

UNIVERSIDAD NACIONAL HERMILIO VALDIZAN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y ARQUITECTURA

ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



**“DISEÑO E INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO MEDIANTE
ARIETE HIDRÁULICO PARA SOLUCIONAR LOS PROBLEMAS DE
AGUA POTABLE DE LA LOCALIDAD DE HUACHOG - CPM COLPA
BAJA DE LA PROVINCIA DE HUÁNUCO”**

PRESETADO POR:

BARDON AQUINO MARIO ELI

CAQUI ACOSTA DAVID

TESIS DE GRADO:

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

ASESOR:

ING. JORGE ZEVALLOS HUARANGA

HUÁNUCO, PERÚ

2017

DEDICATORIA

A Dios por brindarme la oportunidad de vivir,
Conocimiento y fortaleza en cada momento de mi vida,
por estar conmigo en todo momento de mi vida,
por toda la sabiduría, tranquilidad,
amor y bendiciones recibidas.

AGRADECIMIENTO

El sincero agradecimiento a Dios por la vida, a mis queridos padres por el amor, cariño y apoyo brindado, a mis hermanos por ser el ejemplo, guía y apoyo en cada uno de mis pasos, a cada una de mis sobrinas, primas y familias por todo ese cariño brindado.

El grato agradecimiento a la escuela académico profesional de ingeniería civil, por brindarme la oportunidad de obtener una profesión y ser una persona útil para la sociedad.

Mi más grato agradecimiento a cada uno de mis profesores que me guiaron durante la carrera, ya que sin su asesoría y paciencia no hubiera sido posible llegar a la culminación de la carrera.

RESUMEN

La presente tesis se llevó a cabo con un objetivo que es el Diseño e Instalación de un Sistema de Bombeo Mediante Ariete Hidráulico se realiza con la finalidad de abastecer agua a la comunidad Huachog ubicada en el distrito de Huánuco.

El diseño de bombeo cuenta con un caudal disponible de 4lt/s que es captada de un canal existente en la zona, por el cual pasan 20lt/s y una altura disponible de 17m. La bomba de ariete en su funcionamiento óptimo eroga un caudal de 13.2 lt/min, con una carrera de la válvula de impulso de 20mm, 70 golpeteos al minuto, y una altura de descarga de 170 m, cabe recalcar que existe un tanque de reservorio está ubicado a 100m desde el ariete, con una altura de descarga de 100m y un caudal de descarga de 19.8 lt/min. Se selecciona una tubería de presión de 2 pulg., material hierro galvanizado ISO – 65 SERIE LIVIANA II con una longitud de 36m, la tubería de descarga con un diámetro de 1pulg. Material hule DB16, presión 150 psi, con una longitud de 300m.

El sistema de bombeo es ecológico, no requiere de energía ni combustible, está diseñado para una dotación de 28512 lt/día, beneficiándose 57 familias.

Con el aprovechamiento de este sistema de bombeo se busca mejorar el nivel de vida de los moradores, activando así el servicio de agua potable para nuevos usuarios de tal forma que cuenten con los servicios básicos para un adecuado nivel de vida, por otra parte se impulsará a realizar más proyectos como este para el beneficio de esta comunidad y comunidades aledañas.

ABSTRACT

The present thesis was carried out with the objective of the Design and Installation of a Pumping System by Ariete Hydraulics is done with the purpose of supplying water to the community Huachog located in the district of Huánuco.

The pump design has an available flow rate of 4lt / s that is captured from an existing channel in the area, through which 20lt / s and an available height of 17m. The pump in its optimum operation produces a flow of 13.2 lt / min, with a stroke of the 20 mm impulse valve, 70 strokes per minute, and a discharge height of 170 m, it should be noted that there is a reservoir tank Is located 80m from the ram, with a discharge height of 80m and a discharge flow of 19.8 lt / min. A 2in. Pressure pipe is selected, galvanized iron material ISO - 65 65 LIVING SERIES II with a length of 36m, discharge pipe with a diameter of 1in. Material DB16 rubber, pressure 150 psi, with a length of 300m.

The pumping system is ecological, does not require energy or fuel, is designed for an endowment of 28512 lt / day, benefiting 57 families.

With the use of this pumping system seeks to improve the standard of living of the residents, thus activating the potable water service for new users in such a way that they have the basic services for an adequate standard of living, To carry out more projects like this for the benefit of this community and surrounding communities.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1 ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACION DEL PROBLEMA.....	1
1.1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.1.2 FUNDAMENTACION DEL PROBLEMA.....	3
1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA.....	5
1.2.1 PROBLEMA GENERAL.....	5
1.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS.....	5
1.3 OBJETIVOS.....	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	5
1.4 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA.....	6
1.4.1 JUSTIFICACION.....	6
1.4.2 IMPORTANCIA.....	7
1.4.3 LIMITACIONES.....	7
CAPÍTULO II	
MARCO TEORICO.....	8

2.1 LA BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO	8
2.1.1 RESEÑA HSITORICA.....	8
2.2 CONFIGURACION GRAL DE LA BOMBA DE ARIETE	10
2.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA.....	11
2.2.2 CICLO HIDRAULICO DE LA BOMBA DE ARIETE.....	13
2.3 CARTERISTICAS DEL ARIETE HIDRAULICO	18
2.2.1 COLECTOR.....	19
2.2.2 DUCTO DE ENTRADA.....	19
2.2.3 LA BOMBA DE ARIETE.....	20
2.2.4 DUCTO DE SALIDA.....	21
2.4 ESTUDIO DE CAMPO	22
2.4.1 LOCALIZACIÓN POLÍTICA Y GEOGRÁFICA DE LA ZONA.....	22
2.4.2 RECURSOS DISPONIBLES.....	23
2.4.3 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA DISPONIBLE Y LA ALTURA DE DESCARGA.....	24
2.4.4 UBICACIÓN DE LA TOMA DE AGUA Y TANQUE DE CAPTACIÓN.....	25
2.4.5 UBICACIÓN DEL ARIETE.....	27
2.4.6 DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN DEL TANQUE DE DESCARGA.....	28
2.5 MODELO MATEMATICO	29
2.5.1 INTRODUCCION.....	29
2.5.2 TIPOS DE MÉTODOS DE ESTUDIO.....	29
2.5.3 CONCEPTOS DE GOLPE DE ARIETE.....	30
2.5.4 COMPORTAMIENTO DE LA ONDA DENTRO DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE.....	31

2.5.5 Apertura de la válvula de impulso.....	52
2.5.6 Desaceleración del flujo de retorno hacia el reservorio.....	52
CAPÍTULO III HIPOTESIS, VARIABLES E INDICADORES.....	54
3.1 HIPOTESIS.....	54
3.1.1 HIPOTESIS GENERAL.....	54
3.1.2 HIPOTESIS ESPECÍFICA.....	54
3.2 SISTEMA DE VARIABLES E INDICADORES.....	54
3.2.1 VARIABLE INDEPENDIENTE.....	54
3.2.2 VARIABLE DEPENDIENTE.....	54
3.2.3 DEFINICION OPERACIONAL DE VARIABLES.....	55
CAPÍTULO IV MARCO METODOLOGICO.....	56
4.1 TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE ENSAYO.....	56
4.1.1 TIPO DE INVESTIGACION.....	56
4.1.2 NIVEL DE INVESTIGACION.....	56
4.2 UNIVERSO POBLACION Y MUESTRA.....	57
4.2.1 LA POBLACION O UNIVERSO.....	57
4.2.2 LA MUESTRA.....	57
4.3 CALCULOS PROCEDIMIENTOS Y TECNICAS.....	57
4.3.1 DISEÑO MECANICO.....	57
4.3.2 Parámetros de diseño.....	58
4.4 CONSTRUCCION Y MONTAJE.....	122
4.4.1 INTRODUCCION.....	122
4.4.2 CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....	122
4.4.3 Consideraciones generales.....	123

4.4.4 Etapas de construcción del equipo.....	124
4.4.5 Proceso de construcción del ariete hidráulico.....	125
4.4.6 TANQUE DE CAPTACION.....	133
4.4.7 Tubería de alimentación.....	134
4.4.8 Tubería de descarga.....	135
4.4.9 Tanque reservorio.....	136
4.4.10 Puesta a punto del ariete hidráulico.....	137
CAPÍTULO V RESULTADOS	139
5.1 RESULTADOS.....	139
5.1.1 pruebas de campo y resultados.....	139
5.1.2 Característica del sistema.....	139
5.1.3 Determinación de las características de funcionamiento.....	139
5.1.3 Procedimiento para la realización de pruebas.....	140
5.1.4 Curvas para el análisis de la bomba de ariete.....	141
CAPÍTULO VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	154
6.1 DISCUSION DE RESULTADOS.....	154
CONCLUSIONES.....	155
RECOMENDACIONES.....	158
LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	160
BIBLIOGRAFÍA.....	161
ANEXOS.....	162

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACION DEL PROBLEMA

1.1.1 ANTECEDENTES

El abastecimiento de agua es un problema grave en todo el país, especialmente para la población de Huachog del Centro poblado de Colpa Baja de Huánuco que se ve limitada en el uso de este recurso tan importante para un adecuado nivel de vida de los pobladores.

En la actualidad épocas en la que fuentes de energía no renovable tienden a agotarse se trata de racionalizar su utilización, la manera de lograr este propósito es desarrollar otras fuentes de energía renovables, como la hidráulica, eólica, solar, en proyectos que benefician al hombre.

La bomba de ariete es uno de los artefactos más antiguos conocidos para el bombeo de agua, utilizado especialmente en zonas de grandes desniveles geográficos. Fue inventada en el año 1796 por Joseph Montgolfier (UrkiLus I et al. 2003). Por medio de esta bomba, se puede aprovechar un pequeño salto de agua bombeando en forma permanente parte de su caudal a un nivel más elevado de terreno. (Jeffrey T.D. et al 1992). Esta tecnología fue utilizada durante varias décadas en todo el mundo, pero con la difusión de la electricidad y otras tecnologías fueron disminuyendo su aplicación.

Huánuco dispone de un gran potencial hídrico susceptible de ser aprovechado tanto para la producción de energía como para el almacenamiento y la provisión de agua. Sus innumerables relieves, permiten disponer de numerosas vertientes de agua.

La escases de agua, debida a las consecuencias de los cambios climáticos y al incremento de las sequías, impone el cuidado del agua, priorizando obras de canalización y almacenamiento y la implementación de tecnología apropiada de

bombeo de agua, no solamente para las viviendas rurales sino también para las huertas, plantaciones y otras necesidades productivas de la zona rural.

Ortiz, Gustavo Adolfo (EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE) Trata acerca del fenómeno hidráulico conocido como golpe de ariete, haciendo notar su influencia dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable.

Como información previa para entender el enfoque que se desea plantear respecto al golpe de ariete, se hace mención general de ciertos temas en los que repercute el fenómeno: los sistemas de abastecimiento de agua potable, los equipos de bombeo y las válvulas.

La investigación gira en torno a cuatro aspectos del golpe de ariete: las causas que lo originan (su naturaleza), sus efectos sobre un sistema de abastecimiento de agua potable, las formas o mecanismos para tratar de evitarlo o reducir su impacto y su planteamiento hidráulico.

De Freitas J. Reinaldo A y Sánchez H. Sergio A. (DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE SUMINISTRO DE AGUA PARA UNA POBLACIÓN AGRÍCOLA) en su resumen menciona que para la población de Guareguare, ubicada en el Estado Miranda se estudió la posibilidad de instalar un sistema alternativo de suministro de agua, cuya fuente de energía de trabajo depende de las mismas condiciones del río a utilizar para su instalación.

Se diseñó y construyó un Ariete Hidráulico para el estudio de su comportamiento al variar diversos parámetros, como son la caída de agua, el caudal de suministro y la longitud de la tubería de succión. Con este estudio se determinó la factibilidad de instalación del sistema en la zona.

Se obtuvieron evidentes cambios en el comportamiento de la bomba, al variar la frecuencia de ciclo de funcionamiento y al variar la altura de bombeo.

Se determinó comportamientos de curvas Frecuencia de Ciclo – Caudal, diferentes respecto a estudios anteriores, debido a la poca longitud de tubería de succión y del tornillo eje de la válvula de impulso.

Finalmente se concluyó que el sistema no es factible a ser utilizado para esta población dada la gran altura de bombeo y la contaminación existente en el río evaluado.

1.1.2 FUNDAMENTACION DEL PROBLEMA

En la actualidad en la Localidad de Huachog (Aeropuerto) perteneciente al centro poblado de Colpa Baja del Distrito de Huánuco en la Provincia de Huánuco Región Huánuco , donde viven cerca de 120 familias, cuya economía está basada en la agricultura y ganadería, la cual no es beneficiada en su totalidad a pesar de que cuenta con un sistema de abastecimiento de agua por medio de bombas eléctricas de impulsión el cual hace demasiado caro el coste por el servicio de agua potable, que a la vez no es aprovechado de manera racional y eficiente por los beneficiarios.

Dado sus escasos recursos económicos, no pueden solventar la implementación de un sistema de abastecimiento de agua por medio de bomba accionadas por fuente de energía no renovables, y utilizando las grandes posibilidades del recurso hídrico que posee la zona, se diseñó un sistema de bombeo mediante el ariete hidráulico buscando satisfacer el abastecimiento del agua a la población en estudio, de tal manera contribuir en la mejora de la calidad de vida y a la vez poner en práctica los conocimientos adquiridos en el transcurso de la carrera de Ingeniería Civil.

Además de ser mucho más económico que las bombas de motor o eléctricas, el ariete tiene la ventaja de que una vez instalado no presenta fallas en su funcionamiento por mucho tiempo, además de que no requiere combustible de ninguna especie.

El ariete puede ser la solución a la falta de agua en diferentes zonas de esta población de Huachog, el agua al ser un servicio básico, vital para las personas y siendo importante para la preservación de la vida humana.

Este aparato de bombeo se debe fomentar y estimular su utilización por varias razones: Su bajo costo, su fácil manejo y auto-propulsión de energía para realizar su trabajo.

También su mínimo gasto en reparación y calibraciones y la facilidad con que los operarios del campo, aprenden a realizar las reparaciones que se deben efectuar después de cierto tiempo de uso.

Los pobladores de Huachog tiene en el ariete la oportunidad de acceder a los servicios básicos con poca inversión, lo importante del ariete es que no depende para su funcionamiento de insumos que estén fuera de la comunidad rural y mucho menos del exterior. Todo lo que necesita es el agua y su fuerza hidráulica. Cuando se tiene una diferencia de altura de varios metros entre la fuente y el ariete, se puede llevar el agua a alturas que superan los 80 metros. Nuestro país es un país muy montañoso y de grandes irregularidades en su topografía. Por eso lo más común es encontrar acuíferos (arroyos, ríos, lagunas) en los que con pocas modificaciones se puede instalar de manera eficiente este sencillo y útil aparato hidráulico.

En caso de que la fuente de agua no presente la caída de más de un metro de altura, se puede hacer a través de pequeñas represas, con las cuales se crea la diferencia de altura necesaria para que el agua ponga en funcionamiento al ariete y comience a enviarla al lugar previamente establecido.

Con los altos precios de los combustibles y de las bombas hidráulicas de motor eléctricas, el ariete es la mejor opción para los pobladores de Huachog

1.2 FORMULACION DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

Sistema de bombeo deficiente para la dotación de agua potable en el predio de Huachog.

1.2.2 PROBLEMAS ESPECIFICOS

Racionalización del suministro de agua.

Altos costos de bombeo

Baja Vida útil de la bomba

Costo de vida de los pobladores

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e instalar un sistema de bombeo mediante Ariete Hidráulico para solucionar los problemas de Agua Potable del Predio de Huachog.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Realizar un estudio general de la topografía de la zona

Analizar las opciones más factibles para que el sistema de bombeo tenga una vida útil larga.

Evaluar las diferentes alturas disponibles y altura a alcanzar con la bomba.

Diseñar un ariete hidráulico que cumpla con los parámetros establecidos de eficiencia y operatividad.

Seleccionar los equipos y materiales que garanticen el funcionamiento adecuado y durabilidad del proyecto.

Realizar las pruebas necesarias para establecer las curvas de rendimiento y eficiencia, para condiciones óptimas de instalación y operación del sistema.

Establecer el análisis económico para la evaluación del sistema de bombeo, con respecto a otro sistema de bombeo a base de energía eléctrica.

1.4 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA

1.4.1 JUSTIFICACION

1.4.1.1 Justificación técnica

La problemática actual por el crecimiento energético que está atravesando el país requiere de alternativas eficaces que permiten cubrir este déficit energético. Las fuentes alternas de energía representan potenciales energéticos abundantes, Nuestro país posee recursos hídricos como vertientes y ríos que no son aprovechadas de forma adecuada, debido a esto la existencia de terrenos áridos, no cultivables por falta de agua.

El presente estudio está enmarcado en aprovechar el recurso hídrico y las condiciones geográficas del lugar la misma que ayuda aprovechar dicha energía para bombear un parte del caudal existente hacia un lugar de mayor altura en donde se reservara, potabilizara y se distribuirá el agua para el consumo humano.

1.4.1.2 Justificación económica

La población de Huachog posee un sistema de abastecimiento de agua por medio de impulsión de bombas eléctricas la cual ocasiona un alto costo por el servicio.

Con la utilización del ariete hidráulico les permitirá dotar de agua a esta zona Necesitada con la ventaja de que no tendrán que pagar energía eléctrica ni combustible, por la configuración del ariete el cual aprovecha un salto de altura y el caudal disponible de la zona.

Con el aprovechamiento de este sistema de bombeo se busca mejorar el nivel y la calidad de vida que sin duda repercute en el desarrollo de este sector y por lo tanto del país, ya que contara con un caudal suficiente para su efectiva y optima distribución.

1.4.1.3 Justificación social

El presente proyecto tiene como fin mejorar la calidad de vida de los moradores de la zonas involucradas haciendo que la comunidad sea la impulsora del desarrollo y riqueza, de tal forma que se mitigue la migración hacia diferentes lugares dentro y fuera de la región y País, ya que con este proyecto se impulsara a realizar más proyectos como este para el beneficio de la comunidad y comunidades aledañas.

1.4.1.4 Justificación ecológica

El sistema de bombeo mediante bomba de ariete hidráulico es una de las aplicaciones de las energías alternativas de la hidráulica, siendo el agua una fuente renovable de energía, al implementar este sistema de bombeo se producirá una energía limpia, sin desechos tóxicos y no contaminantes.

El efecto ambiental del proyecto es mínimo ya que las obras civiles son muy pequeñas y la transformación de la energía es netamente mecánico, el cual no necesita combustible, electricidad ni sustancias contaminantes, por tanto no produce desechos.

1.4.2 IMPORTANCIA

Es muy importante porque con la utilización del ariete hidráulico se permitirá dotar de agua con la ventaja de que no tendrán que pagar energía eléctrica, además, es una de las aplicaciones de las energías alternativas de la hidráulica, siendo el agua una fuente renovable de energía, al implementar este sistema de bombeo se producirá una energía limpia, sin desechos tóxicos y no contaminantes permitiendo así mejorar el nivel y la calidad de vida de la población lugareña.

1.4.3 LIMITACIONES

Entre las pocas limitaciones que encontramos para el funcionamiento de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico son las caídas de agua en desnivel, para crear la potencia necesaria para que la bomba pueda generar la elevación del agua hacia los reservorios de almacenamiento.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1 LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

2.1.1 RESEÑA HISTÓRICA

Las bombas de ariete se utilizaron en el antiguo Egipto, China, India y Roma, ya que estas son unas de las máquinas más antiguas. En la actualidad estas ocupan el segundo lugar luego de los motores eléctricos.

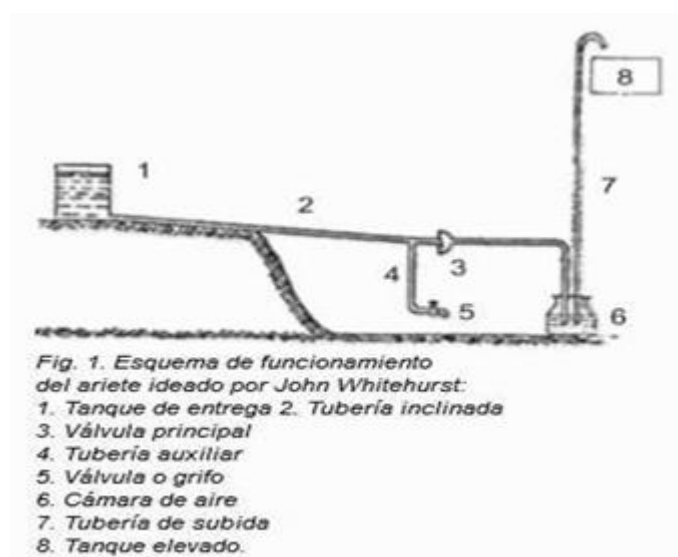
La bomba de Ariete Hidráulico nace en la era de los grandes inventos, y tiene tanto alcance como las máquinas de vapor y el motor de combustión interna. Uno de los equipos más antiguos conocidos, fue utilizado por los griegos en el año 300 AC.

El uso de este dispositivo se suspendió y revivió en el siglo 16, cuando una traducción al alemán de la palabra griega que describe la bomba fue publicada.

Se ha disertado mucho sobre el verdadero creador empírico de esta bomba, pero una de las crónicas aceptadas es en la cual se atribuye la invención al inglés John Whitehurst en el año de 1775, “fermentó su ingenio para construir un aparato con un principio de funcionamiento novedoso, accionaba manualmente un grifo en la tubería conectada a un tanque de abasto, en un nivel superior, para provocar el fenómeno físico conocido como golpe de Ariete, que permitía elevar el líquido a un tanque de almacenamiento colocado a una altura mayor, (Figura 1), aunque su aplicación no fue tan apetecida por el gran ruido y vibración propios de dicho equipo, además era manual. Este ariete fue capaz de levantar el agua hasta una altura de 4.9 m.

El invento fue reconocido en 1776, y posteriormente después de la muerte del inglés fue precedida por los investigadores que se ocuparon de añadir bondades al equipo y descubrir los secretos de una aparente magia.

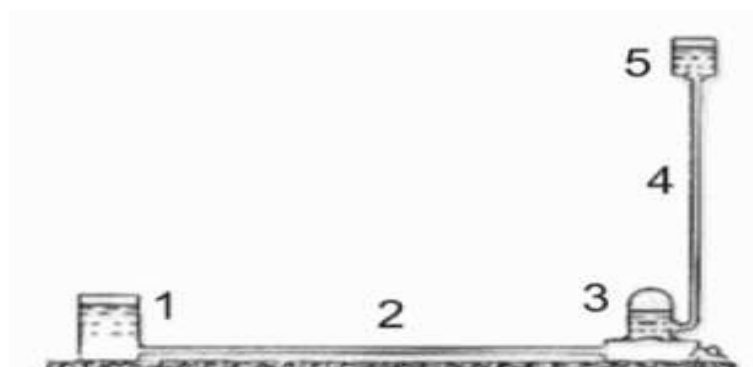
Figura 1. Esquema de funcionamiento del ariete ideado por John Whitehorse



Fuente:www.cubasolar.cu

La sagacidad humana añadió elementos al invento cervecero, y seis años antes de los dos famosos hermanos franceses: Joseph Montgolfier junto a su hermano Étienne, inventaran el globo aerostático, concibieron un ariete autoactivante, en principio, similar a los contemporáneos, aunque entonces lo denominó “le belierhydraulique” (traducido al español, el golpe hidráulico) (Figura 2). La mejora con la anterior radica en que ya no se utilizaba fuerza extrema para abrir la válvula de impulso, sino la fuerza inherente del agua en movimiento se encargaba de realizar ésta tarea.

Figura 2. Ariete hidráulico ideado por Joseph Michael Montgolfier



Fuente:www.cubasolar.cu;

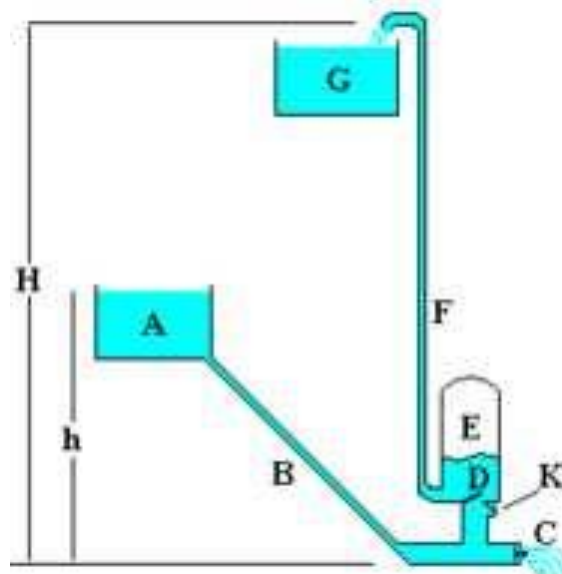
El ariete hidráulico fue patentado en 1796, por Joseph Montgolfier, que como en la actualidad consistía en una máquina que aprovecha únicamente la energía de un pequeño salto de agua para elevar parte de su caudal a una altura superior. Su trabajo fue mejorado por Pierre François Montgolfier, su hijo (1816), quien diseñó una válvula para introducir el aire en la cámara del hidráulico esto mejoró su rendimiento, se informó que bombeo a una altura de 48m.

A partir de su investigación, el ariete hidráulico tuvo una amplia difusión por todo el mundo, como por ejemplo, en las fuentes del TajMahal en la india. El interés en las bombas de ariete, disminuyó en los años 50 y 60 a consecuencia del boom del petróleo, además de su uso fue merced al avance arrollador de la bomba centrífuga.

2.2 Configuración general de la bomba de ariete

La configuración generalizada de cada ariete depende de su diseño y fabricación, pero el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo en todos.

Figura 3. Configuración típica de la bomba de ariete



Fuente: rooseveltsmate.blogspot.pe

En donde:

H: altura a la cual el agua será elevado tomando como nivel de referencia el ariete hidráulico.

h: altura disponible entre el tanque de captación y el punto más bajo del ariete hidráulico.

A: reservorio de alimentación.

B: tubería de conducción

C: válvula de impulsión

D: válvula de retención, descarga

E: Cámara de aire

F: tubería de descarga

K: válvula de aire

2.2.1 Funcionamiento de la bomba

La bomba de ariete es una de las maquinas más sencillas. A continuación presentamos el ciclo de funcionamiento generalizado de un ariete hidráulico.

El agua de la fuente de alimentación (1) puede inyectarse al depósito (9) que se halla a una cota más elevada. El dispositivo funciona de la siguiente manera:

Al descender el agua por efecto de la gravedad por la tubería de alimentación (2), tiene una cierta presión H_a debida a la diferencia de nivel, esta se derrama en la válvula de impulso (3), alcanzando una presión dinámica que sea capaz de cerrarla, contrarrestando su peso.

El cierre repentino de la válvula de impulso produce una sobrepresión en la tubería de alimentación, este fenómeno es conocido como golpe de ariete. La válvula check (6) se abre por el efecto de dicha sobrepresión, y deja pasar cierta cantidad de agua hacia la cámara de aire (7), comprimiendo el aire existente, y haciendo que fluya cierta cantidad de agua (q) por la tubería de descarga (8).

El retroceso del agua en la tubería de alimentación, produce una ligera succión en la caja de válvulas (4), creando una caída de presión que produce la apertura de las válvulas de impulsión y el cierre de la válvula check (6).

De esta forma, el proceso se vuelve automático. El aire comprimido continúa impulsando el líquido almacenado en ella por la tubería de descarga, entre ciclos de operaciones; lográndose una entrega de agua casi uniforme hacia el tanque de almacenamiento (9).

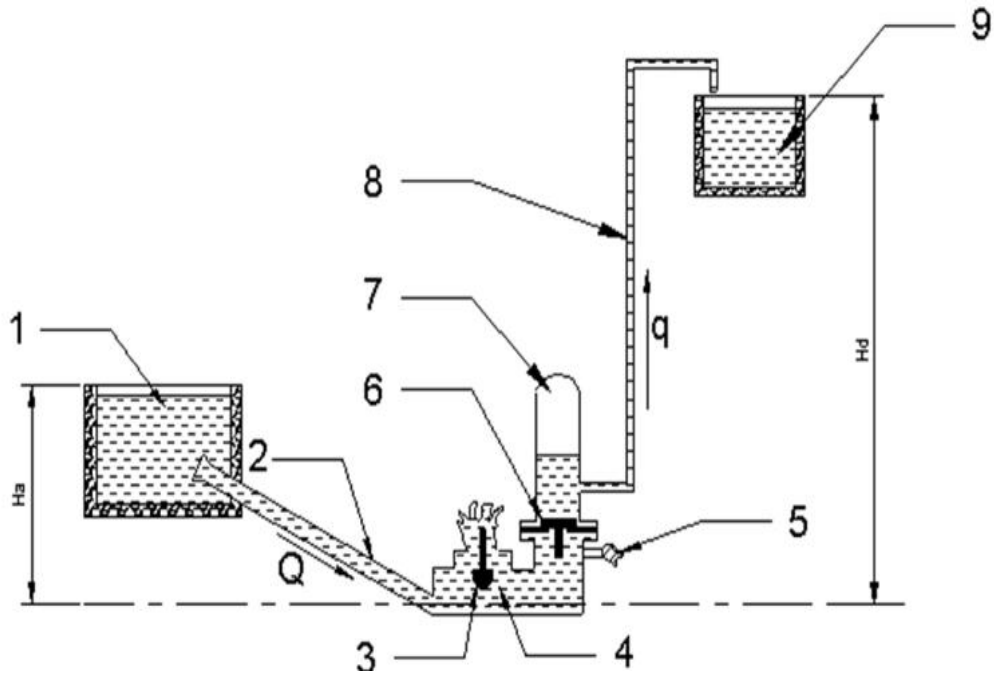
El aire que es parte de la cámara de aire se consume en el flujo bombeado, sino se renovase, manteniendo el nivel se saturaría toda la cámara de agua, por esta razón se coloca la válvula de aire. (5)

En su posición óptima que es debajo de la válvula check. Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en la caja del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire que va a renovar el aire de la cámara. El dispositivo trabajará automáticamente mientras el caudal Q entre en la cámara. Su mayor parte el caudal $Q - Q_p$, se verterá afuera en el tanque reservorio.

La longitud del tubo no influye directamente en el caudal. Sí influye en el tiempo de ciclo del transporte mediante la masa del agua que contiene y el tiempo de aceleración.

Una tubería larga tiene tiempos de aceleración largos y tiempos de ciclo altos. Si las tuberías son demasiado cortas, la dinámica propia de la válvula de impulsión y de la válvula check, ejercen una influencia negativa. Debido a su inercia, las válvulas no tienen tiempo suficiente para abrirse y cerrarse por completo en un mismo ciclo.

Figura 4. Esquema del principio de funcionamiento del Ariete Hidráulico



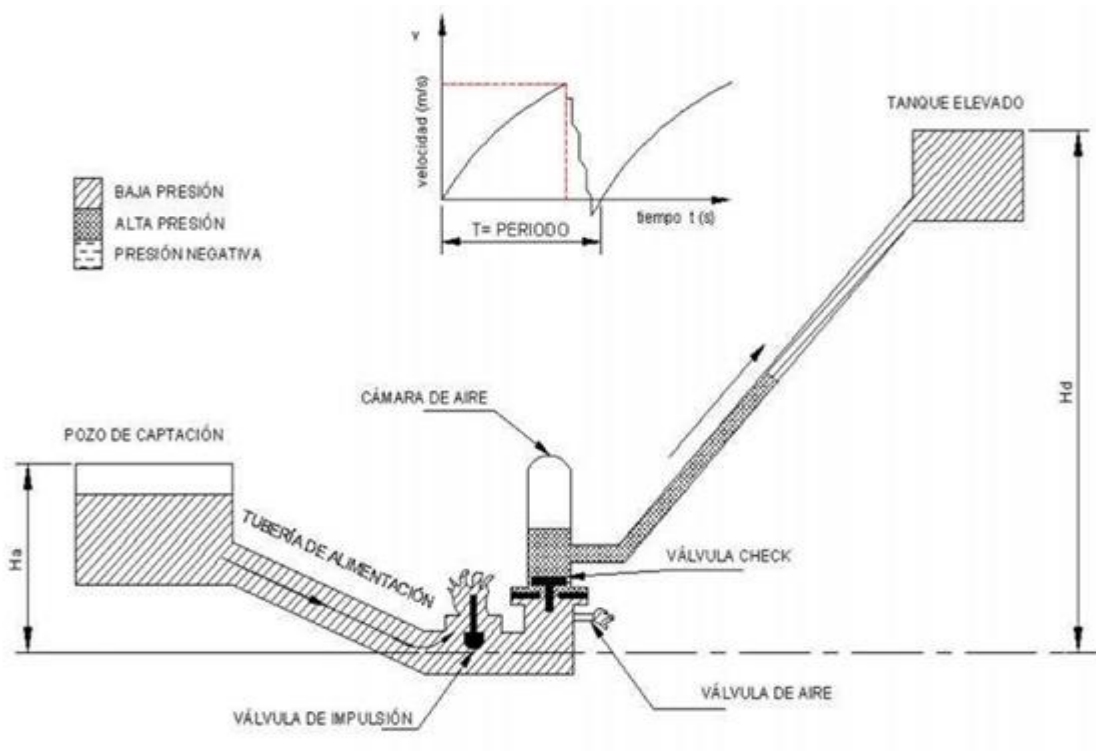
Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

2.2.2 Ciclo hidráulico de la Bomba de Ariete

2.2.2.1 Períodos en que se divide el ciclo de trabajo del Ariete Hidráulico. El aprovechamiento del golpe de ariete se divide en 3 periodos bien definidos durante un ciclo de operación. En las figuras que se encuentran a continuación se muestra de manera más comprensiva.

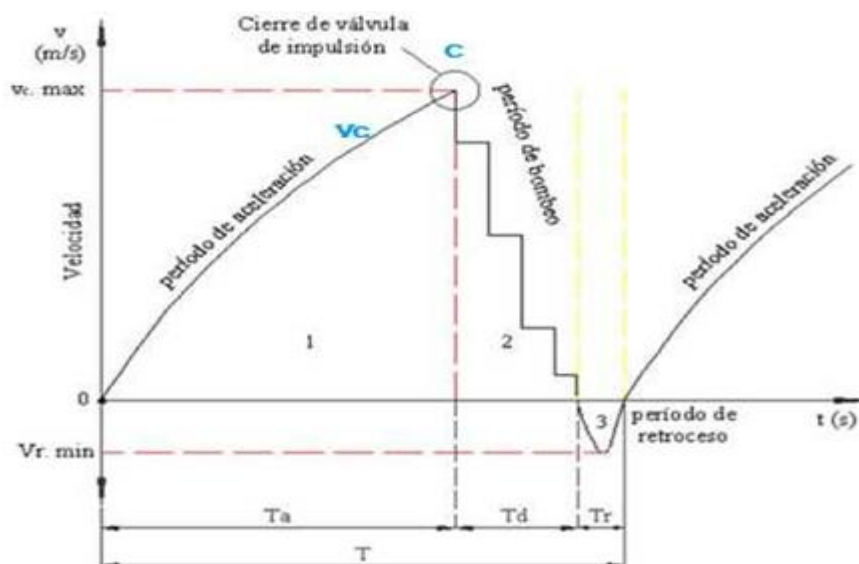
Como partida se inunda el sistema aguas abajo, la válvula de impulsión se cierra debido a la presión inicial H_a , el agua hace que se abra la válvula check, hasta el nivel H_a debido al principio de vasos comunicantes. Seguido de este primer paso, se debe accionar la válvula de impulsión manualmente, así se extrae el aire de las tuberías, hasta que el ariete comience a funcionar automáticamente.

Figura 5. Eventos que se presentan en un ciclo



Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

Figura 6. Representación gráfica de los periodos velocidad-tiempo



Fuente: Ayala Manuel, Diseño y construcción de un Ariete Hidráulico Universidad Nacional de Loja, 2004.

De la gráfica se tiene la siguiente ecuación que nos ayuda a determinar el tiempo de duración del ciclo.

$$T = T_a + T_d + T_r \quad (1)$$

Dónde:

T = Tiempo de duración del ciclo (s).

T_a = Tiempo de duración del periodo de aceleración en (s). T_d = Tiempo de duración de bombeo (s).

T_r = Tiempo de duración del periodo de retroceso (s).

V_c = Velocidad del agua en la tubería de alimentación en el momento del cierre de la válvula de impulsión (m/s).

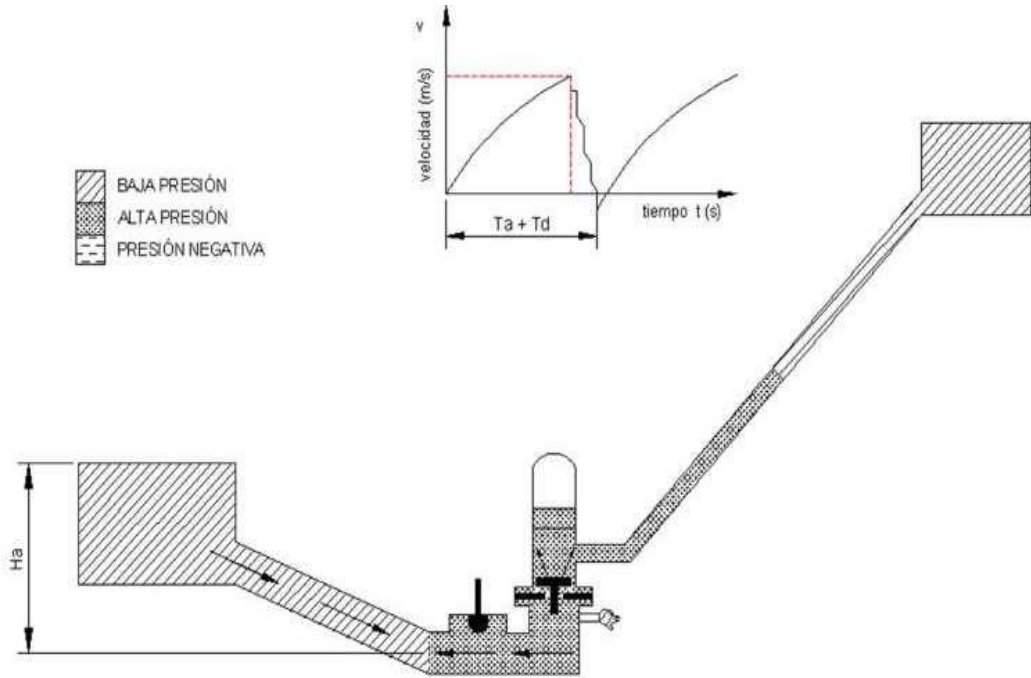
V_r = Velocidad del agua durante el período de flujo invertido (m/s).

$V(t)$ = Velocidad del agua en la tubería de alimentación en los diferentes instantes de tiempo (m/s).

2.2.2.2 Período 1: Aceleración. Se podría decir que este fenómeno inicia desde que la energía cinética del agua es nula, por lo que la velocidad es igualmente cero, es decir el agua todavía se encuentra en el tanque de captación, seguido de esto el agua empieza a acelerar debido a la gravedad, las válvulas se encuentran en su posición baja hasta que el agua llega con una presión que está en función directa con la altura de alimentación H_a , haciendo que se cierren, terminando el período 1 e iniciando el período 2.

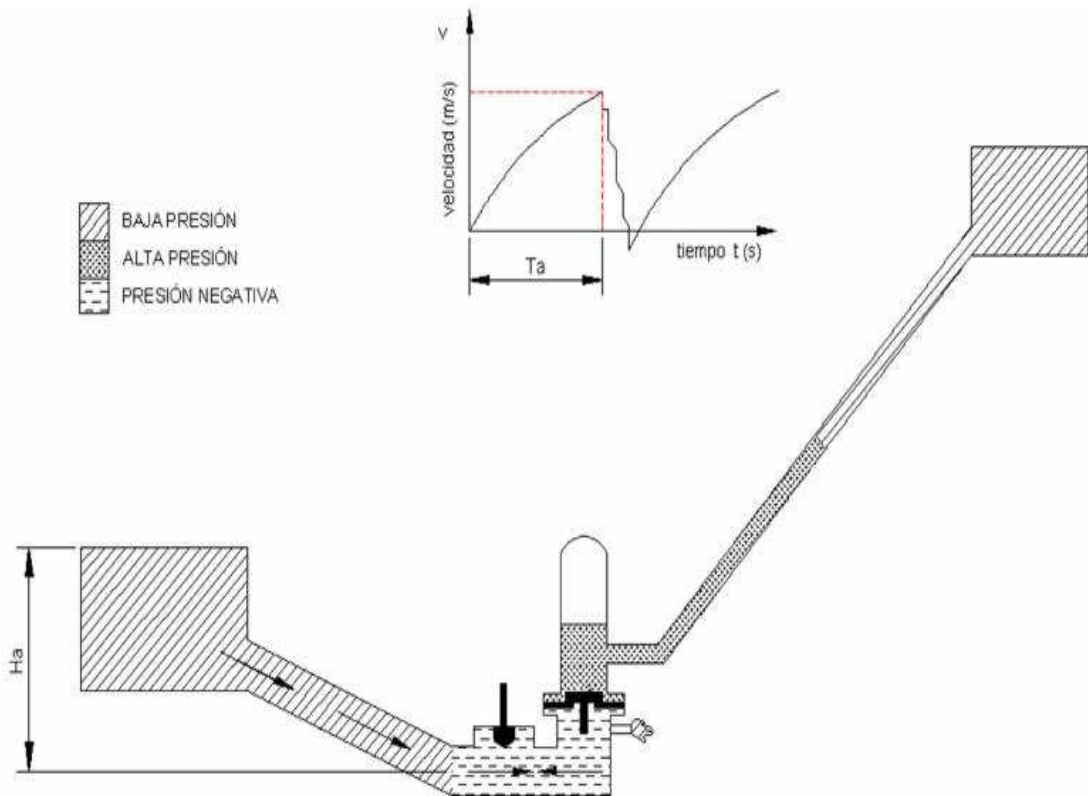
2.2.2.3 Período 2: Bombeo. El instante en que las válvulas de impulso se cierran, inicia el período 2, este finaliza el momento que se produce una desaceleración del flujo en la cámara de aire como podemos observarlo en la figura 7. En este instante en el sector de la válvula de impulso se produce una presión muy alta, esta es amortiguada en la cámara de aire.

Figura 7. Cierre de las válvulas de impulsión



Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

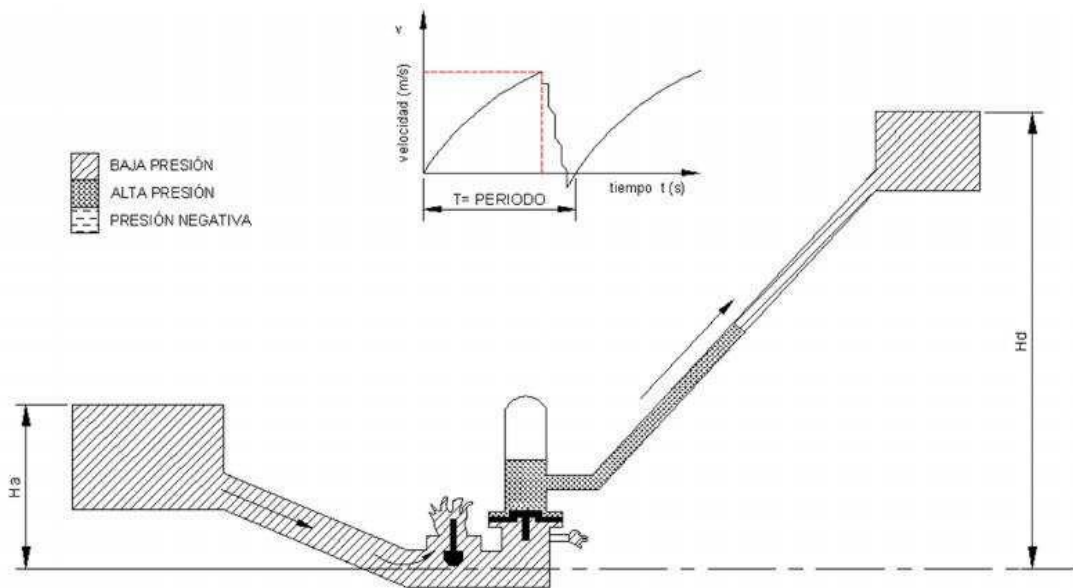
Figura 8. Amortiguación en la cámara de aire



Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

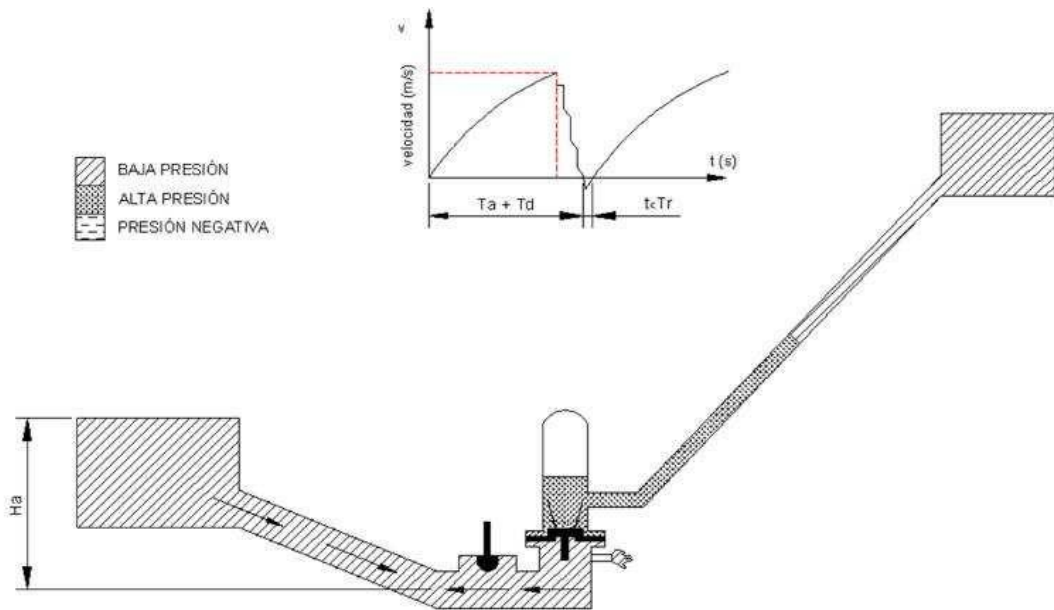
2.2.2.3 Período 3: Retroceso. El período 3 se observa en la figura 9, el cual consta de 3 partes: la caída de presión, la reapertura de la válvula de impulso, y el tiempo durante el cual se cierra la válvula check. Aquí la velocidad vuelve a hacer cero, teniendo un nuevo ciclo en progreso. Se observa que el colchón de aire que existe en la cámara de aire ejerce una presión sobre la válvula check haciendo que se cierre, el agua fluye por la tubería de descarga y no retorna a la tubería de impulsión. Al retroceder el agua por la tubería de alimentación se produce una sección de baja presión en el cuerpo del ariete, de esta manera se genera una renovación de aire en la cámara neumática por la válvula de aire, al mismo tiempo se abre nuevamente la válvula de impulsión, empezando un nuevo ciclo de trabajo.

Figura 9. Cierre de la válvula de descarga



Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

Figura 10.Reapertura de las válvulas nuevo ciclo de trabajo



Fuente: Ma Chi. Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

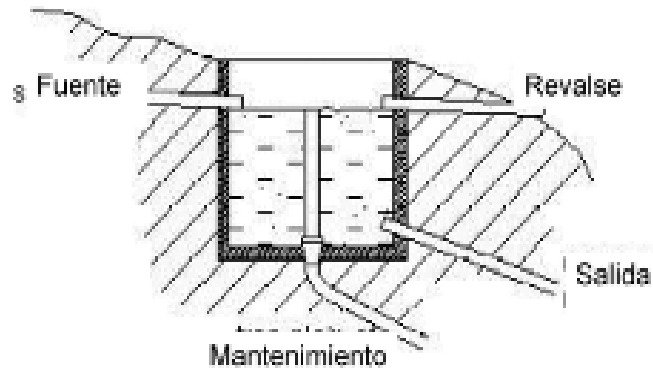
2.3 Características del ariete hidráulico

Sus características generales son; no necesita combustible fósil, electricidad, ni ningún impulsor en absoluto fuera del fluido, no necesita un mantenimiento permanente. Este sistema es más económico que los otros convencionales motorizados, no causa contaminación al medio ambiente, su operación es segura no necesita mano de obra durante su operación y su costo de funcionamiento teóricamente es nulo; ya que este dispositivo presenta únicamente dos partes móviles, la vida útil del equipo es larga y funciona continuamente las 24 horas del día. Ideal para terreno escarpado en donde se pueda realizar riego tecnificado (aspersión o riego por goteo) con finalidades agropecuarias, además puedan solventar otras necesidades como agua potable si esa fuese la necesidad.

A continuación presentamos las características de los componentes principales del ariete hidráulico.

2.3.1 Colector

Figura 11. Colector del agua para el ariete



Fuente: www.taller.inti.org

El colector puede tener diferentes tamaños. Puede ser un tubo de cemento de un diámetro de 0.6m hasta 1m. Puede también ser un cilindro de plástico o de metal. De todas maneras el tubo de salida que va a la bomba del ariete debe siempre estar cubierto por unos 30-40 centímetros de agua para no dejar escapar el golpe de ariete. El colector debe ser construido de manera que las burbujas de agua que llegan a la fuente no entren en el tubo de salida. Para evitar que eventuales residuos sólidos como arena o piedras entren en el tubo de salida, el tubo debe estar colocado unos 20 centímetros arriba del fondo del colector.

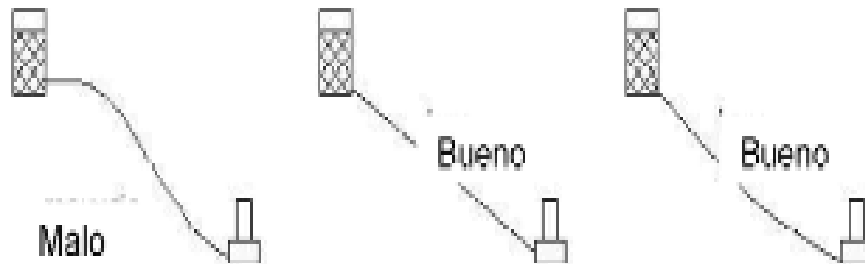
En la toma del agua no debe haber entrada de aire por tanto es necesario hacer un reservorio de agua con cierta capacidad de volumen que permita el flujo continuo y guarde las condiciones de estabilidad y el sitio donde se ubica el ariete debe ser un desagüe ya que el agua salpica.

2.3.2 Ducto de entrada

El ducto de entrada conecta el colector con la bomba de ariete. El diámetro de este tubo depende del tamaño del ariete utilizado. El tubo de entrada debe resistir los

golpes de ariete y debe ser de material rígido y de metal. El tubo debe ser perfectamente hermético, no puede tener ninguna fuga y debe tener una pendiente constante.

Figura12. Ducto de entrada para el ariete



Fuente: www.taller.inti.org

2.3.3 La bomba de ariete

Una bomba de ariete hidráulico es una bomba impulsada por energía del agua que fluye por la tubería que la alimenta. Funciona continuamente, todo el día sin interrupción. No requiere electricidad ni algún tipo de combustible para su funcionamiento. Así, no tiene costos operacionales ni causa contaminación al medio ambiente.

La bomba de ariete está conectada a una tubería de presión (hierro galvanizado) la misma que se conecta con uniones, al ingreso del ariete tenemos una válvula de compuerta la cual nos ayuda a regular el paso del agua al ariete. Para que funcione el ariete a cada golpe se necesita succionar una pequeña cantidad de aire para compensar el aire que se va con el agua bombeada. Consta de una válvula de impulso, la misma que nos ayuda a producir el golpe de ariete, la válvula de descarga permite conducir el agua en cada golpeteo que se da en la válvula de impulso, la cámara de aire que es la amortiguadora de la presión y parte esencial para la elevación del agua, y la descarga que se hace al tanque reservorio por medio de una tubería de presión.

2.3.4 Ducto de salida

El tubo de salida conecta la bomba con el reservorio de almacenamiento. El diámetro de este tubo depende del tamaño del ariete, en nuestro caso utilizaremos una manguera de 1 in. El tubo de salida no debe tener tramos de contra pendientes. Si no se pueden evitar estas pendientes, tenemos que prever unos sistemas de aeración en los puntos más elevados. El tubo de salida puede ser de plástico, dado que hay que tener en cuenta la presión hidráulica estática que está sometido el ducto.

La poca difusión de los arietes puede atribuirse que para su selección, instalación y calibración se requieren de equipos especializados y pruebas además su funcionamiento no está completamente dilucidado y a la dificultad en su diseño hidráulico.

A continuación se muestra en la tabla 1 las relaciones de ventaja y desventaja en los tópicos más trascendentes del ariete hidráulico con las bombas que más se usan en el medio.

Tabla 1. Comparación del ariete hidráulico con otras bombas

Descripción	Bomba-motor	Bomba-eléctrica	Ariete
Energía externa	Si	Si	No
Lubricantes	Si	Si	No
Inversión Inicial	Alto	Bajo	Medio
Mantenimiento	Si	Si	No
Confiabilidad	Alta	Media	Alta
Ruido	Alto	Medio	Medio- Alto
Eficiencia	Alto	Alto	Media

Fuente: Autores

2.4 Estudio de campo

2.4.1 Localización política y geográfica de la zona

La Localidad de Huachog se encuentra ubicada en el distrito de Huánuco, provincia de Huánuco y departamento de Huánuco, a 6.5 km de la ciudad de Huánuco.

La comunidad se encuentra ubicada la parte izquierda del río Huallaga, el acceso es fácil ya que la carretera cruza por esta comunidad. Es una zona de topografía irregular (pendiente) y el sitio donde va el sistema de bombeo mediante el ariete hidráulico, presenta pendientes pronunciadas por la cual la facilidad del bombeo es de una gran alta eficiencia, también existe la facilidad de que el agua atraviesa por el sitio mediante un canal ya existente, esto facilita la ubicación del tanque de captación cerca de la toma.

Figura 13. Huachog – Huánuco



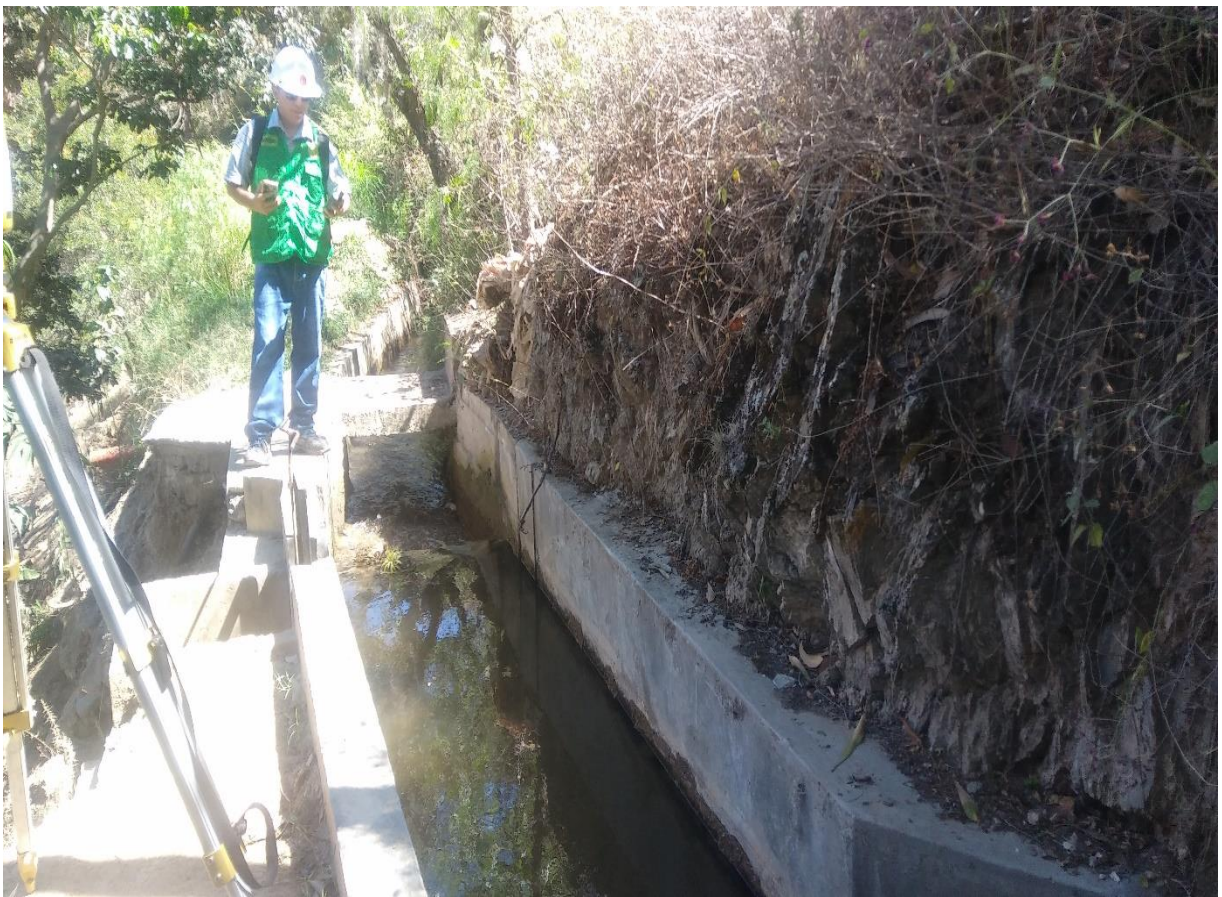
Fuente: Google Earth

2.4.2 Recursos disponibles

Para el estudio e implementación de este proyecto se dispone del potencial hídrico de (30 -20) lt/s es equivalente al 20% de las aguas capadas del Río Conchumayo, el cual es trasladado a través de un Canal.

Las condiciones que presenta el lugar son favorables tanto la pendiente de la pradera, como el caudal, apreciar en la figura 16.

Figura 15. Recurso Hídrico de (30 -20) lt/s



Fuente: Autores

Figura 16. Pendiente del terreno en Huachog



Fuente: Autores

2.4.3 Determinación de la altura disponible y la altura de descarga

La altura disponible se midió desde el tanque de captación hasta el sitio donde se ubicara la bomba de ariete hidráulico, para la altura de descarga se considera cual es la altura conveniente para los usuarios del agua, esta altura se midió desde el lugar donde está instalada la bomba hasta el tanque reservorio en donde el agua se pueda distribuir de una manera adecuada para todos los usuarios de la comunidad. Esta actividad se desarrolló con la ayuda de un equipo topográfico, ya que la distancia a medir es corta y se necesita tener medidas precisas, se utilizó un Teodolito y GPS para obtener medidas exactas de la diferencia de alturas además de conocer nuestra ubicación geográfica.

Para la ubicación de la bomba de ariete disponemos de una altura de 17 m.c.a, ya que con esta es suficiente para alcanzar la altura necesaria para el bombeo que requieren los usuarios

Figura 17. Medición de la altura disponible en Huachog



Fuente: Autores

2.4.4 Ubicación de la toma de agua y tanque de captación

La ubicación de la toma de agua es esencial en este tipo de bombas, por tanto se buscó un lugar propicio en donde la construcción del reservorio tenga todas las características apropiadas para su óptimo funcionamiento. El reservorio de alimentación cumple con el volumen permanente y constante de agua que viene desde la acequia situada al lado de este como se observa en la Figura 18. Controlar el volumen de agua que se mantenga constante es muy importante, se evita que ingrese aire a la tubería de impulso.

Figura 18. Tanque de Captación situado al lado de la acequia en huachog



Fuente: Autores

El aire que entra en el sistema de forma incontrolada se comprime en el momento del golpe de ariete, amortiguando parcialmente el impulso, lo cual resulta en pérdida de energía de bombeo y puede provocar inestabilidad o interrupción en el funcionamiento de la instalación. Por otro lado, existe necesidad de mantener el nivel de aire de la cámara, que sirve como colchón de amortiguamiento contra la propagación de los golpes de ariete en la tubería de bombeo. Por este motivo la válvula de aire se mantiene suficientemente abierta, para compensar la fuga de aire por absorción del agua.

2.4.5 Ubicación del ariete

El sitio para ubicar el ariete está seleccionado adecuadamente, se escogió dos lugares; la fuente de aprovechamiento o reservorio de alimentación y, la ubicación misma del ariete. La distancia entre estos dos puntos define la altura a bombear.

La selección del sitio para la instalación tiene las siguientes características:

El terreno posee ventajas topográficas para el tendido de la tubería de alimentación, desde el embalse de captación hasta la bomba, de tal forma que este conducto quede perfectamente rectilíneo y rígido.

Un flujo suficiente de agua desde el reservorio de suministro o alimentación que no arrastre impurezas y/o suciedades.

Una caída de agua, con altura de 17 m.c.a, de suministro constante, de manera que pueda proporcionar la potencia necesaria para la elevación del agua hacia el depósito de descarga.

Figura 19. Bomba de Ariete hidráulico – en huachog



Fuente: Autores

2.4.6 Determinación de la ubicación del tanque de descarga

Partiendo de que el caudal aprovechado es favorable y se dispone de 17 m.c.a, como altura disponible, se puede alcanzar los 170 m.c.a y una longitud de 500m, esta altura sobrepasa el reservorio existente y es más que suficiente. Con este aprovechamiento se alcanzaría hasta la cota del cerro donde existe un reservorio una altura de 1950 m.s.n.m como se puede ver en la Figura 20.

Figura 20. Ubicación del tanque reservorio - en huachog



Fuente: Autores

2.5 Modelo matemático

2.5.1 Introducción

En la presente introducción se analiza los modelos matemáticos existentes, concluyendo un modelo adecuado; cuya resolución permita conocer los valores máximos de las principales variables, que alcanzan en cada periodo o cambio de estado significativo; para cada elemento del ariete, de su funcionamiento, del papel de cada uno de éstos dentro del ariete, con miras a un entendimiento más detallado, que sirve posteriormente para un diseño mecánico procedente. Además de conseguir un sustento teórico más completo para la construcción del ariete. A pesar de todas las ventajas que ofrece el ariete no han sido utilizados como deberían, por tanto su uso se reduce a pequeña escala, y no tan comercial.

2.5.2 Tipos de métodos de estudio

Métodos empíricos

Se basan en pruebas experimentales con resultados no apoyados o correlacionadas por la teoría. Las fórmulas empíricas no son suficientes para la predicción de la operación del ariete ya que el proceso hidráulico depende de varias variables, las cuales son obviadas en el estudio.

Métodos analíticos

Usando las reglas básicas de la hidráulica y de la mecánica de fluidos se ha intentado acertar la tasa de cambio de la variable velocidad del agua en la tubería de impulso para cada período del ciclo. Estos métodos no fueron muy satisfactorios porque varios parámetros relacionados a la operación del ariete son obtenidos mejor por el método empírico.

Métodos racionales

Se basa en el análisis teórico del ariete con algunos parámetros determinados experimentalmente. Este es hasta ahora el método más exitoso para el estudio del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico.

2.5.3 Conceptos de golpe de ariete

Con el cierre de la válvula de impulso, crea una suspensión súbita del movimiento del agua, si el fluido es completamente incomprensible, y las paredes del tubo fuesen completamente rígidas, todas las partículas de la columna de agua deberían sufrir una detención simultáneamente por efecto del choque; tomando en cuenta la segunda ley de Newton, para detener todo el flujo instantáneamente, la desaceleración sería infinita, por ende la fuerza requerida también simplemente no es posible.

El fenómeno anterior se justifica por la compresibilidad del líquido, el cierre súbito de la válvula, no detiene instantáneamente a toda la columna de agua; sino a las capas del frente de la columna de agua en movimiento, las cuales están en contacto directo con la válvula. El resto de la columna alcanza reposo gracias al choque progresivo de capas anteriores con las posteriores ya en reposo, ésta es una forma discretizada, y macroscópica de entender el fenómeno.

Evidentemente, debido a la compresibilidad del fluido, esto se hace a una velocidad finita que corresponde a la de la onda de propagación. La velocidad con la que se transmite el estado dinámico, corresponde a una perturbación sonora en el medio de trabajo.

El comportamiento de la onda puede ser perfectamente determinado con dos conceptos, cantidad de movimiento y energía, por otra parte los fluidos son capaces de transmitir perturbaciones producidas son por fenómenos de compresión y extensión mas no de deflexión o corte, en consecuencia en los

fluidos, las condiciones se transmiten solo en forma longitudinal, esto ocurre hasta que la viscosidad disipe la energía de la onda.

Por lo expuesto anteriormente, la elasticidad o compresibilidad del agua debe tomarse en cuenta cuando ocurren variaciones súbitas de presión; además en el ariete hidráulico, se tiene la superposición de otros fenómenos particulares, debido a la presencia de otra válvula conocida como de impulso, además de otros elementos como; cámara de aire, válvula de aire, en los cuales ocurren diferentes tipos de fenómenos.

2.5.4 Comportamiento de la onda dentro del funcionamiento del ariete

El estudio del golpe o martillo de ariete tiene su fundamento en la “teoría de la onda elástica”, la cual implica el desplazamiento a una velocidad dada de las variaciones de presión a lo largo de una tubería.

La velocidad de la onda, es el sonido dentro del sistema analizado, condicionada por el diámetro, el espesor y la elasticidad de la tubería además de las propiedades físicas inherentes al fluido como densidad y compresibilidad. Se entiende por período crítico de una tubería el tiempo que se tarda una onda en desplazarse desde el origen de la perturbación hasta el extremo libre y regreso. Además el tiempo de parada T es aquel intervalo entre la inclinación y terminación de la perturbación (duración del ciclo del golpe de ariete) en la vena líquida. Los factores más importantes que intervienen en el golpe de ariete son: la energía cinética, la aceleración de la gravedad, las pérdidas de carga y el movimiento de inercia del grupo de bombeo.

En el estudio de este fenómeno hay que abandonar las dos hipótesis normalmente adoptadas en flujo en tuberías: fluido incompresible y régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en el que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible.

Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda a comprender el estudio de los casos reales.

Así, al cerrarse instantáneamente la válvula de impulso de la figura 3, el frenazo provoca una sobrepresión, que se transmite aguas arriba a la velocidad del sonido. Por tanto, esta transmisión aguas arriba no ocurre de forma instantánea, sino que lo hace a una velocidad finita. En la zona por donde ha pasado la onda, el flujo se ha detenido, el fluido se ha comprimido y la tubería se ha expandido, mientras que donde aún no ha llegado, las condiciones siguen siendo las iniciales. De esta forma, se ha creado una onda elástica, una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el depósito, vuelve a la válvula y de nuevo al depósito, así sucesivamente, originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda.

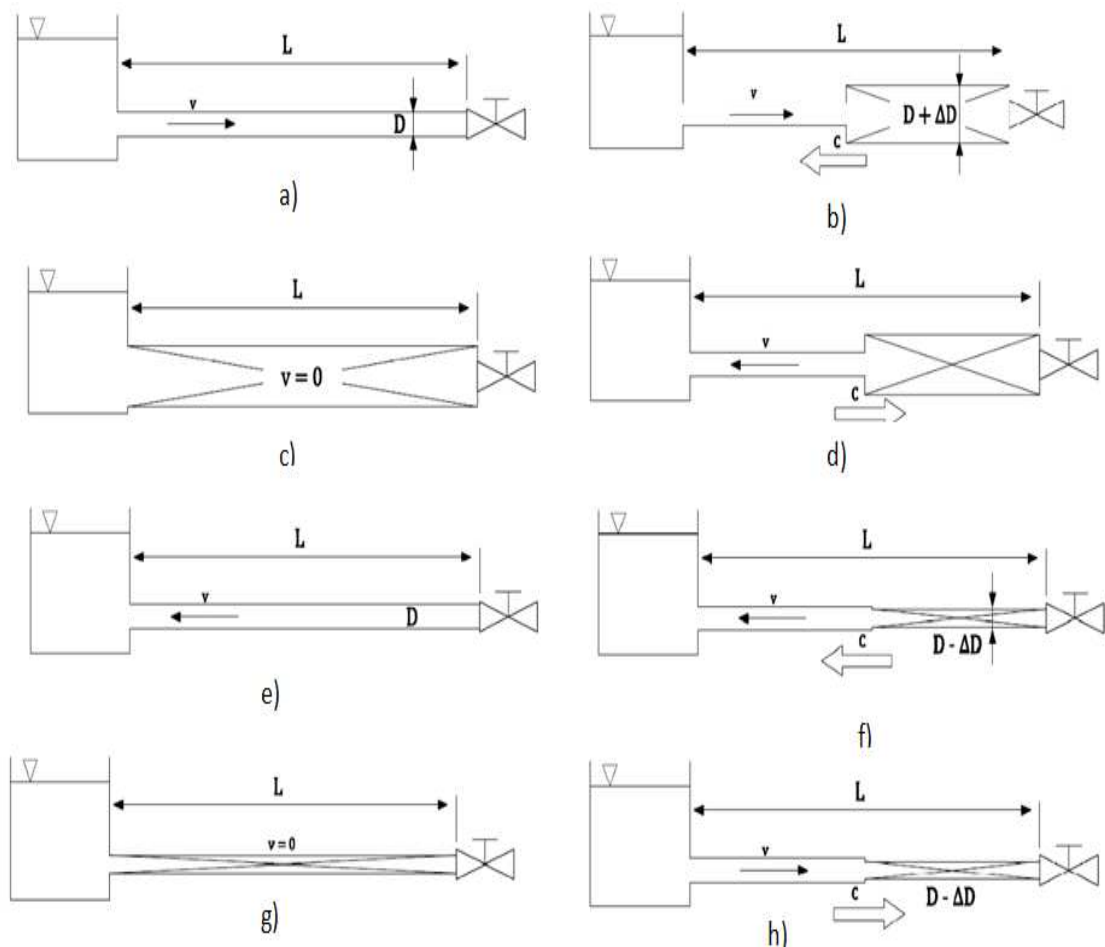
Si la longitud de la tubería se denota como L , entonces el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre la válvula y el depósito es: $t_0 = L/C$. cabo de un tiempo $4t_0 = 4L/C$, el ciclo se repite. Evidentemente, una situación ideal como esta conduciría a un bucle infinito. El proceso se repetiría indefinidamente si no existiera rozamiento en la tubería. En un caso real con rozamiento, el fenómeno se va amortiguando con el tiempo.

2.5.4.1 Proceso del golpe de ariete. A continuación se detalla el proceso del golpe de ariete instantáneo durante un ciclo completo. La explicación se complementa con la evolución gráfica de la Figura 21.

En el primer lapso el líquido en la tubería se desplaza con velocidad v desde el depósito a la válvula. Donde (D) Diámetro de la tubería normal.

En el Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería. Fig. 21 a).

Figura 21. Secuencia de propagación de la onda



Fuente: Revista de ingeniería e Investigación.

En el Tiempo $t_0 = 0.5L/C$ la onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad C y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobre presión Mitad izquierda, diámetro normal. En esa mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha el fluido se ha Comprimido en contra de la válvula. Fig. 21b).

En el Tiempo $t_0 = L/C$, la onda de presión ha llegado al depósito. En toda la tubería el líquido está en reposo y $v = 0$, pero no en equilibrio, pues se encuentra comprimido. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se recupera tras la compresión, el agua de la tubería comienza a moverse con velocidad v , pero dirigida en sentido contrario, hacia el embalse. El líquido comienza a ponerse en movimiento justo en la zona inmediatamente después de la unión tanque-tubería. Fig. 21 c).

En el tiempo $t_0 = 1.5L/C$ la mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad C . En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con velocidad v . Fig. 21 d).

En el Tiempo $t_0 = 2L/C$ la tubería regresa a su diámetro normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el embalse con velocidad v . No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería, pero por la inercia, la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad C : el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal. Fig. 21 e).

En el tiempo $t_0 = 2.5L/C$ la depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad de la derecha contiene agua en reposo y a una presión por debajo de lo normal. El diámetro de la tubería en esta mitad inferior al normal. Fig. 21 f).

En el tiempo $t_0 = 3L/C$ el agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad que va dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal. Fig. 21 g).

En el tiempo $t_0 = 3.5L/C$ en la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha, el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; C y v tienen el mismo sentido. Fig. 21 h).

En el tiempo $t_0 = 4L/C$ la tubería regresa a su diámetro normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad v hacia la válvula. Todo igual que el tiempo 0, así que efectivamente el período de este movimiento es cuatro veces t_0 y nuevamente comienza el ciclo.

2.5.4.2 Parámetros del golpe de ariete. El principal objetivo de esta investigación es el de analizar sus parámetros más importantes para su óptima configuración, y así diseñar el ariete hidráulico con una alta eficiencia, por tal razón se calcula sus parámetros más importantes. Para el desarrollo de esta investigación se sintetizó varias metodologías de cálculo de diferentes autores entre los que constan: el científico Ruso Zhukovski, Krol, Streeter, Ayala, Izquierdo, Mataix, entre otros.

2.5.4.3 Estudio del golpe de ariete. Se denomina golpe de ariete al choque que se produce sobre las paredes de un conducto forzado cuando el movimiento del líquido que viene es modificado bruscamente. En otras palabras, consiste en la sobrepresión (o subpresión) que las tuberías reciben al cerrarse o abrirse bruscamente una válvula por la energía potencial y cinética con la que corre el agua en el ariete.

El fenómeno de golpe de ariete se presenta en forma de una onda oscilatoria o celeridad que viaja a lo largo de la tubería en el momento del cierre brusco de la válvula de impulso. En este instante la cantidad de movimiento (energía cinética) se reduce a cero originando una gran presión.

La magnitud de aumento de presión debido al golpe de ariete ΔP_{ch} en una tubería cuando el tiempo de cierre es rápido, para un tiempo $t_0 = 2L/C$, se halla la condición que la energía cinética del líquido se convierte en trabajo de deformación tanto de la tubería según NEKRASOV está dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{ch} = \frac{\gamma V}{g} \frac{\sqrt{\frac{Kg}{\gamma}}}{\sqrt{1 + \frac{DK}{\delta E}}} \quad (2)$$

Dónde:

ΔP_{ch} = sobrepresión o aumento de presión (kg/m²).

γ = peso específico del agua (kg/m³)

g = aceleración debida a la gravedad (m/s²)

V = velocidad de agua en la tubería antes de cerrarse la válvula de impulso (m/s)

K= módulo de elasticidad del agua (Kg/cm²)

E= módulo de elasticidad de la tubería (Kg/cm²) Di = diámetro interior de la tubería (m)

δ = espesor de la tubería (m)

La magnitud $a = \frac{\sqrt{\frac{Kg}{Y}}}{\sqrt{1 + \frac{DK}{\delta E}}}$ representa la velocidad de onda de propagación de la onda de presión.

Por tanto la magnitud de aumento de presión de golpe de ariete puede quedar expresada:

$$\Delta P_{ch} = \frac{\gamma Va}{g}$$

Esta ecuación puede ser expresada en términos de altura de carga o sea:

$$h_a = \frac{\Delta P_{ch}}{\gamma} = \frac{Va}{g}$$

Dónde:

h_a sobrepresión (m)

El tiempo fase en que se produce la onda de sobrepresión y depresión viene determinada por:

$$T = \frac{2L}{C} \quad (3)$$

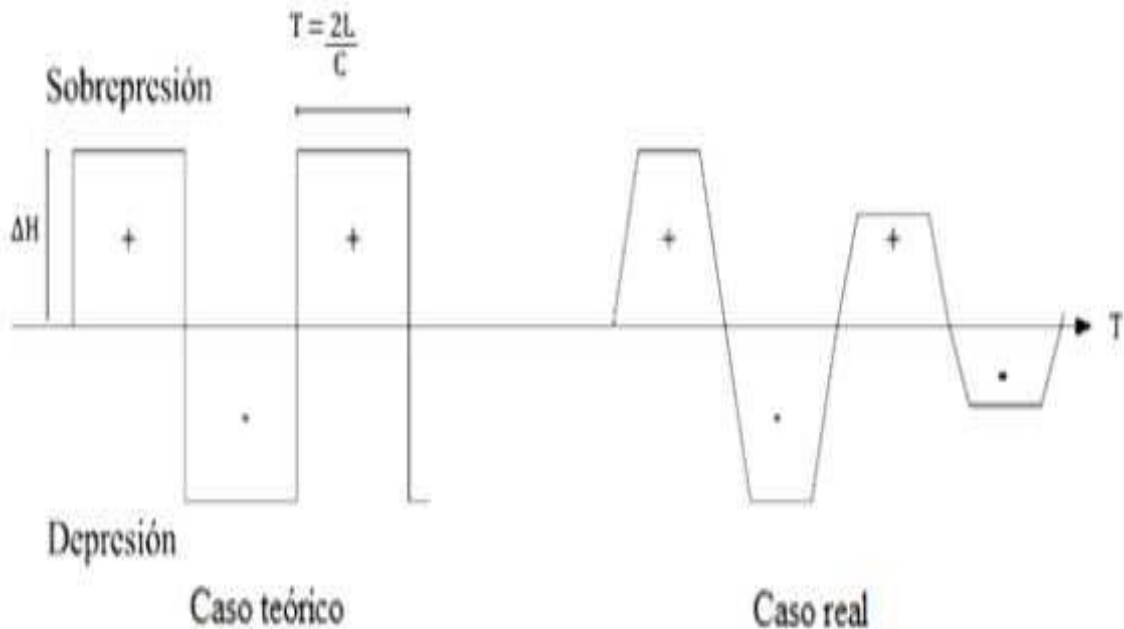
Dónde:

T = tiempo o fase (s)

L = longitud de la tubería (m).

C = velocidad de la onda presión (m/s)

Figura 22. Cambio de presión debido al golpe de ariete función del tiempo



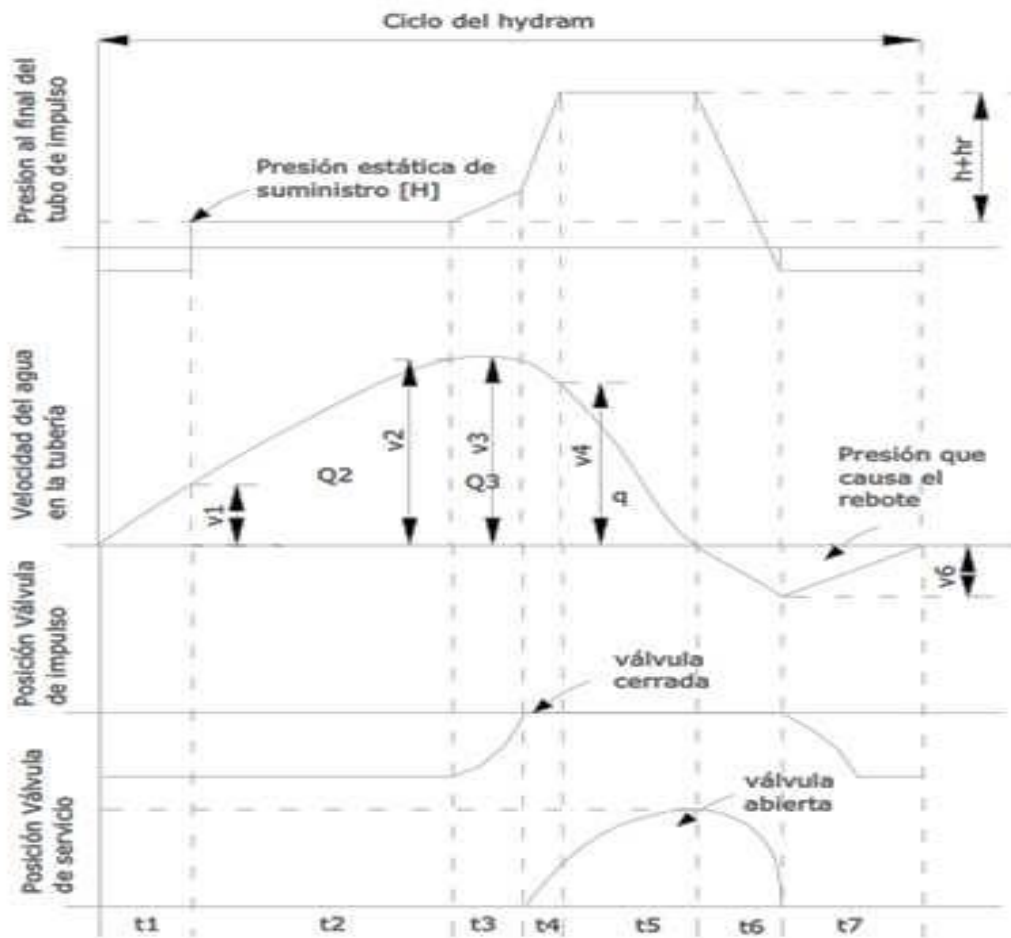
Fuente: Ricardo Alfredo López Cualla. Diseño de acueductos y alcantarillados

2.5.4.4 Ciclo teórico de operación

El funcionamiento y comportamiento del ariete hidráulico se lo representa básicamente por dos curvas en función del tiempo. Se escoge presión y velocidad debido a que estas pueden ser medidas directamente. Además de dichas gráficas se representan curvas de posición de las válvulas dentro del ciclo del ariete como se puede ver en la figura 23. Los diagramas a analizar los mencionamos a continuación.

- 1.- Presión al final de la tubería de impulso en función del tiempo.
- 2.- Velocidad del agua en la tubería de impulso en función del tiempo.
- 3.- Posición de la válvula de impulso en función del tiempo
- 4.- Posición de la válvula de servicio en función del tiempo

Figura 23.Ciclo teórico de operación del ariete hidráulico



Fuente:KROL, J.The Automatic Hydraulic Ram

Para el propósito de análisis matemático del ciclo, Krol divide en siete periodos el ciclo teórico de operación del ariete, los cuales son discutidos a continuación.

Análisis del periodo 1. Este período también es conocido como de aceleración ya que la masa agua se desperdicia hasta adquirir una energía cinética suficiente para iniciar el cierre de válvula. Se inicia el período en un instante del ciclo en el que por efectos del ciclo anterior el agua ha retornado hacia el reservorio una distancia “y”, desde el extremo inferior del tubo de impulso.

La presión en el cuerpo del ariete es la atmosférica y el agua en el tubo de alimentación está completamente en reposo; estado que será cambiado por la acción de la carga de agua del reservorio de alimentación.

Por otra parte la válvula de servicio o entrega se mantiene cerrada gracias a la carga de servicio que actúa en ella. Se forma una bolsa de aire: esta pequeña cantidad de aire se asegura gracias al vacío o succión que se genera en los alrededores de la válvula de impulso por efecto del desperdicio de agua.

Una vez que el frente de la columna de agua hace contacto con la válvula de impulso, el período 1, finaliza.

Teóricamente la aceleración del agua en la tubería de impulso está dada según la ley de Newton:

$$\sum F = m \cdot a \quad (4)$$

$$\gamma A \left[h - \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) \frac{V^2}{2g} \right] = \frac{\gamma A L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$\left[h - \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k \right) \frac{V^2}{2g} \right] = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Como los valores durante este periodo son pequeños, el segundo término se puede despreciarse quedando la siguiente ecuación simplificada:

$$h = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} \quad (5)$$

Si reemplazamos $v = \frac{dy}{dt}$ en la ecuación anterior ya que el agua tiene que recorrer una distancia "y".

Tenemos:

$$H = \frac{L}{g} \frac{d^2y}{dt^2}$$

Integrando la ecuación se obtiene como solución:

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gh}} \quad (6)$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}} \quad (7)$$

Dónde:

h= altura disponible (m)

t1= tiempo de periodo 1 (s)

y= distancia debido al retroceso del agua (m)

V1 = velocidad del agua e la tubería de impulso durante el periodo 1 (m/s)

Análisis del periodo 2. El flujo se incrementa al máximo a través de la válvula de impulso abierta. La aceleración del agua continua hasta que esta alcance a llegar una velocidad V2, necesaria para que ocurra el cierre de la válvula de impulso, esta velocidad viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_2 = \sqrt{\frac{Wg}{\bar{A} \gamma K_0}} \quad (8)$$

Dónde:

V_2 = velocidad del agua en la tubería de impulso durante el periodo 2, (m/s)

W = peso de la válvula de impulso (kg)

A' = área de la válvula de impulso (m^2)

K_o = coeficiente de resistencia de cierre de la válvula de impulso.

Según BEGERON, recomienda que la velocidad en la tubería de impulso necesaria para que ocurra el cierre de la válvula de impulso es:

$$V_2 = (0.3 \text{ a } 0.5) \sqrt{\frac{2gH}{Z}} \quad (9)$$

Dónde:

Z = coeficiente total de pérdidas

h = altura disponible (m)

g = gravedad (m/s^2)

El período 2 forma la mayor parte del tiempo tal de la duración del ciclo completo (T); por tanto la pérdida debida a la fricción y accesorios debe ser considerada.

Haciendo el análisis de fuerzas que actúan en la tubería de impulso se tiene:

$$\gamma AH - \gamma A \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k\right) \frac{V^2}{2g} = \frac{\gamma AL}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$H - \left(1 + f \frac{L}{D} + \sum k\right) \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Si:

$$z = 1 + f \frac{L}{D} + \sum K_z$$

Se tiene:

$$H - Z \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Multiplicando esta ecuación por $\frac{2g}{Z}$ y despejando dt, se tiene:

$$dt = \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - V^2} dv \quad (10)$$

Integrando esta ecuación con los límites $V= V1$ y $V= V2$, se tiene:

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \frac{\left[1 + \sqrt{\frac{WZ}{2\dot{A}HyK_0}} \right] \left[1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}} \right]}{\left[1 - \sqrt{\frac{WZ}{2\dot{A}HyK_0}} \right] \left[1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}} \right]} \quad (11)$$

Dónde:

t_2 = tiempo de período 2 (s).

La cantidad de agua desechada por la válvula de impulso durante este periodo vendrá dado por:

$$Q_2 = \gamma A \int_{v1}^{v2} V dt$$

Reemplazando el valor de dt de la ecuación 10 se tiene:

$$Q_2 = \gamma A \int_{v_1}^{v_2} V \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - V^2} dv$$

Teniendo como solución:

$$Q_2 = \frac{\gamma AL}{Z} \ln \left[\frac{\frac{2gH}{Z} - \frac{2gHy}{L}}{\frac{2gH}{Z} - \frac{Wg}{\dot{A}\gamma K_0}} \right] \quad (12)$$

Dónde:

Q_2 = cantidad de agua desechada durante el período 2 (kg/ciclo).

A = área de la tubería de impulso, (m²)

Una importante relación puede ser establecida por la siguiente expresión:

$$\frac{Wg}{\dot{A}\gamma K_0} = \frac{2gH}{Z} \quad (13)$$

Si se lleva este valor a la ecuación 14 su denominador sería igual a cero, lo que traerá como consecuencia el valor de $\ln = \infty$ y $Q_2 = \infty$

El valor de $Q_2 = \infty$ indica que cuando se cumple la relación ecuación 12 la válvula de impulso no cerrará completamente. Por tanto el peso de la válvula de impulso debe satisfacer la siguiente condición.

$$0 < W < \frac{2H\dot{A}\gamma K_0}{Z} \quad (14)$$

Integrando la ecuación 10 con respecto a t, con los límites $V = 0$ y $V = V_2$, la duración de los períodos 1 y 2 está dada por la siguiente ecuación:

$$\int_0^{t_1+t_2} dt = \int_0^{v_2} \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

Se tiene como solución:

$$t_1 + t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \left[\frac{1 + (wz/2\dot{A} H\gamma K_0)^{1/2}}{1 - (wz/2\dot{A} H\gamma K_0)^{1/2}} \right]$$

Análisis del período 3. La velocidad del agua es ahora tal que, la acción de la fuerza en la superficie interior de la válvula de impulso es superior que el peso de la misma. La válvula de impulso comienza a cerrarse y es completado su cierre al final del período.

El análisis del período 3 es complicado por el hecho que el agua y la válvula de impulso están en movimiento. Sin embargo usando la ecuación fundamental de movimiento, fuerza igual a masa por aceleración e introduciendo algunas simplificaciones matemáticas se tiene que, las ecuaciones aproximadas para el movimiento de la válvula de impulso son:

$$\frac{d^2S}{dt^2} = \frac{\frac{2Hg^2t}{L} \left[1 - \frac{WZ}{2\dot{A} H\gamma K_0} \right]}{\sqrt{\frac{Wg}{\dot{A}\gamma K_0}}}$$

Lo cual da finalmente:

$$T_3 = \sqrt[3]{\frac{LS(Wg/\dot{A}\gamma K_0)^{1/2}}{4g^2H(1 - Wz/2\dot{A}H\gamma K_0)}} \quad (16)$$

Dónde:

t_3 = tiempo del período 3 (s)

S = carrera de la válvula de impulso (m)

La variación de velocidad del agua durante el período 3, es un tanto obscura para ser expresada matemáticamente. Porque debido a la corta duración del período 3, la velocidad no varía grandemente desde su valor inicial V_2 ; por tanto para fines prácticos puede asumirse que:

$$V_2 = V_3 \quad (17)$$

Sobre esta base la cantidad de agua desechada durante el período 3 puede ser estimado como:

$$Q_3 = \gamma A V_3 t_3 \quad (18)$$

Dónde:

Q_3 = cantidad de agua desechada durante el período 3 (kg/ciclo)

La energía cinética de la columna de agua detenida al final del período 3 puede ser determinada como:

$$E_c = \frac{mV_3^2}{2}$$

Si:

$$V_3 = V_2$$

$$m = \frac{\gamma AL}{g}$$

Se tiene:

$$E_c = \frac{\gamma AL}{2g} V_3^2 \quad (19)$$

Dónde:

E_c = energía al final del período 3 (kg-m/ciclo)

V_3 = velocidad del agua en la tubería de impulso durante el período 3 (m/s)

Análisis período 4. Al final del período 3, la válvula de impulso es cerrada completamente y una retardación brusca da lugar causando la abertura de la válvula de descarga mientras que al mismo tiempo la velocidad en la tubería de impulso es reducida en proporción a la cabeza de presión $(h+hr)$ generada en exceso de la carga estática H . Considerando la inercia de las válvulas, toma un tiempo hasta que el momento dinámico creado por el golpe de ariete se traslade hasta la válvula de impulso en un tiempo $2L/a$. Además la bolsa de aire que se generó por vacío en el período 1, bajo la válvula de impulso, se comprime por la acción de la presión.

La duración del período 4 es muy corto pudiendo ser estimado como:

$$t_4 = \frac{2L}{a} \quad (20)$$

Dónde:

t_4 = tiempo del período 4 (s)

Se puede decir que t_4 , es el tiempo requerido para una completa reflexión de una onda de presión viajada a lo largo de la tubería de impulso.

Sí la velocidad del agua al final del período es V_4 , en ese instante se tiene la siguiente relación:

$$V_4 = V_3 - (h + hr) \frac{g}{a} \quad (21)$$

Dónde:

V_4 = velocidad al final del período 4 (m/s)

h = altura de descarga medida sobre el nivel de suministro (m)

h_r = pérdida de carga durante el período de retardación (m)

La pérdida h_r durante el período de retardación en la tubería de impulso, válvula de descarga y tubería de descarga, puede ser determinada por:

$$h_r = 5.64 \left(1 - \frac{h}{h_{\max}} \right) \quad (22)$$

Dónde:

h_{\max} = Altura de descarga desarrollada por el ariete (m)

De la ecuación 18 la altura máxima de descarga que desarrolla un ariete puede determinarse cuando $V_4 = 0$ y $h_r = 0$.

Por tanto:

$$h_{\max} = \frac{aV^3}{g} \quad (23)$$

Sí:

$V_3 = V_4$

Se tiene:

$$h_{\max} = \frac{aV^3}{g} \quad (24)$$

Esta ecuación muestra que para un peso dado de la válvula de impulso (W) y una longitud de carrera S , hay siempre una altura máxima de descarga a la cual no puede

ser bombeada el agua y también muestra que si la válvula de impulso es demasiado liviana, únicamente una pequeña altura de descarga puede ser obtenido.

Debido a la reducción de velocidad en este período por efecto de la subida de presión (golpe de ariete), hay una cierta pérdida de energía cinética que es gastada en la compresión del agua contenida en la tubería de impulso y el ensanchamiento de las paredes de la misma.

Esta pérdida de energía cinética puede ser determinada como:

$$E_{cp} = \frac{m\Delta V^2}{2}$$

Sí:

$$\Delta V^2 = \frac{(h+hr)^2}{a^2}$$

$$m = \frac{\gamma AL}{g}$$

Se tiene:

$$E_{cp} = \frac{\gamma ALg(h+hr)^2}{2a^2} \quad (25)$$

Dónde:

E_{cp} = pérdida de energía cinética (Kg-m/ ciclo).

Análisis del período 5. La válvula de descarga se abre completamente y el agua es descargada dentro de la cámara de aire a una velocidad V_4 , en ese instante es aprovechada la energía disponible para bombear la cantidad q' contra la carga $(h+hr)$ que es igual a la energía cinética desarrollada al final del período 3, menos la energía cinética gastada en la compresión del agua y dilatamiento de las paredes de la tubería. La cantidad de agua descargada por el ciclo es por tanto:

$$q'(h + hr) = Ec - Ecp$$

$$q' = \frac{EC - Ecp}{(h + hr)} \quad (26)$$

Dónde:

q' = cantidad de agua descargada por el ciclo (Kg/ ciclo)

La duración del período 5, puede ser determinada por el teorema de impulso o cantidad de movimiento.

$$Fdt = m dv \quad (27)$$

$$(h + hr)\gamma At_5 = \frac{\gamma AL}{g} (V4 - V5)$$

Si:

$$V4 = V3 - \frac{(h + hr)g}{a}$$

$$V3 = V4$$

Se tiene:

$$t_5 = \frac{L}{(h + hr)g} \left[\sqrt{\frac{Wg}{\hat{A}\gamma K_0} - \frac{(h + hr)g}{a}} \right] \quad (28)$$

Dónde:

t_5 = tiempo de período 5 (s)

El resultado obtenido muestra que el tiempo de descarga decrece rápidamente con el incremento de altura de descarga.

Análisis del período 6. Al final del período 5, la velocidad del agua en la válvula de descarga es de recorrido nulo y el total de la energía disponible para bombear es consumida; la válvula de descarga está cerrada. Este cierre de la válvula pretende que la tubería de impulso, permanezca bajo la altura de presión total ($H + h + hr$), súbitamente retornando a la altura estática disponible H .

El tiempo de duración que este cambio tiene lugar, es muy corto y puede ser estimado como el tiempo requerido para una reflexión completa de una onda de presión.

$$t_6 = \frac{2L}{a}$$

Dónde:

$$t_6 = \text{ tiempo de período 6 (s)}$$

Como resultado del cambio repentino de presión, la energía de deformación del agua y la tubería; ecuación 22 es convertida en la energía cinética del movimiento del agua hacia el tanque de suministro.

La magnitud de la velocidad negativa con que el agua retrocede desde la válvula de impulso puede ser obtenida igualando la energía de deformación del agua y la tubería de impulso para la energía cinética, que produce V_6

$$\frac{A\gamma Lg(h + hr)^2}{2a^2} = \frac{\gamma AL}{2g} V_6^2$$

$$V_6 = - \frac{(h + hr)g}{a} \quad (29)$$

Dónde:

$$V_6 = \text{ velocidad al final del período 6 (m/s).}$$

Este periodo comprende el intervalo de tiempo desde que se cierra la válvula de descarga hasta el inicio de apertura de la de impulso por la inercia de las válvulas, además posee dos actividades.

a) Flujo de retroceso

En el instante del cierre de la válvula de descarga la presión en el cuerpo del ariete será apenas menor respecto a la presión de la cámara de aire. Esta condición se alivia por un flujo de retorno del tubo de alimentación hacia el reservorio alcanzado de este modo una presión menor a la atmosférica del cuerpo del ariete.

b) Reposición de aire a la cámara de aire

En breve intervalo de “vacío” en el cuerpo del ariete se aprovechado para reponer el aire perdido; introduciendo cierta cantidad de aire mediante una pequeña válvula antiretorno de aire, situada bajo la válvula de servicio. La energía elástica que acumuló el volumen de agua en el tubo de impulso, se convierte en cinética.

Análisis del período 7. Al final del período 6, el agua en la tubería de impulso adquiere una velocidad negativa, consecuentemente la válvula de impulso se abre bajo la acción del peso una diferencia de presión causada por el retroceso del agua.

El tiempo t_7 durante el cual el agua se mueve lejos de la válvula de impulso, puede ser encontrado por la ecuación 5 del período 1. La solución de la ecuación da:

$$H = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

$$t_7 = \frac{L}{gH} V_6$$

Reemplazando el valor de V_6 , se tiene:

$$t_7 = \frac{L(h + hr)}{Ha} \quad (30)$$

Dónde:

t_7 = tiempo del período 7 (s)

La magnitud de la distancia y viajada por el retroceso del agua dentro de la tubería de impulso puede ser obtenida igualando las ecuaciones 7 y 30.

$V_1 = V_6$

$$\sqrt{\frac{2gHy}{L}} = \frac{(h + hr)g}{a}$$

$$y = \frac{(h + hr)^2 Lg}{2Ha^2} \quad (31)$$

Dónde:

y = distancia debido al retroceso del agua en la tubería de impulso (m)

2.5.5 Apertura de la válvula de impulso

El efecto combinado de la presión atmosférica que actúan en la cara exterior de la válvula de impulso, el peso de la misma y la presión interna que actúa en la cara interior, producen una fuerza resultante suficiente para abrir la válvula automáticamente. Además la onda de presión que se refleja de regreso hacia arriba del tubo de impulso, causa una ligera succión en el cuerpo del ariete.

2.5.6 Desaceleración del flujo de retorno hacia el reservorio

Al abrirse la válvula de impulso, el vacío en el cuerpo del ariete comienza a desaparecer debido a que la presión trata de igualarse con la atmosférica. Por otro lado, la carga de suministro y la fricción en el tubo actúan para desacelerar el flujo de retorno al reservorio. Por estos efectos, se llega a detener el flujo de retorno. De esta forma, al final del período se tiene las condiciones iniciales del período 1 y el ciclo se repite.

Los resultados del análisis anterior pueden ser resumidos en las siguientes formulas principales:

1. La cantidad del agua descargada por el ciclo:

$$q' = \frac{Ec - Ecp}{(h + hr)} \quad (32)$$

2. La cantidad de agua desechada por ciclo

$$Q' = Q2 + Q \quad (33)$$

3. Duración total del ciclo:

$$T = t1 + t3 + t4 + t5 + t6 + t7 \quad (34)$$

4. La eficiencia de acuerdo a la fórmula propuesta por Eytelwein y Rankine

$$\eta = \frac{q'h}{Q'H} \quad (35)$$

5. La potencia desarrollada:

$$P = \frac{q'h}{T} \left[\frac{kg - m}{s} \right] \quad (36)$$

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS, VARIABLES E INDICADORES

3.1 HIPÓTESIS

3.1.1 HIPÓTESIS GENERAL

Eficiente diseño e instalación del sistema de bombeo mediante Ariete Hidráulico para la dotación óptima del agua en la localidad de Huachog.

3.1.2 HIPOTESIS ESPESIFICA

Adecuada topografía de la zona.
Bajos costos del sistema de bombeo.
Larga vida útil del bombeo.
Calidad de vida de los pobladores.

3.2 SISTEMA DE VARIABLES E INDICADORES

3.2.1 VARIABLE INDEPENDIENTE

Instalación del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico.
Caudal y Topografía de la zona
Bomba de Ariete Hidráulico

3.2.2 VARIABLE DEPENDIENTE

Solucionar los problemas de agua potable en la Localidad de Huachog.

3.2.3 DEFINICION OPERACIONAL DE VARIABLES

VARIABLE INDEPENDIENTE	CRITERIO	INDICADORES
Instalación del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico	Diseñar un ariete hidráulico que cumple con los parámetros establecidos.	Eficiencia y operatividad

VARIABLE DEPENDIENTE	CRITERIO	INDICADORES
Adecuada topografía y caudal en la zona	Evaluar las alturas disponibles	Altura a alcanzar con la bomba

CAPÍTULO IV

MARCO METODOLOGICO

4.1 TIPO, NIVEL Y DISEÑO DE ENSAYO

4.1.1 TIPO DE INVESTIGACION

- **Por su finalidad.**

Es aplicada por que su aporte está dirigido a solucionar los problemas de sistema de bombeo, cuya fundamentación se encuentra el marco teórico.

- **Según el tipo de diseño (propósito de estudio), experimental.**

El estudio que se realiza es mediante la observación, registro y análisis de las variables independientes de la investigación sobre ensayos y ambientes creados para facilitar la manipulación de las mismas.

- **Según el estudio en el tiempo (número de mediciones), Transversal o sincrónica.**

El estudio o análisis de los ensayos se circunscribe en un solo momento, en un tiempo determinado durante el tiempo programado de realizar los ensayos a fin medir u observar sus características en un tiempo específico.

- **Según la cronología de las observaciones, prospectivo.**

Porque la información se recopila luego de planificar el proceso de experimentación.

- **Según el énfasis en la naturaleza de los datos manejados, Cuantitativa.**

Porque la preponderancia del estudio de los datos que es producto de los ensayos se basa en la cuantificación y cálculo de los mismos.

4.1.2 NIVEL DE INVESTIGACION

Descriptivo, cuasi experimental, se señala como es y cómo se manifiesta un fenómeno o ensayo, cuando se busca cuantificar la medición y evaluar los resultados del ensayo.

4.2 UNIVERSO POBLACION Y MUESTRA

4.2.1 La población o universo

La población o universo en la presente investigación está relacionada dentro de una población infinita, debido a los diferentes factores hidráulicos que pueden variar dentro de la investigación. El objeto de estudio en este caso específico fueron los factores hidráulicos, Realizar un estudio general de la topografía de la zona, analizar las opciones más factibles para que el sistema de bombeo tenga una vida útil larga, evaluar las diferentes alturas disponibles y altura a alcanzar con la bomba, diseñar un ariete hidráulico que cumpla con los parámetros establecidos de eficiencia y operatividad, seleccionar los equipos y materiales que garanticen el funcionamiento adecuado y durabilidad del proyecto, realizar las pruebas necesarias para establecer las curvas de rendimiento y eficiencia, para condiciones óptimas de instalación y operación del sistema, establecer el análisis económico para la evaluación del sistema de bombeo, con respecto a otro sistema de bombeo a base de energía eléctrica, los cuales fueron modificados para investigar el comportamiento de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.

4.2.2 La muestra

Como la población en la presente investigación es infinita debido a las características explicadas anteriormente, se puede decir que la muestra en este caso son los factores hidráulicos que afectan directamente a la eficiencia de la bomba de ariete; de los cuales para este trabajo de investigación se han seleccionado.

4.3 CALCULOS PROCEDIMIENTOS Y TECNICAS

4.3.1. Diseño mecánico

Este capítulo tiene la finalidad de determinar un método para la construcción del ariete, mediante la cuantificación de los esfuerzos que actúan en los distintos periodos del ciclo teórico de funcionamiento.

Para desarrollar el procedimiento de cálculo se ha tenido en cuenta la Mecánica de Fluidos, además de varios documentos de varias instituciones dedicadas al estudio de energías alternativas. En dicho procedimiento se van a realizar todos los cálculos necesarios para determinar todas las propiedades que tiene el ariete y con ello vamos a poder determinar cómo se comportará y luego verificaremos dichos cálculos con el comportamiento del ariete hidráulico en funcionamiento.

El ariete hidráulico a diseñar se ajustará se adaptara a las siguientes observaciones las cuales se mencionan a continuación:

1. Disponibilidad de materiales existentes en nuestro medio
2. Disponibilidad de herramientas, máquinas y mano de obra para su construcción
3. Facilidad de instalación y montaje en el lugar de trabajo
4. Facilidad de operaciones y mantenimiento

Estas consideraciones se han determinado teniendo en cuenta el factor económico, debido a que se trata de proporcionar una maquina sencilla, de bajo costo y fácil adquisición por personas de escaso recurso económico.

4.3.2 Parámetros de diseño

4.3.2.1 Cantidad de agua impulsadora

Cantidad de agua impulsadora (Q_f), a utilizar está adjudicado por la comunidad para el funcionamiento del ariete durante las 24 horas del día con el siguiente dato $Q_f = 2\text{lt/s}$

La cantidad de agua que se dispone en el lugar instalarse viene a través de un canal que existe en la zona tiene un caudal máximo de 30lt/s , y en tiempos de estiaje llega

a un valor mínimo de 20 lt/s como se puede observar en la figura 15 expuesto en el capítulo II, cantidad de agua que garantizará el funcionamiento continuo del ariete.

4.3.2.2 Altura disponible

Esta altura disponible o caída de funcionamiento (H) determinan en gran parte la cantidad de agua descargada, cuanto mayor sea la altura disponible en comparación con la altura de descarga, tanto mayor será la cantidad de agua descargada por el ariete.

Se realizó mediciones de alturas con el Teodolito y además se constataron estos datos con la ayuda de GPS (Global Position System) en donde se obtuvo la altura disponible desde el tanque de presión hasta el ariete con valor de 17m; el tanque de presión dispone de una altura de 1867 m y en el lugar donde está ubicado el ariete una altura de 1850m, la misma que se encuentra en los rangos recomendados para el funcionamiento del ariete.

4.3.2.3 Diseño de obras civiles

La realización de obras civiles en el proyecto tales como bocatomas, desarenador, no son necesarias ya que la captación del agua es directamente desde un canal de riego como se mencionó anteriormente, pero el de vital importancia el diseño del tanque de presión.

4.3.2.3.1 Tanque de Presión. El dimensionamiento del tanque de presión se debe considerar 2 aspectos relevantes como son: el volumen y la altura mínima sobre la tubería de presión, para lo cual se determina el diámetro de la tubería de impulsión.

Cálculo y selección del diámetro de impulsión. La tubería de impulsión o presión transporta agua bajo presión debido al comportamiento de la bomba de ariete por lo que la selección es uno de los parámetros más importantes para el óptimo funcionamiento del sistema, por la cual se debe considerar los materiales

frecuentemente utilizados en estas instalaciones, tomando su peso, el grado de dificultad de instalación, costo, transporte hasta el sitio de instalación y entre otros factores.

Para la selección de la tubería de presión se realizó un análisis de las bondades que posee cada uno de estos materiales para lo cual se analizó: tubería de PVC, Tubería Acero Comercial y la tubería de Hierro Galvanizado.

Tabla 2. Características de materiales para la tubería de presión

MATERIAL	Perdida por fricción	Peso	Corrosión	costo	Presión de trabajo	Vida útil
PVC	5	5	4	4	3	3
Hierro Galvanizado	4	4	4	4	5	5
Acero Comercial	3	3	3	2	4	4

Fuente: Autores

El diámetro de la tubería de presión, se determina con la ecuación de Bondschú[11]

$$D = 1.27 * \frac{Qf^{0.4268}}{(H + h_s)^{0.1423}} \quad (37)$$

Donde:

Qf = caudal de diseño, (m³ /s).

H = altura bruta o altura disponible, (m).

h_s = altura de sobrepresión por el golpe de ariete, (m)

Sí:

Qf = 2 lt/s = 0.001706 m³ /s

$$H = 17(\text{m}).$$

$$h_s = 0.3H = 0.3 (17) = 5.1 \text{ m}$$

Entonces:

$$D = 1.27 * \frac{0.001706^{0.4268}}{(17 + 5.1 * 17)^{0.1423}} = 0.05671\text{m} = 2\text{plg}$$

La selección de la tubería se realiza tomando en cuenta las características de cada una de ellas siendo el más óptimo la tubería de hierro galvanizado por las propiedades que posee, además se selecciona esta tubería ya que los moradores de la zona tenían la tubería ya comprada, con esto economizamos el costo del proyecto.

Tubería de Hierro Galvanizado de las siguientes características):

Diámetro Nominal = 2 in

Diámetro Interior = 57.65 mm

Diámetro exterior = 60.30 mm

Espesor Nominal = 2.65 mm

Presión de Trabajo = 21 kg/ mm²

Rugosidad Absoluta = 0.15m

Esfuerzo máximo admisible = 14 kg/ mm²

La tubería seleccionada para la instalación a la intemperie tiene un diámetro interior de 57.65 mm, con un diámetro exterior de 60.30 mm y un espesor de 2.65 mm.

La tubería de presión que conecta el tanque de alimentación con el Ariete Hidráulico y constituye el elemento fijo más importante conjuntamente con la caja de válvulas, y a la vez soporta con mayor intensidad los efectos del choque hidráulico.

La tubería de impulsión se la debe instalar de manera que la entrada del tubo debe estar abocardada, así se evita pérdidas por fricción. Caso contrario se liberan gases

del agua formando burbujas que permanecen en la tubería de impulsión haciendo de colchones neumáticos que disminuyen la eficiencia del sistema.

La tubería de impulso de hierro galvanizado será capaz q soporte las sobrepresiones debidas al golpe de ariete, a fin de evitar resistencias adicionales y una posible cavitación, se ha de colocar recta y lo mejor es asegurarse que este apoyada firmemente.

Cálculo de la sección de la tubería de impulsión [12]

$$A = \frac{\pi D_i^2}{4} \quad (38)$$

$$A = \frac{\pi(0.05765)^2}{4} = 0.00261m^2$$

Cálculo de longitud de la tubería de impulso. De la longitud del conducto de impulso dependerá el funcionamiento automático del ariete. Si no tiene la dimensión correcta el cambio de volumen entre expansión y contracción no es suficiente para producir succión necesaria para abrir la válvula de impulso o el tiempo entre los extremos será demasiado corta para superar la inercia de la misma válvula.

La longitud no debe ser muy corta ya que ese provoca un cierre rápido de la válvula de impulso lo cual no permite un aumento de presión adecuado, si la dimensión es muy larga las pérdidas por fricción dominan reduciendo la capacidad de la bomba.

El correcto funcionamiento tanto de la longitud como del diámetro del mismo es una de la parte esencial del diseño; aunque la bomba de ariete trabajará satisfactoriamente si la relación de la longitud (L) de la tubería con su respectivo diámetro (D), está entre los límites , $150 \leq \frac{L}{D} \leq 100$ fuera de este rango la operación del ariete puede verse afectado notoriamente.

Se debe tener en cuenta que el agua que se acelera en el tubo de alimentación, es lo que provoca el “golpe de ariete”, por lo que éste ha de tener una longitud, inclinación y diámetro adecuados, sin curvas ni estrechamientos que provoque cargas por rozamientos. A continuación mostramos en la tabla los rangos establecidos de longitud de tubería para diferentes diámetros.

Tabla 3. Rango de longitud de tubería de impulso para diferentes diámetros

Diámetro(mm)	Longitud (m)	
	Mínimo	Máximo
13	2	13
20	3	20
25	4	25
30	4,5	30
40	6	40
50	7,5	50
80	12	80

Fuente: www.lifewater.org

Para el caso del ariete es favorable un cierre rápido ($T < 2L/a$), explicado en el capítulo anterior: ya que alcanza mayores sobrepresiones, no obstante se debe tener en cuenta que no fallen los materiales. Las vibraciones que produce el golpe de ariete hacen necesario prever un tubo de impulso, por tal razón el material de la tubería es de hierro galvanizado, que resista un régimen de trabajo caracterizado por fatiga excesiva.

La longitud de la tubería de impulso desde la fuente de suministro a la bomba se calcula con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{H}{\text{sen } \theta} \quad (39)$$

Dónde:

L= longitud de tubería de impulso (m)

H= altura disponible (m)

θ = ángulo de inclinación del terreno tendido de la tubería de impulso ($^{\circ}$) Si:

$$H = 17\text{m}$$

$$\theta = 28^{\circ}$$

Tenemos:

$$L = \frac{17}{\text{sen } 28} = 36 \text{ m}$$

A esta longitud se ha agregado un tramo de 0.846 m desde el final de la tubería que se acopla 1 válvula de compuerta, 1 neplo. Por lo tanto la tubería total de la tubería de impulso desde el tanque de abastecimiento hasta el ariete será:

$$L = 36 + 0.096 + 0.4 + 5(0.07) = 36.84 \text{ m}$$

$$L = 36.84 \text{ m}$$

$$150 \leq \frac{36.84}{0.0603} \leq 1000$$

Como se puede observar la longitud de tubería de impulso se encuentra dentro de los límites de 150 a 1000 y también en los rangos recomendados de la Tabla 3 la selección es correcta.

Cálculo de la velocidad del agua en la tubería de impulsión

$$V_0 = \frac{Q}{A} \quad (40)$$

$$V_0 = \frac{0.001706}{0.002610} = 0.65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Volumen del tanque de presión

Con el fin de mantener constante el caudal que entra en la tubería de presión y al mismo tiempo evitar que ingrese aire el volumen del tanque se determina con la siguiente ecuación:

$$V = \frac{0.693 * A * V_0^2}{i * g} \quad (41)$$

Donde:

V= volumen del tanque (m3)

A =sección del canal o tubería de conducción (m2)

V0 = velocidad del agua en la conducción (m/s)

g = aceleración de la gravedad (m/s2)

i = porcentaje de la pendiente del terreno (%)

Si:

A = 0.002610 m2

V0 = 0.65 m/s

g = 9.8 m/s2

i = 1% = 0.01

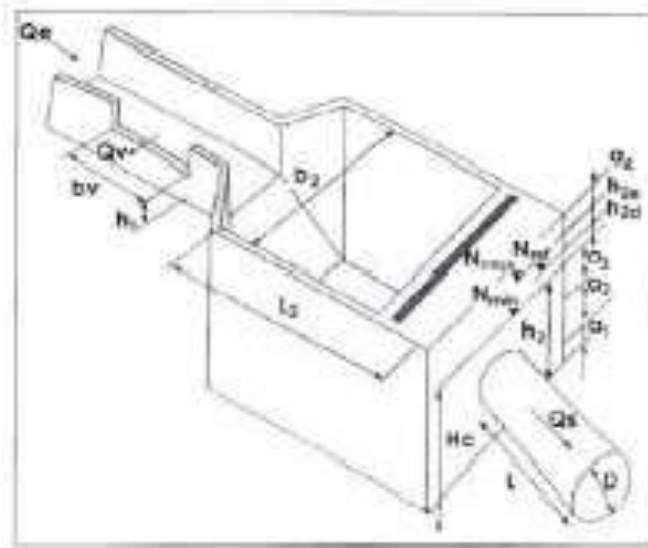
entonces:

$$V = \frac{0.693 * 0.002610 * (0.65)^2}{0.01 * 9.8} = 0.67m^3$$

Dimensionamiento del tanque de presión

Para el dimensionamiento del tanque de presión se debe considerar principalmente el volumen y la altura mínima del agua sobre la tubería de presión.

Figura 24.Dimensiones del tanque de presión



Fuente:Manual de Mini y Micro centrales Hidráulicas.

Como primer paso seleccionamos la altura a_1 , altura que será seleccionada para evitar la entrada de sedimentos a la tubería de impulsión. Según Ortiz la altura debe estar comprendida entre el rango de valores de 0.3 a 0.5m.

$a_1 = 0.4\text{m}$

La altura a_2 tiene el valor del diámetro exterior de la tubería de impulsión que es de $a_2 = 0.0603\text{ m}$

El valor de a_3 para evitar que exista torbellinos creados por el flujo de tal manera que evite cavitación, el valor establecido se encuentra en los rangos de:

$$0.5 D \leq a_3 \leq 1.5D \quad (42)$$

Dónde:

D = diámetro exterior de la tubería en m

Sí:

D = 0.0603m

Entonces:

$a_3 = 1.5 (0.0603) = 0.09\text{m}$

Altura mínima de agua sobre la tubería de presión. Con el fin de evitar en lo máximo la formación de remolinos y así evitar la entrada de aire a la tubería se selecciona esta altura de tal manera que no disminuya la eficiencia de la bomba de ariete ni el paro de la misma. Entonces se establece esta altura mínima, la cual debe quedar a una distancia bajo el nivel del agua hasta la tubería de impulsión como se puede observar en la Figura 24. Esta altura que viene determinado por la siguiente ecuación:

$$h_2 = a_1 + a_2 + a_3 \quad (43)$$

$$h_2 = 0.4 + 0.063 + 0.09 = 0.60\text{m}$$

la máxima altura de agua sobre la tubería de presión para la salida frontal se calcula con la siguiente ecuación:

$$a_4 = 0.543 * V_0 * \sqrt{D_i} \quad (44)$$

Donde:

A_4 = altura máxima (m)

V_0 = velocidad en la tubería de presión (m/s)

D_i = diámetro interior de la tubería de presión (m)

Si:

$V_0 = 0.65$ m/s

$D_i = 0.05765$ m

Entonces:

$$a_4 = 0.543 * (0.65) * \sqrt{0.05765} = 0.08\text{m}$$

Por el efecto del golpe de ariete se toma una distancia a_4 de seguridad con valor mínimo de 0.4 m.

$$a_4 = 0.4\text{m}$$

Con el valor a_4 y h_2 calculamos la altura total del tanque.

$$h_t = h_2 + a_4 \quad (45)$$

Entonces:

$$h_t = 0.60 + 0.4 = 1\text{m}$$

El volumen del tanque es igual a:

$$V = h_T * L_2 * b_2 \quad (46)$$

Para un tanque depresión menor a 1m³ el valor del ancho del taque b₂ está entre los rangos de 0.7m a 0.9 m.

$$b_2 = 0.7m$$

Despejando de la ecuación 45 el valor de L_2 tenemos:

$$L_2 = \frac{V}{h_T * b_2}$$

Sí:

$$V = 0.658$$

$$h_T = 1$$

$$b_2 = 0.7m$$

Despejando la ecuación tenemos:

$$L_2 = \frac{0.65}{1 * 0.7} = 0.92m$$

Cálculo de las paredes del tanque. Este cálculo se lo realiza con el fin de determinar el material con el cual se construirá las paredes del tanque, para lo cual se debe calcular la presión en el fondo del mismo mediante la siguiente ecuación:

$$P_T = P_A + (\rho * g * h_T) \quad (47)$$

Donde:

P_T = presión en el fondo del tanque (Pa)

P_A = presión atmosférica (Pa)

ρ = densidad del agua (Kg/m³)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

h_T = altura total del tanque (m)

Sí:

$$P_A = 72746.82Pa$$

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$h_T = 1 \text{ m}$$

Entonces:

$$P_T = 72746.82 + (1000 * 9.8 * 1) = 82546.82 \text{ Pa}$$

$$P_T = 0.00825 \frac{\text{KN}}{\text{cm}^2}$$

Las paredes del tanque se construirán de hormigón armado ya que este posee una resistencia de 2.1 KN/CM², el cual es mayor a la presión que soportará el tanque.

Rejillas. Para evitar el ingreso de materiales flotantes en la tubería de presión, se debe instalar rejillas, en el proyecto la tubería de captación por donde ingresa el agua al tanque de presión tiene acoplado un filtro a la entrada y salida de la tubería, con esto no existe entrada de materiales flotantes que puedan entrar a la bomba de ariete de esta manera no se perjudican sus componentes y así se evita el paro de la bomba o el bloqueo de unas de sus válvulas.

4.3.2.4 Altura de descarga

La altura de descarga o elevación (h), a la cual se desea obtener el caudal de descarga se ha determinado por la siguiente relación:

$$h = (10) H \quad (48)$$

Si:

$$H = 17 \text{ m}$$

Se tiene:

$$h = 10 * 17 = 170 \text{ m.}$$

4.3.2.5 Cálculo del coeficiente total de pérdidas.

El coeficiente de pérdidas (Hr), viene determinado por la siguiente ecuación:

$$Hr = 1 + \lambda \frac{L}{Di} + \sum K \quad (49)$$

Dónde:

Hr= coeficiente total de pérdidas (m)

λ = coeficiente de fricción o resistencia de la tubería

$\sum K$ =sumatoria de coeficiente de resistencia por accesorios y válvula de impulso

L = longitud de la tubería de impulso (m)

Di = diámetro interno de la tubería de impulso (m)

4.3.2.5.1 Cálculo de λ . El coeficiente de fricción o resistencia λ , está en función el número de Reynolds (Re) y la rugosidad relativa (ϵ)

Número de Reynolds

El número de Reynolds está en función de los siguientes parámetros:

$$Re = \frac{V_0 Di}{\gamma} \quad (50)$$

En donde:

Vo = velocidad del agua disponible (m/s).

Di = diámetro interno de la tubería de impulso (m)

γ = viscosidad cinemática del agua a 15°C, ($\frac{m^2}{s}$)

Re = número de Reynolds

Si:

Vo = 0.65m/s.

Di = 0.05765m

$\gamma = 1.14 \times 10^{-6} m^2/s$

Se tiene:

$$Re = \frac{0.65 \times 0.05765}{1.15 \times 10^{-6}} = 32584.7826$$

Con este valor de Reynolds definimos que el flujo es turbulento ya que para $Re \geq 4000$

Rugosidad relativa. La rugosidad relativa viene determinada por la siguiente relación:

$$\varepsilon = \frac{e}{D_i} \quad (51)$$

Dónde:

ε = rugosidad relativa.

E = rugosidad absoluta

D_i = diámetro interior de la tubería m

Si:

$e = 0,15 \times 10^{-3}$ m. Para una tubería de hierro galvanizado

$D_i = 0,05765$ m.

Se tiene:

$$\varepsilon = \frac{0.15 \times 10^{-3}}{0.05765} = 0.0026$$

Con los valores de Rugosidad relativa (ε) y Número de Reynolds (Re) en el diagrama de Moody. Intersecamos los dos valores obteniendo el siguiente dato:

$$\lambda = 0.0258$$

Calculo de $\sum K$. Los accesorios que se instalarán en la tubería de impulso deberán ser roscados y de un diámetro nominal de 2 in. (0,05765m).

De acuerdo con los valores de factor K para los diferentes accesorios son:

ACCESORIOS	K
1 nepló	0.05
5 uniones	0.05
1 entrada del tubo de alimentación	1.0
1 válvula de compuerta	0.15

Válvula de impulso. El coeficiente de resistencia de paso (K) de la válvula de impulso, viene dado según ZURITA según la siguiente ecuación:

$$K = \left[1.645 \frac{A_c}{A_p} - 1 \right]^2 \quad (52)$$

$$A_c = \frac{\pi(D_c)^2}{4} \quad (53)$$

$$A_p = \pi D_o S \quad (54)$$

Dónde:

A_c = área del cuerpo del ariete, (m²).

A_p = área de paso de la válvula de impulso, (m²).

D_o = diámetro del orificio del asiento de la válvula de impulso, (m).

D_c = diámetro del cuerpo del ariete, (m).

S = carrera de la válvula de impulso, (m).

Si:

$D_c = 0.095\text{m}$

$D_o = 0,0508\text{m}$.

$S = 0,02\text{m}$

Se tiene:

$$A_c = \frac{\pi(0.095)^2}{4} = 0.007m^2$$
$$A_p = \pi * 0.0508 * 0.02 = 0.003191 m^2$$

Reemplazando estos valores se obtiene:

$$K = \left(1.645 \frac{0.007}{0.003191} - 1\right)^2 = 7$$

La sumatoria total $\sum K$ será igual:

$$\sum K = 0.05 + 5 * 0.05 + 1 + 0.15 + 7$$

$$\sum K = 8.45$$

Reemplazando los valores en la ecuación 51, se tiene:

$$Hr = 1 + \lambda \frac{L}{Di} + \sum K$$

$$Hr = 1 + 0.0258 \frac{36.84}{0.05765} + 8.45$$

$$Hr = 26 \text{ m}$$

4.3.2.6 Cálculo de la velocidad para el cierre de la válvula de impulso.

La velocidad del agua en la tubería de impulso necesario para que se del cierre de la válvula de impulso está determinado por la ecuación (9).

$$V_c = 0.5 \sqrt{\frac{2gH}{H_r}} \quad (55)$$

Dónde:

V_c = velocidad de cierre de la válvula de impulso (m/s)

H = altura disponible (m)

H_r = perdidas (m)

Si:

$H = 17\text{m}$

$g = 9,81 \text{ m/seg}^2$

$H_r = 26 \text{ m}$

Se tiene:

$$V_c = 0.5 \sqrt{\frac{2 * 9.81 * 17}{26}} = 1.7 \text{ m/seg}$$

4.3.2.7 Cálculo de la presión total de la carga.

La presión total de la carga (H_t), una vez que se efectúa el cierre de la válvula de impulso viene determinada por la suma de la altura disponible (H) y la subida de presión debido al golpe de ariete (h_a).

$$H_t = H + h_a \quad (56)$$

de la ecuación (2.2), se tiene:

$$ha = \frac{Vc \times a}{g}$$

$$a = \frac{1466.28 \text{ m / seg}}{\sqrt{1 + \frac{Di \times K}{\delta E}}}$$

Dónde:

Di = diámetro interno de la tubería (m)

K= módulo de elasticidad del agua (kg/cm²)

δ= espesor de la tubería (m)

E = módulo de elasticidad de la tubería (kg/cm²)

Vc = velocidad del agua en la tubería para el cierre de la válvula de impulso (m/seg)

g = aceleración debida a la gravedad (m/seg²) Si:

Di = 0,05765 m

K = 21938.775 kg/cm²

δ= 2.65mm = 0.00265m

E = 2,1 * 10⁶ kg/cm²

Vc = 1.7 m/seg

g = 9.81m/seg²

Se tiene:

$$a = \frac{1466.28 \text{ m / seg}}{\sqrt{1 + \frac{0.05765 * 21938.775}{0.00265 * 2.1 * 10^6}}} = 1323.5685 \text{ m/s}$$

$$ha = \frac{1.7 * 1323.5685}{9.81} = 229.36 \text{ m}$$

Si: ha = 229.36 m

$$H = 17\text{m}$$

En la ecuación (57) se tiene:

$$H_t = H + h_a$$

$$H_t = 17 + 229.36 = 246 \text{ m}$$

4.3.2.8 Cálculo del espesor mínimo de la tubería de impulso

Según JIMENES DE CISNEROS, el espesor mínimo de la tubería de impulso viene determinado por la siguiente relación:

$$\delta m = \frac{p * D_e}{2 S_p - 0.8P} + C \quad (57)$$

Dónde:

δm = espesor mínimo, (mm).

P = presión total de carga, (Kg/mm²)

De = diámetro exterior de la tubería, (mm).

Sp = esfuerzo máximo de trabajo con un coeficiente de seguridad de 1,5 (kg/mm²)

C = valor debido a la disminución de resistencia del tubo por el roscado.

Si:

$$P = 246 = 0.246 \text{ kg/mm}^2$$

$$D_e = 60.3 \text{ mm}$$

$$S_p = 14 \text{ Kg/mm}^2$$

$$C = 1.27 \text{ mm.}$$

Se tiene:

$$\delta M = \frac{0.246 * 60.3}{2 * 14 - 0.8 * 0.246} + 1.27 = 1.8 \text{ mm}$$

$$\delta M = 0.0018 \text{ m}$$

Según los cálculos realizados la tubería de impulso seleccionado cumple con las siguientes características para su trabajo óptimo.

Material: hierro galvanizado

Límite de fluencia	(Sf) = 21 kg/m ²
Esfuerzo máximo del trabajo	(Sp) = 14 kg/m ²
Diámetro nominal	(Dn) = 0,0508m
Diámetro exterior	(De) = 0,0603m
Diámetro interior	(Di) = 0,05765m
Espesor	(δ) = 0,00265m

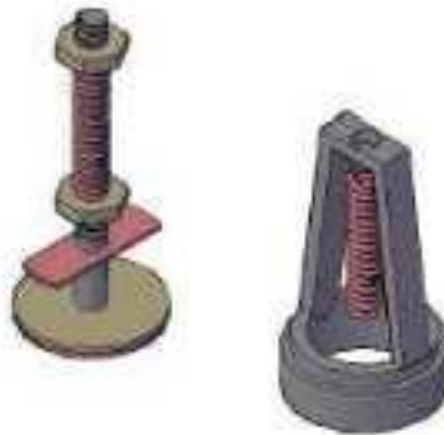
Si el espesor de la tubería seleccionada es de 0,00265 m y el valor del espesor mínimo calculado es 0,0018m, se deduce que la tubería seleccionada soporta adecuadamente la presión total de carga.

4.3.2.9 Válvula de impulso

La válvula de impulso es una de las partes más sensibles del ariete una selección correcta del tipo que se vaya a utilizar garantizará un funcionamiento eficiente. Para su correcta operación debe cumplir características como: soportar el golpe de ariete evitar la excesiva resistencia de flujo, resistencia a la fatiga, vida útil, entre otras.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores, para el diseño de la válvula de impulso, el desplazamiento de la carrera de la válvula lo gobierna un resorte, aunque su construcción es sencilla necesita de métodos de manufactura un tanto exactos.

Figura 25. Válvula regulada por resorte



Fuente: Autores

Los criterios de valoración más importantes que se consideran en este diseño se citan a continuación:

- Sensibilidad: ya que de esto depende la correcta operación del ariete.
- Fiabilidad: opera por un período conveniente
- Fácil regulación: dado que su regulación aumenta el caudal y/o eficiencia.

- Precio moderado: el costo de construcción consta de materiales de fácil adquisición como planchas, eje, pernos, empaques, y se lo puede manufacturar en cualquier taller mecánico.
- Montaje: posee un fácil montaje evitando así pérdidas en tiempos muertos.
- Construcción: se espera que los procesos de manufactura no sean complejos.

4.3.2.9.1 Cálculo del diámetro y el espesor.

Según NEKRASON , el diámetro de pie de la válvula (d_{pv}) viene determinado por la siguiente relación.

$$d_{pv} = 1.25d_0 \quad (58)$$

Dónde: d_0 = diámetro del orificio del asiento de la válvula, (m).

Si:

$$d_0 = 0,0508\text{m}$$

Se tiene que: $d_{pv} = 1,25 * 0,0508 = 0.0635\text{m}$

$$d_{pv} = 0.066 \text{ m}$$

El espesor del pie de válvula tendrá un valor ligeramente menor al espesor del pie de válvula de descarga, el espesor del pie de válvula viene determinado por la siguiente relación:

$$e = 0,14 d_0 \quad (59)$$

Dónde:

e = espesor de la válvula, (m).

Si:

$$d_0 = 0,0508$$

Se tiene:

$$e = 0,14 * 0,0508 = 0.0065$$

$$e = 0.006\text{m}$$

4.3.2.9.2 Cálculo del diámetro del vástago.

Según COLOMBO, el diámetro del vástago de la válvula viene determinado por la siguiente ecuación:

$$d_v = 0,12 d_0 + 10 \quad (60)$$

Dónde:

d_v = diámetro del vástago de la válvula en (m).

Si: $d_0 = 50.80\text{mm}$

Se tiene:

$$d_v = (0,12 * 50.8) + 10 = 16,096\text{mm}$$

$$d_v = 0,016096 \text{ m}$$

A fin de utilizar tuerca y contratuerca para sostener la válvula y dar la carrera de la misma, el diámetro del vástago será:

$$d_v = 0.01905 \text{ (3/4 de in.)}$$

4.3.2.9.3 Cálculo de la carrera.

Es una de las partes esenciales de la bomba. Para una óptima operación esta deberá cerrarse tan pronto como sea posible, bajo esta premisa lo mejor es crear una válvula liviana y de carrera corta, pero tampoco deberá ser demasiada leve no abrirá el tiempo necesario en el ciclo, por otro lado si la carrera es muy corta no puede escapar la suficiente agua; esto limita la velocidad dentro de la tubería de conducción y reduce la presión.

Según STRANEO- CONSORTI, para válvulas de asiento plano la carrera queda limitada al 25 – 33% del diámetro de la válvula.

Tomando un valor promedio del rango establecido, la carrera de la válvula viene de terminado por la siguiente relación.

$$S = 0,29 d_{pv} \text{ (61)}$$

Si:

$$d_{pv} = 0,066\text{m}$$

Se tiene:

$$S = 0,29 * 0,066 = 0,01914 \text{ m}$$

$$S = 0,02\text{m}$$

4.3.2.9.4 Determinación de la longitud del vástago.

El vástago es el elemento encargado de regular la carrera de la válvula por medio de un arreglo consecuencia debe reunir las siguientes características: resistencia a la corrosión, alta tenacidad, resistencia al desgaste por fricción.

La longitud del vástago de la válvula comprenderá el espesor de pie de válvula, espesor de dos pares de tuerca y contratuerca, carrera, espesor de 2 arandelas, espesor de 2 empaques, altura de soporte guía, estimándose su valor en:

$$L_v = 33\text{cm}$$

4.3.2.9.5 Cálculo del peso de la válvula de impulso.

El espesor total de la válvula (W), viene determinado por el peso del pie de válvula, peso del vástago, peso de las tuercas y contratueras.

Peso del pie de la válvula.

$$W_1 = \frac{\gamma_a \pi (d_{pv}^2 - d_v^2) e}{4} \quad (62)$$

Dónde:

W1= peso del pie de la válvula, (Kg).

γ_a = peso específico acero inoxidable (Kg/m³)

e= espesor de la válvula, (m).

dpv=diámetro de pie de válvula de impulso (m).

dv = diámetro de vástago de la válvula de impulso (m)

Si:

$\gamma_a = 7755 \text{ Kg/m}^3$.

dpv= 0,066m.

dv = 0,01905m.

e = 0,006m

se tiene:

$$W_1 = \frac{7755 * \pi [(0.066)^2 - (0.01905)^2] * 0.006}{4}$$

$$W_1 = 0.1459 \text{ kg}$$

Peso del vástago.

Como el vástago es roscado, para el cálculo de su peso se ha tomado el diámetro del núcleo de la rosca.

$$W_1 = \frac{\gamma_a \pi d_n^2 L_v}{4} \quad (63)$$

Dónde:

W2= peso del vástago, (kg)

dn= diámetro del núcleo, (m)

γ_a = peso específico del acero inoxidable (Kg/m³)

Lv= longitud del vástago (m)

Si:

dn = 0.01505 m

Lv= 0,33m

Se tiene:

$$W_2 = \frac{7755 * \pi * (0.01505)^2 * 0.33}{4}$$

$$W_2 = 0.45 \text{ kg}$$

Peso de tuercas, contratueras y arandelas. Cada tuerca tiene un peso aproximadamente de 0,08 kg, y cada peso de cada arandela un peso de 0.2835. Si hay un total de 5 tuercas y contratueras y 2 arandelas el peso total es el siguiente:

$$W_3 = 5 \times 0.08 + 0.2835 \times 2 = 0.96 \text{ kg}$$

$$W_3 = 0,96 \text{ kg.}$$

Luego el peso total de la válvula será:

$$W = W_1 + W_2 + W_3 \quad (64)$$

Se tiene:

$$W = 0.1459+0.45+0.96$$

$$W = 1.55\text{kg}$$

4.3.2.9.6 Cálculo del área de la válvula de impulso.

El área de la válvula de impulso, viene determinado por la siguiente ecuación:

$$A' = \frac{\pi}{4} d_{pv}^2 \quad (65)$$

Si:

$$d_{pv} = 0,066\text{m}$$

Se tiene:

$$A' = \frac{\pi}{4} (0.066)^2$$

$$A' = 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

4.3.2.9.7 Cálculo del coeficiente de resistencia de cierre.

De la ecuación (8) se determina el coeficiente de resistencia de cierre (K_0) de la válvula de impulso, siendo su valor igual a:

$$K_0 = \frac{Wg}{A' \times \gamma_{\text{agua}} \times Vc^2} \quad (66)$$

Dónde:

K_0 = coeficiente de resistencia de cierre

W = peso total de la válvula de impulso (kg)

g = gravedad (m/s²)

A' = área de la válvula de impulso (m²)

γ_{agua} = densidad del agua a 150C (kg/m³)

Vc = velocidad de cierre de la válvula de impulso (m/s)

Si:

$W = 1.55 \text{ kg}$

$g = 9,81 \text{ m/seg}^2$

$A' = 3.42 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$\gamma_{\text{agua}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$

$Vc = 1.7 \text{ m/seg}$

Se tiene:

$$K_0 = \frac{1.55 * 9.81}{3.42 * 10^{-3} * 1.7^2}$$

$$K_0 = 1.5$$

4.3.2.9.8 Cálculo del peso máximo de la válvula de impulso.

El peso de la válvula de impulso necesario para normal funcionamiento del ariete debe cumplir con la siguiente desigualdad (14).

$$0 < W < \frac{2HA' \gamma K_0}{\lambda}$$

Como se puede apreciar esta desigualdad es un intervalo abierto que no contiene a sus extremos. Para hallar el peso máximo de la válvula se transforma la desigualdad anterior en la siguiente igualdad:

$$W_{m\acute{a}x} = \frac{2 \times H \times A' \times \gamma_{agua} \times K_0}{Hr}$$

Si:

$$H=17m$$

$$A' = 3.42 \times 10^{-3} m^2$$

$$\gamma_{agua} = 10^3 kg/m^3$$

$$K_0 = 1.5$$

$$Hr= 26 m$$

Se tiene:

$$W_{m\acute{a}x} = \frac{2 * 17 * 3.42 * 10^{-3} * 10^3 * 1.5}{26}$$

$$W_{m\acute{a}x} = 6.7 kg$$

Del análisis del periodo 2 se concluye que cuando la válvula de impulso alcance el valor calculado, la válvula no se cerrará y por lo tanto el ariete no funcionará. Razón por la cual el peso de la válvula de impulso deberá cumplir el siguiente intervalo:

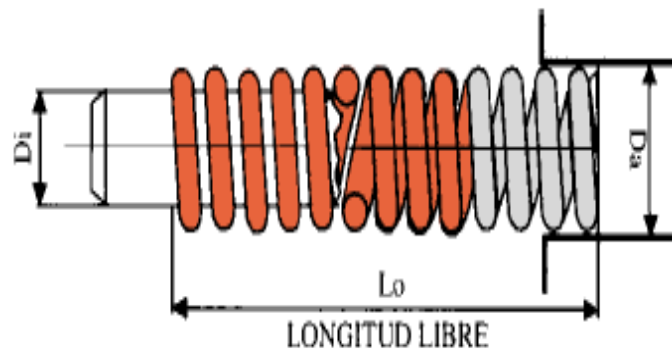
$$0 < W < 6.7 kg$$

Como el peso W se encuentra dentro de estos rangos la válvula de impulso se cerrara y abrirá continuamente para cada ciclo.

4.3.2.9.9 Selección del muelle

El muelle se encuentra alojado entre la bancada de válvula y el asiento de la misma, la constante elástica es función directa de la fuerza que debe ejercer la válvula al momento de frenar la columna de agua. Por la disposición del resorte, estos remplazan a los pesos que se utilizan para otro diseño de la válvula de impulso, entonces la única fuerza que permite el golpe de ariete es la elástica generada por el resorte que tendrá como constante elástica un valor de 191N/mm para una fuerza máxima de 783.18 kgf . Con estos parámetros se selecciona el muelle a continuación, que es suficiente para volver a abrir a la válvula de impulso para el siguiente ciclo. En la tabla 4 se presenta la selección del muelle a compresión.

Tabla 4. Catálogo de resortes de compresión



- A N/mm Larga duración del muelle
- B N/mm Duración normal del muelle
- C N/mm Desviación máxima
- D mm Compresión a bloque
- Da mm Diámetro de alojamiento
- Di mm Diámetro de guía
- Lo mm Longitud libre
- R N/mm Carga para comprimir 1 mm

Diámetro alojam. Exterior	Diámetro guía Interior	Longitud libre	XM198 Muelles C. Medias	R	A 15% L ₀		B 20% L ₀		C 30% L ₀		D f _b			
					N	mm	N	mm	N	mm	N	mm		
25,5 mm	13 mm	76	3,06	100,0	1140	11,4	1520	15,2	2280	22,8	2750	27,5		
		89	3,33	83,4	1118	13,4	1485	17,8	2227	26,7	2719	32,6		
		102	3,75	73,6	1126	15,3	1501	20,4	2252	30,6	2922	39,7		
		115	4,26	63,7	1102	17,3	1465	23,0	2198	34,5	2720	42,7		
		127	4,78	56,9	1087	19,1	1445	25,4	2168	38,1	2726	47,9		
		140	5,24	51,0	1071	21,0	1428	28,0	2142	42,0	2698	52,9		
		152	5,69	47,1	1074	22,8	1432	30,4	2148	45,6	2685	57,0		
		178	6,51	41,2	1100	26,7	1467	35,6	2200	53,4	2810	68,2		
		203	7,46	36,3	1107	30,5	1474	40,6	2211	60,9	2810	77,4		
		305	14,24	22,6	1035	45,8	1379	61,0	2068	91,5	2554	113,0		
		sección		4'4x5'7										
		32 mm	16 mm	38	2,77	362,9	2069	5,7	2758	7,6	4137	11,4	4573	12,6
44	3,01			307,9	2032	6,6	2710	8,8	4064	13,2	4218	13,7		
51	3,20			262,8	2024	7,7	2681	10,2	4021	15,3	4205	16,0		
64	3,64			205,9	1977	9,6	2636	12,8	3953	19,2	4489	21,8		
76	4,17			171,6	1956	11,4	2608	15,2	3912	22,8	4582	26,7		
89	4,78			147,1	1971	13,4	2618	17,8	3928	26,7	4398	29,9		
102	5,29			127,5	1951	15,3	2601	20,4	3902	30,6	4730	37,1		
115	6,09			112,8	1951	17,3	2594	23,0	3892	34,5	4692	41,6		
127	6,91			101,0	1929	19,1	2565	25,4	3848	38,1	4555	45,1		
140	7,46			88,3	1845	21,0	2472	28,0	3709	42,0	4503	51,0		
152	8,03			80,9	1845	22,8	2459	30,4	3689	45,6	4417	54,6		
178	9,19			68,6	1832	26,7	2442	35,6	3663	53,4	4459	65,0		
203	10,29	59,8	1824	30,5	2428	40,6	3642	60,9	4527	75,7				
254	11,54	46,9	1787	38,1	2383	50,8	3574	76,2	4484	95,6				
305	16,49	39,2	1795	45,8	2391	61,0	3587	91,5	4626	118,0				
sección		5'0x7'5												
38,5 mm	19,5 mm	51	3,86	313,8	2416	7,7	3201	10,2	4801	15,3	6715	21,4		
		64	4,55	230,5	2213	9,6	2950	12,8	4426	19,2	6638	28,8		
		76	5,37	196,1	2236	11,4	2981	15,2	4471	22,8	6589	33,6		
		89	6,39	171,6	2299	13,4	3054	17,8	4582	26,7	6915	40,3		
		102	7,39	142,2	2176	15,3	2901	20,4	4351	30,6	6555	46,1		
		115	8,46	124,5	2145	17,3	2864	23,0	4295	34,5	6499	52,2		
		127	9,56	112,8	2154	19,1	2865	25,4	4298	38,1	6588	58,4		
		140	10,13	103,0	2163	21,0	2884	28,0	4326	42,0	6644	64,5		
		152	10,73	93,2	2125	22,8	2833	30,4	4250	45,6	6599	70,8		
		178	11,88	80,4	2147	26,7	2862	35,6	4293	53,4	6593	82,0		
		203	12,99	70,6	2153	30,5	2866	40,6	4300	60,9	6763	95,8		
		254	14,69	56,9	2168	38,1	2891	50,8	4336	76,2	6748	118,6		

Fuente:www.unceta.es

El muelle seleccionado tendrá las siguientes características:

Muelle a compresión X198 de extremos planos:

Material = Acero al cromo silicio UNS G92540 AISI 9254

Longitud libre = 51mm

Máxima compresión = 30% de longitud libre

Diámetro guía inferior = 19.5mm

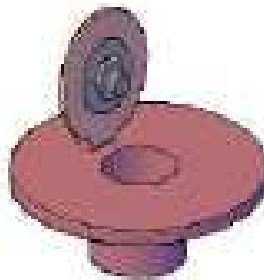
Diámetro alojamiento exterior = 38.5 mm

Constante R = 313.8 N/mm

4.3.2.10 Válvula de descarga.

Esta válvula estará ubicada entre el pasaje de la cámara de aire y el cuerpo de la bomba de ariete. Esta válvula debe permitir el flujo del agua en una sola dirección para prevenir que el agua bombeada regrese al cuerpo del ariete, por tanto, esta válvula es del tipo check o anti retorno, posee gran sensibilidad a los cambios de presión. Estará constituida de un empaque, una arandela, la válvula check hecho de caucho natural rígido que se levantará bajo la acción de la presión del flujo y cerrará debido al retroceso y peso del agua cuando se ha consumido la energía cinética, su fijación se realizará por medio de las bridas porta válvulas que une el cuerpo del ariete y cámara de aire.

Figura 26. Válvula de descarga



Fuente: Autores

Criterios de Valoración

Los criterios de valoración que se consideran más importantes en el diseño de la válvula de servicio se detallan a continuación.

- Sensibilidad: Garantiza mayor tasa de bombeo
- Fiabilidad: Opera en un periodo conveniente
- Precio Moderado: El precio de construcción es bajo por su bajo construcción.

- Construcción: Los procesos de manufactura no son complicados, se los podría realizar en un taller y los materiales es de fácil adquisición.

4.3.2.10.1 Cálculo del área de paso.

Para calcular el área de paso de la válvula de descarga se ha calculado en base a las hipótesis siguientes:

1. El caudal de descarga que atraviesa la válvula debe ser el mayor posible.
2. La velocidad del agua que atraviesa la válvula será de movimiento retardado y su valor igual al valor medio de la velocidad en la tubería de impulso necesaria para el cierre de la válvula de impulso.

Por tanto el área de paso (A) será igual a:

$$A_{pd} = q / V_d. \quad (67)$$

Dónde:

q = caudal de descarga, (m³/seg).

V_d = velocidad del agua a través de la válvula, (m/seg).

A_{pd} = área de paso de la válvula de descarga

El caudal de descarga viene dado por la siguiente ecuación:

$$q = Q_a * \frac{h}{H} * \eta * 86400 \quad (68)$$

Dónde:

Q_a = Caudal de alimentación del tanque de presión.

H = altura disponible

h = altura de descarga

η = eficiencia del ariete

La eficiencia del ariete está dada por la siguiente ecuación:

$$\eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{h}{H}} \quad (69)$$

$$\eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{170}{17}} = 0.45 = 50\%$$

Los usuarios de la Localidad de Huachog necesitan elevar el agua 100 m.c.a. en el proyecto, para esta altura la eficiencia del ariete tiene el siguiente valor el caudal a esta altura es mayor.

$$\eta = 0.258 \sqrt{12.8 - \frac{100}{17}} = 0.6785 = 67.85 \%$$

Lo que indica que el ariete está trabajando en óptimas condiciones.

Sí:

$$Q_a = 4.5 \text{ lt/s}$$

$$H = 17 \text{ m}$$

$$h = 170 \text{ m}$$

$$\eta = 0.50 \quad (\text{eficiencia del ariete})$$

Se tiene:

Para una altura de 170m se tiene:

$$q = 4.5 * \frac{17}{170} * 0.50 * 86400 = 19000 \frac{\text{Lit}}{\text{dia}}$$

$$q = 13.2 \frac{\text{lit}}{\text{min}} = 13.2 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La velocidad del agua a través de la válvula de descarga será igual a:

$$Vd = \frac{V_c}{2} \quad (70)$$

Si:

$V_c = 1.7 \text{ m/seg}$

Se tiene:

$$Vd = \frac{1.7}{2} = 0.85 \text{ m/s}$$

Remplazando los valores obtenidos de q y V en (ecuación 67), se tiene.

$$A_{pd} = \frac{13.2 \times 10^{-3}}{0.85} = 15.52 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

El corte del área de paso de agua en la válvula de descarga esta hasta la mitad de la charnela, para que esta se pueda cerrarse en el instante en que disminuya la presión y se pueda abrir nuevamente para comenzar el siguiente ciclo.

Determinación del diámetro y espesor de pie de valvula. El diámetro del pie de válvula se ha determinado considerando que ésta debe estar firmemente por medio de las bridas porta válvulas. Si la distancia entre centro y centro de los orificios de la brida porta válvula es de 133 mm el diámetro exterior de pie de válvula de descarga viene a ser el mismo, con el fin de que el diseño se realice de la manera más sencilla y por tanto disminuir gastos en su manufactura.

El diámetro de pie de válvula será:

Diámetro exterior = 0.12m

Diámetro interior = 0.0254m

El espesor del pie de válvula tendrá un valor ligeramente menor al espesor del pie de la válvula de impulso, esto es:

$$e = 0,003\text{m}$$

Determinación del diámetro y espesor de la válvula check. La válvula check de la válvula de descarga es de caucho natural hilado de lona que hizo manualmente, tiene la configuración tipo charnela como se puede observar en los planos, su comportamiento es como de una válvula check se abrirá y permitirá el paso de fluido hacia la cámara de aire cuando la presión aumente en el ariete y se cerrara cuando esta disminuya de modo que no permita el paso de agua hacia el cuerpo del ariete, la válvula check posee las siguientes dimensiones.

Diámetro exterior de la base = 0.12m

Espesor de la base = 0.012

Diámetro charnela o disco abisagrado = 0.045m

Altura de la charnela = 0.008 m

4.3.2.11 Selección de pernos y empaques.

Cuando se desea tener una junta desmontable como es el caso de la válvula de descarga, y que sea lo suficiente fuerte para resistir cargas de tensión y cortante o una combinación de ambas, entonces la combinación de pernos y arandelas templadas es una buena solución.

En la figura 27 se muestra un segmento de una junta atornillada, el sujetador utilizado en esta aplicación ha sido precargado a un valor inicial de tensión de F_i , y luego se aplica las cargas extremas. El efecto de la precarga es hacer trabajar las piezas en compresión, para que haya mayor resistencia a la carga de tensión externa y originar fricción entre ellas, a fin de resistir la carga cortante.

La constante de resorte o constante de rigidez de un elemento elástico como un perno, es la relación de la fuerza aplicada al elemento a la deformación total producida por dicha fuerza. La deformación total de la barra en tensión o compresión viene determinada por la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{F_1}{AE} \quad (71)$$

Dónde:

Deformación total (mm)

F1 = fuerza (lb)

A = área transversal del perno (in²)

E = módulo de elasticidad del perno (lb/in²)

L = agarre, longitud total de las piezas a sujetarse (in) Por consiguiente la constante de rigidez, vale:

$$c = \frac{F}{\delta} = \frac{AE}{l} \quad (72)$$

Con ésta ecuación se determina tanto la rigidez para el perno, como para la empaquetadura:

$$\begin{cases} Km &= \frac{AmEm}{l} \\ Kb &= \frac{AbEac}{l} \end{cases}$$

Para la determinación de las rigidez tanto del perno como de los miembros se selecciona pernos SAE 8 de grado métrico 10.9, placas de 10mm para las bridas y 5mm de espesor del empaque.

El agarre electivo del tornillo es $l = 20 + 5 + 20 = 45\text{mm}$, por lo consiguiente la rigidez del tornillo es:

Si:

$l = 45\text{mm} = 1.77\text{ in}$

$db = 0.5\text{ in}$

$Eb = 30\text{ MPsi}$

Entonces:

$$Kb = \frac{\pi \times (0.5)^2 \times (30 \times 10^6)}{4 \times 1.77} = 3.32 \times 10^6 \frac{lb}{p\ lg}$$

Para obtener la constante de rigidez del empaque:

Si:

$$l = 5\text{mm} = 0.19\text{ in}$$

$$d_b = 0.5\text{ in}$$

E empaque=10 KPsi

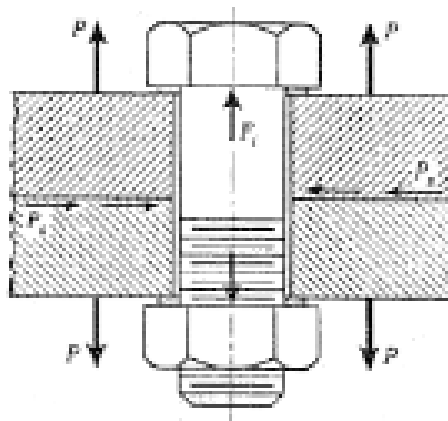
$$K_m = \frac{\pi \times E c}{2 \ln \left[\frac{5(l + 0.5 \times d)}{l + 2.5 d} \right]}$$

$$K_m = \frac{\pi \times 0.5 \times (6 \times 10^3)}{2 \ln \left[\frac{5(0.19 + 0.5 \times 0.5)}{0.19 + 2.5 \times 0.5} \right]} = 0.0111 \times 10^6 \frac{\text{lb}}{\text{in}}$$

Entonces la ecuación de relación de rigidez:

$$C = \frac{3.32}{3.32 + 0.0111} = 0.99$$

Figura 27.Unión de pernos



Fuente: Shigley, J. Diseño en Ingeniería Mecánica, 3ra Ed. Pág. 393

La importancia de la precarga de los pernos no se puede pasar por desapercibido. Una precarga elevada mejora tanto la resistencia a la fatiga a la unión de perno; con el efecto de aseguramiento.

La fuerza a la cual están sujetos los pernos esta designada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F}{Ab} \quad (73)$$

Donde:

P = presión a la cual están sujeto los pernos (Psi)

Ab= área del perno (in)

Si:

P = 246 m=350 (Psi)

Sea el Perno ½ Grado SAE8

Diámetro mayor nominal:db= ½ in

Área de esfuerzo de tensión: At = 0.1479 in²

Resistencia a prueba: Sp = 120 kpsi

Resistencia a la tensión: Sut= 150 kpsi

Resistencia a la fluencia:Sy = 130 kpsi

El área del perno es igual a:

$$Ab = \frac{\pi db^2}{4} \quad (74)$$

$$Ab = \frac{\pi(0.5)^2}{4} = 0.196 \text{ in}^2$$

Despejando la fuerza de la ecuación 72 se tiene:

Si:

P = 246 m=350(Psi)

A b= 0.196 in²

De la ecuación 73 despejamos F se tiene:

$$F = 350 \times 0.1916 = 67 \text{ lb}$$

$$F = P = 67 \text{ lb}$$

Como el perno está expuesto a fatiga se realiza el diseño de los pernos a fatiga. Según la teoría de Soderberg.

$$\frac{\sigma_{ba}}{S_e} + \frac{\sigma_{bm}}{S_y} = 1 \quad (75)$$

Donde:

σ_{ba} = esfuerzo alternante (lb/in²)

σ_{bm} = esfuerzo medio (lb/in²)

S_e = límite de fatiga (lb/in²)

$S_y = 130$ (kpsi)

4.3.2.12 Cargas de fatiga de los pernos

Los valores de esfuerzo medio y alternante según Shigley son:

$$\sigma_{ba} = \frac{cn (p \text{ max} - p \text{ min})}{2A_t N_b} \quad (76)$$

$$\sigma_{ba} = \frac{Fi}{A_t} + \frac{cn (p \text{ max} - p \text{ min})}{2A_t N_b} \quad (77)$$

Donde:

Pmax = carga máxima que soporta el perno (lb) Pmin = carga mínima que soporta el perno (lb) At= área de tracción del perno (in²)

N = número de pernos

C = constante de rigidez

Fi = fuerza de compresión durante el apriete (lb)

n = coeficiente de seguridad

Si:

C =1

Pmax = 67 lb

Pmin= 0 lb

At= 0.1419 in²

N = 2

Reemplazando los valores en la ecuación 74 y 75 Se tiene:

$$\sigma_{ba} = \frac{1 \times n(67 - 0)}{2 \times 0.1419 \times 2}$$

$$\sigma_{ba} = 118 \times n \quad (78)$$

Si la precarga está dentro del intervalo

$$0.6F_p \leq F_i \leq 0.9F_p \quad (79)$$

Si:

Fp = Sp x At

Reemplazando el valor de Fp y despejando en valor Fi/At tenemos;

$$\frac{F_i}{A_t} = 0.9 S_p \quad (80)$$

Reemplazamos la ecuación 79 en la ecuación 77:

Se tiene:

$$\sigma_{bm} = 0.9Sp + \frac{c \times n(p_{max} - p_{min})}{2 \times A_t \times N_b}$$

Reemplazando datos:

$$\sigma_{bm} = 0.9(120000) + \frac{1 \times n(69 - 0)}{2 \times 0.1419 \times 2}$$

$$\sigma_{bm} = 108000 + 118n \quad (81)$$

El límite de fatiga está dado por la siguiente ecuación:

$$S_e = kc \times \frac{1}{kf} \times Se' \quad (82)$$

$Se' = 0.45 Sut$ (Cuando los pernos están sometidos a tracción).

Si:

$Sut = 150 \text{ kpsi}$

$Kc = 0.814$ para una confiabilidad de 90%

$Kf = 3$

Reemplazado datos se tiene:

$$S_e = 0.814 \times \frac{1}{3} \times 0.45(150000)$$

$$S_e = 18315 \text{ Psi}$$

Reemplazando la ecuación 78, 81, el valor de Se y el valor de Sy , en la ecuación 75 se tiene:

$$\frac{118 \times n}{18315} + \frac{108000 + 118n}{130000} = 1$$

$$n = 1.15 = 1$$

La eficiencia es 1 por tanto los pernos resisten a los esfuerzos producido por el golpe de ariete los pernos que unen las bridas en todo el conjunto: pernos ½ in SAE 8, conjuntamente se ha seleccionado las tuercas M12.

Para garantizar sello el empaque de debe cumplir lo siguiente:

$$F_i > A_g \times P_o \quad (83)$$

Donde:

F_i = precarga (Psi)

P_o = presión mínima de sellado (Psi)

A_g = área de empaqueto

Si:

$$A_g = \frac{\pi(de - di)^2}{4} \quad (84)$$

de = diámetro exterior del empaquetado (in)

di = diámetro interno del empaquetado (in)

$de = 133\text{mm} = 5.23 \text{ in}$

$di = 76,2 \text{ mm} = 3 \text{ in}$

$$A_g = \frac{\pi \times (5.23 - 3)^2}{4} = 3.9 \text{ in}^2$$

Si:

$P_o = 1 \text{ atm} = 14.7 \text{ Psi}$

Despejamos de la ecuación 80 F_i : $F_i = 0.9 \text{ Sp (At)}$

Si:

$Sp = 120000 \text{ Psi}$

$At = 0.1419 \text{ in}^2$

Se tiene:

$$F_i = 0.9 (120000)(0.1419)$$

$$F_i = 15325.2 \text{ lb}$$

Reemplazando datos obtenidos en la ecuación 80 tenemos:

$$F_i > A_g \times P_o$$

$$15325.2 > 3.9 \times 14.7$$

$$15325.2 \text{ lb} > 57.33$$

Se puede observar que el empaque seleccionado garantiza cello o hermeticidad en la junta.

La condición para separar la junta es:

$$cP + F_i = 0 \quad (85)$$

Por lo tanto la precarga F_i , debe ser siempre mayor que cP , en consecuencia el valor de seguridad de F_i , debe estar en el intervalo:

$$cP < F_i < A_t S_y \quad (86)$$

Si:

$$C = 1$$

$$P = 67 \text{ lb}$$

$$F_i = 15325.2 \text{ lb}$$

$$A_t = 0.1419 \text{ in}^2$$

$$S_y = 130 \text{ kpsi}$$

Se tiene:

$$1(67) < 15325.2 < (0.1419)(130000)$$

$$67 \text{ lb} < 15325.2 \text{ lb} < 18447 \text{ lb}$$

El valor de F_i se encuentra dentro de los rangos establecidos soporta la carga de 67 lb. Los empaques tanto para la válvula de impulso como para la tubería de descarga son del mismo material que se analizó para la válvula de descarga ya que van a soportar una presión semejante en el ciclo de funcionamiento del ariete, varían en las dimensiones como se muestra a continuación.

Empaque de la válvula de impulso. El empaque de la válvula de impulso se ha considerado las dimensiones de la distribución de orificios distribuidos en la brida, el diámetro interior de la brida en la válvula de

Diámetro exterior = 200mm

Diámetro interior = 101.6 mm

Espesor = 5mm

Empaque de la tubería de descarga. El empaque para la brida en la tubería de descarga se ha considerado las dimensiones de la distribución de orificios distribuidos en la brida, el diámetro interior de la brida ya que tiene que ser mayor para garantizar hermeticidad.

Diámetro exterior = 70mm

Diámetro interior = 40mm

Espesor = 5mm

4.3.2.13 Fuerzas que actúan sobre las válvulas de impulso

Las fuerzas que producen el cierre o apertura de la válvula de impulso y descarga se originan debido a la sobrepresión existente en el interior del ariete, en el instante que se produce el cierre brusco de la válvula de descarga, esta fuerza está determinada por la siguiente ecuación.

$$F_v = pA \quad (87)$$

Dónde:

F_v = fuerza actuante en la válvula de impulso (kgf)

$p = h_a$ = sobrepresión existente al interior del ariete (m.c.a.)

A = área de la válvula de impulso (m²)

Sí:

$p = h_a = 229.36$ m.c.a. = 0.229 kg/mm²

$A = 3.42 \cdot 10^{-3}$ m² = 3420 mm²

$$F_v = 0.229 (3420) = 783.18 \text{ Kgf}$$

$$F_v = F_a = F_e \quad (88)$$

Donde:

F = Fuerza actuante (kgf)

F_e = Fuerza de empuje (kgf)

F_a = Fuerza de apertura (kgf)

4.3.2.14 Válvula de aire

Para compensar el aire contenido en la cámara de aire que se pierde durante el ciclo de operación y absorbido por el agua se ha seleccionado una válvula automática de aire, provista de un orificio de 1mm de diámetro por medio del cual se inyecta el aire en cada golpe de la válvula de impulso.

La válvula de aire es una válvula de compresor de ¼ in NPT que tiene introducido un tapón de bronce fosfórico al cual se ha perforado un orificio de 1mm de diámetro para restitución del aire en la cámara de la bomba de ariete.

4.3.2.15 Cuerpo del ariete.

El cuerpo de ariete es de forma cilíndrica, está fabricado de fundición gris que es un importante material en ingeniería debido a su costo relativamente bajo y a sus propiedades ingenieriles, entre las que se incluyen una excelente capacidad de mecanizado a niveles de dureza, que tiene buena resistencia al desgaste, resistencia a la escoria y un excelente capacidad de amortiguamiento a las vibraciones.

La fundición gris contiene los siguientes elementos: 2.5% C, 3%Si, 0.25%Mg, 0.025 S, 0,05%P. los mismos que al unirse en la colada hacen que la fundición tenga propiedades como las mencionadas anteriormente.

Los criterios de valoración que se mas importantes en el diseño para la manufactura del cuerpo del ariete son los siguientes:

- Diseño: Garantiza bajas pérdidas de presión y velocidad
- Fiabilidad: Opera a una período conveniente
- Robustez: Elevada calidad y bajos costos de construcción
- Construcción: El proceso de manufactura no es compleja y se podría realizar una fabricación en serie

El cuerpo del ariete tiene un área idónea que permite el flujo sustentable del caudal generado en el período de desperdicio. En el cuerpo del ariete se alojan las válvulas de impulso, descarga y aire; estará constituido de accesorios de hierro

galvanizado y acero inoxidable, capaz que soporten la presión total que están sometidas y la corrosión.

4.3.2.15.1 Determinación del diámetro. El diámetro del cuerpo del ariete se ha determinado considerando que debe tener un espacio suficiente para el normal funcionamiento de la valvula de impulso. Si la valvula de impulso tiene un diámetro de 0,066m, los accesorios que constituyen el cuerpo del ariete serán de un diámetro nominal de 4 in (101,6mm), teniendo un diámetro exterior de 137 mm y un diámetro interior de 122mm.

4.3.2.15.2 Verificación de la resistencia. Según la teoría de Esfuerzo Normal **Máximo de Rankine**, la verificación de la resistencia del cuerpo del ariete se realiza comparando la presión total de carga a la que se encuentra sometida y el esfuerzo máximo de trabajo del material bajo la siguiente consideración.

$$P \leq \frac{S_{fg}}{n} \quad (89)$$

Dónde:

P = presión total de carga (kg/mm²).

S_{fg}= límite de fluencia de la fundición gris (kg/mm²)

n = coeficiente de seguridad.

Si:

$$P = 0,246 \text{ kg/mm}^2 \quad (246\text{m})$$

El límite de fluencia para hierro fundido gris

S_{fg} = 40kPsi = 28.11 kg/mm²

Si: n = 3

Se tiene:

$$\frac{S_f}{n} = \frac{28.11}{3} = 9.37 \text{ kg/mm}^2$$

Reemplazando valores en la ecuación 89, se tiene:

$$0.246 \text{ kg/mm}^2 < 9.37 \text{ kg/mm}^2$$

Lo que garantiza que la fundición gris es apropiada para soportar las presiones que se generan por el golpe de ariete.

4.3.2.16 Bridas porta válvulas.

4.3.2.16.1 Bridas del cuerpo de ariete con la cámara de aire

Las bridas que unen el cuerpo del ariete con la cámara de aire y que aloja a la válvula de descarga han sido seleccionadas de acuerdo a la presión total de carga y el diámetro nominal del cuerpo del ariete; las mismas que según MARKS [24], tendrán las siguientes características:

Bridas planas

Diámetro nominal del cuerpo del ariete	= 0,1016 m
Diámetro de la brida	= 0,17m
Espesor de la brida	= 0,02 m
Diámetro de la circunferencia de distribución de los tornillos	= 0,133 m
Números de tornillos	= 2
Diámetro de los tornillos	= 0,0127m
Longitud de tornillos	= 0,0381m
Límite de Fluencia tornillo ½ in Grado SAE 8	= 91.38kg/mm ²

4.3.2.16.2 Bridas del cuerpo de ariete con la tubería de impulso

Las dimensiones de la brida que une la tubería de hierro galvanizado con el cuerpo del ariete tiene las mismas dimensiones que las bridas que unen la cámara del aire al cuerpo del ariete, también posee igual número de tornillos e igual diámetro de circunferencia de distribución de los tornillos.

4.3.2.16.3 Bridas del cuerpo de ariete con la tubería de descarga

Las dimensiones de esta brida son las siguientes:

Bridas planas

Diámetro nominal del cuerpo del ariete	= 0,1016 m	Diámetro
de la brida	= 0,12m	
Espesor de la brida	= 0,02 m	
Diámetro de la circunferencia de distribución de los tornillos	= 0,095 m	
Números de tornillos	= 2	
Diámetro de los tornillos	= 0,0127m	
Longitud de tornillos	= 0,0381m	
Límite de Fluencia tornillo ½ in Grado SAE 8	= 91.38kg/mm ²	

Esta brida tiene sus dimensiones menores debido a la configuración que tiene ariete por tener la tubería de entrega menor a la de impulsión, y con el fin de minimizar costos en la construcción.

4.3.2.16.4 Bridas del cuerpo de ariete con la válvula de impulso.

La selección de las bridas para la válvula de impulso tiene las siguientes dimensiones:

Bridas planas

Diámetro nominal del cuerpo del ariete	= 0,1016 m
Diámetro exterior de la brida	= 0.2m
Espesor de la brida	= 0,01 m
Diámetro de la circunferencia de distribución de los tornillos de tornillos	= 0,125 m Números = 4 m
Diámetro de los tornillos	= 0,0127m
Longitud de tornillos	= 0,0381m
Límite de Fluencia tornillo ½ in Grado SAE 8	= 91.38kg/mm ²

Todos los pernos que unen las bridas al cuerpo del ariete son de grado SAE 8 de diámetro de 1/2 in rosca gruesa, se tomó esta consideración con el fin de abaratar costo y el uso de una sola llave para el fácil desmontaje al ocurrir algún paro de la bomba, además el perno seleccionado resiste a las presiones que se dan en el ciclo de operación del ariete.

4.3.2.17 Tubería de descarga

El agua puede ser bombeada a cualquier distancia, pero la longitud de la tubería involucra trabajo adicional para el ariete, ya que tiene que vencer la fuerza de fricción ofrecida por las paredes de la tubería.

A diferencia de la tubería de descarga o entrega puede ser de cualquier material, que sea capaz de soportar una pequeña presión de agua ascendiendo al tanque de entrega. El caudal de descarga por el ariete es de 13.2 lt/min para una altura disponible de 17m con una altura de descarga de 170m según la tabla 5, la tubería a seleccionarse es de 25mm igual a 1 in.

Tabla 5. Diámetro de las tuberías de entrega en función del caudal

Diámetro de entrega(mm)	Caudal (litros/min)
25	10 a 45
40	37 a 60
50	61 a 90
80	91 a 234

Fuente: www.lifewater.org

Realizando un balance de energía desde el punto donde se encuentra el ariete (A) hasta el tanque de almacenamiento (B) se tiene:

$$E_A = H_{rA} = B = E_B \quad (90)$$

$$H_{rA} - B = h = 170\text{m}$$

Las pérdidas secundarias y primarias están dadas por la siguiente ecuación:

$$H_{rA} - B = \left[\lambda \frac{L}{D_i} + \sum K \right] \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (91)$$

Despreciamos las pérdidas por accesorios entonces se tiene:

$$\sum K = 0$$

$$H_{rA} - B = \left[\lambda \frac{L}{D_i} \right] \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (92)$$

Donde:

HrA-B = pérdidas desde el ariete hasta el tanque de almacenamiento (m).

λ = coeficiente de fricción

L= longitud de la tubería de descarga (m)

Did= diámetro de la tubería de descarga (m)

Q =q= caudal de descarga (m³/s)

g = gravedad (m/s²)

A = área de la válvula de descarga (m²)

Despejamos el valor del Di de la ecuación 92 se tiene:

$$Di = \sqrt[5]{\frac{8 \times \lambda \times L \times Q^2}{\pi^2 \times g \times HrA - B}}$$

Si:

HrA-B = 170 m.

λ = 0.02

L= 360 m

Q= q =13.2lt/min = 0.00022 m³/s

g =9.8m/s²

Se tiene:

$$Di = \sqrt[5]{\frac{8 \times 0.02 \times 360 \times (0.00022)^2}{\pi^2 \times 9.8 \times 170}} = 0.018 \text{ m}$$

$$Di = 1 \text{ in}$$

La tubería a seleccionar es tubería de presión de 1 in

4.3.2.18 Cálculo de la pérdida de carga durante el período de retardación.

La pérdida de carga (hr) durante el período de retardación en la tubería de impulso, válvula de descarga y tubería de descarga puede ser determinada por la ecuación (22).

$$hr = 5.64 \left(1 - \frac{h}{hmáx}\right)$$

Si:

$$h = 170\text{m}$$

$$hmáx = ha = 229.36\text{ m}$$

Se tiene:

$$hr = 5.64 \left(1 - \frac{170}{229.36}\right) = 1.45\text{ m}$$

4.3.2.19 Cálculo de la distancia debido al retroceso del agua.

La distancia debido al retroceso del agua en la tubería de impulso viene determinada de acuerdo a la ecuación (31).

$$y = \frac{(h + hr)^2 Lg}{2Ha^2}$$

Si:

$$H = 170\text{ m } hr = 1.45\text{ m}$$

$$l = 36.84\text{ m longitud tubería de impulso}$$

$$g = 9,81\text{ m/seg}^2$$

$$H = 17\text{m}$$

$$a = 1323.5685\text{ m/seg}$$

Se tiene:

$$y = \frac{(170 + 1.45)^2 \times 36.84 \times 9.81}{2 \times 17 \times (1323.5685)^2} = 0.3 \text{ m}$$

4.3.2.20 Cálculo del ciclo teórico de operación.

Una vez que se ha determinado y calculado el parámetro y constantes que intervienen en el proceso del funcionamiento del ariete los mismos que son:

Donde:

H = altura disponible (m)

H = altura de descarga (m)

hr = pérdida de carga durante el periodo de retardación (m)

a = velocidad de la onda (m/s)

y = distancia debido al retroceso (m)

L = longitud de la tubería de impulso (m) Hr = pérdidas en la tubería de impulso (m) y
= densidad del agua (kg/m³)

A_v = Área de la válvula de impulso (m²)

A = Área de la tubería de impulso (m²)

W = peso total de la válvula de impulso (kg) S = carrera de la válvula de impulso (m)

Ko = coeficiente de resistencia de cierre

Si:

H = 17m

h = 170 m hr = 1.45 m

a = 1323.5685 m/s y = 0.3 m

$$L = 36.84\text{m}$$

$$Hr = 26\text{ m}$$

$$\gamma = 1000\text{ kg/m}^3$$

$$A_1 = 3.42 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

$$A = 2.61 \times 10^{-3}\text{ m}^2$$

$$W = 1.456\text{ kg}$$

$$S = 0.02\text{ m}$$

$$K_o = 1.43$$

Se procede a calcular los parámetros funcionales en los diferentes periodos de operación del ariete, los mismos que responden a las ecuaciones analizadas en el capítulo 2.

De:

$$(6) \quad t_1 = 0,40\text{ seg}$$

$$(7) \quad V_1 = 1.2\text{ m/seg}$$

$$(8) \quad V_2 = 2.9\text{ m/seg}$$

$$(11) \quad t_2 = 0,01\text{seg}$$

$$(12) \quad Q_2 = 0.35\text{ kg/ciclo}$$

$$(16) \quad t_3 = 0,068\text{ seg}$$

$$(17) \quad V_3 = 2.9\text{ m/seg}$$

$$(18) \quad Q_3 = 0,51\text{ kg/ciclo}$$

$$(19) \quad E_c = 41.25\text{ kg - m/ciclo}$$

$$(20) \quad t_4 = 0,05566\text{ seg}$$

- (21) $V_4 = 1.6 \text{ m/seg}$
- (25) $E_{cp} = 7.9 \text{ kg - m/ciclo}$
- (26) $q' = 0,19 \text{ kg/ciclo}$
- (28) $t_5 = 0,00924 \text{ seg}$
- (28) $t_6 = 0,066 \text{ seg}$
- (29) $V_6 = - 1.2 \text{ m/seg}$
- (30) $t_7 = 0,28 \text{ seg}$

4.3.2.21 Cálculo de la duración total del ciclo

La duración total del ciclo viene determinada por la ecuación (34) siendo:

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7$$

Si:

- $t_1 = 0,40 \text{ seg}$
- $t_2 = 0,01 \text{ seg}$
- $t_3 = 0,068 \text{ seg}$
- $t_4 = 0,055 \text{ seg}$
- $t_5 = 0,00924 \text{ seg}$
- $t_6 = 0,066 \text{ seg}$
- $t_7 = 0,28 \text{ seg}$

Se tiene:

$$T = 0.88 \text{ seg / ciclo}$$

4.3.2.22 Cálculo de la cantidad de agua descargada por ciclo.

La cantidad de agua descargada por el ciclo viene determinado por la ecuación (32) siendo su valor igual a:

$$q' = \frac{Ec - Ec_p}{(h + hr)} = \frac{41.25 - 7.9}{170 + 1.45} = 0.19$$

$$q' = 0.19 \frac{kg}{ciclo}$$

4.3.2.23 Cálculo de la cantidad de agua desechada por ciclo

La cantidad de agua desechada por ciclo viene determinada por la ecuación (33) siendo.

$$Q' = Q_2 + Q_3$$

Si:

$$Q_2 = 0,35 \text{ kg/ ciclo.}$$

$$Q_3 = 0,51 \text{ kg/ ciclo.}$$

Se tiene:

$$Q' = 0.35 + 0.51 = 0.86 \text{ kg/ciclo.}$$

4.3.2.24 Cálculo del caudal desechado por minuto.

El caudal desechado por minuto viene determinado por la siguiente relación:

$$Q_d = \frac{60Q'}{T}$$

Si:

$$Q' = 0,86 \text{ kg/ciclo}$$

$$T = 0.88 \text{ seg/ciclo}$$

Se tiene:

$$Q_d = \frac{60(0.86)}{0.88} = 69 \text{ kg/min}$$

$$Q_d = 69 \text{ lit/min}$$

4.3.2.25 Cálculo de la potencia desarrollada.

La potencia desarrollada por el ariete viene determinada por la siguiente ecuación (36).

$$P = \frac{q'h}{T}$$

Dónde:

P = potencia desarrollada (kg-m/s)

T = duración total del ciclo (seg/ciclo)

q'= cantidad de agua descargada por ciclo (kg/ciclo)

h = altura de descarga (m) Si:

T = 0.88seg/ciclo

q'= 0.19 kg/ciclo

h = 170 m

Se tiene:

$$P = \frac{0.19 \times 170}{0.88} = 39 \text{ kg} - \text{m/seg}$$

4.3.2.26 Cámara de aire.

La cámara de aire es un depósito cerrado con aire y agua. El aire dentro de la cámara se comporta como un elemento elástico, que al comprimirse (fase de sobrepresión), la cámara recibe una cantidad de agua y reduce en parte la tendencia a

sobrepresiones altas, mientras que cuando se expande (fase de depresión) se libera cierta cantidad de agua de la almacenada en la fase anterior a la tubería de descarga, dando así un flujo continuo a través de la misma.

La cámara de aire está hecha de fundición gris posee las mismas propiedades que el cuerpo del ariete.

4.3.2.26.1 Cálculo del volumen máximo y mínimo de aire. Según SCHALAG [26], la compresión y expansión del aire en la cámara obedece a la Ley de Boyle es decir.

$$P_{\min} \cdot V_{\max} = P_{\max} \cdot V_{\min} \quad (93)$$

Dónde:

P_{\max} = presión absoluta máxima del aire (m)

V_{\min} = volumen mínimo del aire (lit/ciclo)

P_{\min} = presión absoluta mínima del aire (m)

V_{\max} = volumen máximo del aire (lit/ciclo)

Según BEGERÓN, el volumen mínimo de aire a la presión máxima viene dado por:

$$V_{\min} = \frac{q'}{0.02 - 0.05} \quad (94)$$

Si:

$q' = 0.19$ lit/ciclo y tomando un valor promedio de 0.035 se tiene:

$$V_{\min} = \frac{0.19}{0.035} = 5.43 \text{ lit/ciclo}$$

De la Ley de Boyle a temperatura constante se tiene [27]:

$$V_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot V_{\min}}{P_{\min}} \quad (95)$$

Dónde:

$$P_{\text{mín}} = h + h_{\text{atm}}$$

$$P_{\text{máx}} = H + h_a + h_{\text{atm}} + h_r$$

Sí:

$$h = 170 \text{ m}$$

$$h_r = 1.45 \text{ m}$$

$$H = 17$$

$$h_a = 229.36 \text{ m}$$

$$h_{\text{atm}} = 10.33 \text{ m}$$

Se tiene:

$$P_{\text{mín}} = 170 + 10.33 = 180.33 \text{ m}$$

$$P_{\text{máx}} = 17 + 229.36 + 10.33 + 1.45 = 258.14 \text{ m}$$

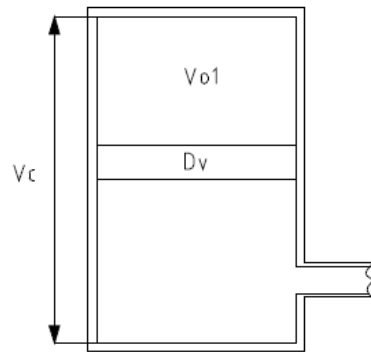
Reemplazando los valores obtenidos en la ecuación 95, se tiene:

$$V_{\text{max}} = \frac{258.14 \times 5.4}{180.33} = 7.7 \text{ lit/ciclo}$$

4.3.2.26.2 Cálculo de la capacidad. El volumen de la cámara de aire deberá encontrarse entre 20 y 50 veces el volumen entregado en un ciclo, está probado que el funcionamiento apropiado se consigue cuando el nivel del agua dentro de la cámara de aire se encuentra por encima de la salida de la tubería de entrega.

Como referencia nos basaremos en la Figura 28, el mismo que tiene los siguientes parámetros.

Figura 28. Cámara de aire



Fuente: Autores

El volumen de la cámara de aire viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{(1 + x)Q_{max}(h + h_r)}{P_{at}} \quad (96)$$

Dónde:

V_c = volumen de la cámara de aire(m³)

P_{at} = presión atmosférica (m)

h = presión de la altura de carga (m)

h_r = pérdida de carga durante el período de retardación (m)

$Q_{max} = q$ = caudal bombeado por el ariete en un ciclo(m³/ciclo)

x = fracción de aumento de presión que permite el bombeo

Si:

$P_{at} = 10.33\text{m}$

$H = 170\text{m}$

$H_r = 1.45\text{m}$

$Q_{max} = q = 13.2 \text{ lt/min} = 0.00022\text{m}^3/\text{ciclo}$

$x = 1$

Donde:

$$x = \frac{h}{h + hr} = \frac{170}{170 + 1.45} = 1$$

Remplazando valores se tiene:

$$V_c = \frac{(1 + 1)(0.00022)(170 + 1.45)}{10.33}$$

$$V_c = 0.007956 \text{ m}^3 = 8 \text{ lt}$$

La cámara de aire tiene una capacidad de 8litros de agua, nuestra cámara de aire tiene 10lt está construida al igual que la base del ariete de fundición gris. El mismo que soporta una presión de 28.11 kg/mm² se concluye que cilindro soporta adecuadamente la presión total de carga, como se muestra a continuación:

$$P = \frac{Sf}{n} \quad (97)$$

Dónde;

n = coeficiente de seguridad

P =presión total de carga, (kg/cm²)

Sfg =40kPsi = 28.11 kg/mm²

Si:

n = 3

P = 0.246 kg/mm²

Se tiene:

$$\frac{s_f}{n} = \frac{28.11}{3} = 9.37 \text{ kg/mm}^2$$

Reemplazando valores en la ecuación 97, se tiene:

$$0.246 \text{ kg/mm}^2 < 9.37 \text{ kg/mm}^2$$

La cámara de aire soporta la presión total de carga ya que su resistencia es mayor.

4.4 construcción y montaje

4.4.1 Introducción

Para la realización de este proyecto diseño e instalación de un sistema de bombeo mediante Ariete Hidráulico en la comunidad de Huachog se divide en tres etapas, la primera es la construcción del ariete hidráulico, la segunda la construcción del tanque de captación, soportes para la tubería de alimentación y la construcción del tanque reservorio, y la tercera es la instalación de todo el equipo en la comunidad y pruebas de la misma. A continuación se detalla cada uno de los pasos realizados para llegar al objetivo principal que es bombear agua aprovechando la presión del fluido y la pendiente del terreno, se tiene que tomar en cuenta que para la construcción del ariete se debe seleccionar materiales de buena resistencia ya que estos van estar sometidos a grandes presiones y expuesto a corrosión, en igual forma para los tanques deben tener una adecuada construcción, tanto para el tanque de presión como para el tanque de almacenamiento. De los cuales el tanque de captación y el tanque de reservorio ya existen en la Localidad de Huachog. Ejecutados por el Programa Nacional de Agua y Saneamiento Rural – PRONASAR. en el año 2007.

4.4.2 Construcción del equipo

En este proyecto la primera consideración en la construcción del ariete hidráulico es la resistencia y durabilidad, lo que incurre en la búsqueda de materiales adecuados para soportar el martillo o golpe de ariete, corrosión y fatiga que estos van estar sometidos. Otro aspecto es el contorno interior del cuerpo del ariete y la tubería desde el punto de vista de pérdidas por fricción y pérdida de velocidad lo que acarrea una baja de presión y rendimiento.

La construcción o fabricación del ariete hidráulico es un conjunto de actividades destinadas a la realización efectiva del producto con unas condiciones aceptables de calidad, costos y tiempo. Entre estas actividades se encuentran las siguientes:

- La preparación de los procesos productivos, la planificación y programación de la producción y disponibilidad del equipo y utillaje necesarios.
- La fabricación de piezas y componentes, o su eventual subcontratación y el establecimiento de las correspondientes especificaciones técnicas.
- El montaje de piezas, subconjuntos y conjuntos para formar un producto que responda a la funcionalidad.
- El control de calidad, en la recepción de materiales y componentes, en los procesos de fabricación, de montaje y como garantía la calidad global del producto. Eventualmente, realizar las inicializaciones y puestas a punto.
- La expedición comprende la documentación (manual de instrucciones y de mantenimiento, garantías).

4.4.3 Consideraciones generales

Una selección adecuada para escoger el material para la construcción de la cámara de aire y el cuerpo de ariete es importante, tomando en cuenta su vida útil y la corrosión que está sometida. Se debe tener en cuenta que por muchos años investigadores han experimentado con nuevos materiales y nueva manufactura con la tentativa de obtener bombas de ariete más livianos y de mayor eficiencia.

Se hace un proceso de construcción genérico para la fabricación del ariete, el mismo que se detalla en este capítulo, así como de su montaje, instalación, mantenimiento; y cuando está en servicio la correcta sintonización de la carrera, la misma que servirá en el proceso de elevar más o menor agua.

La forma de la bomba dificulta la construcción, por ende es importante seleccionar los procesos de construcción idóneos para cada uno de los elementos. El correcto diseño y construcción de las válvulas dentro de la bomba es un factor preponderante por lo tanto estas requieren una atención especial.

Cuando la columna de agua es súbitamente detenida en el tubo de alimentación por el cierre de la válvula de impulso; la presión creada comprime el agua causando el estiramiento del cuerpo del ariete y de la tubería de alimentación; así parte de la energía del pulso de presión es usada en el estiramiento de las experimentando con nuevos materiales y nuevos procesos de manufactura en una tentativa de diseñar un ariete liviano.

Cuando un ariete es bien construido y debidamente instalado el mantenimiento es mínimo. Para facilitar las labores de limpieza es aconsejable ensamblar las partes aisladas mediante uniones desmontables. Las partes que deben chequearse generalmente son: válvula de impulso, la válvula de descarga, tuercas y tornillos que pueden aflojarse y destruirse producto de la corrosión, limpiar el filtro y tanque de captación , regular la válvula de aire y muy importante revisar los empaques cada seis meses para dar mantenimiento.

4.4.4 Etapas de construcción del equipo

El proceso de construcción de cada uno de los elementos constituyentes del equipo de ariete, cumplen con la siguiente secuencia:

- Adquisición de materia prima.
- Trazos de las dimensiones sobre la materia prima.
- Ejecutar los procesos tecnológicos
- Verificar las dimensiones, perpendicularidad, paralelismo y estabilidad.
- Ensamblaje del equipo.
- Instalación y puesta a punto.

4.4.5 Proceso de construcción del ariete hidráulico

El ariete comienza en proceso de construcción una vez realizado su diseño y cálculo de las dimensiones del mismo, esto se obtiene gracias a la altura disponible y altura que los usuarios necesitan para elevar el agua, así como el caudal disponible.

La construcción de la bomba de ariete hidráulico se realiza en un taller de fundición equipado con horno de fundición, arena, moldes, entre las más relevantes y un taller mecánico, para la segunda etapa equipado con equipos como: soldadora, esmeril, torno, fresadora, equipo de pintura, como principales. El recurso humano para la construcción de la bomba de ariete hidráulico debe estar capacitado para seguir las indicaciones.

4.4.5.1 Fundición de la Cámara de Aire y el cuerpo del ariete

Para la fundición de la cámara de aire y el cuerpo del ariete la preparación se realiza en el taller de fundición, en el cual se prepara la arena de moldeo. Como la complejidad de las piezas a fundir es compleja. Se hace uso de moldes utilizados en la elaboración de productos medianos, en la cual los materiales utilizados son:

Arena reciclada: arena recuperada después de una fundición

Arena nueva: de ríos o mar u otras canteras

Tierra blanca: esta componente es de uso común

Carbón marino: se encuentra comercialmente en bolsas de 50 lb, ayuda a reducir la ocurrencia de penetración del metal.

Bentonita: se encuentra comercialmente en bolsas de 100 lbs. Es un tipo aglutinante.

Agua: Componente fundamental para el amarre de arena, es decir para obtener una buena cohesión.

Para este proceso, se prepara la arena con las cantidades empíricamente manejadas por el operario, como se describe a continuación:

1. Se toma arena de reciclaje, a ésta arena se le eliminan los terrones o grumos que resultan de la cohesión de la arena, se zarandea con una malla para eliminar residuos metálicos grandes y piedras.
2. Se toma arena nueva, se zarandea con la misma malla para eliminar piedras y obtener el mismo tamaño de grano que la arena reciclada.
3. Se coloca la arena reciclada, en la cantidad deseada, sobre el suelo en un espacio amplio, formando una base.
4. Se agrega la arena nueva, la bentonita y el carbón marino sobre la arena reciclada, distribuida de forma uniforme. Estas cantidades son empíricamente seleccionadas por el operario, en base a sus años de experiencia en la preparación de la formula.
5. Se hacen hoyos a lo largo y ancho de esta mezcla para 1 Galón de agua en cada uno de ellos, aproximadamente se utiliza 1 Barril de agua.
6. Por último se mezcla el agua con los demás componentes, hasta lograr uniformidad de la mezcla formando un montículo.
7. Para verificar si el amarre o aglutinamiento de la mezcla es el idóneo el operario apresa con su puño la arena y así examina si es buena o necesita agregar más de algún componente.
8. Esta arena ya preparada se aprisiona sobre el molde y se introduce sobre esta el molde para obtener el diseño deseado y poder hacer uso de este en el momento que ya esté lista la colada

Figura 31. Moldes para la fundición de la cámara de aire y cuerpo del ariete



a) Cámara de aire



b) cuerpo del ariete

Fuente: Autores

Una vez realizado los moldes y con mucho cuidado, estos se unen para dar la forma respectiva, se procede en el horno a disolver la fundición gris, el mismo que en la mayoría de los casos es disuelto de chatarra o se puede conseguir en el mercado en kg. Una vez obtenida la colada del hierro gris se procede a verter en los moldes hasta que se llenen completamente, se debe tratar que esta colada se vierta lo más

espacio posible con esto se evita que el aire no ingrese y se evita la porosidad en la fundición

Figura 32. Cuerpo del ariete



Fuente: Autores

4.4.5.2 Construcción de las válvulas en el taller mecánico.

Se trata de la realización de los demás componentes del ariete como la válvula de impulso, válvula de descarga, las bridas para su ensamble, esto se realiza en un taller mecánico. Además el torneado de la cámara de aire y el cuerpo del ariete.

4.4.5.2.1 Válvula de impulso. Para la válvula de impulso se realiza la brida en una plancha de acero comercial la misma que se construyó de acuerdo a los planos realizados, de igual forma el soporte para el buje. El buje se hace en tubo de acero comercial de diámetro interior de $\frac{3}{4}$ in, el mismo que se lo manda a roscar internamente 2mm para que el eje de acero inoxidable de $\frac{3}{4}$ in pueda desplazarse libremente. Las arandelas y las tuercas se seleccionan en catálogos de acuerdo al diámetro del eje, los empaques se construyen de acuerdo al diseño realizado en el capítulo 3.

El resorte se selecciona de acuerdo a la constante K que se necesita para regular los golpes por segundo y este es regulado mediante la plancha de acero comercial y tuercas que se acoplan en los ejes guías construidos de varilla.

Figura 33. Valvula de impulso



Fuente: Autores

4.4.5.2 Válvula de descarga. Esta está diseñadas de acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo 3, las misma que están compuesta de un pie de valvula diseñada de acuerdo al cuerpo de ariete en acero comercial (arandela) y una válvula check construida en caucho natural reforzada con lona como se puede observar en la siguiente Figura .

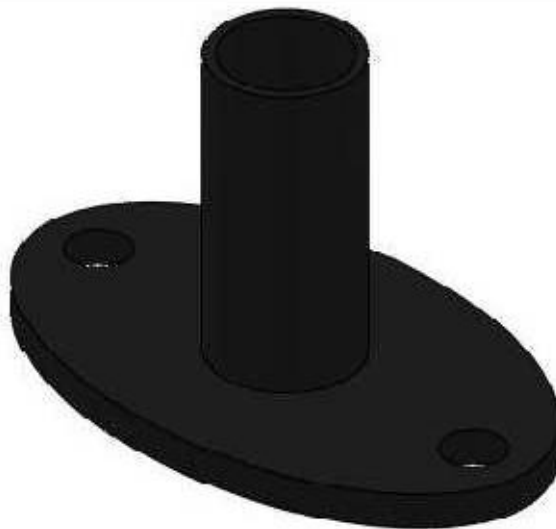
Figura 34. Válvula de descarga



Fuente: Autores

4.4.5.2.3 Bidas para el ingreso y salida del agua al ariete. Estas se construyen en planchas de acero comercial en forma elipsoidal, el diseño se realiza de acuerdo a los cálculos realizados en el capítulo de diseño y al diseño del cuerpo realizado en fundición gris. Estas bidas se sueldan con electrodos 6013 procurando que sus cordones se realicen de la forma correcta, para de esta manera se eviten fugas.

Figura 35. Bida de Acero Comercial



Fuente: Autores

4.4.5.3 Ensamblaje del ariete hidráulico

El ensamble del ariete hidráulico se realiza de forma manual y fácil, una vez lista las piezas se colocan de acuerdo a los planos realizados y centrando cada una de las piezas se tiene que tener en cuenta que se debe ubicar bien los empaques y ajustar correctamente los pernos, dando el debido apriete. Cada uno de las partes del ariete deben estar bien aclopadas de tal manera que deben estar completamente libres de fugas ya que esto desemboca en pérdidas de energía.

El uso de las herramientas adecuadas facilita el ensamble y ajuste de cada una de las piezas a montar.

Figura 36. Explotado de la bomba de ariete hidráulico



Fuente: Autores

En la figura 36, se muestra el despiece de los conjuntos conformantes de la bomba de ariete hidráulico.

Las válvulas tanto la de impulso como de entrega deben moverse libremente, y al momento del cierre se debe asegurar una correcta juntura del asiento de las válvulas con sus respectivas bridas.

Colocar, y fijar el ariete hidráulico en el sitio adecuado es de suma importancia ya que esto evita las vibraciones provocadas por el golpeteo del agua en la válvula de impulso, entonces está lista para proceder a la unión de las tuberías tanto la de suministro como la de entrega.

4.4.6 Tanque de captación

Para la construcción del tanque de captación se debe tomar en cuenta que la ubicación de este debe estar lo más cercano a la toma de agua y el tanque debe quedar al nivel del terreno ya que este es pendiente y con el tiempo se puede producir erosión de la tierra ya sea por el viento o erosión por la lluvia.

Al existir un Canal en el cual el flujo de agua es constante utilizamos dicho canal como tanque de captación, además de contar con una toma lateral por el cual ingreso la tubería de Hierro Galvanizado de 2", en donde se reserva el agua que debe estar hidrostáticamente para el funcionamiento del ariete.

Figura 37. Cana usado como Tanque de captación del agua



Fuente: Autores

4.4.7 Tubería de alimentación

Para la alimentación del ariete se utiliza tubería que soporte altas presiones y tenga una buena resistencia a la corrosión. Para este proyecto se selecciona seis tuberías de hierro galvanizado de seis metros y diámetro nominal de 2 in, las mismas que son unidas por medio de uniones y para evitar fugas y para un buen sellamiento se utiliza teflón en cada unión que se hace. Las tuberías antes de instalarse se deben limpiar con agua limpia y además se las debe inclinar a 28° desde la salida del tanque de captación hasta el ariete, esto facilita que las tuberías queden lo más recto posible, evitando pérdidas y sobrepresiones.

Figura 38. Tubería de presión instalada al ariete hidráulico

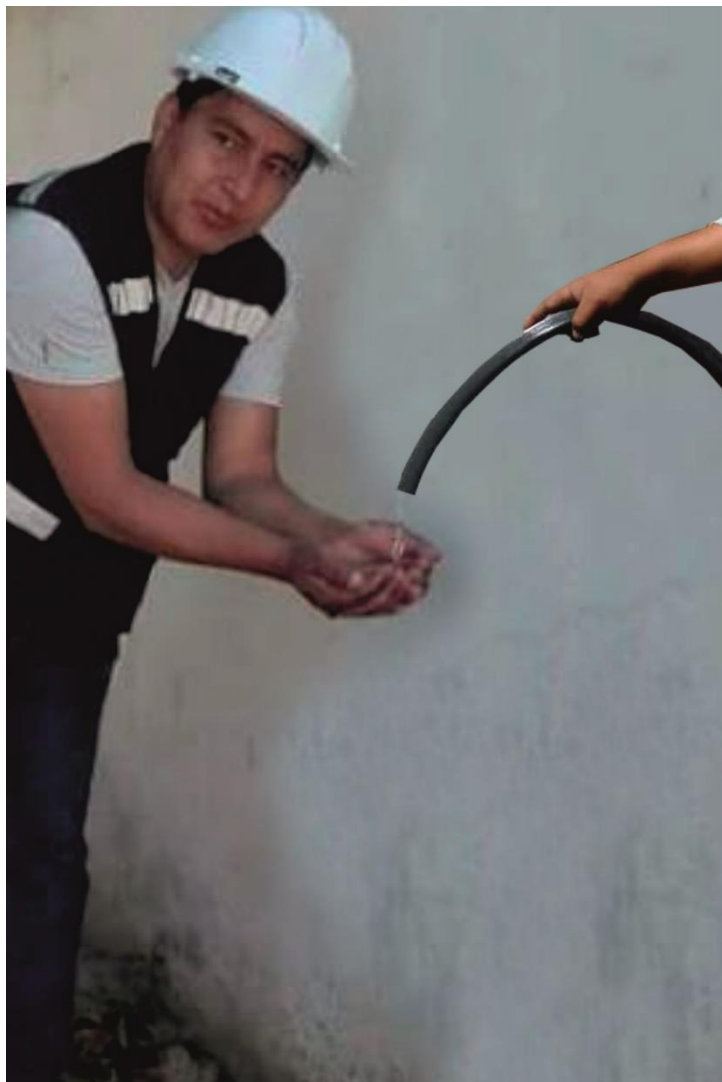


Fuente : Autores

4.4.8 Tubería de descarga

Para descargar el agua donde se ubica el reservorio almacenándolo y luego hacer uso de esta para el suministro a la población se utiliza una tubería en Polietileno de 1 in de diámetro y 3 rollos de 100m ubicando la descarga del fluido a 100 m.c.a sobre el ariete hidráulico.

Figura 39. Tubería de descarga



Fuente: Autores

4.4.9 Tanque Reservorio

Usaremos el tanque de reservorio existente en la Localidad de Huachog. Construido por el Programa Nacional de Agua y Saneamiento Rural – PRONASAR.

Figura 40. Tanque reservorio



Fuente: Autores

4.4.10 Puesta a punto del ariete hidráulico

El Ariete Hidráulico se diseña con la misiva de lograr la mayor cantidad de agua al sitio de entrega con una presión apropiada, el ajuste no es muy complejo ya que esto simplemente lo determina la válvula de impulso, por tanto el máximo rendimiento del ariete se alcanza con la regulación de la carrera del vástago.

Al repetir algunas veces la apertura manual de la válvula de impulso, ayudando que esta se ponga en marcha, la presión en el tubo de bombeo sube tanto que la columna de agua del tubo de impulso sufre una resistencia para entrar en la cámara de aire, y comienza a actuar como un martillo que golpea una superficie dura.

Es decir, la columna en el tubo de impulso golpea y "rebota", o retrocede (por la flexibilidad de los materiales), lo que hace que se produzca un flujo inverso hacia la entrada del tubo de impulso. En éste momento el agua ejerce una succión en el interior del tubo de impulso, por lo cual abre la válvula de impulso y se reinicia la aceleración de la columna hasta que se cierra la válvula de impulso de nuevo. De ésta forma continua el funcionamiento automáticamente, las 24 horas del día.

Esta bomba completa un ciclo cada 1 a 1,5 segundos (período). Si el ciclo es bien rápido o demasiado lento el rendimiento de salida se ve afectado. Un ciclo demasiado rápido es síntoma de que el tubo de alimentación es demasiado corto o la válvula de impulso necesita un resorte más rígido. De diferente manera un ciclo largo es causado por una tubería excesivamente larga o un resorte de rigidez alta de la válvula de residuos lo que causa que la columna de agua tarde más tiempo en superar al resorte.

A continuación se describe los pasos para una correcta puesta en marcha:

1. Mantenga la válvula de impulso cerrada y ajuste la tuerca y contratuerca reguladoras de la carrera, (vástago). Este proceso se realiza con una llave de pico.

2. Una vez ajustado el perno regulador de carrera, permitir el ingreso de agua a la tubería de alimentación. Mantener la válvula de compuerta cerrada hasta que la tubería de impulso se llene completamente de agua; luego liberar la válvula moviendo esta alternativamente con la mano por varias veces. El ariete deberá en aquel tiempo trabajar autónomamente.
3. Si la válvula permanece abierta permitiendo el flujo de agua el resorte no está trabajando apropiadamente, por tanto se debe parar el flujo de agua y calibrar otra vez los pernos; siguiendo los dos primeros pasos.
4. Una vez que la válvula este trabajando autónomamente, repetir los tres primeros pasos con la finalidad de encontrar la carrera óptima para el rendimiento máximo del ariete. Además en este paso se puede determinar la cantidad de agua bombeada y la duración del ciclo (golpes por minuto).
5. Para diferentes carreras se toma la velocidad de bombeo; y se establece la carrera que dio la mejor velocidad de bombeo. Si las velocidades de bombeo no difieren mucho entre sí para un intervalo corto de carreras, se toma la que requiera menor desplazamiento del vástago es decir la de menor carrera.
6. El tubo de impulso deberá ser bien fijado ya que por este se traslada la onda de alta presión. Se debe tener especial cuidado ya que el tubo podría tener resonancia con el golpe impuesto por la frecuencia del ariete hidráulico. Para finalizar la instalación el operador deberá asegurar que el ariete hidráulico está fijamente empernado.

El ajuste del ariete se lo puede realizar para alcanzar el máximo porcentaje de flujo entregado o para obtener la máxima eficiencia; el primer caso se consigue aumentando la carrera de la válvula de impulso.

CAPÍTULO V

RESULTADOS

5.1 RESULTADOS

5.1.1 pruebas de campo y resultados

En esta etapa, en donde la experimentación tiene un punto de inflexión en nuestra investigación, creemos nosotros que es una parte fundamental, ya que de aquí es donde vamos a obtener los datos y por lo tanto las conclusiones que se van a obtener van aportar directamente a la ciencia y fabricación de arietes hidráulicos, aquí es donde aplicamos todos nuestros conocimientos sobre la hidráulica, investigación científica, matemática y es en sí en donde descubriremos por experiencia propia los fenómenos estudiados teóricamente.

Las gráficas obtenidas es tan basadas en un parámetro fundamental que es la regulación de la carrera de la válvula de impulso.

5.1.1 Característica del sistema

A continuación vamos a describir las características del sistema que se ha diseñado para efectuar las pruebas sobre el ariete hidráulico, para así analizar su comportamiento, pruebas con diferentes configuraciones de sus componentes para así definir cuál de ellas es la mejor y con cual vamos a determinar su mayor rendimiento.

5.1.2 Determinación de las características de funcionamiento de lo Bomba de Ariete

Para las pruebas realizadas con el Ariete Hidráulico las condiciones en donde se desarrolla el fenómeno de golpe de ariete, cuenta con:

1. Tanque de Alimentación.
2. Tubería de entrada del fluido hacia la máquina.
3. Tubería de descarga.
4. Medidores de caudal.
5. Tanque de descarga.

6. Manómetros.

El proceso de ejecución de pruebas de la Bomba contempla la obtención de las siguientes curvas de operación:

Curva Caudal de descarga – Altura descarga ($q - h$).

Curva Rendimiento – Altura descarga ($\eta - h$).

Curva Caudal de desecho – Altura descarga ($Q_d - h$).

Los valores medidos de caudal se tomaron directamente con la ayuda de un cronómetro y un recipiente de 10 litros, para la presión con la ayuda de un manómetro, para la variación de la carrera de la válvula de impulso se utiliza un calibrador pie de rey de acero. Los valores medidos nos ayudaran para realizar los cálculos en una hoja de cálculo previamente programada; además, esta hoja de cálculo nos permitirá generar las gráficas que se observaran más adelante.

5.1.3 Procedimiento para la realización de pruebas

Para poder garantizar que las pruebas tengan la suficiente fiabilidad, se debe realizar el siguiente procedimiento.

1. Asegurarse que el tanque de alimentación esté lleno, caso contrario llenarlo hasta que llegue al nivel de agua adecuado, procurando tener la alimentación de agua al tanque constante para evitar posible paros en la bomba.
2. Establecer las características de la prueba a realizar regulando la carrera mediante la tuerca y contratuerca que tiene la válvula de impulso.
3. Abrir la válvula de aire
4. Abrir la válvula de compuerta para permitir el paso de agua a la bomba, el ariete comenzara su funcionamiento comenzando a cerrarse y abrirse la válvula de impulso.
5. Abrir la válvula check que se encuentra en la tubería de descarga lentamente hasta abrirla por completo.
6. Si no se produce golpe de ariete, inducirlo abriendo las válvulas manualmente hasta que se establezca el golpe y seguir el paso anterior.
7. Una vez que se estabiliza el funcionamiento de la bomba tomar los datos.

8. Proceder a realizar las pruebas con las nuevas características.

5.1.4 Curvas para el análisis de la bomba de ariete

Los datos obtenidos de las diferentes pruebas se presentan a continuación en forma tabular en las tablas: 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13, respectivamente.

Con los valores obtenidos, en un sistema de coordenadas cartesianas se realiza los diferentes gráficos que permite observar las características del ariete hidráulico bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

5.1.4.1 Análisis de caudal de descarga en función de la altura de descarga

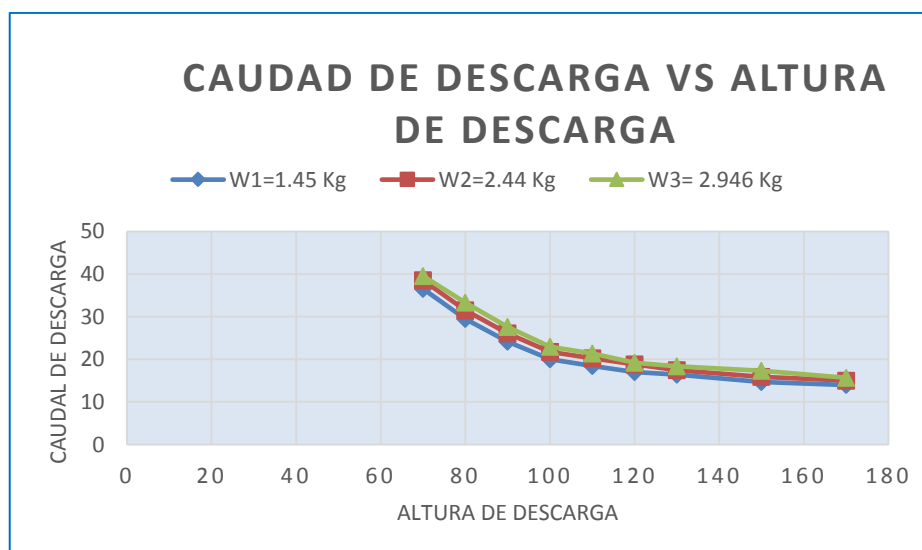
Para el grafico del caudal vs la altura de descarga se obtuvieron los siguientes datos dándonos como resultado las siguientes gráficas.

Tabla 6. Caudal de Descarga (q) en función de la altura de descarga (h) para una carrera (S) de 20mm, altura disponible H=17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte: K=22 kgf/mm.

S = 20 mm, H= 17m,k=22kgf/mm		X	
		0.045 mm	0.068mm
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	q1(lt/min)	q2(lt/min)	q3(lt/min)
70	36.55	38.55	39.55
80	29.51	31.51	33.31
90	24.13	26.13	27.63
100	20	21.78	22.92
110	18.44	20.22	21.36
120	17.02	18.8	19.22
130	16.45	17.45	18.4
150	14.67	15.87	17.32
170	13.98	15.03	15.68

Fuente: Autores

Figura 41. Caudal de descarga vs altura disponible



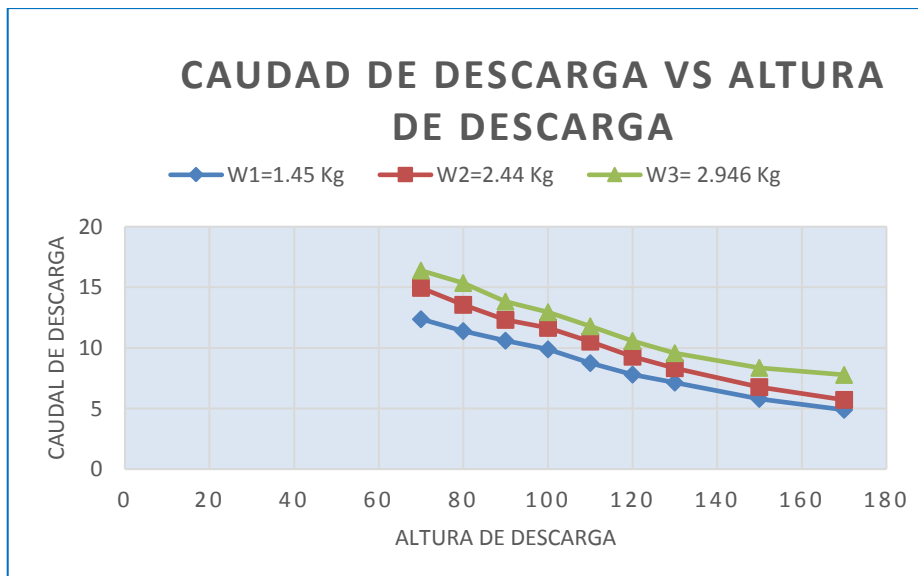
Fuente: Autores.

Tabla 7. Caudal de Descarga (q) en función de la altura de descarga (h) para una carrera(S) de 10mm, altura disponible H=17m ,y diferentes pesos (W), constante del resorte: K=22 kgf/mm.

S = 10 mm, H=17m,k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	q1(lt/min)	q2(lt/min)	q3(lt/min)
70	12.38	14.95	16.38
80	11.38	13.56	15.36
90	10.6	12.32	13.82
100	9.89	11.65	12.94
110	8.75	10.53	11.78
120	7.79	9.29	10.56
130	7.13	8.33	9.56
150	5.8	6.78	8.35
170	4.89	5.71	7.78

Fuente: Autores.

Figura 42.Caudal de descarga vs altura disponible



Fuente: Autores.

Análisis

En el gráfico 41 y 42 se muestra los resultados del caudal de descarga en función de la altura de descarga para una carrera de 20mm, pesos de 1.45, 2.44 y 2.946 kg de la válvula de impulso con una altura disponible de 17m. En estos gráficos se puede apreciar que el caudal de descarga decrece con el incremento de altura de descarga. Esto se debe a la acción de la altura de descarga que hace que el agua en la tubería de impulso sea puesta en reposo una vez que se produce el cierre de la válvula de impulso, consecuentemente el agua que pasa desde el tanque de abastecimiento hacia la tubería de descarga tendrá un movimiento retardado, por lo tanto mientras mayor sea la altura de descarga que se desea alcanzar la velocidad de agua en la tubería de descarga decrecerá, por consiguiente el caudal de descarga.

Se observa además que al incrementar el peso de la válvula de impulso por medio de la fuerza de restitución del muelle, se incrementa el caudal de descarga obteniéndose los mayores valores con el peso total de 2.946.kg, esto se debe a que un incremento del peso incrementa la velocidad del agua en la tubería de impulso necesario para efectuar el cierre de la válvula de impulso, consecuentemente la velocidad del agua en la tubería de descarga se incrementa, por lo tanto el caudal de descarga.

Del análisis conjunto de gráficos 41 y 42 se puede apreciar que un incremento de la carrera manteniendo un mismo peso de la válvula de impulso incrementa los valores del caudal de descarga. Esto se debe a que un incremento de la carrera incrementa la velocidad de agua en la tubería de impulso necesario para vencer la resistencia de cierre de la válvula de impulso. Los mayores valores de caudal de descarga, se obtienen con un peso de 2.946 kg y una carrera de 20mm.

5.1.4.2 Análisis del caudal de desecho en función de la altura de descarga

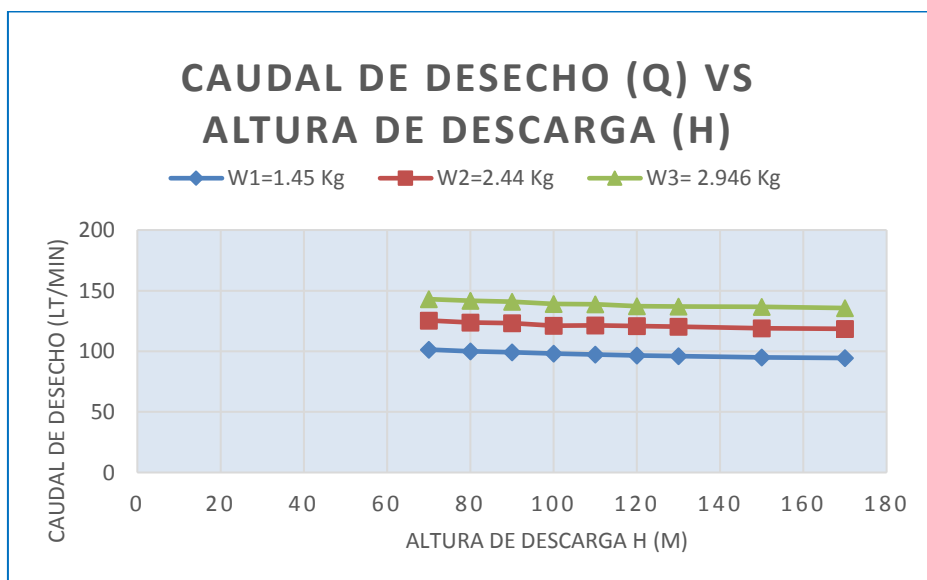
Para el análisis de las curvas se obtuvieron los siguientes datos los cuales se muestran a continuación.

Tabla 8. Caudal de desecho (Q_d) en función de la altura de descarga (h) para una carrera de (S) de 20mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte $K= 22\text{kgf/mm}$.

S = 20 mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Desc	1.45	2.44	2.946
h(m)	q1(lit/min)	q2(lit/min)	q3(lit/min)
70	101.4	125.4	143
80	100	123.7	141.7
90	99.19	123.19	140.89
100	98	121.15	138.95
110	97.2	121.3	138.9
120	96.6	120.8	137.3
130	96	120.2	136.98
150	95.03	118.93	136.55
170	94.43	118.53	135.67

Fuente: Autores

Figura 43. Caudal de desecho vs caudal de descarga



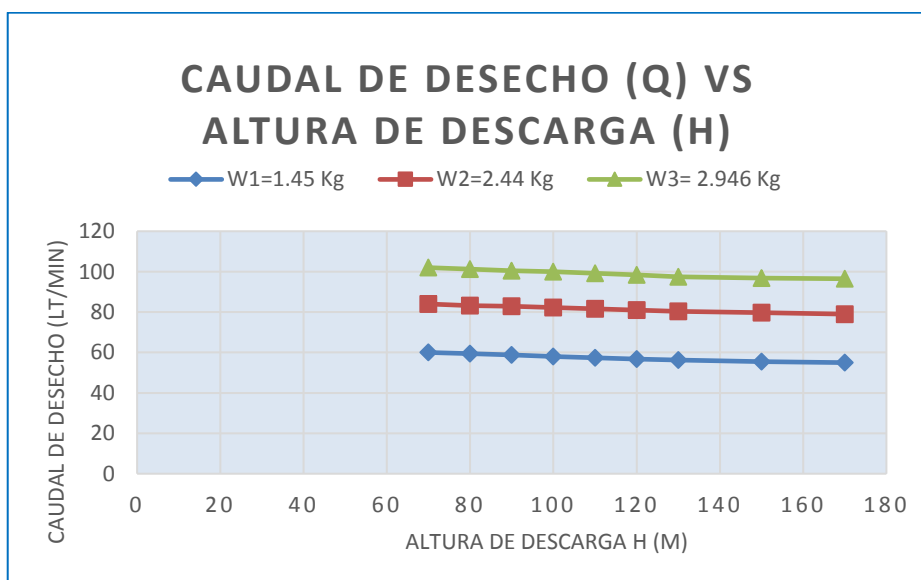
Fuente: Autores

Tabla 9. Caudal de desecho (Qd) en función de la altura de descarga (h) para una carrera de (S) de 10 mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte K= 22kgf/mm.

S = 10mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.l	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	q1(lit/min)	q2(lit/min)	q3(lit/min)
70	60	84	102
80	59.5	83.2	101.3
90	58.81	82.8	100.5
100	58	82.3	100
110	57.34	81.6	99.2
120	56.8	80.9	98.4
130	56.2	80.4	97.5
150	55.45	79.7	96.8
170	54.98	78.98	96.49

Fuente: Autores

Figura 44. Caudal de desecho vs altura disponible



Fuente: Autores

Análisis

La figura 43 permite observar los resultados del caudal de desecho en función de la altura de descarga para una carrera de 20m, pesos de 1.45; 2.44 y 2.946 Kg de la válvula de impulso con altura disponible de 17m. En este gráfico se puede apreciar que el caudal de desecho decrece con el incremento de la altura de descarga. Esto se debe probablemente a que un incremento de la altura de descarga incrementa el tiempo de inicio del ciclo reduciendo el tiempo durante el cual se produce el caudal de desecho.

Se observa además que el incremento al peso de la válvula de impulso se incrementa el caudal de desecho, obteniéndose los mayores valores con un peso de 2.946 Kg. Esto se debe a que un incremento del peso incrementa la velocidad del agua en la tubería de impulso durante las fases en las cuales se produce el caudal de desecho.

De manera similar sucede al analizar la figura 44 el cual muestra los resultados del caudal de desecho en función de la altura de descarga, para una carrera de 10m, pesos de 1.45; 2.44 y 2.9246 Kg con la altura disponible de 17m.

Del análisis conjunto de la gráfica 43 y 44 se puede apreciar que un incremento de la carrera manteniéndose un mismo peso en la válvula de impulso incrementa los valores del caudal de desecho. Esto se debe a que un incremento de la carrera incrementa la velocidad del agua en la tubería de impulso necesario para vencer la resistencia de cierre de la válvula de impulso y el tiempo durante el cual se produce este cierre, factor que influye en el caudal de desecho, los mayores valores del caudal de desecho se obtienen con un peso de 2.946 Kg y una carrera de 20mm.

5.1.4.3 Análisis del rendimiento en función de la altura de descarga

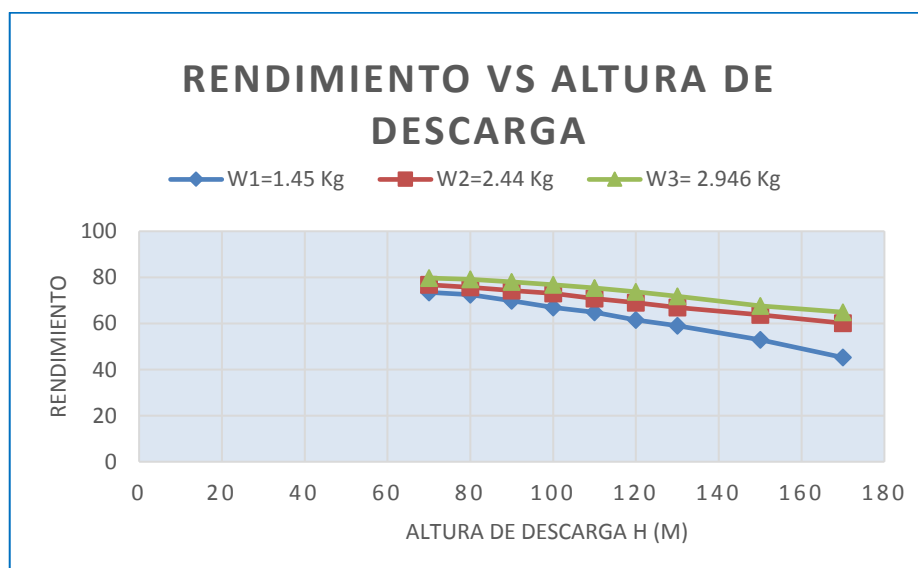
La recolección de datos obtenidos fueron los siguientes dándonos como resultado las siguientes graficas.

Tabla 10. Rendimiento (η) en función de la altura de descarga (h) para una carrera (S) de 20mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte $K= 22\text{kgf/mm}$.

S = 20 mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	n (%)	n (%)	n (%)
70	73.5	76.78	79.7
80	72.45	75.67	79.12
90	69.8	74.3	77.98
100	67	72.98	76.76
110	64.8	70.77	75.47
120	61.46	68.99	73.78
130	58.99	66.98	71.78
150	52.89	63.67	67.65
170	45.23	60.11	64.9

Fuente: Autores

Figura 45. Rendimiento vs Altura de descarga



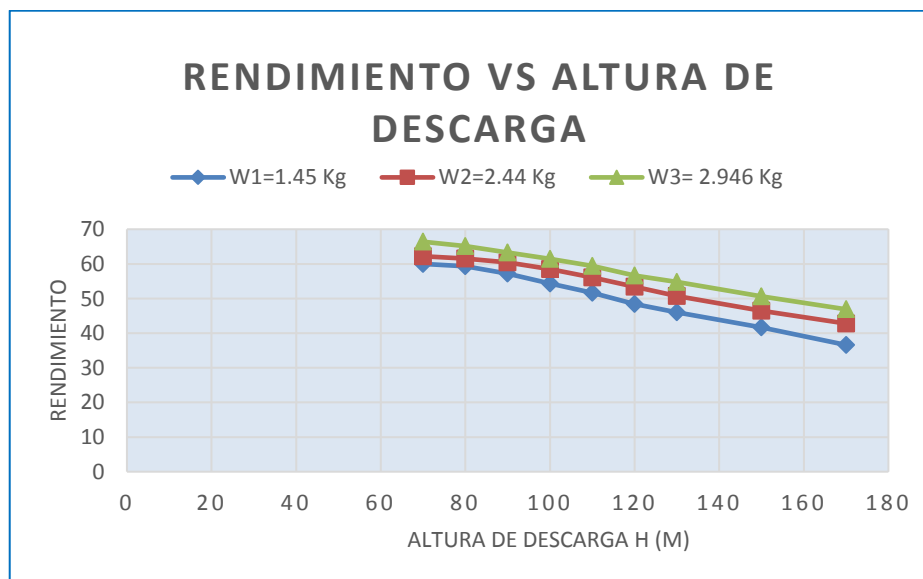
Fuente: Autores

Tabla 11. Rendimiento (η) en función de la altura de descarga (h) para una carrera (S) de 10mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte $K= 22\text{kgf/mm}$.

S = 10 mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	n (%)	n (%)	n (%)
70	60	62.21	66.4
80	59.34	61.56	65.11
90	57.23	60.47	63.3
100	54.31	58.52	61.45
110	51.61	56.1	59.44
120	48.41	53.38	56.68
130	45.97	50.74	54.79
150	41.7	46.48	50.64
170	36.6	42.78	46.89

Fuente: Autores

Figura 46. Rendimiento vs Altura de descarga



Fuente: Autores

Análisis

La figura 45 muestra los resultados del rendimiento en función de la altura de descarga para una carrera de 20m, pesos 1.45; 2.44 y 2.946 Kg con altura disponible de 17m. De este gráfico se puede notar que el rendimiento decrece con el incremento de la altura de descarga. Esto se debe a que un incremento en la altura de descargue produce un decrecimiento de los caudales de descarga y desecho, factores que influyen en el rendimiento del ariete.

De manera similar sucede en el análisis del figura 46 el cual muestra los resultados del rendimiento en función de la altura de descarga para una carrera de 10m, pesos de 1.45; 2.44 y 2.9246 Kg con altura disponible de 17m.

Del análisis conjunto de los gráficos 45 y 46 apreciar que los mayores valores del rendimiento alcanzados en las diferentes pruebas se obtuvieron a las alturas de 70, 80,90 m

5.1.4.4 Análisis de la duración del ciclo (T) en función de la altura de descarga (h)

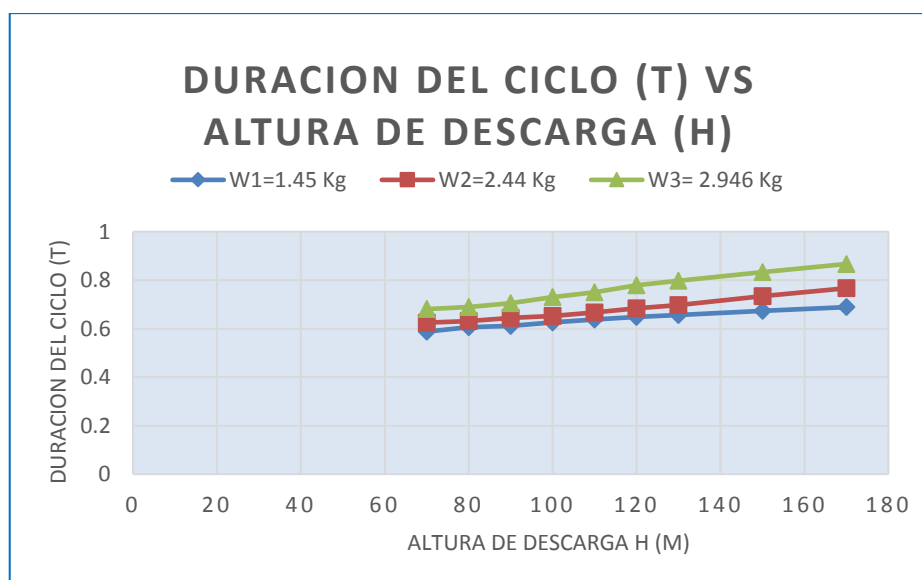
La recolección de datos obtenidos fueron los siguientes dándonos como resultado las siguientes gráficas.

Tabla 12. Duración del ciclo (T) en función de la altura de descarga (h) para una carrera (S) de 20mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte K= 22kgf/mm.

S = 20 mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	T(seg/ciclo)	T(seg/ciclo)	T(seg/ciclo)
70	0.588	0.625	0.681
80	0.606	0.631	0.689
90	0.612	0.645	0.705
100	0.626	0.652	0.731
110	0.638	0.667	0.75
120	0.649	0.684	0.779
130	0.656	0.697	0.798
150	0.674	0.734	0.833
170	0.689	0.767	0.867

Fuente: Autores

Figura 47. Duración del ciclo vs altura de descarga



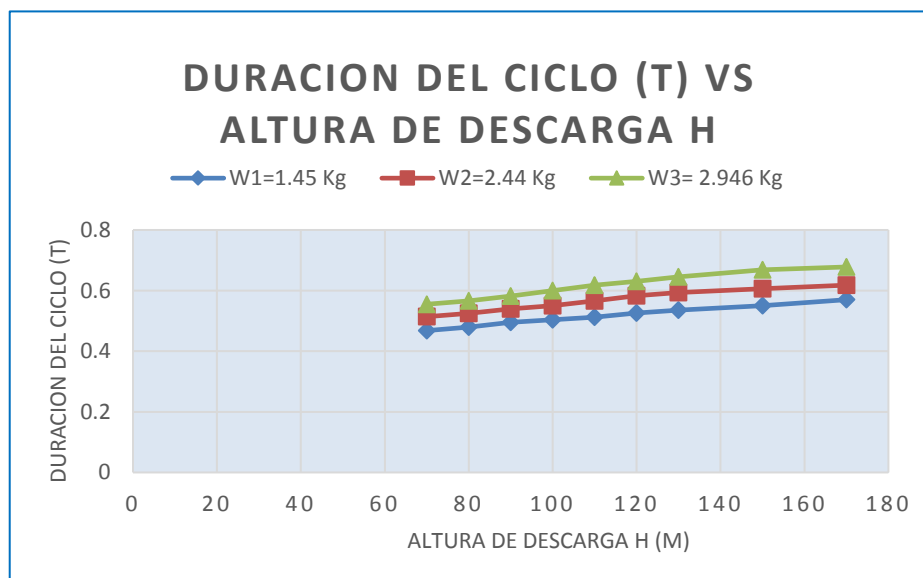
Fuente: Autores

Tabla 13. Duración del ciclo (T) en función de la altura de descarga (h) para una carrera (S) de 10mm, altura disponible (H) de 17m, y diferentes pesos (W), constante del resorte K= 22kgf/mm.

S = 10 mm, H= 17m, k=22kgf/mm		x(mm)	
		0.045	0.068
Peso V.I	w1(Kg)	w2(Kg)	w3(Kg)
Altura Descarga	1.45	2.44	2.946
h(m)	T(seg/ciclo)	T(seg/ciclo)	T(seg/ciclo)
70	0.468	0.514	0.555
80	0.48	0.525	0.566
90	0.495	0.54	0.582
100	0.504	0.55	0.6
110	0.512	0.566	0.618
120	0.526	0.583	0.631
130	0.535	0.594	0.645
150	0.55	0.606	0.669
170	0.57	0.618	0.678

Fuente: Autores

Figura 48. Duración del ciclo vs altura de descarga



Fuente: Autores

Análisis

La figura 47 permite observar los resultados de la duración del ciclo en función de la altura de descarga para una carrera de 20mm y pesos de 1.45; 2.44 y 2.946 Kg de la válvula de impulso con altura disponible de 17m. En este gráfico se puede apreciar que la duración del ciclo se incrementa con el incremento de la altura de descarga. Esto se debe probablemente a que un incremento en la altura de descarga produce un incremento en el tiempo al iniciarse el ciclo, consecuentemente la duración del ciclo.

Se observa además al incrementar el peso de la válvula de impulso se incrementa la duración del ciclo. Esto se debe a que el incremento del peso, incrementa el tiempo durante el cual la velocidad en la tubería de impulso alcanza el valor necesario para efectuar el cierre de la válvula de impulso; tiempo que influye en la duración total del ciclo.

De manera similar sucede al analizar la figura 48 el cual muestra los resultados de la duración del ciclo en función de la altura de descarga para una carrera de 10mm y pesos de 2.44 y 2.946 Kg de la válvula de impulso.

Del análisis conjunto de las figuras 47 y 48 se puede apreciar que un incremento de la carrera manteniendo un mismo peso en la válvula de impulso, incrementa la duración del ciclo. Esto se debe a que un incremento en la carrera incrementa el tiempo durante el cual la válvula de impulso comienza a cerrarse hasta completar su cierre, tiempo que influye en la duración total del ciclo. Los mayores valores de la duración del ciclo se obtienen con un peso de 2.946 Kg y carrera de 20mm.

CAPÍTULO VI

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Discusión de Resultados

Una vez concluido el diseño se puede afirmar que se alcanzó los objetivos de caudal y altura de entrega, con los parámetros de diseño establecidos. Se encuentran en pequeñas variaciones entre los resultados requeridos con los obtenidos, ya que los márgenes de error son mínimos, por tanto no afectan el desempeño de la bomba de ariete hidráulico.

Con una variación de la carrera dentro de un rango de (10mm a 20mm), se adquiere el desarrollo de la máxima potencia, por otro lado la variación de los parámetros independientes, como los determinados por las condiciones de instalación es racional.

Las velocidades para cada periodo son coherentes en particular al final de 2, que es la que inicia el golpe de ariete tiene una magnitud aceptable.

La altura que puede desarrollar el ariete para una carrera de 10mm, por tanto la correcta sintonización del conjunto carrera y constante de resorte de la válvula de impulso dará la altura que se requiere para llegar al reservorio de entrega.

La eficiencia que va ligada a la relación de caudal bombeado y desperdiciado es de 67.8 % para una altura de descarga de 100m.

Los valores óptimos, de caudal de entrega, eficiencia, potencias desarrollada ocurren cuando la válvula de impulso trabaja con el muelle y cuando hay un aumento de la carrera, incrementa el caudal de descarga consecuentemente la potencia desarrollada, por tanto su eficiencia.

CONCLUSIONES

Una vez finalizado el estudio y análisis de la bomba de ariete hidráulico se presentan las siguientes conclusiones

Se realizó un estudio topográfico obteniendo una altura disponible de 17 m.c.a. y una longitud de 36,82 m, desde el tanque de captación al ariete hidráulico; una altura de descarga de 170 m.c.a. y una longitud de 500 m desde el ariete hasta el tanque reservorio, en base al equipo topográfico (GPS y Teodolito).

Se realizó el diseño para la elaboración de un equipo ecológico con un caudal de ingreso de 4lt/seg, 70 golpes/ min con una carrera de 20mm, a una altura 170 m.c.a. Dando un caudal de descarga de 13,2 lt/min y una eficiencia del 45%.

En la Actualidad existe un tanque reservorio construido por el programa PRONASAR que está ubicado a una cota de 1950msnm. Dando una altura de descarga de 100 m.c.a, 70 golpes/ min a una carrera de 20mm, dando un caudal de descarga de 20 lit/ min y una eficiencia de 67,85%.

Según los resultados obtenidos se puede almacenar de 28512 lt/día, beneficiándose 57 familias.

Un incremento de la carrera manteniendo un mismo peso de la válvula de impulso incrementa los valores del caudal de descarga.

Al incrementar el peso de la valvula de impulso por medio de la fuerza de restitución del muelle se aumenta el caudal de descarga.

Los valores de caudal de descarga, caudal de desecho, rendimiento a excepción de la duración del ciclo decrecen con el incremento de la altura de descarga.

Al incrementar el peso de la válvula de impulso se incrementa la duración del ciclo. Esto se debe a que se incrementa el tiempo durante el cual la velocidad con la que llega el agua alcanza el valor necesario para efectuar el cierre.

Al hacer la comparación entre el bombeo mediante ariete hidráulico y bombeo mediante bombas a combustión, según las cotizaciones realizadas en nuestro medio se puede verificar que la adquisición e instalación de bombas mediante combustión y energía eléctrica tienen un precio elevado y además el consumo de combustible y/o energía eléctrica eleva más su costo.

El uso arietes hidráulicos es rentable en comparación con otros sistemas de bombeo bajo determinadas condiciones de diseño.

La bomba de ariete representa una alternativa amigable con el medio ambiente ya que al no utilizar ningún tipo de fuente externa no produce contaminación alguna, por lo que este tipo de bomba puede ser una opción ideal en lugares donde es necesario preservar el medio ambiente.

El apartado de funcionamiento y mantenimiento del equipo permite que el operario pueda realizar su trabajo con total conocimiento, ya que no tiene complejidad.

El correcto funcionamiento tanto de la longitud como del diámetro del mismo es una de la parte esencial del diseño; aunque la bomba de ariete trabajara satisfactoriamente si la relación de la longitud (L) de la tubería con su respectivo diámetro (D), está entre los límites $150 \leq \frac{L}{D} \leq 1000$, fuera de este rango la operación del ariete puede verse afectado notoriamente.

El análisis de los valores obtenidos demuestran que el incremento de peso y/o carrera de la válvula de impulso incrementa el caudal de descarga, caudal de desecho y duración del ciclo, reduce los golpes por minuto que de la válvula evitándose el desgaste y rotura de la misma.

La bomba de ariete construido, debido a su sencillez de funcionamiento y mantenimiento mínimo permite ser operado por personas de escasos recursos económico como es nuestro campesino o poblador de las zonas rurales, cumpliendo así uno de los objetivos de este trabajo.

RECOMENDACIONES

Con el volumen de agua obtenido en los resultados (28512 lt/día), se recomienda que se debería de usar las dos bombas en paralelo para así solucionar el problema de las 30 familias que no cuentan con la dotación de agua.

Las pérdidas en la etapa de bombeo deben ser reducidas al mínimo en la instalación, ubicando la tubería de descarga lo más recto posible.

El usuario debe evitar fuerzas externas a la cámara de aire, ya que su correcto funcionamiento depende de su posición vertical. Por ningún motivo, la válvula de impulso debe ser obstruida de lo contrario el ariete deja de funcionar.

Preparar al personal en la compresión mínima de la operación del Ariete, mediante esto se conseguirá un funcionamiento largo y adecuado.

La válvula de impulso es el elemento que se encuentra a la mayor suma de esfuerzos por lo cual se toman las precauciones necesarias en el diseño construcción y montaje.

Se debe fijar correctamente la bomba de ariete en una posición horizontal bien anclada se sugiere realizar el anclaje mediante caucho para disminuir la vibraciones que produce la bomba.

Controlar que existe el correcto apriete en los pernos, por lo menos cada mes. Por la seguridad de los elementos involucrados en la bomba hidráulica de ariete.

El equipo debe tener un mantenimiento tanto preventivo como correctivo para lograr un buen funcionamiento y cumplir satisfactoriamente su tiempo de vida útil. Es necesario pintar el equipo para evitar ataques de corrosión en la superficie.

Se debe tener en cuenta que el agua que se acelera en el tubo de alimentación, es lo que provoca el “golpe de ariete”, por lo que éste ha de tener una longitud, inclinación y diámetro adecuados, sin curvas ni estrechamientos que provoquen cargas por rozamientos.

Completar la siguiente investigación, mediante el uso de diferentes tipos de válvula de impulso ya que siendo el elemento más importante y el que define las características de funcionamiento, es necesario saber qué tipo de válvula da mejores resultados. Esto permitirá tener una base certera para el diseño y construcción de ariete hidráulico de mayor capacidad.

Incentivar el uso de los arietes hidráulicos en las zonas rurales, asentamientos humanos, etc. A través de volantes informativos de prensa y radio, como también demostraciones prácticas que permitan tener una visión clara y precisa de las ventajas que ofrecen estas unidades de bombeo

Tomar en cuenta el caudal óptimo o el elegido para la construcción del tanque ya que su volumen depende del caudal de descarga disponible.

Por medio de la Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura, se debe incentivar el uso de los arietes hidráulicos en zonas que presentan escases de agua a través de convenios mediante instituciones públicas como municipalidades distritales, Provinciales, gobierno regional, juntas vecinales etc. De tal forma se mejorará la calidad de vida de los ciudadanos.

LINEAS DE INVESTIGACIÓN

1. Realizar la comparación entre un sistema de bombeo mecánico vs sistema de bombeo electrónico que existen en el mercado teniendo en cuenta la topografía existente, así poder tener muchas referencias, alcances de los productos y beneficios que existen en la actualidad.
2. Hacer los mismos ensayos que se presentan en esta tesis, pero aumentar el número de arietes hidráulicos; es necesario mencionar que debido al costo no se realiza, en tal sentido se podría hacer ensayos a escala reducida.
3. La calidad del sistema de bombeo influye en la capacidad de almacenamiento de agua y esta repercutirá en la economía de la población de la Localidad de Huachog.

BIBLIOGRAFÍA

- De Freitas j. Reinaldo a y Sánchez h. Sergio a. “diseño y construcción de un sistema de suministro de agua para una población agrícola.” Tes. Para optar al título de Ingeniero Mecánico. Universidad Central de Venezuela, 2002.
- Galarza Chacón, Raúl. “ESTUDIO DE FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA DE ARIETE Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA.” Tes. Para
- optar al título de Ingeniero Mecánico. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO Ecuador, 2013.
- Larrañaga, F. Introducción A La Mecánica De Fluidos. México: Alfa y Omega,1999.
- Ortiz, Gustavo Adolfo “El Golpe De Ariete En Sistemas De Abastecimiento De Agua Potable.” Tes. Para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad De San Carlos De Guatemala, 2006.
- Paredes Godoy, María Magdalena. “Diseño e instalación de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico en la comunidad de Airón Cebadas.” Tes. Grado Para obtener Titulo de Ingeniero Mecánico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ecuador, 2012.
- Streeter, V., y B. Wylie. Mecánica de los fluidos. Colombia: McGraw Hill,1986.
- Sabando Castro, Luis Alfredo Y Zambrano Castro, Eduardo Geovanny “Diseño e Instalación del Sistema de Bombeo y Conducción para la Cancha del Estadio Universitario de la Universidad Técnica de Manabí” Tes. Previa a la Obtención del Título de Ingeniero Agrícola. UNIVERSIDAD TECNICA DE MANABÍ Ecuador, 2000.
- Torres, F. Obras Hidráulicas. México: Limusa, 1980.

ANEXOS