

**UNIVERSIDAD CENTRAL MARTA ABREU DE LAS VILLAS FACULTAD
DE CONSTRUCCIONES DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
HIDRÁULICA**



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Diseño de un Sistema de Suministro de Agua como Propuesta para el Jardín Botánico de la Universidad Central Martha Abreu de las Villas.

Autor: Leosdan Flores Veitía

Tutor: MSc. Ing. István Gómez Ríos

Santa Clara

Curso: 2015-2016

"Año 58 de la Revolución."

Dedicatoria:

Desde hace un largo tiempo empecé a construir un sueño, pero pensaba en el momento de mi último semestre, lo veía lejano, algo inalcanzable, pero siempre tuve el apoyo de mi Madre, quien ha hecho una parte fundamental en este proceso de mi vida.

He sido feliz en muchas ocasiones pero en otras, la tristeza y la derrota, el sentirse incapaz me han devastado, me desplomado hasta el punto de llorar, de sentir una rabia incontrolable por no lograr las cosas que planeaba. El cansancio fue una de las cosas que más me afectaron en este proceso, pero nunca es tarde para decir "Lo Voy a lograr".

Por eso quiero dejar escrito este documento, mi más sincera gratitud a mi Madre ya que ella ha sido una parte fundamental en mi historia en la Universidad, me apoyo en cada instante y siempre recibí una palabra y un consejo de aliento para no dejarme caer. Su amor de Madre es lo más puro y Leal.

Agradecimiento:

El sincero agradecimiento a Dios por la Vida, a mi madre por su amor, cariño y por el apoyo brindado en especial a la Facultad de Construcciones 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 y en especial al **MSc. Ing. István Gómez Ríos** ya que sin su asesoría y paciencia no hubiera sido posible llegar a la culminación de la Carrera.

Resumen:

Para el Jardín Botánico de la Universidad Central de las Villas ubicado en el municipio de Santa Clara 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 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 es factible a ser utilizado para esta tarea de bombeo en el río evaluado.

Abstract

For the Botanical Garden of the Central University of Las Villas located in the municipality of Santa Clara was studied the installation of an alternative system of water supply whose source of work energy depends from the same conditions of the river to use for its installation.

A Hydraulic Battering ram was designed for the study from its behavior when varying diverse parameters, like they are the fall of water, the supply flow and the

longitude of the suction pipe. With this study the feasibility of installation of the system was determined in the area.

The obtain evident changes in the behavior of the bomb, when varying the frequency of operation cycle and when varying the height of pumping.

It was determined behaviors of curved Frequency of Cycle. Flow, different regarding previous studies, due to the little longitude of suction pipe and of the screw axis of the impulse valve. Finally it is concluded, that the system is feasible to be used for this task of pumping water from the river.

INDICE	Pág.
Introducción	8
Objetivos y Alcances	
Descripción del Problema Científico	
Planteamiento de la Solución	
Objetivo General	
Objetivos Específicos	
Capítulo I: Marco Teórico	
1.1 Mecánica de los Fluidos	9
1.1.1 Flujo Permanente	9
1.1.2 Flujo No Permanente	9
1.1.3 Flujo Incompresible	9
1.1.4 Flujo Compresible	10
1.2 Golpe de ariete	10
1.2.1 Velocidad de Propagación de las Ondas Elásticas	11
1.2.2 Golpe de Ariete en Cierres completos de Válvulas	19
1.3 Bomba de Ariete	21
1.3.1 Principio de Funcionamiento	21
1.3.2 Componentes de la Bomba	22
1.3.3 Funcionamiento del Ariete Hidráulico	23
1.3.4 Análisis Teórico	25
Capítulo II: Diseño y Construcción del Sistema	33
2.1 Recolección de Datos	33
2.1.1 Caudal del Río	33
2.1.2 Medición de Cotas	34

2.1.3 Censo de Área Plantada	35
2.1.4 Características del Terreno	35
2.1.5 Muestra de Agua del Río	36
2.2 Análisis de datos	37
2.3 Velocidad de Propagación de onda	37
2.4 Golpe de Ariete	38
2.5 Bomba de Ariete Hidráulico	38
2.5.1 Válvula de Impulso	38
2.5.2 Válvula de Descarga	39
2.5.3 Tubo “T”	39
2.5.4 Cámara de Aire	40
2.6 Elementos del Sistema de Bombeo	40
2.6.1 Tanque de Suministro	41
2.6.2 Tubería de Impulso	41
2.6.3 Tubería de Descarga	42
2.7 Instrumentos de Medición	42
2.7.1 Manómetro	42
Capítulo III: Instalación y Pruebas.	43
3.1 Ensamblaje	43
3.2 Instalación de Componentes del Sistema de Bombeo	43
3.2.1 Toma de Agua	43
3.2.2 Bomba de Ariete Hidráulico	43
3.3 Puesta en Marcha	44
3.3.1 Acciones Previas	44
3.3.2 Accionamiento del sistema	44
3.3.3 Detención de la bomba	45
3.3.4 Calibración de la Bomba	45
3.3.5 Mantenimiento	46
3.4 Descripción de las Pruebas	47
3.4.1 Cálculos Tipo	47
3.4.2 Tablas y graficas Gráficas	50
3.4.3 Análisis de Resultados	51
Conclusiones	57
Recomendaciones	58

Introducción

El Jardín Botánico se encuentra enmarcado en la Universidad Central De Las Villas y está destinado a la conservación de las plantas endémicas y exóticas que en el se encuentran, ésta instalación cuenta con los servicios básicos indispensables como agua potable, electricidad y teléfono.

Dado que el agua es necesaria para la buena salud y subsistencia de sus especies es indispensable diseñar y construir un sistema de suministro de agua, donde la fuerza motriz sea la elasticidad del líquido, esto debido a que se riega con agua tratada químicamente por el acueducto de la misma Universidad violando los parámetros de uso de esta agua y contaminando las plantas debido a la acides que genera en los suelos y que también se gasta una cantidad considerables de energía eléctrica al bombear agua desde el ríos, por lo cual una Bomba de Ariete puede ser la solución óptima para entregarle la energía al agua que la eleve hasta una cota superior.

La solución planteada es bombear agua desde un pequeño río adyacente a la Instalación hasta un tanque de almacenamiento, y distribuirla entre las diferentes plantaciones, partiendo de la premisa de que el sistema a diseñar debe ser mantenido por la instalación y sus trabajadores y debe ser de bajo costo de instalación y mantenimiento.

Problema Científico:

Actualmente El Jardín Botánico carece de suministro de agua para consumo agrícola. La poca agua de la que disponen es obtenida del acueducto.

Esta carencia de agua apta para riego aumenta los riesgos de enfermedades y limita el surgimiento próspero de la agricultura en la instalación.

La energía eléctrica es otro problema que aqueja a esta instalación, por lo que la tecnología fundamentada en la electricidad usando agua potable para el bombeo de agua no es una opción en la solución de este problema.

Hipótesis

La existencia de ríos adyacentes al Jardín plantea la posibilidad de bombear agua desde los mismos hasta un tanque elevado y luego distribuirla para su aprovechamiento. Se deberán tomar muestras de las aguas para su estudio bacteriológico, además, por los altos costos de servicio eléctrico se pretende utilizar un sistema alternativo de bombeo, de bajo mantenimiento y cuya energía utilizada sea aprovechada a partir de las condiciones elásticas del agua.

La Bomba de Ariete servirá para este propósito y el agua bombeada desde el río adyacente deberá ser almacenada en un punto de cota superior a las instalaciones, para su distribución por gravedad (Tanque elevado).

Objetivo General

Diseñar un sistema de bombeo, y distribución de agua para el Jardín Botánico de la Universidad Central de Las Villas, aprovechando el agua de ríos adyacentes.

Objetivos Específicos

- Investigación sobre el requerimiento agrícola de agua y distribución de la misma según las condiciones climáticas y geológicas de la zona.
- Investigación y diseño de una Bomba de Ariete para el bombeo de agua.
- Estudio sobre el funcionamiento de la bomba y la influencia del Golpe de Ariete en la misma.
- Diseño y plan de mantenimiento del sistema y evaluación periódica de las aguas.

Capítulo I

En este capítulo se realizará una breve revisión bibliográfica y se expondrán las principales teorías de los fluidos y sus propiedades así como que es una bomba y que función realiza.

1.1 Mecánica de Fluidos

1.1.1 Flujo Permanente.

Se dice que el flujo es permanente cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian en el transcurso del tiempo. La expresión analítica que define éste concepto es: $(\partial V / \partial t) = 0$. También no existen cambios ni en la densidad ρ , ni en la presión P , ni en la temperatura T , con el tiempo en cualquier punto[1, 2].

1.1.2 Flujo No Permanente.

El flujo es no permanente cuando las condiciones en cualquier punto cambian con el tiempo, $(\partial V / \partial t) \neq 0$, $(\partial T / \partial t) \neq 0$, etc. Ejemplo: Bombeo por un sistema con caudal Variable, creciente o decreciente. Éste flujo también es denominado flujo transitorio[2, 3].

1.1.3 Flujo Incompresible.

Se denomina Flujo Incompresible a todo aquel flujo que mantiene su densidad relativamente constante en el tiempo mientras se mueve por un campo de flujo[2], esto es:

$$dp/dt=0$$

Esto no exige que la densidad sea constante en todos los puntos. Tanto los flujos Líquidos como los flujos de gases a baja velocidad, son considerados incompresibles.

1.1.4 Flujo Compresible.

Todo aquel flujo en el que la densidad varía significativamente en el tiempo mientras se mueve por un campo de flujo, se denomina Flujo Compresible. Estas Variaciones de densidad son significativas tanto en los gases como en los líquidos[2].

Lo que hace que el líquido se comprima ligeramente y que el material de la tubería experimente deformaciones muy pequeñas es la interacción de los cambios de momento y las fuerzas aplicadas. Estos cambios de presión, que pueden ser significativos, se conocen como **Golpe de Ariete**. Esto va acompañado por perturbaciones de presión y velocidad que viajan a velocidades muy altas, cercanas a la velocidad del sonido en el líquido, además, la acción ondulatoria resultante ocurre a frecuencias relativamente altas[2, 4].

1.2 Golpe de Ariete.

El término Golpe de Ariete se refiere a las fluctuaciones de presión debido a un repentino incremento o decremento en la velocidad del flujo. Este fenómeno de estado estable se encarga del cambio entre la energía cinética y la energía de presión, el cual puede ser positivo o negativo[4]. Algunas causas del golpe de ariete son:

- 1) Abertura o cierre repentino de válvulas en un sistema de tuberías.
- 2) Al arrancar o detener una bomba en un sistema de bombeo.

Si la presión al cerrar un conducto disminuye por debajo de la presión de vapor del

Líquido se forma un espacio o cavidad (donde la columna de agua es separada por un espacio de aire). Este fenómeno es llamado separación de columna de agua, esta es la peor condición de golpe de ariete, y puede provocar que la tubería no sea capaz de soportar las fuerzas externas y colapse. Esto puede ser un problema para tuberías de pared delgada y grandes diámetros y tuberías plásticas con rangos de presión bajos o transportando líquidos calientes. La respuesta de columna de agua separada puede producir altas presiones y poner la tubería en riesgo.

1.2.1 Velocidad de Propagación de las Ondas Elásticas o Perturbaciones De las Magnitudes de Flujo

Para explicar la Teoría de la Columna Elástica de Agua se asumirá lo siguiente[4, 5]:

- a.- La tubería se mantiene llena de agua todo el tiempo y la presión mínima dentro de la misma es mucho mayor a la presión de vapor del agua.
- b.- Las pérdidas hidráulicas son despreciables comparadas con los cambios de presión.
- c.- La velocidad del agua en la dirección del eje de la tubería es uniforme a través De cualquier sección transversal del tubo.
- d.- La presión es uniforme en cualquier punto de una sección transversal del tubo y es igual a la presión en la línea central de la tubería.
- g.- El nivel de agua en el reservorio se mantiene constante durante el movimiento De la válvula de control.

Condición de equilibrio dinámico:

A continuación se estudiará la condición de equilibrio dinámico para el elemento de agua de longitud dx ubicado dentro de la tubería mostrado en la Figura N° 1.

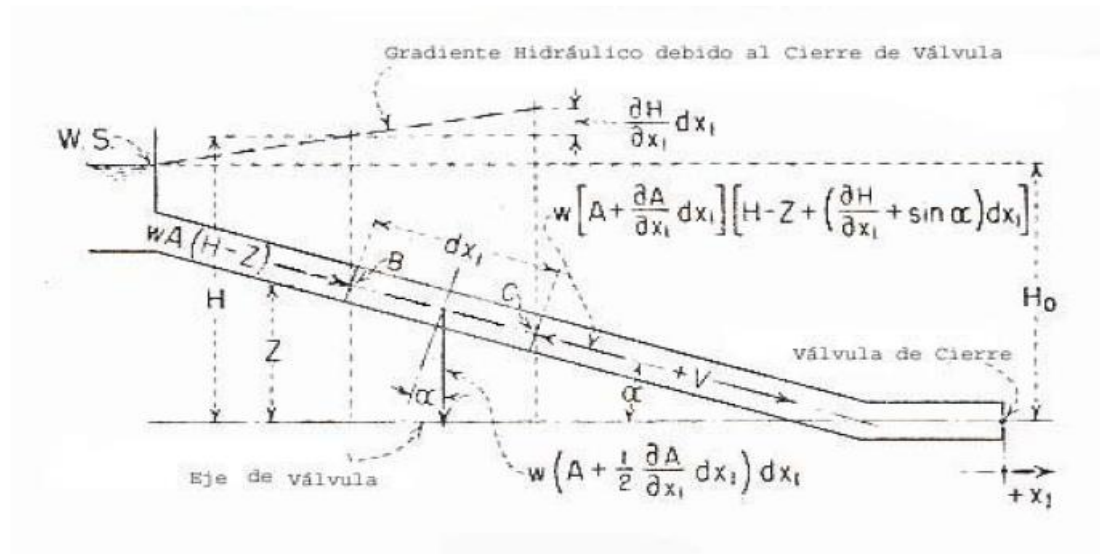


Figura: 1 Condición de equilibrio dinámico

En el paso de la cara B a la cara C del elemento de longitud dx_1 , el área transversal del tubo se incrementa en una tasa de $\frac{\partial A}{\partial x_1}$. Si el área en la cara B la definimos como A, el área en la cara C es entonces. La intensidad de la presión y las fuerzas actuantes en las caras B y C son determinadas de una manera similar y son mostradas en la Tabla N° 1[6].

Tabla 1 Paso de las caras B y C

Ubicación	Cara B	Cara C	
Área	A	$A + \frac{\partial A}{\partial x_1} dx$	Ec .1
Presión	$w(H-Z)$	$w \left[H - Z + \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} + \text{sen} \alpha \right) dx_1 \right]$	Ec .2
Fuerza	$wA(H-Z)$	$w \left(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1 \right) \left[H - Z + \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} + \text{sen} \alpha \right) dx_1 \right]$	Ec .3

En el centro del volumen diferencial estudiado, la fuerza de gravedad que actúa verticalmente hacia abajo sobre la masa del elemento es igual a:

$$w \left(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx \right) dx_1 \quad \text{Ec .4}$$

La fuerza no balanceada que actúa como desaceleradora en dirección del eje longitudinal es:

$$w \left(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1 \right) \left[H - z + \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} + \sin \alpha \right) dx_1 \right] - wA \left[(H - Z) - w \left(A + \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} dx_1 \right) dx_1 \sin \alpha \right] \frac{1}{2} \frac{\partial A}{\partial x_1} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde tomamos como positiva la dirección de la fuerza en sentido opuesto al movimiento normal del flujo. Después de eliminar términos despreciables la ecuación anterior se reduce a:

$$w \left[A \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} + (H - Z) \right) \frac{\partial A}{\partial x_1} \right] dx_1 \quad \text{Ec. 6}$$

Tomando en cuenta que $w [(H - Z) \frac{\partial A}{\partial x_1}] dx$ es muy pequeño comparado con $wA (\frac{\partial H}{\partial x}) dx_1$, entonces la expresión de la fuerza desaceleradora no balanceada queda reducida a:

$$wA \frac{\partial y}{\partial x_1} dx_1 \quad \text{Ec. 7}$$

Observando que la masa del elemento de agua a ser movido es $wAdx_1/g$ y su desaceleración es $-dV/dt$. Entonces la segunda ley de Newton viene expresada por:

$$wA \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1 = \frac{wA}{g} \frac{dV}{dt} dx_1 \quad \text{Ec. 8}$$

Como la velocidad es una función de x_1 y de t , entonces

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = \frac{1}{g} \left(\frac{dV}{dt} + V \frac{\partial V}{\partial x_1} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Que es la ecuación de equilibrio dinámico para el elemento de agua.

Condición de continuidad:

La segunda ecuación que relaciona H y V es extraída de la condición de continuidad. La Figura N° 2 a muestra un elemento de agua de longitud BC igual a dx_1 para un tiempo t . Para un instante de tiempo dado la rata de cambio de la velocidad entre la cara B y la cara C del elemento es dV/dx_1 . y la velocidad en las caras B y C son V y $V + (\partial V / \partial x) dx_1$ respectivamente. En la Figura N° 2b se

observa el cambio en el elemento diferencial de agua desde una posición BC a la posición DF pasado un tiempo diferencial dt [7].

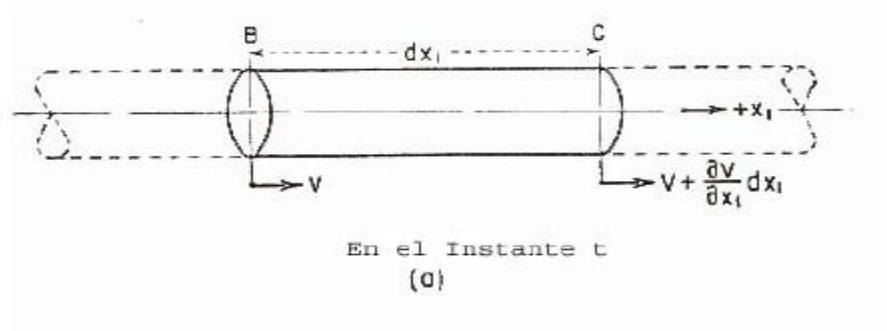


Figura: 2 Cambio de posición del agua

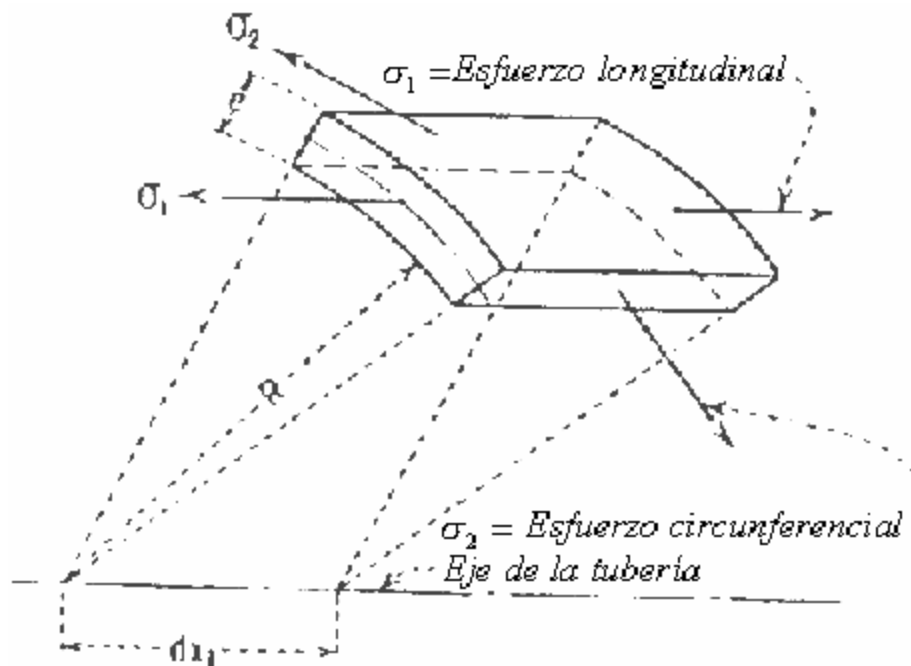
El cambio en longitud del elemento dx_1 en el movimiento desde BC a DF es BDCF.

La velocidad de la cara B en su movimiento hacia D durante el intervalo de tiempo dt es:

$$V + \frac{1}{2} \frac{dV}{dt} BD + \frac{1}{2} \frac{dV}{dt} dt \quad \text{Ec.10}$$

Luego de eliminar términos de menor orden tenemos.

$$BD - CF = -\frac{dV}{dx_1} dx_1 dt \quad \text{Ec.11}$$



$\sigma_1 = \text{Esfuerzo longitudinal en la pared del tubo}$
 $\sigma_2 = \text{Esfuerzo circunferencial en la pared del tubo}$

Figura: 3 Representación de los esfuerzos sobre las paredes del tubo

El cambio en la longitud del elemento dx_1 es consecuencia de dos factores.

En primer lugar el cambio en la presión causa una expansión en la corteza del tubo. El resultado de este cambio de dimensión de la sección transversal es un cambio en la longitud del elemento diferencial, para mantener el mismo volumen de agua[4].

En segundo lugar, a consecuencia de la compresibilidad del agua, un cambio en la presión origina un cambio en el volumen de agua dentro del elemento. Debe calcularse el cambio total en la longitud del elemento, considerando al mismo tiempo la elasticidad del agua y la elasticidad de la corteza del tubo[1]. Tomando como referencia la Figura N° 3, la deformación en el elemento de la corteza de tubo producido por esfuerzos longitudinales y circunferenciales es:

$$\Delta R = \frac{R}{E} (\Delta \sigma_2 - \mu \Delta \sigma_1) \quad \text{y} \quad \partial x_1 = \frac{dx_1}{E} (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_2)$$

E = Módulo de elasticidad del material del conducto (N/m²).

Donde $\Delta \sigma_1$ y $\Delta \sigma_2$ representan el cambio en los esfuerzos longitudinales y circunferenciales respectivamente, producidos por un cambio en la presión. El volumen encerrado dentro del elemento después de aplicados los esfuerzos es $\pi(R + \Delta R)^2 (\delta x_1 + dx_1)$ y el cambio en longitud del elemento original BC compatible con el cambio de volumen es:

$$\partial x_1 + \frac{2\pi R_1}{R} dx_1 \quad \text{Ec.12}$$

El cambio en el esfuerzo longitudinal depende de la habilidad de la tubería para moverse en dirección axial, se estudiarán tres casos de restricción de movimiento axial en tuberías:

A.- Para una tubería anclada únicamente en su extremo superior:

$$\delta x_1 + \frac{2\pi R}{R} dx_1 - \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{4} \left(\frac{5}{4} - \mu \right) dx_1 \quad \text{Ec.13}$$

$$\delta x_1 + \frac{2\pi R}{R} dx \quad \text{Ec.14}$$

e = Ancho de la pared del tubo (m)

B.- Para tuberías con anclajes en ambos extremos que no permiten movimiento en la dirección axial a la tubería.

$$\delta x_1 + \frac{2\pi R}{R} dx_1 = \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{4} (1 - \mu^2) dx_1 \quad \text{Ec.15}$$

C.- Para tuberías con juntas de expansión.

$$\delta x_1 + \frac{2\pi R}{Ee} dx_1 = \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} \left(1 - \frac{\mu}{2}\right) dx_1 \quad \text{Ec.16}$$

De donde podemos decir que la ecuación usada para los tres casos es:

$$\delta x_1 + \frac{2\pi R}{Ee} dx_1 = \frac{wD}{Ee} \frac{dH}{dx_1} c_1 \quad \text{Ec.17}$$

Para los tres casos:

$$A \times c_1 = \left(\frac{5}{4} - \mu\right) \quad B \times c_1 = (1 - \mu^2) \quad C \times c_1 = \left(1 - \frac{\mu}{2}\right)$$

El cambio en la longitud total del elemento de agua dx_1 debido al efecto del cambio de presión $w dH$, considerando la elasticidad del agua y la deformación en la tubería se reduce a:

$$w \left(\frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee}\right) dH dx_1 \quad \text{Ec.18}$$

Donde H es una función de x_1 y t , con $dV/dx_1 = V$ tenemos lo siguiente:

$$dH = \frac{\partial H}{\partial t} dt + \frac{\partial H}{\partial x_1} dx_1 = \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1}\right) dt \quad \text{Ec.19}$$

Si introducimos la definición producida en la ecuación 4:

$$BD - CF = - \frac{\partial V}{\partial x_1} dx_1 dt \quad \text{Ec.20}$$

El cambio en la longitud total del elemento queda:

$$BD - CF = w \left(\frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee}\right) \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1}\right) dx_1 dt \quad \text{Ec.21}$$

Igualando las dos ecuaciones anteriores queda:

$$\frac{\partial V}{\partial x_1} = -w \left(\frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee}\right) \left(\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1}\right) \quad \text{Ec.22}$$

Simplificando:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x_1} = -\frac{a^2}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x_1} \quad \text{Ec.23}$$

Donde:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g} \left(\frac{1}{K} + \frac{Dc_1}{Ee} \right)}} \quad \text{Ec.24}$$

a: velocidad de propagación de las perturbaciones (m/s)

K: módulo de elasticidad volumétrica del líquido (Pa)

w: peso específico del fluido (N/m³)

E: módulo elasticidad del material de la tubería (Pa)

D: diámetro de la tubería (m)

e: espesor de la tubería (m)

C1: factor de colocación de la tubería

Siendo a (Ecuación 6) la expresión de la velocidad a la cual se mueven las ondas de presión producidas por el golpe de ariete dentro de una tubería llena por un líquido. Como se puede apreciar a depende de las condiciones en las cuales se encuentra el fluido y las propiedades de la tubería. Cuando la tubería es muy rígida (E tiende a infinito) a es equivalente a la velocidad del sonido, pero cuando la tubería es menos rígida el valor de a disminuye porque una porción de la energía de las ondas se pierde[2, 4].

Para obtener las ecuaciones fundamentales que describen el golpe de ariete resolveremos simultáneamente las ecuaciones 3 y 5.

Para empezar debemos asumir que el término $\left(\frac{1}{g} \right) V \frac{\partial V}{\partial x}$ de la ecuación 3 es Pequeño comparado con $\frac{\partial V}{\partial t}$. Y en la ecuación 5 el término $\left(\frac{1}{g} \right) V \frac{\partial H}{\partial x}$ es despreciable comparado con $\frac{\partial H}{\partial t}$. De ésta manera rescribiendo las ecuaciones 3 y 5 tenemos:

$$\frac{\partial H}{\partial x_1} = -\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Ec.25}$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{a^2}{g} \times \frac{\partial V}{\partial x_1} \quad \text{Ec.26}$$

Las soluciones generales para estas ecuaciones diferenciales son respectivamente:

$$H-H_0 = f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) + F\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \quad \text{Ec.27}$$

$$V-V_0 = \frac{g}{a} \left[f\left(t - \frac{x_1}{a}\right) - F\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \right] \quad \text{Ec.28}$$

Con el fin de facilitar el estudio del efecto del golpe de ariete hidráulico, es conveniente expresar la variable V como positiva en la dirección espontánea del fluido, en este caso cuando el vector apunta desde el reservorio de agua hacia la compuerta en el nivel más bajo de la tubería.

También resulta provechoso cuando se estudian problemas que involucran compuertas en el extremo inferior de la tubería medir la variable x_1 a partir de dicha compuerta y en sentido positivo opuesto al movimiento del fluido, es decir desde la compuerta hasta el reservorio, esto debido a que la perturbación inicial en el flujo ocurre en el extremo inferior de la tubería y luego se mueve hacia el extremo superior de la misma.

Tomando ésta última consideración en cuenta las ecuaciones 9 y 10 quedan de la siguiente manera:

Haciendo $-x = x_1$

$$H-H_0 = F\left(t - \frac{x_1}{a}\right) + f\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \quad \text{Ec.29}$$

$$V-V_0 = \frac{g}{a} \left[F\left(t - \frac{x_1}{a}\right) - f\left(t + \frac{x_1}{a}\right) \right] \quad \text{Ec.30}$$

Las ecuaciones 11 y 12 son las ecuaciones fundamentales del golpe de ariete hidráulico. [8]

En donde:

$$F\left(t - \frac{x_1}{a}\right) \quad \text{y} \quad f\left(t + \frac{x_1}{a}\right)$$

Son funciones arbitrarias que representan respectivamente la onda de presión que se mueve desde la válvula al reservorio y la onda de presión que recorre la tubería desde el reservorio hasta la válvula.

1.2.2 Golpe de Ariete en Cierres completos de Válvulas

A comienzos del siglo XX, el investigador italiano Lorenzo Alievi propone el primer procedimiento de cálculo del golpe de ariete más o menos riguroso desde el punto de vista teórico y a la vez de utilidad práctica. Siendo, para cierres completos de válvulas que ocurran en tiempos $t \leq 2L/a$ el valor extremo para el golpe de ariete:

$$H_1 - h_0 = \frac{aV_0}{g} \quad \text{Ec.31}$$

Para explicar el movimiento de las ondas de presión en una tubería luego del cierre repentino de una válvula, consideraremos una tubería recta y dispuesta horizontalmente conectada a un depósito como lo indica la Figura N° 4, la cual se encuentra llena de agua para cualquier tiempo t y no tiene roce con el fluido, es decir las pérdidas por fricción son despreciables.

La evolución hidráulica del movimiento transitorio se muestra en la figura 4. Una vez que se cierra la válvula, la altura piezométrica aumenta a un valor $h_0 + a*V_0/g$, la velocidad se anula y comienza la propagación de las perturbaciones hacia el estanque, tal como se indica en las situaciones (b), (c) y (d) de la misma figura. Una vez que la perturbación alcanza el estanque, situación (e), se verifica en la entrada un considerable gradiente piezométrico. En efecto, justo en la tubería, la altura piezométrica es $h_0 + a*V_0/g$, mientras que, inmediatamente aguas arriba, en el estanque es h_0 . Se desarrolla entonces, un flujo desde el conducto hacia el estanque, a expensas de la masa de líquido acumulada en la tubería. Esta perturbación, del tipo f, que es reflejo de la primaria generada en la válvula, comienza a desplazarse hacia aguas abajo, situaciones (f), (g) y (h). Cuando llega al extremo cerrado, el flujo hacia la izquierda reduce la altura piezométrica y comienza la propagación de dicha perturbación hacia el estanque, que representa

una depresión, situaciones (j), (k) y (l). Cuando la perturbación alcanza el estanque, el gradiente piezométrico, puesto de manifiesto por el valor de h_0 y $h_0 + a \cdot V_0/g$ (justo. en la tubería), ocasiona un movimiento desde esa estructura hacia el conducto, que progresa aguas abajo, situaciones (n), (o) y (p). Finalmente, cuando la perturbación f alcanza la válvula, se origina un efecto similar al primario, situación (b), y el ciclo se repite indefinidamente ya que se han ignorado los efectos de la fricción[4, 9].

En el caso de un sistema de tuberías real, la fricción, el movimiento del tubo y el comportamiento no elástico del material del tubo hacen que la oscilación tarde o temprano se amortigüe y cese.

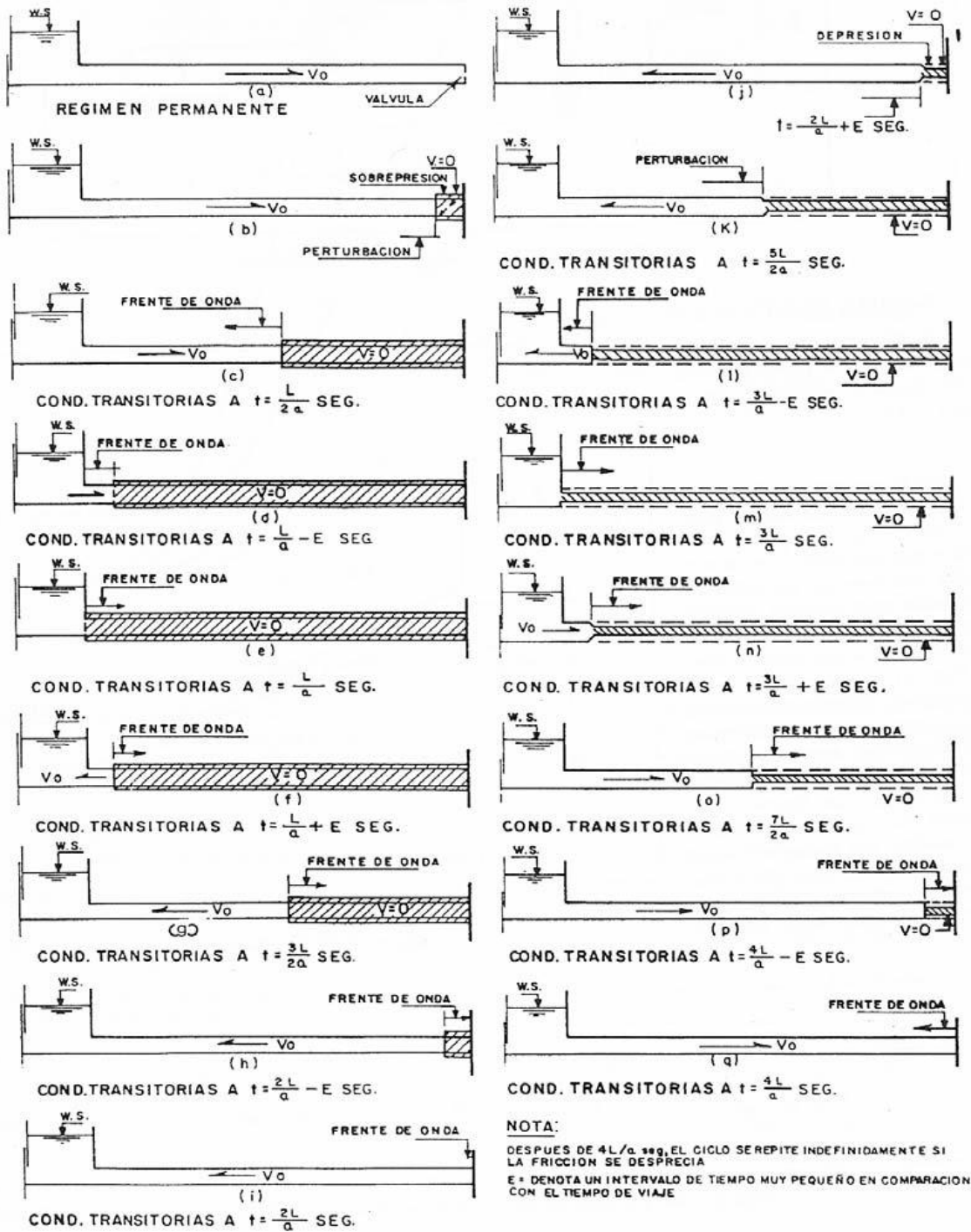


Figura: 4 Evolución de los parámetros de flujo para el caso de un cierre instantáneo[10].

1.3 Bomba de Ariete

1.3.1 Principio de funcionamiento

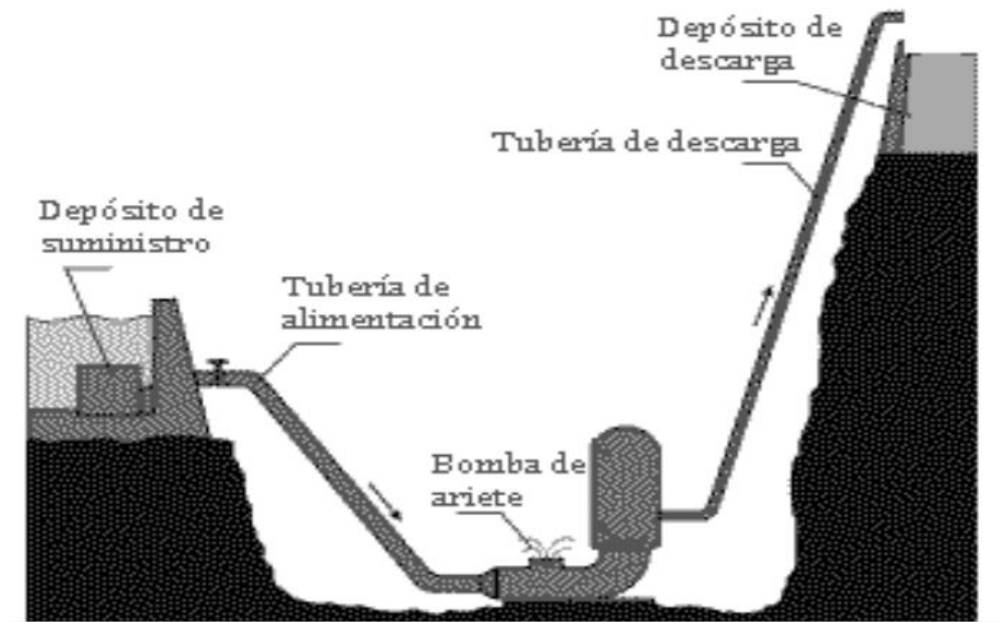


Figura: 1 partes de la bomba de ariete

El funcionamiento de la bomba de ariete es bastante simple y fácil manejo. El agua procedente de un depósito, acequia o río desciende por gravedad por la tubería de alimentación o impulso bajo la acción del desnivel en relación con el Ariete Hidráulico. El agua llega hasta el cuerpo o caja de válvulas con velocidad suficiente para que la presión dinámica cierre la válvula de impulso. El cierre brusco de esta válvula produce el efecto conocido como golpe de Ariete, lo cual origina una sobrepresión en la tubería de alimentación que provoca la apertura de la válvula de retención, que permite el paso del agua hacia el interior del cuerpo de la bomba. Esta agua provoca la compresión de aire existente y cierta cantidad de agua asciende por la tubería de hasta llegar al depósito de descarga. El ciclo se repite una y otra vez a un ritmo de 60 a 90 de golpes por minuto y cuanto más lento sea el funcionamiento, más agua utiliza y bombea. La tubería de alimentación suele ser de acero galvanizado, PVC, PE, cuyo diámetro depende del caudal utilizado[10, 11].

1.3.2 Componentes de la Bomba

En el esquema se muestran los elementos esenciales para el funcionamiento del Ariete hidráulico, que son:

Es importante señalar que los precios relacionados aquí son los precios mayoristas aprobados y se tomó una referencia de facturas encontradas en el departamento de economía de la UCLV

Componentes	Precio unidad (CUP)	Cantidad	Total
material para válvulas de impulso	31,00	1	31,00
Válvula cheque de descarga 1 1/2"	15,00	1	15,00
reducido 3-1 1/2	4,50	1	4,50
niple de 1 1/2(long 6 cm)	2,00	2	4,00
niple de 1 1/2(long 20 cm)	2,00	1	2,00
niple de 3/4	1,50	1	1,50
T de 1 1/2	2,00	1	2,00
tapa de acero galvanizada	3,70	1	3,70
manómetro	4,00	1	4,00
reducido 2-1 1/2	8,00	1	8,00
resorte	1,50	1	1,50
válvula de paso 3/4	0,70	1	0,70
total piezas partes	75,90	13	77,90

–**El tubo de impulso.** Según las reglas convencionales debe tener un largo entre 100 y 500 veces el diámetro del tubo, y un mínimo de 2 y hasta 7 veces la altura de la presa, según el tipo de ariete.

–**La válvula de impulso** con su cámara, que según las mismas reglas, debe tener como mínimo el doble del diámetro del tubo de impulso.

–**La válvula de retención o descarga** la cual generalmente es la mitad del diámetro de la válvula anterior, depende en primer lugar del caudal de bombeo y la frecuencia de los golpes.

–Encima de la válvula de retención se encuentra la **cámara de aire** que debe tener un mínimo de 10 veces el volumen del agua que entra por golpe.

–Por último se observa el **tubo de bombeo**, generalmente de la mitad del diámetro del tubo de impulso, aunque es más lógico determinarlo según el caudal de bombeo, el largo del tubo y la potencia disponible.

1.3.3 Funcionamiento del Ariete Hidráulico

El ariete hidráulico es una bomba en la cual el momento (o cantidad de movimiento) producido por un flujo desde una caída baja es usado para bombear fluido hasta una altura superior a la de suministro. Tan solo tiene dos partes móviles, una válvula de impulso y una de descarga o bombeo, las cuales operan automáticamente con la acción dinámica del fluido durante el ciclo de bombeo[12]. La acción de bombeo puede ser entendida al considerar la siguiente secuencia de Eventos:

- a) Ambas válvulas están cerradas, la válvula de impulso se mantiene cerrada debido a la presión estática de la altura de suministro, H , y la válvula de descarga se mantiene cerrada debido a la presión en la descarga.
- b) El accionamiento de la bomba se inicia forzando la apertura de la válvula de impulso. La presión en (2) viene a ser esencialmente la atmosférica. Bajo la acción De la altura H , el fluido en la tubería de impulso es acelerado, fluyendo hacia fuera De la válvula en el nivel inferior del río.
- c) Con un diseño apropiado de la válvula de impulso, ésta se cerrará automáticamente cuando el fluido salga por la válvula a cierta velocidad, debido a la distribución de presión, que es suficiente para vencer el peso de la válvula. El cierre se produce muy rápidamente.
- d) El repentino cierre de la válvula de impulso inicia una presión en la misma, que es mucho mayor que la presión estática por la altura de suministro. Esta presión abre la válvula de descarga.

e) La inercia de la masa de fluido en la tubería de impulso mantiene el flujo hacia la tubería de descarga (en contra de la presión en la zona de descarga), pero con una velocidad decreciente debido a la fuerza retardante de la altura de descarga, la cual es mayor que la altura de suministro. Durante este intervalo de bombeo con Desaceleración del flujo en el ducto de suministro, la presión en la válvula de impulso es aproximadamente la presión de descarga, manteniéndose así la válvula de impulso cerrada.

f) Cuando la velocidad del flujo a través de la válvula de descarga se reduce a cero, la presión de descarga devuelve el flujo hacia la válvula de descarga y hacia la tubería de impulso. El flujo al devolverse cierra la válvula de descarga.

g) Puesto que el flujo en el ducto de suministro se mueve ahora hacia el tanque de Suministro y la válvula de descarga se encuentra cerrada, la presión en la válvula de impulso disminuye rápidamente hasta que el efecto combinado de la presión atmosférica actuando en la válvula de impulso, el resorte en la válvula y la presión Interna (presión negativa) actuante en la válvula de impulso produce una fuerza neta que la abre automáticamente. (Note que en la parte (b) forzamos la válvula para que se abriera, mientras que ahora esta se abre automáticamente sin otra fuerza externa)

h) Cuando la válvula de impulso se abre, la presión en la válvula de impulso es la Presión atmosférica. La altura del tanque de suministro actúa para desacelerar el flujo en retorno hasta una velocidad cero y acelerar el flujo para el comienzo de otro ciclo.

Con la acción rápida de apertura y cierre de las válvulas, las pulsaciones de presión son sobrepuestas a los mayores efectos de las diferencias de presión estables y la inercia de la columna de fluido. Estas fluctuaciones de presión producen ondas de compresión y cambios de velocidad superpuesta con propagación a la velocidad del sonido. Cuando todos los efectos son considerados, el análisis detallado se vuelve bastante complejo.

Sin embargo, un análisis aproximado puede ser hecho asumiendo que la presión y la velocidad de fluctuación tienden a producir efectos promedios causados por la altura del reservorio de suministro, la presión atmosférica en la válvula de impulso cuando esta se encuentra abierta y la altura de descarga en la tubería de impulso cuando la válvula de descarga está abierta.

1.3.4 Análisis Teórico

Ya que el ducto de impulso es un elemento necesario en la acción de bombeo este debe ser considerado como parte de la bomba. La bomba son los elementos de (0) a (4) (ver fig. 5).

A pesar de que los flujos de impulso y bombeo son intermitentes la Tasa de Flujo Promedio puede ser definida por el volumen total de fluido de impulso y volumen total de fluido bombeado entre el tiempo de un largo número de ciclos.

El fluido de impulso usa la altura H , de (0) a (3). De tal manera que la energía mecánica usada para hacer funcionar la bomba es:

$$P_T = Q_T w H \quad \text{Ec.32}$$

Donde:

Q_T es la tasa de Flujo Promedio a través de la válvula de Impulso.

El fluido bombeado se encuentra originalmente al mismo nivel que el tanque de suministro, z_0 . La altura de descarga es la combinación de la presión por la columna de agua y la elevación en la cámara de aire, es decir

$$h_4 = P_4/w + Z_4 \quad \text{Ec.33}$$

La altura de bombeo es entonces,

$$H = P_4/w + Z_4 - Z_0 \quad \text{Ec.34}$$

Donde:

P_4 es la presión manométrica tomando la presión en (0) como cero.

La tasa de energía mecánica suministrada al fluido bombeado es

$$P_p = Q_p w h \quad \text{Ec.35}$$

Donde:

Q_p es la tasa de flujo promedio a través de la válvula de descarga hacia la cámara de aire y luego hacia el sistema de descarga.

La eficiencia es la siguiente:

$$e = \frac{P_p}{P_T} = \frac{Q_p w h}{Q_T w H} = \frac{Q_p h}{Q_T H} \quad \text{Ec.36}$$

Ignorando los pequeños periodos de presión fluctuante, el ariete hidráulico puede ser analizado considerando únicamente los efectos dependientes del tiempo causados por la altura de impulso y la altura de descarga.

Además, ya que se dijo que casi todo el período de un ciclo completo de eventos está compuesto por el periodo de la aceleración del flujo de impulso desde una velocidad cero hasta la velocidad cuando se cierra la válvula de impulso y el período de desaceleración del flujo bombeado desde el momento en que ocurre simultáneamente la apertura de la válvula de descarga y el cierre de la válvula de impulso hasta que la velocidad del flujo bombeado se hace cero por el cierre de la válvula de descarga, este periodo se tomará como un ciclo de tiempo completo[2]. En efecto, el tiempo de (f) y (g) hasta (h) será ignorado. El ciclo se reduce a dos intervalos, el intervalo de aceleración del flujo de impulso desde (b) hasta (c) y intervalo de bombeo de flujo de (c) o (d) hasta (f).

Estos flujos dependientes del tiempo deben ser tratados como un medio de aproximación al flujo unidimensional no estable.

$$-\frac{dp}{w} - ds - \frac{fV^2}{2gD} dl = \frac{dV}{dt} \frac{dl}{g} \quad \text{Ec.37}$$

Con un factor de fricción constante y un diámetro constante en la tubería de impulso entre (1) y (2)

$$\frac{P_1 - P_2}{w} + z_1 - z_2 - \frac{fLV^2}{D2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.38}$$

Entre (0) y (1) la masa del fluido que se acelera se puede despreciar respecto a la masa de fluido en la tubería de impulso. La ecuación de flujo estable se aplica entonces con un coeficiente de pérdida K_c

$$\frac{P_0 - P_1}{w} + z_0 - z_1 + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} - K_c \frac{V_1^2}{2g} = 0 \quad \text{Ec.39}$$

Para el intervalo de flujo de impulso t_b a t_c , se asume que la válvula de impulso está completamente abierta, con un coeficiente de pérdida K_d . Además, la masa de flujo en aceleración entre (2) y (3) es pequeña comparada con la masa de fluido en línea de impulso.

La ecuación de flujo estable aplicable es:

$$\frac{P_2 - P_3}{w} + z_2 - z_3 + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_3^2}{2g} - K_d \frac{V_2^2}{2g} = 0 \quad \text{Ec.40}$$

Con la ecuaciones (20), (21) y (22) y notando que $P_0 = P_3 = 0$, $V_0 = 0$ y $V_1 = V_2 = V$ se obtiene:

$$z_0 - z_3 - \frac{V_3^2}{2g} - \frac{V^2}{2g} \left(f \frac{L}{D} + K_c + K_d \right) = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.41}$$

Además, V_3 puede ser expresado en términos de V en la línea de impulso, $A_3 V_3 = AV$ donde A es el área de la tubería de impulso. Adicionalmente tenemos que $z_0 - z_3 = H$ por lo que la ecuación para el intervalo de impulso se transforma en:

$$H - \left(\frac{A^2}{A_3^2} \right)^2 + f \frac{L}{D} + K_c + K_d \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.42}$$

Sea $M = \left(\frac{A}{A_3}\right)^2 + f \frac{L}{D} + K_c + K_d$, entonces la ecuación se convierte en:

$$H - M \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.43}$$

de igual forma, para el intervalo de descarga (c) hasta (f) entre (1) y (2)

$$\frac{P_1 - P_2}{w} + z_1 - z_2 - f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{D} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.44}$$

entre (0) y (1)

$$\frac{P_0 - P_1}{w} + z_1 - z_2 + \frac{V_0^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} - K_e \frac{V_1^2}{2g} = 0 \quad \text{Ec.45}$$

Entre (2) y (4), asumiendo una longitud de tubería corta y con un coeficiente K_p de válvula de descarga en términos de la velocidad V_2 ,

$$\frac{P_2 - P_4}{w} + z_2 - z_4 + \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_4^2}{2g} - K_p \frac{V_2^2}{2g} = 0 \quad \text{Ec.46}$$

Con las ecuaciones (26), (27) y (28) y notando que $p_0 = 0$, $V_0 = 0$ y $V_1 = V_2 = V$,

$$-\frac{P_4}{w} + z_0 - z_4 - \frac{V^2}{2g} \left(f \frac{L}{D} + K_c + K_p \right) - \frac{V_4^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.47}$$

V_4 en la ecuación (29) es la velocidad existente desde la válvula de descarga y puede ser expresado en términos de la velocidad de impulso

$$A_4 V_4 = AV$$

La ecuación (29) queda entonces,

$$-\frac{P_4}{w} + z_0 - z_4 - \left(\frac{A^2}{A_4^2} + f \frac{L}{D} + K_e + K_p \right) \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.48}$$

De (16) y definiendo

$$N = \frac{A^2}{A_4^2} + f \frac{L}{D} + K_e + K_p \quad \text{Ec.49}$$

La ecuación (31) queda

$$-h - N \frac{V^2}{2g} = \frac{L}{g} \frac{dV}{dt} \quad \text{Ec.50}$$

Las ecuaciones (25) y (33) pueden ser resueltas para los intervalos de tiempo de impulso y

Descarga, Intervalo de impulso

$$t_c - t_b = \left(\frac{2L^2}{gHM} \right)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{MV_m^2}{2gH} \right)^{1/2} \quad \text{Ec.51}$$

Intervalo de descarga

$$t_f - t_c = \left(\frac{2L^2}{ghN} \right)^{1/2} \tan^{-1} \left(\frac{NV_m^2}{2gH} \right)^{1/2} \quad \text{Ec.52}$$

En las ecuaciones (34) y (35), V_m es la velocidad máxima en la tubería de impulso La cual ocurre cuando la válvula de impulso se cierra y la válvula de descarga se abre. El

Flujo volumétrico en cada intervalo de tiempo se obtiene de las ecuaciones (34) y (35).

$$(\text{Vol})_T = \int_{t_b}^{t_c} AV dt = \int_0^{V_m} \frac{AV}{g} \frac{LdV}{(H - M \frac{V^2}{2g})} \quad \text{Ec.53}$$

$$(\text{Vol})_P = \int_{t_c}^{t_f} AV dt = \int_{V_m}^0 \frac{AV}{g} \frac{LdV}{(h - N \frac{V^2}{2g})} \quad \text{Ec.54}$$

Integrando las ecuaciones (36) y (37)

$$(\text{Vol})_T = \frac{LA}{M} \left[\log \left(\frac{1}{1 - \frac{MV_m^2}{2gH}} \right) \right] \quad \text{Ec.55}$$

$$(\text{Vol})_P = \frac{LA}{N} \left[\log \left(1 + \frac{NV_m^2}{2gh} \right) \right] \quad \text{Ec.56}$$

El cociente volumétrico por ciclo es también el cociente de la tasa de flujos, dado que los volúmenes deben ser promediados sobre el tiempo total de un ciclo.

$$\frac{Q_p}{Q_T} = \frac{(\text{Vol})_p}{(\text{Vol})_T} = \frac{M}{N} \frac{\left[\log\left(\frac{NV_m^2}{2gh} + 1\right) \right]}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{MV_m^2}{2gH}}\right)} \quad \text{Ec.57}$$

Si la válvula de impulso se mantiene abierta hasta que la velocidad en la tubería de impulso alcance el flujo estable bajo la altura H, esta velocidad de flujo estable debe ser obtenida de la ecuación (25) con $dV/dt = 0$ y $V_s^2 = 2gH/M$. Con esta definición la ecuación (40) puede cambiarse a la forma,

$$\frac{Q_p}{Q_T} = \frac{M}{N} \frac{\log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{NH}{Mh} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{V_m^2}{V_3^2}}\right)} \quad \text{Ec.57}$$

La eficiencia es:

$$e = \frac{Q_p h}{Q_{TH}} = \frac{h}{H} \frac{M}{N} \frac{\log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{NH}{Mh} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{V_m^2}{V_3^2}}\right)} \quad \text{Ec.58}$$

La tasa de flujo bombeado es el volumen bombeado en un ciclo promediado sobre el intervalo de tiempo total del ciclo.

$$Q_p = \frac{(\text{Vol})_p}{t_f - t_b} = \frac{A \log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{N}{M} \frac{H}{h} + 1\right)}{\left(\frac{2M}{gh}\right)^{1/2} \left[\left(\frac{M}{N}\right) \tan^{-1}\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{N}{M} \frac{H}{h} + \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \tan^{-1} \frac{V_m}{V_3}\right) \right]} \quad \text{Ec.59}$$

Las ecuaciones (41), (42) y (43) dan la información completa del funcionamiento del ariete hidráulico.

Las ecuaciones de funcionamiento contienen tres cocientes V_m/V_3 , N/M y H/h , las cuáles pueden ser reducidas a dos, notando que N y M son aproximadamente iguales:

$$M = \left(\frac{A}{A_3}\right)^2 + f \frac{L}{D} + K_e + K_d \quad \text{Ec.60}$$

$$N = \left(\frac{A}{A_4}\right)^2 + f \frac{L}{D} + K_e + K_p \quad \text{Ec.61}$$

Note que $K_e \cong 0,5$, K_p y K_d son $\cong 1,0$, A_3 y A_4 son aproximadamente iguales.

Además, $f L/D$ es igual para N y M , con la previa suposición de que f no depende de la velocidad y se tomó como constante. Para valores mínimos de M y N los valores de A/A_3 , A/A_4 , K_p y K_d deben ser tan pequeños como sea posible. Si llegan a ser cero, o son pequeños comparados con $f L/D + K_e$, entonces $M = N$ y $M/N = 1$.

Las ecuaciones de funcionamiento las podemos reducir entonces a

$$\frac{Q_p}{Q_T} = \frac{\log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{H}{h} + 1\right)}{\log\left(\frac{1}{1 - \frac{V_m^2}{V_3^2}}\right)} \quad \text{Ec.62}$$

$$e = \frac{h \log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{H}{h} + 1\right)}{H \log\left(\frac{1}{1 - \frac{V_m^2}{V_3^2}}\right)} \quad \text{Ec.63}$$

$$\frac{Q_p}{AV_3} = (1/2) \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \frac{\log\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{H}{h} + 1\right)}{\tan^{-1}\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{H}{h}\right)^{1/2} + \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \tanh^{-1}\left(\frac{V_m}{V_3}\right)} \quad \text{Ec.64}$$

Tomando V_m/V_3 como un parámetro, el funcionamiento esperado se obtiene de una forma generalizada en forma de gráficas.

De interés es también la frecuencia de ciclos, y con $M = N$, se tiene:

$$\text{ciclos / s} = \frac{1}{t_f - t_b} = \frac{gH}{LV_3} \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \frac{1}{\tan^{-1}\left(\frac{V_m^2}{V_3^2} \frac{H}{h}\right)^{1/2} + \left(\frac{h}{H}\right)^{1/2} \tanh^{-1}\left(\frac{V_m}{V_3}\right)} \quad \text{Ec.65}$$

Capítulo II Diseño y Construcción del Sistema

En este capítulo se realizarán cálculos necesarios debido a la importancia de los mismos, utilizando para ello métodos tradicionales y no convencionales de medición de caudales.

2.1 Recolección de Datos

2.1.1 Caudal del Río

Para la determinación de este dato se utilizó una cinta métrica y un flotador determinando el caudal por el método del flotador. Se procedió a establecer un perímetro de los ríos en una longitud de 5 m y el ancho de dicha medición calculando la profundidad y área por el método de las secciones, el cronometraje para la determinación del caudal se realizó tomando el tiempo inicial y final del recorrido del flotador. Este procedimiento se realizó en tres sectores diferentes del río para la determinación de la ubicación con mayor caudal, además, para la ubicación de estos puntos de posible bombeo fue indispensable la presencia de un desnivel o caída, puesto que este es utilizado para dar impulso al agua bombeada. El procedimiento anterior fue efectuado tanto en el periodo seco como en el lluvioso en los meses de Marzo y Agosto respectivamente, obteniéndose resultados similares en ambos periodos, los datos del mes de agosto fueron aportados por estudiantes de 3er año de la carrera de Ingeniería Hidráulica.

Debido a la existencia de diques en el cauce del río se determinó utilizar el primer dique por contar con mejores condiciones para la colocación del ariete.

Altura del dique 2 m

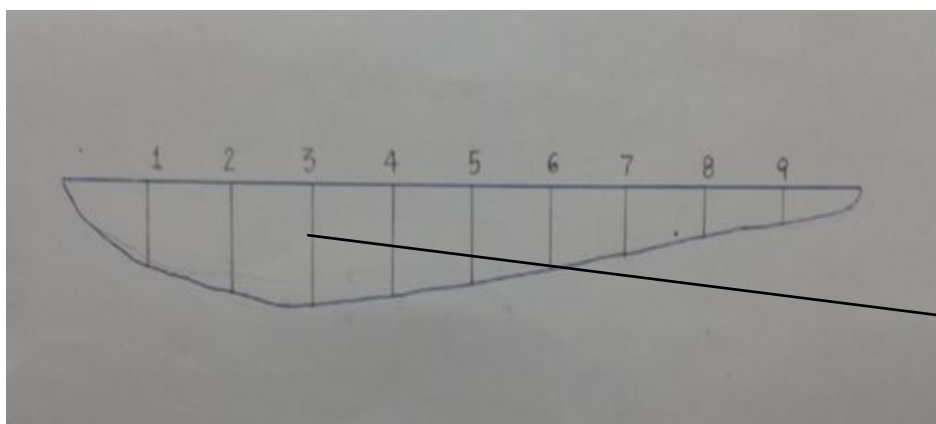
Longitud de caída del agua en la tubería de succión proyectada a realizar 6m

Obteniendo una velocidad superficial promedio una vez analizados los resultados de 0.114 m/s y después de ser corregida la medición obtenida con el flotador utilizando como coeficiente 0.70 ya que no era un caudal ni muy grande ni muy pequeño. Resultando una velocidad promedio del caudal igual a 0.08 m/s.

El cálculo de las áreas se realizó por el método de las secciones donde la sección del río se divide en varias subsecciones, el ancho de estas debe ser menor o igual al 10% del ancho de la superficie del río.

Medición del ancho de la superficie del río y de las subsecciones:

Quedando la siguiente sección transversal:



Tirantes

puntos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
tirantes (m)	0.37	0.52	0.94	0.92	0.78	0.59	0.41	0.29	0.18

Se calculan las áreas por el método de las figuras geométricas, tomando los extremos como triángulos y los demás como trapecios utilizando respectivamente las formulas siguientes.



$$A = \frac{b * h}{2}$$



$$A = \frac{(B+b)}{2} * h$$

A = Área. (m²)

B o b = Bases. (m)

H = altura. (m)

Obteniendo un área total de 3.9 m².

Por último el caudal lo calculamos por la ecuación de continuidad.

$$Q = v * A$$

$$Q = 0.08 \text{ m/s} * 3.9 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.312 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 312 \text{ l/s}$$



2.1.2 Medición de Cotas

Se utilizó en primera instancia un Plano topográfico de la zona del Jardín con levantamiento de cotas realizado por el Instituto de Recursos Hidráulico de Villa Clara[13], con una escala 1:5000

Se ha pretendido inicialmente, realizar el bombeo al punto de ubicación del tanque de descarga el cual debería estar debería estar a una cota de 6m por encima de la bomba de ariete.

Alturas (cota sobre el nivel del Jardín):

Escala (ver escala 1:5.000 1:000

Altura de la bomba con respecto al nivel del Jardín = 3.00 m

Altura de la bomba con respecto al nivel del tanque elevado = 6.00 m

2.1.3 Censo de área plantada

Para la realización de este censo se contó con la colaboración de los trabajadores del Propio Jardín los que brindaron gran variedad de datos.

El jardín cuenta con cerca de 1250 plantas

El 100 % de la actividad productiva de esta institución se basa en la agricultura, la cual se desarrolla de manera científica y tradicional.

2.1.4 Características del Terreno:

La topografía de la zona es poco accidentada con bajas pendientes, está ubicado en la Rivera del río Ochoa que transita por la UCLV

Precipitación promedio: 1.400 mm. Anuales, con dos picos de precipitación en Junio y Octubre. Seco en Enero, Febrero y Marzo.

Agricultura:

En zonas tropicales se calcula 1etc (evapotranspiración del cultivo) = 5 mm por día, considerando que $1\text{mm por m}^2 = 1000\text{ L}$.

En otras palabras, por cada metro cuadrado se debe suministrar 0,5 L de agua al día, lo que indica que por hectárea serían 5.000 L por día.

En el caso de los árboles maderables, que es el cultivo más común de la zona, se debe regar dos veces a la semana, aportándole las pérdidas de toda la semana, es decir, 5.000 L por día X 7 días, o lo que es igual a 35.000 L por hectárea a la semana.

Si se calcula este caudal nos daría unos 0,06 L/s por cada hectárea de cultivo de las variedades existente en el Jardín.

Consumo de Agua:

El consumo de agua está regulado por normas cubanas las cuales se detallan a continuación[14, 15].

Tabla 1321.131.1 norma de agua requerida por plantación

Cantidad de agua requerida por día en zonas rurales	
Plantación (u)	Norma de Consumo (m^3/ha)
Frutales	4000
Maderables	4375
Ornamentales	1250

2.1.5 Muestra de Agua del Río

Para el análisis del agua se obtuvo ayuda del laboratorio de Química de el INRH. La consulta con esta institución fue de vital importancia, para el conocimiento de la forma en que se realizan los análisis del agua para diversos usos.

En el suministro de agua para consumo vegetal se requiere realizar un amplio análisis del agua a suministrar, según las normas cubanas[14, 15]. El objetivo principal de esta norma es especificado, y es el de establecer los valores máximos de aquellos componentes o características del agua que representan un riesgo para las plantas [14].

Los estudios realizados para este trabajo incluyen pruebas Fisicoquímica y Bacteriológicas, sin embargo es de vital importancia mencionar, que esto no representa un estudio estadístico de las aguas, sino un simple estudio puntual de una sola muestra, es decir, no es concluyente el análisis por no representar las características periódicas de las aguas del río ver anexo C .

Según la norma establecida se cataloga el agua del río como buena.

2. Coliformes Totales y Fecales: $2,3 \times 10^4$ y 210 (ucf/100ml) respectivamente. Aunque estos no son los agentes que perjudican la salud de las plantas, este análisis bacteriológico muestra gran cantidad de desechos fecales y obviamente un valor muy por encima del estipulado en la norma, que es de 0 ucf/100ml para consumo humano, y menor a 1000 y 100 respectivamente, para uso en el riego.

2.2 Análisis de Datos

Los datos obtenidos no han sido del todo satisfactorios, especialmente la altura de Bombeo, la cual es excesiva. El punto deseado para la colocación del tanque de almacenamiento se encuentra a una diferencia de cota mínima lineal de 400 m respecto al río, esto representa una altura significativa respecto a los escasos 6 m de altura de caída que se puede obtener.

Una vez más debemos mencionar que el estudio no puede ser tomado como representativo, pues el nivel de contaminación puede aumentar con el aumento de las lluvias o con la deposición de más desechos contaminantes por los residentes en el centro y por los desechos del comedor.

2.3 Velocidad de Propagación de Onda

Utilizando la Ec. (6) para una columna elástica de agua tenemos

$$W=9800\text{N/m}^3$$

$$O=2.15 \cdot 10^{-4} \text{m}^3/\text{s}$$

$$E=1.10 \cdot 10^{11} \text{Pa}; K=2.20 \cdot 10^9$$

$$\text{El diámetro } D=0.042\text{m}$$

$$\text{La longitud } =7.6\text{m}$$

$$V=Q/A; V=0.049\text{m/s}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{1}}{\frac{w}{g} \left(\frac{1}{k} + \frac{Dc1}{Ee} \right)} \quad \text{Ec.66}$$

$$\alpha=1.284 \cdot 10^3 \text{m/s}$$

2.4 Golpe de ariete

Según la ec (13) tenemos

$$H=a*V/g$$

$$H=755.155 \text{ m}$$

2.5 Bomba de Ariete Hidráulico

2.5.1 Válvula de Impulso

En una Bomba de Ariete Hidráulico se debe aprovechar la sobrepresión producida por el golpe de ariete, en tal sentido se debe minimizar la absorción de energía por el material, por lo que el mismo debe ser lo más rígido posible, además se debe considerar las condiciones a las que estará sujeto la válvula y el uso que se le dará al fluido bombeado, es decir, siendo para consumo en riegos se debe evitar la oxidación del material. Un acero inoxidable AISI 304 (Acero galvanizado) es adecuado para el sistema deseado, sin embargo debido al constante golpeteo del tapón de cierre de la válvula, este debe ser el elemento a desgastarse pues es el más sencillo y económico de construir, por lo que se seleccionó un material más dúctil y menos resiliente, un Acero Inoxidable AISI 316 fue el escogido[2]. (Ver Anexo A) En cuanto a la forma y diseño de la válvula, esta debe ser de un diseño tal que:

- a) Permita el flujo libre del agua hacia el exterior, minimizando las pérdidas en lo posible
- b) Al producirse el golpe, las fuerzas ejercidas sobre las paredes de la pieza deben ser distribuidas lo más uniforme posible, a fin de evitar los esfuerzos excesivos concentrados en una sola región de la pieza y la posible falla de la válvula.
- c) La apertura y cierre de la válvula deberá tener un ciclo de repeticiones lo más alto posible por unidad de tiempo, lo que se logra con el adecuado dimensionamiento del sistema, es decir, una longitud de Tornillo Eje adecuada y una longitud de tubería de succión lo suficientemente larga, además se debe tomar en cuenta el cálculo adecuado de la fuerza a ejercer por el elemento de

cierre de válvula sobre las fuerzas producidas por el agua al descender a través de la tubería de succión.

A continuación se muestra un dibujo de la válvula de cierre

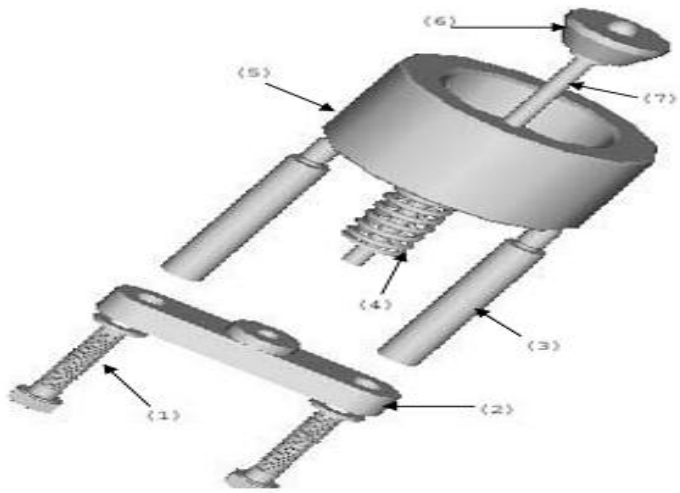


Figura: 2.0000000 partes de una válvula de cierre rápido

- 1- Tornillo M8*2P
- 2- Lámina Sujetadora
- 3- Soporte de Unión
- 4- Resorte
- 5- Cuerpo de la Válvula
- 6- Tapón de Cierre
- 7- Tornillo Eje

2.5.2 Válvula de Descarga

La Válvula de Descarga permite el paso de agua desde la succión hasta la cámara de aire. Esto se efectúa debido a la sobrepresión producida en el golpe, que al pasar por el tubo "T" es desviada hacia la válvula, la cual abre su compuerta por la fuerza ejercida sobre ella.

Puesto que la energía en la sobrepresión se transfiere a la cámara de aire, el Material de esta válvula no es realmente muy exigido en comparación con la Válvula de Impulso, por lo que se seleccionó una Válvula Check comercial de 1 ½", diseñada en bronce.

2.5.3 Tubo “T”

Este elemento conecta la tubería de Impulso con la válvula de Impulso y la Válvula de Descarga, esta conexión permite desviar el paso del agua hacia la Válvula de Descarga

en el momento en que la sobrepresión alcanza este elemento.

Se seleccionó un Tubo “T” comercial en Hierro Galvanizado de 1 ½”.



2.5.4 Cámara de Aire



Considerando que la cámara de aire debe tener un mínimo de 10 veces el volumen del agua que entra por golpe, se seleccionó un tubo de 3” de diámetro y 0,7m de longitud, en acero galvanizado. El mismo, es suficientemente resistente para soportar las presiones que se pretenden, además de ser un material cuyo tratamiento permite su uso en el manejo de agua incluso para consumo humano.

Puesto que el recipiente a utilizar como Cámara de Aire estará sometido a una alta Presión se determinará la presión máxima que resiste,

Longitud (L) = 0,7 m

Diámetro externo (Do) = 88 mm

Espesor (t) = 4 mm

Material: Acero Galvanizado ASTM 20

De las tablas de la se obtiene que para el ASTM 20 el $S_y = 20 \text{ Kpsi}$ [16].

Puesto que la altura máxima a ser alcanzada por esta bomba es muy inferior, se puede utilizar el tubo de 3” escogido.

2.6 Elementos del Sistema de Bombeo

2.6.1 Tanque de suministro

Para la realización de las pruebas se utilizó una caída natural de agua de 2 m de altura, que era la altura del dique de hormigón construido para dirigir el agua hacia la tubería.

Para la instalación de la bomba para su uso permanente se dispone de una represa ya construida, cuya altura es de 4 m. Esta represa debe ser reparada y calculada para soportar la presión del agua, además deben considerarse varios factores para su construcción, como la erosión producida por el río en la base de la represa, y la implantación de varios ductos para la correcta circulación del agua en exceso, para su mantenimiento y remoción de sedimentos y el ducto de succión del ariete hidráulico.

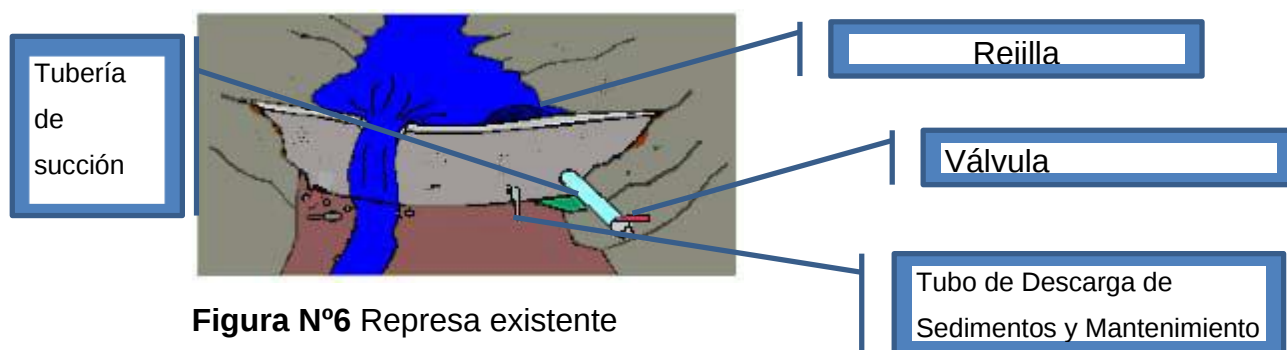


Figura N°6 Represa existente

2.6.2 Tubería Impulso

Se utilizó un tubo comercial de Acero Galvanizado de 1 ½". El diámetro se calculó y seleccionó en base al caudal medido en el río ($0.312\text{m}^3/\text{s}$) para la mayor altura posible de bombeo y según la magnitud del golpe producido, es decir, se calculó el golpe de ariete para varios diámetros y se seleccionó el más adecuado.

El material seleccionado se debe a tres factores esenciales:

- Debe ser lo más rígido posible para mantener la intensidad de la sobrepresión producida por el golpe.
- Debe ser un material comercial de fácil adquisición.
- El costo del mismo debe ser el menor posible debido al bajo presupuesto disponible.

2.6.3 Tubería de descarga

Para simular un sistema de tuberías de descarga, se instaló a la salida de la cámara de aire, una válvula de paso, tipo esfera, de $\frac{3}{4}$ ", con la cual se varía el caudal de salida y las pérdidas en la misma.

Para la instalación del sistema se puede utilizar tuberías comerciales de hierro o PVC y el funcionamiento del sistema no se verá afectado, pero se recomienda utilizar materiales poco rugosos, a fin de minimizar las pérdidas.

2.7 Instrumentos de Medición

Los instrumentos de medición nos permiten obtener una lectura manométrica que nos indique a cuanta presión está operando la bomba, así como nos permite deducir el estado del suministro del caudal.

2.7.1 Manómetro



El manómetro se seleccionó en base a la magnitud de la sobrepresión calculada. (Ver Anexo B). Se utilizó un manómetro cuya escala es de 0 – 230 psi y con intervalos de 10 psi, sin embargo para los valores de presión menores se utilizó un manómetro con escala de 0 – 80 psi e intervalos de 5 psi.

El roscado de las tuberías se realizará con medios propios por esa razón no se incluyen los precios

Capítulo III

3.1 Ensamblaje

El ensamblaje de la bomba se realizara por estudiantes de la carrera de mecánica o por nuestros estudiantes, objetivo que sale de este marco de trabajo.

Para el ensamblaje de la bomba, se deben armar los diferentes componentes, según los planos del anexo E. Entre cada pieza roscada, se coloca teflón y un sellador flexible para uniones roscadas, lo cual evitará la existencia de fugas. El ensamblaje es relativamente sencillo, pero debe tenerse la precaución de roscar todos los elementos correcta y firmemente, además se debe utilizar arandelas de presión al colocar los tornillos, pues la alta vibración puede producir el desarme de la válvula y el malfuncionamiento del sistema.

3.2 Instalación de Componentes del Sistema de Bombeo

3.2.1 Toma de Agua

Para las pruebas se utilizará una caída existente en el dique de 2,5 m, dirigirla hacia la tubería de impulso. El caudal se mantendrá siempre constante.

3.2.2 Bomba de Ariete Hidráulico.

La Bomba de Ariete Hidráulico debe ser instalada sobre una base con las siguientes características:

- Debe ser construida sobre suelo firme y estable que evite el movimiento bajo las condiciones de vibración a las cuales la Bomba opera.
- La bomba debe estar fijada a la base. La base debe poseer una estructura que permita dicho anclaje.
- Preferiblemente debe existir una estructura de acero dentro del suelo firme para evitar que ésta se quiebre.
- La bomba de Ariete y su base debe estar particularmente alineada con la tubería de suministro para evitar esfuerzos y pérdidas en la conexión.
- La superficie de la base de la bomba debe permitir el adecuado drenaje del agua de trabajo hacia el cause de la quebrada.
- Se recomienda la construcción de una caseta o reja protectora para albergar a la bomba, para evitar el contacto de animales con la bomba que puedan ocasionar daño al sistema o interrumpir su funcionamiento.

3.3 Puesta en Marcha.

3.3.1 Acciones Previas.

Una vez instalado el sistema, deben tomarse ciertas precauciones antes de encender la bomba:

- 1) Asegurarse de que todas las conexiones estén debidamente ajustadas.
- 2) Asegurarse que la bomba se encuentre sujeta firmemente a la base.
- 3) Asegurarse que las tuercas y tornillos de la válvula de impulso estén ajustadas.
- 4) Chequear que el canal de desagüe drene debidamente sin posibles escapes.
- 5) Chequear que la válvula de impulso abra y cierre efectivamente.
- 6) Manteniendo la válvula de impulso abierta, se abre la válvula de paso en la entrada de la tubería de suministro y luego en la entrada de la bomba, permitiendo la salida del agua a través de la válvula de impulso durante un minuto, esto con el fin de garantizar que la tubería de suministro esté llena de agua y no existe aire dentro de la misma.
- 7) Manteniendo llena la tubería de suministro y el cuerpo de la bomba con la válvula de impulso cerrada chequear que no existen escapes de agua a través de estos elementos.

3.3.2 Accionamiento del Sistema.

Para accionar el sistema se debe mantener la válvula de impulso abierta con la mano ejerciendo presión suficiente para esto. El agua fluirá más rápido a través de la abertura, luego debido a esto la válvula debe cerrarse súbitamente por sí misma. Cuando esto ocurre debe presionarse inmediatamente para reabrir la válvula, se sentirá un punto después de cerrar, en el cual la válvula abre fácilmente. Mantener ésta ayuda a la válvula durante varios ciclos y luego verificar que funcione normalmente sin ayuda.

3.3.3 Detención del Sistema.

Para detener el funcionamiento de la bomba, debe cerrarse la válvula de la tubería de suministro o mantener cerrada la válvula de impulso. El cierre de la válvula debe realizarse lentamente para evitar el golpe de ariete en la compuerta de la misma, lo que podría ocasionar daños a la misma.

3.3.4 Calibración de la Bomba.

La calibración de la bomba dependerá de la altura de bombeo y del caudal de suministro, debiéndose obtener el mayor caudal posible. Para obtener un mayor caudal se deben tener ciclos de bombeo rápidos, sin embargo la altura de bombeo determina la velocidad del ciclo, pues la disminución en el tiempo de cierre produce un aumento en la sobrepresión.

La calibración de la bomba de ariete busca optimizar los siguientes puntos:

- **Punto de Bombeo Máximo:** Cuando se dispone de suficiente agua de la fuente la calibración para un mayor servicio es la ideal. Esto coincide con una larga duración del ciclo de bombeo o una alta presión en la fuente, permitiendo una mayor velocidad del flujo de agua a través de la tubería de suministro y por ende una mayor energía disponible para el servicio. Sin embargo debe tomarse en cuenta que una mayor energía del fluido se traduce en un aumento de la probabilidad de falla de la bomba.
- **Punto de Eficiencia Máxima:** Cuando la cantidad de agua en la fuente es limitada, debe procederse a calibrar la bomba en el punto de eficiencia máximo, para tratar de aprovechar toda la energía disponible de la fuente. El punto de eficiencia máximo se logra cuando se utiliza un mínimo del caudal y carga de suministro, para bombear la mayor cantidad posible de agua y a una mayor altura.

La calibración de la válvula depende de las condiciones dadas por la fuente y el lugar. Para mayor caudal, la apertura de la válvula de impulso debe ser relativamente pequeña y la fuerza producida por el resorte debe ser menor, lo que se traduce en una reducción del tiempo del ciclo de bombeo.

En el caso de requerir mayor altura de servicio, la apertura de la válvula de impulso debe ser mayor, permitiendo un golpe de ariete más efectivo, es decir, un golpe de ariete de mayor energía al permitir un mayor aumento de la velocidad del flujo de agua en la tubería de suministro. La calibración para ambas situaciones se efectúa de la siguiente forma:

1. Si se desea un buen caudal y no mucha altura, se hace funcionar la bomba de modo que el tornillo eje esté lo más atornillado posible y el resorte lo menos rígido posible, de modo que el funcionamiento de la bomba sea rápido. Esta graduación dependerá de la altura de descarga y del caudal de suministro.
2. A medida que abrimos más la válvula (desatornillando el tornillo eje) y comprimimos el resorte se obtendrá un ciclo de golpes más lento, por lo que se tendrá un aumento en la sobrepresión, esto disminuye el caudal de descarga pero aumenta la altura de bombeo.

3.3.5 Mantenimiento

Periódicamente se debe vaciar el contenido de agua dentro de la cámara de aire para asegurar un adecuado volumen de aire dentro de la misma. Éste procedimiento debe realizarse a través de la válvula de mantenimiento, colocada entre la salida de la bomba y la tubería de descarga. Deteniendo el sistema, cerrando la válvula de la tubería de succión y cerrando la de la tubería de descarga, se abre la válvula de mantenimiento lentamente, liberando gradualmente el contenido de la cámara de aire. Luego de vaciada la cámara de aire, se cierra la válvula de mantenimiento y se revisan todos los elementos de unión y los de fijación (tornillos) percatándose de que estén bien apretados, luego se inicia el funcionamiento de la bomba.

El periodo de mantenimiento debe ser determinado por los usuarios de la bomba, dependiendo de las condiciones a las que esté sometida la bomba, es decir, si se observa una disminución en la presión de bombeo o en el caudal de descarga o incluso si se detiene el sistema.

3.4 Descripción de las Pruebas

Luego de instalar correctamente la bomba y los componentes del sistema, se pone en funcionamiento la misma. Puesto que se pretende determinar cuál es la máxima altura de bombeo dado una altura de caída, se selecciona el mejor resorte (de un grupo de tres) probándolos en la bomba con la válvula de descarga cerrada y obteniendo la mayor presión posible; la graduación de la válvula se hace como se indicó en la sección en el subtópico de calibración de la bomba.

1. Luego de determinar cuál es el mejor resorte se procede a anotar la máxima presión obtenida.
2. Se abre la válvula de descarga hasta hacer descender la presión indicada en el Manómetro.
3. Se determina el caudal de descarga, el que se pierde en la válvula de impulso, la presión y el número de ciclos por minuto (se repiten las mediciones 3 veces).
4. Se toman nota de los datos y se repiten los pasos 2 y 3, hasta obtener una cantidad de puntos adecuado para la graficación.
5. Se detiene la bomba y se repiten las pruebas anteriores desde la presión máxima (paso 1).

3.4.1 Cálculos Tipo

a) Para calcular h, procedemos según la Ec. (26)

$$b) h = \frac{P_4}{w} + z_4 - z_0$$

donde $z_0 = 3\text{m}$ y como no se utilizó un visor de nivel, se calculará teóricamente el valor z_4 , según la ecuación de los gases ideales.

Tomando como altura de la cámara de aire $H_1 = 0,75\text{m}$, se tiene que:

$$V_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{P_2}$$

$$V_1 = H_1 \times A$$

$$A = 3.1416 \frac{(0.075)^2}{4}$$

$$A = 3.1416 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$V_1 = 3.313 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$H_2 = \frac{V_2}{A}$$

$$H_2 = 0.429m$$

$$z_4 = H_1 - H_2$$

$$z_4 = 0.321m$$

$$h = 5.051m$$

c) De la Ec. (18) calculamos la Eficiencia Hidráulica,

$$e = \frac{P_p}{P_T} = \frac{Q_p w h}{Q_T w H} = \frac{Q_p h}{Q_T H}$$

$$e = \frac{12,9 \times 5,051}{36,44 \times 3} * 100$$

$$e = 59.6\%$$

d) Para obtener la razón de caudal bombeado respecto al utilizado por la bomba, calculamos la Eficiencia Volumétrica,

$$e_v = \frac{Q_p}{Q_T + Q_p}$$

$$e_v = \frac{12,90}{36,44 + 12,90} * 100 = 26,15\%$$

e) Las Eficiencias Hidráulicas teóricas son calculadas según la Ec. (45), para relaciones $(V_m/V_s)^2$ de 0,9, 0,7 y 0,5.

$$(V_m/V_s)^2 \text{ de } 0,9 \text{ , } 0,7 \text{ y } 0,5$$

$$e = \frac{5,06 \log\left(1 + 0,9 \frac{3}{5,06}\right)}{3 \times \log\left(\frac{1}{1-0,9}\right)}$$

$$e = 31.3\%$$

f) De la Ec. (14) tenemos, la tasa de energía mecánica usada para hacer funcionar la bomba:

$$P_T = 9800 \frac{kg}{m^2 s^2} \times 3m \times 36.44 \frac{L}{min} \frac{1L \times min}{60s \times 1000m^3}$$

$$P_T = 1.786 \times 10^{-5} W$$

g) De la Ec. (17) tenemos, la tasa de energía mecánica suministrada al fluido bombeado:

$$P_P = 9800 \frac{kg}{m^2 s^2} \times 5,06 \times 12,9 \frac{L}{min} \frac{1L \times min}{60s \times 1000m^3}$$

$$P_p = 1,066 \times 10^{-5} w$$

g) para calcular las pérdidas por fricción se utilizó la ecuación de Darcy-Weisbach,

$$h_f = f \frac{L}{D} \times \frac{V^2}{2g}$$

Donde: el factor de fricción f , fue calculado con la ecuación de Swamee,

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{k}{3,7 \times D} + \frac{5,74}{R^{0,9}}\right)\right)^2}$$

Con:

$K := 0.102 \text{ mm}$ $D := 0.01905 \text{ m}$ u $1.007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y V se calcula a partir de la ecuación de continuidad, para la descarga

$$f_0 = 0.037$$

$$hf_0 = 0.435 \text{ m}$$

h) Pérdidas por Entrada

$$\Delta H = K (V^2/2g)$$

Con $k=0.5$

i) La frecuencia de ciclos también fue calculada, según la Ec. (47), donde

$$V_3^2 = 2gH/M$$

y M se calcula según la ecuación siguiente, con $K_e=0,5$ y $K_d=1$

$$M = \left(\frac{A}{A_3}\right) + f \frac{L}{D} + K_e + K_d$$

Los resultados se realizaron en hojas de cálculo Excel, se muestran a continuación, así como las graficas para un mejor análisis de los procesos ocurridos en el cierre y apertura de la válvula.

3.4.2 Tablas y graficas

A continuación se exponen las tablas de resultados obtenidos así como las gráficas necesarias de los parámetros más fundamentales de la bomba a tener en consideración.

Tabla: 3.4 Cálculos de las presiones teóricas a obtener contra la altura

Presión	Z4	h	en	ev	ht	he	Z estimado	Pt	Pp
mca	m		(%)		(m)			(W)	
7,74	0,32	5,06	59,76	26,15	0,435	1,45E-02	7,61	17,87	10,68
8,44	0,34	5,78	61,64	24,23	0,325	9,65E-03	8,45	16,15	9,95
10,55	0,38	7,94	64,26	19,54	0,288	6,66E-03	10,64	17,66	11,35
10,55	0,38	7,94	56,01	17,48	0,216	4,87E-03	10,71	17,31	9,7
14,07	0,43	11,51	54,42	12,53	0,147	2,32E-03	14,36	17,84	9,71
14,78	0,44	12,22	58,32	12,52	0,124	1,81E-03	15,09	15,61	9,11
17,59	0,47	15,07	48,87	8,87	0,089	1,02E-03	17,98	17,27	8,44
20,41	0,5	17,91	46,19	7,18	0,058	5,03E-04	20,85	15,63	7,22
25,33	0,53	22,87	28,74	3,63	0,024	1,44E-04	25,84	16,74	4,81
28,85	0,55	26,41	29,77	3,27	0,018	8,54E-05	29,39	14,36	4,27
31,66	0,57	29,24	20,4	2,05	0,009	3,38E-05	32,23	14,6	2,98
38,70	0,59	36,3	8,45	0,69	0,0021	3,67E-06	39,3	14,42	1,22
40,81	0,6	38,42	7,27	0,56	0,0018	2,76E-06	41,42	15,37	1,12

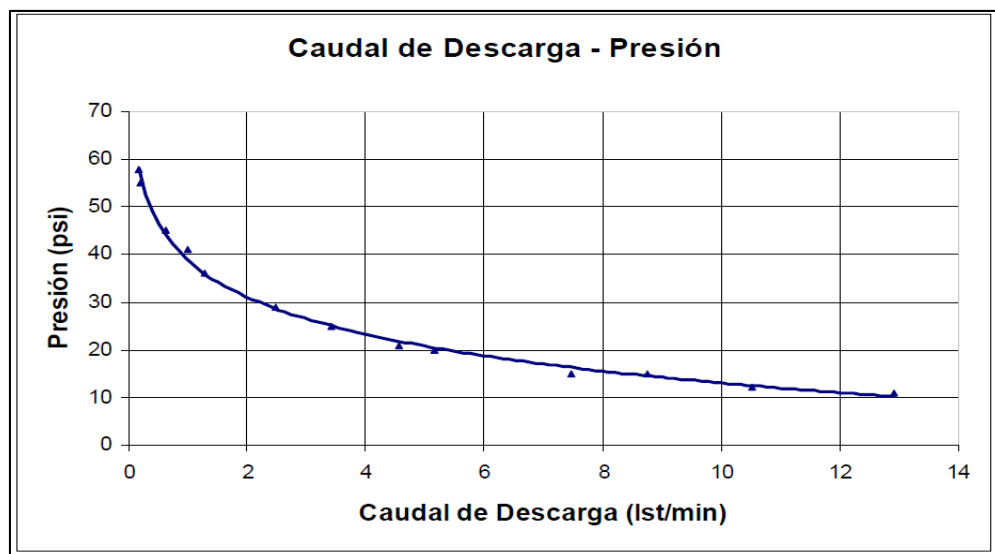
Tabla: 3.5 Cálculos de la eficiencia a obtener según presión obtenida teóricamente

Presión	Eficiencia Teórica	Eficiencia Teórica	Eficiencia Teórica
mca	Vm/Vs =0,9 %	Vm/Vs =0,7 %	Vm/Vs =0,5 %
7,74	39,84	63,89	81,04
8,44	40,72	64,84	81,71
10,55	42,55	66,76	83,04
10,55	42,55	66,76	83,04
14,07	44,25	68,48	84,19
14,78	44,48	68,72	84,34
17,59	45,22	69,44	84,81
20,41	45,74	69,94	85,13
25,33	46,35	70,53	85,51
28,85	46,66	70,82	85,69
31,66	46,85	71,00	85,81
38,70	47,21	71,34	86,02
40,81	47,29	71,41	86,06

A continuación se exponen las diferentes gráficas y curvas obtenidas mediante el uso del Excel.

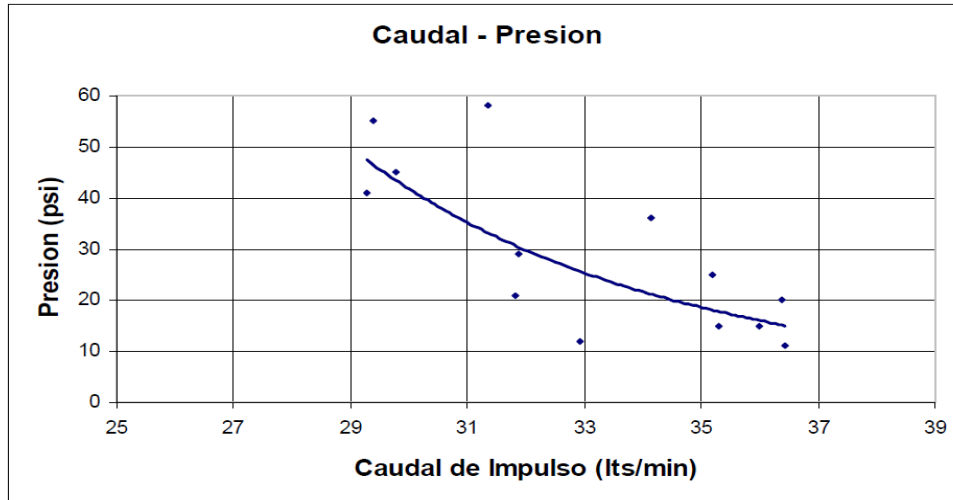
3.3.8 Análisis de Resultados

De los datos obtenidos y las gráficas se pueden deducir los siguientes puntos de discusión:



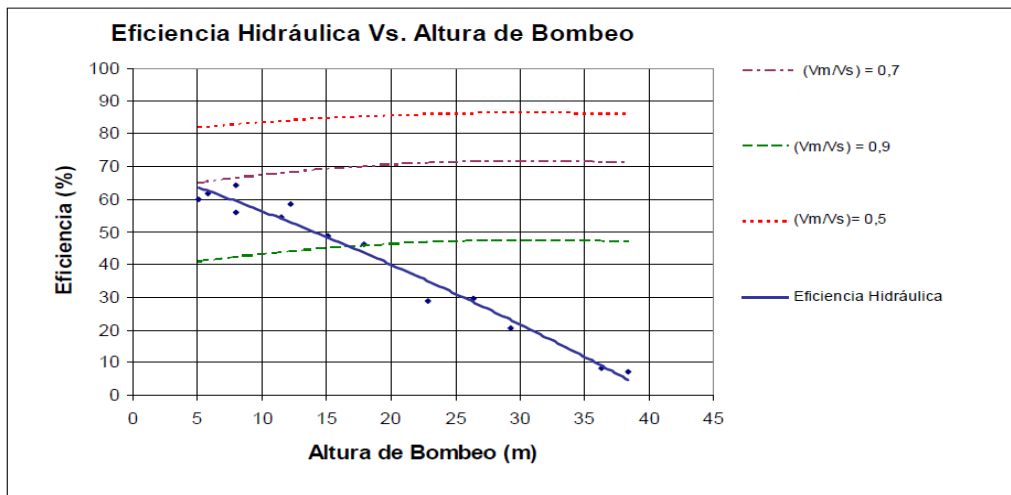
Gráfica: 1 Caudal de descarga & Presión

1. El caudal de descarga aumenta al disminuir la presión en la cámara de aire (se disminuye la altura de bombeo), ya que el golpe de ariete es menor. Al ser menor la altura de bombeo, la frecuencia de ciclo es mayor, debido a que la energía necesaria para desplazar fluido desde la tubería de impulso a través de la válvula de descarga es menor y este aumento de frecuencia aumenta el caudal.



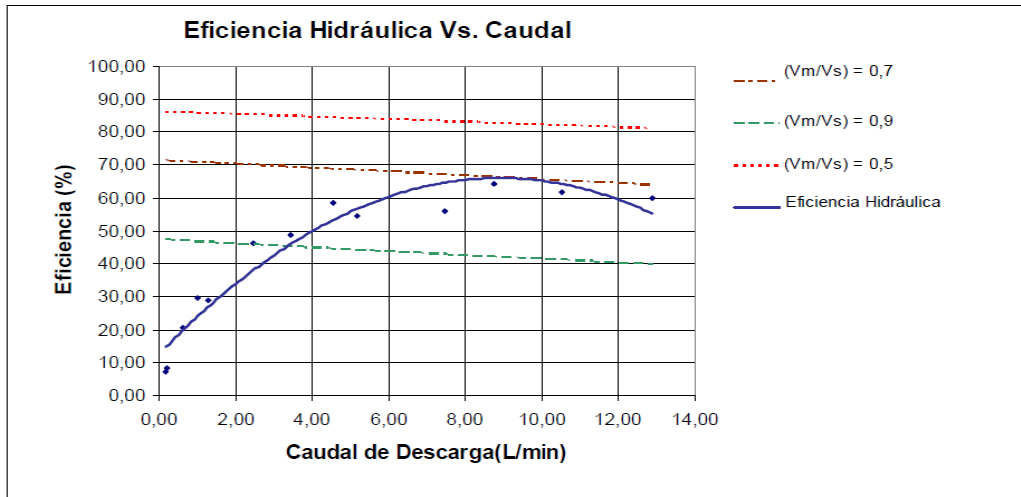
Gráfica: 2 Caudal de impulso & Presión

2. El caudal de impulso se ubicó en un rango muy reducido, aunque se observó una pequeña tendencia hacia el aumento al disminuir la presión en la cámara de aire.



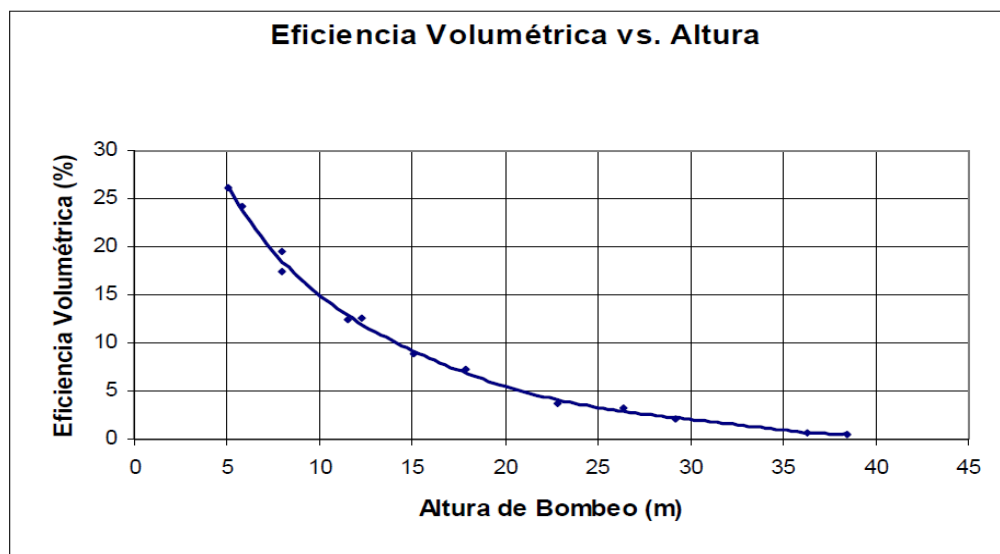
Gráfica: 3 Eficiencia hidráulica de la bomba & altura de bombeo

3. Aquí vemos como varia la eficiencia de la bomba con respecto a la altura siendo el valor máximo de 5 m para una eficiencia aproximada del 64.5% y en consecuencia la disminución de la eficiencia para la altura proyectada de 6 m sería de un 60%, si se varia la altura del tanque de descarga la bomba seria menos eficiente entregando un menor caudal.



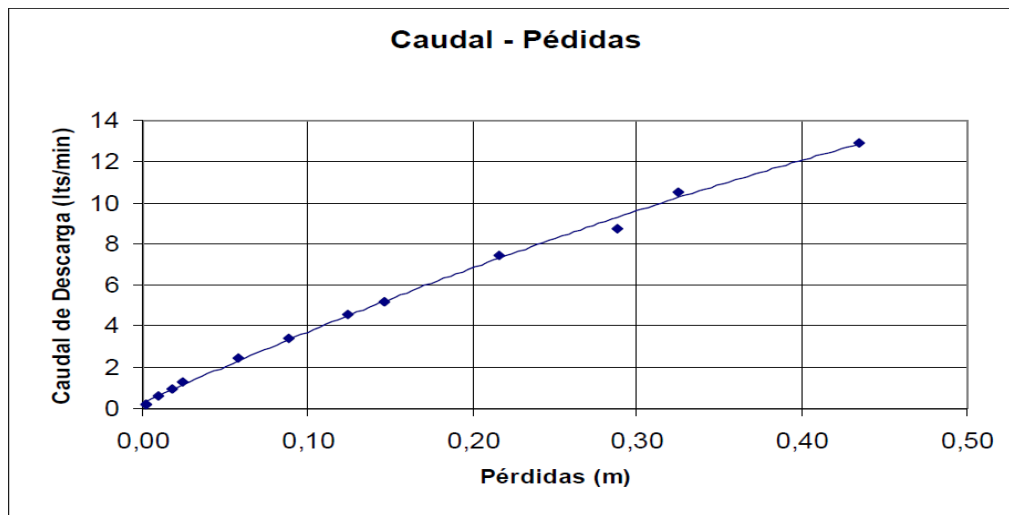
Gráfica: 4 Eficiencia hidráulica & Caudal

4. Efectivamente se observaron curvas de eficiencia relativamente diferentes a las esperadas teóricamente, sin embargo se puede deducir de estas gráficas que el diseño de la bomba es para bajas alturas de bombeo y altos caudales, pues la eficiencia cae notablemente con el aumento de la altura (disminución del caudal). Se observan eficiencias superiores a 55% con caudales de entre 7 y 13 lts/min y cuyas alturas llegan a los 15 m.



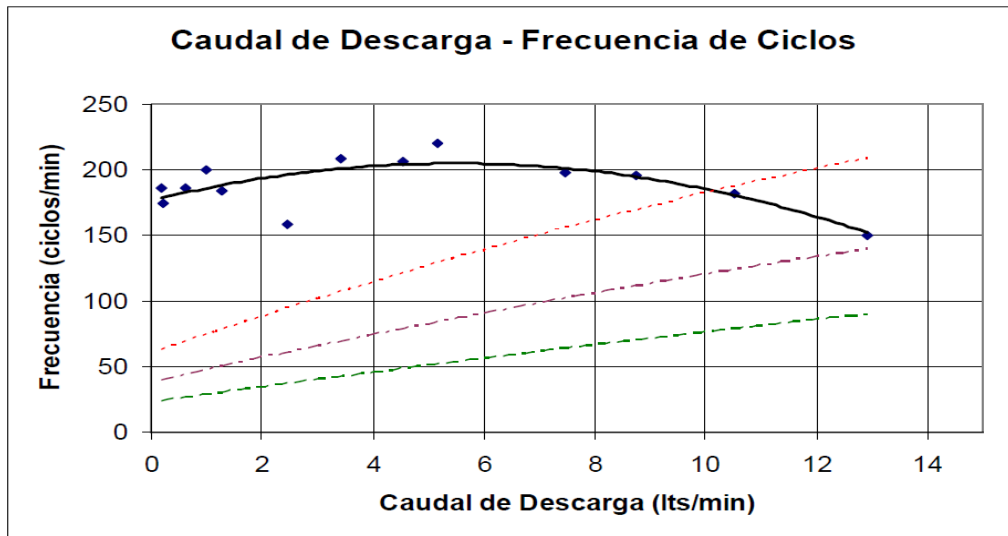
Gráfica: 5 Eficiencia volumétrica & Caudal

La eficiencia de la bomba considerada de un 22.5% disminuirá a medidas que aumente la altura de bombeo lo que se presume que haciendo los ajustes necesarios y recomendados al sistema se pueden alcanzar alturas considerables, aunque notablemente con poca eficiencia.



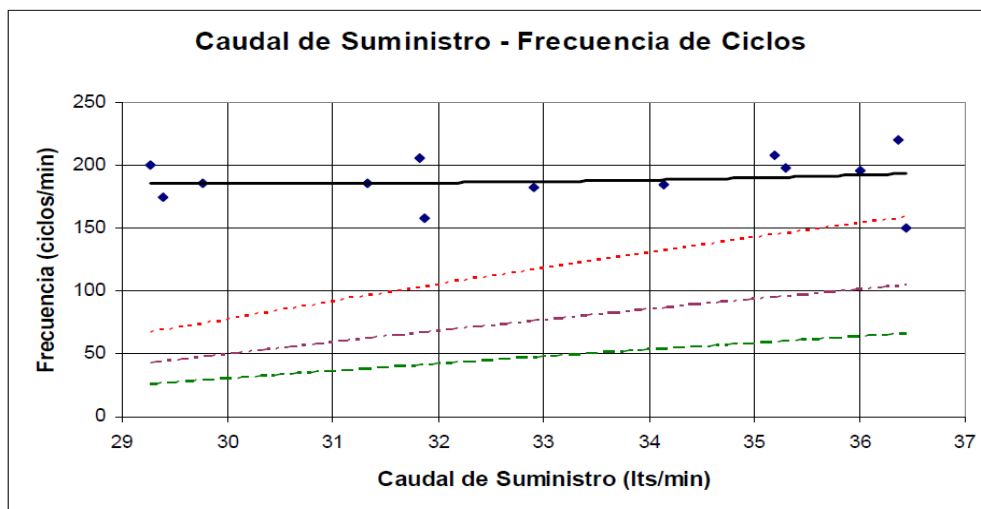
Gráfica: 6 Pérdidas & Caudal

6-Las pérdidas deben ser minimizadas al mínimo, mediante la utilización de materiales y diseños adecuados, sin embargo la necesidad de utilización de elementos comerciales y económicos produjo las pérdidas de descarga observados en el gráfico N° 6, los cuales aumentan con el caudal de descarga, es decir, con la disminución de la altura. Esto ocurre debido a que al aumentar la altura de bombeo se tienen caudales, y consecuentes velocidades, menores en el fluido transportado.



Gráfica: 7 Caudal de descarga & Frecuencias de ciclos

La frecuencia de ciclos se mantuvo relativamente constante respecto a los caudales de suministro y descarga, aunque según las curvas teóricas esta frecuencia debía aumentar con los caudales. El gran flujo de agua disponible, la poca longitud de tubería y el hecho de tener un tornillo eje muy corto influye en el hecho de obtener altas frecuencias de golpe, esto es beneficioso respecto a la eficiencia, pues aumenta el caudal bombeado a su máximo, sin embargo si se desean altas alturas de bombeo la frecuencia debe disminuir.



Gráfica: 8 Caudal de suministro & frecuencias de ciclo

Como podemos observar si el suministro de agua no varía la frecuencia de ciclos se mantendrá constante, lo que presupone un buen desempeño de la bomba.

La máxima presión alcanzada fue de 110 psi, equivalente a 77 m.c.a, lo que se Presume que haciendo los ajustes necesarios y recomendados al sistema se pueden alcanzar alturas considerables, aunque notablemente con poco caudal.

Conclusiones

- La alta frecuencia de ciclos produce una disminución de la sobrepresión producida por el golpe.
- La frecuencia de ciclos está directamente relacionada con la longitud del tornillo Eje de la válvula de impulso.
- Las altas frecuencias de ciclo son producidas por la Corta longitud del tornillo eje utilizado (que es inferior al diseñado).
- La alta frecuencia de ciclos está directamente relacionada con la baja relación L/D de la tubería de succión.
- A medida que exigimos mayor altura en la descarga de la bomba (mayor presión de descarga), se bombea menos agua, ya que por menos tiempo se abre la válvula de retención.
- Se obtuvieron buenos rendimientos y muy bajos costos de fabricación, lo que hace competitivo nuestro diseño frente a otros sistemas similares vendidos comercialmente.
- Mientras mejor se fije la bomba para evitar vibraciones, se reduce las pérdidas de energía por disipación.
- Con elementos accesibles en la zona se puede construir a un costo de \$2000, una bomba de ariete con excelente prestación, que incluye la bomba y todos sus componentes, incluyendo el filtro, elemento esencial para su funcionamiento.

Recomendaciones

- Para el mejoramiento del sistema de bombeo de agua se plantea la instalación de dos o más bombas con capacidad para elevar el caudal requerido a una altura mayor permitiendo esto el mejoramiento del caudal de salida del tanque.
- El caudal sustraído del río, debe ser previamente determinado mediante un estudio hídrico, geológico y de la cuenca, para evitar causar daños ecológicos, como la disminución de la vegetación o la fauna de la zona.
- Este sistema de bombeo planteado se debe utilizar en las demás instalaciones de la UCLV para disminuir el gasto de corriente eléctrica o de combustible (diesel)
- Esta alternativa se debe evaluar en localidades donde se pueda instalar para el bombeo de agua para consumo humano.
- Es aconsejable colocar una válvula de cierre a la salida del dique con acoples rápidos, para evitar la pérdida de agua disponible en el dique por mantenimientos generales aguas abajo del mismo. También es necesario inspeccionar los filtros con frecuencia, para así evitar obstrucciones significativas que repercutirán directamente en el caudal de alimentación de la bomba y su rendimiento.
- Un tema de suma importancia es que el filtro siempre este sumergido a por lo menos 0,50 m debajo del nivel del tajamar. Esto facilita que una vez que la válvula cierra el caudal por el golpe de ariete esta pueda caer libremente.
- No colocar ningún tipo de cierre automático o flotador de cierre en el depósito elevado debido a que la bomba puede ocasionar una sobrepresión peligrosa.
- Para evitar el robo o vandalismo es recomendable ubicar la bomba de ariete dentro de una estructura enrejada, con candados o elementos que eviten la sustracción de algún elemento.

Referencias Bibliográficas

1. Wylie E.BENJAMÍN, V.S., *Fluid Transients*. 1978, Nueva York.: McGraw Hill.
2. Victor .L Streeter, E.B.W., Keith W Bedford, *Mecanica De Los Fluidos*. Novena Edicion ed. Vol. 1. 2013, La Habana Cuba Editorial Universitaria Felix Varela 740.
3. W.D.James, D.R.F., Harleman, *Dinámica de los Fluidos* 5ta Edicion ed. 2011, Mexico.
4. H.Shames, I., *Mecánica de los Fluidos*. 3ra Edicion ed. Vol. 2. 2012, USA: Mc Grau Hill. 699-715.
5. LIFEWATER. *Designing a hydraulic ram pump*. Available from: www.Lifewater.org.
6. Mendez, M.V., *Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua*. 3 Edición ed. 2011, Caracas.
7. COMPANY, T.R. *Pumping Water Without Electricity*. Consultada día20 de enero 2016]; Available from: www.Theramcompany.com.
8. Parkmaki, J., *Waterhammer Analysis*. 2011, NY U.S.A.: Dover Publications Inc.
9. IVERSEN, H.W. and Engineering, *An Analysis of the Hydraulic Ram*. Journal of the Fluids, Junio de 1995: p. Pag. 191-196.
10. Mendez, V., *Tuberías a Presion* 2009. p. 7-28.
11. Dominguez, A.M., *apuntes de Mecánica de los Fluidos*. 2009, CC-BY-SA: España. p. 65-68.
12. Igor J. Karassik, J.P.M., Paul Cooper, *Pump Handbook*, McGRAW-HILL, Editor. 2005: New York. p. 1195.
13. INRH, *Levantamiento topográfico al Jardín Botánico de la UCLV*. 2012, IPH: Villa Clara.
14. (NC), O.N.d.N., *Calidad de Agua Para Preservar El Suelo- Especificaciones* in 1048. 2014, Cuban National Bureau Of Standards: La Habana Cuba. p. 16.
15. INRH, *Normas de riego, Indices de consumo, Eficiencia de aplicación* in Resolución 21/1197. 2007, Cuban Standards Bureau Habana.
16. ASTM, *Aceros estructurales para construcción de tuberías*, in 2. 2001, American Society for Testing and Materials USA.

Anexos

Nomenclatura Utilizada

A = Área transversal del tubo (m^2).

a = Velocidad de la onda de presión (m/s)

C_1 = Factor de Colocación de Tubería (Adimensional)

D = Diámetro de Tubería (m)

E = Módulo de elasticidad del material del tubo (N/m^2).

e = Ancho de la pared del tubo (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

H = Altura en la Succión (m).

h = Altura de Descarga (m)

H_a = Elevación de la presión (m)

K = Módulo de elasticidad volumétrica del agua (N/m^2)

L = Longitud de la tubería. (m)

P_T = Energía Mecánica en la tubería de Impulso (Joule)

P_p = Energía Mecánica en la tubería de Descarga (Joule)

Q_p = Caudal en la Descarga (m^3/s)

Q_T = Caudal en la Succión (m^3/s)

t = Tiempo (seg)

V = Velocidad (m/s)

V_m = Velocidad media (m/s)

w = Peso específico del agua (N/m^3).

Z_1 = Altura piezométrica a la entrada del tubo (m)

α = Ángulo de inclinación de la tubería

$\Delta\sigma_1$ = Esfuerzo Longitudinal en la pared del tubo (N/m^2)

$\Delta\sigma_2$ = Esfuerzo Circunferencial en la pared del tubo (N/m^2)

η = Eficiencia del Sistema (Adimensional)

μ = Coeficiente de Poisson del material de las paredes del tubo (Adimensional)

ANEXO B

Materiales: Propiedades

- Acero Inoxidable AISI 304

Dureza Brinell -160

Resistencia a la Tracción: 50-70 kg/mm²

Límite de Fluencia: >19 kg/mm²

Resiliencia (DVM): 15kg/cm² Longitudinal

Alargamiento: >50% (L=5d) Longitudinal

Densidad: 7,9 gr/cm³

- Acero Inoxidable AISI 316

Dureza Brinell: 120

Resistencia a la Tracción: 46-71 kg/mm²

Límite de Fluencia: >20 kg/mm²

Resiliencia (DVM): 20kg/cm² Longitudinal

Alargamiento: >45% (L=5d) Longitudinal

Densidad: 7,95 gr/cm³

- Acero Galvanizado

Módulo de elasticidad: E = 207 GPa

- Cobre

Módulo de elasticidad: E = 119 GPa

- Hierro

Módulo de elasticidad: E = 100 GPa

Anexo C

embalse	análisis	Abril	meq/L	OK	
Rio Ochoa	pH	8,25			
	Temp.				
	DBO ₅				
	O ₂ disuelto				
	Turbidéz				
	Color				
	Olor y sabor				
	Grasas				
	STD				
	NO ₂	0			
	F				
	Ca	1,9	0,10		
	Fe				
	Mn				
	Cu				
	Mg	2,8	0,23		
	SO ₄	0,18	0,00		
	Zn				
	Ag				
	CT				
	CF				
	CO ₃	0,3	0,01		
	HCO ₃	281	4,61		
	Cl	0,7	0,02		
	Na	0,95	0,04		
	K	0,03	0,001		
	DQO				
	NO ₃	0,09			
	NH ₄	0			
	PO ₄				
	CE	680			
	B	0,2			
	Riego			Calcio(Ca)	0,10
	Suma aniones = CO ₃ + HCO ₃ + Cl + SO ₄		4,640	Sulfato(SO ₄)	0,00
	Suma cationes = Ca + Mg + Na + K		0,370		
	Suma de iones = aniones + cationes		5,011		

CO ₃ + HCO ₃ + SO ₄			4,620		
CO ₃ + HCO ₃			4,617		
% CO ₃ + HCO ₃			99,49		
Ca + Mg			0,328		
CE			680		
SE			-4,246	Buena	SE = (C)
SP			0,022	Buena	
CSR			1,228	Buena	
PSP			-1	Condicionada	
B			0,200	Buena	
Cl			0,020	Condicionada	

Donde según la norma

	meq/l		
	Buena	Condicionada	No recomendable
SE	< 3,0	3,0 a 10,0	> 10,0
SP	< 3,0	3,0 a 15,0	> 15,0
CSR	< 1,25	1,25 a 2,50	> 2,50
PSP	< 50 %	> 50%	
B	< 0,3	0,3 a 4,0	> 4,0
Cl	< 1,0	1,0 a 5,0	> 5,0