



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

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE
ARIETE CON TUBERÍA DE $\frac{3}{4}$ DE PULGADA**

Javier Arturo Argueta Blas

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE
ARIETE CON TUBERÍA DE $\frac{3}{4}$ DE PULGADA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JAVIER ARTURO ARGUETA BLAS

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
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 Ralòn
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
EXAMINADOR	Ing. Manuel Alfredo Arrivillaga Ochaeta
EXAMINADORA	Inga. Christa del Rosario Classon de Pinto
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 HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE ARIETE CON TUBERÍA DE $\frac{3}{4}$ DE PULGADA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 07 de noviembre de 2017.


Javier Arturo Argueta Blas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 02 de Abril de 2019

Doctor en Ciencias

Luis Manuel Sandoval Mendoza

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Javier Arturo Argueta Blas, quien se identifica con Registro Académico 95-15986 CUI No. 1721 78681 2011, titulado **ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE ARIETE CON TUBERÍA DE ¾ DE 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"

Dr C Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

Docente Departamento de Hidráulica

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
COLEGIADO 6496



Guatemala, 10 de Abril 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 HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE ARIETE CON TUBERÍA DE $\frac{3}{4}$ DE PULGADA", desarrollado por el estudiante de ingeniería civil Javier Arturo Argueta Blas, quien contó con la asesoría del ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza.

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





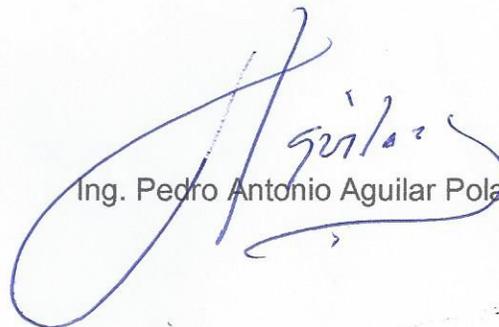
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<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 y Coordinador del Departamento de Hidráulica Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza, al trabajo de graduación del estudiante Javier Arturo Argueta Blas **ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE ARIETE CON TUBERÍA DE $\frac{3}{4}$ DE PULGADA** da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, septiembre 2019

/mrm.



Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 355.2019

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, al Trabajo de Graduación titulado: **ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE UNA BOMBA DE ARIETE CON TUBERÍA DE ¾ DE PULGADA**, presentado por el estudiante universitario: **Javier Arturo Argueta Blas**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2019



/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por haberme dado vida, por bendecirme toda mi carrera y poner en mí camino a buenas personas.
Mis padres	Javier Argueta Salazar y Amarilys Blas de Argueta, por su amor y confianza.
Mis hermanos	Grethel y Omar Argueta Blas, por brindarme su cariño y apoyo incondicional.
Mis tíos y primos	Por su apoyo incondicional y consejos que llevaré en mi memoria, siempre.
Mis abuelos	Por haberme brindado tanto cariño y confianza durante tanto tiempo. (q.e.p.d.)
Mis amigos	Por ser parte importante de mi vida y brindarme su apoyo y confianza.
Mi familia	Sonia Paz Rodas, Javier Arturo, Mattheo Fabricio, por su amor, apoyo, comprensión; por ser mi mayor motivo de inspiración.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios durante estos años.
Facultad de Ingeniería	Por formarme académica y profesionalmente.
Mis amigos de la Facultad	Mario Maldonado, Elder Morataya, Edix Zabala, Josué Torres, Antonio Mejía, William Pineda, Omar Aquino, Marvin Felipe, Chistian García, Salvador García, Fernando Gil, Napoleón Guzmán, Juan Carlos Tuc, José Galicia, Julia Gómez, Ángel López, Henry González.
Mis catedráticos	Luis Sandoval, Cesar García, Claudio Castañón, Aldo Ozaeta, Erick Hernández, Mario Corzo, Hugo Rivera, María del Mar, Mario Arriola, Luis Portillo.
Asesor de tesis	Ing. Luis Sandoval, por su amistad, confianza y el apoyo incondicional.

Mis amigos

Por brindarme la oportunidad y apoyo en la realización de mi estudio de tesis, Guillermo Meza, Allan Veliz; especialmente a Ing. Luis Portillo, por el apoyo brindado.

A mis amigos

Ing. Nelson Álvarez Cho (q.e.p.d.), por su amistad sincera y por creer siempre en mí.

Oscar H. Paz Morales, por el cariño, confianza, y por los buenos momentos compartidos que vivirán en mi memoria y corazón. (q.e.p.d.)

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	III
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Recursos hídricos.....	4
1.2.1. Definición.....	4
1.2.2. Gestión	5
1.2.2.1. A nivel internacional.....	6
1.2.2.2. A nivel nacional.....	7
1.2.3. Uso de tecnologías de bajo costo en Guatemala ...	10
2. SISTEMAS DE BOMBEO.....	13
2.1. Definición.....	13
2.2. Antecedentes históricos.....	14
2.3. Parámetros de diseño.....	14
2.4. Componentes	15
2.5. Tipos.....	25
3. BOMBAS DE ARIETE	27
3.1. Desarrollo	27
3.2. Definición.....	27

3.3.	Diseño	28
3.3.1.	Parámetros hidráulicos.....	29
3.3.2.	Funcionamiento.....	30
3.4.	Ventajas y desventajas	32
3.5.	Materiales.....	34
3.6.	Usos	37
4.	ESTUDIO PRÁCTICO.....	39
4.1.	Desarrollo.....	39
4.2.	Antecedentes	39
4.3.	Metodología	40
4.3.1.	Descripción y análisis de resultados	89
	CONCLUSIONES.....	93
	RECOMENDACIONES	97
	BIBLIOGRAFÍA.....	99
	APÉNDICES.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Distribución mundial de la escasez de agua en las principales cuencas (2011)	3
2.	Disponibilidad de agua en Guatemala según vertiente, año 2015 (millones de metros cúbicos).....	9
3.	Mapa de cuencas y vertientes República de Guatemala	10
4.	Rejas y limpia rejas	16
5.	Tanques enterrado y elevado, sistema de bombeo residencial	17
6.	Tuberías sistema de bombeo.....	18
7.	Tipos de bombas sistemas de bombeo.....	19
8.	Sistema de bombeo agua residual.....	20
9.	Válvulas sistemas de bombeo (A).....	21
10.	Válvulas sistemas de bombeo (B).....	22
11.	Detalle caseta sistema de bombeo	23
12.	Componentes caseta sistema de bombeo de agua potable.....	24
13.	Estación de bombeo para agua potable (pozo mecánico)	26
14.	Esquema funcionamiento bomba de ariete	30
15.	Onda de compresión generada por el cierre súbito de una válvula	32
16.	Bomba de ariete industrial (Ariete Walton7).....	35
17.	Uso de 5 bombas de ariete conectadas en paralelo	37
18.	Ubicación bomba de ariete en el laboratorio de hidráulica Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC	41
19.	Estructuras sistema de bombeo (H = 1,50 m).....	42
20.	Armado de válvula bomba de ariete $\frac{3}{4}$ "	43
21.	Modelo de bomba de ariete construido para el estudio.....	44

22.	Detalle instalación bomba de ariete	45
23.	Actividades cálculo de pérdidas en el sistema de bombeo	46
24.	Control de presiones sistema de bombeo, uso de manómetros	47
25.	Herramientas utilizadas durante la construcción e instalación de la bomba de ariete	48
26.	Sistema de bombeo instalado.....	49
27.	Línea de carga sistema de bombeo ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)	51
28.	Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)	56
29.	Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)	56
30.	Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)	61
31.	Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)	61
32.	Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)	65
33.	Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)	65
34.	Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$)	69
35.	Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 2,50 \text{ m}$)	69
36.	Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)	72
37.	Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)	73
38.	Gráfica Curva de interpolación para selección de altura.....	75
39.	Gráfica factor de fricción vs. Energía cinética	79
40.	Gráfica caudal vs. pérdida de fricción	81
41.	Gráfica aumento de presión vs. Relación descarga-carga	85
42.	Gráfica determinación constante K del resorte	86

TABLAS

I.	Ventajas y desventajas del uso de bombas de ariete	33
II.	Comparación del ariete hidráulico con otro tipo de bombas (grado de utilización de cada aspecto).....	34
III.	Condiciones hidráulicas instalación	40

IV.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 1,5 \text{ m}$)	54
V.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,0 \text{ m}$)	54
VI.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)	55
VII.	Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)	55
VIII.	Resultados presión en manómetro, cálculo de pérdidas (altura del tanque 1,0 m)	57
IX.	Resultados aforo caudal descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,0 \text{ m}$)	58
X.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)	58
XI.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)	59
XII.	Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)	60
XIII.	Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)	60
XIV.	Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 1,5 m).....	62
XV.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)	63
XVI.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)	63
XVII.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)	64
XVIII.	Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)	64
XIX.	Resultados presión en manómetro, cálculo de pérdidas (altura del tanque 2,0 m)	66
XX.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)	67
XXI.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)	67
XXII.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 4,0 \text{ m}$)	68
XXIII.	Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$)	68
XXIV.	Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 2,5 m).....	70
XXV.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)	71
XXVI.	Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 4,0 \text{ m}$)	71
XXVII.	Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)	72
XXVIII.	Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 3,0 m).....	74
XXIX.	Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 3 vueltas	76
XXX.	Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 2,5 vueltas	76

XXXI.	Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 2 vueltas.....	77
XXXII.	Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 1,5 vueltas.....	77
XXXIII.	Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 1 vuelta.....	78
XXXIV.	Resumen resultados cálculo factor de fricción.....	79
XXXV.	Resumen de factores de fricción para cada caudal real	80
XXXVI.	Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (1 m).....	82
XXXVII.	Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (1,5 m).....	83
XXXVIII.	Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (2,0 m).....	83
XXXIX.	Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (2,5 m).....	84
XL.	Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (3,0 m).....	84
XLI.	Resultados cálculo constante K del resorte	85
XLII.	Presupuesto materiales de estructura metálica para soportar el depósito a distintas alturas. Bomba de ariete con tubería de $\frac{3}{4}$ "	87
XLIII.	Presupuesto materiales Bomba de ariete tubería de $\frac{3}{4}$ "	88
XLIV.	Integración de costos sistema de bomba de ariete.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H_{carga}	Altura carga
H_{descarga}	Altura descarga
A	Área
d	Día
h	Hora
m	Metro
mca	Metro columna de agua
mg/L	Miligramos por litro
%	Porcentaje
”, pul	Pulgadas
Σ	Sumatoria
T	Tiempo
U	Unidad
V	Volumen

GLOSARIO

Agua subterránea	Es el agua contenida por una capa impermeable o acuífero, y que fluirá hacia pozos, manantiales u otros puntos de recuperación.
Altura de carga	Es la distancia que hay entre el suelo y el punto donde la tubería de alimentación se carga de agua.
Altura de descarga	Es la distancia que hay entre el suelo, hasta el punto donde la tubería de descarga abastece de agua
Cambio climático	Un cambio en el clima, atribuible directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables.
Carga	Presión que ejerce una columna de líquido por unidad de área: se puede expresar en unidades de longitud.

Caudal	Se denomina caudal en hidrografía, hidrología y, en general, en geografía física, al volumen de agua que circula por el cauce de un río en un lugar y tiempo determinados. Se refiere fundamentalmente al volumen hidráulico de la escorrentía de una cuenca hidrográfica concentrada en el río principal de la misma.
Desarrollo sostenible	Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas. Esto sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas.
Estanquidad	Capacidad de un elemento para un perfecto sellado entre uniones.
Extracción de agua subterránea	Volumen de agua que es sacada de un acuífero, generalmente por bombeo, para el suministro agrícola, industrial, doméstico, o público.
Impermeabilidad	Propiedad de la unión de dos cuerpos para impedir el paso de líquidos a través de estos.
Nivel de descarga	Altura a la que hay que llevar el agua. Distancia que hay desde la superficie hasta el borde superior del tanque de almacenamiento; se mide en metros.

Vertedero

Desaguadero de líquido, donde se puede medir la cantidad del mismo que pasa por unidad de tiempo.

RESUMEN

El agua es un recurso natural limitado y un bien público fundamental para la vida y la salud; es de vital importancia para el desarrollo de Guatemala. El uso de sistemas de bombeo debe optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico, para esto la participación de la ingeniería civil en los proyectos de hidráulica es fundamental e importante.

Las bombas de ariete se han utilizado desde hace más de dos siglos por su bajo costo de construcción, costo de operación cero y cero contaminación (no se utiliza ningún tipo de energía ni combustible fuera de la fuerza del fluido); se considera que este sistema puede ser utilizado en casi toda actividad donde el caudal inicial de fluido no sea un problema o pueda ser reciclado. Es una alternativa de solución con ventajas con respecto al uso de los sistemas y equipos de bombeo más conocidos.

En Guatemala muchas zonas no cuentan con la disponibilidad de una fuente hídrica para sus necesidades básicas y no tiene muchos recursos económicos, por esto es necesario impulsar el uso de la bomba de ariete hidráulico, ya que no tiene costos por energía eléctrica y mantenimiento, por lo que esta bomba es prácticamente auto sostenible.

En la investigación se estudia de forma teórica y práctica la influencia de algunos parámetros en el funcionamiento del ariete hidráulico; el trabajo incluye información valiosa y actualizada sobre el uso de la bomba de ariete; así como un caso práctico donde se presente la metodología utilizada.

OBJETIVOS

General

Estudiar el funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico con tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada, teniendo en cuenta consideraciones técnicas e hidráulicas.

Específicos

1. Conocer la eficiencia energética en el aumento de la carga de presión de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de $\frac{3}{4}$ ".
2. Deducir fórmulas y tablas que relacionen el caudal entubado de la bomba de ariete con el tanque y con el diámetro.
3. Presentar recomendaciones para el diseño y operación de bombas de ariete hidráulico.
4. Consultar y presentar la bibliografía relacionada con bombas de golpe de ariete, que incluya recomendaciones para el diseño y operación de bombas de ariete hidráulico.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala muchas zonas no cuentan con la disponibilidad de una fuente hídrica para sus necesidades básicas y no tienen muchos recursos económicos, por esto es necesario impulsar el uso de la bomba de ariete hidráulico, ya que no tiene costos por energía eléctrica ni en el mantenimiento de la misma, por lo que esta bomba es prácticamente auto sostenible.

En esta investigación se estudia de forma teórica y experimental la influencia de algunos parámetros en el funcionamiento hidráulico del ariete hidráulico, el trabajo busca generar un documento que incluya información valiosa y actualizada sobre el uso y análisis de la bomba de ariete, así como un caso práctico donde se presente la metodología utilizada.

En el capítulo uno se presentan antecedentes sobre el tema y aspectos importantes de los recursos hídricos. En el capítulo dos se desarrolla el tema de los sistemas de bombeo, incluyendo definición, parámetros de diseño, entre otros.

El tema de las bombas de ariete se aborda en el capítulo tres, presentando la definición, diseño, ventajas y desventajas. En el capítulo cuatro se desarrolla el estudio práctico, que incluye los antecedentes, metodología y análisis de resultados.

1. ANTECEDENTES

1.1. Generalidades

El agua es esencial para la supervivencia y el bienestar humanos, y es importante para muchos sectores de la economía; en todo el mundo la mayoría de las actividades económicas afecta no solo la cantidad, sino también la calidad de los recursos hídricos, además de restringir aún más la disponibilidad de agua. La población mundial crece a un ritmo de unos 80 millones de personas al año y se prevé que alcance los 9 100 millones en el año 2015.

El cambio climático aumenta las presiones existentes sobre los recursos hídricos, Guatemala es particularmente vulnerable a los efectos del cambio climático; el efecto preciso que produce sobre los recursos hídricos es incierto. El problema principal es la variabilidad climática, que genera una mayor concentración de la lluvia en períodos cortos, haciendo los períodos secos más largos y prolongados, lo que requerirá un mayor almacenamiento de agua para contrarrestar estos efectos.

En el país existen grandes diferencias entre regiones, en lo referente a disponibilidad y calidad del agua; la demanda se ve incrementada como resultado del crecimiento de la población y otros cambios demográficos (en particular, la urbanización) y la expansión agrícola e industrial. “La República de Guatemala se ubica entre las coordenadas geográficas 13°44’ y 17°49’ de latitud norte y entre 88°14’ y 92°17’ de longitud oeste. Se encuentra en el extremo norte del Istmo Centroamericano, con una extensión de 108 889 km².

El 60 % del territorio es montañoso, dividiendo el país en varias zonas fisiográficas claramente definidas.”¹

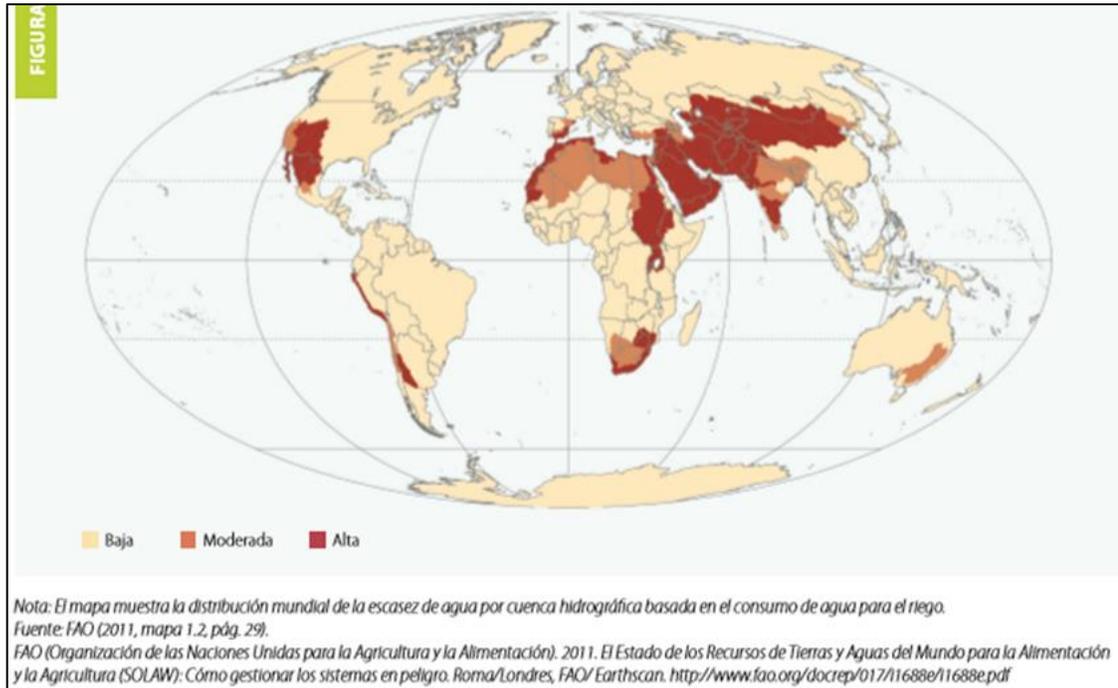
En el medio rural y urbano, toda la población necesita el agua ya que este es un recurso indispensable para su desarrollo y supervivencia; el estado de pobreza de un amplio porcentaje de la población en Guatemala es a la vez un síntoma y una causa de la crisis del agua. A nivel nacional, los servicios de agua potable se ven afectados, primero haciéndolos más dependientes de los sistemas de bombeo con la consiguiente sobreexplotación de acuíferos, ante la falta de regulación; y segundo por los altos costos de operación y mantenimiento que implican los sistemas de bombeo.

Para tener acceso y provechar el agua superficial y subterránea (pozo) se emplean como medios los sistemas de bombeo; su principal función es mover de un lugar a otro el agua, para satisfacer las necesidades de: consumo humano, uso doméstico, riego a mayor y pequeña escala y abrevadero de ganado.

Una bomba de ariete es una bomba hidráulica cíclica que utiliza la energía cinética de un golpe de ariete en un fluido para subir una parte de ese fluido a un nivel superior. No necesita por lo tanto aporte de otra energía exterior, se utiliza especialmente en zonas de grandes desniveles geográficos.

¹ Asociación Mundial para el Agua. *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica. Guatemala*. 2015. p. 5.

Figura 1. **Distribución mundial de la escasez de agua en las principales cuencas (2011)**



Fuente: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2015. NNUU. p. 10. *Agua para todos. Agua para la vida.*

Por el bajo costo de construcción, costo de operación cero y cero contaminación, se considera que la bomba de ariete de PVC puede ser utilizada en casi toda actividad donde el caudal inicial de agua no sea un problema o pueda ser reciclado.

1.2. Recursos hídricos

La importancia del recurso hídrico se extiende a casi todos los ámbitos, el agua es fundamental para la supervivencia humana, el medio ambiente y la economía. “Más de mil millones de puestos de trabajo, que representan más del 40 % de la población económica activa mundial, dependen significativamente del agua.”²

De acuerdo a su ubicación, los recursos hídricos se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agua superficial: es el agua procedente de la lluvia y el deshielo que discurre con rapidez sobre el suelo y alimenta arroyos, charcas y ríos. Esta agua constituye la escorrentía superficial, que proporciona la mayor parte del agua utilizada.
- Agua subterránea: constituye el agua de precipitación infiltrada en el subsuelo que escapa de la evapotranspiración y desciende hasta llegar a una capa impermeable que la retiene, acumulándose encima y saturando los huecos del terreno formando un acuífero.

1.2.1. Definición

“Recursos disponibles o potencialmente disponibles, en cantidad y calidad suficientes, en un lugar y en un período de tiempo apropiados para satisfacer una demanda identificable.”³

² UNESCO, Agua y empleo. *Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo* 2016. p. 8.

³ Glosario Hidrológico Internacional de la UNESCO.

1.2.2. Gestión

El agua constituye parte fundamental para la vida, la gestión del agua es compleja porque se refiere a un recurso móvil, espacial y temporalmente no uniforme. Los recursos hídricos incluyen el agua y los medios a través de los cuales ese recurso discurre y se almacena: glaciares, laderas, lagunas y lagos, manantiales, ríos y riachuelos, acuíferos y las obras construidas por el hombre, como represas, pozos, canales y drenes.

De acuerdo con el Banco Mundial, “Los asuntos relacionados con la gestión de los recursos hídricos se han vuelto tan apremiantes que el Foro Económico Mundial ha destacado el tema del agua durante dos años consecutivos (en 2013 y 2014) como uno de sus máximos desafíos.”⁴

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), tiene como principal fundamento que el agua es un recurso limitado y vulnerable, y debe ser manejado de manera concertada y participativa, ya que sus usos se encuentran interrelacionados (uso doméstico, industrial, agrícola y ambiental).

“La gestión de los recursos hídricos abarca el conjunto de prácticas que realizan las personas y las empresas privadas en los territorios de su propiedad o alquiler, así como las que realizan las entidades con responsabilidad pública, incluyendo las organizaciones de usuarios y las entidades del Estado, para la adecuada conservación y funcionamiento de los recursos hídricos. La gestión

⁴ <http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/15/water-resources-management-results-profile>. Consulta: octubre de 2017.

incluye todas las acciones que permiten el uso racional del agua, su ahorro y la preservación de su calidad.”⁵

1.2.2.1. A nivel internacional

La problemática del agua es diferente en cada país, derivado de que la distribución geográfica de los recursos hídricos y la asignación del agua son muy desiguales; en la actualidad muchos países del mundo se encuentran frente a enormes retos en el campo de la gestión del agua.

Debido a las actividades humanas como la urbanización, el crecimiento demográfico, la elevación del nivel de vida, la creciente competencia por el agua y la contaminación, la presión sobre los recursos hídricos está aumentando. Los usos del agua se dividen en usos consuntivos (consumen el agua) y usos no consuntivos (el agua puede volver a usarse varias veces); el principal uso del agua en el mundo es la agricultura.

Los países de América Latina y el Caribe han hecho esfuerzos importantes para mejorar la gestión y aumentar la cobertura de sus servicios de agua potable y saneamiento. Inclusive en algunos países la gestión del agua se ha elevado a un tema de seguridad nacional.

⁵ Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. *Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura*. México. Setiembre de 2015. p. 25.

1.2.2.2. A nivel nacional

Guatemala es un país rico en recursos hídricos, cuenta con 459 km² de cuerpos de agua, 198 de ellos mayores a 0,1 km². Su territorio se caracteriza por un clima tropical y cuenta con dos estaciones: la estación lluviosa de mayo a septiembre, y la estación seca de octubre a abril. La precipitación promedio anual es aproximadamente de 2 000 milímetros, con variaciones desde 700 milímetros en las regiones más secas (oriente del país) hasta 5 000 milímetros en las más húmedas (norte y occidente del país).

En el país se enfrentan grandes desafíos para lograr una gestión adecuada de los recursos hídricos nacionales, de acuerdo con el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación-MAGA, solo el 26 % del territorio tiene alto potencial de agua subterránea, mientras que el 47 % es pobre o muy pobre. “Según el último balance hídrico nacional del 2003, el INSIVUMEH reporta una disponibilidad hídrica total de 93 338 millones de m³, al igual que IARNA en su Perfil Ambiental 2010-2012. Mientras que el diagnóstico de la Estrategia de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de Guatemala (SEGEPLAN 2006), reporta un caudal total de 97 120 millones de m³.”⁶

Dependiendo de dónde desembocan los ríos, el país se divide en tres grandes vertientes:

- La del Pacífico: cuenta 18 cuencas, los ríos de la vertiente hidrográfica del Pacífico se caracterizan por ser cortos, en promedio un poco más de 100 km, con crecidas de corta duración pero de respuesta rápida, las que se ha visto afectadas por el alto grado de urbanización del altiplano. La

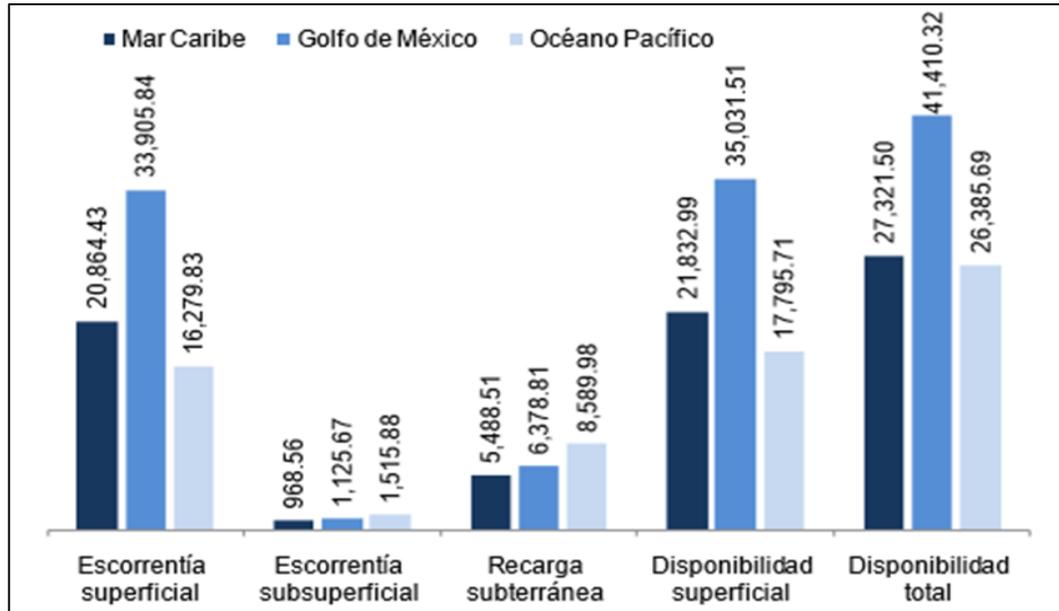
⁶ . Asociación Mundial para el Agua. *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica. Guatemala*. 2015. p. 11.

vertiente del pacífico aglutina el 52 % de la población y drena el 22 % del territorio del país.

- La del atlántico: incluye 10 cuencas de los ríos que desembocan en el Golfo de Honduras y abarcan el 31 % del territorio del país con 30,7 % de la población. En general los ríos son extensos y profundos, propios para la navegación y la pesca, los más importantes son el Polochic, el Motagua o río Grande y el río Dulce, desagüe natural del lago Izabal. El resto son ríos que desembocan o son fronterizos con Belice en la zona norte.
- La del Golfo de México: es la que posee más área geográfica 50 730 km², aproximadamente el 47 % del territorio nacional con solamente el 18 % de la población. Es la vertiente más caudalosa (con mayor disponibilidad hídrica).

Se caracteriza por tener ríos caudalosos, anchos, con pendientes relativamente suaves y con crecidas mucho más lentas. También es la vertiente con la menor densidad de población. Existen 10 cuencas hidrográficas, sobresalen el río la Pasión y el Chixoy o Negro, todos afluentes del Usumacinta, el más largo y caudaloso de Centroamérica y frontera natural entre Guatemala y México.

Figura 2. Disponibilidad de agua en Guatemala según vertiente, año 2015 (millones de metros cúbicos)



Fuente: Instituto Nacional de Estadística. Sección de Estadísticas Ambientales. *Compendio Estadístico Ambiental de Guatemala, 2015. Guatemala. p. 23.*

Es importante indicar que la contaminación del agua en las distintas cuencas del país se debe a fuentes puntuales (aguas residuales domésticas, industriales y agroindustriales) y no puntuales (erosión del suelo con agroquímicos durante los eventos de precipitación esorrentía). Los usos actuales generan 1 540 millones de m³ de aguas residuales a nivel nacional, esto limita usos productivos aguas abajo y su control es factor decisivo para las políticas de reducción de la pobreza

La transferencia tecnológica debe impulsar el desarrollo y crecimiento de las diversas tecnologías y estudios sobre el agua, que permitan desarrollar herramientas de bajo costo que mejoren la vida de las personas de más bajos recursos. Los mecanismos para la transferencia tecnológica en Guatemala son aquellos que facilitan y dan soporte a todos los sectores involucrados para su logro.

En los últimos años el uso de los recursos naturales en Guatemala ha generado un fuerte debate, el empleo de tecnología para la explotación masiva de recursos naturales acarrea consigo problemas de cambio climático y el agotamiento de los bosques, el agua y los minerales del subsuelo, que socavan la armonía entre las poblaciones y su entorno natural.

En Guatemala hay comunidades que no cuentan con servicios básicos como el agua, el ariete hidráulico se reconoce como una eficiente solución de abastecimiento de este recurso. El uso de las bombas de ariete es más adecuado al mundo en vías de desarrollo que las bombas a motor, por lo que esto puede ser base de una transferencia tecnológica de técnicas y métodos de bajo costo para la prospección, gestión y captación de agua.

El uso de la bomba de ariete es considerado por algunas organizaciones como parte de las tecnologías limpias que deben promoverse a nivel mundial, por los beneficios que puede aportar a la humanidad y por ser amigable con el medio ambiente.

2. SISTEMAS DE BOMBEO

2.1. Definición

“Sistemas de bombeo: son el conjunto motor eléctrico, bomba y conductos que se instalan para la extracción y manejo de cualquier tipo de aguas.”⁷

“Estaciones de bombeo de agua: son un conjunto de estructuras civiles, equipos, tuberías y accesorios, que toman el agua directa o indirectamente de la fuente de abastecimiento y la impulsan a un reservorio de almacenamiento o directamente a la red de distribución.”⁸

“Estaciones de bombeo de agua residual: son instalaciones, construidas y equipadas para transportar el agua residual del nivel de succión o de llegada a las unidades de tratamiento, al nivel superior o de salida de la misma. Las estaciones de bombeo de aguas residuales son necesarias para elevar y/o transportar, cuando la disposición final del flujo por gravedad ya no es posible.”⁹

⁷ http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0198_ME.pdf. Consulta: octubre de 2017.

⁸ Organización Panamericana de la Salud. *Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable*. Lima 2005.

⁹ <http://hidraulicaucentral.blogspot.com/2012/05/bombas-y-estaciones-de-bombeo.html>.

Consulta: octubre de 2017. Consulta noviembre de 2017.

2.2. Antecedentes históricos

Dentro de los antecedentes de los sistemas de bombeo, se sabe que la primera bomba construida por el hombre fue la jeringa y se debe a los antiguos egipcios, quienes la utilizaron para embalsamar las momias; el ser humano ha necesitado transportar el agua de un lugar a otro, por lo que empezó a idear diversos mecanismos para su solución, iniciando así el desarrollo tecnológico en sistemas de bombeo.

Los sistemas de bombeo se utilizan para transportar toda clase de fluidos como agua, aceites, combustibles, líquidos alimenticios, sólidos en suspensión, entre otros. De forma general, los sistemas de bombeo incluyen las estructuras destinadas a elevar un fluido desde un nivel energético inicial a un nivel energético mayor, se utilizan en los siguientes tipos de proyectos de acuerdo a las condiciones de cada uno:

- Redes de abastecimiento de agua potable
- Red de alcantarillado
- Sistema de riego
- Sistema de drenaje
- Plantas de tratamiento tanto de agua potable como de aguas servidas
- Plantas industriales

2.3. Parámetros de diseño

En el diseño de sistemas de bombeo, el objetivo principal es proyectar instalaciones que cumplan con aspectos de seguridad, flexibilidad de operación, confiabilidad y economía; es importante analizar los conceptos básicos para

poder realizar un adecuado diseño de los sistemas de bombeo, que garantice que el sistema funcione de acuerdo a las necesidades existentes.

De acuerdo a las características y tipo de proyectos, existen una diversidad de mecanismos de bombeo (bombas), cuya capacidad, diseño y aplicación cubren un amplio rango que va desde pequeñas unidades utilizadas para dosificación de cantidades mínimas, hasta bombas centrífugas que son capaces de manejar grandes volúmenes para surtir de agua a las grandes concentraciones urbanas.

La variedad de diseños cubren desde diferentes principios de operación, hasta bombas especiales para manejo de sustancias tan diversas como el agua, metales fundidos, concreto y materiales de construcción. Cuando se ha definido el tipo de bombas a utilizar, se debe consultar los catálogos o información técnica del fabricante para obtener las curvas características de cada una, las curvas características de las bombas presentan datos similares independientemente del fabricante.

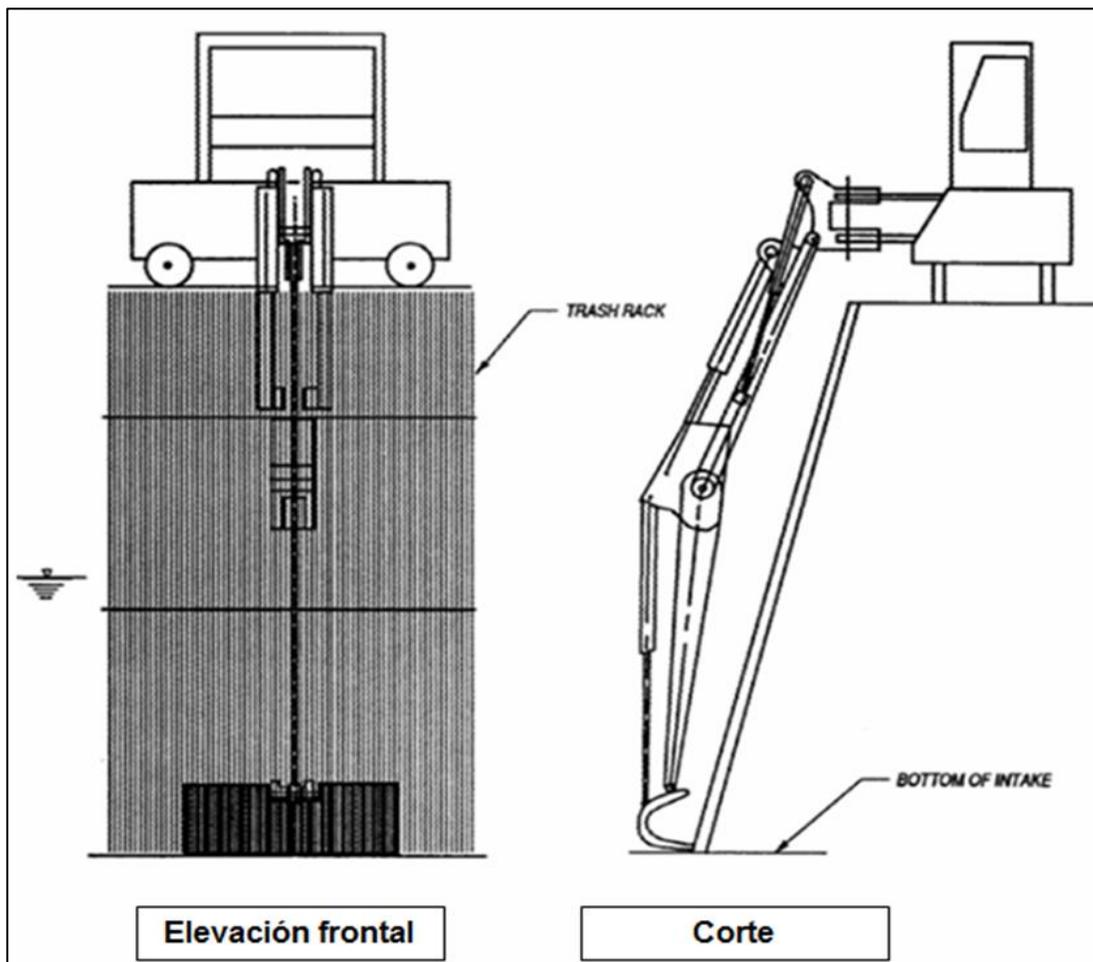
2.4. Componentes

Un sistema de bombeo está constituido, básicamente, por un equipo de bombeo más una red de ductos por donde circula el fluido a impulsar, son de uso frecuente en el sector industrial como parte de los procesos productivos. Cualquier sistema de bombeo tiene 2 lados perfectamente identificados, el lado de la succión y el lado de la impulsión.

De acuerdo con el tamaño y características, por lo general los sistemas de bombeo constan de los siguientes componentes:

- Rejas: de acuerdo al sistema de bombeo, las instalaciones deben disponer de algún sistema de retención de sólidos; su función es evitar que el ingreso de estos no dañen las bombas.

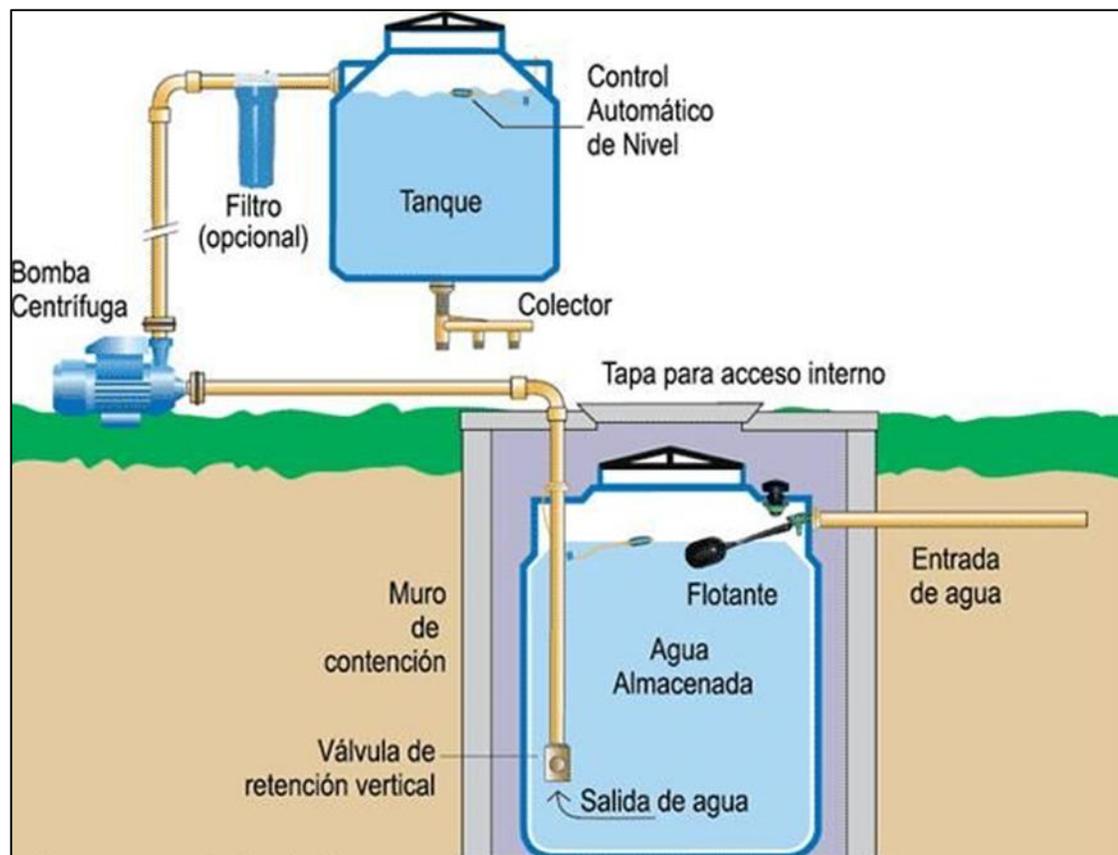
Figura 4. **Rejas y limpia rejas**



Fuente: http://fi.uba.ar/archivos/Estaciones_de_Bombeo.pdf. Consulta: noviembre de 2017.

- Tanques y cisternas: de acuerdo al sistema de bombeo que se trate, son necesarios tanques de almacenamiento o distribución.

Figura 5. **Tanques enterrado y elevado, sistema de bombeo residencial**



Fuente: <https://www.pinterest.cl/pin/374502525244477210/>. Consulta: abril 2018.

- Cámara de succión: es la instalación hidráulica donde se recibe el líquido que habrá de bombearse; se refiere a todas las partes del sistema de bombeo, desde la fuente del fluido a la entrada de la bomba.

- Línea de impulsión: su diseño óptimo minimiza los costos de instalación y operación, en general, la línea de descarga debe ser tan corta y directa como sea posible, para minimizar la carga sobre la bomba.

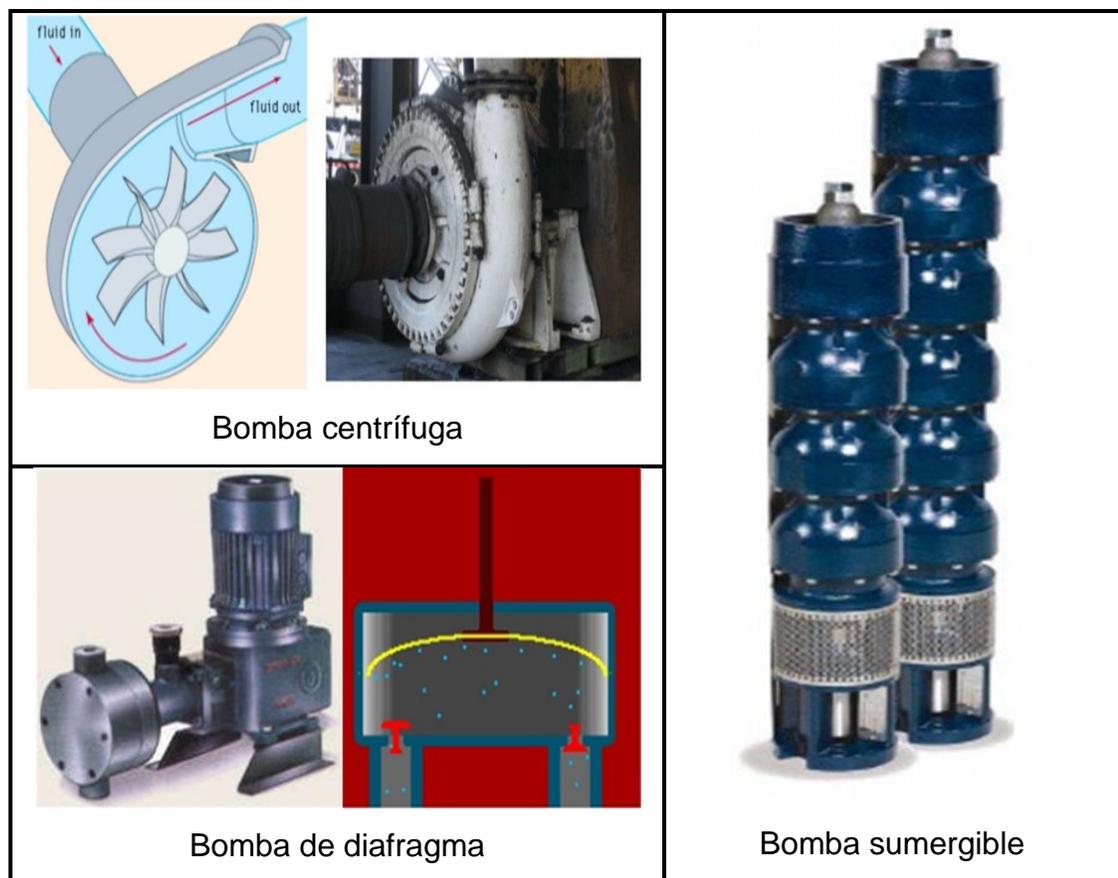
Figura 6. **Tuberías sistema de bombeo**



Fuente: elaboración propia.

- **Bombas:** las bombas poseen diferentes aplicaciones dentro de la vida práctica de las personas y la industria, las instalaciones de bombeo pueden tener una amplia gama de necesidades de carga o descarga, en ocasiones una sola bomba no podría satisfacerlas.

Figura 7. **Tipos de bombas sistemas de bombeo**



Fuente: elaboración propia.

Entre las aplicaciones de las bombas se pueden mencionar las siguientes:

- o Bombas para manejo de diferentes sustancias químicas.
- o Bombas rotatorias para manejo de aceites, mieles, fibras, otros.
- o Bombas para aguas subterráneas.

Figura 8. **Sistema de bombeo agua residual**



Fuente: file:///C:/Users/PC%20%201/Downloads/DISE%C3%91O%20DE%20ESTACIONES%20DE%20BOMBEO.pdf. Consulta: noviembre de 2017.

- Servicios auxiliares: como compuertas, válvulas, trituradores, iluminación, elementos de medición y control, entre otros.

Figura 9. Válvulas sistemas de bombeo (A)



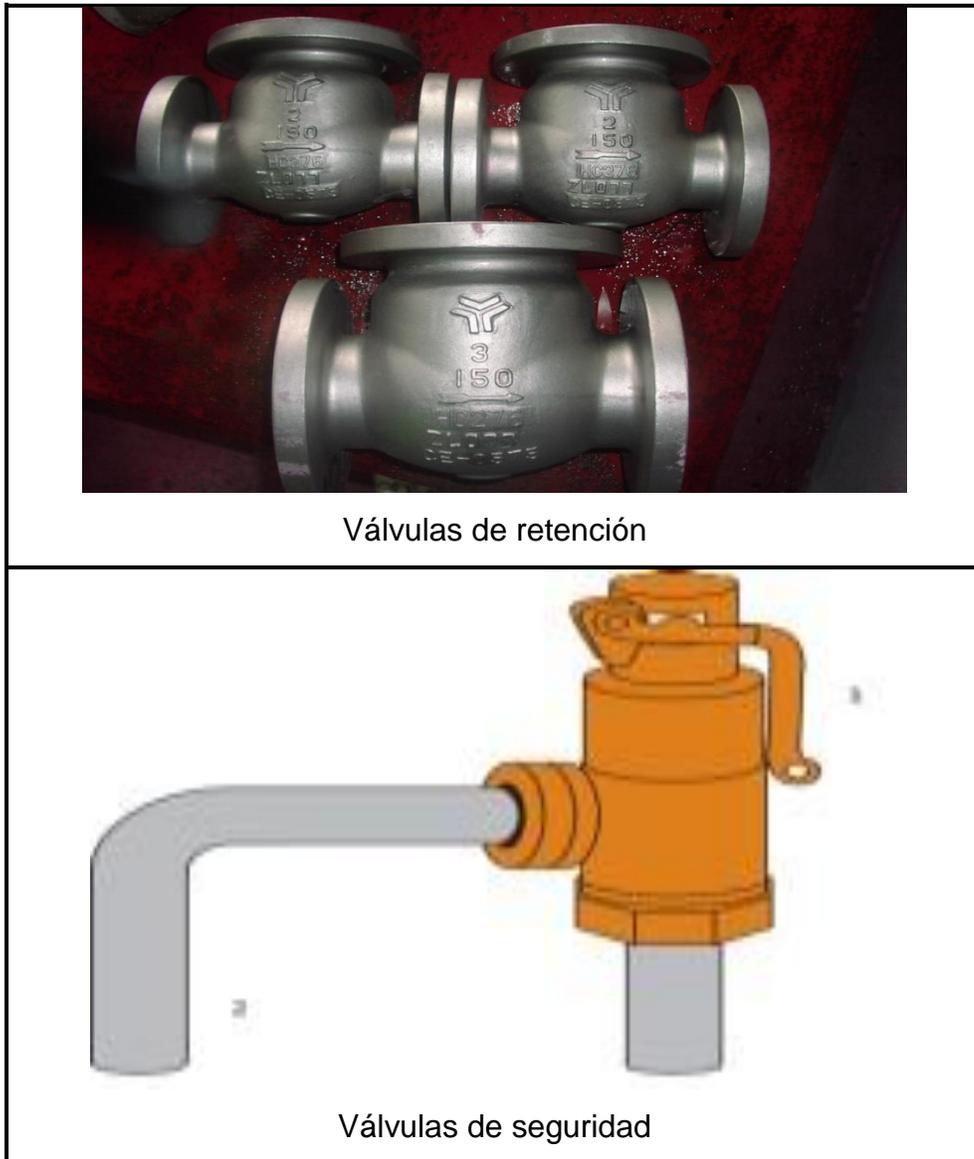
Válvulas de regulación



Válvulas de control.

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Válvulas sistemas de bombeo (B)**

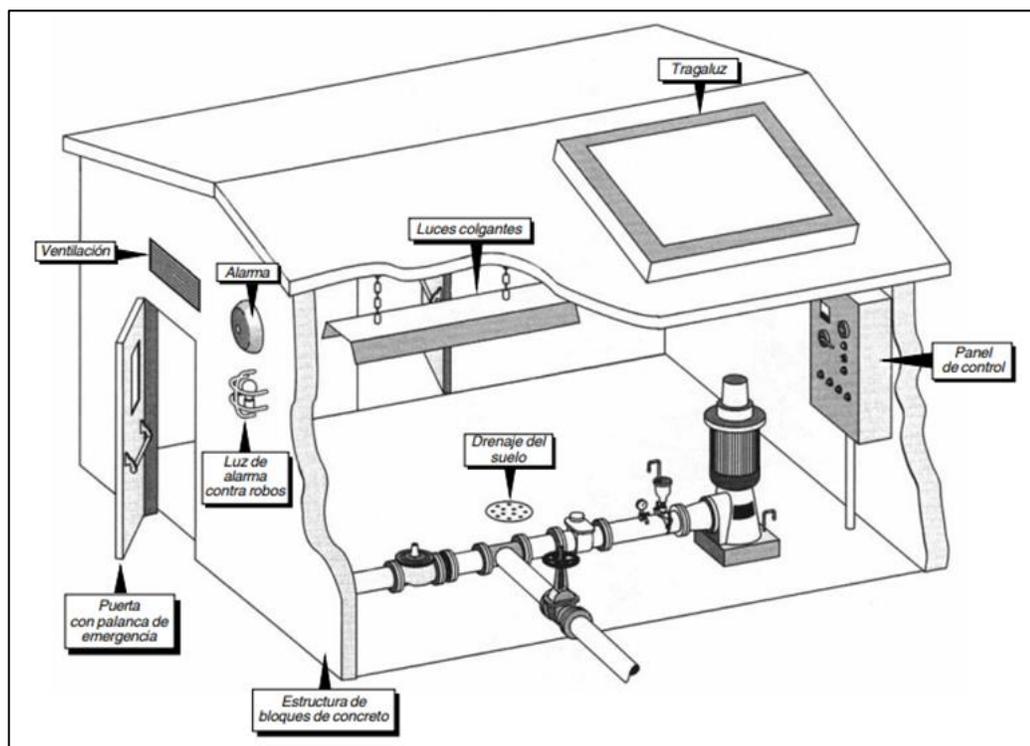


Fuente: elaboración propia.

- Dispositivos de protección contra el golpe de ariete: de acuerdo al sistema de bombeo, las instalaciones deben disponer de algún sistema de protección; su función es evitar que se dañen las bombas.

- Caseta de bombeo: de acuerdo al tipo y características del sistema de bombeo, en la caseta se encuentran las bombas, los motores, tableros de control, entre otros; en el caso de equipos medianos o grandes también se incluyen dentro de la caseta de bombeo los elementos de izaje (grúas o puente grúas), las compuertas, sistema de monitoreo y telecomunicaciones, entre otros.

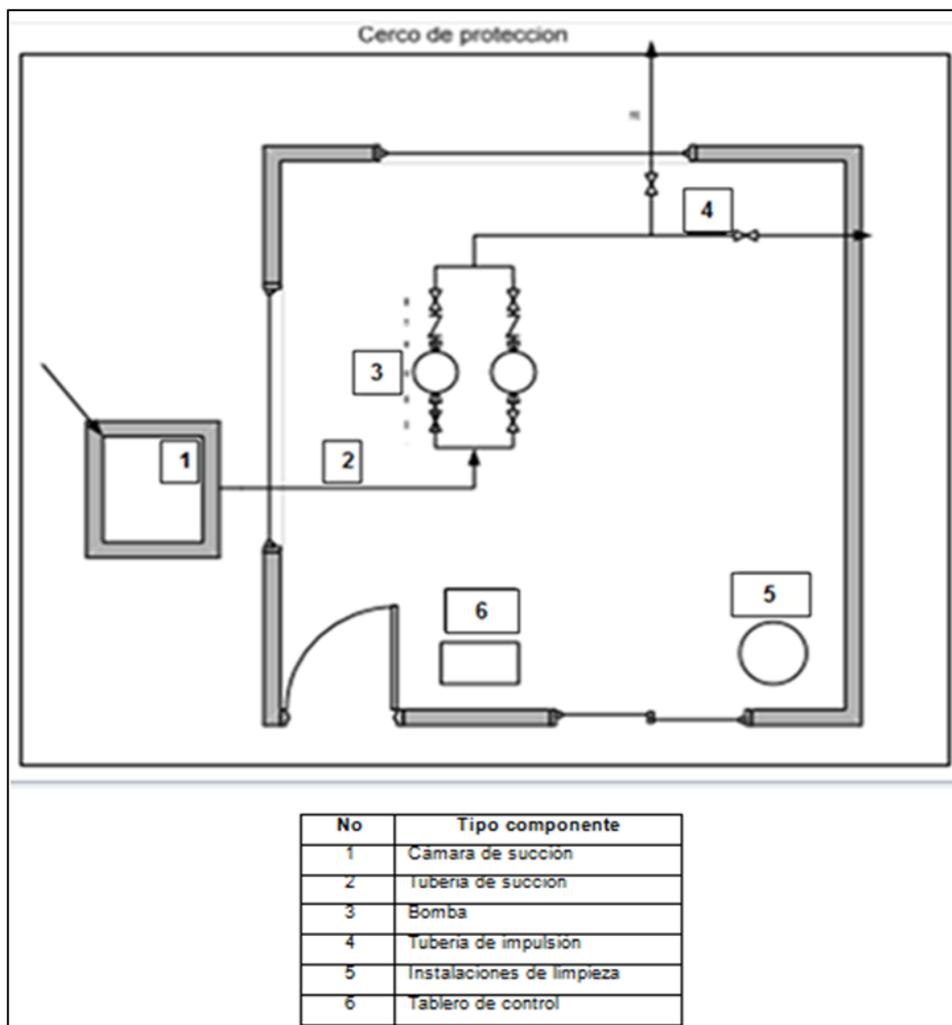
Figura 11. **Detalle caseta sistema de bombeo**



Fuente: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/inspecciones/lec4.pdf>. Consulta: noviembre 2018.

- Cerco de protección para la caseta de bombeo: es necesario proteger las instalaciones de bombeo contra el vandalismo y el ingreso de personas no autorizadas.

Figura 12. Componentes caseta sistema de bombeo de agua potable



Fuente: Organización Panamericana de la Salud. *Elaboración propia en base a Guías para el diseño de estaciones de bombeo de agua potable.* Lima 2005. p. 5.

- Línea de alimentación de energía eléctrica o instalación para almacenamiento de combustible.

2.5. Tipos

Los sistemas de bombeo se pueden clasificar de acuerdo a diferentes criterios, entre los que se incluyen los siguientes:

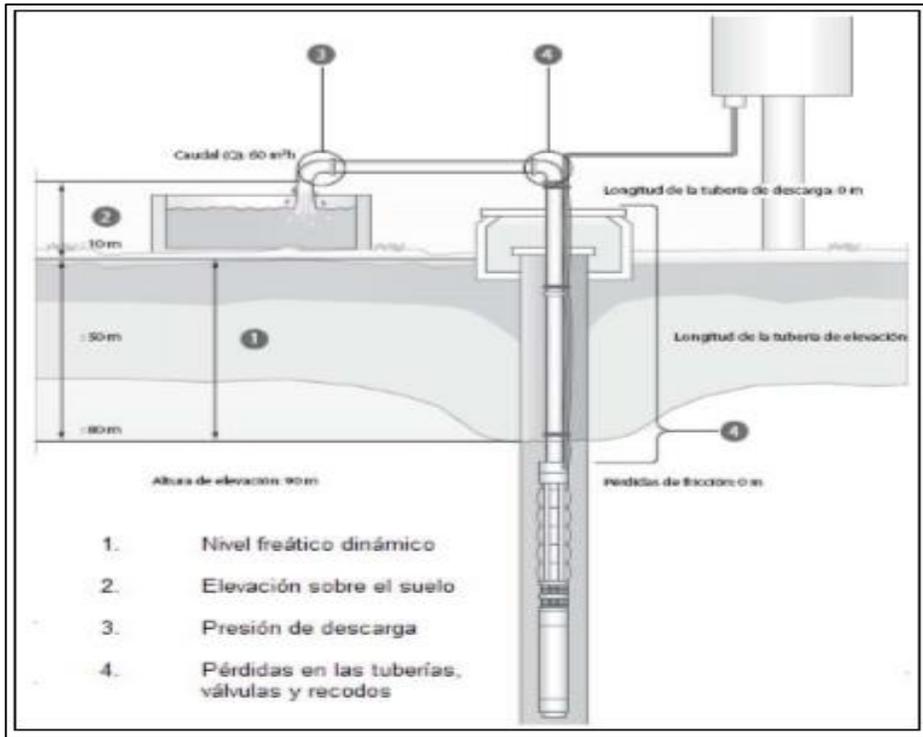
- Las aplicaciones a las que están destinados
- Los materiales con que se construyen
- Los líquidos o fluidos que mueven
- Su configuración mecánica

Los sistemas de abastecimiento de agua potable, son el conjunto de obras de captación, tratamiento, conducción, regulación, distribución y suministro intradomiciliario de agua potable, las estaciones de bombeo para agua potable se clasifican en primarias y secundarias.

De acuerdo a la forma cómo funcionan, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Sistema por gravedad (sin y con tratamiento)
- Sistema por bombeo (sin y con tratamiento)

Figura 13. Estación de bombeo para agua potable (pozo mecánico)



Fuente: MIJANGOS RIVAS, José María. *Diseño, instalación, energización y puesta en operación de equipo electromecánico, aplicando equipo submonitor, en pozos profundos.* Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería. Guatemala. 2014. p. 47.

3. BOMBAS DE ARIETE

3.1. Desarrollo

A continuación se presenta información sobre el fenómeno de golpe de ariete, parte fundamental y principio del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, así como su desarrollo y configuraciones del sistema.

3.2. Definición

“Las bombas de agua son máquinas de transformación de energía con la que se facilita el movimiento de líquidos en una forma ascendente aumentando su presión y añadiendo energía al sistema hidráulico, y permitiendo solucionar necesidades de suministro de agua en actividades cotidianas como la industria, la agricultura y en el uso doméstico.”¹⁰

“Una bomba de ariete es una bomba hidráulica cíclica que utiliza la energía cinética de un golpe de ariete en un fluido para subir una parte de ese fluido a un nivel superior. No necesita por lo tanto aporte de otra energía exterior.”¹¹

¹⁰ ACITORES MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete*. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2012. p. 15.

¹¹ RENGIFO HINCAPIÉ, Sebastián y GALLEGOS CADENA, Juan Daniel. *Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Pereira. 2016. p. 25.

3.3. Diseño

El ariete hidráulico es una bomba semiautomática que basa su principio de operación en función a la caída de un cuerpo de agua, utilizando su energía cinética para producir un golpe de ariete, y así, elevar parte de este cuerpo de agua a una altura considerablemente mayor.

Determinar el lugar donde se va a utilizar la bomba es la etapa primordial que marcará factores determinantes para el diseño de la misma, debido a las necesidades en el caso específico para su funcionamiento. La bomba tiene larga durabilidad, poco mantenimiento e inspección, y la opción de poder funcionar las 24 horas del día por varios meses o años.

El diseño de una bomba de ariete hidráulico está en función de los siguientes datos:

- Estimación de elevación de agua a entregar, es decir, la altura desde el lugar en donde se sitúa el ariete al tanque de almacenamiento de agua.
- Estimación del caudal de la fuente disponible en litros por minuto.
- Estimación de la caída de agua, es decir, la altura desde el nivel del agua en el tanque alimentador al lugar en donde se sitúa el ariete.
- Estimación de la necesidad de entrega de agua en litros por día.

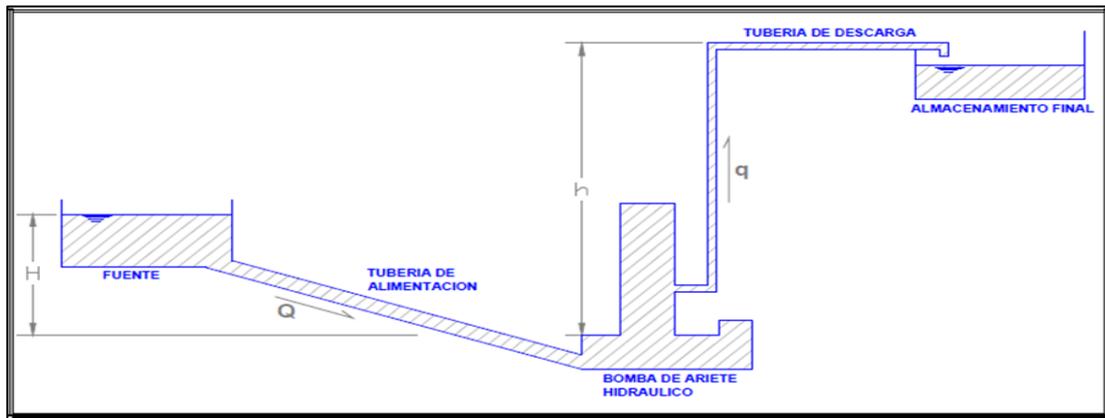
3.3.1. Parámetros hidráulicos

El uso de un sistema de bombeo requiere de una serie de cálculos para determinar, a partir de los datos de partida, las características de la bomba, como su rendimiento, caudal de descarga y altura máxima de elevación o de bombeo. Para determinar el tamaño y tipo de una bomba de ariete con el mejor rendimiento para las condiciones requeridas es necesario conocer los siguientes datos:

- H, altura de caída máxima que se puede lograr (m): es importante mantener la cota del nivel de agua en el tanque, ya que si no se lo hace la velocidad de salida en la tubería de impulsión no es constante.
- h, altura a la que se desea bombear el agua (m): se mide desde el nivel de la válvula de descarga hasta el nivel que llega el agua en el tanque de descarga.
- Q_{carga} , para el correcto funcionamiento de la bomba de ariete se necesita un caudal de impulsión continuo.
- q_{descarga} , es el caudal que la bomba de ariete entrega una vez puesta en marcha.
- L, distancia a la que se desea bombear el agua (m): de la longitud del conducto de impulso depende el funcionamiento automático de un ariete.

La siguiente figura presenta la distribución típica de los componentes de un sistema de bombeo con ariete hidráulico

Figura 14. **Esquema funcionamiento bomba de ariete**



Fuente: GUTIÉRREZ, Luis Lorenzo y MANCEBO Piqueras, José Antonio. *Primeras Jornadas Internacionales sobre Bombas Manuales y de Ariete*

3.3.2. **Funcionamiento**

El sistema de la bomba se basa en el fenómeno conocido en la hidráulica como golpe de ariete, el cual se observa cuando se interrumpe el flujo de agua cerrando bruscamente una tubería. La energía cinética, que trae el agua en movimiento, al ser detenida, origina un aumento brusco o golpe de presión.

El principio del funcionamiento de la bomba de ariete se basa en el fenómeno de golpe ariete, por lo que se necesita disponer de una fuente de agua para su activación. Opera de la siguiente manera:

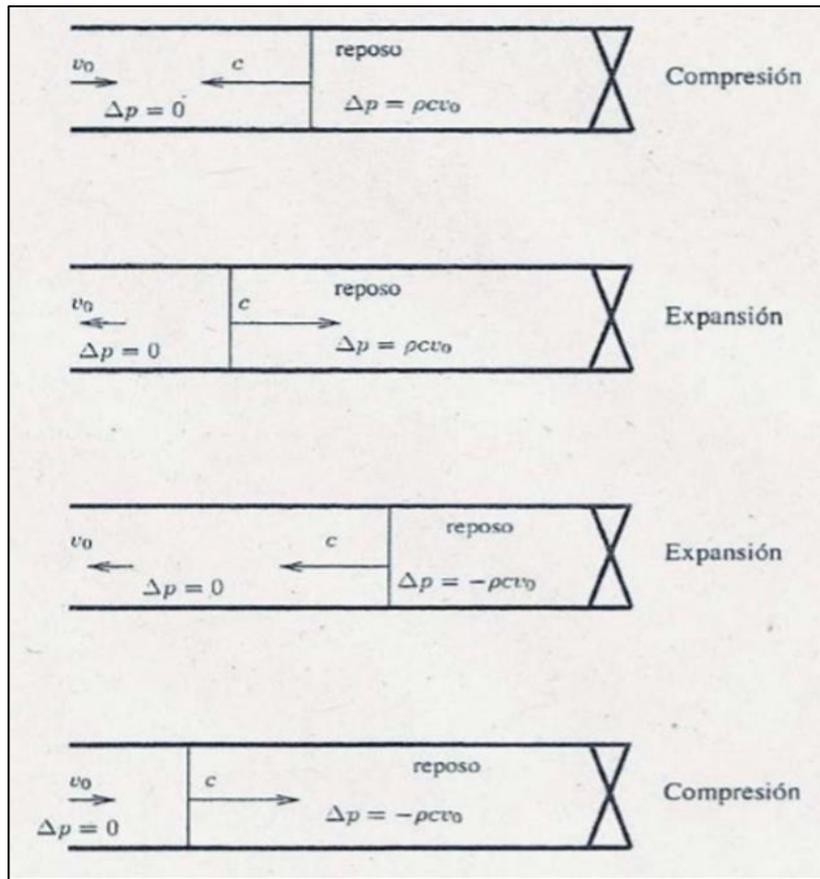
- Al inicio la válvula de impulso se encuentra abierta como consecuencia del propio peso que la mantiene en esa posición, mientras que la válvula de descarga se encuentra cerrada. Desde la fuente de suministro el agua fluye por la tubería de alimentación, mientras va adquiriendo una

aceleración, atravesando el cuerpo del ariete y escapando a través de la válvula de impulso.

- A medida que transcurre un pequeño período de tiempo, el agua que circula por la tubería de alimentación alcanza cierta aceleración suficiente para que la presión dinámica del fluido actúe sobre la válvula de impulso, venciendo su propio peso, y la cierre. Esta interrupción del flujo de agua produce una sobrepresión instantánea de gran empuje, conocida como golpe de ariete, que obliga a abrir la válvula de descarga o válvula *check*, entrando el flujo de agua hacia la cámara de aire, comprimiendo el aire que ahí se encuentra.
- Una vez disipada la sobrepresión generada en la cámara de aire, y por lo tanto igualada la presión a uno y a otro lado de la válvula anti retorno, el aire comprimido actúa como una especie de muelle, transmitiendo al fluido la presión que se ha acumulado en el aire de la cámara, provocando el cierre la válvula *check* y el bombeo del agua a través de la tubería de descarga.
- Cuando la presión del aire, en la cámara, aumenta hasta ser igual o mayor que la fuerza impulsora ocurre el retroceso de agua cerrando la válvula de descarga y abriendo la válvula de impulso, con lo que se repite de nuevo el ciclo. El retroceso del agua permite la inyección de aire por medio de la válvula de aire, con el fin de compensar el aire absorbido por el agua.

Esto ocurre indefinidamente, dándose así, el funcionamiento automático de la bomba de ariete hidráulico; el ciclo de bombeo del ariete hidráulico ocurre de forma muy rápida, repitiéndose este fenómeno del orden de 40 a 120 veces por minuto.

Figura 15. Onda de compresión generada por el cierre súbito de una válvula



Fuente: ACITORES MARTÍNEZ, Francisco Javier. *Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete*. Universidad Carlos III de Madrid. España. 2012. p. 10.

3.4. Ventajas y desventajas

La bomba de ariete hidráulico es una máquina de construcción y funcionamiento muy sencillo y de bajo costo; no utiliza toda el agua proveniente de la tubería de entrada (entre 20 % hasta 70 % o 90 % en algunos casos).

A continuación se presentan algunas de las ventajas y desventajas del uso de este tipo de bombas.

Tabla I. **Ventajas y desventajas del uso de bombas de ariete**

Ventajas	Desventajas
No requiere electricidad, combustible ni trabajo humano para su funcionamiento.	Poco acceso a la tecnología (no hay asistencia técnica).
Todo el equipo es de bajo costo y sus piezas son de fácil recambio, materiales de reparación de fácil acceso.	La altura a la que se desea bombear depende de la caída de agua.
Requiere un mínimo de manutención.	Bombeo por pulsación.
Funciona automáticamente ante un suministro de agua.	Bombee poco caudal.
Puede usarse todo el año en los cuerpos de agua disponibles.	Rendimientos bajos en relación a las electrobombas y motobombas.

Fuente: elaboración propia.

Esta tecnología es una alternativa de solución con muchísimas ventajas con respecto al uso de sistemas y equipos de bombeo más conocidos. Las bombas actualmente utilizadas para impulsar agua, funcionan principalmente con electricidad o combustibles.

Tabla II. **Comparación del ariete hidráulico con otro tipo de bombas (grado de utilización de cada aspecto)**

Descripción	Bomba-Motor	Bomba-Eléctrica	Ariete hidráulico
Energía externa	Sí	Sí	Sí
Lubricantes	Sí	Sí	Sí
Inversión inicial	Alta	Bajo	Bajo
Bajo mantenimiento	Sí	Sí	Sí
Confiabilidad	Alta	Media	Sí
Ruido	Alto	Medio	Medio - alto
Eficiencia	Alta	Alta	Bajo

Fuente: RENGIFO Hincapié, Sebastián y GALLEGO Cadena, Juan Daniel. *Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Pereira. 2016. p. 32.

3.5. Materiales

En el mercado se pueden encontrar bombas de ariete producidas en fábricas con materiales bajo diseño; en la actualidad las bombas de ariete se pueden construir con materiales como hierro galvanizado y PVC de fácil acceso en ferreterías.

El cuerpo de la bomba de ariete es estructuralmente simple, constituido por una caja de válvulas la cual puede estar formada por una té y un codo, una unidad ensamblada cuyos elementos pueden estar unidos por pernos, tornillos, elementos roscados o mediante soldadura según los recursos, tecnificación y complejidad para la misma; ahí se produce la propagación de la onda de presión, donde se ubican la válvula de impulso y la válvula de entrega.

Figura 16. **Bomba de ariete industrial (Ariete Walton7)**



Fuente: GUTIÉRREZ, Luis Lorenzo y MANCEBO Piqueras, José Antonio.
Primeras Jornadas Internacionales sobre Bombas Manuales y de Ariete.

La bomba de ariete consta de una serie de elementos los que se describen a continuación:

- Tanques de alimentación y descarga: pueden ser de diferentes materiales; el tanque de alimentación almacena un mayor volumen de fluido que el tanque de descarga.

- Válvula de impulso (cheque inicial): constituye la parte móvil más importante y determinante en el funcionamiento del equipo; es la encargada de producir el golpe de ariete debido al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua. Esta válvula permite regular la cantidad de agua que penetra en la cámara de aire.
- Válvula de entrega (cheque final): es la que permite el paso del agua, desde la caja de válvulas hasta la cámara de aire, no permitiendo su retroceso al cerrarse por los efectos del rebote que se produce con el aire comprimido dentro de la cámara, lo que hace que el agua sea impulsada hasta un nivel superior al de la captación. Debe estar construida de forma tal que se logre una buena hermeticidad, lo que evita pérdidas en la eficiencia y el rendimiento.
- Cámara de aire o campana: es el dispositivo que regula el flujo de agua hacia la tubería de descarga, absorbe la sobrepresión (funciona como amortiguador de los golpes de ariete) e impulsa el agua por la tubería, dando de esta forma un flujo casi continuo, logrando un nivel superior al de captación y va montada sobre su propia base en la caja de válvulas mediante tornillos.
- Tubería de suministro: la longitud de la tubería de suministro es única para cada bomba; no puede ser de material plástico ni PVC porque la sobrepresión efectuada por el golpe de ariete es muy fuerte para este tipo de tubos, es muy recomendable utilizar acero galvanizado de primera calidad o tuberías de hierro. El diámetro de la tubería de entrega normalmente se calcula como la mitad del diámetro de la tubería de suministro.

- Estructuras de soporte para tanques: deben ser construidas de un material metálico que soporte el peso del tanque lleno a su mayor capacidad.

3.6. Usos

Las bombas de ariete hidráulico se usan en abastecimiento a poblaciones rurales y urbanas, propiedades particulares, riego, entre otras. También se aplica en proyectos en los que se requieren de un caudal pequeño debido a su situación y condiciones topográficas y plantas pequeñas de purificación en la que la topografía del terreno ofrezca facilidades para su instalación.

Figura 17. **Uso de 5 bombas de ariete conectadas en paralelo**



Fuente: GUTIÉRREZ, Luis Lorenzo y MANCEBO Piqueras, José Antonio.
Primeras Jornadas Internacionales sobre Bombas Manuales y de Ariete

4. ESTUDIO PRÁCTICO

4.1. Desarrollo

La bomba de ariete hidráulico es un dispositivo mecánico, ecológico y con autonomía propia, cuyo objetivo es bombear agua desde una fuente de alimentación hasta una altura superior determinada, aprovechando la sobrepresión que produce el efecto del golpe de ariete debido al cierre súbito de válvulas en tuberías.

El objetivo del presente trabajo es evaluar el rendimiento de la bomba de ariete fabricada utilizando tubería de alimentación de PVC de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y variando las alturas del tanque de alimentación y del tanque de descarga, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de los usuarios. La evaluación del sistema fue realizada en el Laboratorio de Hidráulica y Mecánica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC.

4.2. Antecedentes

El suministro de agua potable de las municipalidades del país, un 70 % se abastece con aguas superficiales y el 30 % con aguas subterráneas. Además, un 66,3 % del total de consumidores utilizan sistemas de gravedad; 18,5 % utilizan bombeo y 15,2 % usan sistemas mixtos para abastecerse de este recurso. Esto genera la necesidad de evaluar otras alternativas que ayuden a mejorar esta situación, el ariete hidráulico se reconoce como una eficiente solución de abastecimiento de agua.

4.3. Metodología

De acuerdo a lo establecido inicialmente se elaboró el marco teórico sobre el tema de interés, para esto se consultaron libros, revistas y páginas *WEB* lo que facilitó el trabajo de laboratorio.

La parte experimental incluye el diseño y construcción de un sistema de bombeo de ariete hidráulico a escala de laboratorio con tubería de $\frac{3}{4}$ " de diámetro en las siguientes etapas:

- Diseño: determinar las condiciones de servicio de acuerdo al lugar donde se va a utilizar la bomba, es la etapa primordial que marcará factores determinantes para su diseño, es necesario identificar tres condiciones básicas: hídricas, topográficas y técnicas. Los requisitos hidráulicos de instalación que se necesitaron para efectuar el análisis de resultados de la bomba de ariete fueron los siguientes:

Tabla III. Condiciones hidráulicas instalación

Requisito	Identificación	Dimensión
Altura de carga	H_{carga}	1,05 m
Longitud tubería carga	L_{carga}	Se mantiene constante
Caudal de carga	Q_{carga}	Se mantiene constante
Diámetro tubería de impulsión	$\varnothing_{\text{impulsión}}$	1 pulgada
Altura de descarga	H_{descarga}	Variable (1,0, 1,5, 2,0 y 3,0 m)
Diámetro tubería descarga	$\varnothing_{\text{descarga}}$	$\frac{3}{4}$ pulgada
Caudal de descarga	Q_{descarga}	Variable

Fuente: elaboración propia.

- **Construcción:** la bomba se construyó utilizando materiales disponibles en el mercado, de manera que sea económica y accesible a las personas; el proceso de construcción es muy práctico, en caso de daño o deterioro de alguna pieza del sistema se puede sustituir por una nueva.

Figura 18. **Ubicación bomba de ariete en el laboratorio de hidráulica Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC**



Fuente: elaboración propia, construcción de bomba de ariete octubre 2018.

El conjunto de piezas que permiten el funcionamiento de un ariete hidráulico se clasifican en dos grupos:

- o **Componentes estructurales:** son aquellos que integran la estructura del sistema.

Figura 19. **Estructuras sistema de bombeo (H = 1,50 m)**



Fuente: elaboración propia, construcción bomba de ariete octubre 2018.

- o Componentes hidráulicos: son accionados con el movimiento o presión que el agua ejerce sobre cada uno de ellos.

Figura 20. Armado de válvula bomba de ariete 3/4"



Fuente: elaboración propia, construcción bomba de ariete octubre 2018.

- Instalaciones complementarias: corresponden a los sistemas de tuberías y almacenamiento de agua necesarios para el funcionamiento de la bomba de ariete.

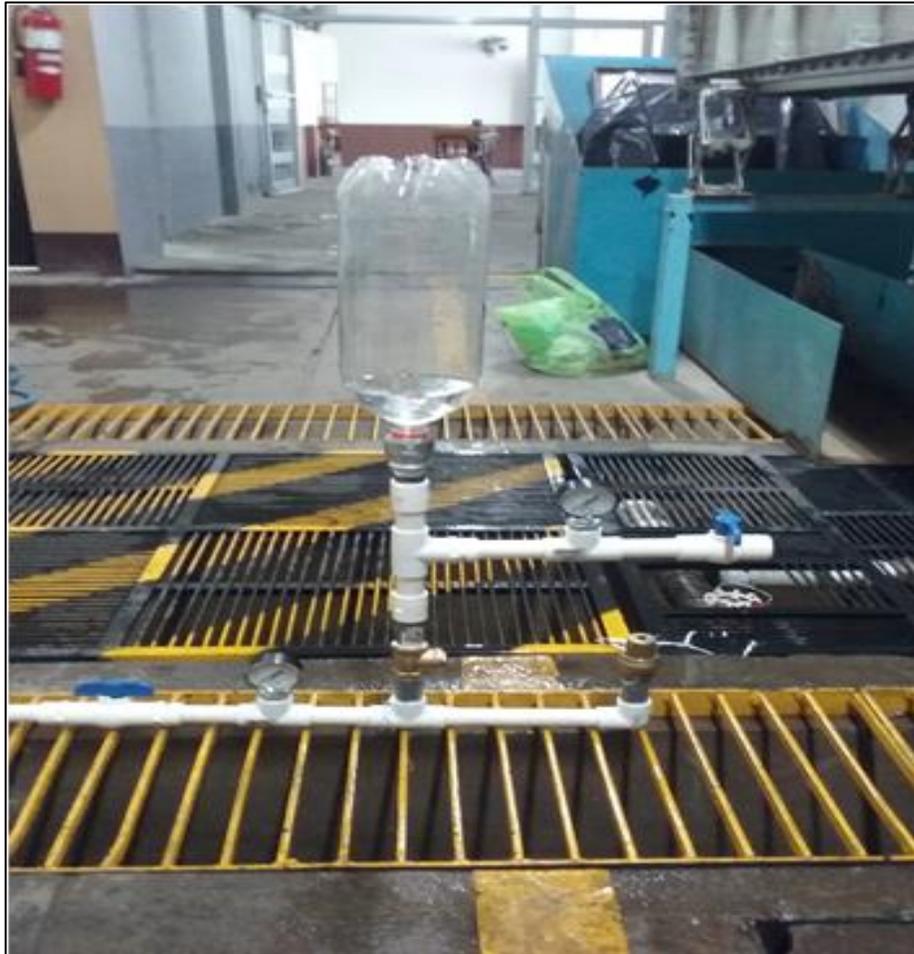
Figura 21. **Modelo de bomba de ariete construido para el estudio**



Fuente: elaboración propia, construcción bomba de ariete octubre 2018.

- Evaluación en laboratorio: el diseño de la presente investigación es experimental, la recolección de información se realizó mediante observación y experimentación en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, USAC. Los resultados de los ensayos se tabularon y analizaron en hojas electrónicas, lo que facilitó evaluar el sistema de bombeo propuesto.

Figura 22. **Detalle instalación bomba de ariete**

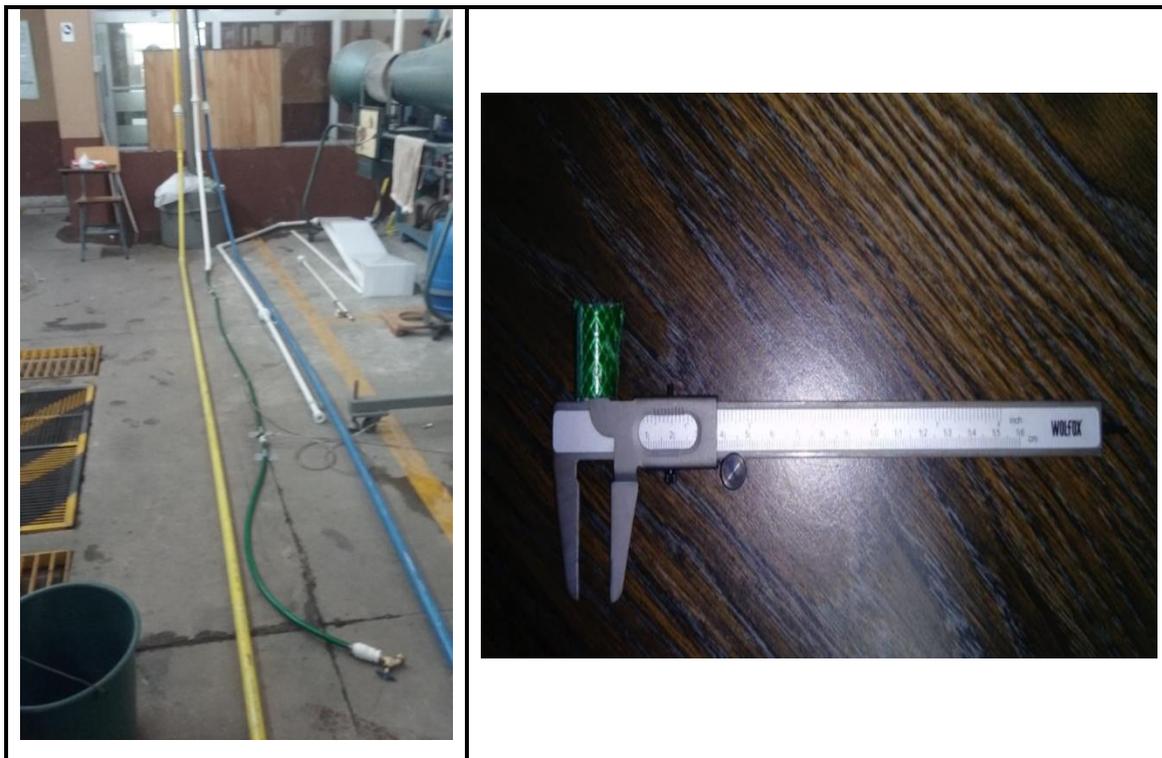


Fuente: elaboración propia, ensayos de laboratorio octubre 2018.

- Puesta en marcha: antes de accionar el ariete hidráulico para realizar las pruebas correspondientes, revisar cada una de las uniones de las piezas para comprobar que el ensamble se llevó a cabo correctamente.

Una vez construido el sistema de bombeo diseñado, se procede a la medición experimental de datos de caudal y presión para la condición de trabajo. Se deben determinar las pérdidas mayores y menores en el sistema, de acuerdo a las condiciones de las pruebas a realizar.

Figura 23. **Actividades cálculo de pérdidas en el sistema de bombeo**



Fuente: elaboración propia, ensayos de laboratorio octubre 2018.

Figura 24. **Control de presiones sistema de bombeo, uso de manómetros**



Fuente: elaboración propia, ensayos de laboratorio octubre 2018.

1.1.1. Actividades de campo

Luego de construida la bomba y de acuerdo a los objetivos de este trabajo, las actividades de campo se desarrollaron de la siguiente manera:

- Instalación y construcción de sistema de bombeo, Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Universidad de San Carlos de Guatemala USAC.

Figura 25. **Herramientas utilizadas durante la construcción e instalación de la bomba de ariete**



Fuente: elaboración propia, construcción bomba de ariete octubre 2018.

Figura 26. Sistema de bombeo instalado



Fuente: elaboración propia, construcción bomba de ariete octubre 2018.

- Ensayos y toma de resultados: se efectuaron ensayos preliminares a fin de fijar los parámetros iniciales de operación y prueba de la bomba de ariete. De acuerdo a los objetivos y parámetros de operación se definieron las siguientes condiciones de evaluación final.
 - o Evaluación de las pérdidas en el sistema: la presión se mide con un manómetro (psi) colocado a la entrada de la bomba, la presión registrada por el manómetro esta en PSI, por lo que se convierte a metros columna de agua, con la siguiente fórmula:

 Valor manómetro PSI* (0,703 MCA)/(1 PSI)
 - o Aforos en la línea de carga, varía según la altura a la que esté colocada la línea de carga. Se utilizó el método volumétrico, se tomaron cuatro medidas de tiempo de llenado, tomando el caudal promedio como caudal de carga.
 - o Aforos en la línea de descarga, varía según la altura a la que esté colocada la línea de descarga. Se utilizó el método volumétrico, se tomaron cuatro medidas de tiempo de llenado, tomando el caudal promedio como caudal de descarga.
 - o Prueba de altura de descarga fija y altura de carga variable. Para ello se utilizó un depósito de abastecimiento de agua y una bomba eléctrica de 0,5 HP que abastece el depósito de alimentación, manteniendo así un nivel constante del agua en el depósito.

Este se conecta a la tubería de carga que hace funcionar al ariete, al que se conecta un tubo PVC de 2" de diámetro, que lleva el agua nuevamente al depósito de abastecimiento de agua, repitiendo el ciclo.

Figura 27. Línea de carga sistema de bombeo ($H_{\text{carga}} 1,0 \text{ m}$)



Fuente: elaboración propia, construcción de bomba de ariete octubre 2018.

- Procedimiento de toma de datos: para determinar la eficiencia del sistema hidráulico es necesario conocer la altura de carga, caudal de carga, altura descarga y caudal de descarga.

- o Para el cálculo del caudal de descarga (Q_{desc}) se utilizó el método volumétrico con recipientes de 1 o 2 litros, de acuerdo al caudal, se tomaron cuatro medidas de tiempo, se tomó el caudal promedio como caudal de descarga.
- o Para la altura de carga: se mide en metros desde el nivel de la base de la bomba de ariete hidráulico hasta la lámina de agua en depósito.
- o Para la altura de descarga: se toma la altura medida en metros desde el nivel de la base de la bomba de ariete hidráulico hasta la tubería de descarga.

1.2. Análisis de resultados

De acuerdo a lo establecido, hay dos alturas significativas en el sistema de bombeo evaluado:

- La altura de carga o de alimentación (H_{carga}): es la distancia que hay entre el suelo y el punto donde la tubería de alimentación se carga de agua.
- La altura de descarga ($H_{descarga}$): es la distancia que hay entre el suelo hasta el punto donde la tubería de descarga abastece de agua.

Los resultados de las pruebas realizadas para diferentes condiciones se presentan a continuación. Para su análisis se consideran los siguientes aspectos:

- Evaluación del sistema de bombeo: de acuerdo a lo observado durante los ensayos el sistema funcionó de manera correcta, no presentando problemas mecánicos o hidráulicos.
- Resultados ensayos: se incluyen los resultados de laboratorio así como los costos de la estructura de soporte, de la bomba de ariete y de la mano de obra considerada.

1.2.1. Gráficas y tablas

A continuación se presentan las gráficas y tablas elaboradas en base a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio y pruebas relacionadas, así como los costos relacionados con la propuesta.

- Cálculo de caudal otorgado para altura de carga de 1,0 m y altura de descarga variable (entre 1,5 y 3,0 m).
 - o Caudal otorgado a 1,0 metro altura del tanque y 1,5 metros descarga.

Tabla IV. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 1,5 \text{ m}$)**

		Volumen: 1 litro				
Altura tonel 1,0 m	Altura descarga 1,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		61,89	61,9	62,28	62,66	62,56
		Caudal descarga l/s = volumen / tiempo				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,016158	0,016155	0,016057	0,015959	0,015985
		Caudal promedio				0,016 l/s
$\text{Error mediciones} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,01615 - 0,01595}{0,01615} * 100 = 1,24 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 1,0 metros altura del tanque y 2,0 metros descarga.

Tabla V. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,0 \text{ m}$)**

		Volumen: 1 litro				
Altura tonel 1,0 m	Altura descarga 2,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		91,3	92,5	92,5	92,5	93,0
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,010955	0,010812	0,010811	0,010811	0,010753
		Caudal promedio				0,010828 l/s
$\text{Error mediciones} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,01095 - 0,01075}{0,01095} * 100 = 1,82 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 1,0 metro altura del tanque y 2,5 metros descarga.

Tabla VI. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 1,0 m	Altura descarga 2,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		196,84	196,31	196,47	220,57	196,89
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0051	0,0051	0,0051	0,0045	0,0051
		Caudal promedio				0,0050 l/s
		Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0051 - 0,0045}{0,0051} * 100 = 11,76 > 2 \%$, no cumple				

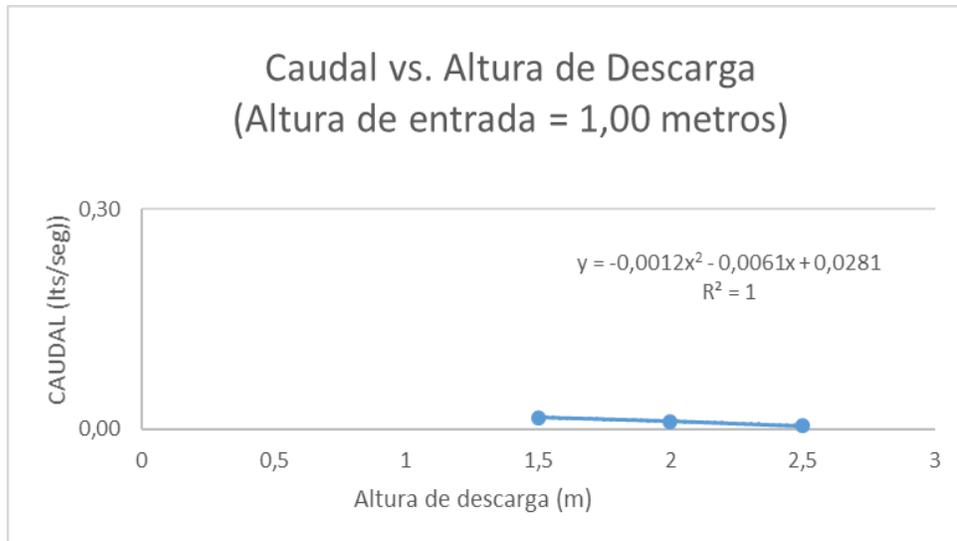
Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)**

Altura carga (m)	Altura descarga (m)	Valor caudal promedio (l/s)
$H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$	1,5	0,01600
	2,0	0.01083
	2,5	0,00500

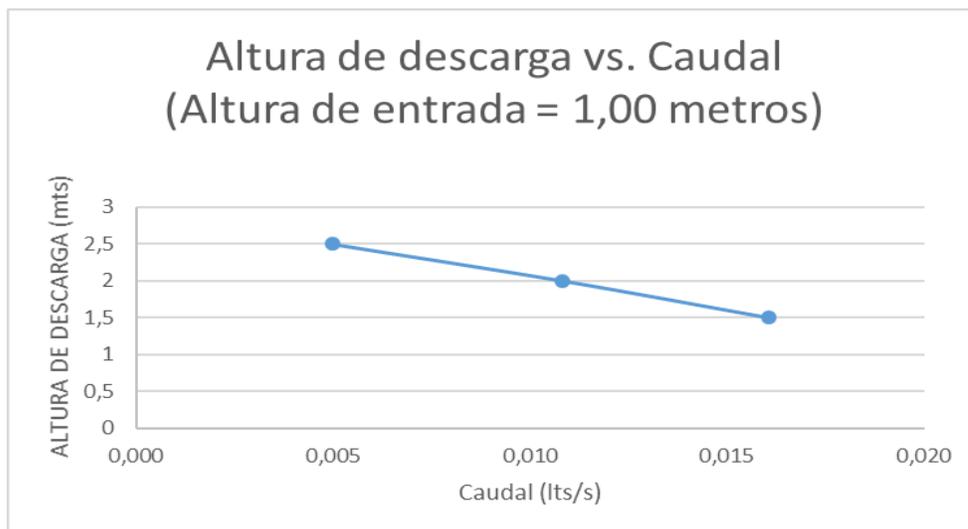
Fuente: elaboración propia.

Figura 28. **Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)**



Fuente: archivo personal.

Figura 29. **Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 1,0 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo de pérdidas en el sistema de acuerdo a las condiciones hidráulicas (altura del tanque 1,0 m); para esto se utilizaron manómetros colocados a la entrada de la bomba. El valor de la presión registrada 1,75 PSI., por lo que para pasarlo a metros columna de agua se utiliza la siguiente conversión:

Tabla VIII. **Resultados presión en manómetro, cálculo de pérdidas (altura del tanque 1,0 m)**

	$1,75 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 1,34 \text{ mca}$
--	---

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de caudal otorgado para valor de altura de carga 1,5 m y altura de descarga variable (entre 2,0 y 3,5 m).
 - o Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,0 metros descarga.

Tabla IX. **Resultados aforo caudal descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,0 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 1,5 m	Altura descarga 2,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		61,426	61,45	61,46	61,48	61,49
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0163	0,0163	0,0163	0,0163	0,0163
		Caudal promedio				0,0163 l/s
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0163 - 0,0162}{0,0163} * 100 = 0,61 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 2,5 metros descarga.

Tabla X. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 1,5 m	Altura descarga 2,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		72,54	73,188	73,44	73,596	73,698
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,01379	0,01366	0,01362	0,01359	0,01357
		Caudal promedio				0,01364 l/s
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,01379 - 0,01357}{0,01379} * 100 = 1,59 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XI. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro					
Altura tonel 1,5 m	Altura descarga 3,0 m	Tiempo de aforo (segundos)					
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
		78,92	79,24	79,68	79,78	79,81	
		Caudal descarga l/s					
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
		0,0127	0,0126	0,0126	0,0125	0,0125	
		Caudal promedio				0,0126 l/s	
		Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0127 - 0,0125}{0,0127} * 100 = 1,53 \leq 2 \%$ si cumple					

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 1,5 metros altura del tanque y 3,5 metros descarga.

Tabla XII. **Resultados aforo caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 1,5 m	Altura descarga 3,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		122,02	124,50	125,04	126,07	126,13
		Caudal descarga				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0082	0,0080	0,0080	0,0079	0,0079
		Caudal promedio				0,0080
$\text{Error mediciones} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0082 - 0,0079}{0,0082} * 100 = 3,65 > 2 \% \text{ no cumple}$						

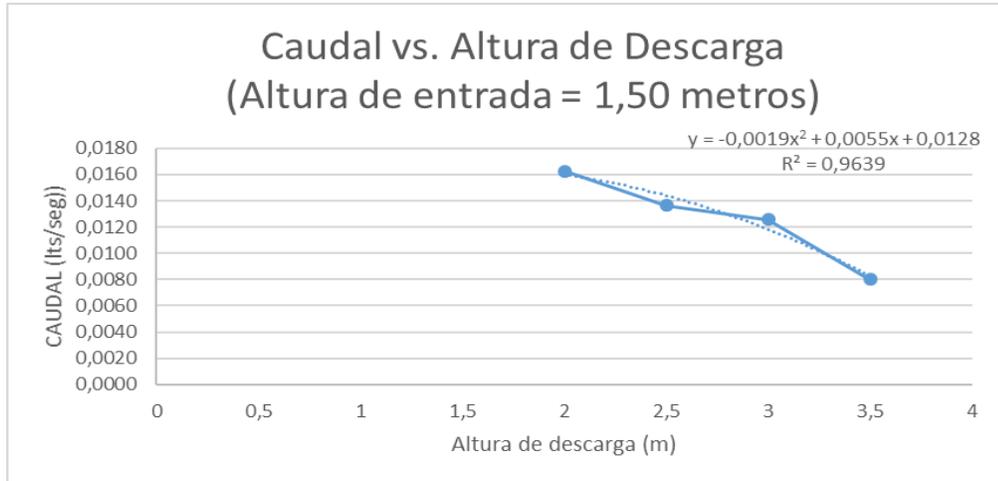
Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)**

Altura carga (m)	Altura descarga (m)	Valor caudal promedio (l/s)
$H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$	2,0	0,01630
	2,5	0,01364
	3,0	0,01260
	3,5	0,00080

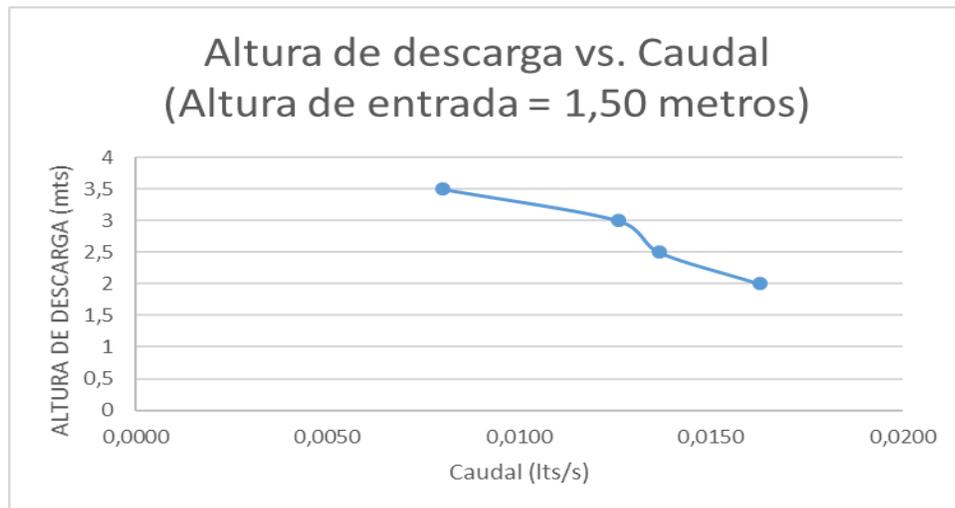
Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 31. **Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 1,5 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo de pérdidas en el sistema de acuerdo a las condiciones hidráulicas (altura del tanque 1,5 m); para esto se utilizaron manómetros colocados a la entrada de la bomba. El valor de la presión registrada 2,3 PSI., por lo que para pasarlo a metros columna de agua se utiliza la siguiente conversión:

Tabla XIV. **Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 1,5 m)**

	$2,3 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 1,62 \text{ mca}$
--	--

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de caudal otorgado para valor de altura de carga 2,0 m y altura de descarga variable (entre 2,5 y 3,5 m).
 - o Caudal otorgado a 2,0 metros altura del tanque y 2,5 metros descarga.

Tabla XV. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 2,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 2,0 m	Altura descarga 2,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		23,38	23,49	23,51	23,67	23,85
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0428	0,0426	0,0425	0,0422	0,0419
		Caudal promedio				
$\text{Error mediciones} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0428 - 0,0419}{0,0428} * 100 = 2,0 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 2,0 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XVI. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 2,0 m	Altura descarga 3,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		35,32	35,34	35,47	35,63	35,68
		Caudal descarga				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0283	0,0283	0,0282	0,0281	0,0280
		Caudal promedio				
$\text{Error mediciones} = \frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0283 - 0,0280}{0,0283} * 100 = 1,07 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 2,0 metros altura del tanque y 3,5 metros descarga.

Tabla XVII. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 2,0 m	Altura descarga 3,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		68,75	69,22	69,32	69,47	69,63
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0145	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144
		Caudal promedio				0,0144 l/s
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0145 - 0,0144}{0,0145} * 100 = 0,68 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

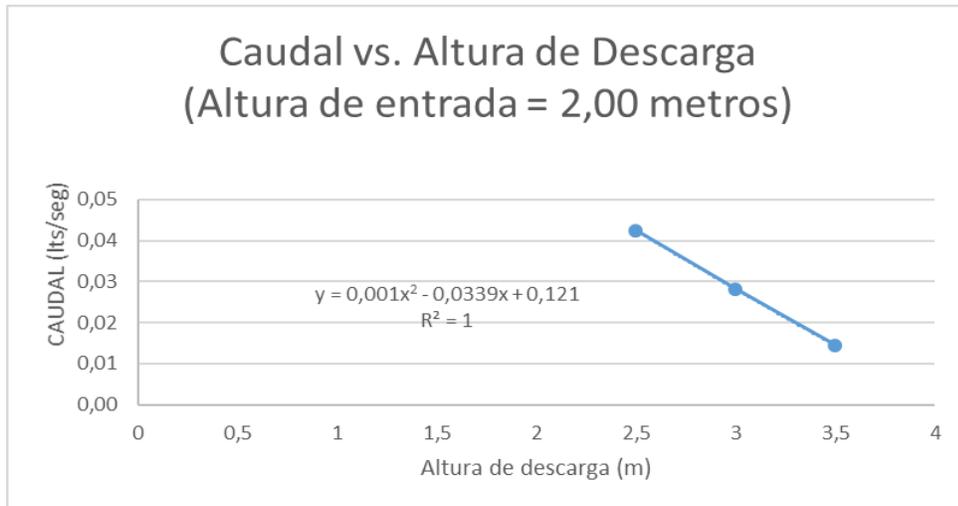
Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)**

Altura carga (m)	Altura descarga (m)	Valor caudal promedio (l/s)
$H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$	2,5	0,04240
	3,0	0,02820
	3,5	0,01440

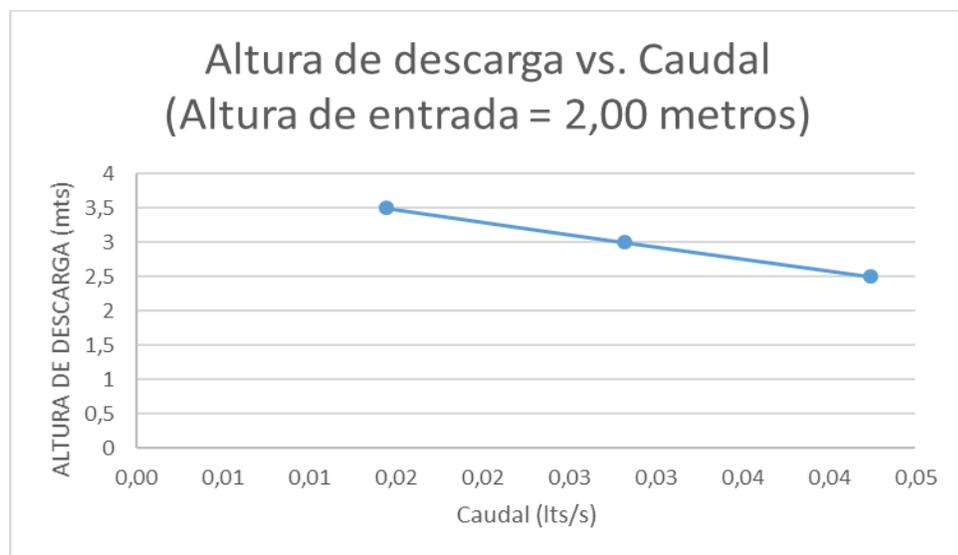
Fuente: elaboración propia.

Figura 32. **Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

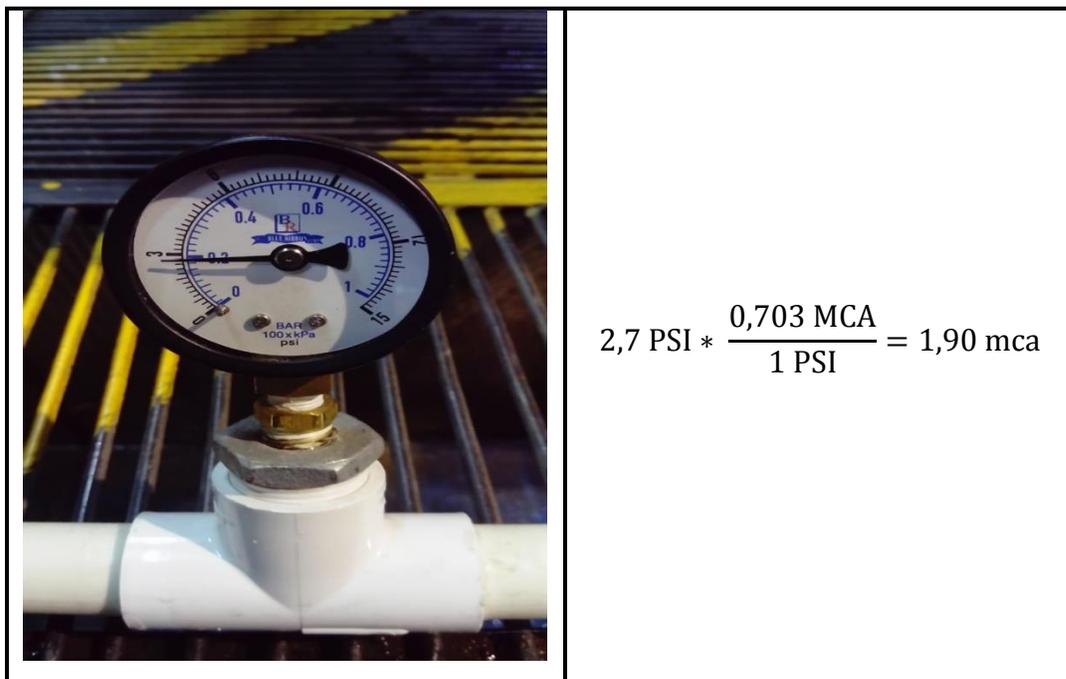
Figura 33. **Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 2,0 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo de pérdidas en el sistema de acuerdo a las condiciones hidráulicas (altura del tanque 2,0 m); para esto se utilizaron manómetros colocados a la entrada de la bomba. El valor de la presión registrada 2,7 PSI., por lo que para pasarlo a metros columna de agua se utiliza la siguiente conversión:

Tabla XIX. **Resultados presión en manómetro, cálculo de pérdidas (altura del tanque 2,0 m)**



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de caudal otorgado para valor de altura de carga 2,5 y altura de descarga variable (entre 2,0 y 3,5 m).
 - o Caudal otorgado a 2,5 metros altura del tanque y 3,0 metros descarga.

Tabla XX. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,0 \text{ m}$)**

		Volumen 2 litros				
Altura tonel 2,5 m	Altura descarga 3,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		48,75	48,93	49,29	49,44	49,63
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0410	0,0409	0,0406	0,0405	0,0403
		Caudal promedio				0,0406 l/s
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0410 - 0,0403}{0,0410} * 100 = 1,7 \leq 2 \%$ si cumple						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 2,5 metros altura del tanque y 3,5 metros descarga.

Tabla XXI. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)**

		Volumen 2 litros				
Altura tonel 2,5 m	Altura descarga 3,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		60,02	60,18	60,26	60,31	60,49
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0333	0,0332	0,0332	0,0332	0,0331
		Caudal promedio				0,0332 l/s
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0333 - 0,0331}{0,0333} * 100 = 0,60 \leq 2 \%$ si cumple						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 2,5 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.

Tabla XXII. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 4,0 \text{ m}$)**

		Volumen 2 litros				
Altura tonel 2,5 m	Altura descarga 4,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		78,45	79,37	81,4,5	82,05	82,08
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0255	0,0252	0,0246	0,0244	0,0244
		Caudal promedio				
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0255 - 0,0244}{0,0255} * 100 = 4,31 > 2 \% \text{ no cumple}$						

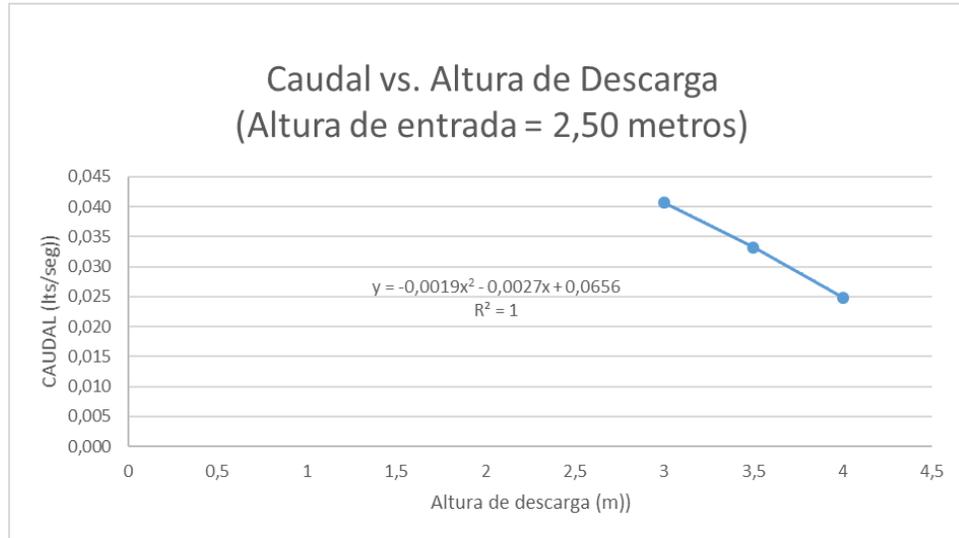
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXIII. **Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$)**

Altura carga (m)	Altura descarga (m)	Valor caudal promedio (l/s)
$H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$	3,0	0,04060
	3,5	0,03320
	4,0	0,02480

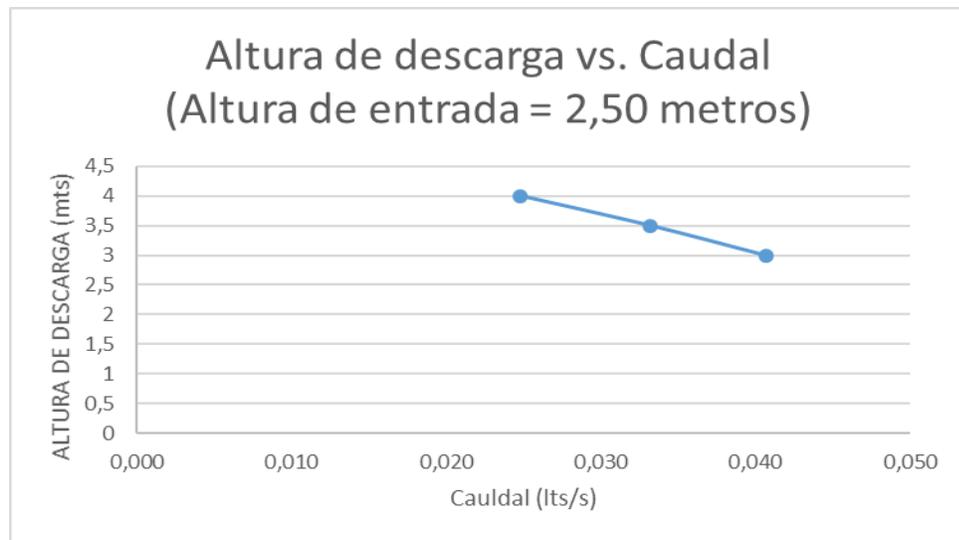
Fuente: elaboración propia.

Figura 34. **Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 2,5 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

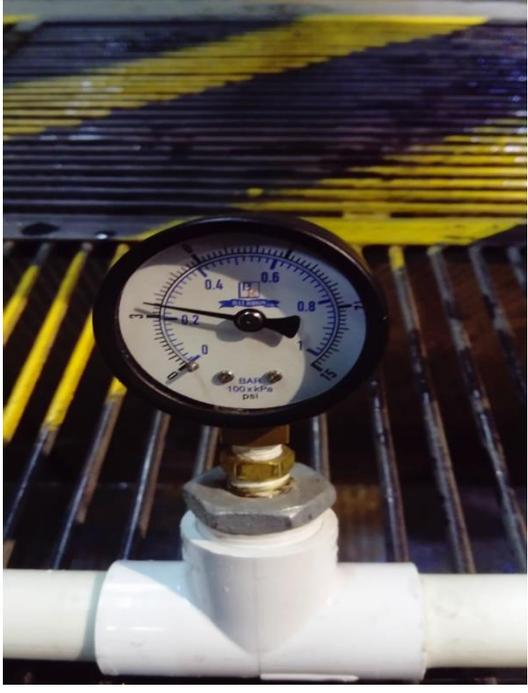
Figura 35. **Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 2,50 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo de pérdidas en el sistema de acuerdo a las condiciones hidráulicas (altura del tanque 2,5 m); para esto se utilizaron manómetros colocados a la entrada de la bomba. El valor de la presión registrada 3,25 PSI., por lo que para pasarlo a metros columna de agua se utiliza la siguiente conversión:

Tabla XXIV. **Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 2,5 m)**

	$3,5 \text{ PSI} * \frac{0,703 \text{ MCA}}{1 \text{ PSI}} = 2,46 \text{ mca}$
--	--

Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de caudal otorgado para valor de altura de carga 3,0 m y altura de descarga variable (entre 3,5 m y 4,0 m).
 - o Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 3,5 metros descarga.

Tabla XXV. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 3,5 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 3,0 m	Altura descarga 3,5 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		90,45	91,368	93,45	94,023	94,09
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0111	0,0109	0,0107	0,0106	0,0106
		Caudal promedio				
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0111 - 0,0106}{0,0111} * 100 = 4,50 > 2 \% \text{ no cumple}$						

Fuente: elaboración propia.

- o Caudal otorgado a 3,0 metros altura del tanque y 4,0 metros descarga.

Tabla XXVI. **Resultados aforos caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$, $H_{\text{desc}} = 4,0 \text{ m}$)**

		Volumen 1 litro				
Altura tonel 3,0 m	Altura descarga 4,0 m	Tiempo de aforo (segundos)				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		120,00	120,01	120,01	120,01	120,02
		Caudal descarga l/s				
		Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
		0,0083	0,0083	0,0083	0,0083	0,0083
		Caudal promedio				
Error mediciones = $\frac{Q_{\text{max}} - Q_{\text{min}}}{Q_{\text{max}}} * 100 = \frac{0,0083 - 0,0083}{0,0083} * 100 = 0 \leq 2 \% \text{ si cumple}$						

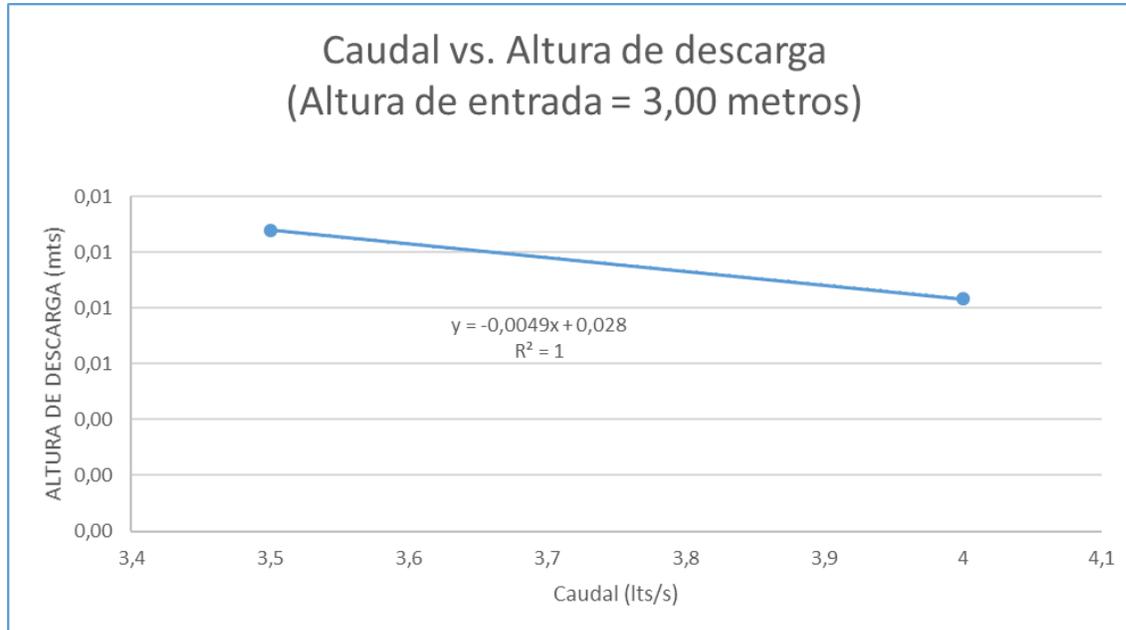
Fuente: elaboración propia.

Tabla XXVII. **Resumen resultados caudales descarga ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)**

Altura carga (m)	Altura descarga (m)	Valor caudal promedio (l/s)
$H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$	3,5	0,0108
	4,0	0,0083

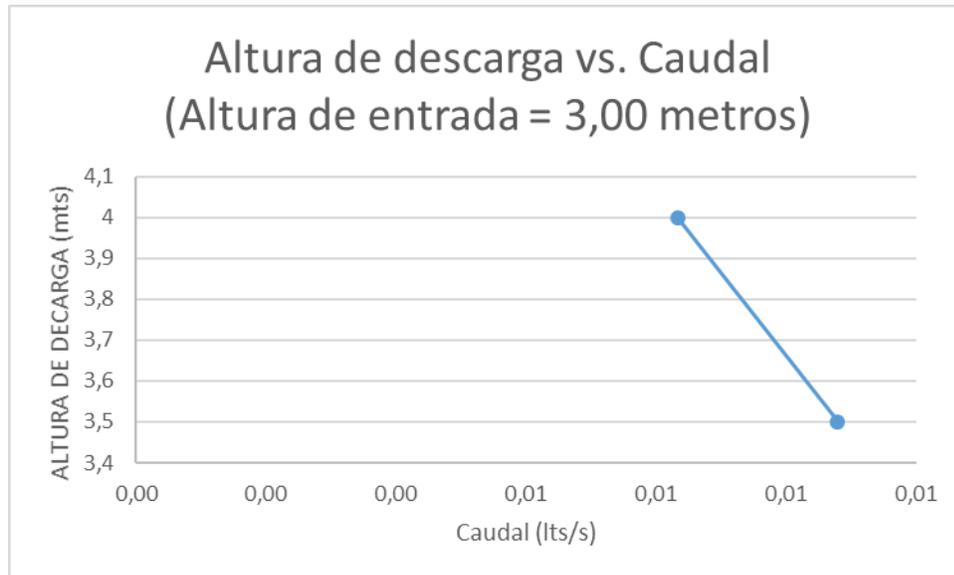
Fuente: elaboración propia.

Figura 36. **Gráfica caudal vs. Altura descarga ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

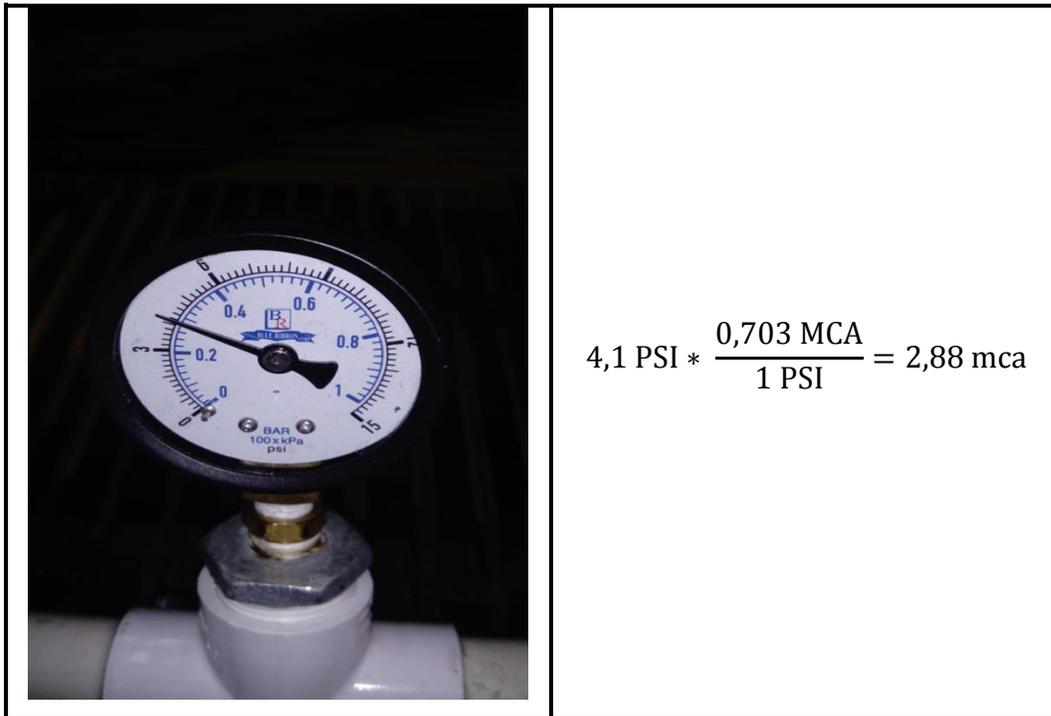
Figura 37. **Gráfica altura de descarga vs. Caudal ($H_{\text{carga}} = 3,0 \text{ m}$)**



Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo de pérdidas en el sistema de acuerdo a las condiciones hidráulicas (altura del tanque 3,0 m); para esto se utilizaron manómetros colocados a la entrada de la bomba. El valor de la presión registrada 4,1 PSI., por lo que para pasarlo a metros columna de agua se utiliza la siguiente conversión:

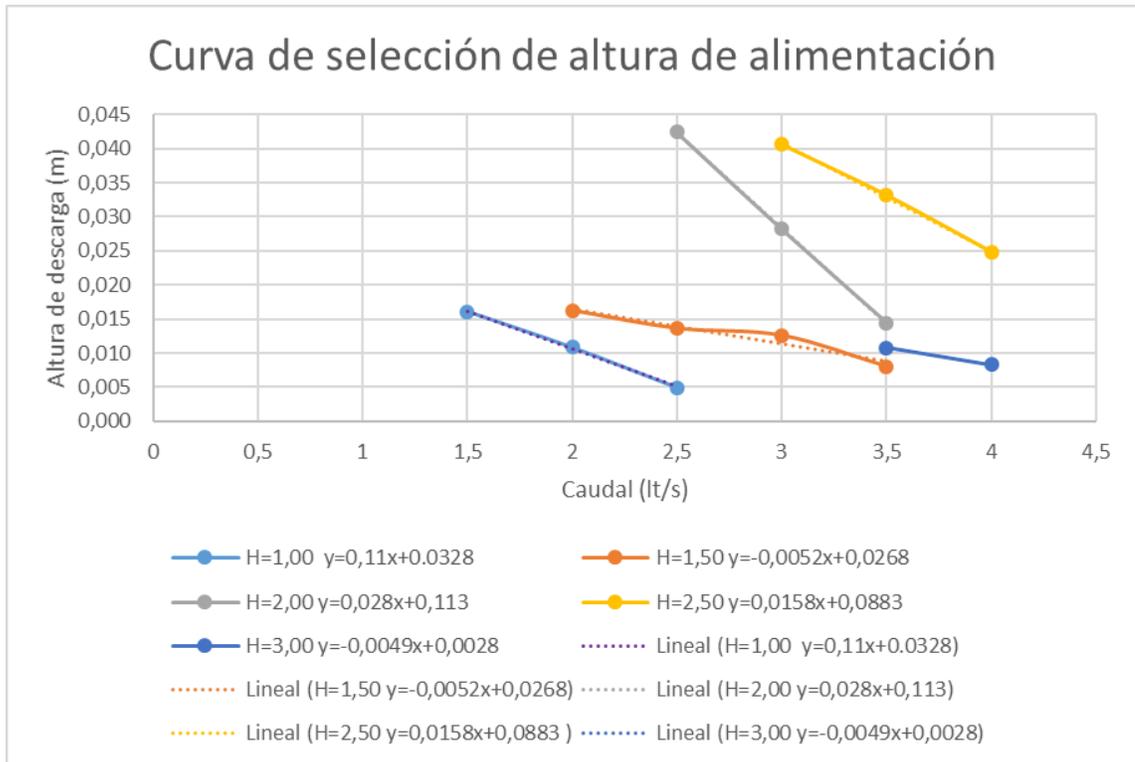
Tabla XXVIII. Resultados cálculo de pérdidas (altura del tanque 3,0 m)



Fuente: elaboración propia.

- Curva de selección de altura de alimentación para otorgar un caudal, de acuerdo con la siguiente gráfica.

Figura 38. Gráfica Curva de interpolación para selección de altura



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo Factor de fricción en manguera de descarga
 - o Tiempo de aforo y caudales otorgados válvula abierta 3 vueltas.

Tabla XXIX. **Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 3 vueltas**

		Volumen 1 litro				
Tiempos tomados para pérdidas	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 en pérdidas	Caudal otorgado (lt/s)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
	0,08340	0,082509	0,08333	0,08341	0,08197	
	Caudal promedio				0,083 lt/s	

Fuente: elaboración propia.

- o Tiempo de aforo y caudales otorgados válvula abierta 2,5 vueltas.

Tabla XXX. **Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 2,5 vueltas**

		Volumen 1 litro				
Tiempos tomados para pérdidas	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 en pérdidas	Caudal otorgado (lt/s)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
	0,07599	0,07605	0,07745	0,07675	0,07722	
	Caudal promedio				0,077 lt/s	

Fuente: elaboración propia.

- o Tiempo de aforo y caudales otorgados válvula abierta 2 vueltas.

Tabla XXXI. **Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 2 vueltas**

		Volumen 1 litro				
Tiempos tomados para pérdidas	Tiempo de aforo (segundos)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
Válvula abierta 2,5 vueltas	13,87	13,94	13,72	13,84	13,69	
Caudales otorgados en pérdidas	Caudal otorgado (lt/s)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
	0,07210	0,07174	0,07288	0,07225	0,07304	
	Caudal promedio				0,072 lt/s	

Fuente: elaboración propia.

- o Tiempo de aforo y caudales otorgados válvula abierta 1,5 vueltas.

Tabla XXXII. **Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 1,5 vueltas**

		Volumen 1 litro				
Tiempos tomados para pérdidas	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 en pérdidas	Caudal otorgado (lt/s)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
	0,070422	0,07013	0,07052	0,06993	0,07008	
	Caudal promedio				0,070 lt/s	

Fuente: elaboración propia.

- o Tiempo de aforo y caudales otorgados válvula abierta 1 vuelta.

Tabla XXXIII. **Resultados cálculo de pérdidas, válvula abierta 1 vuelta**

		Volumen 1 litro				
Tiempos tomados para pérdidas	Tiempo de aforo (segundos)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
Válvula abierta 1 vuelta	24,37	24,22	24,3	24,37	24,37	
Caudales otorgados en pérdidas	Caudal otorgado (lt/s)					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5	
	0,041034	0,04129	0,04112	0,04103	0,04103	
	Caudal promedio				0,041 lt/s	

Fuente: elaboración propia.

- o Cálculo factor de fricción para manguera de descarga (2 metros)

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

Donde

H_f = diferencia de altura piezométrica (m)

Φ = diámetro manguera (1,3 cm)

L = longitud manguera (2,0 m)

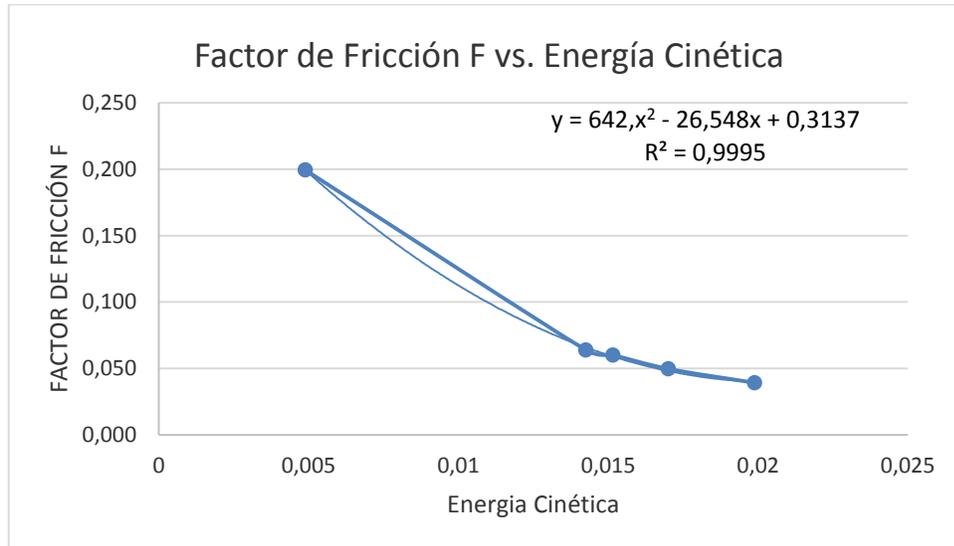
K = energía cinética

Tabla XXXIV. Resumen resultados cálculo factor de fricción

Condiciones de operación	Caudal (lt/s)	Velocidad (m/s)	Energía Cinética (m)	Pérdida (m)	Factor de fricción F
Válvula abierta 3,5 vueltas	0,083	0,6247	0,0199	0,12	0,0392
válvula abierta 3,0 vueltas	0,077	0,5778	0,0170	0,13	0,0497
válvula abierta 2,5 vueltas	0,072	0,5455	0,0152	0,14	0,0600
válvula abierta 2,0 vueltas	0,070	0,5290	0,0142	0,14	0,0638
Válvula abierta 1,0 vuelta	0,041	0,3097	0,0049	0,15	0,1994

Fuente: elaboración propia.

Figura 39. Gráfica factor de fricción vs. Energía cinética



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de pérdida de fricción F para la tubería de descarga: se necesita conocer el valor de 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.

$$f = hf * \frac{D}{L} * \frac{2g}{v^2} \quad \text{Ecuación de Darcy-Weisbach}$$

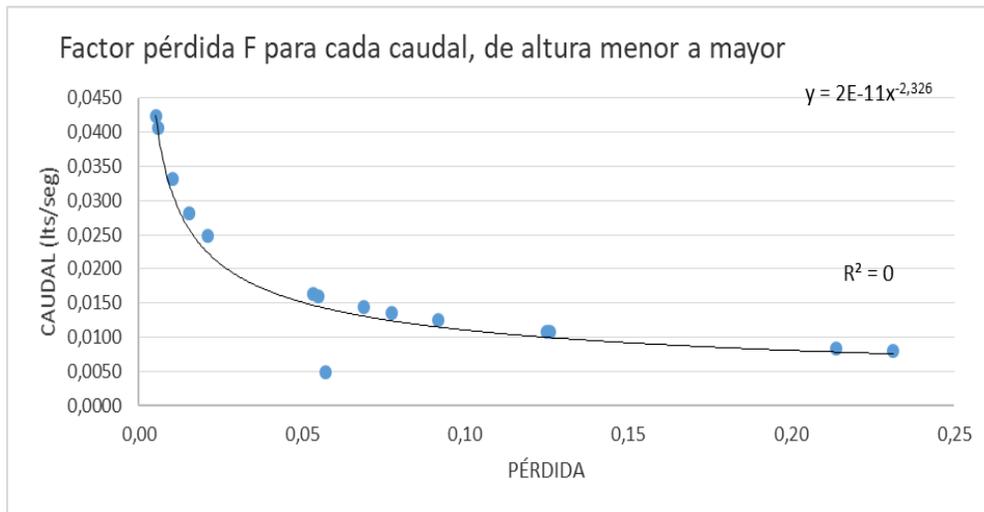
Tabla XXXV. **Resumen de factores de fricción para cada caudal real**

Velocidades	Lts/s	Energía K	Caudales (m ³ /s)	Factor Fricción
0,1210152	0,0161	0,0007464	0,00001606	0,05
0,0815801	0,0108	0,0003392	0,00001083	0,13
0,0374841	0,0050	0,0000716	0,00000498	0,06
0,1225896	0,0163	0,0007660	0,00001627	0,05
0,1027965	0,0136	0,0005386	0,00001364	0,08
0,0947873	0,0126	0,0004579	0,00001258	0,09
0,0604009	0,0080	0,0001859	0,00000802	0,23
0,3195625	0,0424	0,0052049	0,00004242	0,01
0,2122997	0,0282	0,0022972	0,00002818	0,02
0,1087530	0,0144	0,0006028	0,00001444	0,07
0,3062221	0,0406	0,0047794	0,00004065	0,01
0,2500734	0,0332	0,0031874	0,00003319	0,01
0,1868269	0,0248	0,0017790	0,00002480	0,02
0,0813145	0,0108	0,0003370	0,00001079	0,13
0,0627794	0,0083	0,0002009	0,00000833	0,21

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de la tabla anterior, se observa que a mayor velocidad del agua menos pérdidas en el sistema.

Figura 40. **Gráfica caudal vs. pérdida de fricción**



Fuente: elaboración propia.

- Presión a la entrada y salida de la bomba: para determinar estos parámetros es necesario utilizar el teorema de Bernoulli, de la siguiente manera:

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

De acuerdo a las condiciones del sistema, se cancelan las energías cinéticas ya que el diámetro es el mismo y el valor de P2 por estar expuesto a la atmósfera. Realizando el cálculo con la ecuación de Hazen-Williams, queda:

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

Donde

Hf = diferencia de altura piezométrica (m)

Φ = diámetro tubería descarga (cm)

L = longitud tubería (m)

c = constante de rugosidad (PVC = 150)

Q = caudal descarga bomba (m³/s)

o Presión a la entrada y salida de la bomba. Altura de carga 1,0 m.

Tabla XXXVI. **Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (1 m)**

Altura de descarga (m)	Descarga vs. alimentación (m)	Pérdida energía salida (m)	Pérdida energía entrada (m)	K sistema (m)	Presión entrada Kpa	Presión salida Kpa	Diferencia de presión	% aumento
1,5	1,5	0,04414	0,00101	0,00075	9,38556	12,20498	2,81941	23,10052
2,0	2,0	0,04572	0,00049	0,00034	9,52578	17,12547	7,59969	44,37654
2,5	2,5	0,00442	0,00012	0,00007	9,68046	21,62537	11,94489	55,23559

Fuente: elaboración propia.

- o Presión a la entrada y salida de la bomba. Altura de carga 1,5 m.

Tabla XXXVII. **Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (1,5 m)**

Altura de descarga (m)	Descarga vs. alimentación (m)	Pérdida energía salida (m)	Pérdida energía entrada (m)	K sistema (m)	Presión entrada Kpa	Presión salida Kpa	Diferencia de presión	% aumento
1,5	1,33	0,04406	0,00113	0,00077	14,28413	17,10924	2,82512	16,51222
2,0	1,67	0,04494	0,00080	0,00054	14,35497	22,02284	7,66787	34,81782
2,5	2,00	0,04525	0,00070	0,00046	14,38351	26,93092	12,54741	46,59110

Fuente: elaboración propia.

- o Presión a la entrada y salida de la bomba. Altura de carga 2,0 m.

Tabla XXXVIII. **Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (2,0 m)**

Altura de descarga (m)	Descarga vs. alimentación (m)	Pérdida energía salida (m)	Pérdida energía entrada (m)	K sistema (m)	Presión entrada Kpa	Presión salida Kpa	Diferencia de presión	% aumento
3,0	1,25	0,028934	0,00705	0,00521	18,45616	21,86590	3,40974	15,59389
3,5	1,50	0,038416	0,00331	0,00230	18,86031	26,86386	8,00355	29,79301
4,0	1,75	0,044690	0,00096	0,00068	19,23806	31,83040	12,59235	39,56076

Fuente: elaboración propia.

- o Presión a la entrada y salida de la bomba. Altura de carga 2,5 m.

Tabla XXXIX. Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (2,5 m)

Altura de descarga (m)	Descarga vs. alimentación (m)	Pérdida energía salida (m)	Pérdida energía entrada (m)	K sistema (m)	Presión entrada Kpa	Presión salida Kpa	Diferencia de presión	% aumento
3,0	1,20	0,03022	0,00697	0,004780	23,40773	26,78350	3,375777	12,60394
3,5	1,40	0,03535	0,00480	0,003188	23,62142	31,73870	8,117288	25,57535
4,0	1,60	0,04028	0,00280	0,001780	23,85765	36,69210	12,83446	34,97880

Fuente: elaboración propia.

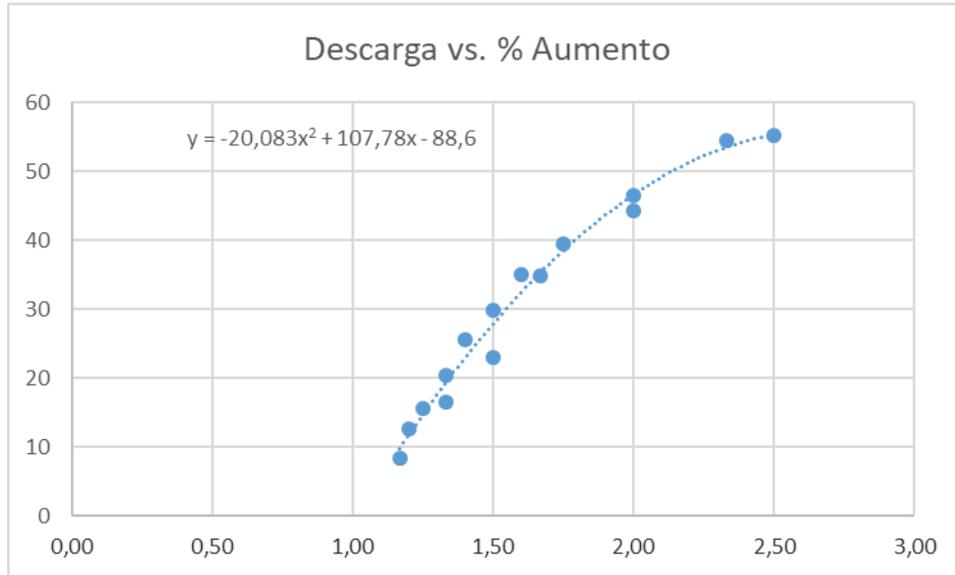
- o Presión a la entrada y salida de la bomba. Altura de carga 3,0 m.

Tabla XL. Resultados cálculo de presión a la salida de la bomba por teorema de Bernoulli (3,0 m)

Altura de descarga (m)	Descarga vs. alimentación (m)	Pérdida energía salida (m)	Pérdida energía entrada (m)	K sistema (m)	Presión entrada Kpa	Presión salida Kpa	Diferencia de presión	% aumento
3,0	1,17	0,04572	0,000640	0,00034	29,14521	31,84056	2,69534	8,46512
3,5	1,33	0,04626	0,00040	0,00020	29,21108	36,75081	7,53972	20,51560

Fuente: elaboración propia.

Figura 41. **Gráfica aumento de presión vs. Relación descarga-carga**



Fuente: elaboración propia.

- Cálculo de constante K del resorte: para esto se utilizaron diferentes masas estándar (0,0025, 0,007 y 1,0 kg), midiendo en cada caso la elongación del resorte, luego se calculó la pendiente y al final el valor de la constante K del resorte.

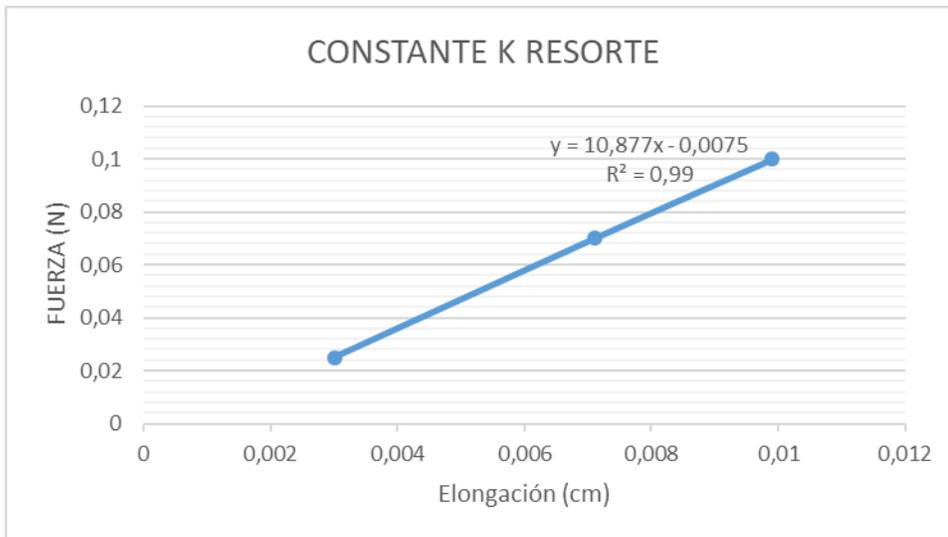
Tabla XLI. **Resultados cálculo constante K del resorte**

Medidas	Masa (kg)	Fuerza peso (N)	L (m)	$\Delta X = L - L_0$
1	0,0025	0,0025	0,0400	0,0030
2	0,0070	0,0070	0,0550	0,0071
3	0,1000	0,1000	0,0689	0,0099

Fuente: elaboración propia.

Con estos valores se elaboró la gráfica Fuerza vs. Elongación, siendo el valor de la pendiente del gráfico, la constante K del resorte.

Figura 42. **Gráfica determinación constante K del resorte**



Fuente: elaboración propia.

- Costos bomba de ariete $\frac{3}{4}$ " : a continuación se presentan los presupuestos de materiales para la construcción de la estructura metálica para soportar el depósito a distintas alturas y de la bomba de ariete. Para integrar el costo de la bomba de ariete se consideraron el precio de cada pieza, accesorios y niples que la forman, estos pueden variar dependiendo del lugar donde se instale o de los precios que manejen las ferreterías del lugar, además el costo de la mano de obra.

El costo de la mano de obra, incluye el tiempo que una persona invierte en el proceso constructivo de la bomba de ariete (comprar los materiales, construir las piezas y la instalación del sistema), es de aproximadamente cuatro días (Q 75,00 por día).

Tabla XLII. **Presupuesto materiales de estructura metálica para soportar el depósito a distintas alturas. Bomba de ariete con tubería de ¾"**

Cantidad	Descripción	Tipo material	Precio Unitario (Q)	Total (Q)
1	Estructural metálica, altura 4 metros.	Acero	1 600,00	1 600,00
1	Tonel	Plástico	50,00	50,00
3	Codos de 1 ½"	PVC	7,00	21,00
2	Tubos de 1 ½"	PVC	120,00	240,00
6	Adaptadores macho de 1 ½"	PVC	15,00	90,00
6	Adaptadores hembra de 1 ½"	PVC	15,00	90,00
2	Adaptadores de 1" universales	PVC	43,00	86,00
1	Adaptador de 1 ½" universal	PVC	45,00	45,00
1	Manguera de ½ de 10metros	PVC	100,00	100,00
2	Mangueras transparentes 1"	Plástico	60,00	60,00
1	Cinta de teflón de ¾"	Teflón	6,00	6,00
1	Cemento para PVC 25 mm Tangit		15,00	15,00
1	Silicón para PVC	Silicón	40,00	40,00
1	Diésel	Diésel	200,00	200,00
			Total	2 301,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIII. Presupuesto materiales Bomba de ariete tubería de ¾"

Cantidad	Descripción	Material	Precio Unitario (Q)	Total (Q)
2	Cemento para PVC de 25 ml	Pegamento	15,00	15,00
1	Envase plástico de 2 lt	Plástico	10,00	10,00
1	Reductor campana galvanizada de 1" a ¾"	Hierro galvanizado	14,00	14,00
3	Niple PVC de ¾"	PVC	8,00	8,00
2	Adaptador PVC ¾"	PVC	1,50	3,00
1	Válvula de Pie de ¾" inoxidable	Inox	45,00	45,00
4	T PVC ¾" Rosca	PVC	7,00	28,00
3	Adaptador PVC macho ¾"	PVC	1,50	4,50
2	Reductor <i>Bushing</i> Galvanizado	Hierro galvanizado	10,00	20,00
2	Válvula de Bola PVC ¾"	PVC	30,00	60,00
2	Cinta de Teflón de ¾"	Teflón	6,00	12,00
1	Válvula de Pie de ¾" hierro colado	Hierro colado	23,00	23,00
1	Válvula de Pie de ¾" acero inoxidable	Inox	250,00	250,00
1	Resortes de compresión P23/32	Inox	25,00	25,00
1	Resorte de Compresión P 7/16x2	Inox	20,00	20,00
1	Resorte Compresión	Acero	40,00	40,00
1	1 metro de tubo PVC ¾"	PVC	4,00	4,00
1	Adaptador de PVC de ¾" a 1"	PVC	5,00	5,00
1	Adaptador de PVC de 1" a 1 ½"	PVC	10,00	10,00
1	Acople Rápido de Rosca de 1 ½"	PVC	45,00	45,00
2	Manómetros de 15 psi	Plásticos	100,00	200,00
1	Reductor <i>bushing</i> PVC Liso 1	PVC	5,00	5,00
1	Reductor <i>bushing</i> PVC liso 1 ½"	PVC	8,00	8,00
1	Acople PVC DE 1 ½"	PVC	4,00	4,00
1	Diésel	Diésel	200,00	200,00
	Total			1 089,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XLIV. **Integración de costos sistema de bomba de ariete**

Renglón	Valor (Q)
Costo materiales estructura metálica soporte.	2,301.00
Costo materiales bomba de ariete	1,089.50
Costo mano de obra	300,00
Costo total	3 690,50

Fuente: elaboración propia.

4.3.1. Descripción y análisis de resultados

Al finalizar la toma de datos en laboratorio se procedió a la tabulación y análisis de resultados, las conclusiones y recomendaciones se basan en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos.

- **Diseño y fabricación:** en el diseño de la bomba de ariete es fundamental la aplicación de conocimientos de mecánica de fluidos, hidráulica, diseño de elementos mecánicos, procesos de manufactura, entre otros. Si el ariete está bien diseñado, construido e instalado el mantenimiento necesario será mínimo.

Las bombas de ariete pueden competir con bombas que utilizan energía no renovable, que si bien no son automáticas, requieren electricidad para funcionar; su uso permite un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos.

- Aforos: para esta actividad se usó un cronómetro y recipientes de 1 y 2, los aforos varían según la altura a que esté colocado el depósito y el punto de descarga. Los resultados de los aforos permitieron calcular caudales de carga y descarga así como valores de pérdidas en el sistema.
- Medición de presión por medio de manómetros: se colocaron en la tubería de descarga, indican la presión con la que el fluido se transporta. Los resultados de las medidas de presión permitieron conocer la presión que se manejaba en el sistema así como calcular valores de pérdidas en el sistema.
- Determinación de pérdidas en el sistema: de acuerdo a la altura de carga y el punto de descarga en cada caso. En la práctica se debe buscar que los materiales para las tuberías de impulsión y descarga, sean lo más lisos posibles para evitar pérdidas de carga.
 - o Pérdidas mayores: las pérdidas de carga a lo largo de la sección de tubería se calcularon mediante la ecuación de Darcy-Weisbach.
 - o Pérdidas menores: los componentes adicionales de la tubería de alimentación como codos, válvulas, niples, entre otros, contribuyen a la pérdida de presión en el sistema.
- Pruebas para diferentes valores de altura de carga constante (1,05, 1,5, 2,0, 2,5 y 3,0 m) y altura de descarga variable (entre 1,5 y 4,0 m). Durante el desarrollo de las pruebas, es necesario controlar el

funcionamiento de todo el sistema para evitar que se presenten inconvenientes.

- o De las pruebas realizadas se generan las gráficas necesarias para describir y analizar el comportamiento general de la bomba de ariete construida.
- o Hay una relación directa entre la altura de carga y la eficiencia de la bomba, ya que a mayor altura se dispondrá de mayor energía potencial de entrada, la cual se convertirá en energía cinética y así influir notoriamente en el caudal de descarga.
- o El rendimiento en cuanto a caudal de carga disminuye a medida que las alturas de descarga aumentan.
- o De acuerdo con los resultados la velocidad del flujo influye inversamente proporcional en las pérdidas que se produzcan en el sistema (a mayor velocidad menos pérdidas).

CONCLUSIONES

1. Durante el trabajo realizado se pudo estudiar el funcionamiento de una bomba de ariete con tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada, de acuerdo a los criterios de diseño considerados.
2. El procedimiento adecuado para construir un ariete hidráulico eficiente en el abastecimiento de agua, varía de acuerdo al diseño; el cual ha de considerar las condiciones hídricas y topográficas del lugar donde se desee instalar.
3. El funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de $\frac{3}{4}$ de 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 alimentación de 2,5 y un caudal de 0,0050 lts/s.
 - Para una altura de abastecimiento de 1,5 metros la altura máxima de descarga obtenida es 2,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 2,0 y un caudal de 0,00080 lts/s.
 - Para una altura de abastecimiento de dos metros la altura máxima de descarga obtenida es 3,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 1,50 y un caudal de 0,01440 lts/s.

- Para una altura de abastecimiento de 2,5 metros la altura máxima de descarga obtenida es 4,0 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 1,60 y un caudal de 0,0248 lts/s.
 - Para una altura de abastecimiento de tres metros la altura máxima de descarga obtenida es 3,5 metros, obteniendo una relación de descarga vs abastecimiento de 1,33 y un caudal de 0,0083 lts/s.
4. 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 0,04240 lts/s esto puede observarse en la tabla XVIII, mismo que se obtuvo a una altura de alimentación de 2,0 metros y una altura de descarga de 2,5 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 gráfica la gráfica de envolvente.
 5. La bomba de ariete hidráulico artesanal con diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada otorga un promedio de 45,35 % de aumento de energía de presión lo que la hace una herramienta para el bombeo de agua viable.
 6. 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.

7. El costo total de la bomba de ariete de $\frac{3}{4}$ de pulgada, puede variar debido a los precios de las piezas que manejen en las ferreterías; para este trabajo el costo asociado a la fabricación asciende a un total de Q 3 690,00.
8. Hay una relación directa entre la altura de carga y la eficiencia de la bomba, ya que a mayor altura se dispondrá de mayor energía potencial de entrada, la cual se convertirá en energía cinética y así influir notoriamente en el caudal descarga.
9. El uso de la bomba de ariete no genera gastos directos de operación y mantenimiento, siendo esta una herramienta autosuficiente que generará disminución de costos y consumos de agua.

RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios que reemplacen la tubería de alimentación y descarga de PVC por acero para analizar el efecto del material en las condiciones operacionales del sistema de bombeo.
2. Se deben realizar distintas inspecciones de mantenimiento para las piezas de HG que pasan en contacto con el agua para evitar fugas por óxido.
3. Se debe de tener un espacio amplio, estable y sin objetos que interrumpan el funcionamiento de la bomba, de al menos de un metro cuadrado libre para colocar dicha bomba de ariete hidráulico artesanal.
4. A los profesores de la Escuela de Ingeniería Civil, utilizar el documento como referencia para estudiantes y profesionales interesados en el tema.
5. Impulsar la difusión de las ventajas que proporciona la tecnología apropiada, para dar soluciones económicas a problemas relacionados con el saneamiento y el abastecimiento de agua potable.
6. 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.

7. Durante los ensayos se reconocieron dos tipos de marchas de golpes para la válvula de pie, siendo rápidos cuando se desea bombear agua a menor altura y siendo lentos y pausados cuando se necesita bombear el agua a una mayor altura.

8. Para un mejor aprovechamiento del desperdicio de la bomba de ariete hidráulico colocarla en un jardín para que dicho desperdicio tenga un mejor uso, o bien tener la bomba en un río donde dicho desperdicio retorne al mismo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Agua y empleo. UNESCO. *Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016*. 164. p.
2. Asociación Mundial para el Agua. 2015. p. 47. *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica. Guatemala*.
3. Gobierno de la República de Guatemala. Secretaria de Planificación y Programación de la Presidencia. Banco Internacional de Desarrollo. Estrategia para la Gestión de Los Recursos Hídricos de Guatemala. Diagnóstico. Guatemala, noviembre 2006. 104. p.
4. Edwin Huffman. <http://www.bancomundial.org/es/results/2013/04/15/water-resources-management-results-profile>. Consulta: octubre 2017
5. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. México. Septiembre de 2015. p. 105. *Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura*.
6. Instituto Nacional de Estadística. Sección de Estadística Ambientales. Guatemala. 2015. p. 175. *Compendio Estadístico Ambiental de Guatemala, 2015*.

7. MIJANGOS RIVAS, José María. *Diseño, instalación, energización y puesta en operación de equipo electromecánico, aplicando equipo submarino, en pozos profundos. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica. Guatemala. 2014. 175. p.*

8. RENGIFO HINCAPIÈ, Sebastián y GALLEGO CADENA, Juan Daniel. *Diseño y Construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Pereira. 2016. 75. p.*

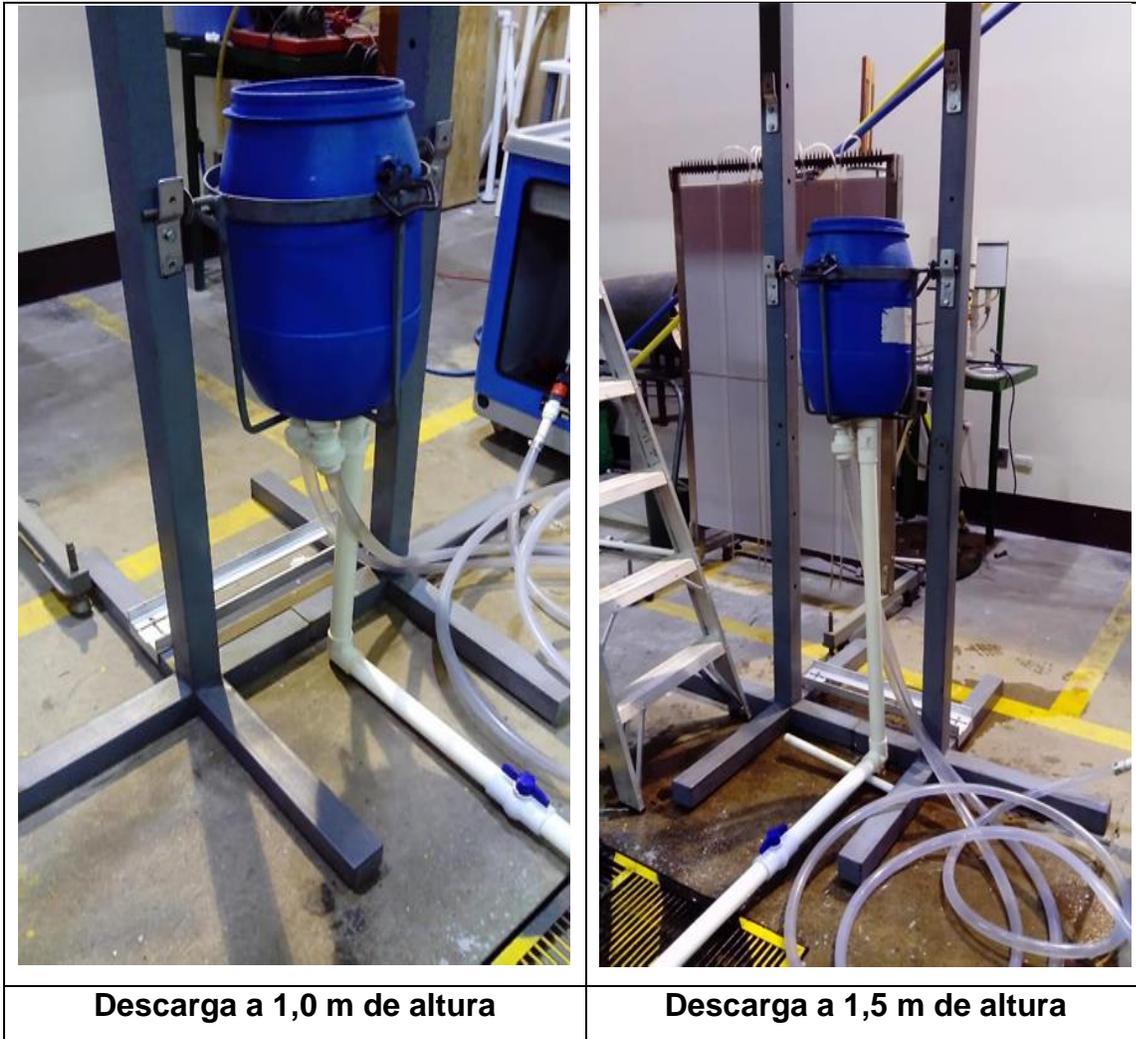
APÉNDICES

Apéndice 1. Archivo fotográfico trabajo de laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Archivo fotográfico trabajo de laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Archivo fotográfico trabajo de laboratorio



Descarga a 2,0 m de altura



Descarga a 2,5 m de altura

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Archivo fotográfico trabajo de laboratorio**



Fuente: elaboración propia.