando la salida del tubo de descarga. Cuando de momento el agua se agota, la columna de la misma se suspende, se cierra la cámara de aire, el agua sobrante se escapa por la válvula de liberación y el ciclo se repite sucesivamente por el propio impulso del agua.

En un ariete de acción simple, el agua, que puede ser proveniente de un manantial, arroyo, río o depósito, es trasladada por medio de una tubería de carga que permite la caída del flujo hacia el ariete. Este flujo sale por la válvula de desfogue, la cual se cierra por el mismo impulso que lleva el flujo, causando una sobrepresión; también conocido como golpe de ariete. Este movimiento se repite cíclicamente impulsando el flujo por la tubería de descarga hacia el depósito de almacenamiento, sistema de riego o hasta su disposición final.



## 2. GENERALIDADES DE UN ARIETE HIDRÁULICO

### 2.1. Bombas de golpe de ariete

La bomba de ariete, también conocida como ariete hidráulico, *hydram* o *ram pump*, aprovecha la energía hidráulica ocasionada de un pequeño desnivel para elevar agua a una altura superior, sin usar, para ello, electricidad o combustible alguno. De este modo, esta bomba de impulsión toma el agua de un depósito, acequia o río situado a una altura ligeramente superior, aprovechando la energía cinética que induce el propio fluido al discurrir por una tubería hasta el cuerpo de la misma para provocar una sobrepresión ocasionada por la apertura y cierre continuo de una válvula.

Esta sobrepresión producida se denomina golpe de ariete y es el principio básico para su funcionamiento. La bomba de ariete no es un invento actual, sino que pertenece al conjunto de herramientas que han sido relegadas, en muchos casos, a piezas de colección, mostradas en museos como mero recuerdo de lo que hace un tiempo no tan lejano significaron para el desarrollo de los pueblos. De este modo, observamos como norias, ruedas o arietes hidráulicos, entre otros muchos, fueron sistemas de bombeo muy extendidos y de gran éxito, que con la irrupción de la corriente eléctrica y la bomba centrífuga fueron cayendo poco a poco en desuso, debido a la mayor eficiencia de estas últimas. Esta situación de omnipresencia que durante este último siglo han disfrutado los sistemas de bombeo eléctricos y de combustión interna ha llevado a un desarrollo magnífico, coincidente con el esplendor de las nuevas tecnologías, lo que ha provocado el abandono de los sistemas tradicionales, así como de su investigación en busca de máquinas más eficientes de las que existían antiguamente, bien fabricándolas con otros materiales o bien añadiendo nuevos elementos que permitiesen un mayor rendimiento. Sin embargo, en los últimos años, se ha suscitado un interés creciente en los dispositivos de energía renovable, debido no solo a una mayor concienciación social, sino a los actuales precios del petróleo y de la electricidad.<sup>10</sup>

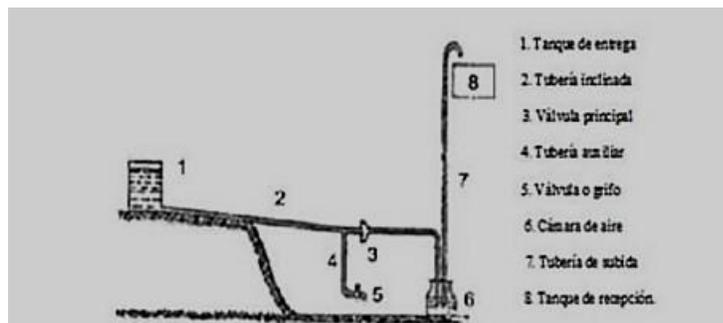
---

<sup>10</sup> CASTILLO, C. *Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica*. p. 54.

## 2.2. Reseña histórica

La primera bomba de ariete conocida se atribuye al inglés John Whitehurst en 1772. Este científico experimentaba con el agua que fluía rápidamente por los tubos, inventó una máquina muy básica, la cual se accionaba manualmente. Este *hydram*, como le llamó *pulser pump* estaba accionado por un grifo en una tubería conectada a un tanque de abasto, en un nivel superior, para así provocar el fenómeno físico conocido como golpe de ariete, lo cual le permitió elevar el líquido a 4,9 metros de altura.

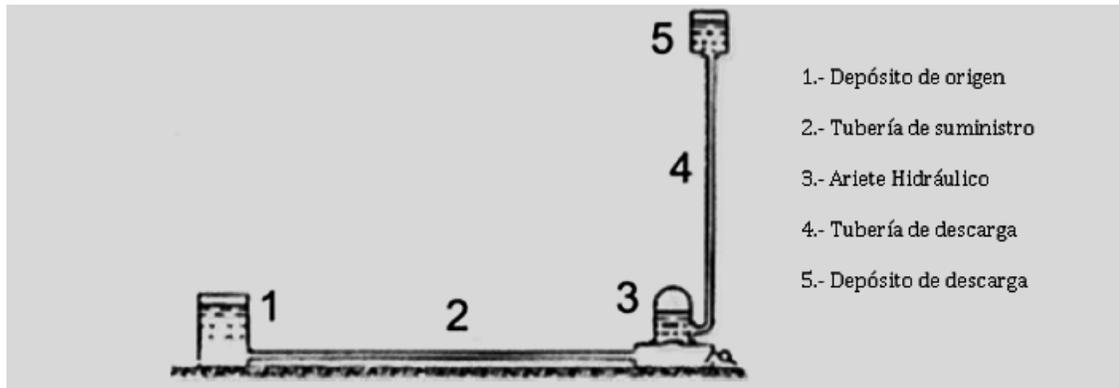
Figura 8. **Diseño del *pulser pump* de John Whitehurst**



Fuente: ALTOZANO, J. *Ingeniería rural hidráulica*. p. 65.

Unos años después, en 1776, al seguir experimentando se añadieron elementos al invento de John Whitehurst y se fabricó el primer ariete hidráulico auto activante de la mano de los hermanos Montgolfier, la mejora radicaba en no hacer uso de ninguna fuerza externa para abrir la válvula de impulso, sino que era la propia fuerza inherente del agua la que se encargaba de realizar esa tarea. A este nuevo prototipo le denominó *belier hydraulique*.

Figura 9. **Diseño del *belier hydraulique* de los hermanos Montgolfier**



Fuente: ALTOZANO, J. *Ingeniería rural hidráulica*. p. 65.

### **2.3. Definición de bomba de ariete**

La bomba de ariete o ariete hidráulico es una bomba de agua totalmente automática y de fácil construcción que no requiere motor o mecanismo manual. La bomba de ariete aprovecha la energía de un caudal de agua constante para impulsar parte de esa agua a mayor altura. Cuando se tiene disponible de un caudal permanente, la bomba puede funcionar continuamente sin intervención alguna. Como principal inconveniente podemos mencionar que sufren una cierta pérdida de agua mientras funcionan en el golpe de ariete. Pero su punto clave además de su facilidad de uso, es que no necesita electricidad, de forma que se pueden utilizar en sitios remotos e inaccesibles.

#### **2.3.1. Características de bomba de ariete**

Sus características generales son; no necesita combustible fósil, no necesita electricidad ni ningún impulsor en absoluto fuera del fluido, no necesita un mantenimiento frecuente. Este sistema es más económico que los

convencionales, no contamina el medio ambiente, su operación es segura y fácil, no necesita mano de obra durante su utilización y su costo de funcionamiento teóricamente es nulo; ya que este dispositivo presenta únicamente dos partes móviles, la vida útil del equipo es prolongada y funciona durante las 24 horas del día. Ideal para terreno escarpado en donde se pueda realizar riego tecnificado (aspersión o riego por goteo) con finalidades agropecuarias, además puede solventar otras necesidades como agua potable para la comunidad.

#### **2.4. Descripción del trabajo de un ariete hidráulico**

Construido el ariete, se procederá a bombear agua que entrará mediante el recipiente que alimenta la bomba provocando el fenómeno buscado. El agua es captada directamente de dicho recipiente a través de la tubería de alimentación, el cual está situado a una altura superior a la posición de la bomba de ariete. Esa energía potencial se transforma en energía cinética debido a la caída del fluido por la tubería de alimentación. El agua atraviesa el cuerpo del ariete con gran velocidad y llega hasta la válvula de impulso, cerrándola y abriéndola, lo que origina sobrepresiones denominadas golpes de ariete, bombeando parte del agua en la tubería de descarga hasta un lugar determinado previamente donde se colocará un recipiente de recogida, con el que se podrá medir la cantidad de agua y comprobar el rendimiento del ariete construido.

Con el objetivo de analizar el fenómeno físicamente, el caso del “cierre y apertura instantánea de la válvula”, la que, a pesar de ser una abstracción teórica, posibilita una más fácil comprensión del problema. Decimos que el cierre instantáneo es una abstracción, porque los órganos de cierre, por rápido que actúen siempre demandarían un tiempo para completar la obturación del

caudal. Ello, no obstante, en la realidad práctica se produce cierres que pueden adaptarse a ese criterio y muchas veces no son deseables, puesto que pueden producir sobrepresiones máximas, no siendo este el caso ya que las sobrepresiones generadas dentro de nuestras tuberías son controladas y no exceden la capacidad soporte de la tubería PVC.

Casos en los que se puede producir el fenómeno. Además del caso ejemplificado anteriormente, existen diversas maniobras donde se induce el fenómeno:

- Cierre y apertura de válvulas
- Arranque de bombas
- Detención de bombas
- Funcionamiento inestable de bombas
- Llenado inicial de tuberías
- Sistemas de protección contra incendios

En general, el fenómeno aparecerá cuando, por cualquier causa, en una tubería se produzcan variaciones de velocidad y, por consiguiente, en la presión. Como puede observarse del listado anterior todos estos fenómenos se producen en maniobras necesarias para el adecuado manejo y operación del recurso, por lo que debemos tener presente que su frecuencia es importante y no un fenómeno eventual.

## **2.5. Mantenimiento de una bomba de ariete hidráulico**

Ya que este tipo de bombas no manejan presiones muy altas y cuentan con un ensamblaje muy sencillo, su mantenimiento es muy reducido, conociendo que estamos controlando el fenómeno de sobrepresiones (golpe de

ariete) en las paredes de la tubería que conforma la bomba artesanal, esta no sobrepasará su resistencia estándar (120 PSI), por lo que esta tubería y todos los accesorios que componen la bomba no contarán con cambios a corto plazo.

Una inspección periódica basta para poder evitar fallas de las diferentes partes de la bomba. Las inspecciones de la bomba pueden hacerse trimestral o anualmente, según esta clase de servicio que otorga la bomba. La inspección debe ser simple, bastará con una limpieza cerrando las válvulas de entrada y salida, permitiendo que la cámara de aire pueda llenarse de nuevo.

Una de las causas más probables por la cual un ariete puede disminuir su capacidad es al reducirse la cantidad de agua en el caudal de suministro, esto ocurre cuando la carrera de la válvula es demasiada larga y no proporciona la cantidad de agua que gasta el ariete, para esto se debe de verificar la entrada de alimentación a la bomba, y si no hay algo que obstruya el paso. De no ser ese el problema, se deberá de acelerar el impulso de la válvula generadora del golpe de ariete para disminuir la carrera y equilibrar el suministro con el consumo de agua dentro del ariete.

## **2.6. Alcances y limitaciones de un ariete hidráulico**

Como toda bomba que eleva el agua de un punto a otro, está sujeto a distintos alcances y limitaciones dentro de las cuales encontramos:

Alcances:

- Bombear agua de una altura mayor de donde se ubica la caída de agua que alimenta la bomba.

- Hacer uso de energía renovable gravitacional y no hacer uso de energía eléctrica para el funcionamiento de este sistema.
- Tener una bomba que abastece agua a un muy bajo costo de manufactura y mantenimiento.

Limitaciones:

- Para obtener mejores resultados es necesario tener una altura mínima de un metro a donde se encuentra instalado el ariete, para poder ganar energía gravitacional y la presión entrante a la bomba.
- Sensibilidad al funcionamiento del ariete, esto debido a que el ariete se ve seriamente afectado por la variación del caudal y presión que circula dentro de él.
- El gasto provocado por la válvula que genera el golpe de ariete se va a un desperdicio de agua considerable, ya que por esto se recomienda dejar la bomba a cielo abierto o controlar dicho desperdicio para reutilizarlo.
- No debe de haber ninguna entrada de aire dentro de la bomba de ariete hidráulica, ya que esto ocasionaría pérdidas y se cuenta ya con la cámara de aire instalada.



### **3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ARIETE HIDRÁULICO**

#### **3.1. Descripción de sus componentes**

El conjunto de piezas y accesorios que permiten el funcionamiento de un ariete hidráulico se clasifican en dos grupos. El primer grupo lo integran componentes estructurales de bombeo y el segundo componentes hidráulicos para bombeo eficiente.

##### **3.1.1. Componentes estructurales de bombeo**

Los componentes estructurales son aquellos que integran la estructura del ariete, entre estos se describen brevemente los siguientes:

- Tubos PVC: que une la tubería de alimentación con el ariete y el paso de agua hasta la válvula pulsadora.
- Niples: para realizar los empalmes entre piezas.
- Tees: para la unión entre la tubería de paso hacia la cámara de aire y para la unión de la cámara de aire con la tubería de descarga.
- Cámara de aire: para regular la presión del fenómeno del ariete.
- Válvula de Check vertical: para que el agua se dirija en una sola dirección y no pueda regresarse.

- Reductores: para adaptar tubos de diferentes diámetros.

### **3.1.2. Componentes hidráulicos de bombeo**

Al construir un ariete hidráulico, se tienen componentes que son accionados con el movimiento o presión que el agua ejerce sobre cada uno de ellos, tales como:

- Tubería de carga
- Válvula pulsadora (de pie)
- Válvula de liberación
- Válvula expulsadora de aire
- Tubería de salida

### **3.2. Cualidades de diseño**

En el diseño del ariete hidráulico artesanal que se presenta, se estudiaron distintas alturas de bombeo y presiones otorgadas, registrando datos de caudales en el laboratorio de hidráulica ubicado en la Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 12, ciudad de Guatemala.

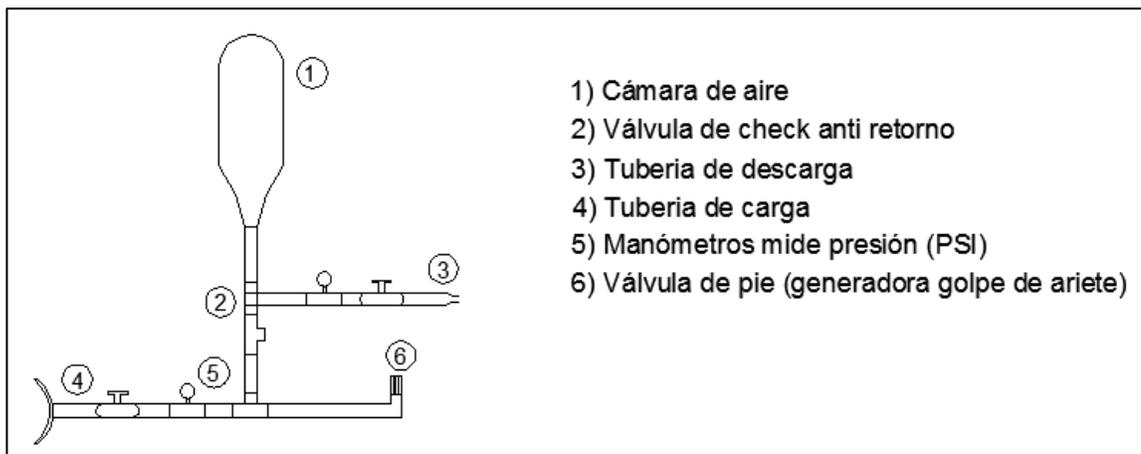
Este diseño puede ser adaptado fácilmente a diferentes regiones, porque está seccionado en componentes básicos, cuyas piezas están disponibles en cualquier ferretería.

Entre las características de diseño contempladas para la construcción en este ariete hidráulico, se presentan y describen sus componentes, las piezas que las integran y sus respectivas medidas para que sean funcionales.

### 3.3. Componentes constructivos de un ariete hidráulico

El proceso constructivo de un ariete hidráulico es llevado a cabo con distintas piezas que luego se deben ensamblar, un conjunto de piezas específicas con funciones específicas para poder bombear agua de un lugar a otro, las cuales se describen a continuación:

Figura 10. Componentes ariete hidráulico



Fuente: elaboración propia.

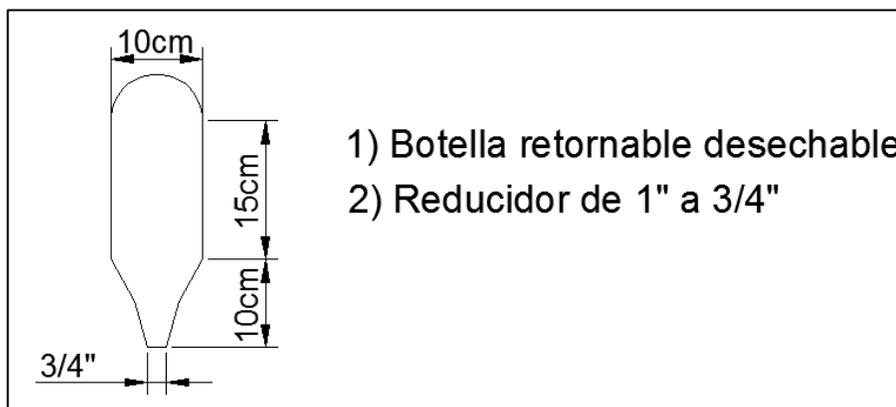
#### 3.3.1. Cámara de aire

La cámara de aire que en este caso será una botella de agua retornable, es el compartimiento donde se almacena el agua que entra debido al golpe de ariete, comprimiendo la masa de aire generada, disminuyendo el golpe de ariete y almacenando la presión.

El aire que se encuentra en esta cámara, tiene como función absorber de forma continua los golpes y las sobrepresiones a las que se verá sometido en

determinados momentos, y de liberar esa energía progresivamente durante cada ciclo, contribuyendo con el impulso del agua por la tubería de descarga.

Figura 11. **Esquema cámara de aire**



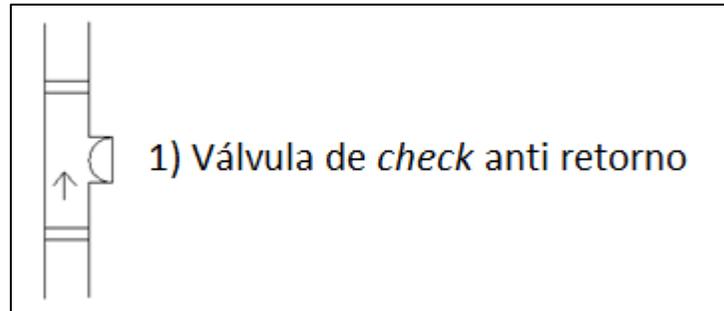
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.2. **Válvula de cheque antiretorno**

Tiene por objetivo cerrar por completo el regreso del agua circulando hacia arriba dentro de la bomba y dejar paso libre en el contrario.

Se pretende mantener la presión dentro de la cámara de presión, así mismo dentro de la tubería y poner en descarga la alimentación.

Figura 12. **Esquema válvula de cheque**

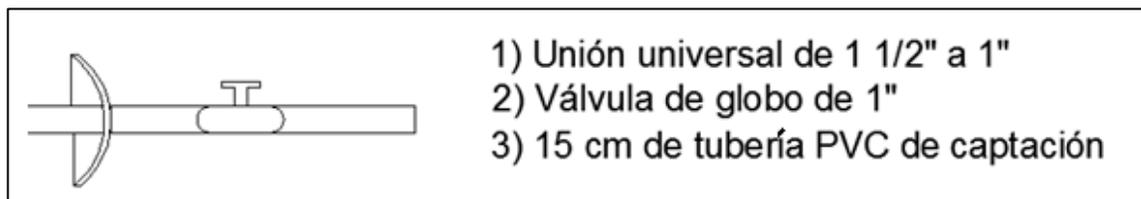


Fuente: elaboración propia.

### 3.3.3. Tubería de captación o alimentación

La tubería de alimentación es la que capta y transporta el agua desde la fuente, ya sea un río o en este caso desde un tanque de alimentación, llevando el fluido para activar la bomba de ariete.

Figura 13. **Esquema de tubería de captación**



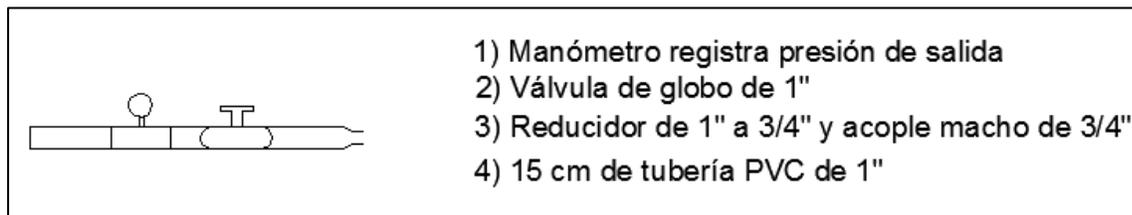
Fuente: elaboración propia.

### 3.3.4. Tubería de descarga

La tubería de descarga se encarga de liberar el fluido ya bombeado es decir con una presión y velocidad ejercida ya por la bomba en funcionamiento,

consta de un manómetro que registra la presión de salida del fluido como también una válvula de globo para poder abrir, cerrar o graduar el paso del agua.

Figura 14. **Esquema de tubería de descarga**

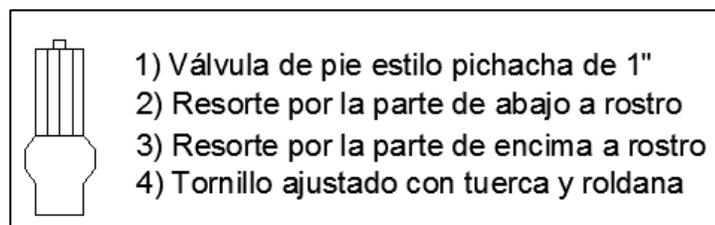


Fuente: elaboración propia.

### 3.3.5. **Válvula de pie (pichacha)**

La válvula de pie o pozo estilo pichacha sufre unas modificaciones simples que constan en cruzar un tornillo por justo a la mitad de la rejilla con una roldana y una tuerca, como también un resorte de 7 vueltas por encima del cierre de válvula y un tornillo con medida a rostro de la válvula y así garantizar y graduar el trabajo del ariete.

Figura 15. **Esquema válvula de pie (pichacha)**

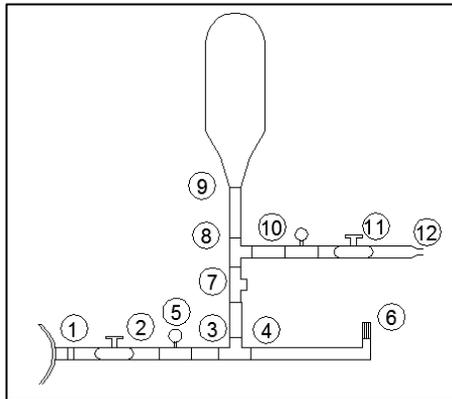


Fuente: elaboración propia.

### 3.4. Proceso de ensamblaje de piezas

El ensamblaje de piezas no es más que la acción de unificar los accesorios en su lugar (figura 15 y tabla I) con sus distintas formas o materiales, con el objetivo de crear la bomba de ariete hidráulico. La finalidad de la presentación de este proceso es la aplicación adecuada a su naturaleza y funcionalidad, de tal forma que el ensamblaje se realice correctamente y permita que la bomba de ariete hidráulico funcione eficientemente.

Figura 16. Enumeración de piezas a utilizar para ensamblaje



Fuente: elaboración propia.

Tabla I. **Listado de piezas a utilizar para el ensamblaje de la bomba de ariete hidráulico**

Núm.	Piezas a utilizar
1	Unión universal acompañada de un reductor de 1 ½" a 1" conectada a tubería PVC de 1" de 8 centímetros.
2	Unión de la tubería PVC de 1" proveniente del tramo anterior conectándose a una válvula de globo sin rosca de 1".
3	Tubería PVC de 1" con longitud de 8 centímetros proveniente de válvula de globo, conectándose a unión tee de 1".
4	Tubería de PVC de 1" con longitud de 13 centímetros conectada proviniendo de la tee.
5	Adaptador a manómetro de presión de entrada proveniente del tramo anterior, colocando 8 centímetros más de PVC de 1" hasta llegar a codo de 90° entrada lisa y salida con rosca.
6	Válvula de pie estilo pichacha (modificada) con la rosca proveniente del codo a 90°.
7	<i>Bushing</i> de HG de 1" entrada y salida con rosca uniendo la tee de PVC de 1" y válvula de <i>check</i> de 1".
8	<i>Bushing</i> de HG de 1" entrada y salida con rosca y conectándola a tee de 1"
9	<i>Bushing</i> de HG de 1" entrada y salida con rosca conectándola a la tee de 1" anterior y por el otro lado un acampanador reductor de 1" a ¾" posteriormente conectada una botella plástica de doble litro a dicho acampanador en su función como cámara de aire.
10	Tubo PVC de 1" de 4 centímetros uniendo la tee con el adaptador a manómetro de presión de salida
11	Tubería de PVC de 1" de 4 centímetros uniendo el manómetro de presión con la válvula de globo reguladora de caudal de salida (bombeado por el ariete hidráulico).
12	Reductor macho de 1" a ¾" para la colocación de la manguera que eleve a distintas alturas el caudal bombeado por el ariete hidráulico.

Fuente: elaboración propia.

### 3.4.1. Pasos para la modificación de la válvula de pie estilo pichacha

La única pieza de ensamblaje que tiene modificación es la válvula de pie estilo pichacha, la cual se modifica para poder tener un golpe de ariete más controlado dentro de la bomba de ariete y así moderar el ariete hidráulico según sea la altura requerida para bombear el agua. El procedimiento siendo sencillo y resumido en los siguientes pasos:

- Colocar un tornillo de rosca que atraviese justo a la mitad de la canastilla que evita que entre basura dentro de la válvula.
- Colocar una tuerca una roldana y seguido de otra tuerca para evitar que la roldana se juegue dentro de la canastilla. (Que la roldana se de diámetro exterior mayor que el externo pero que no tope con las paredes de la canastilla).
- Colocar un resorte de 7 vueltas y espesor de 0,3 mm con constante  $K = 10,87 \text{ N/m}$ , de modo que quede al final de la canastilla justo por encima del flote provocador del golpe de ariete.
- Graduar mediante el tornillo el golpe de ariete según sea necesario para la altura que se desee bombear el agua.

#### **3.4.2. Descripción detallada de metodología para construcción del ariete hidráulico.**

Para poder realizar una guía más detallada luego de haber explicado las piezas a utilizar como también la modificación necesaria de la válvula de pie necesarias para la construcción del ariete hidráulico, se procede a desarrollar una metodología de ensamblaje.

- Revisar a cabalidad la tabla de piezas a utilizar para el ensamblaje del ariete hidráulico y guiarse mediante el diagrama enumerado en la figura 10.
- Colocar la unión universal de la bomba esta de 1 ½" que es la tubería estándar que se usará para los ensayos realizados, así mismo colocarle

un reductor de 1" que es la medida de toda la bomba de ariete hidráulico.

- Seguido de la unión y el reductor, colocar una tubería de PVC de 1" de aproximadamente 8 centímetros la cual hará conectar el acople universal a la válvula de globo reguladora de caudal.
- Seguido de la conexión de la válvula de globo se procede a colocar 5 centímetros de tubería PVC de 1" la cual se conecta con la base donde se ubica el manómetro el cual nos registrará la presión en la entrada de la bomba.
- A continuación, se pone una nueva tubería PVC de 1" de longitud de 5 centímetros la cual nos conectará el manómetro con la tee ramificadora.
- En la siguiente salida de la tee se colocarán 5 centímetros más de tubería PVC de 1" la cual nos conectará a un codo a 90° de entrada lisa y salida con rosca de 1".
- Seguido en el codo se deberá enroscar la válvula de pie estilo pichacha ya modificada, la cual hará todo el trabajo de bombeo de agua.
- En la siguiente salida vertical de la tee ramificadora se colocará un *bushing* de HG de 1" con rosca en ambos lados, este unirá la tee con la válvula de *check*.
- Colocado y enroscada la válvula de *check* que es la que evitará que el flujo regrese actuando solo en una dirección en este caso vertical, en la

salida del *check* se pondrá un *bushing* más de HG de 1" que se conectará a otra tee.

- En la siguiente salida vertical de la tee se colocará un *bushing* de HG de 1" el cual nos conectará con un reductor de 1" a  $\frac{3}{4}$ ".
- Dicho acampanador nos permitirá colocar el embase plástico desechable que actuará como nuestra cámara de aire, el cual nos ayudará a contener la presión que provoque el golpe de ariete.
- Por el lado contrario horizontal de la tee, se colocará una tubería PVC de 1" de 5 centímetros de longitud, la cual conectará la tee con el segundo manómetro de presión el cual nos leerá la presión de salida de la bomba, conociendo que si esta es mayor a la presión de entrada el ariete está realizando su trabajo de manera correcta.
- Seguido del manómetro se colocará otro tramo de tubería PVC de 1" de 3 centímetros de longitud el cual nos ayudará a colocar un reductor macho de 1" a  $\frac{3}{4}$ ".
- En la salida de la bomba con el reductor macho de salida de  $\frac{3}{4}$ " nos permitirá colocar la manguera de entrada universal, la cual nos ayudará a conocer las alturas registradas del bombeo.
- Si se desea se puede realizar una base en la que se quede montada la bomba de ariete, ya que esta al producir el ariete hidráulico, provoca un leve movimiento, y al ser constante la bomba vibra más, siendo una muy buena opción colocarle una base para estabilizarla o colocarla en un nivel plano en donde se pueda mantener estable.

### **3.5. Espacios necesarios para la bomba de ariete hidráulico**

En la construcción de un ariete hidráulico se debe de elegir el área o espacio óptimo, en el cual no sea interrumpido por personas y pueda tener una entrada de flujo constante, por lo que hay ciertos espacios en los cuales se debe implementar:

- Para la tubería de alimentación debe de ser rectilínea y colocada en un lugar donde no le llegue a hacer falta la entrada de flujo a la bomba, siendo óptimos como nacimientos de ríos, caídas a lo largo del cauce de un río, o por debajo de un tanque de almacenamiento distribuidor de agua.
- La bomba de ariete debe de tener una base o una superficie plana en la cual no se llegue a mover de su sitio cuando el golpe se genere y esta bomba vibre.
- Se debe de prever que el desperdicio o desfogue que tiene la válvula de pie pueda ser aprovechable, siendo útil para campos de riego o huertos, o pequeños tanques almacenadores para captar el agua y poder reutilizarla de diferente manera.
- Para la tubería de descarga basta con tener un tubo largo que permita llevar el agua a la altura deseada, como también puede ser una manguera de riego la cual puede manipularse de una mejor forma y poder así aprovechar en su totalidad el agua bombeada.

### 3.6. Materiales y herramientas necesarias para la construcción del ariete hidráulico

A continuación, se presenta una descripción de los materiales y herramientas necesarias para la construcción del ariete hidráulico.

Tabla II. **Herramientas utilizadas en el proceso**

Herramientas	Descripción de uso
<b>Barreno y taladro</b>	Para la perforación de la plataforma donde se colocará el tanque que abastece la bomba de ariete a alturas de 1m, 1,5mts, 2mts, 2,5mts, 3mts y 3,5mts.
<b>Sierra de PVC</b>	Para los cortes necesarios de la tubería de abastecimiento de la bomba de ariete hidráulico.
<b>Llave No.12</b>	Llave utilizada para la colocación de los tornillos que cargarán el tanque de abastecimiento de la bomba.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Materiales utilizados en el proceso constructivo**

Materiales	Descripción del uso
<b>Tornillos</b>	Serán los que contienen las platinas que sostienen el tonel que abastece la bomba de ariete
<b>Tuercas</b>	Para lograr que el tornillo no se juegue y esté estable.
<b>Silicón</b>	Para pegar distintos accesorios como acoples y uniones.
<b>Tangit PVC</b>	Para unir toda pieza plástica de PVC a PVC
<b>Teflón de 1"</b>	Para evitar fuga en todas las uniones con rosca.
<b>Acoples machos y hembras</b>	Colocados en la parte de abajo del tonel abastecedor, es decir en la salida para poder hacer cambio las distintas alturas para ensayo de la bomba.
<b>Acoples universales</b>	Colocados en la entrada de cada bomba para lograr cambiar la tubería de una forma más sencilla.
<b>Tubería PVC de distinto diámetro</b>	Utilizada para las distintas alturas de ensayo para la tubería de abastecimiento a la bomba de ariete.
<b>Manguera plástica transparente.</b>	Utilizada como tubería de rebalse, para lograr una altura constante de agua dentro del tonel abastecedor y este no llegue a rebalsarse.

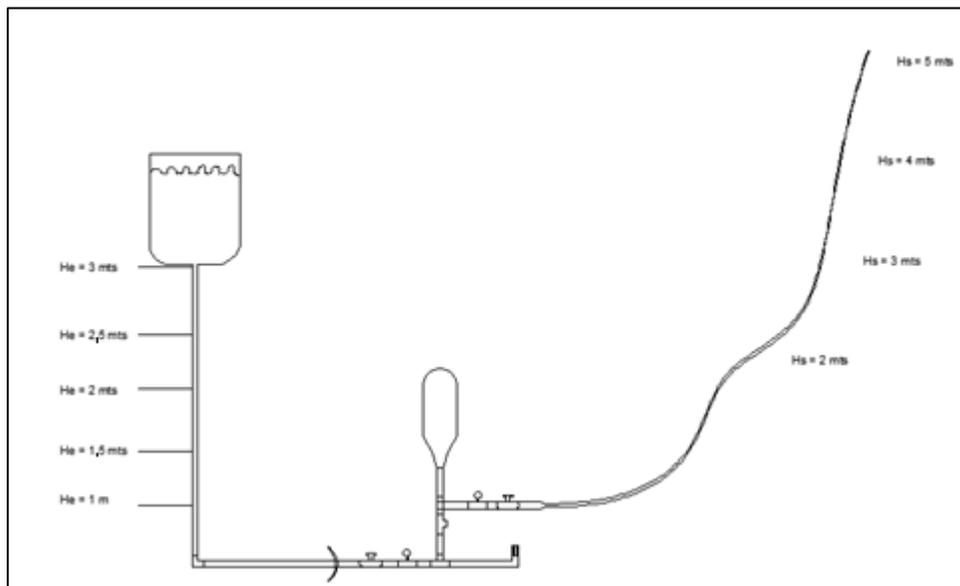
Fuente: elaboración propia.

### 3.7. Pruebas de bombeo

Al tener construida y finalizada la bomba de ariete junto con todos sus componentes y accesorios, tanto normales como modificados, se procederá a realizar las pruebas de bombeo con el objetivo de determinar de manera cuantitativa la capacidad de bombeo otorgada por el ariete hidráulico.

Por lo que se establecieron diferentes alturas de entrada de agua, es decir alturas variables en donde se encontrará el tonel de abastecimiento para la bomba de ariete que serán 1m, 1,5mts, 2mts, 2,5mts y 3mts y verificar distintas alturas de salida otorgadas por la bomba como 2mts, 3mts, 4mts, y 4,5mts, el cual se encuentra explicado de una mejor forma por el siguiente diagrama:

Figura 17. Esquema pruebas de bombeo



Fuente: elaboración propia.

### 3.7.1. Sistema de bombeo de ariete

Se instalará a la entrada del sistema un tanque de abastecimiento, el cual debe garantizar una altura de entrada  $H_e$  constante.

Durante las pruebas de bombeo, la altura máxima de entrada ( $H_e$ ) será 3 metros, y la altura máxima de salida ( $H_s$ ) de 5 metros, en dicha salida y con la bomba en funcionamiento, se realizarán aforos de tipo volumétrico con la ayuda de una probeta de 3 litros y un cronómetro, realizando 5 aforos por cada una de las alturas de salida. Posteriormente se realizará la misma secuencia de actividades en la altura de salida a 2mts, 3mts, 4mts y 5mts.

Al terminar con la altura máxima de entrada (3 metros), se procede a cortar la tubería de entrada a una altura de 1,5 metros y se da continuación a la misma dinámica de los ensayos.

Figura 18. **Representación de equipo de bombeo montado en laboratorio**



Fuente: elaboración propia.

### 3.8. Ensayo de pérdida de fricción $F$ dentro de la manguera

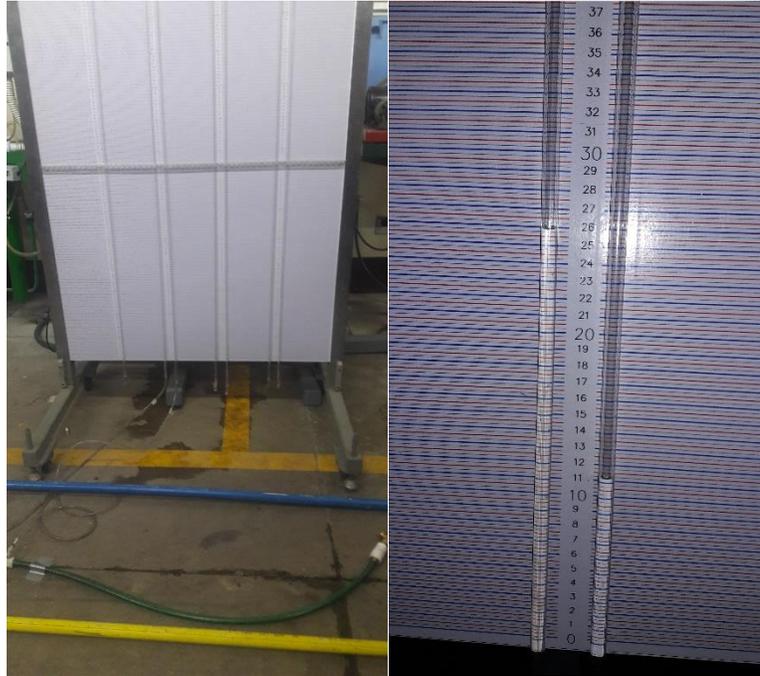
Para dicho ensayo es necesario poder conocer la variación de metros columna de agua en un tramo de manguera de 2 metros medido con piezómetros, que luego mediante la ecuación de Darcy se podrá encontrar el factor de fricción  $F$  de la manguera y así poder conocer la pérdida real correspondiente para cada caudal otorgado para la bomba de ariete hidráulico y disminuir el error de bombeo proporcionado.

Figura 19. Tramo de manguera dos metros para ensayo de factor de pérdida de fricción  $F$



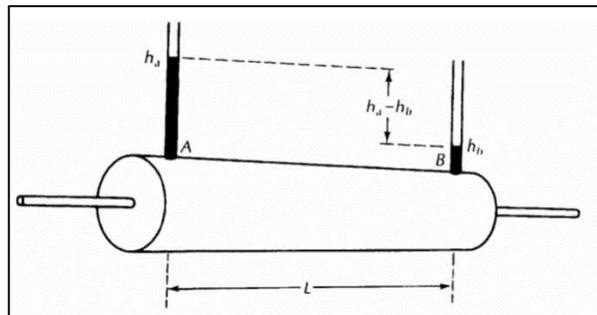
Fuente: elaboración propia.

Figura 20. **Caída de presión en la tubería de dos metros de longitud**



Fuente: elaboración propia.

Figura 21. **Gráfico pérdida dentro de tubería**



Fuente: elaboración propia.

### **3.9. Medidas de seguridad para el ensamblaje y ensayos**

A continuación, se describen las medidas de seguridad para el ensamblaje y ensayos.

#### **3.9.1. Uso de medidas de seguridad industrial para los ensayos realizados en laboratorio**

- Todos los ensayos dentro del laboratorio cada persona debe de hacer uso de botas industriales, punta de acero y suela antideslizante para evitar accidentes en el laboratorio.
- Colocar las plataformas a utilizar para los ensayos en lugares estables y nivelados para evitar caídas de dichos equipos.
- Hacer uso de escalera en buen estado y con escalones antideslizantes para evitar caídas desde alturas mayores o menores.

#### **3.9.2. Medidas de seguridad para el ensamblaje de la bomba de ariete hidráulico y la estructura**

- Al utilizar el taladro para la abertura de agujeros en la estructura, sostener el taladro a un ángulo ideal para evitar rupturas de broca y ejercer la presión necesaria para evitar sobrecalentamiento de dicho equipo.
- Para los residuos metálicos, al terminar de abrir los agujeros, utilizar guantes especiales o un cepillo y no las manos para evitar cortaduras.

- Revisar que todo el equipo eléctrico no haga contacto con el agua para evitar cortos circuitos.
- Hacer uso de guantes de látex para la utilización de pegamentos fuertes para la tubería y estructura, para evitar contacto directo con la piel.
- Revisar que todo el equipo esté bien ensamblado y estable antes de hacer algún ensayo para evitar que las presiones ejercidas por el agua puedan separar piezas de la bomba bruscamente.



## **4. DISPOSICIONES FINALES DEL TRABAJO DEL ARIETE HIDRÁULICO**

### **4.1. Consideraciones**

Al hacer uso y tomar en cuenta todas las consideraciones presentadas anteriormente tanto para el abastecimiento de agua, se procede a recolectar datos para poder determinar el caudal que proporciona la bomba de ariete y las diferentes alturas que la misma puede bombear, la presión con la que otorga el agua en la salida de la bomba y la eficiencia de la misma.

La recolección de datos, los cálculos y los costos de fabricación e instalación son presentados en este capítulo, para estandarizar los datos obtenidos con la bomba de ariete hidráulico con el diámetro de una pulgada.

Esto, a su vez, nos dará a conocer y poder unificar los datos obtenidos, los caudales otorgados y alturas de bombeo para poder estandarizar las máximas y mínimas etapas de trabajo para una bomba de ariete con diámetro de una pulgada y poder utilizar dichos datos para la fabricación de la bomba de ariete hidráulico según alturas de bombeo establecidas.

### **4.2. Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 1,5 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 1,5 metros descarga.

Tabla IV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		1,05	1,5	36,39	36,31	35,44

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla V. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,05	1,5	0,0274	0,0275	0,0282	0,0277	0,02784
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0280 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0282 - 0,0274}{0,0282} * 100 = 1,83 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.2.1. Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,0 metros descarga.

Tabla VI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		1,05	2	91,44	91,12	92,38

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla VII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,05	2	0,01093	0,01097	0,01082	0,01081	0,01093
					Caudal Promedio	0,01089 lts/seg

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,01097 - 0,01081}{0,01097} * 100 = 1,40 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.2.2. Caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,50 metros descarga

A continuación, se describe el caudal otorgado a 1 metro altura del tanque y 2,50 metros descarga.

Tabla VIII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Volumen 1 Litro				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,05	2,50	380,5	380,8	380,2	381,3	380,8

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla IX. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,05	2,50	0,0026	0,0236	0,00254	0,00266	0,0026
					<b>Caudal promedio</b>	<b>0,0026 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0026 - 0,00256}{0,0026} * 100 = 1,92 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

Posteriormente se realiza la medición de la presión registrada en la entrada de la bomba dentro de los manómetros para conocer los metros de columna de agua.

Figura 22. **Manómetro medidor de presión marcando 1,5 PSI**



Fuente: elaboración propia.

La presión registrada por el manómetro nos indica 1,5 PSI en la entrada de la bomba, por lo que para pasarlo a metros columna de agua se hace una conversión:

$$1,5 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 1,05 \text{ Metros}$$

#### **4.3. Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,0 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,0 metros descarga.

Tabla X. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		1,5	2	38,50	38,83	39,00

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XI. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,5	2	0,0519	0,0515	0,0513	0,0514	0,512
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0515 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0519 - 0,0512}{0,0519} * 100 = 1,35 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.3.1. Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,50 metros descarga.

Tabla XII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		1,5	2,5	52,4	51,9	51,95

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Tabla XIII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,5	2,5	0,03816	0,0385	0,0384	0,0382	0,0385
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0384 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0385 - 0,0381}{0,0385} * 100 = 1,03 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.3.2. Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XIV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		1,5	3	72,21	72,32	71,38

Fuente: elaboración propia.

Después de obtener los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XV. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,5	3	0,0277	0,0278	0,0280	0,0279	0,0277
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0278 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,028 - 0,0277}{0,0277} * 100 = 1,08 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.3.3. Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.

Tabla XVI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Volumen 2 Litros				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,5	3,5	115,3	116,15	116,3	114,41	115,47

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XVII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
1,5	3,5	0,0173	0,0169	0,0172	0,0175	0,0173
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0173 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0175 - 0,0169}{0,0175} * 100 = 1,55 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

Posteriormente se realiza la medición de la presión registrada en la entrada de la bomba dentro de los manómetros para conocer los metros de columna de agua.

Figura 23. **Manómetro medidor de presión marcando 2,10 PSI**



Fuente: elaboración propia.

La presión registrada por el manómetro nos indica 2,10 PSI en la entrada de la bomba, por lo que para pasarlo a metros columna de agua se hace una conversión:

$$2,10 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 1,476 \text{ Metros}$$

#### **4.4. Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 2,5 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 2,5 metros descarga.

Tabla XVIII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		2	2,5	28,1	28,14	28,1

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XIX. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	2,5	0,0712	0,0711	0,0712	0,0712	0,0714
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0712 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0714 - 0,0711}{0,0714} * 100 = 0,42 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.4.1. Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XX. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		2	3	37,37	37,28	37,75

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXI. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	3	0,0535	0,0536	0,0530	0,0535	0,0526
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0533 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0536 - 0,0530}{0,0536} * 100 = 1,12 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.4.2. **Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.

Tabla XXII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Volumen 2 Litros				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	3,5	55,6	55,44	56,46	55,87	55,19

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXIII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	3,5	0,036	0,0361	0,0354	0,0352	0,0362
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0358 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0362 - 0,0352}{0,0362} * 100 = 1,00 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.4.3. Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.

Tabla XXIV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	4	55,9	56,03	55,89	56,01	55,98

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Tabla XXV. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	4	0,0179	0,0178	0,0179	0,0178	0,0179
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0179 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0179 - 0,0178}{0,0179} * 100 = 0,55 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

**4.4.4. Caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga.

Tabla XXVI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	4,5	85,15	86,15	85,25	85,68	86,08

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXVII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2	4,5	0,0116	0,0116	0,0117	0,0116	0,0116
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0116 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0117 - 0,0116}{0,0116} * 100 = 0,86 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

Posteriormente se realiza la medición de la presión registrada en la entrada de la bomba dentro de los manómetros para conocer los metros de columna de agua.

Figura 24. **Manómetro medidor de presión marcando 3,00 PSI**



Fuente: elaboración propia.

La presión registrada por el manómetro nos indica 3,0 PSI en la entrada de la bomba, por lo que para pasarlo a metros columna de agua se hace una conversión:

$$3,0 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 2,05 \text{ Metros}$$

#### **4.5. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XXVIII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		2,5	3	23,37	23,41	22,99

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXIX. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	3	0,0856	0,0854	0,0870	0,0870	0,0857
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0862 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,087 - 0,0854}{0,087} * 100 = 1,16 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.5.1. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.

Tabla XXX. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	3,5	25,09	25,37	25,68	25,78	25,02

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXXI. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	3,5	0,0797	0,0788	0,0779	0,0776	0,0799
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0788 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0797 - 0,0776}{0,0797} * 100 = 1,96 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

**4.5.2. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.

Tabla XXXII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	4	33,35	33,37	33,22	33,12	33,2

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXXIII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	4	0,0600	0,0599	0,0602	0,0604	0,0602
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0601 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0604 - 0,0599}{0,0604} * 100 = 0,82 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.5.3. **Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga.

Tabla XXXIV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		2,5	4,5	38,65	38,87	38,75

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXXV. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	4,5	0,0517	0,0515	0,0516	0,0513	0,0513
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0515 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0517 - 0,0513}{0,0517} * 100 = 0,77 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.5.4. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga.

Tabla XXXVI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	5	58,72	58,82	59,05	58,23	58,66

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Tabla XXXVII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	5	0,0341	0,0340	0,0339	0,0343	0,0341
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0341 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0343 - 0,0339}{0,0343} * 100 = 1,16 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

**4.5.5. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga.

Tabla XXXVIII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	5,5	60,15	60,22	60,21	60,7	60,21

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior, se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XXXIX. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	5,5	0,0333	0,0332	0,0332	0,0329	0,0332
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0332 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0333 - 0,0332}{0,0333} * 100 = 0,30 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.5.6. Caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 2,50 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga.

Tabla XL. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		2,5	6	94,5	94,9	94,26

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XLI. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
2,5	6	0,0212	0,0211	0,0212	0,0210	0,0212
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0211 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0212 - 0,0210}{0,0212} * 100 = 0,94 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

Posteriormente se realiza la medición de la presión registrada en la entrada de la bomba dentro de los manómetros para conocer los metros de columna de agua.

Figura 25. **Manómetro medidor de presión marcando 3,60 PSI**



Fuente: elaboración propia.

La presión registrada por el manómetro nos indica 3,60 PSI en la entrada de la bomba, por lo que para pasarlo a metros columna de agua se hace una conversión:

$$3,60 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 2,53 \text{ Metros}$$

#### 4.6. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 3,50 metros descarga.

Tabla XLII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		3	3,5	21,35	21,19	21,44

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XLIII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	3,5	0,0937	0,0944	0,0933	0,0947	0,0946
<b>Caudal Promedio</b>						<b>0,0941 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0947 - 0,0933}{0,0947} * 100 = 1,47 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.1. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.

Tabla XLIV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Volumen 2 Litros				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	4	24,15	24,1	24,02	23,87	24,05

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XLV. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	4	0,0828	0,0839	0,0833	0,0834	0,0832
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0831 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0839 - 0,0828}{0,0839} * 100 = 1,31 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

**4.6.2. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,50 metros descarga.

Tabla XLVI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	4,5	30,85	30,46	30,97	30,72	30,47

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XLVII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	4,5	0,0659	0,0657	0,0646	0,0651	0,0656
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0654 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0659 - 0,0646}{0,0659} * 100 = 1,97 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.3. **Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga**

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,0 metros descarga.

Tabla XLVIII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		3	5	36,43	36,53	36,2

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla XLIX. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	5	0,0549	0,0547	0,0552	0,0551	0,0547
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0549 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0552 - 0,0547}{0,0552} * 100 = 0,90 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.4. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 5,50 metros descarga.

Tabla L. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	5,5	38,54	38,4	38,31	38,66	38,4

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$\text{Caudal} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Tiempo}}$$

Tabla LI. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	5,5	0,0519	0,0521	0,0522	0,0517	0,0521
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0520 (lts/seg)</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0522 - 0,0517}{0,0522} * 100 = 0,95 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.5. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,0 metros descarga.

Tabla LII. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	6	43,37	43,7	43,22	43,5	43,53

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla LIII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	6	0,0461	0,0458	0,0463	0,0460	0,0469
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0460 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0463 - 0,0458}{0,0463} * 100 = 0,10 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.6. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,50 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 6,50 metros descarga.

Tabla LIV. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		3	6,5	65,4	65,32	64,4

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla LV. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/seg)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	6,5	0,0306	0,0306	0,0311	0,0312	0,0307
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0308 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificará el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$\text{Error} = \frac{0,0312 - 0,0306}{0,0312} * 100 = 1,92 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

#### 4.6.7. Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 7,0 metros descarga

A continuación, se presenta el caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 7,0 metros descarga.

Tabla LVI. **Tiempos obtenidos en aforo**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Tiempo de Aforo (Segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	7	92,99	93,2	93,28	93,23	93,36

Fuente: elaboración propia.

Después de haber obtenido los datos recopilados expresados en la tabla anterior se procede a calcular el caudal otorgado en cada tiempo distinto mediante la ecuación:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo}$$

Tabla LVII. **Caudales calculados**

Altura Tonel (Metros)	Altura Descarga (Metros)	Caudal Otorgado (lts/min)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
3	7	0,0215	0,0215	0,0214	0,0215	0,0214
					<b>Caudal promedio</b>	<b>0,0215 lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

Y se verificara el error de medición mediante:

$$Error_{max} = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{Q_{max}} * 100 \leq 2 \%$$

$$Error = \frac{0,0215 - 0,0214}{0,0215} * 100 = 0,46 \leq 2 \text{ CUMPLE}$$

Posteriormente se realiza la medición de la presión registrada en la entrada de la bomba dentro de los manómetros para conocer los metros de columna de agua.

Figura 26. **Manómetro medidor de presión marcando 5,0 PSI**



Fuente: elaboración propia.

La presión registrada por el manómetro nos indica 5,0 PSI en la entrada de la bomba, por lo que para pasarlo a metros columna de agua se hace una conversión:

$$5,0 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 3,53 \text{ Metros}$$

#### **4.7. Resumen de caudales otorgados**

Los caudales presentados en la siguiente tabla son el resultado de los caudales promedio según su altura de captación y altura de descarga, que se organizaron sistemáticamente:

Tabla LVIII. Resumen de caudales (Lts/seg)

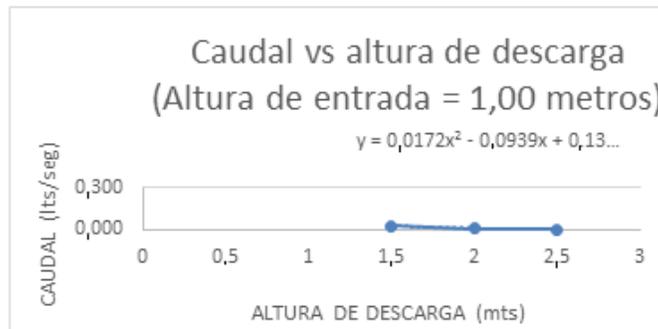
He (mts)	Hs (mts)	Caudal	He (mts)	Hs (mts)	Caudal
1,00	1,50	0,028 L/seg	2,5	4,00	0,06 L/seg
1,00	2,00	0,011 L/seg	2,50	4,50	0,051 L/seg
1,00	2,50	0,003 L/seg	2,50	5,00	0,034 L/seg
1,50	2,00	0,05 L/seg	2,50	5,50	0,033 L/seg
1,50	2,50	0,038 L/seg	2,50	6,00	0,021 L/seg
1,50	3,00	0,028 L/seg	3,00	3,50	0,09 L/seg
1,5	3,5	0,017 L/seg	3,00	4,00	0,083 L/seg
2,00	2,50	0,07 L/seg	3,00	4,50	0,065 L/seg
2,00	3,00	0,053 L/seg	3,00	5,00	0,054 L/seg
2,00	3,50	0,035 L/seg	3,00	5,50	0,052 L/seg
2,00	4,00	0,017 L/seg	3,00	6,00	0,046 L/seg
2,50	3,00	0,086 L/seg	3,00	6,50	0,030 L/seg
2,50	3,50	0,079 L/seg	3,00	7,00	0,021 L/seg

Fuente: elaboración propia.

#### 4.7.1. Gráficas resumen de caudales otorgados a alturas de descarga

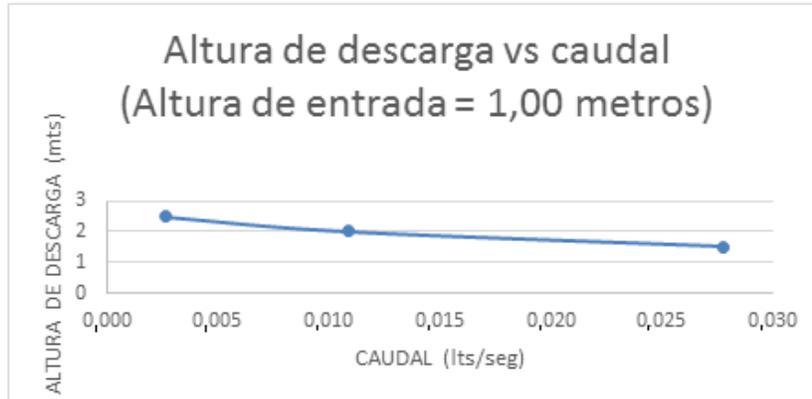
- Altura de entrada = 1,00 mts

Figura 27. Caudal vs descarga (entrada 1 metro)



Fuente: elaboración propia.

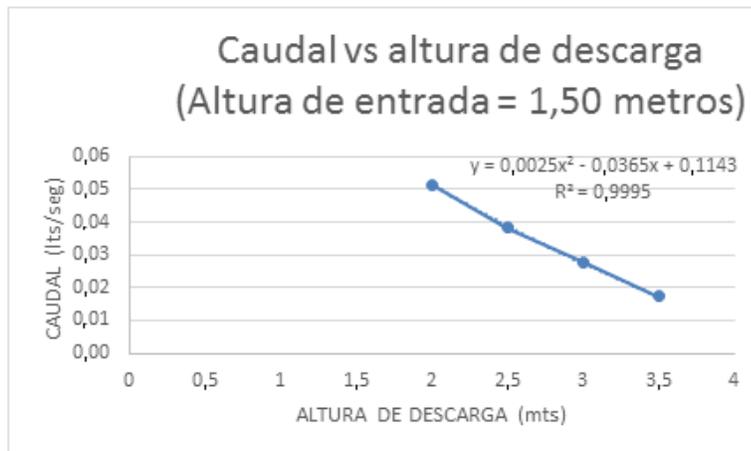
Figura 28. Descarga vs caudal (entrada 1 metro)



Fuente: elaboración propia.

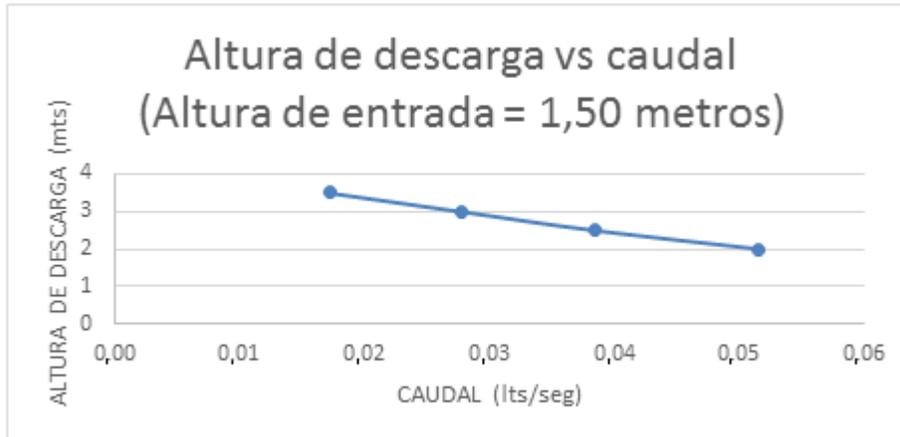
- Altura de entrada = 1,50 mts

Figura 29. Caudal vs descarga (entrada 1,5 metros)



Fuente: elaboración propia.

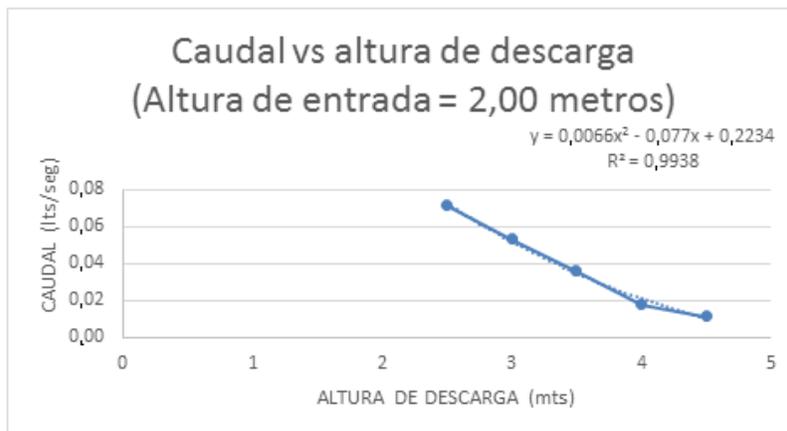
Figura 30. **Descarga vs caudal (entrada 1,5 metros)**



Fuente: elaboración propia.

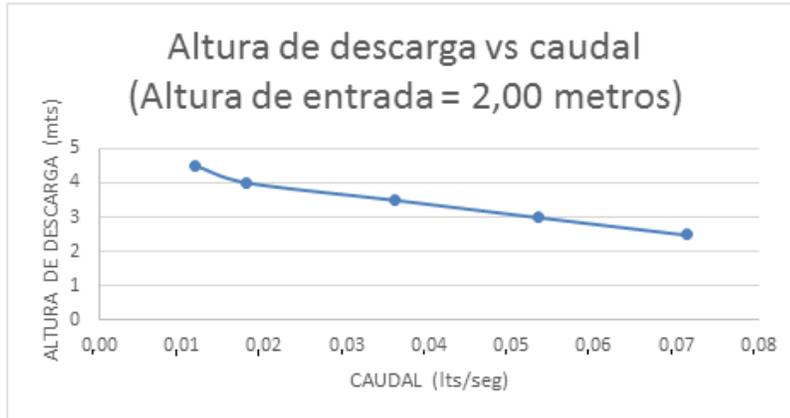
- Altura de entrada 2,00 metros

Figura 31. **Caudal vs descarga (entrada 2,0 metros)**



Fuente: elaboración propia.

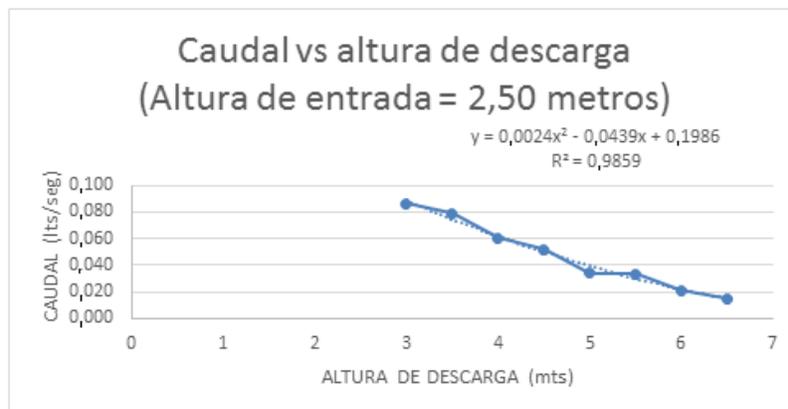
Figura 32. Descarga vs caudal (entrada 2,0 metros)



Fuente: elaboración propia.

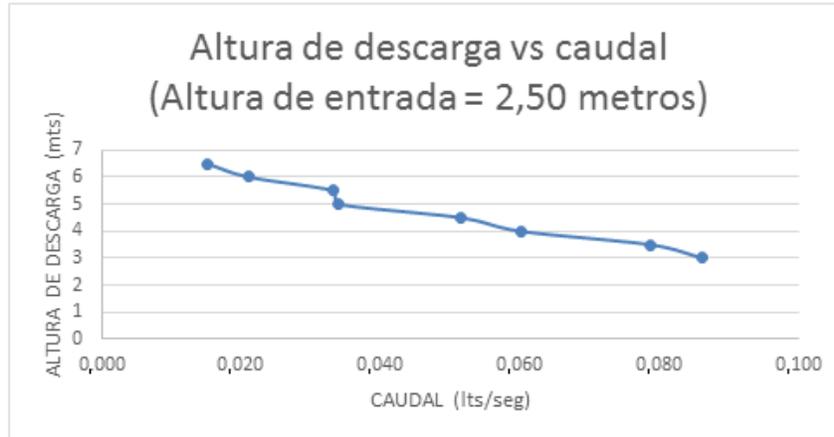
- Altura de entrada 2,50 metros

Figura 33. Caudal vs descarga (entrada 2,5 metros)



Fuente: elaboración propia.

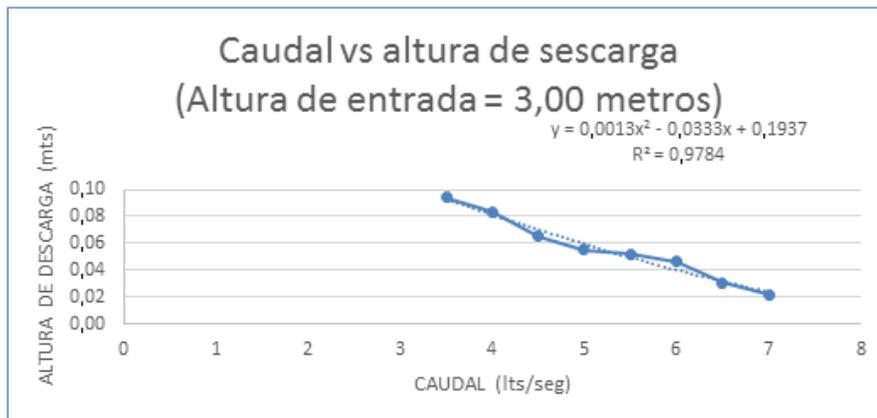
Figura 34. **Descarga vs caudal (entrada 2,5 metros)**



Fuente: elaboración propia.

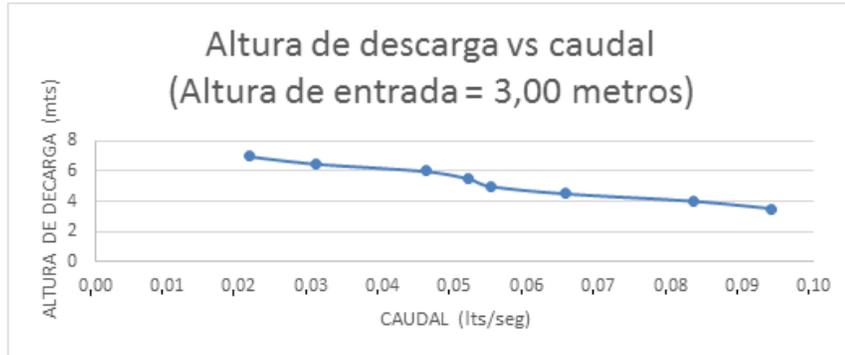
- Altura de entrada 3,0 metros

Figura 35. **Caudal vs descarga (entrada 3,0 metros)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Descarga vs caudal (entrada 3,0 metros)

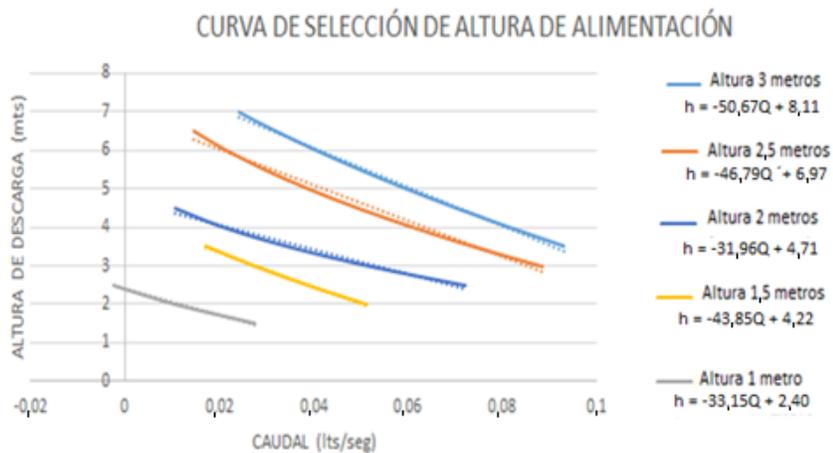


Fuente: elaboración propia.

#### 4.7.2. Curva de selección de altura de alimentación para otorgar un caudal

A continuación, se presenta la gráfica de la curva de selección de altura de alimentación para otorgar un caudal.

Figura 37. Curva de interpolación para selección de altura



Fuente: elaboración propia.

#### 4.8. Factor de fricción en manguera de descarga

A continuación, se describe el factor de fricción en manguera de descarga.

##### 4.8.1. Tiempo de aforo y caudales otorgados (2 metros de manguera)

A continuación, se describe el tiempo de aforo y caudales otorgados (2 metros de manguera).

Tabla LIX. **Tiempo de aforo y caudales otorgados (2 metros de manguera)**

Tiempos de pérdidas	Volumen 1 Litro				
	Tiempo de aforo (Segundos)				
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Válvula abierta 3 vueltas	11,99	12,12	12,00	11,99	12,20

Caudales otorgados	Caudal otorgado (Lts/seg)				
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Válvula abierta 3 vueltas	0,0834	0,0825	0,0833	0,0834	0,0819
<b>Caudal Promedio</b>					<b>0,0830 Lts/seg</b>

Tiempos de pérdidas	Volumen 1 Litro				
	Tiempo de aforo (Segundos)				
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Válvula abierta 2,5 vueltas	13,16	13,15	12,91	13,03	12,95

Caudales otorgados	Caudal otorgado (Lts/seg)				
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Válvula abierta 2,5 vueltas	0,0759	0,0760	0,0774	0,0767	0,0772
<b>Caudal Promedio</b>					<b>0,0770 Lts/seg</b>

Continuación de la tabla LIX.

Tiempos de pérdidas	Volumen					1	Litro
	Tiempo de aforo (Segundos)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 2,0 vueltas	13,87	13,94	13,72	13,84	13,69		

Caudales otorgados	Caudal otorgado (Lts/seg)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 2,0 vueltas	0,0720	0,0717	0,0728	0,0722	0,0730		
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0720</b>	<b>Lts/seg</b>

Tiempos de pérdidas	Volumen					1	Litro
	Tiempo de aforo (Segundos)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 1,5 vueltas	14,20	14,26	14,18	14,30	14,27		

Caudales otorgados	Caudal otorgado (Lts/seg)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 1,5 vueltas	0,0704	0,0701	0,0705	0,0699	0,0700		
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0700</b>	<b>Lts/seg</b>

Tiempos de pérdidas	Volumen					1	Litro
	Tiempo de aforo (Segundos)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 1,0 vuelta	24,37	24,22	24,30	24,37	24,38		

Caudales otorgados	Caudal otorgado (Lts/seg)						
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5		
Válvula abierta 1.0 vuelta	0,0410	0,0412	0,0411	0,0410	0,0411		
					<b>Caudal Promedio</b>	<b>0,0410</b>	<b>Lts/seg</b>

Fuente: elaboración propia.

#### 4.8.2. Cálculo de factor F para manguera de descarga (2 metros)

a continuación, se presenta el cálculo de factor F para manguera de descarga (2 metros).

$$F = hf * \frac{\Phi}{L} * \frac{1}{K}$$

Donde:

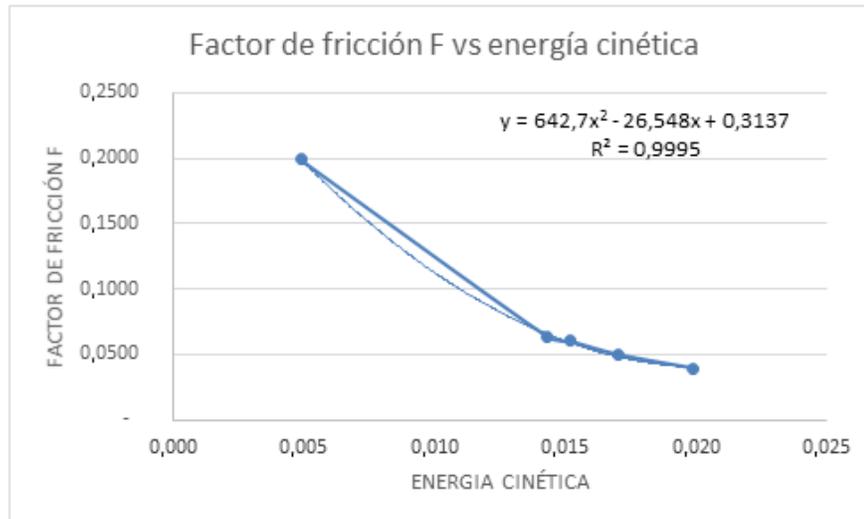
- Hf = diferencia de altura piezométrica (mts)
- $\Phi$  = diámetro manguera (1,3 cm)
- L = longitud manguera (2 mts)
- K = energía cinética

Tabla LX. Cálculo de factor F para tramo de dos metros

Caudales (lts/seg)	Velocidad (m/s)	Energía Cin (m)	Pérdida (m)	F
0,083	0,6247	0,01989	0,12	0,0392
0,077	0,5777	0,01701	0,13	0,0497
0,072	0,5454	0,01516	0,14	0,0600
0,070	0,52900	0,01426	0,14	0,0638
0,041	0,30971	0,00488	0,15	0,1994

Fuente: elaboración propia.

Figura 38. **Factor F vs energía cinética**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.9. **Cálculo de pérdida de fricción F para la tubería de descarga**

Es necesario conocer la pérdida de fricción F que se encuentra en cada caudal otorgado por la bomba, por lo que se utilizará la siguiente fórmula de Darcy despejada de modo de encontrar el valor de F, seguido de una tabla con su respectiva gráfica para visualizar de una mejor forma dicho factor.

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

Tabla LXI. **Resumen de factores de fricción para cada caudal real**

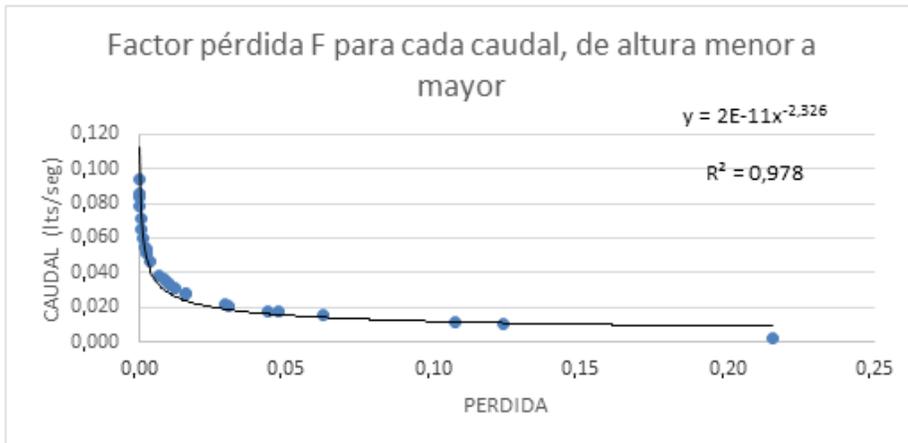
Velocidades (mt/seg)	Caudales Lts/seg	Energía K (mts)	Caudales (m3/s)	Fac. Fricción
0,20920	0,028	0,0022307	0,00002777	0,02
0,08209	0,011	0,0003435	0,00001090	0,12
0,01978	0,003	0,0000200	0,00000263	0,22
0,38779	0,051	0,0076650	0,00005147	0,001
0,28931	0,038	0,0042663	0,00003840	0,0011
0,20951	0,028	0,0022373	0,00002781	0,02
0,13001	0,017	0,0008616	0,00001726	0,05
0,53641	0,071	0,0146658	0,00007120	0,0006
0,40121	0,053	0,0082045	0,00005325	0,0024
0,26952	0,036	0,0037026	0,00003578	0,01
0,13462	0,018	0,0009238	0,00001787	0,04
0,08778	0,012	0,0003927	0,00001165	0,11
0,64907	0,086	0,0214729	0,00008615	0,00026
0,59359	0,079	0,0179587	0,00007879	0,00034
0,45314	0,060	0,0104660	0,00006015	0,00141
0,38781	0,051	0,0076656	0,00005148	0,00269
0,25671	0,034	0,0033590	0,00003407	0,001
0,24989	0,033	0,0031828	0,00003317	0,001
0,15919	0,021	0,0012917	0,00002113	0,03
0,11385	0,015	0,0006608	0,00001511	0,06
0,70917	0,094	0,0256331	0,00009413	0,0003
0,62632	0,083	0,0199938	0,00008313	0,0002
0,49253	0,065	0,0123646	0,00006538	0,009
0,41398	0,055	0,0087350	0,00005495	0,002
0,39176	0,052	0,0078226	0,00005200	0,0025
0,34668	0,046	0,0061258	0,00004602	0,0039
0,23223	0,030	0,0027488	0,00003082	0,01
0,16165	0,021	0,0013319	0,00002146	0,03

Fuente: elaboración propia.

Dentro de los valores otorgados se puede observar que mediante más velocidad tenga el caudal las pérdidas serán menores; y al contrario, si el caudal pasa de una manera más lenta, esto ocasionará que la pérdida de

fricción sea más elevada, lo cual se puede terminar de apreciar de mejor forma mediante el siguiente gráfico de caudales vs factores de fricción.

Figura 39. **Caudal vs pérdida de fricción F**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.10. Presión a la entrada y salida de la bomba

Para poder determinar la presión a la salida de la bomba es necesario hacer el uso del principio de Bernoulli que se describe de la siguiente manera:

$$\frac{V1^2}{2g} + \frac{P1}{\gamma} + Z1 = hf + \frac{V2^2}{2g} + \frac{P2}{\gamma} + Z2$$

Cancelando las energías cinéticas, ya que el diámetro es el mismo en todo el tramo y la P2 por estar expuesta a la atmósfera, procedemos a realizar una tabla en donde encontramos la presión a la salida de la bomba:

Realizando el cálculo de pérdida dentro del sistema con la ecuación de Hazen Williams:

$$hf = 10,643 * Q^{1,85} * \frac{L}{C^{1,85}} * \Phi^{4,87}$$

Donde:

- hf = pérdida de carga por Hazen - Williams
- L = longitud de tubería
- V = constante de rugosidad (PVC = 150)
- Q = caudal otorgado por la bomba (m3/seg)
- $\Phi$  = diámetro de la manguera de descarga
- Altura del Tonel 1,00 metros

Tabla LXII. **Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli**

Descarga vs alimentación	Pérdida energía salida (mts)	Pérdida energía entrada (mts)	K sistema (mts)	Presión Entrada (Kpa)	Presión Salida (Kpa)	Diferencia de Presión	% aumento
1,50	0,038651	0,00009511837	0,01826	9,8089	12,151	2,342	19,276
2,00	0,045698	0,00001685489	0,00716	9,8098	17,125	7,315	42,717
2,50	0,004626	0,00000121224	0,00172	9,8099	21,627	11,817	54,640

Fuente: elaboración propia.

- Altura del Tonel 1,50 metros

**Tabla LXIII. Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli**

Descarga vs alimentación	Pérdida energía salida (mts)	Pérdida energía entrada (mts)	K sistema (mts)	Presión Entrada (Kpa)	Presión Salida (Kpa)	Diferencia de Presión	% aumento
1,33	0,022195	0,000321555	0,03385	14,711	16,894	2,183	12,923
1,67	0,031820	0,000187014	0,02525	14,712	21,894	7,181	32,800
2,00	0,038628	0,000102939	0,01828	14,713	26,865	12,152	45,232
2,33	0,043695	0,000042582	0,01134	14,714	31,820	17,106	53,757

Fuente: elaboración propia.

- Altura del Tonel 2,00 metros

**Tabla LXIV. Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli**

Descarga vs alimentación	Pérdida energía salida (mts)	Pérdida energía entrada (mts)	K sistema (mts)	Presión Entrada (Kpa)	Presión Salida (Kpa)	Diferencia de Presión	% aumento
1,25	0,009382	0,000629049	0,04682	19,612	21,674	2,061	9,510
1,50	0,020872	0,000367576	0,03502	19,615	26,691	7,075	26,509
1,75	0,033632	0,000176085	0,02352	19,617	31,721	12,103	38,156
2,00	0,043458	0,000048752	0,01175	19,619	36,723	17,103	46,574
2,25	0,045505	0,000022100	0,00766	19,619	41,648	22,028	52,891

Fuente: elaboración propia.

- Altura del Tonel 2,50 metros

**Tabla LXV. Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli**

Descarga vs alimentación	Pérdida energía salida (mts)	Pérdida energía entrada (mts)	K sistema (mts)	Presión Entrada (Kpa)	Presión Salida (Kpa)	Diferencia de Presión	% aumento
1,20	0,005996	0,000956279	0,05666	24,514	26,545	2,031	7,653
1,40	0,006631	0,000810569	0,05181	24,515	31,457	6,941	22,066
1,60	0,015937	0,000491904	0,03955	24,519	36,453	11,933	32,737
1,80	0,022193	0,000368800	0,03385	24,520	41,419	16,898	40,799
2,00	0,034766	0,000171920	0,02240	24,523	46,448	21,924	47,203
2,20	0,035356	0,000163563	0,02181	24,523	51,358	26,835	52,251
2,40	0,042076	0,000071024	0,01389	24,524	56,329	31,805	56,463
2,60	0,044465	0,000038205	0,00993	24,524	61,258	36,733	59,965

Fuente: elaboración propia.

- Altura del Tonel 3,00 metros

**Tabla LXVI. Datos para cálculo de presión a la salida de la bomba por Bernoulli**

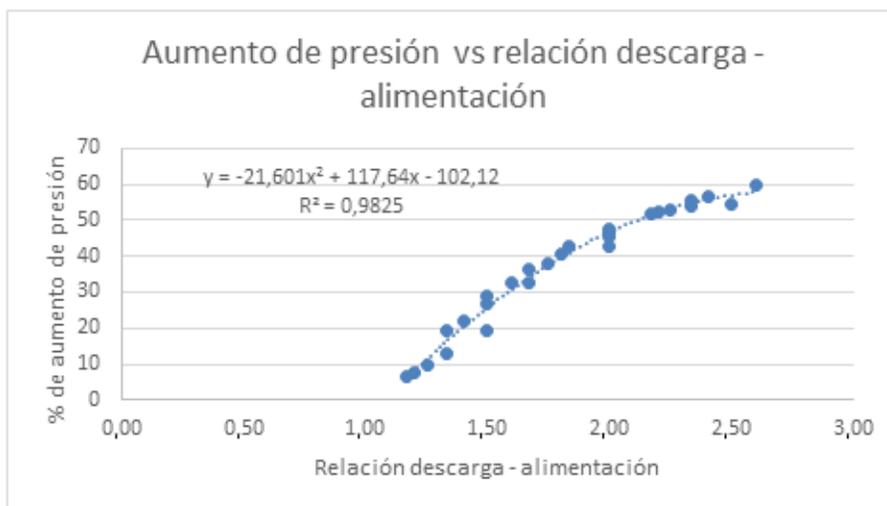
Descarga vs alimentación	Pérdida energía salida (mts)	Pérdida energía entrada (mts)	K sistema (mts)	Presión Entrada (Kpa)	Presión Salida (Kpa)	Diferencia de Presión	% aumento
1,17	0,008322	0,001198606	0,061905865	29,416	31,473	2,057	6,536
1,33	0,005973	0,000952494	0,054673662	29,419	36,355	6,936	19,079
1,50	0,012555	0,000610664	0,042995361	29,423	41,325	11,902	28,801
1,67	0,019626	0,000442797	0,036137945	29,425	46,299	16,874	36,446
1,83	0,021803	0,000399840	0,034198524	29,425	51,225	21,800	42,557
2,00	0,026278	0,000318902	0,030262934	29,426	56,174	26,748	47,616
2,17	0,036837	0,000151962	0,020272147	29,428	61,183	31,755	51,901
2,33	0,041922	0,000077743	0,014111192	29,429	66,138	36,709	55,503

Fuente: elaboración propia.

#### 4.11. Gráfico aumento de presión vs relación descarga - alimentación

En la siguiente gráfica se presenta el aumento de presión vs relación descarga - alimentación.

Figura 40. Aumento de presión vs descarga - alimentación



Fuente: elaboración propia.

#### 4.12. Cálculo de constante K del resorte

Dentro de la metodología para encontrar la constante K del resorte utilizado se colocaron 3 distintas masas de 0,0025 kg, 0,007 kg y 0,01 kg midiendo el alargamiento del resorte para cada peso aplicado, de modo que luego se generó una gráfica donde la pendiente nos da como resultado la constante K del resorte.

Tabla LXVII. **Recolección de datos para constante K**

Medidas	m (kg)	Fuerza peso (N)	l ( m)	$\Delta x = l - l_0$
1ª	0,0025	0,025	0,040	0,003
2ª	0,0070	0,07	0,055	0,0071
3ª	0,010	0,1	0,0689	0,0099

Fuente: elaboración propia.

Generando la gráfica y siendo la pendiente de la ecuación el valor de  $K = 10,87$

Figura 41. **Constante K del resorte**



Fuente: elaboración propia.

#### 4.13. **Costos asociados para la construcción de la bomba de ariete hidráulico.**

Los costos asociados para la construcción de la bomba de ariete hidráulico se podrían separar en tres distintos costos los cuales fueron llevados a cabo para los ensayos y con costos separados:

- Costo de materiales para ensayos experimentales
- Costo de fabricación
- Costo de instalación

#### 4.13.1. Costo de materiales para ensayos experimentales

Se refiere a la sumatoria del costo de cada elemento y material utilizado para poder llevar a cabo los ensayos experimentales de laboratorio.

Tabla LXVIII. Costos de materiales para ensayos experimentales

Item	Componente	Pieza	Cantidad	Costo
1	Base estructural de metal de 3 metros de altura.	Pilares de 3 metros con aberturas a cada 50 centímetros.	2 unidades	Q800,00
2	Platinas y rigidizante para la estructura.	Platinas de acero para descanso de tonel.	10 unidades	Q800,00
3	Tornillos aseguradores de platinas.	Tornillos de 3" y 1/12" para platinas.	20 unidades	Q103,45
4	Tonel abastecedor de agua para la entrada de la bomba.	Tonel de plástico almacenador de agua.	1 unidad	Q85,50
			TOTAL	Q1 788,95

Fuente: elaboración propia.

#### 4.13.2. Costo de fabricación

Se refiere a la sumatoria del costo de cada elemento y material utilizado para construir la bomba de ariete hidráulico.

Tabla LXIX. **Costos de materiales para construcción de bomba de ariete**

Item	Componente	Pieza	Cantidad	Costo
1	Unión universal de PVC de 1 ½" con rosca para acomodar la bomba con la tubería de abastecimiento.	Unión universal de PVC de 1"	1 unidad	Q 32,50
2	Reductor de 1 ½" a 1"	Reductor de PVC de 1 ½" a 1"	1 unidad	Q 2,75
3	Un metro de tubo PVC de 1"	Tubo de PVC de 1" (120 PSI)	1 unidad	Q 4,35
4	Tee ramificadora de PVC para conexiones de la bomba de ariete	Tee de PVC lisa de dos lados y rosca arriba	3 unidades	Q 52,35
5	Adaptadores para medir presiones dentro de la bomba con manómetros	Adaptadores <i>bushing</i> HG para manómetros	2 unidades	Q 33,15
6	<i>Bushing</i> con rosca doble para colocar las piezas de la bomba	<i>Bushing</i> de HG de 1" rosca ambos lados	4 unidades	Q 13,50
7	Codo de PVC a 90° para colocar la válvula de (pichacha)	Codo de PVC de 90°	1 unidad	Q 2,35
8	Válvula de globo para abrir y cerrar el paso del flujo	Válvula de globo de PVC de 1"	2 unidades	Q 76,15
9	Válvula de cheque para evitar el reflujo	Válvula de cheque de 1"	1 unidad	Q 65,60
10	Tee con rosca para la conexión de salida y cámara de aire	Tee de HG de 1" con rosca en los tres lados	1 unidad	Q 14,33
11	Acampanador para conectar la cámara de aire de la bomba	Acampanador de HG de 1" a ¾"	1 unidad	Q 3,25
12	Cámara de aire guarda presión	Botella plástica de doble litro	1 unidad	Q 2,00
13	Válvula de pie que genera el golpe de ariete	Válvula de pie estilo pichacha de 1" de PVC	1 unidad	Q 75,00
14	Reductor macho que conecta la bomba a la salida de agua	Reductor de PVC macho de 1" a ¾"	1 unidad	Q 3,40
			TOTAL	Q 380,73

Fuente: elaboración propia.

#### **4.13.3. Costo de instalación**

El costo de instalación no es más que un costo asociado a la instalación propiamente, incluye materiales que no intervienen en el funcionamiento del ariete directamente, pero que son necesarios para que quede estable y seguro, los cuales se reducen a cero ya que todo lo necesario está incluido en la tabla de materiales para ensayos de laboratorio. Ya que la mano de obra fue propia, la cual no tuvo ningún costo.

## CONCLUSIONES

1. El funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada se logra con una altura mínima de abastecimiento de un metro, pudiendo transportar caudales de la siguiente manera:
  - Para una altura de abastecimiento de un metro la altura máxima de descarga obtenida es 2,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,5 y un caudal de 0,00263 lts/seg.
  - Para una altura de abastecimiento de 1,5 metros la altura máxima de descarga obtenida es 3,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,33 y un caudal de 0,0172 lts/seg.
  - Para una altura de abastecimiento de dos metros la altura máxima de descarga obtenida es 4,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,25 y un caudal de 0,0116 lts/seg.
  - Para una altura de abastecimiento de 2,5 metros la altura máxima de descarga obtenida es 6,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,60 y un caudal de 0,0151 lts/seg.
  - Para una altura de abastecimiento de tres metros la altura máxima de descarga obtenida es 7,0 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,33 y un caudal de 0,0214 lts/seg.

2. El caudal otorgado por la bomba es directamente proporcional a la altura de alimentación e inversamente proporcional a la altura de descarga, el caudal máximo obtenido durante los ensayos fue de 0,09413 lts/seg esto puede observarse en la tabla de resumen de caudales (Tabla LVIII) mismo que se obtuvo a una altura de alimentación de 3 metros y una altura de descarga de 3,50 metros. Este caudal al igual que los obtenidos con las otras relaciones de descarga vs alimentación va disminuyendo conforme esta relación aumenta, esto puede observarse en la figura 36.
3. La bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de una pulgada otorga un promedio de 55,35 % de aumento de energía de presión lo que la hace una herramienta para el bombeo de agua viable.
4. Existe una relación polinómica de segundo grado entre la altura de descarga y la altura de abastecimiento, en la misma se puede observar que conforme aumenta la relación de altura de descarga y abastecimiento aumenta también la presión, y así mismo disminuye el caudal de descarga; esta relación entre la altura de descarga abastecimiento y la presión se representa en la gráfica aumento de presión vs relación descarga - alimentación.
5. La bomba de ariete hidráulico artesanal es una herramienta de bombeo de fácil construcción e instalación, bajo costo y eficiencia de bombeo viable; el proceso de construcción e instalación se encuentra descrito dentro de este trabajo de investigación.

## RECOMENDACIONES

1. Se deben realizar distintas inspecciones de mantenimiento para las piezas de HG que pasan en contacto con el agua para evitar fugas por óxido.
2. Se debe de tener un espacio amplio, estable y sin objetos que interrumpen el funcionamiento de la bomba, de al menos un metro cuadrado libre para colocar dicha bomba de ariete hidráulico artesanal.
3. Para poder tener un mejor control del golpe de ariete provocado por la válvula de pie se debe de agregar un resorte interno sostenido por un tornillo, tuercas y roldana, para poder mantener un golpe constante.
4. Durante los ensayos se reconoció dos tipos de marchas de golpes para la válvula de pie, siendo rápidos cuando se desea bombear agua a menor altura y lentos y pausados cuando se necesita bombear el agua a una mayor altura.
5. Para un mejor aprovechamiento del desperdicio de la bomba de ariete hidráulico colocarla en un huerto para que dicho desperdicio tenga un mejor uso, o bien tener la bomba en un río donde dicho desperdicio retorne al mismo.



## BIBLIOGRAFÍA

1. GÓMEZ ROALES, Víctor. *Análisis y construcción de un ariete hidráulico de tubería y accesorios de hierro galvanizado*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1993. 88 p.
2. HERRERA ESCOBAR, Danilo. *Evolución y aprobación del ariete hidráulico PVC – A2*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 63 p.
3. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Plan sectorial multianual de ambiente y agua del Plan estratégico institucional 2013-2017*. Guatemala: MARN, 2012. 60 p.
4. PAÍZ MONTENEGRO, Leonel Alberto. *Análisis, construcción y evaluación de un ariete hidráulico utilizando tubería y accesorios de cloruro de polivinilo (PVC)*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1996. 112 p.
5. POTTER, MERLE C.; WIGGERT, DAVID C. *Mecánica de fluidos 2a ed.* México: Thomson, 2002. 450 p.

6. SANDOVAL LÓPEZ, Rigoberto Rafael. *Manual de construcción de ariete hidráulico para el abastecimiento de agua*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánica. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2016. 70 p.

## APÉNDICES

### Apéndice 1. Toma de tiempos y caudales a altura de captación de un metro

Esta medición a la primera altura de un metro que nos dice la teoría del tanque de captación la cual muestra de forma real y de esta manera se realizaron todas las demás alturas de 1,50, 2, 2,50 y 3 metros:



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Montaje final de la bomba de ariete hidráulico artesanal de una pulgada puesta en trabajo.**

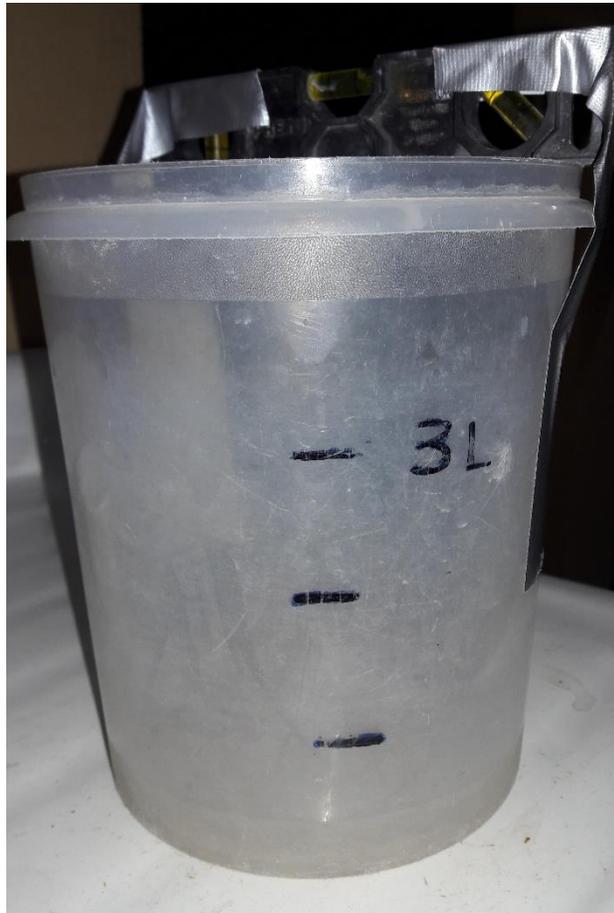
Montaje final realizando la unión de cada uno de los accesorios y materiales especificados dentro de la metodología de construcción, la bomba se encuentra trabajando y bombeando agua, notando el desperdicio que causa la válvula de pie generadora del golpe de ariete hidráulico.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Recipiente volumétrico con el cual se realizaban los aforos**

Recipiente con medida de distintos volúmenes para realizar el aforo en la recolección de datos, dicho recipiente cuenta con un nivel en la parte superior para dar una lectura más precisa del volumen captado y descartar desniveles del fluido.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Altura máxima de bombeo realizada a una altura de tanque de 3 metros y una descarga de 7 metros**

Altura máxima alcanzada por la bomba de ariete hidráulico de una pulgada, la cual bombeaba como máximo dos veces la altura de captación, es decir, al estar ubicada en la altura de 3 metros de captación bombeaba a una descarga de 7 metros, una bomba con eficiencia de 60,08 % la cual entra en el rango de aceptable.



Fuente: elaboración propia.