

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA:
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de INGENIERO MECÁNICO

TEMA:
ANÁLISIS PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE UNA BOMBA
DE ARIETE HASTA UNA ALTURA DE 50 METROS

AUTORES:
LENIN EDUARDO PILCO MORA
DANIEL ANDRÉS SANDOVAL FERNÁNDEZ

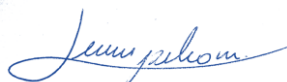
TUTOR:
SIXTO ORLANDO PINEDA PINTO

Quito, enero del 2017

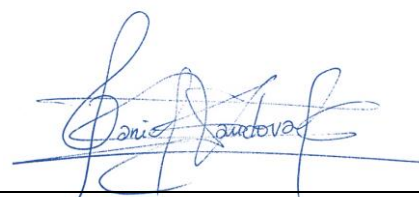
Cesión de derechos de autor

Nosotros, Lenin Eduardo Pilco Mora con Cédula de Identidad N° 1722526231 y Daniel Andrés Sandoval Fernández con Cédula de Identidad N° 172557729 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación: ANÁLISIS PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE UNA BOMBA DE ARIETE HASTA UNA ALTURA DE 50 METROS, mismo que ha sido desarrollado para optar por el Título de INGENIERO MECÁNICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Lenin Eduardo Pilco Mora
C.I 1722526231



Daniel Andrés Sandoval Fernández
C.I 1725157729

Quito, enero 2017

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación ANÁLISIS PARA EL INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE UNA BOMBA DE ARIETE HASTA UNA ALTURA DE 50 METROS realizado por Lenin Eduardo Pilco Mora y Daniel Andrés Sandoval Fernández, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como Trabajo Final de Titulación.

Quito, enero 2017



Ing. Sixto Orlando Pineda Pinto
CI: 1711029429

DEDICATORIA

Este Trabajo de Titulación está dedicado a mis padres Juan Sandoval Muñoz y María Elena Fernández y a mi hermano Juan Víctor Sandoval, quienes me han apoyado a lo largo de mi carrera universitaria, dándome ánimos y fuerza.

Daniel Sandoval Fernández

He llegado tan lejos gracias al apoyo incondicional de mi familia y de mis amigos, quienes me ayudaron a no rendirme en el camino

Lenin Pilco Mora

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica Salesiana por las enseñanzas brindadas a lo largo de mi carrera profesional, a los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica por impartir sus conocimientos y experiencias en clase; en especial al Ingeniero Orlando Pineda porque gracias a sus consejos y sugerencias hemos logrado culminar con este Proyecto de Titulación.

Daniel Sandoval Fernández

Agradezco infinitamente a nuestro tutor, el Ingeniero Orlando Pineda, quien fue una guía en el transcurso del desarrollo de este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana por respaldar nuestro trabajo y a nuestros docentes que con sus palabras nos guiaron durante el transcurso de nuestra formación académica.

Lenin Pilco Mora

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO 1	20
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1. Introducción.....	20
1.2. Justificación.....	20
1.2.1. Estado del arte	20
1.3. Energía hidráulica.....	20
1.4. Bomba	21
1.4.1. Eficiencia mecánica de una bomba	22
1.5. Bomba de ariete.....	22
1.6. Golpe de ariete (choque hidráulico)	23
1.7. Partes de la bomba de ariete	24
1.7.1. Cuerpo del ariete	24
1.7.2. Cámara de aire.....	25
1.7.3. Válvula de impulso	25
1.7.4. Válvula de entrega.....	26
1.8. Funcionamiento	26
1.8.1. Caudal de suministro.....	27
1.8.2. Línea de succión.....	27
1.8.3. Línea de descarga.....	27
1.9. Condiciones iniciales de operación	28
1.9.1. Altura de suministro.....	28
1.9.2. Altura de entrega	29
1.10. Estudios relacionados	29

1.10.1.	Development Technology Unit (DTU)	29
1.10.2.	Diseño y construcción de un ariete hidráulico Escuela Politécnica Nacional (EPN) 2011	30
1.10.3.	Diseño, dimensionamiento, construcción y mantenimiento de un sistema alimentado por gravedad en áreas rurales, sistemas de ariete hidráulico Action contre la Faim (ACF)	30
1.10.4.	Bomba de ariete hidráulico para riego en el norte de Tailandia.....	33
CAPÍTULO 2		34
2.	CÁLCULOS.....	34
2.1.	Introducción.....	34
2.2.	Condiciones geográficas de la instalación.....	34
2.3.	Pruebas preliminares	36
2.3.1.	Resultados previos a la nueva instalación de la bomba de ariete.....	36
2.4.	Datos iniciales	38
2.4.1.	Tubería de succión	38
2.5.	Factores de operación	41
2.5.1.	Caudal de entrega.....	41
2.5.2.	Caudal libre	43
2.5.3.	Cálculo del número de pulsaciones.....	50
2.5.4.	Eficiencia del ariete hidráulico.....	54
2.5.5.	Caudal de suministro.....	55
2.5.6.	Caudal desechado.....	55
2.5.7.	Cálculo de la sobrepresión generada en el ariete hidráulico	55
CAPÍTULO 3		58
3.	REDISEÑO DE COMPONENTES	58

3.1.	Introducción.....	58
3.2.	Componentes a rediseñar.....	58
3.2.1.	Tubería de succión	58
3.2.2.	Válvula de impulso	59
3.2.3.	Cámara de aire.....	67
CAPÍTULO 4		71
4.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	71
4.1.	Introducción.....	71
4.2.	Pruebas de Funcionamiento.....	71
4.3.	Instrumentos de medición	71
4.3.1.	Medidor de flujo.....	72
4.3.2.	Estación total.....	73
4.3.3.	Manómetros	74
4.4.	Banco de Pruebas	75
4.4.1.	Primera prueba de funcionamiento	75
4.4.2.	Segunda prueba de funcionamiento	77
4.4.3.	Tercera prueba de funcionamiento.....	79
4.5.	Análisis de resultados	82
CAPÍTULO 5		83
5.	COSTOS	83
5.1.	Introducción.....	83
5.2.	Costos directos	83
5.2.1.	Costo de materia prima	83
5.2.2.	Costo de accesorios y materiales normalizados	84
5.2.3.	Costo de mano de obra.....	84

5.2.4. Costos de transporte	85
5.3. Costos indirectos	86
5.4. Costo total del proyecto.....	86
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS	89
ANEXOS	92

Índice de figuras

Figura 1. Bomba centrífuga con su respectivo motor	21
Figura 2. Bomba de ariete laboratorio mecánica de fluidos UPS.	22
Figura 3. Generación del golpe de ariete en una tubería.....	23
Figura 4. Principales elementos que conforman la bomba de ariete.....	24
Figura 5. Válvula de impulso con pesas encima.	25
Figura 6. Desplazamiento del líquido antes de llegar al cuerpo del ariete.....	28
Figura 7. Diseño de ariete hidráulico elaborado por ACF	32
Figura 8. Diferentes ensayos como válvula de impulso, vista esquemática impulso y descarga.....	33
Figura 9. Locación de la bomba de ariete con respecto a la finca Albán.....	35
Figura 10. Bomba de ariete hidráulico laboratorio mecánica de fluidos UPS.	37
Figura 11. Equipo utilizado para determinación del ángulo de inclinación en la tubería de succión.....	39
Figura 12. Factores necesarios para la instalación del ariete hidráulico	40
Figura 13. Se detallan los accesorios que se necesitan en la tubería de succión.....	45
Figura 14. Accesorios que se encuentran conformando el cuerpo del ariete.	46
Figura 15 Accesorios disponibles en la instalación	46
Figura 16. Factor de resistencia de una válvula de pie de disco	47
Figura 17. Tiempo de cierre de la válvula de impulso o tiempo de apertura de la válvula de entrega.	52
Figura 18: Herramienta utilizada para el cálculo de la eficiencia a partir del caudal de entrega y la altura de suministro.	54
Figura 19. Configuración inicial de la válvula de impulso	59
Figura 20. Diámetro y longitud del vástago en milímetros.....	63

Figura 21. Diámetro y espesor de cada pesa en milímetros.....	65
Figura 22. Rediseño del vástago y pesas para la válvula de impulso	66
Figura 23. Acotación en milímetros de la nueva cámara de aire	69
Figura 24. Rediseño de la cámara de aire	70
Figura 25. Funcionamiento del medidor de flujo en la instalación.....	72
Figura 26. Estación total colocada en el lugar de la instalación	73
Figura 27. Manómetros utilizados en la descarga del fluido, cuerpo del ariete y cámara de aire	74
Figura 28. Instalación del ariete hidráulico con sus nuevos componentes.	94
Figura 29. Fuente de agua natural disponible en la instalación	94
Figura 30. Tanque de almacenamiento donde se represará el agua	95
Figura 31. Colocación del ariete hidráulico en la nueva ubicación	95
Figura 32. Se evidencia el dispositivo con el cual se determinó el ángulo de la línea de succión.....	96
Figura 33. Instalación de la tubería de descarga	96
Figura 34. Funcionamiento del ariete hidráulico en sus condiciones iniciales.....	97
Figura 35. Sedimentos rocosos que obstruyeron el funcionamiento de la válvula de impulso.....	97
Figura 36. Medición de la altura de entrega desde un punto de referencia.....	98
Figura 37. Instalación de la bomba con sus nuevos componentes.....	98
Figura 38. Instalación del ariete hidráulico con sus respectivas modificaciones.....	99
Figura 39. Pruebas finales de operación del equipo.....	99

Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros iniciales de operación del ariete hidráulico.....	28
Tabla 2. Especificaciones DTU S2 ram pump.....	30
Tabla 3. Características de la bomba de ariete ACF de 2 pulgadas.....	32
Tabla 4. Temperatura ambiente media mensual y anual (°C).....	36
Tabla 5. Resultados obtenidos en la instalación inicial.....	36
Tabla 6. Dimensiones tubería galvanizada ISO 65 L-2.....	39
Tabla 7. Dimensiones y parámetros de la tubería de succión y descarga.....	41
Tabla 8. Valores de coeficientes de fricción en cada accesorio.....	47
Tabla 9. Proceso iterativo.....	49
Tabla 10. Características iniciales de operación de la válvula de impulso.....	59
Tabla 11. Beneficios en el rediseño del vástago.....	60
Tabla 12. Pesos correspondientes a los elementos que componen la válvula de impulso.	65
Tabla 13. Características iniciales de la cámara de aire.....	67
Tabla 14. Valores obtenidos en las pruebas de funcionamiento.....	71
Tabla 15. Medidor de flujo ultrasónico.....	72
Tabla 16. Estación total.....	73
Tabla 17. Manómetro Winters.....	74
Tabla 18. Datos obtenidos en la primera prueba de funcionamiento.....	75
Tabla 19. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.....	75
Tabla 20. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.....	76
Tabla 21. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.....	76
Tabla 22. Datos obtenidos en la segunda prueba de funcionamiento.....	77
Tabla 23. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.....	77

Tabla 24. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.....	78
Tabla 25. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.....	78
Tabla 26. Datos obtenidos en la tercera prueba de funcionamiento	79
Tabla 27. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.	79
Tabla 28. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.....	80
Tabla 29. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.....	80
Tabla 30. Datos generales de operación.....	81
Tabla 31. Gastos materia prima.	83
Tabla 32. Costo de accesorios y elementos normalizados.	84
Tabla 33. Gastos de mano de obra.	85
Tabla 34. Costo total directo	85
Tabla 35. Costos indirectos	86
Tabla 36. Costo total del proyecto.	86

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	40
Ecuación 2	41
Ecuación 3	42
Ecuación 4	42
Ecuación 5	43
Ecuación 6	43
Ecuación 7	44
Ecuación 8	45
Ecuación 9	48
Ecuación 10	49
Ecuación 11	51
Ecuación 12	51
Ecuación 13	52
Ecuación 14	52
Ecuación 15	52
Ecuación 16	53
Ecuación 17	55
Ecuación 18	55
Ecuación 19	56
Ecuación 20	56
Ecuación 21	61
Ecuación 22	62
Ecuación 23	63
Ecuación 24	64

Ecuación 25	66
Ecuación 26	68
Ecuación 27	68

RESUMEN

El objetivo principal de este Proyecto de Titulación propone realizar el análisis para el incremento de la capacidad de una bomba de ariete hasta una altura de 50 metros, considerando el impacto y el correcto aprovechamiento al utilizar fuentes renovables de energía, que ayuden a preservar el ambiente.

La instalación del equipo se realizó en Quito Parroquia Tumbaco, en el Barrio las Peñas-Finca Albán donde la locación dispone de los requerimientos necesarios para la realización del proyecto.

El análisis en cuanto al mejoramiento del equipo disponible en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, se lo realizó aplicando métodos y principios como: cálculo de pérdidas del sistema, factores de operación del ariete basados en estudios internacionales certificados por documentos científicos realizados por la Unidad de Desarrollo de Tecnología (DTU), que garantizaron el rendimiento óptimo del equipo. Se mejoraron elementos como tubería de succión, cámara de aire y el eje de la válvula de impulso los cuales posibilitaron alcanzar los resultados esperados al compararlos con las condiciones iniciales de operación.

De acuerdo a los métodos descritos anteriormente los resultados finales son los siguientes, la altura de descarga alcanzada es 50 metros, al obtener un caudal de suministro de 314.1 litros por minuto y un caudal de entrega de 15 litros por minuto.

Palabras claves: bomba de ariete, tubería de succión, válvula de impulso, sistema de pérdidas, cámara de aire, altura de descarga, caudal de suministro, caudal de entrega.

ABSTRACT

The main objective of this project consists in analyze the increase of the capacity of a ram pump until getting a height of 50 meters, considering the impact and also taking advantage from the use of renewable energies sources which help the environment.

The equipment installation was made in Quito, in the Tumbaco parish, at las Peñas neighborhood where the location has the necessary requirements for the realization of the project.

The analysis which involves the improvement of this equipment available in the Fluid Mechanics Laboratory, was made applying methods and principles like: head losses, operation parameters of the hydam which were based on international certified studies by scientific documents that where maid by Development Technology Unit (DTU) that guaranteed a properly efficiency of the pump.

The improvements involve elements like supply pipe, air chamber and the impulse valve shaft, which helped to reach the expected results comparing them with the initial conditions of operation.

According to the methods described above, these are the final results, the delivery height is 55.78 meters with a supply flow of 323.8 liters per minute and a delivery flow of 7 liters per minute.

Keywords: ram pump, supply pipe, impulse valve, head losses, air chamber, delivery height, supply flow, delivery flow.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el uso de fuentes de energías renovables a nivel nacional y mundial ha ido incrementando de manera paulatina con el pasar de los años, gracias al avance de la tecnología y cuidado del ambiente. Éstas se han convertido en energías rentables comparándolas con plantas de generación de energía eléctrica tanto convencionales como termoeléctricas o centrales térmicas de ciclo combinado. El uso oportuno de este tipo de energías garantizará el desarrollo de una localidad, pueblo o nación. A lo largo de la historia, el transporte de agua como líquido vital ha mejorado considerablemente, debido a la utilización de bombas en su mayoría eléctricas las cuales han desarrollado industrias, plantas de generación de energía y han hecho posible que este recurso hídrico llegue a cualquier hogar sin ninguna dificultad.

Al analizar el sistema de ariete hidráulico como una alternativa ecológica y amigable con el medio ambiente, se evidencia que su impacto en zonas rurales es mínimo, ya que su implementación beneficia a estas zonas de difícil acceso donde el uso de bombas eléctricas es imposible. Su funcionamiento consiste en trasladar agua, sin hacer uso de energía externa en función de una altura y caudal de suministro utilizando el efecto del golpe de ariete, es por esta razón que la instalación del ariete hidráulico en estas zonas es primordial.

El presente Proyecto de Titulación propone analizar detenidamente parámetros y factores de diseño de la bomba de ariete disponible en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana con el fin de optimizar su funcionamiento. Estos métodos se han sustentado en el estudio del estado del arte, los cuales permitirán incrementar su rendimiento y mejorar su capacidad de bombeo. El rediseño estará enfocado en los elementos principales (tubería de succión, válvula de

impulso, cámara de ariete) del ariete hidráulico con el propósito de alcanzar una altura de entrega de 50 metros. A partir de estas mejoras se podrán realizar pruebas de funcionamiento en campo, de esta manera se establecerán las curvas de operación del equipo, las cuales permitirán comparar los datos obtenidos con sus condiciones iniciales de operación.

La instalación se realizará en la Finca “Albán”, Barrio Las Peñas, Parroquia Tumbaco en la Provincia de Pichincha ya que en esta localidad existe un alto potencial hídrico y gratuito con desniveles geográficos que cumplen con las condiciones adecuadas para su instalación y funcionamiento.

CAPÍTULO 1

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción

En el presente capítulo se sintetizarán investigaciones similares sobre el análisis para el incremento de la capacidad de una bomba de ariete, incluyendo conceptos fundamentales que aportarán a la comprensión del fenómeno, equipo y sus componentes. A partir de estas investigaciones se hallarán métodos óptimos para perfeccionar el funcionamiento del ariete hidráulico en las condiciones requeridas.

1.2. Justificación

La bomba de ariete de la Universidad Politécnica Salesiana según Rivadeneira & Silva (2013) logra alcanzar una altura de 12 metros. El objetivo principal de este trabajo será replantear los parámetros determinantes de dicho equipo, para incrementar su capacidad de bombeo y alcanzar alturas de 50 metros o superiores.

1.2.1. Estado del arte

El estado del arte determinará un análisis fundamental de cada variable, parámetros y características de los estudios enfocados en la bomba de ariete hidráulico, el cual se encarga de sacar provecho a la energía que se genera al producirse el fenómeno del golpe de ariete, sin la necesidad de utilizar algún tipo de energía no renovable favoreciendo al ambiente y siendo aplicable en zonas rurales.

1.3. Energía hidráulica

“El agua almacena energía según las características de su flujo y su posición dentro del campo de la gravedad” (De Juana, 2003, pág. 9). Es por esta razón que, la

acumulación de energía que genera un fluido, es aprovechada de acuerdo a su posición partiendo de un punto de referencia o altura (Energía potencial) y también analizando su movimiento o velocidad (Energía cinética).

Otro tipo de energía que no debe pasar desapercibida es la energía de flujo, siendo “el contenido de energía basado en la presión que hay en el fluido y en su peso específico” (Mott, 2015, pág. 117).

1.4. Bomba

“Una bomba es un dispositivo mecánico que transmite energía a un fluido con la ayuda de un motor eléctrico o algún otro mecanismo de potencia primaria impulsando así un eje giratorio en el interior de la misma” (Mott, 2015, pág. 156).

Habitualmente en el medio, se encuentran diferentes clases de bombas eléctricas para distintas aplicaciones, e instalarlas en un ambiente donde no se posea energía eléctrica elevaría su costo de implementación y operación, ya que se debería colocar tendido eléctrico y adecuar toda el área de operación.

En este proyecto se aplicará una opción ecológica para el bombeo de agua, y se aprovechará una fuente de agua natural, al recibir energía potencial debido a la altura de suministro.



1.4.1. Eficiencia mecánica de una bomba

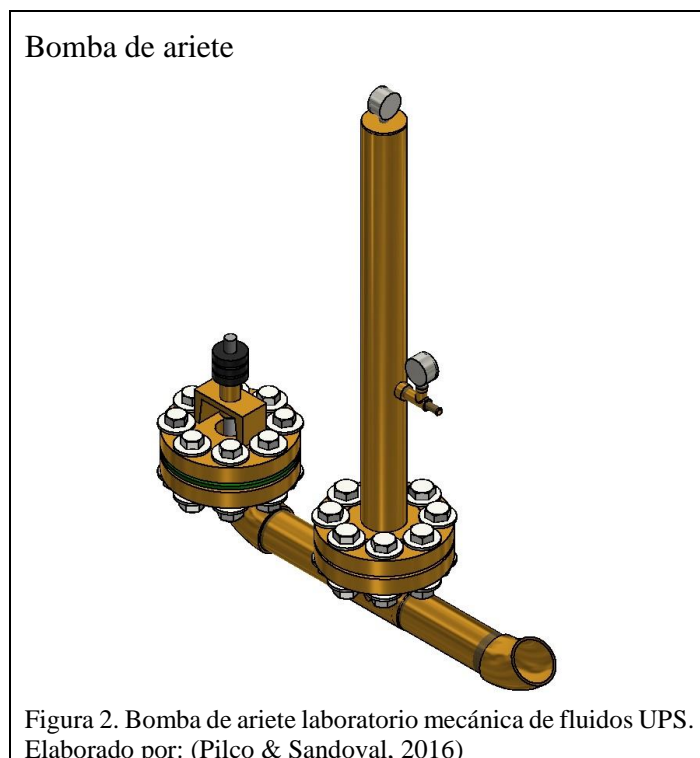
La eficiencia de una bomba expresa la relación entre la potencia suministrada por la bomba al fluido sobre la potencia que alimenta a la bomba (Mott, 2015, pág. 163).

Los materiales con los que fue diseñado el equipo, las pérdidas por fricción en elementos mecánicos, excesiva turbulencia y fricción del fluido generada en el interior de la bomba, así también las condiciones adversas donde se encuentre instalado son algunos de los limitantes para el aprovechamiento de la potencia suministrada al fluido. (Mott, 2015, pág. 163)

Todos estos factores serán de vital importancia al momento de mejorar el rendimiento del equipo con el fin de obtener una altura de descarga de 50 metros.

1.5. Bomba de ariete

La bomba de ariete o hydram es una “máquina que aprovecha la energía cinética de una caída de agua para generar un aumento instantáneo de presión (golpe de ariete) en el tubo de entrada” (Pongutá, 2003, pág. 18).

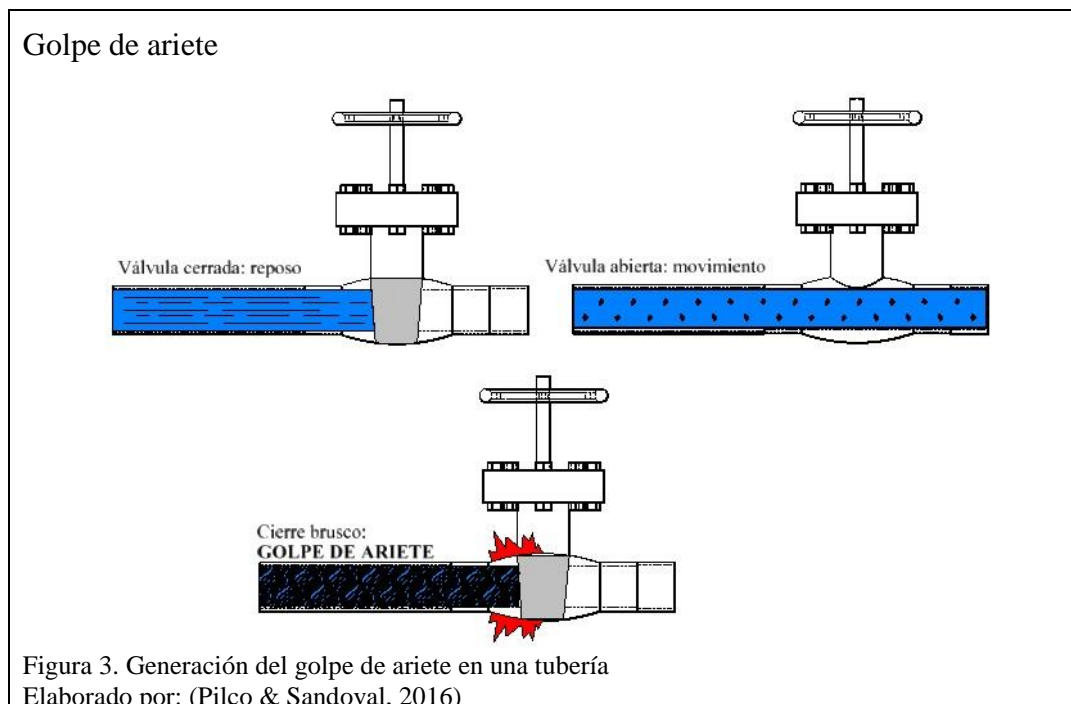


En la figura 2 se observa la bomba de ariete disponible, en la que se procederá a realizar un análisis para mejorarla, modificando algunos de sus componentes para lograr alcanzar los 50 metros de altura al aumentar su capacidad de bombeo.

1.6. Golpe de ariete (choque hidráulico)

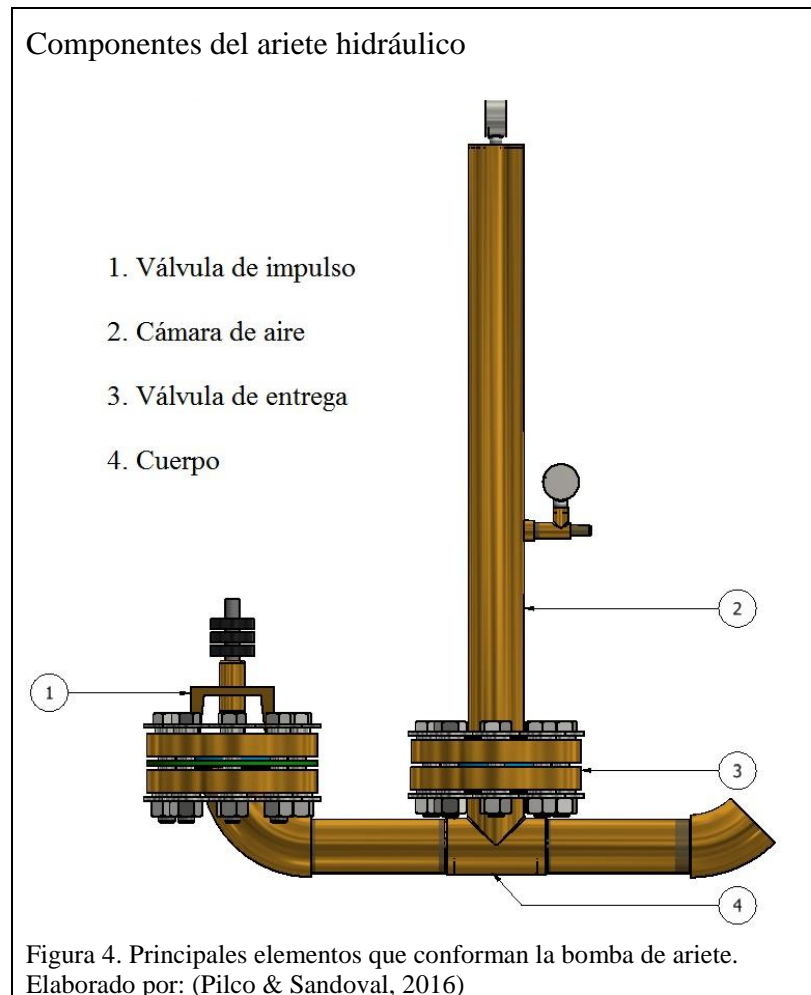
Se genera debido a un cambio brusco en la dirección y velocidad del fluido, al cerrar una válvula de control, rápidamente, obstruyendo el paso del líquido; de esta manera la energía de presión se transfiere a la válvula y a las paredes de la tubería originando el golpe de ariete (Viejo & Álvarez, 2004, pág. 130). Caracterizándose por incrementar la presión de manera momentánea, en un sistema de transporte de fluidos mediante tuberías.

Aunque en sistemas convencionales de tuberías este fenómeno es perjudicial, por ocasionar averías en diferentes accesorios, por lo que se requiere emplear métodos de regulación. Por otro lado, la bomba de ariete utilizará este efecto para beneficio de una comunidad al trasladar agua a distintas alturas, a partir de un caudal y altura de suministro.



1.7. Partes de la bomba de ariete

A continuación, se detallan los principales componentes que conforman la bomba de ariete hidráulico disponible.



1.7.1. Cuerpo del ariete

Como se muestra en la figura 3, en el cuerpo de la bomba de ariete hidráulico se colocan todos los elementos mecánicos que componen el ariete como son la cámara de aire, válvula de entrega y válvula de impulso; de esta manera se encargará de resistir toda la sobrepresión generada debido al cierre violento de la válvula de impulso. (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 75).

1.7.2. Cámara de aire

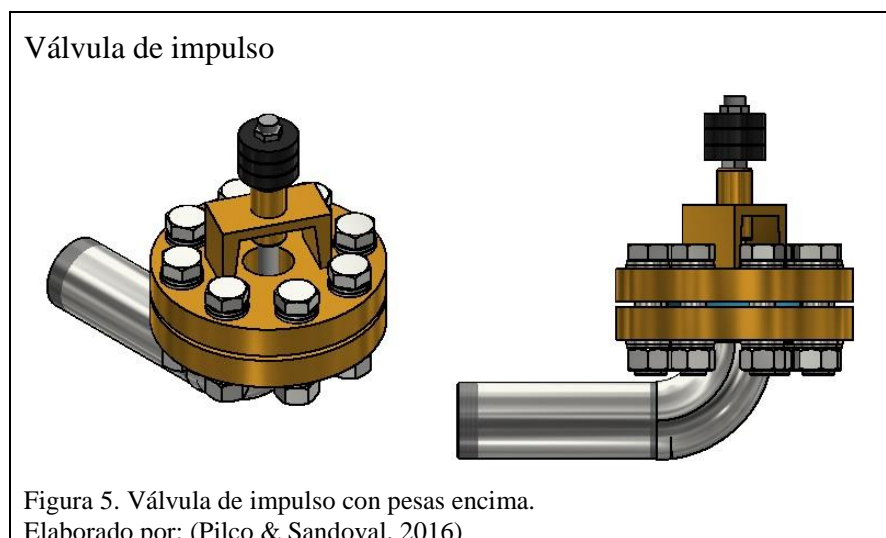
La cámara de aire o acumulador es un elemento encargado de amortiguar la sobrepresión, que se genera por el efecto del golpe de ariete, y, además garantiza la continuidad del flujo de agua a través de la tubería de descarga.

El aire dentro de la cámara se comporta como un elemento elástico, que al comprimirse (fase de sobrepresión), el acumulador recibe una cantidad de agua y reduce la tendencia de sobrepresiones altas, mientras que cuando se expande (fase de depresión) cede cierta cantidad de agua almacenada en la fase anterior a la tubería de entrega. (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 29)

En el interior de la cámara se producen dos presiones debido al fenómeno, “una presión mínima cuando una cantidad de aire soporta la columna de agua presente en la tubería de descarga y otra presión máxima cuando el fluido ingresa y el aire de la cámara se comprime” (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 29)

1.7.3. Válvula de impulso

Es uno de los elementos más importantes para al funcionamiento de la bomba porque en este elemento mecánico se genera el golpe de ariete. La válvula de impulso tiene como tarea cerrarse de manera violenta y regresar a su punto inicial.



Como se puede observar en la figura 5, el eje de la válvula de impulso posibilita la colocación de pesas permitiendo ajustar su carrera y velocidad de cierre con la modificación de un conjunto de cargas. La construcción de esta válvula se caracteriza por ser robusta lo que garantiza una gran durabilidad para un ciclo de vida elevado (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 25).

1.7.4. Válvula de entrega

Es aquella que permite el paso del fluido hacia la tubería de descarga, su trabajo es similar a una válvula anti retorno “check”. Esta válvula se encuentra, normalmente, cerrada y bloquea el retorno del fluido desde la descarga hacia el cuerpo del ariete, se abrirá cuando la dirección del agua tenga un solo sentido y se produzca el efecto del golpe de ariete (Sierra & Biancha, 2012, pág. 35).

“Su función principal es dejar pasar la mayor cantidad de caudal posible durante el tiempo que permanezca abierta en cada ciclo y debe cerrarse tan pronto se libere la presión del cuerpo del ariete”. (Sierra & Biancha, 2012, pág. 36)

1.8. Funcionamiento

El modo de funcionamiento del ariete es mediante ciclos de cierre y apertura por parte de la válvula de impulso y paralelamente de la válvula de entrega. Este inicia con la apertura de la válvula de alimentación la cual se encuentra en la línea de succión, esta será la encargada de suministrar el caudal de entrada necesario a la bomba (Sierra & Biancha, 2012, pág. 39).

Una vez que el fluido atraviesa el cuerpo de la bomba llegará a la válvula de impulso con la velocidad necesaria para cerrarla, sobrepresionando el interior del cuerpo de la bomba gracias al efecto del golpe de ariete. Permitiendo que el fluido retorne, pase por

la válvula de entrega e ingrese a la cámara de aire proporcionando un caudal de entrega pulsante en la tubería de descarga.

Así el fluido logra aliviar la presión acumulada en el cuerpo del ariete, cuando la válvula de impulso se cierra y la válvula de entrega se abre regresando a su posición inicial consiguiendo que se repita el proceso de bombeo en ciclos pulsantes y estables (Sierra & Biancha, 2012, pág. 43).

1.8.1. Caudal de suministro

El caudal de entrada o suministro es todo el volumen de agua que circula a través de la línea de succión. Este ingresará a la bomba variando de velocidad por las condiciones topográficas donde se encuentre instalado el ariete hidráulico

1.8.2. Línea de succión

“La línea de succión se refiere a todas las partes que constituyen el sistema de flujo desde la fuente del fluido hasta la entrada de la bomba” (Mott, 2015, pág. 346).

En esta sección se encontrará la válvula de alimentación y otros accesorios como codos, uniones y acoples.

1.8.3. Línea de descarga

La línea de descarga debe ser tan corta y directa como sea posible para minimizar la carga de la bomba. Los codos deben ser tipo estándar o de radio largo si es posible. El tamaño del tubo debe elegirse de acuerdo con la velocidad o las pérdidas de fricción permisible. (Mott, 2015, pág. 346)

1.9. Condiciones iniciales de operación

A continuación, se detallan las condicionales iniciales con las que opera la bomba de ariete hidráulico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

Tabla 1. Parámetros iniciales de operación del ariete hidráulico.

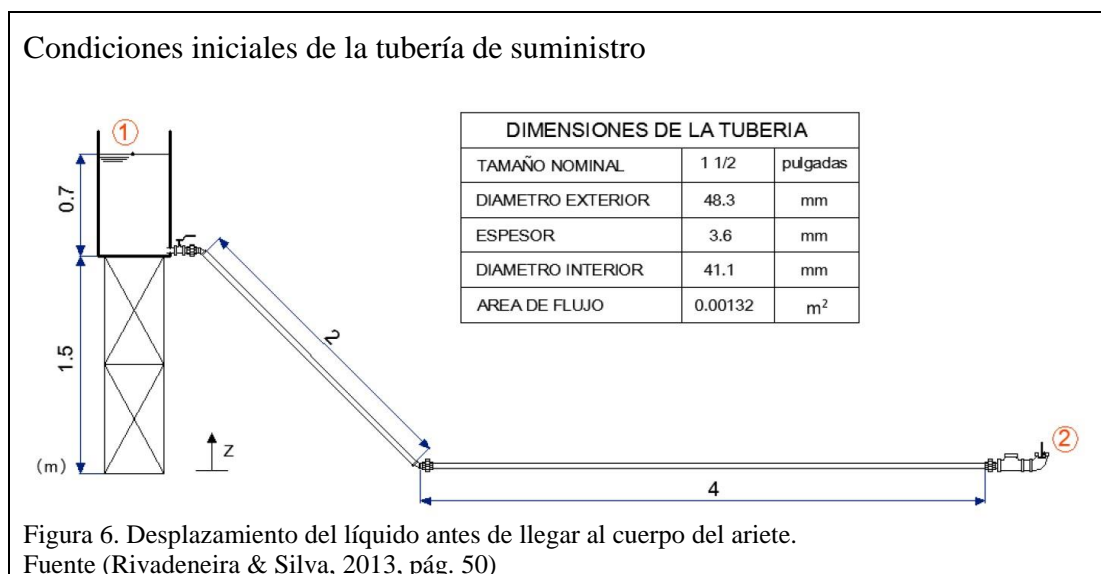
<i>Prueba Final</i>	<i>Valor Obtenido</i>
Altura de suministro	2.2 m
Altura de entrega	6.6 m
Caudal de suministro	45 l/min
Caudal de entrega	7.2 l/min
Caudal desechado	37.8 l/min
Rendimiento	48%
Presión 1 (Cámara de aire)	9 psi
Presión 2 (Cámara de aire)	13 psi

Nota: Parámetros iniciales con lo que opera la bomba de ariete.

Fuente: (Rivadeneira & Silva, 2013) ; Adaptado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

1.9.1. Altura de suministro

Es la altura medida entre la salida de la fuente de agua y el ingreso de la misma hacia la bomba. Retomando los cálculos realizados y las pruebas experimentales respecto a las condiciones iniciales de operación de la bomba de ariete del laboratorio, la altura de suministro fue de 2,2 metros (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 43).



1.9.2. Altura de entrega

La altura de entrega de acuerdo a las pruebas realizadas en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana en el año 2013 fue de 6,6 metros (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 43). Uno de los parámetros más críticos en los que se enfocará el análisis será la altura de entrega, la cual deberá ser de 50 metros o mayor a esta, tal y como se ha planteado en los objetivos del presente proyecto.

1.10. Estudios relacionados

Existen varios estudios relacionados con el uso de la bomba de ariete a nivel mundial y nacional, en los que constan los métodos y el análisis para el mejoramiento de la capacidad de bombeo. Además, estos estudios poseen datos reales basados en pruebas de funcionamiento que permiten establecer parámetros y directrices para la modificación de los elementos mecánicos del equipo y también sus condiciones de operación.

1.10.1. Development Technology Unit (DTU)

Es una entidad encargada del desarrollo de tecnologías a nivel mundial, la cual ha enfocado sus investigaciones al uso de bombas de ariete. El DTU S2, específicamente, es un diseño compacto y amigable con el ecosistema del ambiente; se lo ha utilizado para irrigación de sembríos, lo que ha facilitado el desarrollo de varios sectores de países africanos con el pasar de los años (University of Warwick, 1998, pág. 1).

El fabricante propone una serie de ventajas referentes al diseño, mantenimiento y puesta en marcha del equipo con lo que el beneficiario tiene una clara idea de cómo manejar la máquina, reducir pérdidas y ponerla a funcionar según los requerimientos en distintas épocas del año de acuerdo a las variaciones climáticas.

En la siguiente tabla se pueden analizar las condiciones recomendables en las que debe operar este equipo.

Tabla 2. Especificaciones DTU S2 ram pump.

<i>Características de operación DTU S2</i>	
Altura de suministro	2 a 15 m
Caudal de suministro	40 a 120 l/min
Tubería de succión	Hierro galvanizado
Diámetro de la tubería de succión	1.5" para caudales de suministro de 40 a 60 l/min 2" para caudales de suministro de 60 a 120 l/min
Altura de entrega	100 m
Caudal de entrega	1 a 25 l/min
Diámetro de la tubería de entrega	25 mm

Nota: Se evidencian los parámetros recomendados para la instalación del DTU S2.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

1.10.2. Diseño y construcción de un ariete hidráulico Escuela Politécnica Nacional (EPN) 2011

En las instalaciones de la (EPN) en el año 2011 se realizó el diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico a partir de varios estudios de modelos matemáticos, el equipo alcanzó a bombear una altura de 120 metros con un caudal de suministro de 8 litros por segundo (Campaña & Guamán, 2011, pág. 153).

La altura de descarga en este proyecto supera de cierta manera al DTU S2, lo que permite concluir que si es factible alcanzar alturas considerables utilizando un sistema de bombeo innovador y ecológico como el del ariete hidráulico.

1.10.3. Diseño, dimensionamiento, construcción y mantenimiento de un sistema alimentado por gravedad en áreas rurales, sistemas de ariete hidráulico Action contre la Faim (ACF)

Este proyecto fue realizado por la misión Acción Contra el Hambre, traducido del francés Action contre la Faim (ACF) en la Provincia de Nusa Tenggara-Indonesia,

donde el 70% de la población posee en sus alrededores fuentes de agua natural provenientes de ríos. Es por esto que la instalación de arietes hidráulicos es lo ideal para el abastecimiento de agua en estas zonas rurales (ACF, 2009).

A continuación, se pueden observar algunas características y recomendaciones de la instalación.

- La tubería de succión tiene como objetivo resistir los choques del golpe de ariete y permitir la entrada de agua al cuerpo de la bomba desde el tanque de almacenamiento con una alta velocidad, no puede ser plástica ya que no resistirá altas presiones (ACF, 2009, pág. 9).
- La eficiencia de la bomba de ariete aumenta si los componentes del sistema no absorben los choques del golpe de ariete. Es por esto que la tubería de succión debe ser rígida y anclada firmemente con abrazaderas en una fundición de concreto (ACF, 2009, pág. 9).
- Una tubería de polietileno de alta densidad es recomendada como tubería de entrega debido a su fácil instalación y disponibilidad en el mercado (ACF, 2009).
- Un ariete en particular funciona bajo un rango de caudal y altura de suministro. Si esta altura o caudal de suministro son demasiado bajas, el agua no tendrá suficiente energía para generar el golpe de ariete.
- Por otro lado, si el caudal o altura de suministro es demasiado alto, la energía del agua causará demasiado esfuerzo en la bomba y reducirá su tiempo de vida, el ACF baso su diseño en los estudios realizados por el DTU en 1998, el cual especifica una altura de suministro de 2 a 15 metros y un caudal de suministro de 0.6 a 2 litros por segundo (ACF, 2009, pág. 22).

En la siguiente tabla se pueden observar algunas de las características de la bomba de ariete diseñada por ACF.

Tabla 3. Características de la bomba de ariete ACF de 2 pulgadas.

<i>Parámetros</i>	<i>Valores de operación</i>
Diámetro de la tubería de succión	2 pulg
Mínimo caudal de suministro	0.6 l/s
Máximo caudal de suministro	2 l/s
Promedio caudal de suministro	1.3 l/s
Mínima altura de suministro	6 m
Máxima altura de suministro	10 m
Altura de entrega máxima	150
Eficiencia	60%
Rango de caudal de entrega estimado	1 a 25 l/min
Frecuencia número de golpes	25 a 50 golpes/min

Nota: Factores de operación bomba de ariete ACF de 2 pulgadas.
Fuente: (ACF, 2009, pág. 51)

Bomba de ariete hidráulico ACF design

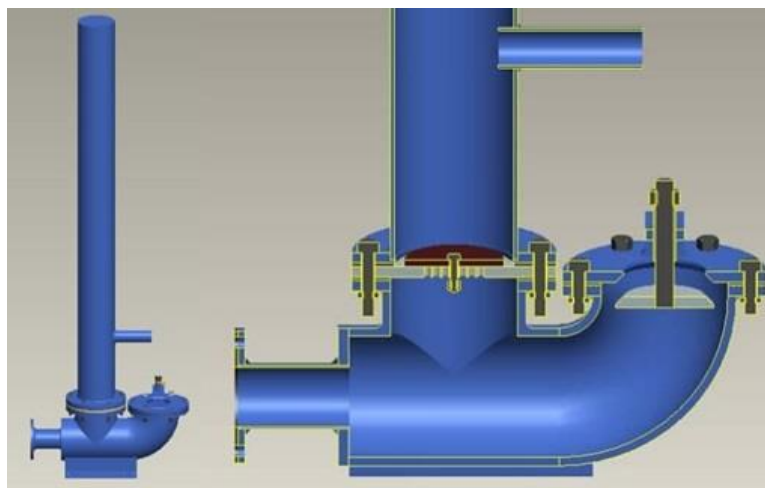


Figura 7. Diseño de ariete hidráulico elaborado por ACF
Fuente: (ACF, 2009)

1.10.4. Bomba de ariete hidráulico para riego en el norte de Tailandia

Al norte de Tailandia en Foothill, se instaló un ariete hidráulico el cual fue conectado a un sistema de riego automático de baja presión, para suministrar agua a una pequeña parcela de cafetales. Este proyecto enfocó su estudio en el mejoramiento de la válvula de impulso. Se optó por mejoras básicas construidas con materiales de fácil adquisición en el mercado, obteniendo como resultado que al acoplar un resorte en la válvula de impulso la eficiencia no aumenta de manera significativa, pero al instalarla en posición horizontal se disminuyen las pérdidas por fricción y se logra aumentar el golpe de ariete. El sistema de bombeo hidráulico funcionó sin necesidad de mantenimiento y totalmente automático por más de seis semanas con una eficiencia del 44% (Inthachot, Saehaeng, Max, Müller, & Spreer, 2015).



Los estudios relacionados permiten sustentar el objeto de estudio propuesto al inicio del proyecto, el cual está enfocado en diseñar un equipo que alcance alturas de bombeo de 50 metros en adelante.

CAPÍTULO 2

2. CÁLCULOS

2.1. Introducción

En los estudios relacionados, que se mencionaron en el capítulo anterior, elaborados por entidades como el DTU, ACF y en nuestro país la EPN, se especifica al cálculo de cada elemento de la bomba de ariete hidráulico como un procedimiento importante, de esta manera se sustenta la variación de caudales, diámetros, espesores y alturas, para cumplir el objetivo del proyecto.

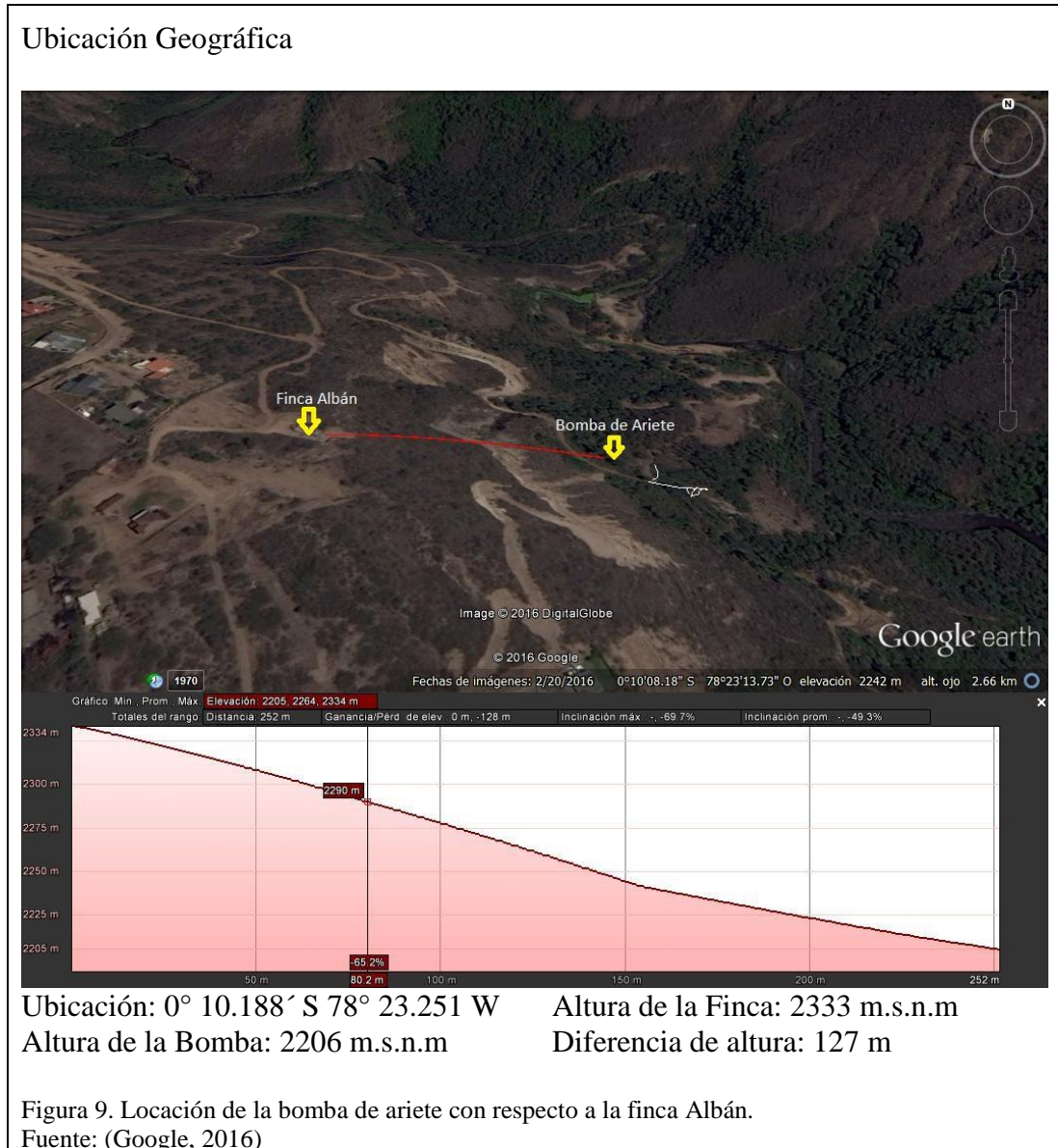
2.2. Condiciones geográficas de la instalación

La posición geográfica donde se instalará la bomba de ariete, tiene un terreno irregular el cual contiene pendientes demasiado inclinadas y alturas pronunciadas. Debido a estas variables la instalación del equipo resulta ser compleja, es así que según ACF (2009), la locación de un sistema de ariete hidráulico es de suma importancia, por lo que sugiere implementar las siguientes recomendaciones (págs. 23-24).

- El corte de árboles debe ser evitado, en cualquier caso (es necesario obtener el permiso del dueño del lugar o de la comunidad).
- La ruta e instalación de la tubería de entrega debe anticipar problemas causados por el cruce de caminos, ríos o tierras con ganado.

Con el fin de evitar en lo posible estos problemas, es necesario establecer un estudio adecuado de la zona donde se instale el equipo (ACF, 2009, pág. 23).

Se detallarán a continuación los datos obtenidos por referencias a través de GPS y por fuente de Google Earth de la ubicación de la finca Albán donde se realizan las pruebas de este proyecto.



En la Figura 9, se aprecia una longitud entre el equipo y la finca de 252 metros y una altura de 127 metros, siendo apto el lugar para el desarrollo del proyecto, ya que dispone de una fuente de agua natural y elevaciones requeridas para las pruebas del equipo.

El Sistema Nacional de la Información (SNI), proporciona las temperaturas promedio en diferentes meses del año en el sector de Tumbaco, donde se realizará la instalación.

A continuación, se presentan los valores de temperatura media registrados en distintos periodos del año.

Tabla 4. Temperatura ambiente media mensual y anual (°C).

Código	Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
M054	Quito- Obsertario	13.6	13.6	13.8	13.7	13.9	13.7	13.7	13.8	13.8	13.4	13.3	13.5
M114	Tumbaco	16.9	16.9	17	16.8	17	16.9	16.3	16.5	16.7	16.7	16.8	16.8
M606	Quito- U. Central	13.7	13.6	13.5	13.3	13.8	13.4	13.9	13.9	13.8	13.3	13.1	13.6
M024	Quito INAMHI- IÑAQUITO	14.7	14.7	14.6	14.8	15	15.2	15.2	15.5	15.4	14.9	14.7	14.8

Nota: Temperaturas promedios en la locación.

Fuente por: (SNI, 2013) Adaptado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

De acuerdo con los datos obtenidos por el SNI, el valor máximo de temperatura es 17°C, por ende, los valores de viscosidad cinemática y densidad del agua corresponderán a $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y $999 \text{ kg}/\text{m}^3$ respectivamente, los cuales se utilizarán en cálculos posteriores (Mott, 2015, pág. 488).

2.3. Pruebas preliminares

2.3.1. Resultados previos a la nueva instalación de la bomba de ariete.

Los datos obtenidos en las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana dieron como resultado los siguientes valores de operación.

Tabla 5. Resultados obtenidos en la instalación inicial.

<i>Parámetros</i>	<i>Medición</i>
Caudal de Entrega	7,2 l/min
Altura de Entrega	12 m
Potencia	7,7 W (0,010 HP)
Tubería de succión	Ø 1 1/2 pulg
Tubería de entrega	Ø 1/2 pulg
Altura de suministro	2,2 m

Nota: Resultados finales con los que operó el ariete hidráulico.

Fuente: (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 123) Adaptado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

A partir de estos resultados se procedió a instalar el equipo en la nueva locación, sin realizar ninguna modificación en los elementos del equipo (cuerpo de la bomba, válvula de entrega, válvula de impulso, cámara de aire, diámetros de tubería) obteniendo las siguientes limitantes.



- Longitud de la tubería de succión muy corta.
- Taponamiento de la tubería de succión por acumulación de sedimentos rocosos.
- Fisuras de la tubería de succión.
- Ruptura de los accesorios, codos, neplos y universal debido a la baja resistencia.
- Desprendimiento del empaque en la válvula de entrega debido a la sobrepresión.
- Avería en manómetros por sobrepresión en la cámara de aire.
- Alojamiento limitado de pesas en la válvula de impulso debido a la pequeña longitud del eje.
- El peso máximo colocado en el eje de la válvula de impulso no fue el suficiente para abrirla.

- Restricción en la carrera del vástago de la válvula de impulso debido a deflexión.

2.4. Datos iniciales

Son las variables con las cuales operará el equipo y serán evaluadas con instrumentos de medición adecuados.

2.4.1. Tubería de succión

- Diámetro de la tubería de suministro

Como se detalla en la Tabla 2, para elegir un diámetro de tubería el DTU menciona que, para alcanzar alturas de 100 metros se utilizará una tubería de succión de diámetro de 2 pulgadas para caudales entre 60 y 120 litros por minuto con una altura de suministro de 2 a 15 metros (University of Warwick, 1998, pág. 4).

En base a lo expuesto se define que el nuevo diámetro de la tubería de succión será de 2 pulgadas.

- Material

Se trabajará con tubería de acero ISO 65 L-2 galvanizado, que está disponible en el mercado nacional y de acuerdo a las recomendaciones del DTU este material es el más apropiado (University of Warwick, 1998, pág. 4).

Las principales razones para la utilización de este material:

- Resistir el efecto de martillo del impacto producidos por el golpe de ariete.
- Evitar rutinas de mantenimiento, posibles fugas o fisuras en la tubería (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 32).

Como se aprecia en la Tabla 6, los valores de la tubería a ser utilizados para los futuros cálculos son los siguientes.

Tabla 6. Dimensiones tubería galvanizada ISO 65 L-2.

TUBO ISO				
Especificaciones	Diámetro		Espesor	Peso
	Nominal pulg	Real mm	Nominal mm	kg/m
ISO 65 L-2	1	33.2	2	1.99
	1 1/4	42.1	2.3	2.55
	1 1/2	48.2	2.6	3.25
	2	59.9	2.9	4.1
	2 1/2	71.8	2.9	5.75
	3	88.25	3.2	6.76
	4	113.3	3.2	9.83

Nota: Dimensiones y especificaciones técnicas tubería ISO 65 L-2
Fuente: (Kubiec-Conduit, 2013)

- Ángulo de inclinación

Según Romero Guerrero (2014) el ángulo de inclinación de la tubería de succión respecto a la horizontal debe hallarse entre 10 y 45 grados respectivamente. Por lo que en este caso de acuerdo a la nueva instalación el ángulo medido es de 34 grados mostrado en la figura 11.



- **Altura de suministro y longitud de tubería de succión**

De acuerdo con las mediciones realizadas en la nueva ubicación, se procederá a comprobar que el valor de la longitud 39 metros y la altura medida de 10.53 metros se encuentren dentro de la relación establecida por Bjarnegard & Allen Chou (2006, pág. 15).

Donde:

H_s : Altura real medida en campo 10.53 m

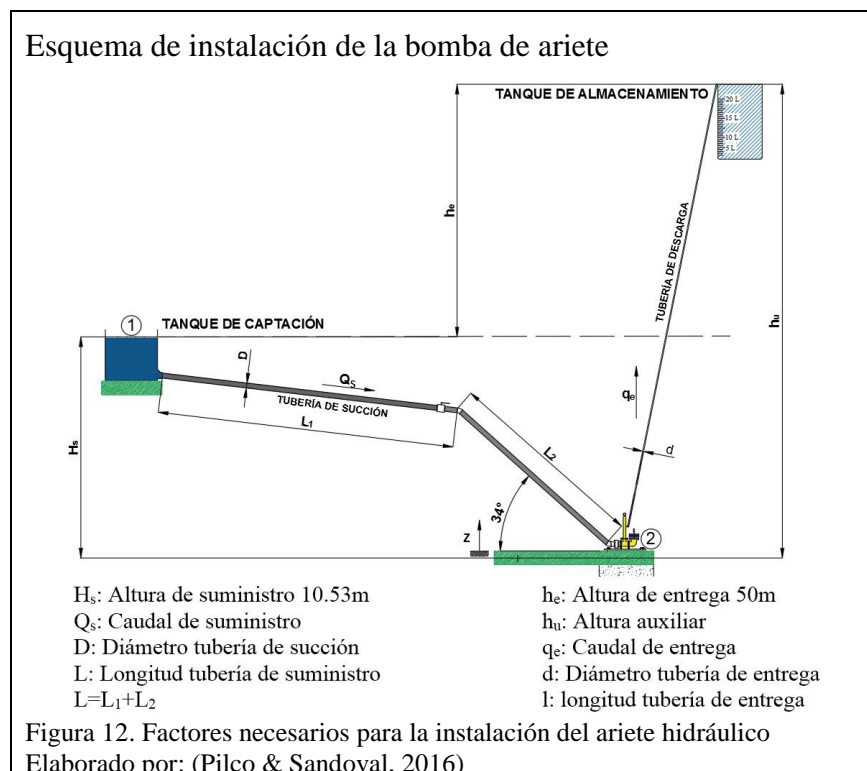
$$\frac{L}{H_s} = 3 \text{ a } 7 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$L = 3 \times H_s$$

$$L = 3 \times 10.53 \text{ m}$$

$$L = 31.59 \text{ m}$$

De acuerdo a esta relación la longitud de tubería de succión debe estar entre 31.59 metros y 73.71 metros, por lo que el valor medido en campo de 39 metros cumple con la condición de rango mencionada.



En la figura 12, se describe el esquema de la instalación de la bomba de ariete con sus longitudes, alturas y parámetros necesarios para su operación los que se encuentran disponibles en la finca Albán.

La altura auxiliar h_u , se la utiliza para fines de cálculo según Kumar (2016) es la altura total del sistema medida desde la bomba hasta el tanque de almacenamiento.

Por lo tanto, en la Tabla 7 se evidencian los valores con los que el nuevo sistema de bombeo entrará en funcionamiento, estos serán los valores finales con los que la bomba de ariete será instalada.

Tabla 7. Dimensiones y parámetros de la tubería de succión y descarga.

<i>Elemento</i>	<i>Variable</i>	<i>Valor</i>
Altura de suministro	H_s	10.53m
Altura de entrega	h_e	50m
Altura auxiliar $h_u=H_s+h_e$	h_u	60.53m
Diámetro interior tubería succión	D_i	2pulg=0.0543m
Longitud total tubería succión	L	39m
Longitud de tubería medida desde la caída	L_2	18m
Diámetro interior tubería descarga	D_d	½ pulg=0,011m
Longitud tubería descarga	l	100m

Nota: Valores obtenidos en campo
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

De acuerdo con estos parámetros se procederá a obtener distintos factores del funcionamiento del equipo.

2.5. Factores de operación

2.5.1. Caudal de entrega

Young en (1996) demostró que el caudal de agua entregado por una bomba de ariete, depende de los siguientes parámetros descritos en la siguiente ecuación.

$$q_e = \frac{H_s \times v_c \times (D_i)^2 \times \pi \times C_d}{h_u \times 10} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

q_e : Caudal de entrega; (l/min)

C_d : Coeficiente de descarga

v_c : Velocidad de cierre de la válvula; (m/s)

D_i : Diámetro interior tubería de succión; (m)

- Velocidad de cierre de la válvula de impulso

Es la velocidad crítica expresada en metros por segundo requerida para cerrar la válvula de impulso, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación (Young, 1996, pág. 297).

$$v_c = 0.135 \times C_v \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

v_c : Velocidad de cierre; (m/s)

C_v : Carrera del vástago 30mm

$$v_c = 0.135 \times 30mm$$

$$v_c = 4.05 \frac{m}{s}$$

- Coeficiente de descarga

Para el cálculo del coeficiente de descarga en la válvula de impulso se utilizará la siguiente fórmula proporcionada por Valvias (2013).

$$C_d = \frac{Q_l}{\sqrt{(2 \times g \times H_s)} \times A_s} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

A_s : Área de salida del fluido $9.7 \times 10^{-4} m^2$ (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 56)

Q_l : Caudal libre; (l/min).

2.5.2. Caudal libre

De acuerdo a Mott (2015) el valor de caudal libre se calcula con la siguiente ecuación.

$$Q_l = v_2 \times A_2 \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

A_2 : Área de asiento de la válvula de impulso menos área del vástago $9.697 \times 10^{-4} m^2$
(Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 53).

v_2 : Velocidad del fluido en el punto 2; (m/s).

- Ecuación de la Energía

Como se muestra en la Figura 11 la ubicación del sistema de referencia, permite proceder con el cálculo de la velocidad en el punto 2 para la zona de succión. A continuación, se presenta la ecuación general de la energía, expuesta por Mott (2015, pág. 183).

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{(v_1)^2}{2 \times g} + h_a - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{(v_2)^2}{2 \times g} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

P_1, P_2 : Presión en el punto 1 y 2; (Psi).

Z_1, Z_2 : Altura al punto 1 y 2; (m).

V_1, V_2 : Velocidad en el punto 1 y 2; (m/s).

h_L : Sumatoria de pérdidas del sistema; (m).

h_a : Energía que cede una bomba eléctrica al sistema.

h_r : Energía absorbida por un motor de fluido.

Como se puede observar P_1, P_2 serán cero debido a que estos puntos se encuentran abiertos a la atmósfera. La velocidad en el tanque de captación es aproximadamente cero. No se tendrá valores de h_A, h_R ya que el sistema no tiene energía suministrada o

absorbida por algún dispositivo externo, por tanto, la ecuación 6 quedará de la siguiente manera.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{(v_1)^2}{2 \times g} + h_a - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{(v_2)^2}{2 \times g}$$

$$z_1 = \frac{(v_2)^2}{2 \times g} + h_L$$

- **Cálculo de pérdidas en el sistema**

Se procede a iniciar el cálculo de pérdidas del sistema, a través del proceso iterativo con el fin de obtener la velocidad de flujo en el punto 2.

- **Pérdidas mayores**

La ecuación descrita por Mott (2015, pág. 183) determina los parámetros necesarios para el cálculo de pérdidas mayores.

$$h_{LM} = f \times \frac{L}{D_i} \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

h_{LM} : Pérdidas mayores del sistema; (m).

L : Longitud de la tubería 39m

D_i : Diámetro interior de la tubería 0.0543m

v_2 : Velocidad de flujo en el punto 2; (m/s).

f : Factor de fricción 0.02 (Valor asumido para iniciar el proceso iterativo)

- **Cálculo de pérdidas mayores en succión**

Éstas son las pérdidas que se hallan a lo largo de la tubería de succión.

$$h_{LM} = 0.02 \times \frac{39m}{0.0543m} \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g}$$

$$h_{LM} = 14.365 \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g}$$

- Pérdidas menores

Para realizar el cálculo de pérdidas menores, se aplica la siguiente ecuación. (Mott, 2015, pág. 227).

$$h_{Lm} = \sum k \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g} \quad \text{Ecuación 8}$$

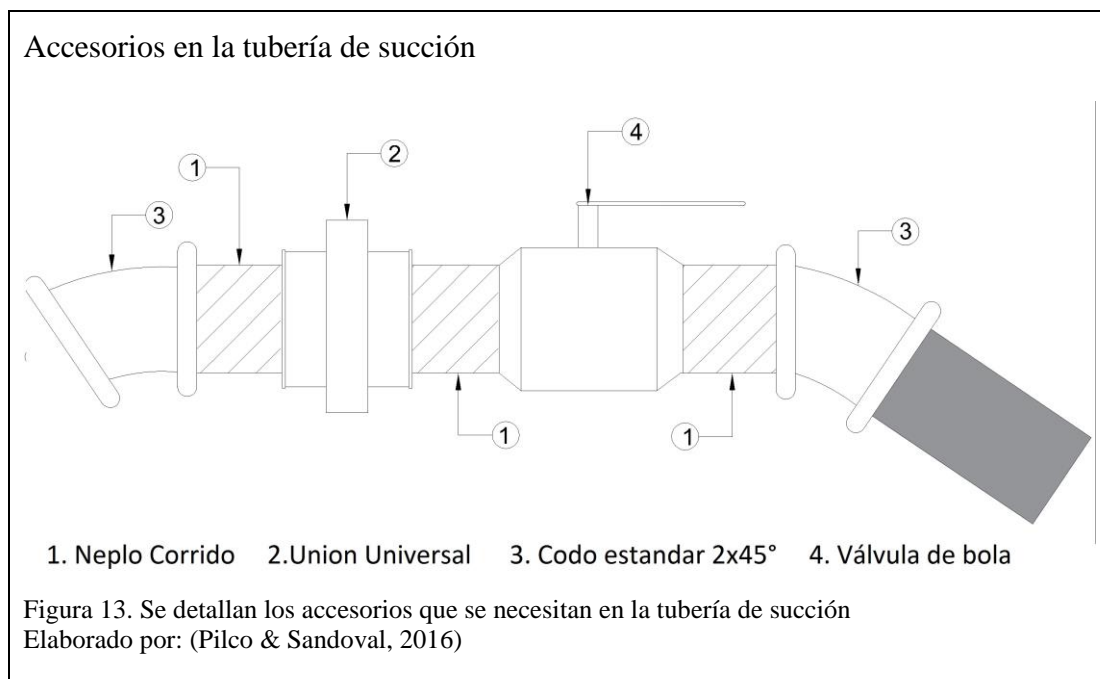
Donde:

k : Coeficientes de pérdida

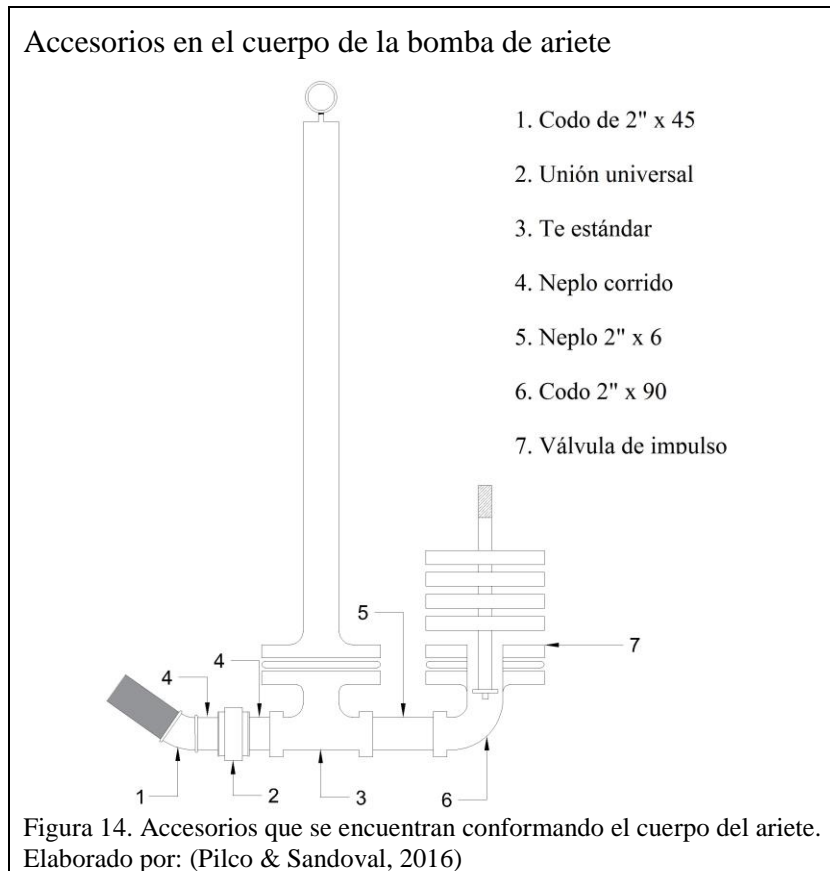
- Cálculo de pérdidas menores en succión

Éstas son las pérdidas que se hallan a través de todos los accesorios en la instalación de la succión.

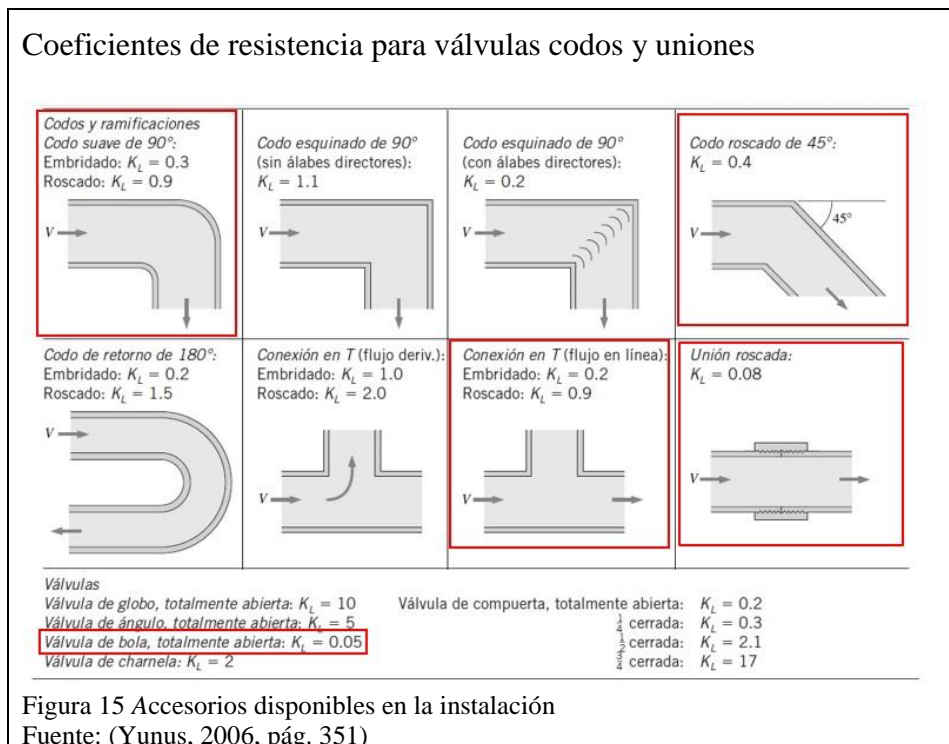
En la figura 13 se muestran los elementos utilizados en la línea de succión, los que permitirán el flujo del agua desde la captación hacia la bomba.



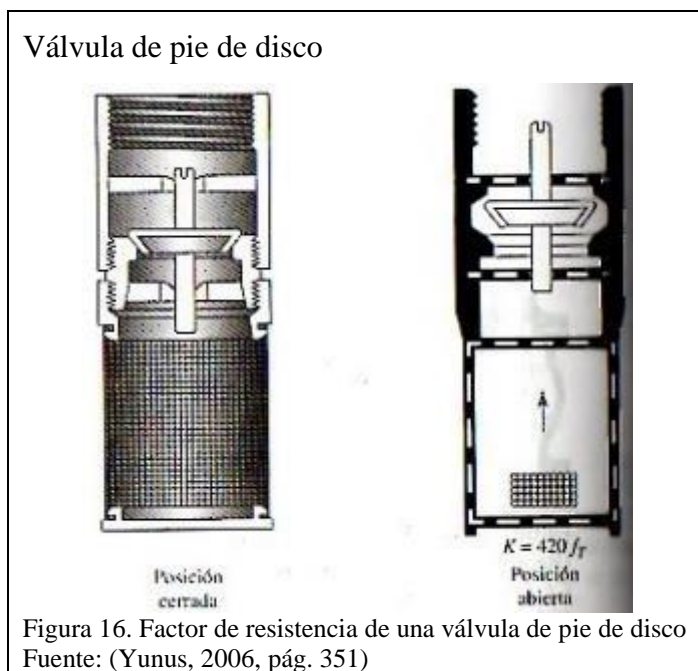
En la figura 14 se muestran los accesorios que conforman la bomba de ariete.



Los coeficientes de pérdida utilizados en el sistema, corresponden a los accesorios mostrados en la figura 15.



Además, para el cálculo del coeficiente de fricción de la válvula de impulso se determina el factor de fricción a turbulencia completa f_t : 0.019 para un diámetro de 2 pulgadas. El coeficiente de resistencia de la válvula de impulso se asemeja al de una válvula de pie de disco por su funcionamiento y geometría (Mott, 2015, pág. 297).



Al elaborar una lista de todos los accesorios que se muestran en las anteriores figuras. Se obtiene un coeficiente de pérdida total.

Tabla 8. Valores de coeficientes de fricción en cada accesorio.

<i>Accesorio</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Coefficiente de pérdida k</i>	<i>Valor total del coeficiente de pérdida</i>
Tanque de almacenamiento	1	1.00	1.00
Neplos	8	0.08	0.64
Universales	2	0.08	0.16
Codo estándar a 45	3	0.40	1.20
Codo estándar a 90	1	0.90	0.90
Te estándar	1	0.90	0.90
Válvula de bola abierta por completo	1	0.05	0.05
Válvula de pie tipo disco	1	$420 * 0.019$	7.98
Salida al almacenamiento	1	1.00	1.00
Sumatoria de todos los coeficientes de pérdidas menores			13.83

Nota: Se muestra el valor total del coeficiente de resistencia de toda la instalación de la tubería de succión.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Retomando la ecuación 8, el cálculo de las pérdidas menores en la tubería de succión corresponde al siguiente valor.

$$h_{Lm} = 13.83 \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g}$$

Con los valores de las pérdidas mayores y menores, se determina el valor de la velocidad de flujo en el punto 2, reemplazando los resultados en la ecuación 6.

$$z_1 = \frac{(v_2)^2}{2 \times g} + h_L$$

$$z_1 = \frac{(v_2)^2}{2 \times g} + h_{LM} + h_{Lm}$$

$$10.53m = \frac{(v_2)^2}{2 \times g} + \left(14.365 \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g} + 13.83 \times \frac{(v_2)^2}{2 \times g} \right)$$

$$v_2 = 2.656m/s$$

Continuando con el proceso iterativo se determinará el factor de fricción real, como lo menciona Sheikh (2013) en la siguiente ecuación.

$$f = \frac{0.316}{N_{RE}^{0.25}} \quad \text{Ecuación 9}$$

- Número de Reynolds

La manera en la que se comporta un fluido respecto a las pérdidas de energía, depende en gran mayoría si el flujo es laminar o turbulento. Se determina laminar si el número de Reynolds es menor que 2000 y turbulento si el número de Reynolds es mayor que 4000 (Mott, 2015, págs. 181-182).

Al calcular el número de Reynolds se determinará el valor de velocidad de flujo mediante el proceso iterativo. El cálculo de este factor corresponde a la siguiente ecuación.

$$N_{RE} = \frac{v_2 \times D_i}{\nu_c} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

v_2 : Velocidad de flujo; (m/s).

ν_c : Viscosidad cinemática $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ del agua a 17°C (Mott, 2015, pág. 488)

D_i : Diámetro interior de tubería de succión; (m).

$$N_{RE} = \frac{2.656 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0.0543 \text{m}}{1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}$$

$$N_{RE} = 144221$$

El valor del número de Reynolds se encuentra mediante la Ecuación 10, para obtener el factor de fricción correspondiente a la primera iteración se lo calcula de la siguiente manera.

$$f = \frac{0.316}{144221^{0.25}}$$

$$f = 0.01621$$

Con el fin de verificar si el proceso iterativo es correcto. En la siguiente tabla se detalla los valores correspondientes a cada iteración.

Tabla 9. Proceso iterativo.

<i>N° Iteración</i>	<i>Factor de fricción f</i>	<i>Velocidad de flujo m/s</i>
1	0.02	2.656
2	0.01621	2.8432
3	0.01602	2.8541
4	0.01601	2.8545

Nota: El proceso iterativo permite encontrar el valor correcto de la velocidad de flujo.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Una vez que se ha calculado el valor de la velocidad del fluido en el punto 2, después de realizar el proceso iterativo, se procede a hallar el valor del caudal libre.

$$Q_l = 2.8545 \frac{m}{s} \times 9.697 \cdot 10^{-4} m^2$$

$$Q_l = 0.002768 \frac{m^3}{s} \rightarrow 166.08 \frac{l}{min}$$

Una vez que se ha calculado el valor del caudal libre se obtendrá el coeficiente de descarga descrito en la Ecuación 5.

$$C_d = \frac{0.002768 \frac{m^3}{s}}{\sqrt{\left(2 \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 10.53m\right) \times 9.7 \cdot 10^{-4} m^2}}$$

$$C_d = 0.2$$

De esta manera se obtienen todos los parámetros necesarios para el cálculo del caudal de entrega descrito en la Ecuación 4.

$$q_e = \frac{10.53 \times 4.05 \frac{m}{s} \times (0.0543m)^2 \times \pi \times 0.2}{60.53m \times 10}$$

$$q_e = 0.00013 \frac{m^3}{s} \rightarrow 7.8314 \frac{l}{min}$$

2.5.3. Cálculo del número de pulsaciones

Con el propósito de hallar todos los parámetros que componen el funcionamiento del ariete, se utilizará la Ecuación 11 (Kumar, 2016, pág. 12).

- **Velocidad máxima en el ariete hidráulico**

El cálculo de la velocidad máxima se hallará con el coeficiente de pérdida total del sistema, según los estudios realizados por Aniruddha & Atharva (2016) se lo obtiene de la siguiente manera.

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times g \times h_u}{h_{LT}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

h_u = altura auxiliar; (m).

h_{LT} : Coeficiente de pérdida total del sistema; (m).

$$h_{LT} = h_{LM} + h_{Lm} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

h_{LM} : Pérdidas mayores; (m).

h_{Lm} : Pérdidas menores; (m).

$$h_{LT} = 0.01601 \times \frac{39m}{0.0543m} \times \frac{\left(2.8545 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.8 \frac{m}{s^2}} + 13.83 \times \frac{\left(2.8545 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \times 9.8 \frac{m}{s^2}}$$

$$h_{LT} = 10.5298m$$

Una vez obtenido el valor de las pérdidas totales del sistema, se procederá a calcular la velocidad máxima en la que opera el ariete hidráulico. Al remplazar los valores en la Ecuación 11 (Kumar, 2016, pág. 11).

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 60.53m}{10.5298m}}$$

$$v_{\max} = 10.6146 \frac{m}{s}$$

- **Número de pulsaciones o golpes**

Kumar (2016) añade que para el cálculo del número de pulsaciones o golpes se utilizará la siguiente ecuación (pág. 12).

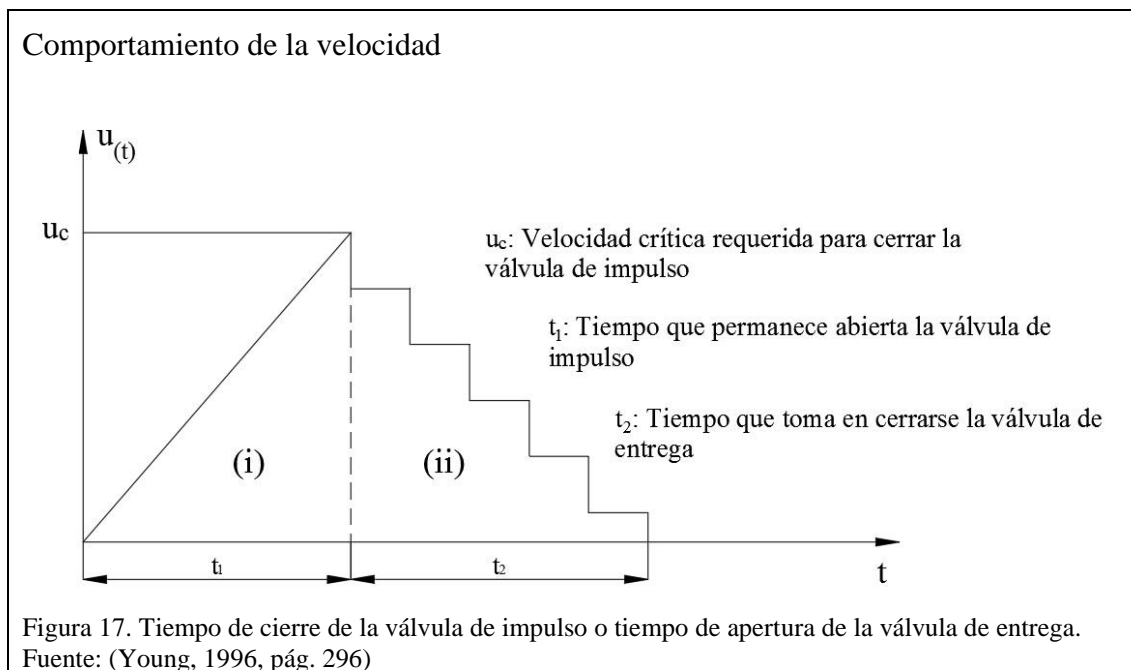
$$n = \frac{60}{T_{total}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

T_{total} : El tiempo total de una pulsación; (s).

$$T_{total} = t_1 + t_2 \quad \text{Ecuación 14}$$

En la siguiente figura se observa el comportamiento de la velocidad crítica requerida para cerrar la válvula de impulso.



Para esto es necesario calcular los tiempos de cierre y apertura tanto de la válvula de entrega como de la de impulso (Kumar, pág. 12).

$$t_1 = L \times \frac{v_{max}}{(h_u - H_s) \times g} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

t_1 =Tiempo de cierre de la válvula de impulso o tiempo de apertura de la válvula de entrega; (s).

L = Longitud tubería de suministro 39m.

$$t_1 = 39m \times \frac{10.6146 \frac{m}{s}}{(60.53m - 10.53) \times 9.8 \frac{m}{s^2}}$$
$$t_1 = 0.8483s \approx 0.9s$$

Se procederá con el cálculo del tiempo de cierre de la válvula de entrega.

$$t_2 = L_2 \times \frac{v_{\max}}{(h_u - H_s) \times g} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

t_2 =Tiempo que toma en cerrar la válvula de entrega; (s).

L_2 = Longitud de la tubería de suministro medida desde la caída 18m

$$t_2 = 18m \times \frac{10.6146 \frac{m}{s}}{(60.53m - 10.53m) \times 9.8 \frac{m}{s^2}}$$
$$t_2 = 0.3899s \approx 0.4s$$

De acuerdo a los datos obtenidos de t_1 y t_2 , el tiempo total es.

$$T_{total} = 0.9s + 0.4s$$

$$T_{total} = 1.3s$$

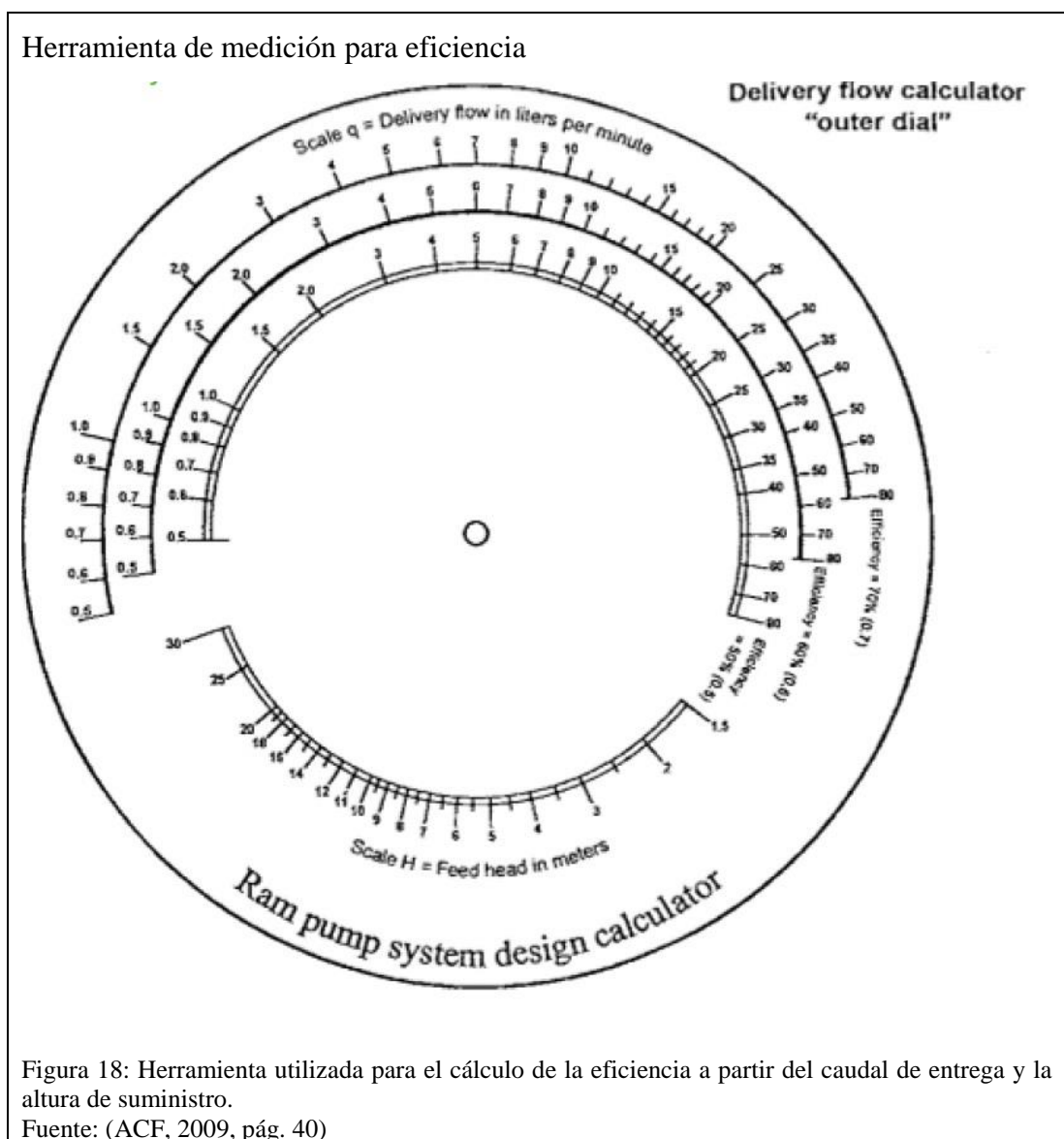
Retomando la Ecuación 13. El número de pulsaciones será 46 por minuto.

$$n = \frac{60}{1.3} = 46 \text{ pulsaciones}$$

2.5.4. Eficiencia del ariete hidráulico

Una vez calculados los parámetros de interés, como el caudal de entrega y la altura de suministro, se procede a encontrar el valor de eficiencia del equipo que será del 50%, a través de la herramienta “disco de eficiencia” provisto por el DTU (ACF, 2009, pág. 40).

En la figura 18 se muestra la escala utilizada para el cálculo de eficiencia a partir del caudal de entrega y la altura de suministro.



2.5.5. Caudal de suministro

Una vez calculados la eficiencia y el caudal de entrega, se procederá a obtener el valor del caudal de suministro requerido para el sistema de bombeo. Según Jeffery (1992)

La siguiente ecuación permite calcular dicho parámetro.

$$Q_s = \frac{q_e \times h_u}{E \times H_s} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$Q_s = \frac{0.00013 \frac{m^3}{s} \times 60.53m}{0.50 \times 10.53m}$$

$$Q_s = 0.00149 \frac{m^3}{s} \rightarrow 89.4 \frac{l}{min}$$

2.5.6. Caudal desechado

El balance de los valores entre los caudales de suministro y entrega corresponderá al caudal de desecho, descrito en la siguiente ecuación.

$$Q_s = Q_d + Q_e \quad \text{Ecuación 18}$$

$$Q_d = Q_s - Q_e$$

$$Q_d = 0.00149 \frac{m^3}{s} - 0.00013 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_d = 0.00136 \frac{m^3}{s} \rightarrow 81.56 \frac{l}{min}$$

2.5.7. Cálculo de la sobrepresión generada en el ariete hidráulico

Según Bergada (2012), la sobrepresión del sistema se genera debido al cierre brusco de la válvula de impulso, de acuerdo con la ecuación de Joukowsky, se obtiene la siguiente expresión (pág. 577).

$$P = \rho \times C \times v_2$$

Ecuación 19

Donde:

$$\rho : \text{Densidad del agua a } 17^\circ\text{C: } 999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

C : Celeridad; (m/s).

- Celeridad

La onda que se forma en el interior del fluido, se la puede considerar como una variación ya sea en la velocidad de flujo, presión o ambas en un corto período de tiempo, la cual se propagará en su interior. Es así que la celeridad es considerada como un fenómeno temporal generado por la intervención de fuerzas externas y su velocidad de propagación (Sotelo, 2002, pág. 227).

El cálculo de la celeridad corresponde a la siguiente ecuación descrita por Arnalich (2008) la cual permite definir la sobrepresión que resistirá la tubería al golpe de ariete (pág. 85).

$$C : \sqrt{\frac{1}{\rho \times \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D_i}{E \times e} \right)}}$$

Ecuación 20

Donde:

C : Celeridad o velocidad de propagación de la onda de sobrepresión

E_v : Módulo de elasticidad volumétrico del agua 2.05 GPa

E : Módulo de elasticidad de Young de la tubería 206.01 GPa

e : Espesor de pared del tubo 0.003m

$$C : \sqrt{\frac{1}{999 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \left(\frac{1}{2.05\text{GPa}} + \frac{0.0543\text{m}}{206.01\text{GPa} \times 0.003\text{m}} \right)}}$$

$$C = 1318.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Al obtener la celeridad generada en el interior de la tubería, se calculará con la Ecuación 20 el valor de sobrepresión.

$$P = 999 \frac{kg}{m^3} \times 1318.66 \frac{m}{s} \times 2.8545 \frac{m}{s} \rightarrow 3.7603 MPa$$

$$P = 545.39 Psi$$

A través de los calculados realizados se sustenta que los métodos utilizados son los más adecuados en cuanto al análisis de cada variable, en el incremento de la capacidad de bombeo de un sistema de ariete hidráulico para alcanzar alturas de bombeo de 50 metros. Estos valores podrán ser comprobados en las pruebas de funcionamiento con los resultados obtenidos en las pruebas de campo.

CAPÍTULO 3

3. REDISEÑO DE COMPONENTES

3.1. Introducción

Este capítulo se enfocará en el rediseño y mejoramiento de los componentes que conforman el ariete hidráulico, de tal modo que se logre optimizar la eficiencia y la capacidad de bombeo del equipo para obtener la descarga del fluido a 50 metros de altura.

La tubería de succión, cámara de aire y la válvula de impulso son los componentes en los cuales se realizará el rediseño, debido a que estos elementos soportarán toda la sobrepresión generada en el sistema, es por esta razón que su funcionamiento debe ser mejorado.

3.2. Componentes a rediseñar

3.2.1. Tubería de succión

La parte esencial de la instalación se encuentra en la línea de succión, ya que será la encargada de soportar el efecto de martillo del golpe de ariete, además es necesario implementar un anclaje fijo para la bomba el cual debe estar en una base de concreto como se muestra en el plano ubicado en los Anexos.

Una mala selección del material conllevará a una fractura en las uniones o en las partes expuestas a mayor esfuerzo, es por esta razón que el DTU especifica que el material a seleccionar debe ser acero galvanizado además de sus accesorios.

De acuerdo a las recomendaciones, para alturas de bombeo de 50 metros en adelante es necesario implementar un diámetro de tubería de 2 pulgadas para un caudal de suministro de 60 a 120 litros por minuto (University of Warwick, 1998, pág. 2).

El incremento en el diámetro de la tubería de succión reducirá las pérdidas por fricción, además permite cumplir con las velocidades recomendadas para un flujo esperado.

3.2.2. Válvula de impulso

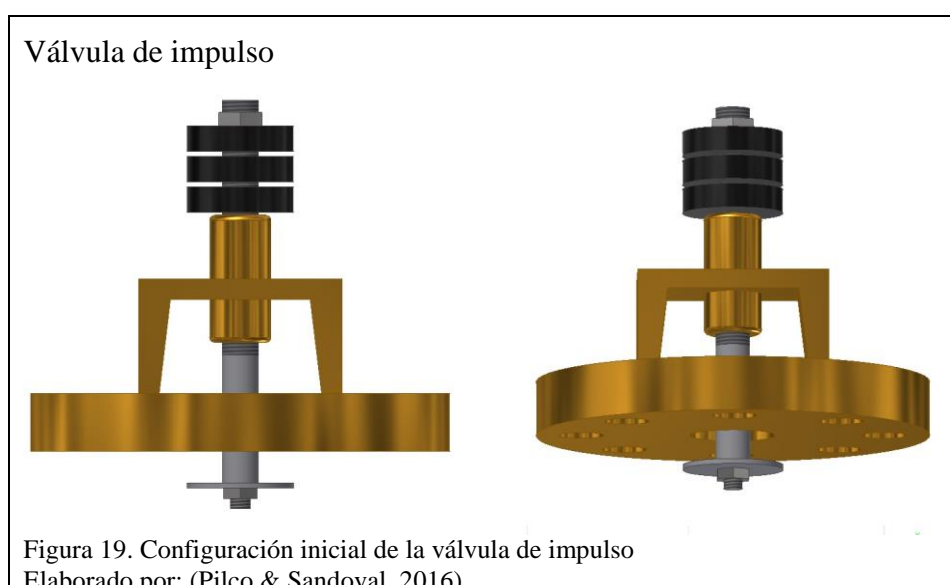
En las pruebas iniciales se detalló que este elemento presentó algunos inconvenientes en su funcionamiento, en la tabla 10 se detallan las características preliminares de operación preliminar.

Tabla 10. Características iniciales de operación de la válvula de impulso.

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Material</i>	<i>Cantidad</i>
Placa	160x160x10mm	A-36	1
Selección perfil	UPN80	Acero al Carbono	1
Bocín	3/8 pulg NPT	Bronce	1
Vástago	5/16 pulg diámetro, 6 pulg longitud.	INOX 304	1
Pesas	42 mm diámetro, 10 mm espesor.	A-36	3

Nota: Detalles preliminares de la válvula de impulso.
Fuente: (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 78)

En la figura 19 se muestra a detalle la configuración inicial de la válvula de impulso.



- **Pruebas iniciales**

Éste elemento presentó fallas en las pruebas preliminares, su longitud evita que el eje se desplace de manera correcta, obteniendo una carrera corta. Su diámetro de 5/16 pulgadas, se flexiona con las pesas. Logrando un resultado de operación nulo.

- **Rediseño del vástago de la válvula de impulso**

Se construirá en acero AISI 304, debido a que estará en contacto directo con agua y a la intemperie.

El cambio constará en aumentar su longitud para poder albergar mayor cantidad de pesas, alcanzar una carrera más larga del eje, y así mejorar el desempeño de este elemento.

Al ejecutar el rediseño del vástago se obtendrán los siguientes beneficios.

Tabla 11. Beneficios en el rediseño del vástago.

<i>Modificación</i>	<i>Beneficio</i>
Longitud	Albergar mayor número de pesas, para regular el caudal bombeado y mejorar la carrera
Diámetro	Aumentar la resistencia mecánica y reducir vibraciones
Tope de carrera	Obtener una carrera fija y máxima del vástago

Nota: Beneficios obtenidos en el rediseño del vástago
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

- **Cálculo del peso máximo**

El uso de pesas en la válvula de impulso permite controlar la velocidad de apertura y cierre de la misma, además del volumen de caudal que se suministrará a la descarga,

por lo que éstas otorgarán una regulación del caudal según las exigencias requeridas. Con esta regulación se podrá trasladar el fluido a diferentes alturas de bombeo. Al comprobar que la carga inicial no fue la necesaria para cerrar la válvula de impulso se procederá a realizar el cálculo de peso para el caudal disponible y la altura de total del sistema, de acuerdo con (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 41), se expresa que un peso máximo calculado será el necesario para soportar al fluido y de esta manera cerrar la válvula caso contrario no se producirá este efecto, para lo cual se aplicará la siguiente fórmula.

$$0 < W_v < W_{\max} = \frac{c_{ar} \times A_v \times \rho \times h_u}{h_{LM} + h_{Lm}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde:

W_v : Peso de la válvula; (kg).

A_v : Área de sección transversal de la válvula $0.0014m^2$ (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 61).

c_{ar} : Coeficiente de arrastre 1.17 de la válvula de impulso (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 61).

h_u : Altura auxiliar; (m).

ρ : Densidad del agua $17^\circ C$: $999 \frac{kg}{m^3}$

$$W_{\max} = \frac{1.17 \times 0.0014m^2 \times 999 \frac{kg}{m^3} \times 60.53m}{10.5298}$$

$$W_{\max} = 9.40kg$$

- **Peso del Vástago**

Se procederá a obtener el peso del vástago con sus nuevas dimensiones mediante la siguiente ecuación.

$$W_{vt} = V_{vt} \times \delta_{vt} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

W_{vt} : Peso del vástago; (kg).

V_{vt} : Volumen del vástago; (m³).

l_{vt} : Longitud del vástago; (m).

D_{vt} : Diámetro del vástago ½ pulgada; (m).

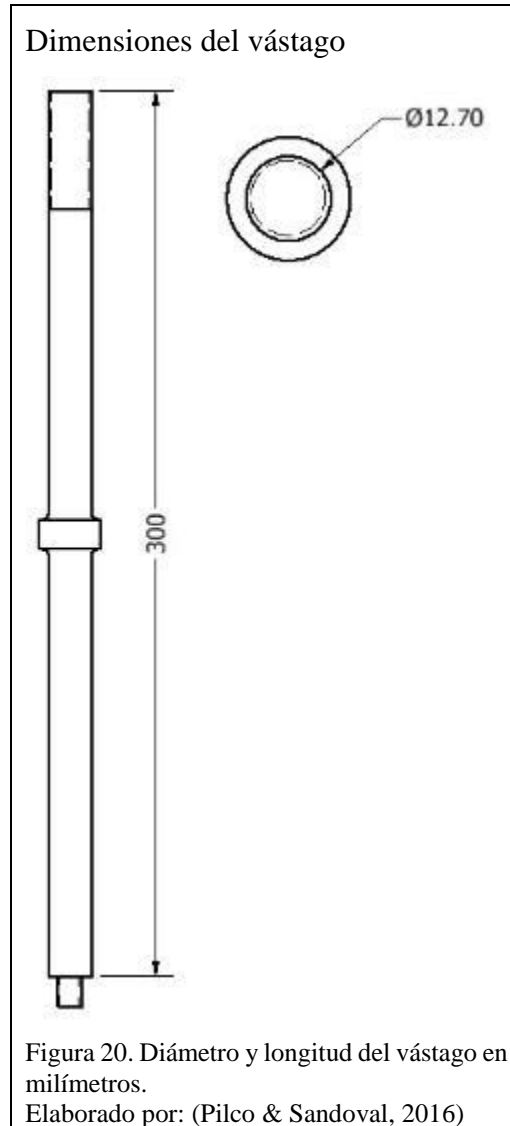
δ_{vt} : Densidad del vástago (AISI 304) $7900 \frac{kg}{m^3}$

$$W_{vt} = \frac{\pi}{4} \times D_{vt}^2 \times l_{vt} \times \delta_{vt}$$

$$W_{vt} = \frac{\pi}{4} \times (0.0127m)^2 \times 0.3m \times 7900 \frac{kg}{m^3}$$

$$W_{vt} = 0.3kg$$

En la figura 20 se evidencian las nuevas dimensiones en cuanto a la longitud y diámetro del vástago que será colocado en la válvula de impulso, el material con que se construirá el eje será acero inoxidable



- **Peso de las cargas**

Para el cálculo de las dimensiones y peso de las cargas, se utilizará el peso disponible el cual será el valor de carga que soportará la válvula de impulso. Se lo obtendrá a través del valor de la carga máxima que soportará el sistema, al restar los pesos del vástago y pie de la válvula, el cual se lo encuentra mediante la siguiente ecuación.

$$W_{dp} = W_{\max} - W_{vt} - W_{pv} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde:

W_{pv} : Peso del pie de la válvula (0.052 kg) (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 62)

$$W_{dp} = 9.40kg - 0.3kg - 0.052kg$$

$$W_{dp} = 9.048kg$$

El valor de peso disponible permite encontrar el valor unitario de cada carga. Con el fin de obtener distintas configuraciones de cargas en la válvula de impulso, para un número de 6 pesas colocadas en el eje del vástago se obtendrá el peso unitario.

$$W_{ps} = \frac{9.048kg}{6}$$

$$W_{ps} = 1.508kg$$

Una vez que se ha obtenido este valor se procederá a encontrar sus dimensiones, mediante la siguiente ecuación.

$$W_{ps} = V_{ps} \times \delta_{ps} \quad \text{Ecuación 24}$$

Donde:

W_{ps} : Peso de una carga; (kg).

V_{ps} : Volumen de una pesa; (m^3).

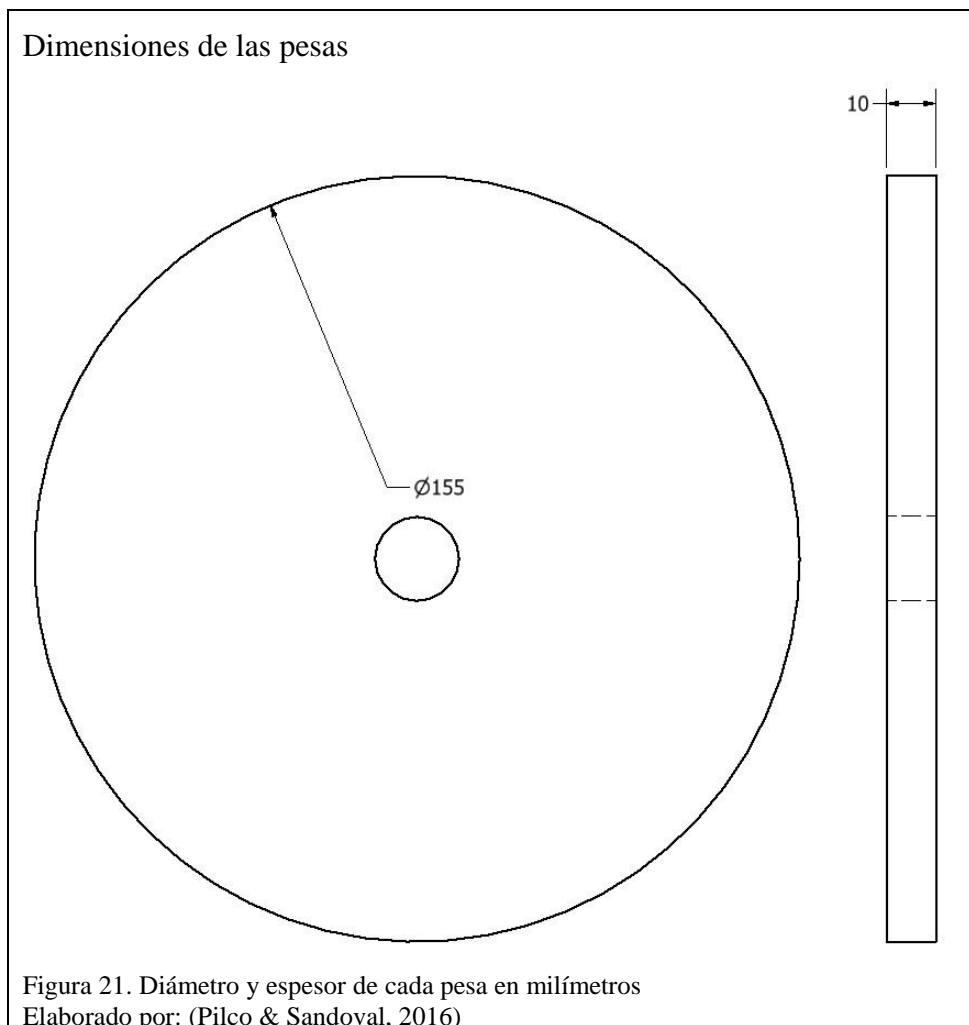
δ_{ps} : Densidad del acero (A 36) $7860 \frac{kg}{m^3}$

$$V_{ps} = \frac{W_{ps}}{\delta_{ps}}$$

$$V_{ps} = \frac{1.508kg}{7860 \frac{kg}{m^3}}$$

$$V_{ps} = 0.000192 m^3$$

En la siguiente figura se observa las dimensiones de las pesas, para el volumen calculado de acuerdo al material seleccionado.



Una vez calculados todos los pesos de los componentes que se alojaron en la válvula de impulso, se verificará que la nueva configuración no sobrepase el peso máximo necesario para que la válvula se cierre.

Tabla 12. Pesos correspondientes a los elementos que componen la válvula de impulso.

<i>Elemento</i>	<i>Material</i>	<i>Peso kg</i>
Pesas	A36	1.5063
Pie de la válvula	A36	0.0520
Vástago	AISI304	0.3000
Peso Total		1.8583

Nota: Sumatoria del peso total que soportará la válvula de impulso con una pesa.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Por lo tanto, el peso total que se colocará en la válvula de impulso es de 1.8583 kilogramos, y según la nueva configuración el peso máximo que no se debe sobrepasar es de 9.39 kilogramos, para esto el número de cargas que se necesitará será un máximo de 4 pesas, de esta manera se cumplirá la igualdad, caso contrario la válvula no se cerrará.

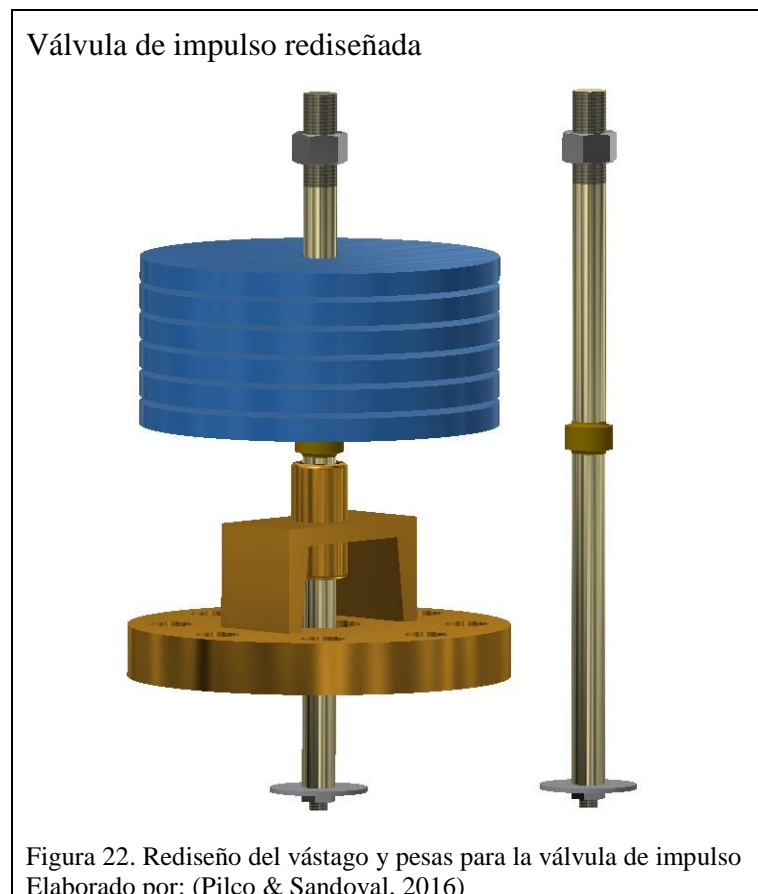
Con la siguiente formula se demostrará este valor.

$$W_{tv} = W_{pv} + W_{vt} + (W_{ps} \times 4) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$W_{tv} = 0.052kg + 0.3kg + (4 \times 1.5063)kg$$

$$W_{tv} = 6.37kg < W_{\max}$$

En la figura 22 se muestra el rediseño del nuevo eje colocado en la válvula de impulso, después de obtener todos los valores requeridos para su funcionamiento.



3.2.3. Cámara de aire

Como se detalló en las pruebas iniciales, la cámara de aire también presentó algunos inconvenientes. En la tabla 13 se describen los elementos con los cuales fue diseñada.

Tabla 13. Características iniciales de la cámara de aire.

<i>Elemento</i>	<i>Descripción</i>	<i>Material</i>
Tubo	diámetro 2 pulgadas	Acero al carbono cédula 80
Brida	diámetro 2 pulgadas	Acero al carbono clase 300
Unión	diámetro 3/8	Acero al carbono NPT

Nota: Se detallan los elementos con los que fue diseñado la cámara de aire.
Fuente: (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 76)

- Pruebas Iniciales

En el capítulo anterior se menciona los inconvenientes que presentaron los elementos que componen la bomba de ariete hidráulico, en la cámara de aire se mencionó que la capacidad de amortiguar el golpe de ariete no era insuficiente para el caudal que se posee actualmente, debido a que los manómetros presentaron averías generadas por el exceso de presión.

- Rediseño de la cámara de aire

Para el rediseño de este componente es necesario considerar los siguientes aspectos.

- Su correcto diseño incrementa de manera significativa la eficiencia de la bomba (ACF, 2009, pág. 18).
- Al instalar una cámara de aire con un diámetro de 3 pulgadas en adelante, se obtendrá un flujo continuo en la tubería de descarga (tanque de almacenamiento) (Sierra & Biancha, 2012, pág. 72).

- Cálculo del volumen en la cámara de aire

Para proceder con el rediseño de la cámara de aire, se optó por utilizar el método mencionado en el capítulo 2, con el cual se hallará las dimensiones de la cámara de aire, el volumen de agua contenida en la tubería de entrega debe ser igual al volumen de la cámara como se describe en la siguiente ecuación (Rivadeneira & Silva, 2013, pág. 65).

$$V_{te} = \frac{\pi \times \theta^2}{4} \times h_e \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

V_{te} : Volumen tubería de entrega; (m^3).

V_{ca} : Volumen cámara de aire; (m^3).

h_e : Altura de entrega; (m).

θ : Diámetro interno de la tubería de descarga $\frac{1}{2}$ pulg $\rightarrow 0.00870m$

$$V_{te} = \frac{\pi \times (0.00870m)^2}{4} \times 60.53m$$

$$V_{te} = 0.00360 m^3 \rightarrow 3.59l = V_{ca}$$

- Cálculo de la altura en la cámara de aire

Al calcular el valor del volumen almacenado de agua, se procederá a encontrar la altura total de la cámara de aire.

$$V_{ca} = \frac{\pi \times \theta_i^2}{4} \times h_{ca} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde:

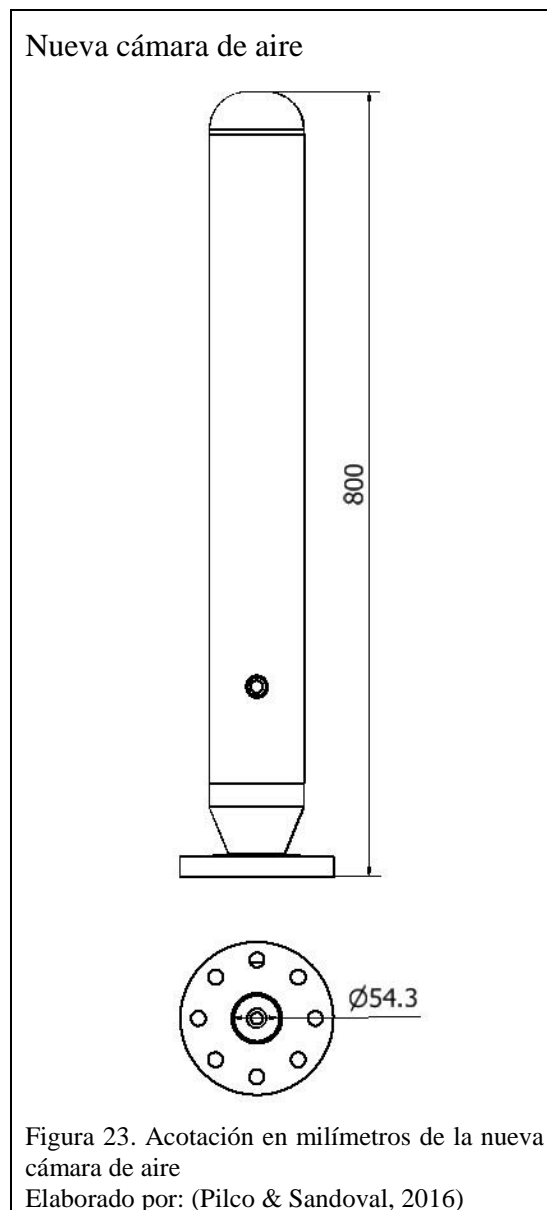
h_{ca} : Altura de la cámara de aire; (m).

θ_i : Diámetro interno de cámara de aire 3 pulg=0.0762m.

$$h_{ca} = \frac{0.00360m^3 \times 4}{\pi \times (0.0762m)^2}$$

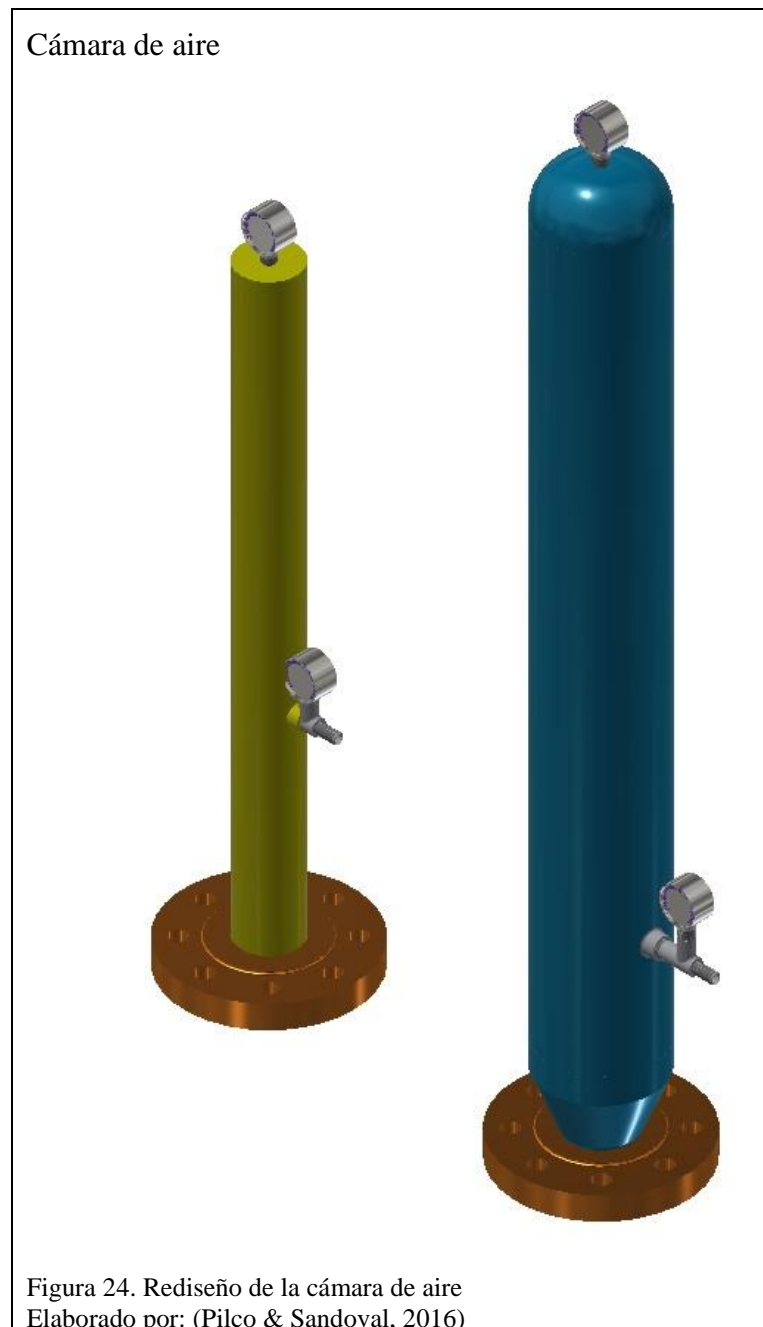
$$h_{ca} = 0.78m$$

A continuación, en la figura 23 se describen las dimensiones de la nueva cámara de aire que será instalada en el cuerpo de la bomba.



El diámetro de la cámara corresponderá a 3 pulgadas, el material con el que se construirá será de acero galvanizado; además se utilizará una reducción de 3 a 2 pulgadas debido a que el cuerpo del ariete está construido con elementos normalizados correspondientes a esta medida. El diseño se basará en estas dimensiones, es así que el amortiguamiento del golpe de ariete será aumentado y el caudal de descarga será continuo.

En la figura 24 se aprecia el cambio de rediseño comparado con el antiguo modelo de la cámara de aire.



El rediseño de los elementos descritos en este capítulo fue realizado de acuerdo a las exigencias requeridas, con el fin de alcanzar una altura de bombeo de 50 metros, dichas modificaciones permitirán obtener un óptimo desempeño del ariete hidráulico desde su puesta en marcha, además de facilitar la correcta toma de datos en las pruebas de funcionamiento.

CAPÍTULO 4

4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se muestran los resultados finales de operación del ariete hidráulico, una vez que ha sido instalado con todos los requerimientos necesarios para alcanzar una altura de bombeo de 50 metros, además de realizar un rediseño adecuado de sus componentes principales (tubería de succión, válvula de impulso, cámara de aire).

4.2. Pruebas de Funcionamiento

Tabla 14. Valores obtenidos en las pruebas de funcionamiento.

<i>Prueba</i>	<i>Valor Calculado</i>	<i>Valor obtenido</i>
Altura de suministro	10.53m	10.53m
Altura de entrega	h_e 50m	h_e máxima 55.78m
Caudal de suministro	90 l/min	321.3 l/min
Caudal de entrega	7.83 l/min	7 l/min

Nota: Se muestra la comparación entre los valores obtenidos en la prueba de funcionamiento realizado en campo con respecto a los valores calculados.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

4.3. Instrumentos de medición

Con el fin de obtener resultados precisos en los valores de caudal de suministro, altura de entrega, entre otros. Se llevó a cabo la utilización de equipos con tecnología adecuada para cada operación como medidores de flujo, altímetro, estación total y manómetros.

4.3.1. Medidor de flujo

El medidor de flujo por ultrasonido permite obtener un valor aproximado de caudal de suministro.

Tabla 15. Medidor de flujo ultrasónico

<i>DCT-7088 Medidor de flujo</i>	
<i>Especificaciones de operación</i>	
Rango de caudal	± 0 a 50 pie/s (± 0 a 15 m/s)
Precisión	$\pm 0.5\%$ de la velocidad o 0.05pie/s (0.0152m/s) usualmente en un sistema calibrado/digital output
Sensibilidad	0.001pie/s (0.3mm/s) a cualquier tasa de flujo incluido cero
Linealidad	0.1% de la escala, digital output
Dimensión tubería	1 a 200pulg (25mm a 5m)
Fluido	Líquidos homogéneos sin burbujas de gas

Nota: Especificaciones de operación del medidor de flujo ultrasónico
Fuente: (Electron, 1998, pág. 9)

En la figura 25 se aprecia el medidor de flujo ubicado en la línea de succión.



4.3.2. Estación total

Este instrumento consiste de un distanciamiento, un micro procesador y un nivel electrónico que facilita la tarea de cálculo de altura a través de un punto de referencia.

Tabla 16. Estación total

TRIMBLE S6 DR PLUS	
Medición de ángulos	
Tipo de sensor	Codificador absoluto con lectura diamétrica
Precisión (Desviación típica según DIN18723)	2" (0.6mgon)
Alcance	
Modo Prisma (Bajo condiciones despejadas estándar)	
1 prisma	2500m (8202pies)

Nota: Especificaciones técnicas de la estación total TRIMBLE S6 DR PLUS
Fuente: (Trimble VISION, 2013, pág. 2)

En la figura 26 se observa al equipo en operación utilizado para encontrar la altura de suministro y entrega.



4.3.3. Manómetros

Con respecto a la medición de presión se utilizó manómetros en la descarga del fluido, la cámara de aire y en el cuerpo de ariete.

Tabla 17. Manómetro Winters

<i>Especificaciones</i>	
Carátula	1,5" (40mm), 2"(50mm), 2.5"(63mm), 4"(100mm) aluminio blanco con marcaciones en rojo y negro
Conexión	1/8", 1/4" y 1/2" NPT o BSPT
Limite de sobrepresión	25% de fondo de escala
Presión de trabajo	Máximo 75% de fondo de escala (200PSI)
Temperatura de proceso	(-40°C a 65°C) (-40°F a 150°F)
Exactitud	3-2-3%
Grado de protección	IP52

Nota: Especificaciones de manómetros utilizados en la instalación del ariete
Fuente: (Winters Instruments, 2008, pág. 4)

En la figura 27 se muestra la ubicación de los manómetros en el ariete hidráulico.



4.4. Banco de Pruebas

4.4.1. Primera prueba de funcionamiento

En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos en la prueba de funcionamiento número uno del ariete.

Tabla 18. Datos obtenidos en la primera prueba de funcionamiento

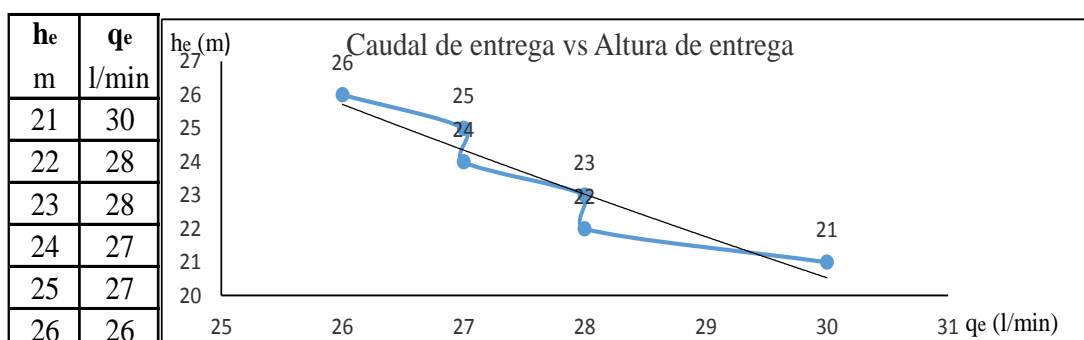
Carrera	Caudal		Pesas	Pulsaciones	Presión			Eficiencia	Altura	
	Suministro Q_s	Entrega q_e			Cámara de aire	Cuerpo	Descarga		H_s	h_e
cm	l/min		kg	pul/min	PSI			%	m	
3	140.60	30	3	42	90	60	71	43%	10.53	21
3	162.15	28	3	42			76	36%		22
3	166.70	28	3	42			83	37%		23
3	170.38	27	3	41			85	36%		24
4	175.25	27	3	41			90	37%		25
4	180.36	26	3	40			93	36%		26

Nota: Se evidencian los datos obtenidos en la prueba de funcionamiento inicial.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

A continuación, se obtendrán las curvas de operación del sistema correspondientes a la prueba de funcionamiento N°1, al analizar distintos parámetros de interés en el funcionamiento del ariete hidráulico como la altura y caudal de entrega, además de los rangos de presión en la descarga y cámara de aire.

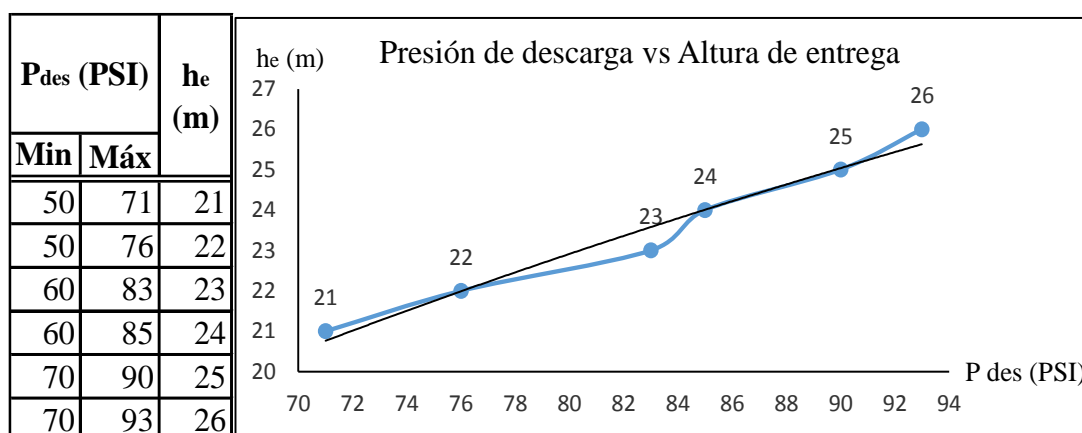
Tabla 19. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°1 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la altura de entrega y el caudal de entrega.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

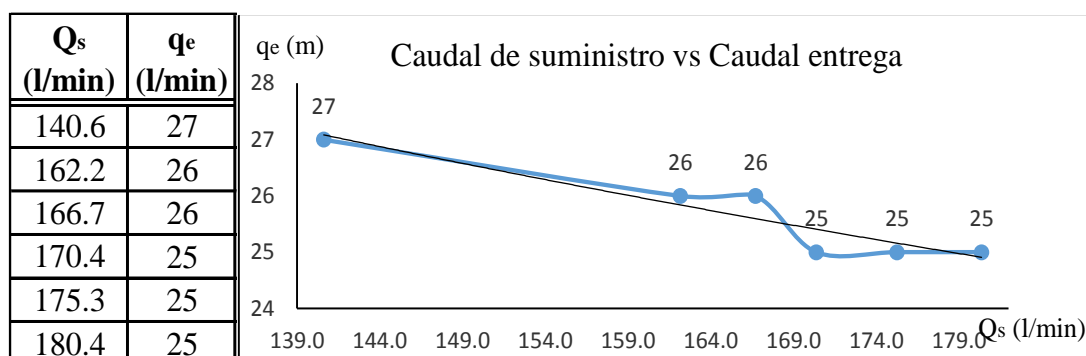
Tabla 20. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°1 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la presión y la altura de entrega.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Tabla 21. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°1 de funcionamiento del ariete hidráulico con distintas configuraciones de las pesas en el eje de la válvula.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

El caudal mínimo de suministro con el cual debe operar el ariete hidráulico corresponde a un valor de 60 l/min, con el fin de obtener alturas de entrega elevadas, es por esto que los valores iniciales de operación obtenidos en la Prueba N°1 concuerdan con la recomendación propuesta por el DTU debido a la disponibilidad del fluido en la captación. A pesar de alcanzar dicho valor en el caudal de suministro recomendado, no se logró obtener la altura de entrega deseada 50 metros.

4.4.2. Segunda prueba de funcionamiento

En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos en la segunda prueba de funcionamiento del ariete, al variar distintos parámetros.

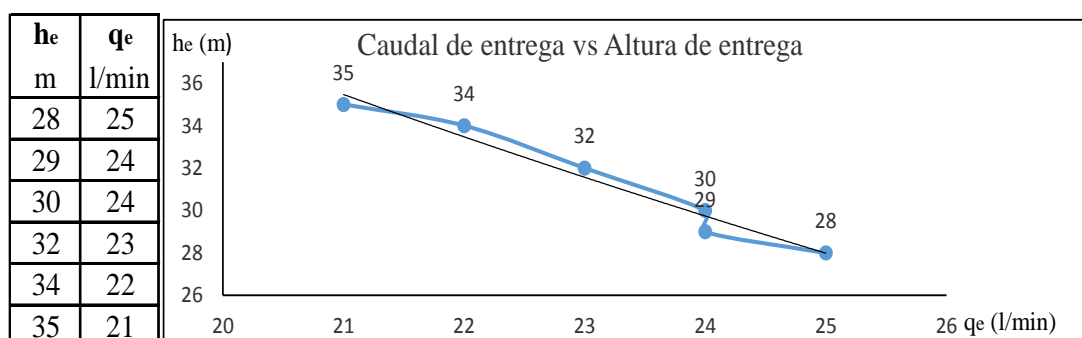
Tabla 22. Datos obtenidos en la segunda prueba de funcionamiento

Carrera	Caudal		Pesas	Pulsaciones	Presión			Eficiencia	Altura	
	Suministro Q_s	Entrega q_e			Cámara de aire	Cuerpo	Descarga		H_s	h_e
cm	l/min		kg	pul/min	PSI			%	m	
4	214.1	25	4	40	120	100	95	31%	10.53	28
4	219.6	24	4	40			98	30%		29
4	246.6	24	5	39			105	28%		30
5	256.3	23	5	39			112	27%		32
5	259.6	22	5	39			120	27%		34
5	273.8	21	5	39			125	25%		35

Nota: Se evidencian los datos obtenidos en la segunda prueba de funcionamiento.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

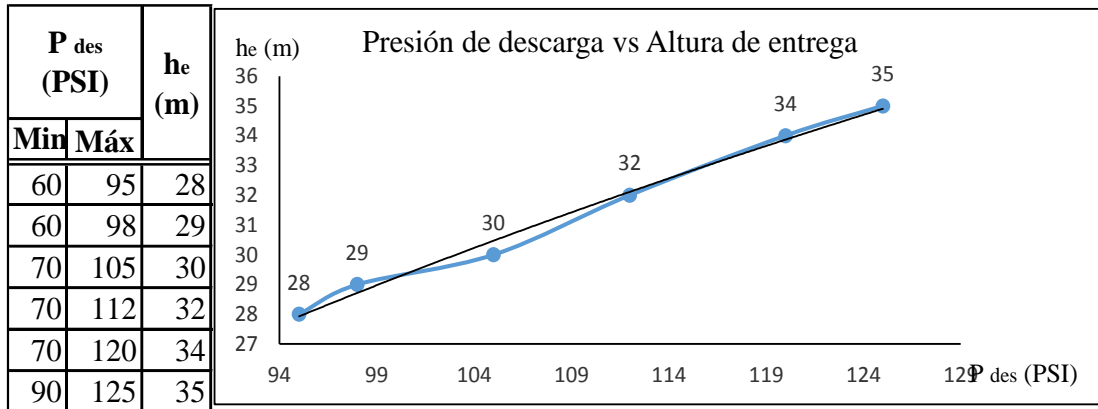
A continuación, se obtendrán las curvas de operación del sistema correspondientes a la prueba de funcionamiento N°2.

Tabla 23. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°2 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la altura de entrega y el caudal de entrega.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

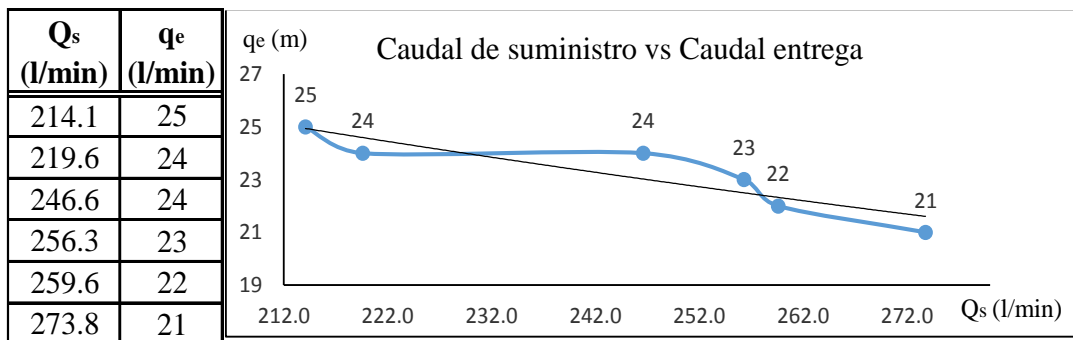
Tabla 24. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°2 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la presión y la altura de entrega.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Tabla 25. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°2 de funcionamiento del ariete hidráulico con distintas configuraciones de las pesas en el eje de la válvula.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Como se muestra en la tabla 25, el caudal que ingresa a la bomba de ariete es mayor con respecto al primer análisis, una vez que se realizaron adecuaciones en la instalación con el fin de aprovechar al máximo la cantidad de agua represada en el reservorio.

El análisis realizado, anteriormente, en la Prueba N°1 describe la relación existente entre el caudal y altura de entrega. Al incrementar la altura de entrega, la cantidad de volumen de agua que será bombeado en la descarga disminuye de manera significativa.

4.4.3. Tercera prueba de funcionamiento

En la siguiente tabla se pueden observar los valores obtenidos en la tercera prueba de funcionamiento del ariete.

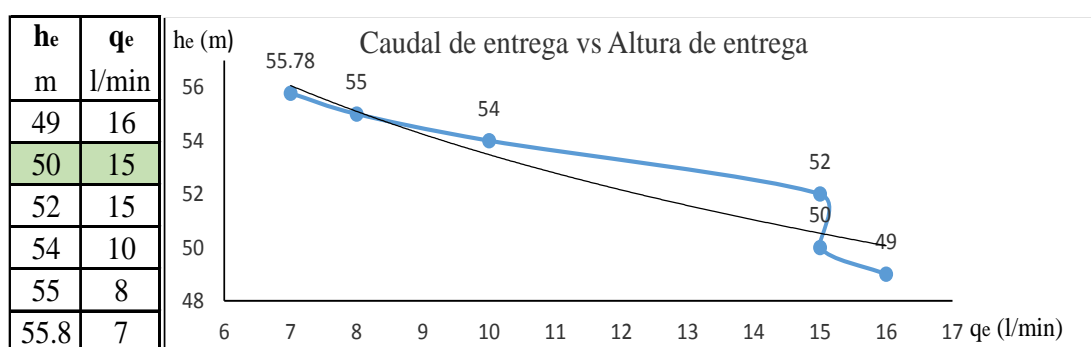
Tabla 26. Datos obtenidos en la tercera prueba de funcionamiento

Carrera	Caudal		Pesas	Pulsaciones	Presión			Eficiencia	Altura	
	Suministro Q_s	Entrega q_e			Cámara de aire	Cuerpo	Descarga		H_s	h_e
cm	l/min		kg	pul/min	PSI			%	m	
5	302.9	16	5	39	200	180	125	25%	10.53	49
5	314.1	15	5	38			140	23%		50
5	321.3	15	6	37			160	23%		52
5	322.6	10	7	37			190	16%		54
5	322.8	8	7	37			200	13%		55
5	323.8	7	7	37			220	11%		55.8

Nota: Se evidencian los datos obtenidos en la tercera prueba de funcionamiento.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

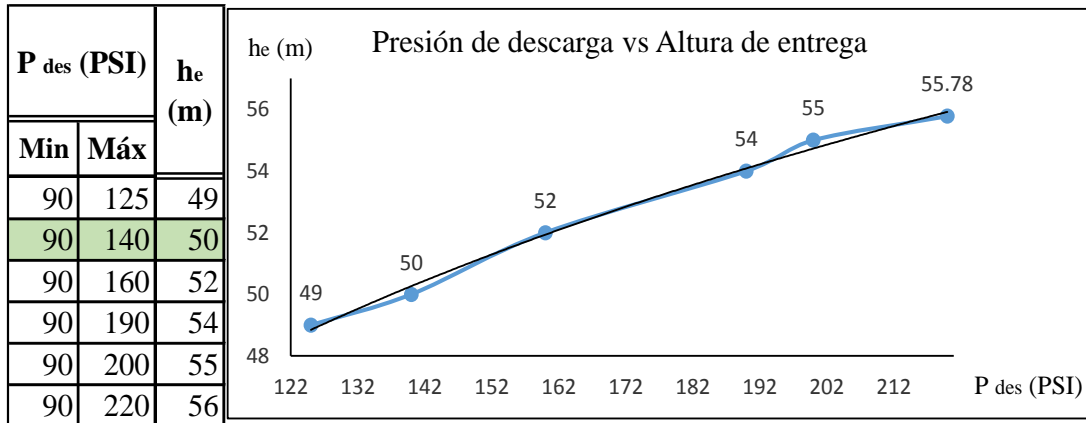
A continuación, se obtendrán las curvas de operación del sistema correspondientes a la prueba de funcionamiento N°3.

Tabla 27. Datos obtenidos caudal de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°3 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la altura de entrega y el caudal de entrega.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

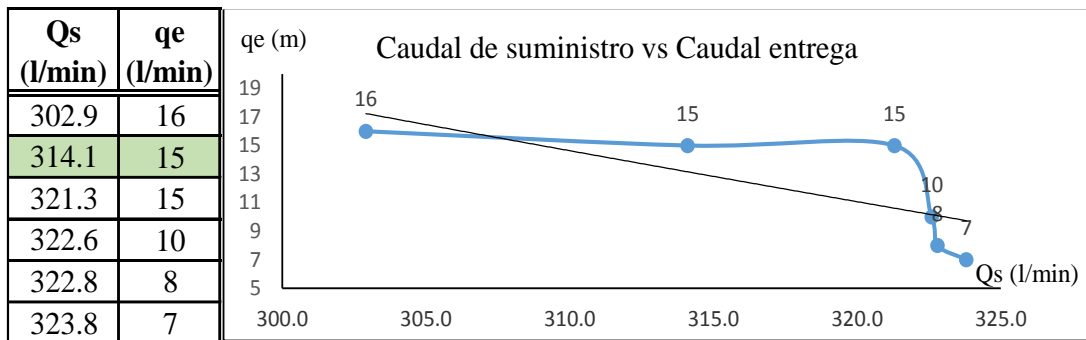
Tabla 28. Datos obtenidos presión tubería de entrega y altura de entrega.



Nota: Datos obtenidos en las pruebas N°3 de funcionamiento del ariete hidráulico con respecto a la presión y la altura de entrega.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Tabla 29. Datos obtenidos caudal de suministro y caudal de entrega.



Nota: Valores finales de operación del ariete hidráulico, se muestran los datos de operación con los cuales se estabiliza el equipo y se supera la altura de entrega deseada.

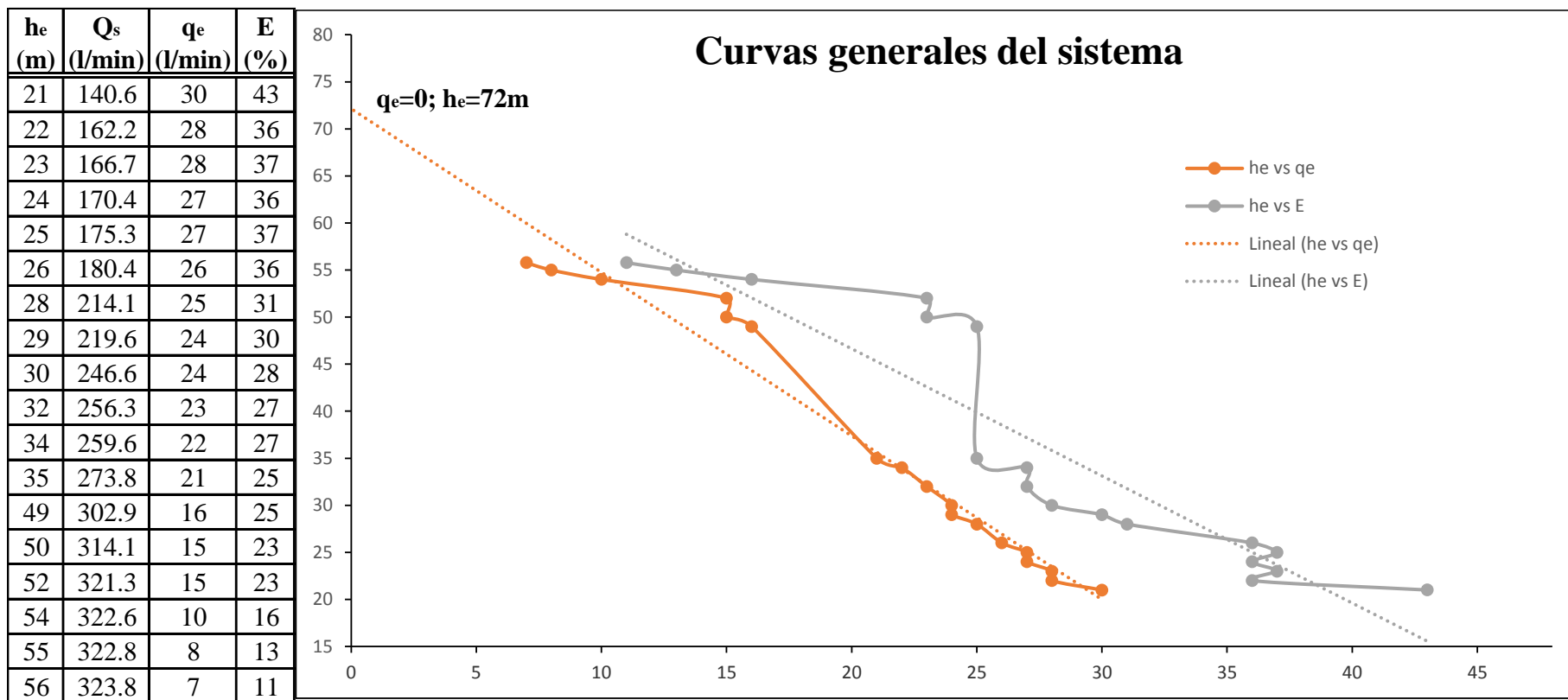
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

En la prueba de funcionamiento N° 3, el equipo se estabilizó en un tiempo de funcionamiento mayor a 20 min, con un caudal de suministro de 323,8 l/min y un peso de 7 kg en el eje de la válvula de impulso como se aprecia en la tabla 29.

Sin duda alguna, el análisis realizado en las pruebas anteriores, permite verificar que a mayor altura de entrega se aprovechará al máximo el volumen de la cámara de aire debido a la sobrepresión generada en el interior de la misma, obteniendo un caudal de descarga en el tanque de almacenamiento de 7 l/min.

Con el propósito de analizar todos los datos de operación del sistema, se procederá a obtener la gráfica general de funcionamiento del equipo.

Tabla 30. Datos generales de operación



Nota: Curvas generales de operación
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

4.5. Análisis de resultados

A través de los resultados obtenidos en las tres pruebas de funcionamiento se determinó que el equipo alcanzó su estabilidad después de una hora de funcionamiento logrando suministrar 7 litros por minuto en la descarga, al colocar un peso de 7 kilogramos en la válvula de impulso, además de contar con un caudal de suministro de 323.8 litros por minuto, a una altura de 55.78 metros.

Continuando con el objeto de estudio, la altura a ser alcanzada es de 50 metros. Para esto se debió configurar por varias ocasiones el peso de las cargas en la válvula de impulso, obteniendo un peso adecuado de 5 kilogramos mediante el cual se pudo conseguir un caudal de entrega de 15 litros por minuto con un caudal de suministro de 314.1 litros por minuto. Es por esta razón que para una altura, gradualmente, mayor se debe colocar un valor de cargas proporcional a la misma.

Otro dato relevante es la relación existente entre la altura y el caudal de entrega, ya que a mayor altura de entrega el caudal en la descarga disminuye como se hace referencia en la tabla 27 y su respectiva gráfica.

En cuanto al rendimiento del equipo se pudo observar mediante la tabla 30 que a mayor altura de entrega la eficiencia del equipo disminuye.

Es por estos resultados que el caudal de entrega tiende a cero a una altura no mayor a 75 metros como se explica gráficamente en la tabla 30.

Finalmente, el equipo se estabilizó en un rango de fluctuaciones de presión con valores entre 150 PSI a 200 PSI, tanto en la descarga y en la cámara de aire, es por esto que la sobrepresión generada permitió alcanzar los 50 metros de altura.

CAPÍTULO 5

5. COSTOS

5.1. Introducción

Este capítulo se enfoca al análisis financiero de los costos del proyecto, es decir los gastos incurridos tanto en el rediseño de componentes, materia prima, accesorios normalizados, costos de mano de obra en la nueva instalación y distintos recursos que fueron involucrados en la finalización del proyecto.

5.2. Costos directos

Son todos los costos relacionados directamente con la realización del proyecto como por ejemplo, mano de obra, materia prima, máquinas empleadas para la ejecución del mismo, entre otros.

5.2.1. Costo de materia prima

A continuación, se describe la cantidad de materia prima utilizada en el transcurso del proyecto.

Tabla 31. Gastos materia prima

<i>Descripción</i>	<i>Valor unitario</i>	<i>Cant</i>	<i>Valor total</i>
Tubo ISO galvanizado (diámetro 2"; longitud de cada tubo 6 m)	\$32.00	6	\$192.00
Manguera PVC (diámetro ½ pulg; longitud de 100 m)	\$49.00	1	\$49.00
Tubo AC S/C SCH 80 (diámetro 3 "; longitud de 1 m)	\$22.80	1	\$22.80
Eje de acero inoxidable AISI 304 (5/8 x 12 pulg)	\$4.00	1	\$4.00
Cemento HOLCIM Fuerte tipo GV (saco)	\$8.24	3	\$24.72
Tubo cuadrado ASTM A36 (40mmx2mmx6mm)	\$18.00	2	\$36.00
Varilla NOVACERO (12 mm)	\$10.08	3	\$30.24
Alambre galvanizado N°18	\$1.00	2	\$2.00
Arena(25 kg)	\$1.71	2	\$3.42
Ripio (25kg)	\$1.71	2	\$3.42
Subtotal			\$367.60

Nota: Se detallan los gastos en materia prima, de acuerdo a las necesidades del proyecto.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

5.2.2. Costo de accesorios y materiales normalizados

En la siguiente tabla se describen los accesorios y elementos normalizados utilizados tanto en la tubería de succión y de descarga.

Tabla 32. Costo de accesorios y elementos normalizados.

<i>Descripción</i>	<i>Valor unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Valor total</i>
Válvula esférica roscable 2 pulg	\$37.66	1	\$37.66
Perno de anclaje de expansión CARGA BAJA (½ x 6pulg)	\$1.70	12	\$20.40
Brida H/N Deslizable (2" x 300)	\$13.68	1	\$13.68
Reducción H/N P/s SCH 40 (3" x 2")	\$6.61	1	\$6.61
Tapón Hembra H/N P/S SCH 40 3"	\$6.16	1	\$6.16
Neplo AC C/40 (2" x 6pulg)	\$5.22	1	\$5.22
Codo AC C/40 (2" x 45)	\$5.74	4	\$22.96
Unión H/N CIFUNSA ULFM 2"	\$2.63	5	\$13.15
Codo H/N CIFUNSA UL/FM 150 90x2"	\$3.75	1	\$3.75
Nudo H/N CIFUNSA UL/FM 2"	\$10.41	2	\$20.82
Subtotal			\$150.41

Nota: Se detallan los gastos en la utilización de los accesorios y materiales normalizados disponibles en el mercado los cuales fueron incluidos en la instalación.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

5.2.3. Costo de mano de obra

En la siguiente tabla se detalla el costo de mano de obra empleado para la realización del proyecto.

Tabla 33. Gastos de mano de obra.

<i>Tarea</i>	<i>Tiempo de ejecución (días)</i>	<i>Valor de mano de obra (usd/día)</i>	<i>Valor total USD</i>
Limpieza: Corte de maleza, adecuación de la zona de operación	5	\$30.00	\$150.00
Colocación de la tubería de succión	4	\$40.00	\$160.00
Cimentaciones base de la bomba de ariete	5	\$30.00	\$150.00
Colocación soportes de tubería	2	\$30.00	\$60.00
Colocación tubería de descarga	3	\$30.00	\$90.00
Subtotal			\$610.00

Nota: Se detallan los gastos en cuanto al empleo de mano de obra durante todo el proyecto, basado en las tareas realizadas en orden cronológico.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

5.2.4. Costos de transporte

La instalación fue realizada en la Finca “Albán” en el sector de Tumbaco, por ende, el costo del transporte de materiales y recursos tiene un valor de \$ 100,00.

Tabla 34. Costo total directo

<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>
Costo de materia prima	\$367.60
Costo de accesorios	\$150.41
Costo de mano de obra	\$610.00
Costos de transporte	\$100.00
Costo total directo	\$1,228.01

Nota: Se realiza la suma de los subtotales de los costos directos.

Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

5.3. Costos indirectos

Los gastos o costos indirectos son aquellos que no se vinculan directamente con la realización del proyecto.

Tabla 35. Costos indirectos

<i>Descripción</i>	<i>Cant</i>	<i>Valor unitario</i>	<i>Total USD</i>
Gastos varios	1	\$106.84	\$106.84
Transporte público	50	\$0.45	\$22.50
Transporte privado	20	\$28.00	\$560.00
Impresiones	100	\$0.10	\$10.00
Alquiler estación total	1	\$200.00	\$200.00
Recarga Móvil	20	\$1.00	\$20.00
Costo total indirecto			\$919.34

Nota: Se detalla el valor total de la suma de los costos indirectos.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

5.4. Costo total del proyecto

La suma tanto del costo total directo e indirecto dará como resultado el valor total invertido para la finalización del proyecto.

Tabla 36. Costo total del proyecto.

<i>Descripción</i>	<i>Total</i>
Costo total directo	\$1,228.01
Costo total indirecto	\$919.34
Total	\$2,147.35

Nota: Se define el valor total del proyecto con un monto de \$2147.35
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

CONCLUSIONES

- Las principales alternativas necesarias para incrementar la capacidad de bombeo del ariete analizado hasta una altura de 50 metros, han sido basadas en estudios como el DTU y el ACF los cuales definen que sus componentes y accesorios deben cumplir características específicas para poder soportar el fenómeno del golpe de ariete.
- El sistema de ariete hidráulico disponible en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos permitía elevar 7.2 litros por minuto de agua con una altura de entrega de 12 metros. Al realizar el cambio de tamaño en la tubería de succión, mejoramiento de la válvula de impulso, aumento de diámetro y altura de la cámara de aire permitió proporcionar una altura de 50 metros en la descarga con un caudal de entrega de 15 litros por minuto con una altura de suministro de 10.53 metros.
- La configuración de las pesas en el eje de la válvula de impulso es de 7 kg, el cual permite estabilizar el golpe de ariete, alcanzando presiones en la cámara de aire de hasta 200 psi mejorando el rendimiento del equipo.
- Los resultados permiten establecer las diferentes curvas del sistema, con las que se evidencia el rendimiento del equipo, al operar con las nuevas mejoras implementadas.
- El uso de tubería o manguera de PVC en la succión no es lo más adecuado debido a su baja resistencia al golpe de ariete.
- El incremento de la altura de entrega conlleva a la disminución del flujo de entrega.
- La eficiencia del equipo se ve disminuida al incrementar la altura de entrega.
- Los valores de sobrepresión comprendidos entre 150 PSI y 200 PSI permiten al equipo alcanzar su máxima capacidad de bombeo.

RECOMENDACIONES

- El material de la tubería de suministro debe ser necesariamente de acero galvanizado o inoxidable con el fin de evitar la corrosión, además que este tipo de material soporta altas presiones de al menos 200 psi.
- Se requiere utilizar accesorios en acero galvanizado o inoxidable con el fin de evitar la corrosión, además de soportar presiones de 300 psi en adelante durante el funcionamiento del equipo.
- La apertura de la válvula de alimentación, al arranque, debe realizarse de manera rápida, para generar la sobrepresión necesaria y que se produzca el golpe de ariete en el equipo.
- La cimentación y el sistema de sujeción de la bomba son factores de suma importancia ya que absorben las vibraciones por efecto del golpe de ariete.
- La bomba de ariete debe ser instalada a nivel, para evitar la obstrucción o estancamiento en la carrera del eje de la válvula de impulso.
- El uso de filtros en la tubería de succión es primordial, para evitar el ingreso de sedimentos rocosos hacia la válvula de impulso.
- El agua de captación debe ser almacenada con el propósito de aumentar la presión en la tubería de succión y garantizar un flujo continuo.
- La unión entre la tubería y el tanque de captación requiere un sellado hermético para evitar fugas y asegurar un suministro de agua adecuado.
- El caudal desechado debe ser canalizado para aprovecharlo en otra aplicación.

REFERENCIAS

- ACF. (2009). *Design, sizing, construction and maintenance of gravity-fed system in rural areas*. Soe: ACF mission.
- Aniruddha, D., & Atharva, P. (2016). *Design Methodology for Hydraulic Ram Pump*. Maharashtra: IJRSET.
- Arnalich, S. (2008). *Abastecimiento de agua por gravedad concepción, diseño y dimensionado para proyectos de cooperación*. Publicaciones Arnalich.
- Bergada, J. (2012). *Mecánica de fluidos breve introducción teórica con problemas resueltos*. Barcelona: Publicacions Acadèmiques Digitals de la UPC.
- Bjarnegard, F., & Allen Chou, S. (2006, Junio 29). *Ram pump and solar pump training*. Recuperado el septiembre 21, 2016, de Palangthai: <http://www.palangthai.org/docs/WaterPumpingManualJun06.pdf>
- Campaña, C., & Guamán, D. (2011). *Diseño y Contrucción de una bomba de ariete hidráulico*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cegarra, J. (2012). *Los Métodos de Investigación*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- De Juana, J. (2003). *Energías Renovables para el Desarrollo*. Madrid : Paraninfo .
- Electron, T. (1998). *Polysonics DCT7088 Portable Digital Correlation Transyst Time Ultrasonic Flowmeter*. Houston, Texas: Peek Measurement Inc.
- Google. (2016, Enero 21). *Ubicación geográfica finca Albán Tumbaco*. Recuperado el Abril 18, 2016, de Google Earth GPS.
- Inthachot, M., Saehaeng, S., Max, J., Müller, J., & Spreer, W. (2015). Hydraulic ram pumps for irrigation in Northern Thailand. *Procedia Agriculture and Agricultural Science*, 107-114.
- Jeffery, T. (1992). *Hydraulic ram pumps A guide to ram pump water supply systems*. London: ITDG publishing.

- Kubiec-Conduit. (2013, marzo 20). *Tubería ISO 65 light serie 1*. Recuperado el septiembre 16, 2016, de Fujinox hidro: <http://www.kubiec.com/catalogos/tuberia.pdf>
- Kumar, H. (2016). *Pollution free design and manufacturing of hydraulic ram pump for villages in hill areas*.
- Mott, R. L. (2015). *Mecánica de Fluidos Séptima Edición*. México: PEARSON EDUCATION.
- Pongutá, J. (2003). *Guía para el manejo de energías alternativas*. Bogotá: Convenion Andrés Bello.
- Rivadeneira, S., & Silva, L. (2013). *Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento*. Quito: UPS.
- Romero Guerrero, J. M. (2014). *EL ARIETE HIDRAULICO PROYECTO E INSTALACION EN NTONGUI (Angola)*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.
- Sheikh, S. (2013). *Design methodology for hydraulic ram pump (hydram)*.
- Sierra, C., & Biancha, G. (2012). *Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones*. Bucaramanga: Universidad Internaional de Santander .
- SNI. (2013, Noviembre 15). *Generación de Geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1:25.000 Clima e Hidrología*. Recuperado el Abril 25, 2016, de Secretaría Nacional de Informacion del Ecuador: app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA9/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/PICHINCHA/QUITO/IEE/MEMORIA_TECNICA/mt_quito_clima_hidrologia.doc
- Sotelo, G. (2002). *Hidráulica de canales*. México : UNAM.

- SPXflow. (2016, Abril 30). *CombiNorm Centrifugal Pump*. Recuperado el Mayo 11, 2016, de SPX flow Johnson Pump: <http://www.spxflow.com/en/johnson-pump/pd-mp-centrifugal-pump-combinorm/>
- Trimble VISION. (2013). *ESTACIÓN TOTAL TRIMBLE S6*. Westminster: Trimble.
- University of Warwick. (1998). DTU S2 Hydraulic Ram Pump. *RAM Pump System*, 2-44.
- Valvias. (2013, Junio 13). *Coefficiente de descarga de una válvula*. Recuperado el octubre 15, 2016, de Valvias: <http://www.valvias.com/coeficiente-de-descarga.php>
- Viejo, M., & Álvarez, J. (2004). *Bombas teoría, diseño y aplicaciones*. México: Limusa.
- Watt, S. (1975). *A manual on the hydraulic ram for pumping water*. London: Russel Press.
- Winters Instruments. (2008). *Catálogo de productos*. Toronto: Winters.
- Young, B. (1996). *Symplified analysis and design of the hydraulic ram pump*. New Guinea: Pro Quest Central.
- Yunus, C. (2006). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. México: Mc Graw Hill.

ANEXOS

Rediseño del ariete hidráulico

Rediseño de la bomba de ariete



Figura 28. Instalación del ariete hidráulico con sus nuevos componentes.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Zona de Captación

Zona de Captación



Figura 29. Fuente de agua natural disponible en la instalación
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Tanque de captación

Tanque de captación



Figura 30. Tanque de almacenamiento donde se represará el agua
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Instalación del ariete hidráulico

Instalación del ariete hidráulico



Figura 31. Colocación del ariete hidráulico en la nueva ubicación
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Determinación del ángulo de inclinación en la tubería de succión

Determinación del ángulo de inclinación en la tubería de succión



Figura 32. Se evidencia el dispositivo con el cual se determinó el ángulo de la línea de succión
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Colocación de la tubería de entrega

Colocación de la tubería de entrega



Figura 33. Instalación de la tubería de descarga
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Prueba de funcionamiento inicial

Prueba de funcionamiento inicial



Figura 34. Funcionamiento del ariete hidráulico en sus condiciones iniciales.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Sedimentos Rocosos en el cuerpo del ariete

Sedimentos Rocosos en el cuerpo del ariete



Figura 35. Sedimentos rocosos que obstruyeron el funcionamiento de la válvula de impulso
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Medición de altura en la descarga

Medición de altura en la descarga



Figura 36. Medición de la altura de entrega desde un punto de referencia
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Nueva bomba de ariete

Nueva bomba de ariete



Figura 37. Instalación de la bomba con sus nuevos componentes
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Bomba de ariete rediseñada

Bomba de ariete rediseñada



Figura 38. Instalación del ariete hidráulico con sus respectivas modificaciones.
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Funcionamiento del ariete hidráulico

Funcionamiento del ariete hidráulico



Figura 39. Pruebas finales de operación del equipo
Elaborado por: (Pilco & Sandoval, 2016)

Nomenclatura

<i>Siglas</i>	Significado
<i>ACF</i>	Acción Contra el Hambre
<i>DTU</i>	Development Technology Unit
<i>HYDRAM</i>	Bomba de Ariete
<i>ISO</i>	International Standar Organization
<i>S.N.I</i>	Sistema Nacional de Información
°C	Grados Celsius
<i>s</i>	segundos
<i>min</i>	Minutos
<i>cm</i>	Centímetros
<i>mm</i>	Milímetros
<i>m</i>	Metros
<i>kg</i>	Kilogramos
<i>t</i>	Tiempo
<i>pág</i>	Página
<i>USD</i>	Dólares
<i>l/min</i>	Litros por minuto
<i>bar</i>	14.50 psi (Unidad de presión)
<i>psi</i>	Libras por pulgada cuadrada
<i>pul/min</i>	pulsación por minuto
<i>mgon</i>	miligon unidad de ángulo
<i>pulg</i>	pulgada
<i>NPT</i>	National Pipe Thread
<i>UPN</i>	Perfil europeo normal en "U"
<i>A-36</i>	Acero Estructural 36 Ksi
<i>ASME</i>	American Society Of Mechanical Engineers
<i>ASTM</i>	American Society For Testing and Materials
<i>JIS</i>	Japanese Industrial Standards