

ANÁLISIS DEL ARIETE HIDRÁULICO PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES

CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO

GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2012

ANÁLISIS DEL ARIETE HIDRÁULICO PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES

CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO

GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ

Trabajo de Grado para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Director

Ing. JABID EDUARDO QUIROGA

Magister, Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2012

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las personas que con su aporte ayudaron a la realización de este proyecto de grado.

A los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica que fueron los constructores del conocimiento adquirido para su aplicación en este proyecto.

Al Ingeniero Jabid Quiroga como director de este proyecto por sus aportes y recomendaciones para su realización.

DEDICATORIA

A Dios por darme la oportunidad de vivir y sentir lo grande de la vida desde los momentos de tristeza o preocupación hasta la felicidad por los logros alcanzados.

A mis padres que siempre han dado todo lo mejor para que mi vida sea llena de conocimiento y valores, que siempre dieron su esfuerzo por darme el estudio y la capacidad para tener un futuro mejor.

A mí querida Liliana porque gracias a ella tuve las fuerzas para seguir en el duro aprendizaje de mi carrera profesional, por su acompañamiento y apoyo en todos los momentos difíciles de mi vida.

A mis amigos y todas las personas que con su aporte me hicieron crecer como persona y avanzar en el mundo de la ingeniería.

CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO

A Dios por ser gestor de mi vida y conductor de mi porvenir, padre sagrado que siempre estuvo, está y estará a mi lado llenándome de bendiciones.

A mis padres, Mario y Rosaura, quienes siempre apoyaron mi formación académica, social y espiritual, logrando hacer de mí una persona con principios y valores.

A mi amada Nury Yurley, apoyo incondicional en prácticamente toda mi vida académica, acompañándome y dándome aliento en cualquier falencia de esta etapa de mi vida.

A mi suegra Ema Ofelia, mi segunda madre, persona que me apoyo en todo sentido, colaborando así con mi formación.

A mis amigos, especialmente a mi hermano quienes siempre estuvieron a mi lado.

GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES	19
1.1 ANÁLISIS DEL FENÓMENO PRINCIPAL. EL GOLPE DE ARIETE.....	19
1.1.1 Golpe de Ariete	19
1.1.2 Propiedades Físicas del fluido de trabajo.....	23
1.1.3 Velocidad de la Onda de Presión	26
1.1.4 Sobrepresión debida al Golpe de Ariete.....	27
1.2 GENERALIDADES DE UN ARIETE HIDRÁULICO	29
1.2.1 Cuerpo del ariete.....	32
1.2.2 Válvula de impulso	35
1.2.3 Válvula de descarga.....	35
1.2.4 Cámara de Presión	36
2. FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.....	38
2.1 Montaje del ariete en el sistema de bombeo.	38
2.2 Funcionamiento del ariete hidráulico.	38
3. ANÁLISIS DEL FENÓMENO.....	44
3.1 MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN.....	44
3.2 ANÁLISIS TEÓRICO	46
4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LOS PROTOTIPOS.....	47
5. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS Y DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS DEL EXPERIMENTO.	55
5.1 BANCO DE PRUEBAS.....	55
5.2 PROCEDIMIENTO PARA TOMA DE DATOS	57
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES.....	59
6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	59
6.1.1 Constante elástica del resorte de la válvula de impulso.	59
6.1.2 Volumen del acumulador.....	61

6.1.3	Combinación de las áreas de las válvulas descarga e impulso.....	63
6.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS	68
6.2.1	Análisis de la influencia de la constante del resorte de la válvula de impulso.....	68
6.2.2	Análisis de la influencia de la válvula de impulso en la eficiencia total del sistema.....	69
6.3	Análisis de funcionamiento en campo.	70
7.	CONCLUSIONES.....	72
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.	19
Figura 2. Cierre instantáneo de una válvula al final de una tubería que sale de un depósito.	21
Figura 3. Sistema de arietes hidráulicos en paralelo.	30
Figura 4. Dos arietes hidráulicos colocados en serie.	31
Figura 5. Esquema de tipos de cuerpo de ariete.	33
Figura 6. Montaje del sistema de bombeo.	38
Figura 7. Apertura de válvula de alimentación.	39
Figura 8. Aceleración del agua en la válvula de impulso.	39
Figura 9. Cierre de la válvula de impulso.	40
Figura 10. Apertura de la válvula de descarga.	41
Figura 11. Reducción de la sobrepresión.	41
Figura 12. Cierre de la válvula de descarga.	42
Figura 13. Inicio del ciclo siguiente.	43
Figura 14. Cuerpo del ariete.	49
Figura 15. Válvula típica de impulso.	50
Figura 16. Válvula típica de descarga.	52
Figura 17. Esquema Banco de Pruebas.	55
Figura 18. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades físicas del agua.	25
Tabla 2. Tabla inclusión de datos experimentales.	58
Tabla 3. Análisis Duncan para los resultados de los resortes.	60
Tabla 4. Análisis Duncan para los resultados de acumuladores.	62
Tabla 5. Análisis Duncan para válvula D 25.	64
Tabla 6. Análisis Duncan para válvula D 40.	65
Tabla 7. Análisis Duncan para válvula D 50.	67

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TEÓRICO CON LAS MODIFICACIONES REALIZADAS.	75
ANEXO B. PROGRAMA PARA ANÁLISIS TEÓRICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.	92
ANEXO C. PLANOS VÁLVULAS DESCARGA E IMPULSO.	96
ANEXO D. ARTÍCULO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.	98

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL ARIETE HIDRÁULICO PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES*

AUTORES: GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ.
CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO**.

PALABRAS CLAVES: Ariete hidráulico, energía alternativa, velocidad del agua, carrera de válvula, golpe de ariete, sobrepresión.

DESCRIPCIÓN:

La investigación realizada en esta tesis busca determinar la influencia de algunos parámetros presentes en el funcionamiento del ariete hidráulico para obtener un mejor rendimiento y aprovechar al máximo su capacidad como sistema de bombeo y aplicación de la energía alternativa. La investigación abarca dos procedimientos uno experimental y otro teórico que determinarán la influencia del resorte de la válvula de impulso, el acumulador y la combinación de las áreas de la válvula de descarga y de impulso en la eficiencia total del sistema, incluyendo como parámetro principal la carrera de la válvula de impulso que determina la frecuencia de los pulsos en el funcionamiento del ariete hidráulico.

El análisis teórico se lleva a cabo mediante un programa realizado en la plataforma de MATLAB basado en un modelo teórico que permite relacionar las variables presentes en el funcionamiento del ariete y determinar su influencia en la eficiencia sistema. El análisis experimental se realiza con la construcción de modelos de ariete hidráulico que permitan variar los parámetros que se quieren analizar y mediante un diseño de experimentos comprobar la influencia en el comportamiento del sistema de bombeo por ariete hidráulico.

Posteriormente se hace una comparación de los resultados experimentales y teóricos para determinar la relación que tiene cada uno de los parámetros con respecto a estos dos métodos de análisis y concluir cómo afectan en la operación del ariete hidráulico.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Quiroga

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE HYDRAULIC RAM FOR DIFFERENT CONFIGURATIONS*

AUTHORS: GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ.
CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO**.

KEYWORDS: Hydraulic ram, alternative energy, water velocity, valve stroke, water hammer, pressure.

DESCRIPTION:

The research conducted in this thesis seeks to determine the influence of some parameters in the operation of the hydraulic ram for better performance and maximize their capacity as pumping system and implementation of alternative energy. The research covers two procedures experimental and theoretical one that will determine the influence of the valve spring pulse, the accumulator and the combination of the areas of the discharge valve and the pulse in total system efficiency, including as the main parameter the stroke of the valve of pulse which determines the frequency of the pulses in the operation of the hydraulic ram.

The theoretical analysis is carried out using a program developed in MATLAB platform based on a theoretical model that relates the variables present in the operation of the ram pump and determine their impact on system efficiency. The experimental analysis is performed by building models which allow hydraulic ram to vary the parameters to be analyzed and with a design of experiments to test the influence on the behavior of the system by pumping hydraulic ram.

Subsequently, a comparison of the experimental and theoretical results to determine the relationship of each of the parameters on these two methods of analysis and conclude how they affect the operation of the hydraulic ram.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Jabid Quiroga

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la investigación sobre las energías renovables se ha convertido en un tema de mucha importancia dadas las circunstancias por las que atraviesa nuestro planeta, el uso de las fuentes “inagotables” de energía ha llamado la atención de un sinnúmero de investigadores del mundo entero, por esta razón en los últimos años han descubierto o demostrado las formas en las que se pueden aprovechar recursos como la energía solar, la fuerza y velocidad del viento, la energía de la biomasa, la geotermia y la energía hidráulica.

Muchas de estas formas de energías son en realidad nuevas, o que han surgido en los últimos años, pero existe un artefacto mecánico que fue inventado para el aprovechamiento de la energía hidráulica que data del año 1796 cuando Joseph Montgolfier (1749-1810) decidió investigar sobre el “ariete Hidráulico”, una máquina que aprovecha únicamente la energía de un pequeño salto de agua para elevar parte de su caudal a una altura superior. A partir de su invención, el ariete hidráulico tuvo una amplia difusión por todo el mundo. Basta decir, a modo de ejemplo, que estuvo presente en las famosas fuentes del Taj Mahal en la India, o en el Ameer de Afganistán. Con el tiempo cayó en desuso, sobre todo debido al avance arrollador de la bomba centrifuga. En la actualidad asistimos a un renacer del interés acerca de este aparato debido a que es tecnológicamente accesible, eficiente, ecológico y muy didáctico.

Un ariete hidráulico es una máquina que por medio de un trabajo sinérgico logra aprovechar la energía de una corriente de agua para elevar parte de su caudal a una altura mucho mayor que la de abastecimiento, es un conjunto de elementos con formas y funciones únicas, los cuales cumplen su labor generando un ciclo de bombeo, es decir, mientras unos elementos están en su posición original, los otros se encuentran realizando una labor, luego de este instante los papeles se intercambian y así sucesivamente generando ciclos o “pulsaciones de bombeo”,

por esta razón es de interés realizar una investigación sobre la importancia de cada elemento que compone un ariete hidráulico, concluir sobre su relevancia dentro del sistema, abordar sobre su forma, el material utilizado y la facilidad de adquisición y manufactura de estos dentro del mercado actual en Colombia.

El análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones comprende el estudio detallado y experimental de sus componentes, las distintas configuraciones se logran variando en alguna medida la forma o dimensión de algunas piezas internas, logrando así desempeños diferentes en el sistema de bombeo, en este trabajo se intentará concluir la combinación de elementos más adecuada para satisfacer las necesidades hídricas de alguna población que por motivos económicos o de ubicación territorial no cuenten con el servicio de energía eléctrica.

Para lograr estos objetivos, primero se tendrán en cuenta investigaciones anteriores sobre el tema, de estos trabajos se tomaran los avances obtenidos y después de analizar estos datos se iniciará un proceso de construcción de un modelo para la realización de pruebas, para la construcción de este modelo se abordará elemento por elemento, decidiendo así su forma y dimensiones para que cumpla sin ningún impedimento su función.

El aporte de este trabajo es determinar la influencia de los cuatro componentes principales del ariete hidráulico como lo son el cuerpo del ariete, la válvula de desfogue (o de impulso), la válvula de retención (o de descarga) y el acumulador (o cámara de presión).

De la experimentación se obtendrán gráficas del funcionamiento de un ariete hidráulico, las cuales se compararán con las obtenidas usando un modelo matemático del ariete.

1. GENERALIDADES

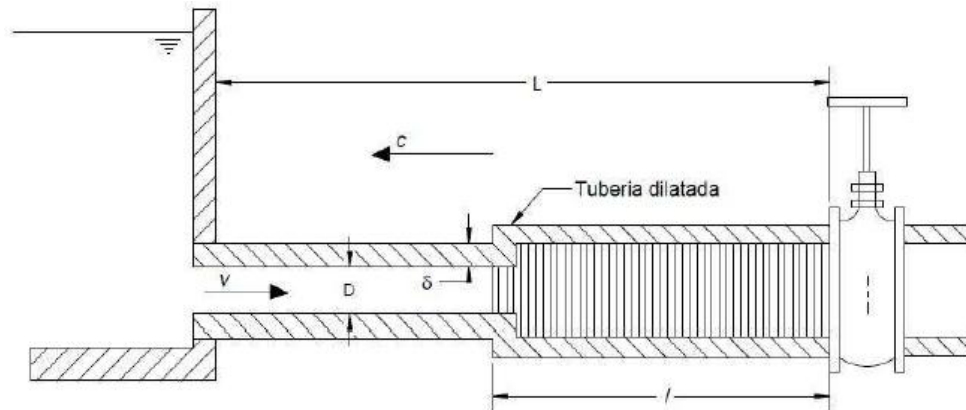
1.1 ANÁLISIS DEL FENÓMENO PRINCIPAL. EL GOLPE DE ARIETE.

1.1.1 Golpe de Ariete²

El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible.

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente el caudal.

Figura 1. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.



“c” es la velocidad de propagación de la onda y v la velocidad del fluido. La tubería se dilata (o se contrae) al avanzar la onda de presión (o de depresión).

² MATAIX, CLAUDIO. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas, Ediciones del Castillo S.A. 1986.

La figura 1 muestra una tubería de longitud L , espesor δ y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un embalse y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última: se ha producido una sobrepresión, o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

Explicación del fenómeno.

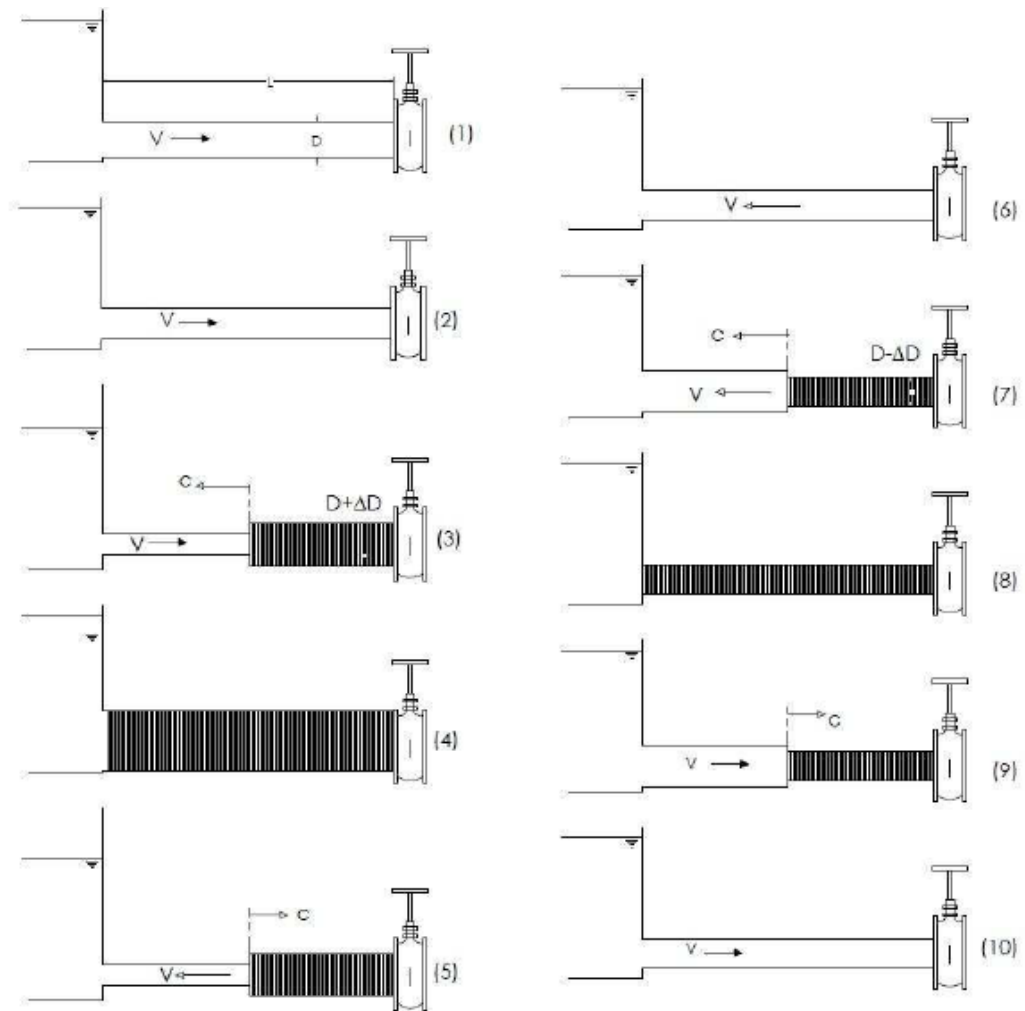
Es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente por eso el estudio se realiza mediante la asunción de un cierre instantáneo de la válvula.

Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la figura anterior y si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, como la 1, 2, 3 y 4 sucesivamente, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc., necesitando un cierto tiempo. Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con velocidad c , la cual en un instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad v del fluido.

Siendo c la velocidad de la onda y L la longitud de la tubería, el tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y el embalse es $t_0 = L/c$. al cabo de un tiempo $T = 4t_0 = 4L/c$ el ciclo se repite.

Consideremos en la figura 2 la serie de acontecimientos en la tubería durante un periodo $T = 4L/c$.

Figura 2. Cierre instantáneo de una válvula al final de una tubería que sale de un depósito.



1°. *No hay perturbación.* Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad v del embalse a la válvula. Diámetro de la tubería normal.

2°. *Tiempo 0.* La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería.

3°. Tiempo $t_0/2 = 1/2 L/c$. 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 sobrepresión. Mitad izquierda, diámetro normal. En esta mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha $v=0$.

4°. *Tiempo $t_0 = L/c$* . La onda de presión ha llegado al embalse. En toda la tubería el líquido está en reposo, $v=0$, pero no en equilibrio. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se expande, el agua en la tubería comienza a moverse con velocidad v , pero dirigida en sentido contrario al anterior. El líquido empieza a ponerse en movimiento comenzando, por decirlo así, por las rodajas contiguas al estanque.

5°. *Tiempo $3/2 t_0 = 3/2 L/c$* . 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 .

6°. *Tiempo $2 t_0 = 2L/c$* . Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el embalse con velocidad v , o sea en dirección contraria a la de las figuras 1, 2 y 3. 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.

7°. *Tiempo $5/2 t_0 = 5/2 L/c$* . La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad derecha de la tubería contiene agua en reposo y a una presión por debajo de la normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

8°. *Tiempo* $3t_0 = 3L/c$. El agua en toda la tubería esta en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad v dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

9°. *Tiempo* $7/2 t_0 = 7/2 L/c$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido esta 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.

10°. *Tiempo* $4 t_0 = 4L/c$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad v hacia la válvula. Todo igual que en el tiempo 0. Luego el periodo de este movimiento es: $T = 4 t_0 = 4L/c$.

Teóricamente. Este movimiento oscilatorio continuará indefinidamente.

Prácticamente. La deformación de la tubería y la viscosidad del líquido disipan energía y las oscilaciones se amortiguan.

1.1.2 Propiedades Físicas del fluido de trabajo.

Las propiedades que son de importancia en el análisis del golpe de ariete son la densidad o peso específico y el módulo de elasticidad influenciando en la compresibilidad del fluido. En el próximo numeral se observa que estas propiedades van a determinar la velocidad de la onda de presión que resulta del golpe de ariete.

Densidad y peso específico.³

La densidad de un fluido se define como la masa por unidad de volumen. La propiedad directamente relacionada con la densidad es el **peso específico** γ o peso por unidad de volumen. Se define como:

$$\gamma = \rho * g$$

Donde g es la gravedad local. Las unidades de peso específico son N/m^3 .

Para el agua la densidad es de **1000 Kg/m^3** y el peso específico es **9810 N/m^3** .

La densidad y peso específico del agua varían un poco con la temperatura; las relaciones aproximadas son

$$\rho_{H_2O} = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180}$$

$$\gamma_{H_2O} = 9810 - \frac{(T - 4)^2}{180}$$

Compresibilidad

Una forma común de describir la compresibilidad de un fluido es mediante la siguiente definición de módulo de masa de elasticidad B :

$$B = -V \left. \frac{\partial P}{\partial V} \right|_T = \rho \left. \frac{\partial P}{\partial \rho} \right|_T$$

En otros términos, el módulo de elasticidad también llamado coeficiente de compresibilidad, se define como la relación del cambio de presión al cambio relativo de densidad, mientras que la temperatura permanece constante.

El módulo de elasticidad para el agua en condiciones estándar es **2100 Mpa**.

³ POTTER, Merle C. y Wiggert, David C. Mecánica de fluidos, 3ª Ed. México. Thompson, 2002.

Viscosidad dinámica (μ)

La viscosidad es una magnitud física que mide la resistencia interna al flujo de un fluido (resistencia al esfuerzo cortante). Es medida por el tiempo en que tarda en fluir éste a través de un tubo capilar a una determinada temperatura. Las unidades con que se mide en el Sistema Internacional son $N \cdot s/m^2$.

Para el agua tenemos $\mu=0,0001 N \cdot s/m^2$, a temperatura ambiente.

Tabla 1. Propiedades físicas del agua.

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	$1,98 \cdot 10^6$	$1,781 \cdot 10^{-3}$	$1,785 \cdot 10^{-6}$	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	$2,05 \cdot 10^6$	$1,518 \cdot 10^{-3}$	$1,519 \cdot 10^{-6}$	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	$2,10 \cdot 10^6$	$1,307 \cdot 10^{-3}$	$1,306 \cdot 10^{-6}$	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	$2,15 \cdot 10^6$	$1,139 \cdot 10^{-3}$	$1,139 \cdot 10^{-6}$	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	$2,17 \cdot 10^6$	$1,102 \cdot 10^{-3}$	$1,003 \cdot 10^{-6}$	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	$2,22 \cdot 10^6$	$0,890 \cdot 10^{-3}$	$0,893 \cdot 10^{-6}$	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	$2,25 \cdot 10^6$	$0,708 \cdot 10^{-3}$	$0,800 \cdot 10^{-6}$	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,653 \cdot 10^{-3}$	$0,658 \cdot 10^{-6}$	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	$2,29 \cdot 10^6$	$0,547 \cdot 10^{-3}$	$0,553 \cdot 10^{-6}$	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	$2,28 \cdot 10^6$	$0,466 \cdot 10^{-3}$	$0,474 \cdot 10^{-6}$	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	$2,25 \cdot 10^6$	$0,404 \cdot 10^{-3}$	$0,413 \cdot 10^{-6}$	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	$2,20 \cdot 10^6$	$0,354 \cdot 10^{-3}$	$0,364 \cdot 10^{-6}$	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	$2,14 \cdot 10^6$	$0,315 \cdot 10^{-3}$	$0,326 \cdot 10^{-6}$	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	$2,07 \cdot 10^6$	$0,282 \cdot 10^{-3}$	$0,294 \cdot 10^{-6}$	0,0589	101,33

1.1.3 Velocidad de la Onda de Presión

Formula de JOUKOWSKI para la celeridad de la onda de presión en una tubería

$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_0 D}{E \delta}}}$$

Donde c --- celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, m/s, SI

E_0 --- modulo de elasticidad de volumen del fluido, N/m², SI

ρ --- densidad del fluido, Kg/m³, SI

D --- diámetro de la tubería, m, SI

E --- modulo de elasticidad del material de la tubería

δ --- espesor de la tubería, m, SI

El numerador es la celeridad de la onda elástica en el fluido, para el agua tenemos:

$$c_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} = 1425 \frac{m}{s}$$

1.1.4 Sobrepresión debida al Golpe de Ariete.

Formulas de presión máxima o sobrepresión

El estudio del golpe de ariete fue hecho en primer lugar por Joukowski, mientras que la solución completa del problema fue dada por Allievi.

El cálculo de la sobrepresión depende del tiempo de cierre t_c de la válvula.

El cierre puede ser:

- Instantáneo: $t_c = 0$. Caso teórico, físicamente imposible; pero muy interesante porque explica la esencia del fenómeno.
- Rápido: $0 < t_c < 2t_0 = 2L/c = T/2$. La presión máxima es la misma que el cierre instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo.
- Lento: $t_c > 2t_0 = 2L/c = T/2$. La presión máxima es menor que en los dos casos precedentes, porque la depresión de la onda elástica llega a la válvula antes de que se complete el medio ciclo e impide el aumento ulterior de la presión.

Presión máxima o sobrepresión.

Suponiendo que el cierre de la válvula es instantáneo. El fluido se desacelera, lo que genera un cambio de energía que produce una fuerza de inercia.

$$Fi = -m * \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Donde:

Δt es el tiempo que transcurre para que una masa $m = \rho l A$ de fluido que ocupa una longitud finita de tubería l reduzca su velocidad un cierto valor finito Δv

Para cierre total $\Delta v = -v$

$$Fi = \rho l A * \frac{v}{\Delta t}$$

l es la longitud recorrida por la onda a partir de la válvula en el tiempo Δt .

La sobrepresión está dada por:

$$\Delta p = \frac{Fi}{A}$$

La velocidad de la onda de presión

$$c = \frac{l}{\Delta t}$$

Obtenemos finalmente la formula de Joukowski para la sobrepresión:

$$\Delta p = \rho c v$$

1.2 GENERALIDADES DE UN ARIETE HIDRÁULICO

El ariete hidráulico fue patentado en 1796, por Joseph Montgolfier (1749-1810), consiste en una máquina que aprovecha únicamente la energía de un pequeño salto de agua para elevar parte de su caudal a una altura superior. Con el tiempo cayó en desuso, sobre todo debido al avance arrollador de la bomba centrifuga. En la actualidad asistimos a un renacer del interés acerca de este aparato debido a que es tecnológicamente accesible, eficiente, ecológico y muy didáctico.

Fue sólo durante el siglo pasado cuando se constató de forma correcta su principio de funcionamiento. Entonces fue cuando se demostró que el ariete es un dispositivo muy complejo que sólo puede funcionar a alto rendimiento tras un ajuste preciso de sus componentes. En este sentido fue significativa la aportación del ingeniero Heerlein de la empresa Firma Pfister & anghanss, quien hizo de los problemas del ariete hidráulico el objetivo de su vida y en su trabajo sistemático durante décadas exploró las regularidades y estableció principios de construcción.

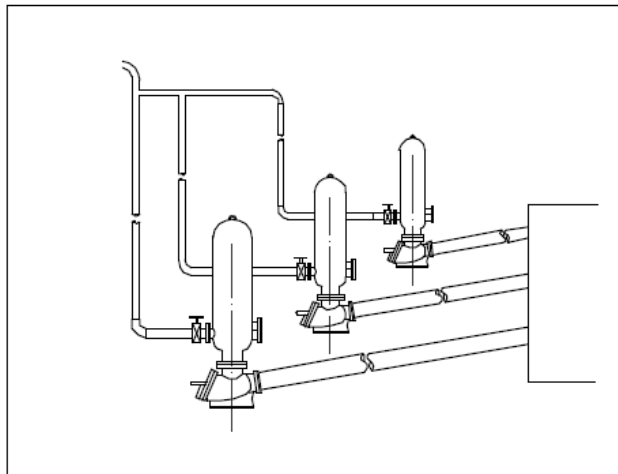
En este sistema hidráulico, la energía potencial del agua en el tanque de abastecimiento, es convertida primero en energía cinética que acciona el ariete, y posteriormente en energía potencial del agua que llega al tanque de descarga.

Un ariete hidráulico funciona aprovechando el fenómeno del golpe de ariete que ocurre en las tuberías, para aprovechar la sobrepresión generada por el cierre rápido de una válvula se necesita un juego armado por dos válvulas, una normalmente abierta y la otra normalmente cerrada, las cuales se encuentran ubicadas en un cuerpo el cual es una estructura a la cual están acopladas las dos válvulas antes mencionadas, para conducir el fluido hasta y desde el cuerpo se

necesitan unos conductos que en la mayoría de los casos son tuberías que se convierten en la alimentación y la descarga del sistema de bombeo por ariete hidráulico.

Existen algunas alternativas para el mejoramiento de la eficiencia de estos sistemas, como por ejemplo colocar varios arietes en forma paralela alimentados con un solo tubo de alimentación, esto depende de la condición del sitio donde se los va instalar. En el caso de que la fuente de agua sea abundante y la demanda de agua sea alta, un set de ariete hidráulico podría no elevar la suficiente cantidad de agua para abastecer la demanda, por lo que es recomendable la instalación de algunos sets de arietes hidráulicos en paralelo, como lo podemos ver la figura 3.

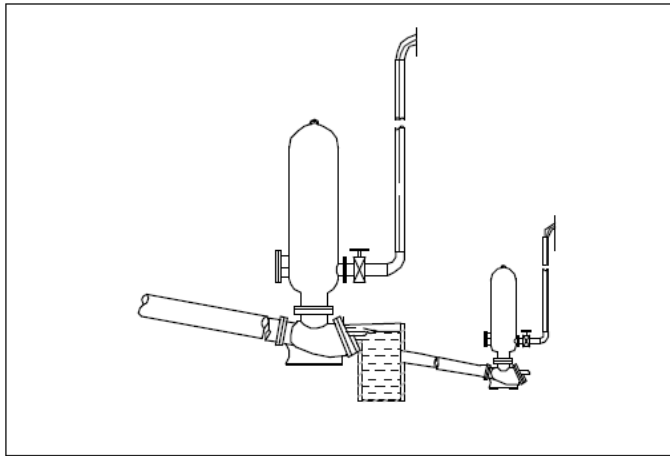
Figura 3. Sistema de arietes hidráulicos en paralelo.



Fuente: MA, CHI, *Hydraulic Ram Handbook*, Zhejiang University of Technology 2002.

Para la instalación en serie de estos sistemas, se tiene en cuenta la altura a la que se quiere llegar, porque si la altura es muy elevada un solo ariete tendría que ser muy grande, por lo que se coloca varios arietes en serie hasta alcanzar la altura deseada, los arietes a medida que se los coloca a diferentes alturas, son de menor tamaño.

Figura 4. Dos arietes hidráulicos colocados en serie.



Fuente: MA, CHI, *Hydraulic Ram Handbook*, Zhejiang University of Technology 2002.

Con respecto a la distribución y cantidad de elementos, hay varios tipos de configuración que permiten que un ariete hidráulico aproveche la sobrepresión generada, pero siempre se debe garantizar que una de las válvulas (normalmente abierta) genere la sobrepresión y que la otra válvula (normalmente cerrada) permita la salida del líquido hacia la descarga.

En anteriores ocasiones se ha investigado sobre la morfología de cada uno de los elementos que componen a un ariete hidráulico, además de los subconjuntos adyacentes que hacen parte del sistema de bombeo por medio de ariete hidráulico.

Los subconjuntos mencionados son los que componen el sistema de alimentación y el sistema de descarga, sobre estos elementos no se ha investigado mucho, existe ambigüedad sobre el diseño de estos componentes, muy pocos autores se atreven a concluir o dar relaciones entre estos elementos, pero recopilando la

poca información importante, se sugiere que el diámetro de la tubería de alimentación sea aproximadamente 2 veces el diámetro de la tubería de descarga.

$$\varnothing_{\text{ali}} \approx 2 * \varnothing_{\text{desc}}$$

Además, en los últimos adelantos sobre esta bomba ecológica se tiene que la tubería de alimentación debe ser lo más rígida posible para evitar que la onda de presión se pierda en la expansión del material.

En cuanto al cuerpo del ariete hidráulico se tienen distintas formas que de acuerdo a la condición de trabajo se pueden acomodar para que cumpla con los requerimientos deseados.

El ariete, sin importar su morfología ni sus dimensiones se compone de cuatro partes fundamentales que son:

- Cuerpo del Ariete.
- Válvula de impulso.
- Válvula de descarga.
- Cámara de Presión.

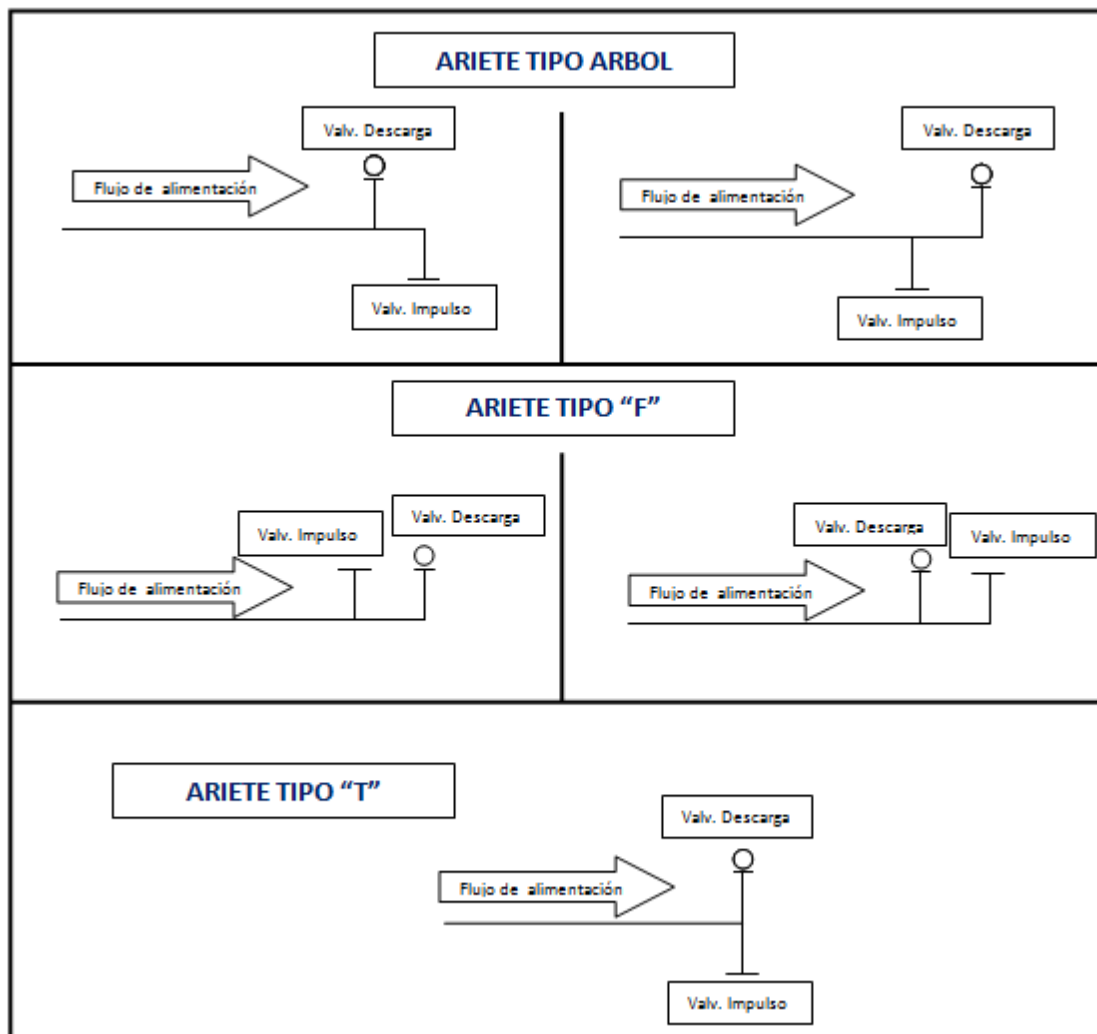
1.2.1 Cuerpo del ariete.

El cuerpo del ariete básicamente es el elemento que alberga los componentes que hacen posible el funcionamiento de esta bomba, el parámetro de diseño y selección del cuerpo del ariete más importante es la ubicación relativa de las

válvulas de impulso y descarga dado que estas son las encargadas de crear la sobrepresión y de permitir el paso del fluido hacia la descarga respectivamente.

A continuación se mencionan las tres opciones de posición generales para las válvulas de desfogue y de retención.

Figura 5. Esquema de tipos de cuerpo de ariete.



El ariete **tipo árbol** presenta una distribución en la que se alternan las direcciones de las válvulas de impulso y descarga. La válvula de descarga, la cual permite la salida del fluido siempre se ubica en vertical hacia arriba, esto es por funcionalidad de la bomba, la posición relativa de estas válvulas pueden cambiar siempre alternando sus direcciones, es decir, la válvula de impulso puede estar hacia abajo antes de la válvula de descarga, o puede estar hacia abajo después de esta.

En este tipo de cuerpo de ariete la onda de presión generada en la válvula de impulso se devuelve y tras chocar con las paredes internas del cuerpo del ariete busca la válvula de descarga para así salir a la descarga de la bomba.

El ariete **tipo F** presenta una distribución en la que coinciden las direcciones de las válvulas de impulso y descarga.

También, en este tipo de cuerpo de ariete la onda de presión generada en la válvula de impulso se devuelve y tras chocar con las paredes internas del cuerpo del ariete busca la válvula de descarga para así salir a la tubería de descarga.

El ariete **tipo T** presenta una distribución en la que las direcciones de las válvulas de impulso y descarga son inversas pero coincidiendo sus ejes de simetría. Esta configuración tiene posición única con la válvula de impulso hacia abajo y la válvula de descarga hacia arriba.

En este tipo de cuerpo de ariete la onda de presión generada en la válvula de impulso se devuelve y sale directamente hacia la válvula de descarga.

1.2.2 Válvula de impulso

Esta válvula es la encargada de producir el golpe de ariete, esta es normalmente abierta y se cierra debido a la aceleración del agua que proviene de la alimentación, para abrirse nuevamente e iniciar el ciclo está provista de un resorte graduado para que sea capaz de vencer el peso de la válvula y de la cantidad de agua existente en el cuerpo.

Es la encargada de regular la cantidad de agua que ha de circular en el sistema y cuando se ha de interrumpir el flujo para generar un pulso de presión que hará elevar la presión en el cuerpo del ariete.

Se debe dar como condición forzosa que el cierre de la válvula de impulso ha de efectuarse en un tiempo menor al tiempo que tarda la onda de presión en ir de la válvula al embalse y volver; porque solo en estas condiciones tenemos un cierre rápido lo que es clave para el adecuado funcionamiento de la bomba.

Esta válvula se debe acoplar al cuerpo del ariete de forma tal que produzca un cierre adecuado evitando fugas y afecten el funcionamiento del sistema.

1.2.3 Válvula de descarga

Esta válvula se encarga de permitir el paso del fluido hacia la descarga, funciona como una válvula anti retorno, es normalmente cerrada bloqueando el paso del líquido desde la descarga hacia el cuerpo del ariete, solo permite flujo en el otro sentido, solo se abre debido al golpe de ariete.

La válvula de descarga debe permitir el mayor caudal posible a través de su sección, durante el tiempo que permanezca abierta en cada ciclo. Debe cerrarse tan pronto se libere la presión del cuerpo del ariete.

1.2.4 Cámara de Presión

Es un tipo de acumulador hidráulico encargado de hacer continuo el flujo de descarga presurizando el aire existente en la cámara de presión y descargando el fluido atrapado en esta cada vez que la válvula de descarga está cerrada, de este modo se suavizan las pulsaciones de un flujo generado en forma pulsante, como es el caso de un golpe de ariete que se repite indefinidamente.

El ingeniero Jairo Emiro Velandia Silva en su tesis de grado⁴ realizó un trabajo de experimentación para escoger la forma más adecuada y que genera la mayor eficiencia posible en un ariete, luego de una serie de pruebas, concluyó que la forma más eficiente es la de ariete tipo “T” corto, este tipo de ariete es uno tipo “T” como se explicó anteriormente pero se construye de tal forma que sea lo más corto posible, con esta forma de ariete se obtiene que la mayor parte de la onda de presión que se genera en la válvula de impulso (parte inferior del cuerpo del ariete), choca directamente en la válvula de retención para abrirla y dar paso al fluido con mayor efectividad. Mientras los otros modelos analizados presentan mayor dificultad en el recorrido de la onda de presión entre las válvulas.

⁴ VELANDIA SILVA, JAIRO EMIRO. En procura de mayor eficiencia para el ariete hidráulico, Tesis de Grado, Bucaramanga, UIS. 1993.

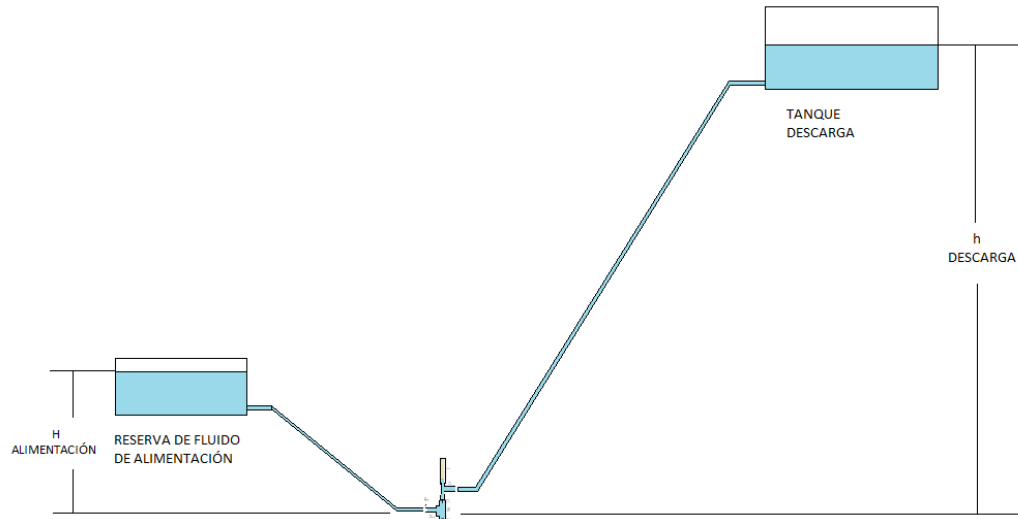
Para tener un mayor rango de variación de la abertura de las válvulas, se crea un nuevo modelo de ariete, conservando la forma “T” pero dando una mayor capacidad a la caja de válvulas para reducir las obstrucciones al flujo de desfogue; la longitud del cuerpo del ariete se redujo a su mínima expresión, pues solo se tiene una caja de válvulas sin ninguna longitud adicional considerable en la dirección de la tubería de alimentación.

Además se tendrá en cuenta otros adelantos en cuanto a los demás componentes del ariete hidráulico, en el capítulo 5 se analizará cada uno de los elementos usados y la razón de ser de cada una de las piezas de esta bomba ecológica.

2. FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.

2.1 Montaje del ariete en el sistema de bombeo.

Figura 6. Montaje del sistema de bombeo.



El sistema de bombeo es básicamente un tanque de alimentación, el ariete hidráulico, un tanque de descarga que se encuentra a un nivel superior de la alimentación y las tuberías que conectan dichos elementos.

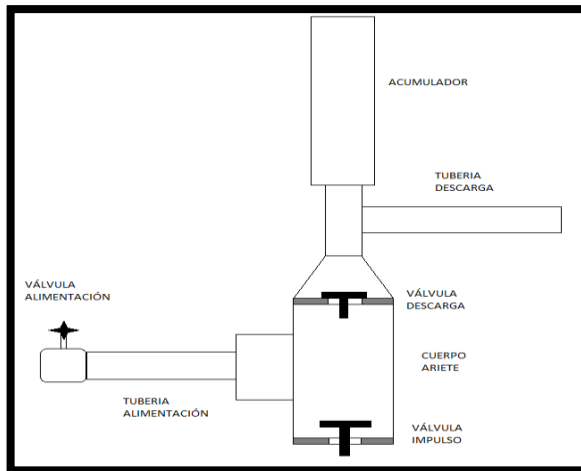
La función del ariete hidráulico es elevar el fluido a una altura mayor que la del reservorio aprovechando la energía que proporciona la altura de alimentación, este proceso posee una alta ineficiencia debida al desperdicio de fluido en los momentos en que la válvula de impulso se encuentra abierta.

2.2 Funcionamiento del ariete hidráulico.

El ciclo de bombeo que ocurre en un ariete hidráulico se describe mediante los siguientes pasos:

- Apertura de la válvula de alimentación.

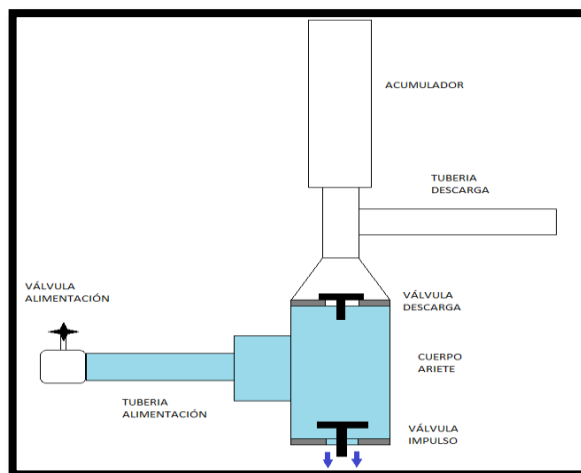
Figura 7. Apertura de válvula de alimentación.



En la figura 7 se observa la configuración de un ariete tipo T corto en las condiciones iniciales cuando se tiene la válvula de alimentación cerrada. Para iniciar su funcionamiento se abre la válvula de alimentación para que el flujo llegue al cuerpo del ariete y comience la aceleración del agua para el primer cierre de la válvula de impulso.

- Aceleración del agua hasta llegar a la velocidad de cierre.

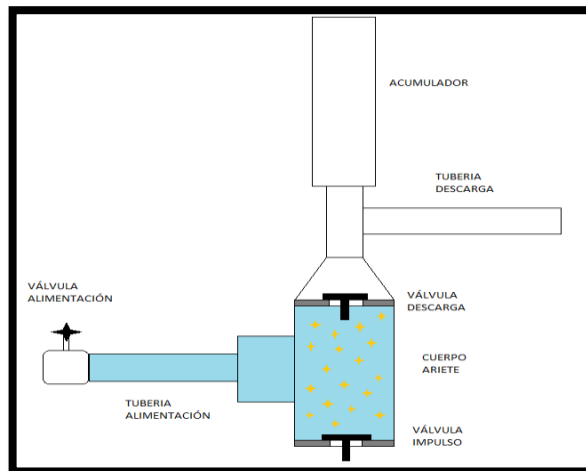
Figura 8. Aceleración del agua en la válvula de impulso.



En este periodo el fluido llena el cuerpo del ariete y sale por la abertura de la válvula de impulso mientras se va acelerando hasta que llega a una velocidad que comienza a cerrar la válvula mediante la fuerza de arrastre producida por el fluido. En la figura 8 no se muestran los resortes de las válvulas pero se espera que la fuerza de arrastre producida venza la fuerza del resorte y la válvula de impulso comience a cerrarse.

- Cierre de la válvula de impulso y generación de la sobrepresión

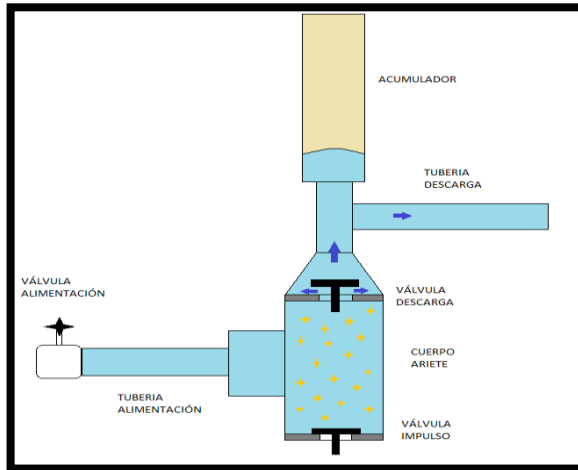
Figura 9. Cierre de la válvula de impulso.



Después que el fluido llega a la velocidad requerida para cerrar la válvula, la fuerza de arrastre debida a esta velocidad termina por cerrarla, aquí es donde se debe garantizar que la velocidad de cierre de la válvula sea tal que el golpe de ariete generado sea lo más fuerte posible, este tiempo de cierre se analizó en el capítulo del golpe de ariete.

- Apertura de la válvula de descarga y descarga del fluido.

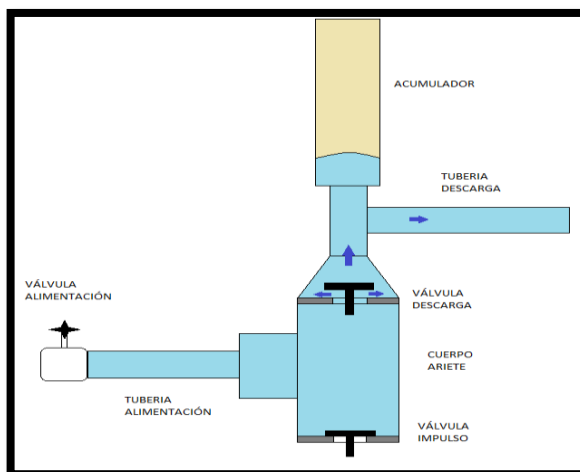
Figura 10. Apertura de la válvula de descarga.



La sobrepresión generada por el golpe de ariete termina por vencer la fuerza que realiza el resorte de la válvula de descarga, esto permite que una porción del fluido pase al acumulador y luego a la tubería de descarga, en este periodo la válvula de impulso continúa cerrada debido a la sobrepresión presente dentro del cuerpo del ariete.

- Reducción de la sobrepresión.

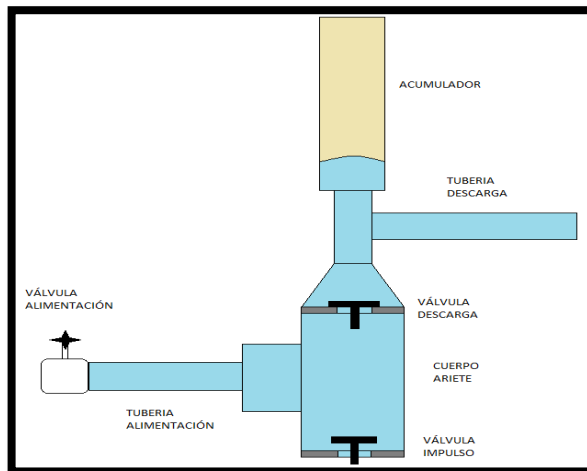
Figura 11. Reducción de la sobrepresión.



Al seguir el fluido a la tubería de descarga permite el alivio de la presión que se encuentra en el cuerpo del ariete, esto hace que los resortes de las válvulas comiencen a llevar a cada válvula a su posición inicial. La utilización de un acumulador es para reducir o eliminar el efecto pulsante en cada ciclo del funcionamiento del ariete y obtener en la tubería de descarga un caudal constante, aunque no es obligatoria su utilización es recomendable en los casos en que la utilización del fluido bombeado deba ser constante.

- Cierre de la válvula de descarga y apertura de la válvula de impulso

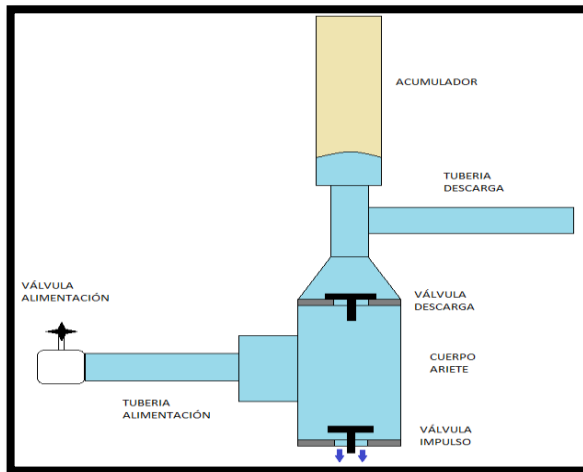
Figura 12. Cierre de la válvula de descarga.



Debido al alivio de la presión mediante la válvula de descarga los resortes de las válvulas llevan cada una a su posición inicial, la válvula de descarga cerrada y la de impulso abierta. En este periodo el fluido se encuentra casi estático debido a que la sobrepresión generada produce el retroceso del fluido hasta la fuente de alimentación esto lleva a que no hay una fuerza que produzca el movimiento del fluido.

- Estado inicial con aceleración de agua para el ciclo siguiente.

Figura 13. Inicio del ciclo siguiente.



Aquí inicia un nuevo ciclo en el que el fluido comienza a aumentar su velocidad para generar un nuevo cierre de la válvula de impulsión.

Debido al funcionamiento continuo mediante pulsos se puede obtener un sistema de bombeo mediante la utilización de una diferencia de altura entre la alimentación y el ariete, la ventaja de este principio es que se pueda bombear cualquier tipo de fluido con pocas impurezas sin la utilización de energías que puedan generar un costo para los interesados en la utilización del ariete hidráulico.

3. ANÁLISIS DEL FENÓMENO

Método experimental: el fenómeno presente en el ariete hidráulico es complejo y esto requiere que se realice un análisis experimental para encontrar la diferencia que puede llegar a tener con lo que teóricamente es probable, para este análisis se utilizan modelos de los cuales se obtienen varias configuraciones, además se puede determinar cuál es la eficiencia global de todo el sistema e indicar como influye cada parámetro en su funcionamiento.

Método analítico: mediante el estudio y la aplicación de la mecánica de fluidos se puede obtener un modelamiento teórico para analizar el fenómeno presente en el funcionamiento del ariete hidráulico, aunque es un modelo complejo la base se centra en el modelo realizado por el Ingeniero mecánico J. Kroll⁵ el cual mediante la dinámica de fluidos obtiene un sistema de ecuaciones para analizar el fenómeno, aunque este modelo tiene algunas condiciones también se puede obtener una eficiencia global y analizar la influencia de cada parámetro en el fenómeno.

A continuación se describen detalladamente los dos métodos que se han mencionado anteriormente.

3.1 MEDIANTE EXPERIMENTACIÓN

La experimentación se centra en el estudio realizado por el Ingeniero Jairo Emiro Velandia Silva, el cual analizó la influencia que produce la implementación de varias formas en el cuerpo del ariete y la determinación de la mejor configuración de las áreas para cada una de las válvulas.

⁵ Kroll, J. "The automatic hydraulic ram: Its theory and design". Paper Nº 76-JE-17. ASME. 1976.

El ariete hidráulico es influenciado por las variables presentes en su configuración, por eso se continuó con el procedimiento realizado por Velandia Silva pero analizando otros parámetros en la configuración del ariete que afectan directamente la eficiencia global.

Los parámetros seleccionados para el análisis teórico:

- La constante elástica de los resortes de las válvulas.
- El volumen del acumulador.
- Las áreas de las válvulas relacionadas con los parámetros anteriores.
- La carrera de la válvula de impulso como parámetro fundamental en el funcionamiento del ariete hidráulico, está relacionado con cada configuración resultante de los anteriores parámetros.

Mediante la utilización de un ariete tipo T que es la mejor forma para el cuerpo del ariete (según el trabajo de Velandia Silva), se construyen los modelos posibilitando variar los parámetros seleccionados.

El procedimiento es de la siguiente manera:

1. Se determina el parámetro que se va a analizar.
2. Manteniendo los demás parámetros fijos, se determina un valor inicial para el parámetro analizado.
3. Para la configuración anterior se toman diferentes dimensiones para la carrera de la válvula de impulso.
4. Poner en funcionamiento el ariete hasta que el flujo esté estabilizado.
5. Medir el Q alimentación Y q descarga para determinar la eficiencia.
6. Esto se realiza para todas las dimensiones de carrera de válvula.
7. Los anteriores pasos para todos los parámetros de análisis.

Los datos se recolectan en los formatos realizados para tal fin, posteriormente se realiza el análisis de experimentos. Este procedimiento se encuentra en el capítulo de análisis de resultados.

La especificación de las configuraciones del ariete hidráulico se describirá posteriormente.

3.2 ANÁLISIS TEÓRICO

El análisis teórico se hace mediante un programa realizado en la plataforma de interfaz gráfica de matlab (GUI), este programa permite realizar un estudio del ariete hidráulico para varias configuraciones dependiendo de la carrera de la válvula de impulso y posteriormente definir una configuración específica y obtener los resultados teóricos.

El modelo matemático utilizado para la realización del programa se basa en el trabajo realizado por J. Kroll el cual mediante la aplicación de la dinámica de fluidos determina correlaciones entre las variables presentes en el funcionamiento del ariete hidráulico, Kroll divide el ciclo hidráulico en siete periodos a los cuales les aplica la dinámica de fluidos. Este modelo se ha modificado debido a que el ariete propuesto por Kroll fue especialmente diseñado para las condiciones propuestas por él, pero la aplicación de los conocimientos adquiridos permiten modificar e incluso mejorar este modelo incluyendo las variables referentes a la fuerzas de arrastre y perdidas por efecto tobera en las válvulas.

La descripción de este sistema de ecuaciones se encuentra en el anexo A.

4. DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE LOS PROTOTIPOS.

En el capítulo 2 se menciona las 4 partes principales de un ariete hidráulico, en este capítulo se describirá el procedimiento por el cual se seleccionó cada uno de los componentes de un sistema de bombeo por ariete hidráulico.

Se empezará por el sistema de alimentación el cual consta de un tanque de alimentación y una serie de tuberías que conducen el fluido desde el tanque de alimentación hasta el ariete hidráulico.

Tanque de alimentación.

El tanque de alimentación simula la fuente natural de agua para abastecer al ariete de forma continua. El tanque utilizado tiene una capacidad de 230 litros por cuestiones de espacio (ver figura 14). Para suplir deficiencias de fluido se utilizó una motobomba pequeña que recircula parte del caudal perdido, este elemento auxiliar se detallara más adelante.

Tuberías de alimentación.

Las tuberías del sistema de alimentación son las encargadas de conducir el fluido desde el tanque de alimentación hasta 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 golpe de ariete.

Según recopilaciones de autores anteriores se dice que la tubería de impulsión se debe construir 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.

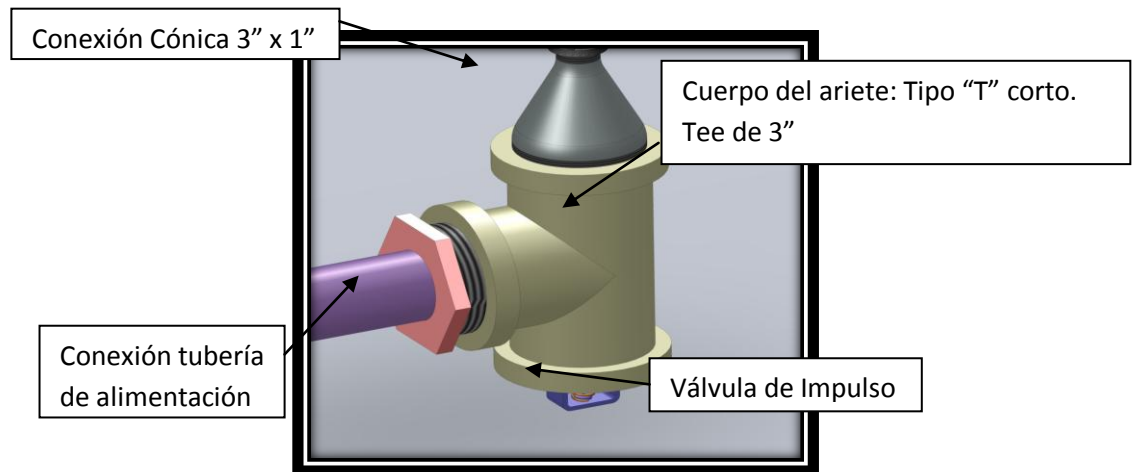
Este sistema de tuberías consta de dos tramos de tubo galvanizado de 1-1/2" y de tres tramos de tubo galvanizado de 1-1/4" los cuales junto con dos codos a 45° y una reducción 1-1/2" a 1-1/4" conformarían el sistema de tuberías de alimentación el cual se encargaría de transportar el fluido a una altura de 80 cms. y una longitud horizontal de 553 cms. para llegar al sitio de montaje del ariete hidráulico.

Cuerpo del ariete

Como ya se mencionó, el cuerpo del ariete es el componente que contiene más elementos como son las válvulas y las conexiones para la descarga, para la selección de este componente se tendría que cumplir especificaciones requeridas para la ubicación de las válvulas y los elementos en la descarga, además tendría que cumplir con la forma de **ariete tipo "T" corto** que ya se había determinado usar gracias a las conclusiones de trabajos anteriores.

De acuerdo a lo anterior y al amplio mercado en elementos hidráulicos, se seleccionó una **Tee de 3"** en hierro galvanizado. Se utiliza este elemento debido a la facilidad de adquirirlo, a la fácil ubicación de las válvulas, a la forma de "T" corto, al material resistente a la corrosión, y el tamaño se escoge de 3" debido al mayor rango de posibilidades para los tamaños de las válvulas de impulso y descarga, además se contaba con la recomendación de una tesis anterior en el cual se pedía el uso de un ariete más grande que el utilizado en ese proyecto el cual era de 2".

Figura 14. Cuerpo del ariete.



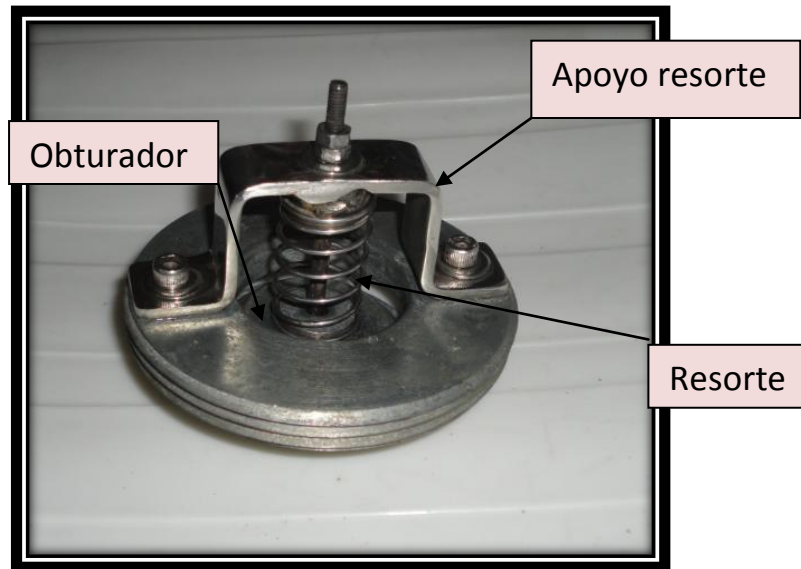
Válvula de Impulso

Esta pieza es muy relevante dentro del cuerpo del ariete hidráulico, es la encargada de generar el golpe de ariete debido al cierre rápido de esta, es el elemento más sensible dentro de todo el sistema de ariete hidráulico debido a que puede variar considerablemente el funcionamiento del sistema de bombeo con tan solo modificar un poco una de sus piezas.

Esta válvula se encuentra ubicada en la parte inferior del cuerpo del ariete (ver figura 15), esto es debido a que sería la única posición posible, teniendo en cuenta que la válvula adyacente que es la válvula de descarga debe estar en la parte superior del cuerpo del ariete para un mejor funcionamiento.

La válvula de impulso, como se muestra en la figura 16, es una válvula normalmente abierta, en cuanto a forma es básicamente un disco al cual se adjunta el Obturador, el resorte (el cual mantiene abierta la válvula hasta que la velocidad del agua la cierre), y los apoyos del resorte.

Figura 15. Válvula típica de impulso.



El disco de la válvula es un tramo de eje de 3" el cual se máquina para crearle la rosca que acoplará con una de las salidas del cuerpo del ariete, para dar paso al resorte y para apoyar al mismo; se selecciona así debido a facilidades de adquisición en el mercado y a la posibilidad de maquinarlo sin problemas, el material del disco es acero AISI 1045 al que posteriormente se pasaría a un proceso de galvanización para prevenir una corrosión prematura, se fabrican 4 tipos diferentes de válvulas de impulso, la diferencia entre todas estas válvulas es únicamente la perforación interna que permite obtener 4 áreas posibles para la válvula de impulso.

El obturador de la válvula es un tramo de eje AISI 1045 de 4 diferentes diámetros de los cuales se obtienen los cuatro obturadores de las válvulas de impulso. Los obturadores tienen una forma cónica que permite un buen sello.

La forma cónica de este elemento es la encargada de producir un cierre adecuado, esta forma es un avance de este proyecto puesto que modelos anteriores utilizaban un obturador plano, también usado en este trabajo pero con

resultados poco aceptables en cuanto a la eficiencia del ariete; una pequeña sección cilíndrica con una perforación (pasante por todo el obturador) albergará uno de los extremos de un resorte a compresión ayudando a mantenerlo posicionado, la perforación mencionada permite el paso de un tornillo cuya función es permitir variar la carrera de esta válvula por medio de unas tuercas que hacen posible posicionar el obturador.

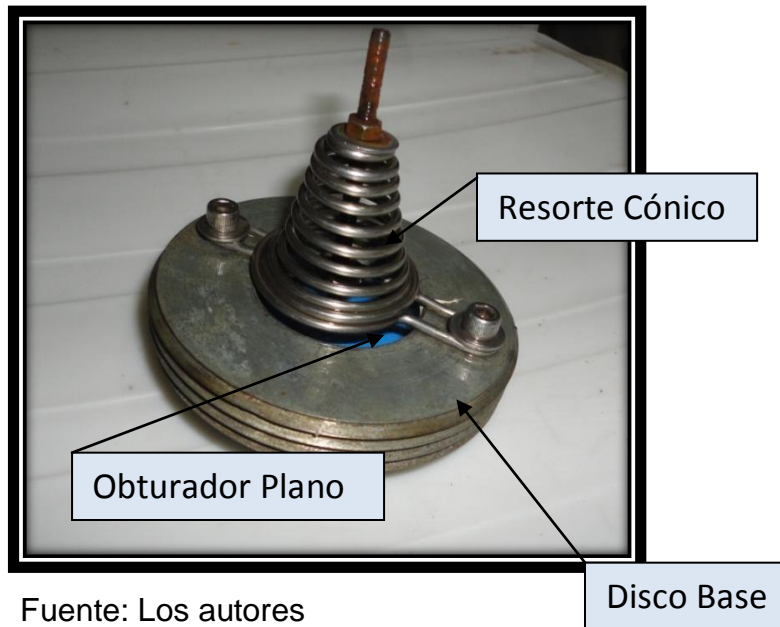
El resorte cilíndrico a compresión es el elemento encargado de hacer volver a la posición de inicio al obturador de la válvula de impulso para iniciar un nuevo ciclo. El material del resorte es alambre inoxidable de distintos calibres dependiendo de la fuerza necesaria para el correcto funcionamiento de este conjunto. Este resorte se ubica entre las secciones cilíndricas del obturador y del apoyo del resorte tratando en lo posible de mantener un eje de dirección lo más recto posible para así evitar que el obturador se desvíe y entonces no produzca un cierre adecuado.

Válvula de Descarga

También llamada válvula check del ariete hidráulico, es la encargada de dar paso al fluido presurizado y permitirle seguir el camino a la descarga, es una válvula normalmente cerrada debido a que la gran mayoría de energía presente en el fluido de alimentación se tiene que gastar en la aceleración de la válvula de impulso, por esto la válvula de descarga debe en lo posible evitar la salida de fluido de alimentación antes de la generación del golpe de ariete, además debe restringir en su totalidad el flujo en sentido contrario al deseado, es decir desde la descarga hacia el cuerpo del ariete, porque de esta manera se perdería presión en la descarga del ariete.

Para lograr lo anterior, se dispone de una válvula como la mostrada en la figura 16, en la cual se tiene una serie de piezas que cumplen la función deseada.

Figura 16. Válvula típica de descarga.



Fuente: Los autores

El disco base nuevamente es el apoyo de todas las demás piezas, es un tramo de eje AISI 1045 de 3" el cual se maquina con el fin de acomodarlo al cuerpo del ariete, es decir se le realizó un roscado NPT para encajarlo en la Tee de 3", este disco pasó por un proceso de galvanizado para evitar la corrosión prematura, la selección de este elemento fue debido a facilidades en el mercado y la disponibilidad de una transformación del material. Se fabrican cuatro tipos de válvulas, cuya diferencia es el tamaño de la perforación central, el diámetro de la perforación de este disco limita la cantidad de agua que sale del ariete y que se dirige a la descarga.

El obturador plano es un disco de hierro con un diámetro un poco mayor al diámetro de la perforación del disco de la válvula esto se debe a que se debe garantizar taponamiento del cuerpo del ariete, este componente simplemente es un retal en forma de disco de una lámina de acero A-36 de un espesor aproximado a 3/16", pero puede variar sin ningún problema, solo se escogió esta lámina porque es sencilla de conseguirse en el mercado metalúrgico.

El resorte que hace parte de esta válvula es cónico, el resorte trabaja a compresión y la válvula debe garantizar un sello para evitar la pérdida de energía por eso al tener un resorte cónico se asegura que el disco obturador de la válvula permanezca centrado. También se puede contar con varios resortes para cada uno de los discos disponibles pero para este trabajo solo se requiere de un resorte por cada conjunto. La función principal del resorte es mantener la válvula de descarga cerrada mientras se cierra la válvula de impulso.

Además de las piezas mencionadas anteriormente, una válvula de retención necesita un tornillo junto con tuerca y arandela, este conjunto se encarga de comunicarle los esfuerzos del resorte al disco obturador y viceversa, girando la tuerca se comprime el resorte y de esta manera cambia la fuerza requerida en la sobrepresión para abrir totalmente esta válvula.

Unión cónica 3" x 1"

Esta pieza fue objeto de un análisis de forma dado que por motivos de comodidad y de funcionalidad la descarga deberá ser de menor diámetro que la alimentación y comercialmente un elemento de unión entre el cuerpo del ariete (3") y la tubería de descarga (3/4") es una reducción tipo buje que tiene un cambio de sección brusco y que produciría muchas pérdidas a la descarga, además que vienen para roscar internamente, cosa que obligaría el uso de otro elemento.

Para solucionar este problema se necesitó una reducción en la cual el cambio de sección no fuera tan brusco, este elemento es una unión cónica (ver figura 18) para soldar en tubería de hierro negro A-36, a esta pieza se le maquinaron las roscas NPT en sus extremos para así poder roscarla al cuerpo del ariete y al conjunto de descarga en sus dos extremos. Las pruebas cambiaron significativamente al utilizar este elemento y por comodidad fue una elección muy acertada.

Conjunto de conexiones a la descarga

Este conjunto es una serie de conexiones, niples, tee de $\frac{3}{4}$ " que tienen la función de conectar otros componentes de este sistema. Estos elementos son una reducción 1" x $\frac{3}{4}$ ", 3 niples cortos y dos Tees de $\frac{3}{4}$ ". Todas estas piezas son accesorios de tubería de hierro galvanizado, elementos fáciles de conseguir en cualquier ferretería.

Acumulador o "Cámara de presión"

El acumulador es un elemento encargado de que el fluido llegue de forma continua a la descarga. El aire contenido dentro del acumulador se comprime en cada pulso cuando hay sobre presión y se expande cuando la sobrepresión termina logrando así un flujo continuo en cada sección de bombeo.

EL acumulador se construyó usando cilindros de acero con un buje roscado en su extremo para unirlo al sistema del ariete hidráulico, el material del acumulador es tuberías de acero A-36 de pared delgada con unas tapas en lámina A-36 de $\frac{1}{8}$ " de espesor (ver figura 19).

Se construyeron cuatro tipos diferentes de acumuladores de 325 ml, 880 ml, 1160 ml y de 1680 ml respectivamente, para lograr estos volúmenes se varió el diámetro nominal y la longitud de cada tramo de tubo.

Tubería de descarga

La tubería de descarga tiene que ser de menor capacidad que la tubería de alimentación debido a la considerable disminución en el caudal entregado. La tubería de descarga es una manguera de $\frac{3}{4}$ " transparente. Se cumple así la condición que la tubería de descarga debe ser la mitad de la tubería de alimentación.

5. CONSTRUCCIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS Y DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA TOMA DE DATOS DEL EXPERIMENTO.

5.1 BANCO DE PRUEBAS

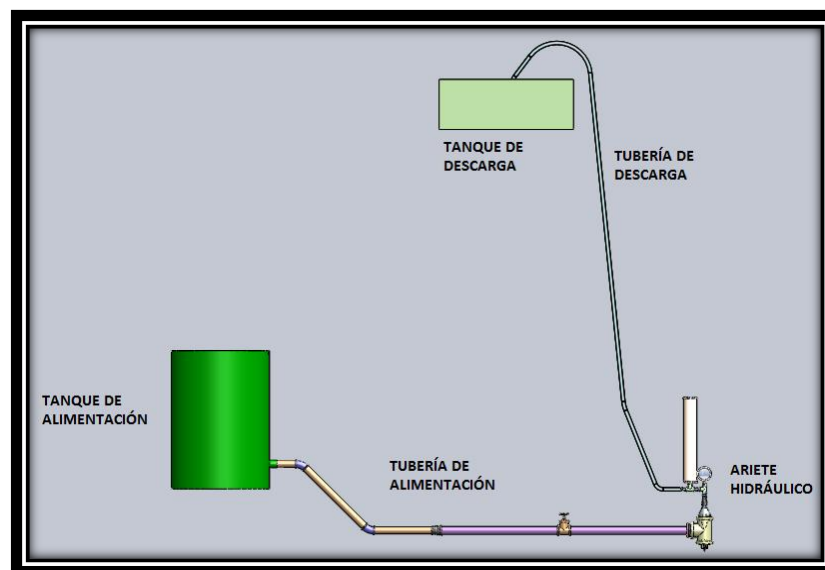
El banco de pruebas es un sistema diseñado para poner en funcionamiento el ariete hidráulico que permite ajustar las condiciones de funcionamiento que se puedan requerir en un caso real. Está compuesto por dos subsistemas.

1. El sistema de bombeo:

Es el grupo de elementos con el cual se realiza la experimentación, compuesto básicamente por el tanque de alimentación, la tubería de alimentación, el ariete hidráulico, la tubería de descarga (Ver figura 17).

El sistema de bombeo tiene la facilidad de ubicarlo en varios lugares, para efectos de la experimentación se buscó que la ubicación del montaje permita la visualización completa del funcionamiento.

Figura 17. Esquema Banco de Pruebas.



Los componentes de este sistema se analizaron en el capítulo anterior.

2. Sistema de retroalimentación del fluido al tanque de alimentación.

El sistema de retroalimentación se utiliza para recuperar el líquido utilizado en la operación de bombeo, debido a que son pruebas de laboratorio no se tiene una cantidad ilimitada de fluido y el caudal perdido en la operación no se debe desperdiciar por condiciones ambientales, por el contrario se recircula para mantener el nivel de alimentación constante.

El sistema de retroalimentación se utiliza para cumplir con la condición que el fluido de alimentación debe ser ilimitado algo que es difícil de producir en un laboratorio, por eso con este sistema podemos con una cantidad limitada de fluido simular una cantidad ilimitada.

Descripción del sistema de retroalimentación:

- **Recipiente receptor de caudal de descarga:** aquí es donde se recibe toda el agua que se pierde por la válvula de impulso, cumple la función de mantener inundado el ariete hidráulico esto es necesario para que no se llene de aire. De aquí se distribuye el agua a la bomba de recirculación.
- **Tubería de alimentación de la bomba de recirculación:** comunica el fluido desde el recipiente receptor hacia la succión de la bomba, la restricción del flujo se realiza mediante una válvula de bola.
- **Bomba de recirculación:** realiza la función de tomar el agua perdida de la válvula de impulso y la devuelve al tanque de alimentación para mantener el nivel de agua constante.
- **Manguera de descarga del agua recirculada:** comunica la descarga de la bomba de recirculación y el tanque de alimentación.

5.2 PROCEDIMIENTO PARA TOMA DE DATOS

Para la experimentación se realizó un diseño de experimentos para un mejor análisis de los resultados, este incluye un procedimiento que describe la forma de tomar los datos y permitir un posterior manejo de estos.

El procedimiento para la toma de datos experimentales es de la siguiente forma:

1. Realizar el montaje del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico descrito en el numeral anterior.
2. Abrir la válvula de compuerta en la tubería de alimentación para alimentar el ariete hidráulico.
3. inicialmente se mantiene la válvula de impulso cerrada mientras el agua llena el cuerpo del ariete, cuando esto ocurre se abre la válvula para iniciar el funcionamiento del ariete.
4. Se espera a que se estabilice el sistema, es decir cuando haya un flujo constante en la tubería de descarga.
5. Se miden y consignan los datos de las variables que se van a mantener constantes, H alimentación, h descarga, longitud de alimentación y los parámetros que se van a mantener constantes dependiendo del experimento a realizar.
6. Se gradúa una carrera de válvula que permita la frecuencia más alta posible y que bombee al menos un poco de fluido. Requerido para el análisis.
7. Después de tener todos estos datos y el sistema de bombeo estable se procede a medir el caudal de descarga (q) y el caudal perdido por la válvula de impulso (Q_{per}). También se toma la medida de los pulsos, todos estos valores para un tiempo fijo generalmente un minuto.
8. Se gradúa nuevamente a una frecuencia menor que la anterior y se espera un tiempo para que se estabilice de nuevo el sistema de bombeo.

9. Se vuelven a medir caudales y frecuencia. El proceso termina cuando la frecuencia sea muy baja y el caudal de descarga tienda a cero.

Este procedimiento es únicamente para analizar una sola variable, para las demás variables se modifica la variable que se va a analizar y se dejan los demás parámetros constantes.

Los parámetros a analizar son:

- La constante de los resortes de la válvula de impulso
- El volumen del acumulador
- La configuración de las áreas. Válvula descarga e impulso

Las pruebas buscan determinar la influencia de algunos parámetros en la operación y la eficiencia del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico, se determinó la siguiente tabla para consignar los valores medidos del funcionamiento del ariete hidráulico y así realizar el posterior análisis de datos.

Tabla 2. Tabla inclusión de datos experimentales.

<i>Variable a analizar</i>					
CARRERA DE VÁLVULA (mm)	FRECUENCIA [PULSOS/min]	CAUDAL PERDIDO [mlts/min]	CAUDAL DESCARGADO [mlts/min]	Qdes/Qtot	η TOTAL

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

6.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de realizado el procedimiento descrito en el capítulo anterior se obtuvieron los datos dependiendo de la variable analizada, con el diseño de experimentos se realiza el análisis de los resultados mediante un procedimiento estadístico por DUNCAN y se concluye la influencia de los parámetros en prueba.

6.1.1 Constante elástica del resorte de la válvula de impulso.

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron:

D válvula impulso: 40 mm

D válvula descarga: 40 mm

H alimentación: 1.2 m

H descarga: 6.1 m

Volumen de acumulador: 1.16 litros

Resultados:

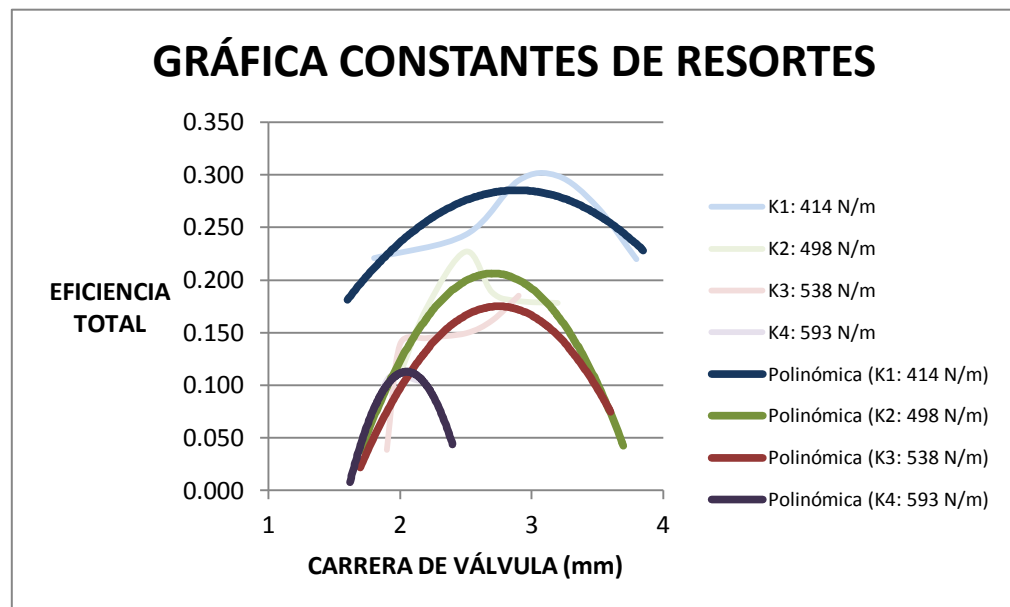


Tabla 3. Análisis Duncan para los resultados de los resortes.

DUNCAN		RESORTES						
TABLA DE DATOS PARA ANÁLISIS								
TRATAMIENTOS		K RESORTE (N/m)						
		K1: 414	K2: 498	K3: 538	K4: 593	Yj		
1		0.221	0.111	0.039	0.075	0.445		
2		0.243	0.173	0.139	0.106	0.661		
3		0.295	0.227	0.145	0.112	0.778		
4		0.299	0.188	0.149	0.106	0.742		
5		0.270	0.180	0.162	0.103	0.714		
6		0.220	0.178	0.185	0.098	0.681		
Yi		1.547	1.058	0.818	0.599	<u>4.022</u>		
						<u>Y</u>		

tipo	valor	grados de libertad						
suma Y2	0.784	15	5%					
suma Yi2	4.541	ANÁLISIS DUNCAN						
suma Yj2	2.766		MEDIA	DIFERENCIA MEDIAS		VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
SCT	0.110	K1	0.258	K1-K4	0.158	3.25	0.029	SIGNIFICATIVO
SContrat	0.083			K1-K3	0.122	3.16	0.028	SIGNIFICATIVO
SCb	0.017			K1-K2	0.082	3.01	0.027	SIGNIFICATIVO
SCE	0.009	K2	0.176	K2-K4	0.077	3.16	0.028	SIGNIFICATIVO
				K2-K3	0.040	3.01	0.027	SIGNIFICATIVO
CME	0.0005	K3	0.136	K3-K4	0.037	3.01	0.027	SIGNIFICATIVO
Sy	0.0089	K4	0.100					

Conclusiones parciales del experimento.

El análisis Duncan para la experimentación con los resortes concluye:

La constante de los resortes en la válvula de impulso influencia significativamente la eficiencia global del sistema. El resorte facilita o restringe la velocidad con la cual la válvula de impulso se cierra.

Para una constante menor la eficiencia global es mayor. Un resorte que provee de menor fuerza permite que la válvula se cierre más rápido, lo cual genera un golpe de ariete más fuerte.

Hay límites superior e inferior para el valor de la constante. Estos se determinan mediante la energía disponible en la alimentación del fluido.

6.1.2 Volumen del acumulador

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron:

D válvula impulso: 40 mm

D válvula descarga: 40 mm

H alimentación: 1.2 m

H descarga: 6.1 m

Constante del resorte: 414 N/m

Resultados:

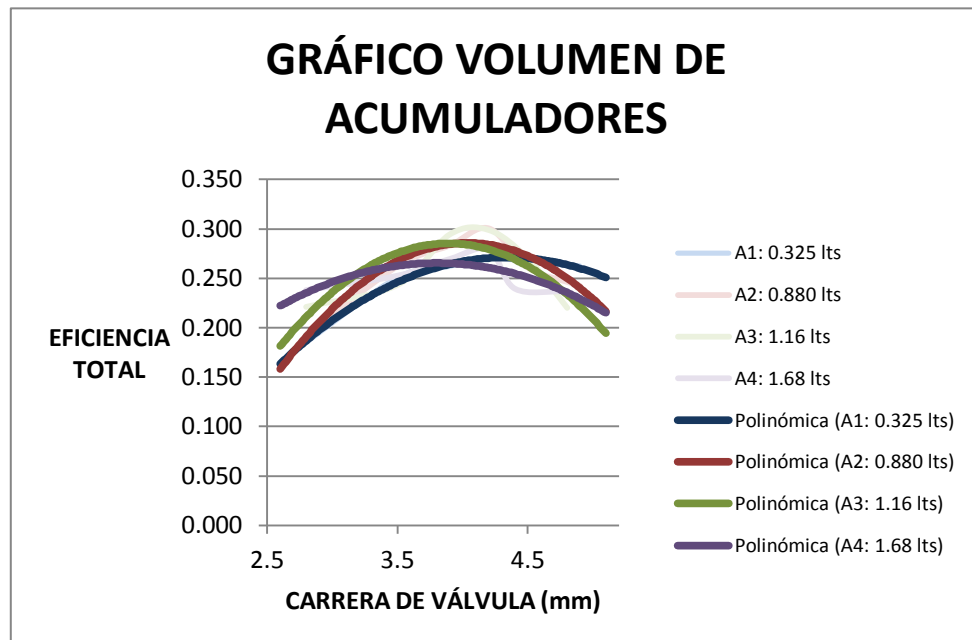


Tabla 4. Análisis Duncan para los resultados de acumuladores.

DUNCAN		ACUMULADORES			
TABLA DE DATOS PARA ANÁLISIS					
TRATAMIENTOS	ACUMULADOR [Its]				
	A1: 0.325	A2: 0.88	A3: 1.16	A4: 1.68	Yj
1	0.185	0.193	0.221	0.238	0.837
2	0.251	0.262	0.243	0.252	1.008
3	0.262	0.283	0.295	0.269	1.109
4	0.271	0.300	0.299	0.279	1.149
5	0.267	0.261	0.270	0.239	1.036
6	0.263	0.242	0.220	0.237	0.961
Yi	1.498	1.540	1.547	1.514	6.100
					Y
Media	0.250	0.257	0.258	0.252	

tipo	valor	grados de libertad						
suma Y2	1.571	15	5%					
suma Yi2	9.304	ANÁLISIS DUNCAN						
suma Yj2	6.263		MEDIA	DIFERENCIA MEDIAS		VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
SCT	0.020	A3	0.258	A3-A1	0.008	3.25	0.020	NO SIGNIFICATIVA
SContrat	0.000			A3-A4	0.006	3.16	0.019	NO SIGNIFICATIVA
SCb	0.015			A3-A2	0.001	3.01	0.018	NO SIGNIFICATIVA
SCE	0.004	A2	0.257	A2-A1	0.007	3.16	0.019	NO SIGNIFICATIVA
				A2-A4	0.004	3.01	0.018	NO SIGNIFICATIVA
CME	0.0002	A4	0.252	A4-A1	0.003	3.01	0.018	NO SIGNIFICATIVA
Sy	0.0061	A1	0.250					

Conclusiones parciales del experimento.

El análisis Duncan para la experimentación con los acumuladores concluye:

El acumulador no tiene una influencia significativa en la eficiencia global del sistema. El aumento de caudal descargado no es considerable.

Para un mayor volumen de acumulador el flujo es más constante en la descarga. Un acumulador grande tiene más capacidad de almacenar energía.

El acumulador no afecta el funcionamiento del ariete hidráulico. Se debe considerar la dificultad que se tuvo para regular la fuerza producida por los resortes de las válvulas y esto puede influir en el funcionamiento del ariete.

6.1.3 Combinación de las áreas de las válvulas descarga e impulso

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron:

H alimentación: 1.2 m

H descarga: 4.5 m

Constante del resorte: Dependiendo de la válvula de impulso

Volumen de acumulador: 1.16 litros

RESULTADOS:

ÁREA VAL. DESCARGA 2: D 25

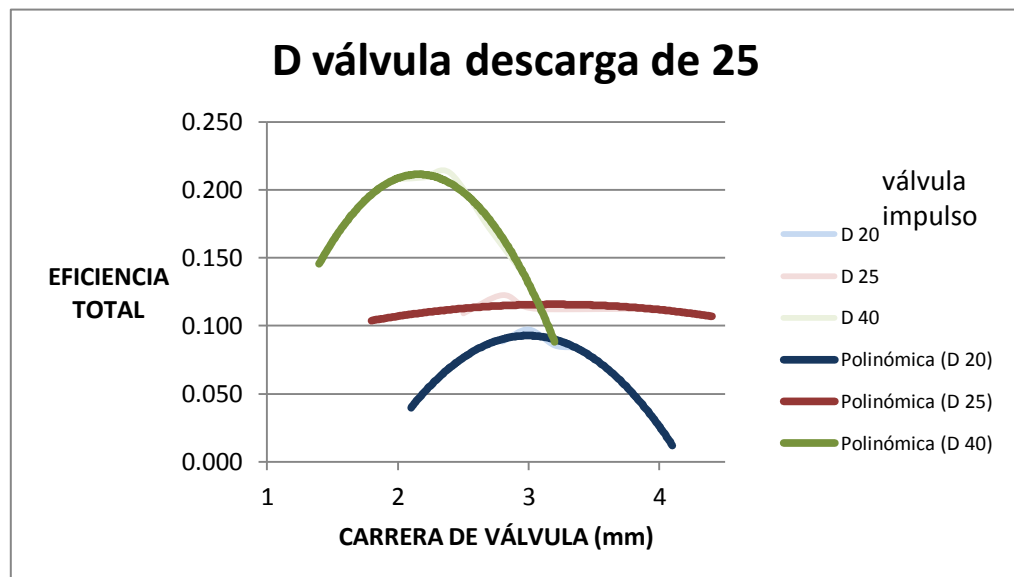


Tabla 5. Análisis Duncan para válvula D 25.

DUNCAN		D descarga de 25					
TABLA DE DATOS PARA ANÁLISIS							
TRATAMIENTOS	DIÁMETRO DE VÁLVULA IMPULSO					Yj	Yi
	D1: 20	D2: 25	D3: 40	D4: 50	Y		
1	0.089	0.109	0.208	0.165	0.571		
2	0.098	0.123	0.209	0.166	0.596		
3	0.086	0.113	0.212	0.167	0.579		
4	0.083	0.112	0.172	0.169	0.536		
5	0.069	0.113	0.133	0.201	0.516		
Yi	0.424	0.571	0.934	0.869	<u>2.797</u>		
Media	0.085	0.114	0.187	0.174			

tipo	valor	grados de libertad						
suma Y2	0.433	12	5%					
suma Yi2	2.132	ANÁLISIS DUNCAN						
suma Yj2	1.569		MEDIA	DIFERENCIA MEDIAS		VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
SCT	0.041	D3	0.187	D3-D1	0.102	3.33	0.027	SIGNIFICATIVO
SContrat	0.035			D3-D2	0.073	3.23	0.026	SIGNIFICATIVO
SCb	0.001			D3-D4	0.013	3.08	0.025	NO SIGNIFICATIVO
SCE	0.005	D4	0.174	D4-D1	0.089	3.23	0.026	SIGNIFICATIVO
				D4-D2	0.060	3.08	0.025	SIGNIFICATIVO
CME	0.0003	D2	0.114	D2-D1	0.029	3.08	0.025	SIGNIFICATIVO
Sy	0.0080	D1	0.085					

Análisis parcial:

Se observa que a medida que la válvula de impulso es mayor se tiene una mayor eficiencia, esto para una válvula de descarga fija. Los resultados de la válvula de impulso de D 50 se descartaron, estadísticamente no son considerables para una comparación.

ÁREA VAL. DESCARGA 3: D 40

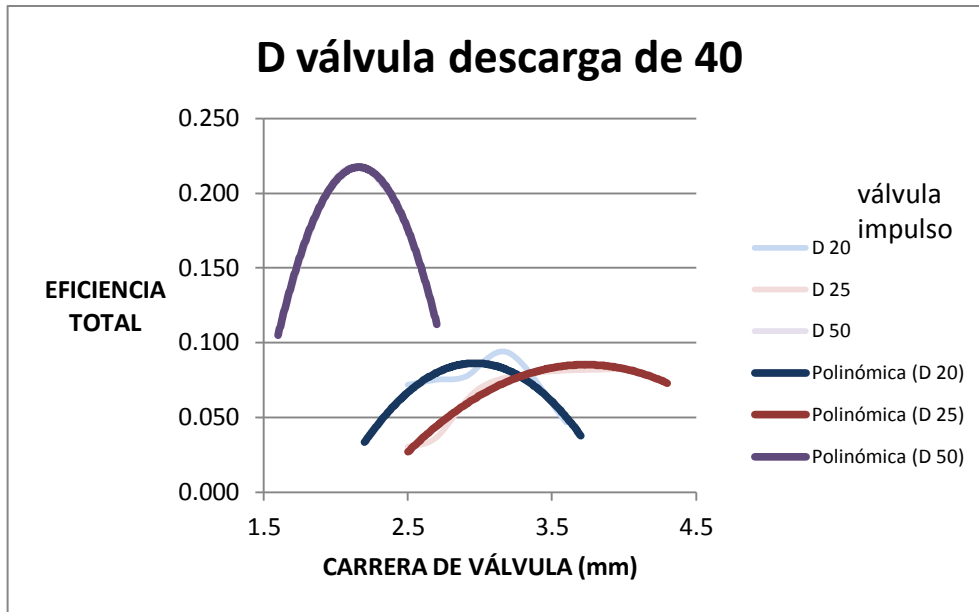


Tabla 6. Análisis Duncan para válvula D 40.

DUNCAN		D descarga de 40			
TABLA DE DATOS PARA ANÁLISIS					
TRATAMIENTOS	DIÁMETRO DE VÁLVULA IMPULSO				
	D1: 20	D2: 25	D3: 40	D4: 50	Yj
1	0.072	0.030	0.249	0.106	0.458
2	0.075	0.037	0.265	0.169	0.546
3	0.077	0.070	0.242	0.210	0.599
4	0.093	0.080	0.234	0.217	0.624
5	0.047	0.083	0.234	0.196	0.559
Yi	0.364	0.299	1.225	0.898	2.786
					Y
media	0.073	0.060	0.245	0.180	

tipo	valor	grados de libertad						
suma Y2	0.518	12	5%					
suma Yi2	2.528	ANÁLISIS DUNCAN						
suma Yj2	1.569		MEDIA	DIFERENCIA MEDIAS		VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN
SCT	0.130	D3	0.245	D3-D2	0.185	3.33	0.034	SIGNIFICATIVO
SContrat	0.118			D3-D1	0.172	3.23	0.033	SIGNIFICATIVO
SCb	0.004			D3-D4	0.065	3.08	0.031	SIGNIFICATIVO
SCE	0.008	D4	0.180	D4-D2	0.120	3.23	0.033	SIGNIFICATIVO
				D4-D1	0.107	3.08	0.031	SIGNIFICATIVO
CME	0.0005	D1	0.073	D1-D2	0.013	3.08	0.031	NO SIGNIFICATIVO
Sy	0.0102	D2	0.060					

Análisis parcial:

La válvula de descarga es grande y facilita la salida del fluido en la descarga. Al igual que los experimentos anteriores para una válvula de impulso mayor es mejor la eficiencia global. Los resultados de la válvula de impulso de D 40 se descartaron, estadísticamente no son considerables para una comparación.

ÁREA VAL. DESCARGA 4: D 50

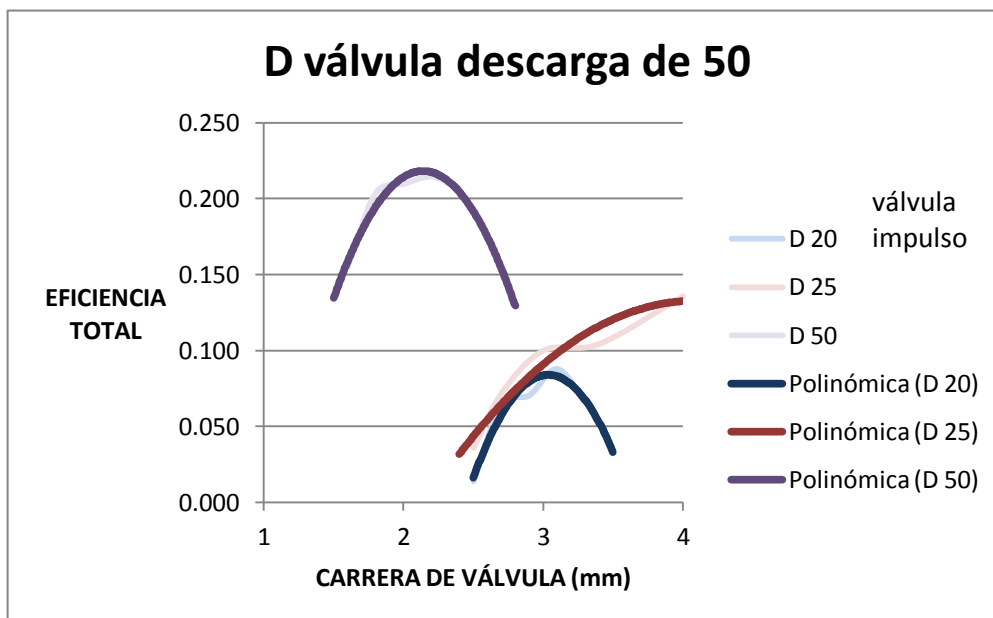


Tabla 7. Análisis Duncan para válvula D 50.

DUNCAN		D descarga de 50					
TABLA DE DATOS PARA ANÁLISIS							
TRATAMIENTOS	DIÁMETRO DE VÁLVULA IMPULSO					Yj	
	D1: 20	D2: 25	D3: 40	D4: 50			
1	0.014	0.036	0.236	0.155	0.440		
2	0.065	0.072	0.263	0.204	0.603		
3	0.070	0.100	0.226	0.210	0.606		
4	0.088	0.104	0.223	0.214	0.630		
5	0.067	0.136	0.218	0.207	0.626		
Yi	0.303	0.447	1.166	0.989	<u>2.906</u>		
						<u>Y</u>	
media	0.061	0.089	0.233	0.198			

tipo	valor	grados de libertad						
suma Y2	0.538	12	5%					
suma Yi2	2.631	ANÁLISIS DUNCAN						
suma Yj2	1.714		MEDIA	DIFERENCIA MEDIAS	VALOR DUNCAN	DUNCAN AJUSTADO	CONCLUSIÓN	
SCT	0.116	D3	0.233	D3-D1	0.173	3.33	0.029	SIGNIFICATIVO
S _{Contrat}	0.104			D3-D2	0.144	3.23	0.028	SIGNIFICATIVO
S _{Cb}	0.006			D3-D4	0.035	3.08	0.027	SIGNIFICATIVO
SCE	0.006	D4	0.198	D4-D1	0.137	3.23	0.028	SIGNIFICATIVO
				D4-D2	0.108	3.08	0.027	SIGNIFICATIVO
CME	0.0004	D2	0.089	D2-D1	0.029	3.08	0.027	SIGNIFICATIVO
Sy	0.0087	D1	0.061					

Análisis parcial:

Los resultados de la válvula de impulso de D 50 se descartaron, estadísticamente no son considerables para una comparación. Se mantiene la tendencia que para una válvula de impulso mayor aumenta la eficiencia global.

El análisis Duncan para la experimentación con las áreas concluye:

La configuración de las válvulas influencia significativamente en la eficiencia global del sistema.

Una mayor área en la válvula de descarga permite una mayor salida del fluido lo cual reduce las pérdidas en la descarga. Se debe tener en cuenta la fuerza realizada por el resorte de esta válvula.

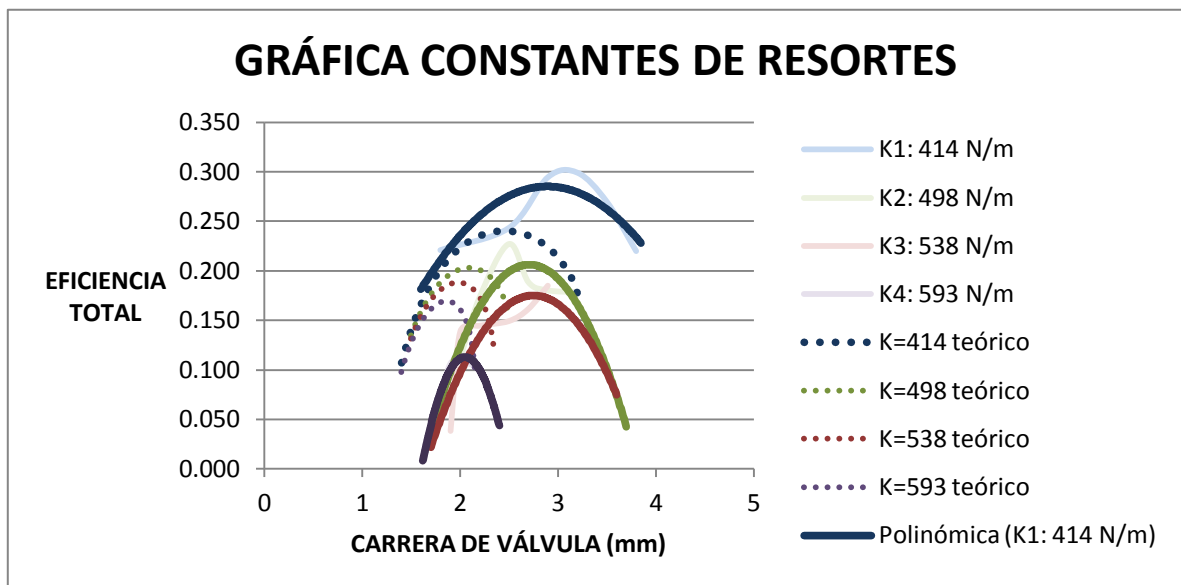
A medida que el área de la válvula de impulso es mayor se obtiene una mayor eficiencia.

6.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS TEÓRICOS

El análisis teórico del funcionamiento del ariete hidráulico se realiza con los resultados obtenidos del programa realizado para tal fin, ver anexo B. Los resultados teóricos se comparan con los resultados experimentales y se determinan las relaciones y diferencias para concluir sobre la veracidad del modelamiento teórico.

6.2.1 Análisis de la influencia de la constante del resorte de la válvula de impulso.

Se realiza el análisis de los resultados teóricos comparándolos con los resultados experimentales.



Se observa que en las gráficas experimentales como las teóricas la eficiencia total con respecto a la carrera de la válvula de impulso presenta una forma de parábola invertida, lo cual indica que hay un valor máximo para la eficiencia total del sistema con respecto a una configuración determinada. De los resultados experimentales sabemos que para la mayor eficiencia no se tiene el mayor caudal

descargado, a medida que la carrera de la válvula de impulso aumenta se obtiene un mayor caudal descargado.

Otra observación es que a medida que la constante del resorte aumenta la eficiencia total disminuye, esto se observa teóricamente como experimentalmente. Para una menor constante el cierre de la válvula de impulso es más rápido lo cual reduce el caudal perdido y esto hace que la eficiencia total aumente.

También a medida que la constante del resorte aumenta la curva de funcionamiento del ariete se corre hacia la izquierda, es decir funciona a una carrera de válvula menor, este comportamiento se observa tanto experimentalmente como teóricamente.

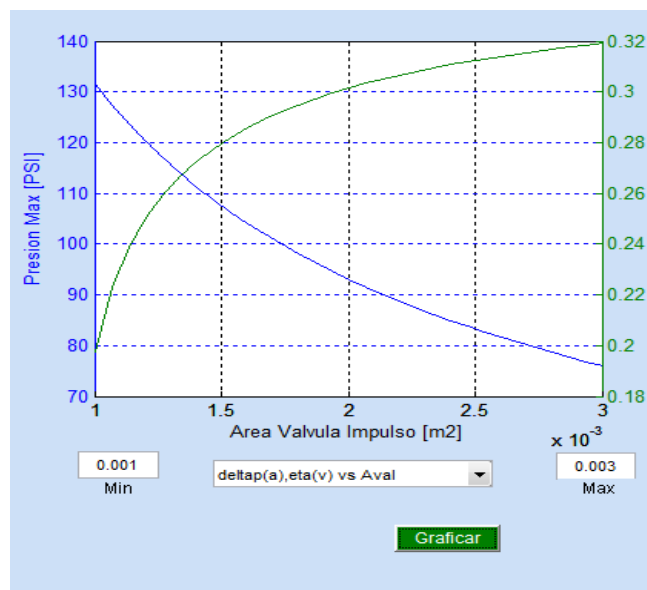
6.2.2 Análisis de la influencia de la válvula de impulso en la eficiencia total del sistema.

Experimentalmente se analizó la influencia de la combinación de las válvulas de impulso y descarga, este mismo análisis sirve para relacionarlo con los resultados teóricos en la relación de la válvula de impulso con la eficiencia total.

GRÁFICA DE VÁLVULAS EXPERIMENTAL

Estos resultados son los mismos que se analizaron en el caso experimental para la configuración de las válvulas.

GRÁFICAS PROGRAMA



De las gráficas experimentales se observa que para una válvula de descarga fija a medida que aumenta el área de la válvula de impulso aumenta la eficiencia total. El mismo análisis se realizó de forma teórica obteniendo la misma tendencia.

6.3 Análisis de funcionamiento en campo.

Después de realizados los experimentos se llevó el ariete hidráulico para la prueba en campo, utilizando una de las mejores configuraciones obtenidas de la experimentación se obtuvieron los siguientes resultados.

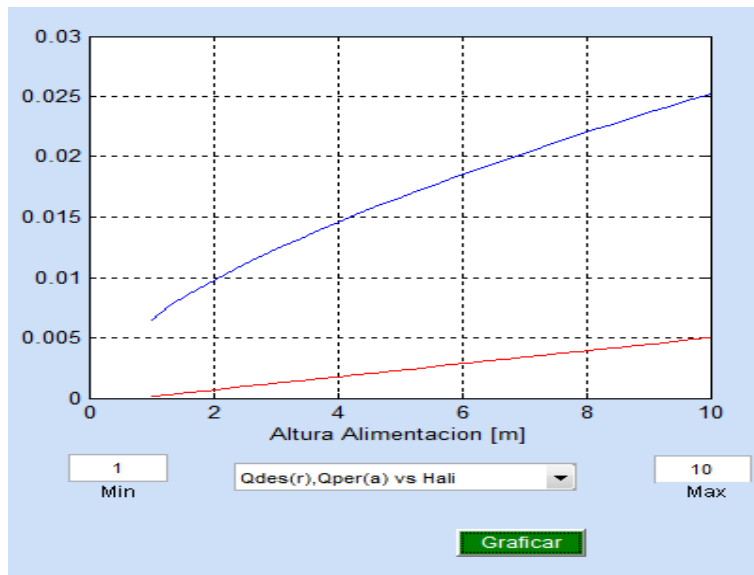
Condiciones de funcionamiento:

D válvula impulso:	40 mm
D válvula descarga:	40 mm
H alimentación:	3 m
Constante del resorte:	593 N/m
Volumen acumulador:	1.16 lts

Los resultados obtenidos fueron:

H descarga:	20 m
Caudal descargado:	1 litro/min aprox.
Caudal perdido:	11 litros/min aprox.
Eficiencia total:	60%

Las observaciones realizadas en campo determinan un mejor funcionamiento del ariete hidráulico para esas condiciones de funcionamiento, lo que permite concluir que la configuración del ariete hidráulico utilizada requiere de una mayor capacidad que en el laboratorio para un mayor rendimiento.



Otra observación es que para una altura de alimentación mayor se tiene un mayor caudal descargado, esto también se puede comprobar teóricamente mediante la utilización del programa y para las mismas condiciones de operación, estos resultados se muestran a continuación.

7. CONCLUSIONES

El buen funcionamiento del ariete hidráulico depende en gran medida de las condiciones de su configuración como de las condiciones del medio en que va a trabajar, por eso es importante realizar un análisis previo para la construcción de un sistema de bombeo de estas características.

La influencia del resorte de la válvula de impulso afecta significativamente la eficiencia global del sistema, se determinó que hay un límite superior y uno inferior que debe tener la constante del resorte para un debido funcionamiento del ariete, además que para una constante menor la eficiencia global es mayor.

El acumulador como parámetro en el sistema de bombeo por ariete hidráulico no afecta la eficiencia global pero si permite un flujo continuo en la descarga cuando se tiene un volumen de acumulador grande.

La configuración de las válvulas afecta considerablemente la eficiencia global del sistema, se requiere que la válvula de descarga sea un poco mayor que la válvula de impulso y estas áreas las determina las condiciones del medio en que va a trabajar el ariete hidráulico.

- Una válvula de impulso mayor requiere una capacidad mayor pero es más eficiente para una válvula de descarga fija.
- Una válvula de descarga mayor permite más facilidad de descarga del fluido.

El análisis previo realizado con el programa facilita significativamente el estudio del funcionamiento del ariete hidráulico para unas condiciones determinadas y así definir la mejor configuración para un buen rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- CASADIEGOS G, RAFAEL. Cálculo y Diseño de un Ariete Hidráulico, Tesis de Grado, Bucaramanga, UIS. 1959.
- CRANE, División de Ingeniería. Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías. Mc. Graw Hill. 1987.
- GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México: McGraw-Hill, 2008.
- Krol, J. "The automatic hydraulic ram: Its theory and design". Paper N° 76-JE-17. ASME. 1976.
- MATAIX, CLAUDIO. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas, Ediciones del Castillo S.A. 1986.
- POTTER, Merla C. y Wiggert, David C. Mecánica de fluidos, 3ª Ed. México. Thompson, 2002.
- VELANDIA SILVA, JAIRO EMIRO. En procura de mayor eficiencia para el ariete hidráulico, Tesis de Grado, Bucaramanga, UIS. 1993.

ANEXOS

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TEÓRICO CON LAS MODIFICACIONES REALIZADAS.

El modelo de Kroll busca modelar lo mejor posible el fenómeno ocurrido en el ariete hidráulico y se basa en el análisis del golpe de ariete descrito anteriormente en el capítulo 2. Kroll aplica la dinámica de fluidos en cada uno de los siete periodos del ciclo del ariete hidráulico y encuentra correlaciones entre las variables utilizadas.

El modelo teórico de Kroll tiene algunas condiciones importantes que se describen a continuación:

- El factor de pérdidas $1 + \sum k + f(L/D)$, se calcula en estado estable y se considera constante para todo el clico.
- Se desprecia la carga por fricción en los periodos 1 y 7 debido a la baja velocidad.
- La velocidad del agua al final del periodo 2, es igual a la del periodo 3.

Ecuaciones fundamentales del modelo matemático.

- a.** Ecuación de movimiento aplicable a todos los periodos.

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

$$Z = 1 + \sum k + f \left(\frac{L}{D} \right) + R$$

- b.** Ecuación básica de golpe de ariete.

Sobrepresión.

$$\Delta H = -\Delta v \frac{c}{g}$$

Perdidas.

Menores
$$h_m = \sum k \frac{v^2}{2g}$$

Fricción
$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$$

Turbulencia válvula de impulso.
$$h_{turb} = R \frac{v^2}{2g}$$

R depende de la forma y carrera del obturador de la válvula de impulso. Este factor se determina experimentalmente junto con el coeficiente de descarga de las válvulas.

$$R=1/Cd^2$$

El coeficiente de descarga se determina realizando la experimentación para las válvulas.

$$Cd = \frac{Q_{real}}{Q_{teorico}}$$

$$Cd = \frac{Q_{medido}}{A_{tub} * \sqrt{2gH}}$$

Dependiendo del área y la carrera de la válvula se obtienen las siguientes relaciones:

Área de diámetro de 20 mm.

$$Cd = -167.86*s^2 + 8.8685*s + 0.0865$$

Área de diámetro de 25 mm.

$$Cd = -362.47*s^2 + 15.381*s + 0.104$$

Área de diámetro de 40 mm

$$C_d = -1246.2*s^2 + 37.4*s + 0.1219$$

Área de diámetro de 50 mm

$$C_d = -630.2*s^2 + 28.398*s + 0.1588$$

Donde:

Cd: coeficiente de descarga

S: carrera de la válvula de impulso

c. Fuerza de arrastre en la válvula de impulso.

$$F = \int \bar{v}(\rho \bar{v} d\bar{A})$$

Escalar

$$F = \rho v^2 A$$

$$F = W = Kr * S$$

Se debe incluir el coeficiente de arrastre dependiente de la forma de la válvula.

Para un disco $C_a=1,17$

$$F = C_a * (\rho v^2 A)$$

d. Pérdidas en el periodo de bombeo. h_r .

$$h_r = \frac{v^2}{2g} \left[f \frac{L}{D} + \sum k \right] \left(1 - \frac{h}{h_{max}} \right)$$

Periodos del ariete hidráulico

Periodo 1.

Válvula de impulso abierta debido al retroceso del agua en el ciclo anterior, se presenta una presión negativa y la distancia y viaja por la columna de agua en la tubería de impulso. En este periodo se considera el agua como fluido incompresible.

Se determina la fuerza producida por la altura de alimentación mediante la ecuación de energía.

$$p = \gamma \left(H - \frac{v^2}{2g} \right)$$

$$F_p = p * A = \gamma A \left(H - \frac{v^2}{2g} \right)$$

La aceleración en la tubería de impulso.

$$\sum F = ma$$

$$F_p - F_f = ma$$

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

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

Reduciendo términos tenemos.

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

En este periodo la velocidad del agua es muy baja por eso el segundo término se desprecia.

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

Solucionando para el periodo 1.

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}}$$

Donde:

H: altura de alimentación disponible. [m]

t₁: tiempo del periodo 1 [s]

y: distancia debida al retroceso del agua [m]

V₁: velocidad del agua en la tubería de impulso en el periodo 1.

L: longitud de alimentación.

Periodo 2.

El flujo en la tubería de impulso aumenta hasta llegar a la velocidad V₂, que es la velocidad necesaria para generar la fuerza de arrastre que cierra la válvula.

Aquí determinamos los dos valores posibles que puede tener la velocidad 2, una se debe a la generada por la altura disponible y la otra debida a los requerimientos de la fuerza en la válvula de impulso.

1. V_2 disponible debida a la altura de alimentación:

De la ecuación de energía de Bernoulli tenemos.

$$P_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_1 = P_2 + \frac{v_2^2}{2g} + H_2 + \frac{v_2^2}{2g} \left(f \frac{L}{D} + \sum k + R \right)$$

Tomando como nivel de referencia la posición 2 y simplificando obtenemos:

$$V_2 = \sqrt{\frac{2gH}{Z}}$$

Donde Z es el coeficiente de perdidas.

Se debe corregir el efecto tobera en la válvula de impulso.

Velocidad disponible: $V_2 d = Cd * \sqrt{\frac{2gH}{Z}}$

El coeficiente de descarga Cd se determina experimentalmente.

Cd: coeficiente de descarga de la válvula de impulso.

H: altura de alimentación.

2. V_2 requerida debido a la fuerza en la válvula de impulso.

De la definición de fuerza de arrastre:

$$F = W = Kr * S$$

$$F = C_a * (\rho v^2 A)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{Wg}{Av * \gamma * C_a}}$$

Donde:

V_2 : velocidad requerida para el cierre de la válvula de impulso.

W: fuerza en la válvula debida al resorte.

A_v : área de la válvula de impulso.

C_a : coeficiente de arrastre para el tipo de válvula.

K_r : constante del resorte de la válvula de impulso.

S: carrera de la válvula de impulso.

Para este periodo la velocidad es apreciable y es la máxima posible.

Partiendo de:

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

Reduciendo términos:

$$\left[H - Z \frac{v^2}{2g} \right] = \frac{L}{g} \frac{dv}{dt}$$

Multiplicando la ecuación por $\frac{2g}{Z}$ y despejando dt, obtenemos:

$$dt = \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

Integrando entre t_1 y t_2 y V_1 y V_2 obtenemos:

$$\int dt = \int_{V_1}^{V_2} \frac{\frac{2L}{Z}}{\frac{2gH}{Z} - v^2} dv$$

Obtenemos la fórmula para obtener el tiempo en el periodo 2.

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \frac{\left[1 + \sqrt{\frac{WZ}{2AvHyCd}}\right] \left[1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right]}{\left[1 - \sqrt{\frac{WZ}{2AvHyCd}}\right] \left[1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right]}$$

t_2 : tiempo del periodo 2.

La cantidad de agua perdida en este periodo está dada por la siguiente ecuación:

$$Q_2 = \gamma A \int_{v_1}^{v_2} V dt$$

Reemplazando dt, obtenemos:

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

Se obtiene la solución para el caudal perdido.

$$Q_2 = \frac{\gamma AL}{Z} \ln \left[\frac{\frac{2gH}{Z} - \frac{2gHy}{L}}{\frac{2gH}{Z} - \frac{Wg}{AvyCd}} \right]$$

Donde:

Q_2 : caudal perdido en el periodo 2.

A: área de la tubería de alimentación.

L: longitud de alimentación.

De esta ecuación obtenemos una importante relación analizando el denominador del logaritmo.

$$\text{Vel requerida} = \text{Vel disponible}$$

$$\frac{Wg}{Av\gamma Cd} = \frac{2gH}{Z}$$

Si estos dos términos son iguales el Q2 sería ∞ lo que quiere decir que la válvula no se cerraría. Por lo tanto de aquí se obtiene la fuerza máxima posible en la válvula debida al resorte.

Fuerza máxima posible en la válvula.

$$0 < W < \frac{2HA v \gamma C d}{Z}$$

Periodo 3.

Es el periodo en que la válvula comienza y termina su cierre debido a la acción de la fuerza de arrastre, en este periodo la velocidad del agua es la máxima.

En el análisis de este periodo se debe considerar que tanto el agua como la válvula de impulso están en movimiento. Usando la ecuación de movimiento $F=ma$ y con simplificaciones matemáticas se obtiene la ecuación para el movimiento de la válvula de impulso.

$$\frac{d^2s}{dt^2} = \frac{\frac{2Hg^2t}{L} \left[1 - \frac{WZ}{2AvH\gamma Cd} \right]}{\sqrt{\frac{Wg}{Av\gamma Cd}}}$$

Haciendo una integración doble para el periodo del tiempo 3, obtenemos:

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3Ls \sqrt{\frac{Wg}{Av\gamma Cd}}}{Hg^2 \left[1 - \frac{WZ}{2AvH\gamma Cd} \right]}}$$

Donde:

t_3 : tiempo del periodo 3.

s: carrera de la válvula de impulso.

Este periodo tiene una duración muy corta y no hay aumento de velocidad significativa, por eso podemos asumir:

$$V_2 = V_3$$

La cantidad de agua perdida en este periodo se obtiene mediante:

$$Q_3 = \gamma A V_3 t_3$$

Donde:

Q_3 : cantidad de agua perdida en el periodo 3.

La energía cinética del agua detenida al final del periodo 3 se determina:

$$E_c = \frac{m(V_2 d)^2}{2}$$

Si

$$m = \frac{\gamma A l}{g}$$

$$E_c = \frac{\gamma A l}{2g} (V_2 d)^2$$

Donde:

E_c : energía cinética al final del periodo 3.

$V_2 d$: velocidad real debida a la altura de alimentación teniendo en cuenta las pérdidas.

Periodo 4.

Al final del periodo 3 la válvula queda completamente cerrada, debido al cambio brusco de velocidad generado por el cierre de la válvula se genera una sobrepresión para vencer la cabeza de presión ($h+h_r$). Aquí la válvula de descarga se abre.

La duración de este periodo debe ser tal que la onda reflejada pueda llegar al almacenamiento.

$$t_4 = \frac{2L}{c}$$

Donde:

t_4 : tiempo del periodo 4.

c : velocidad de la onda de presión.

L : longitud de alimentación.

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

Partiendo de:

$$\Delta H = H_{inicial} - H_{final}$$

$$\Delta H = H - (H + h + h_r)$$

$$\Delta V = V_3 - V_4$$

$$\Delta H = \frac{\Delta V * c}{g}$$

La velocidad al final del periodo 4 es:

$$V_4 = V_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

Donde:

V_4 : velocidad al final del periodo 4.

H: altura de suministro con respecto a la posición del ariete.

h: altura descarga medida sobre el nivel de suministro.

h_r : pérdida de carga debido a la descarga. Calculada como se mostró al inicio del capítulo.

De la ecuación anterior si la velocidad $V_4=0$ y $h_r=0$, decimos que la altura producida por el ariete es la máxima, por lo tanto:

$$h_{max} = \frac{(V_2d) * c}{g}$$

Se utiliza la velocidad V_2d porque es la velocidad que realmente produce el golpe de ariete.

Hay una pérdida de energía cinética debida a la compresión del agua por el golpe de ariete y al ensanchamiento de las paredes de la tubería de impulso.

Esta pérdida de energía cinética se puede determinar por:

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

Si:

$$\Delta v^2 = \frac{(h + h_r)^2 g^2}{c^2}$$

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

Obtenemos:

$$E_{cp} = \frac{\gamma ALg(h + h_r)^2}{2c^2}$$

Donde:

E_{cp} : energía cinética perdida debido a la compresión del fluido.

Periodo 5.

En este periodo se abre la válvula de descarga completamente y se produce la descarga del fluido. En este periodo se aprovecha la energía disponible para bombear un caudal q a una carga de $(h+h_r)$ y que es igual a la diferencia entre la energía calculada en el periodo 3 y la energía gastada en el periodo 4.

$$q(h + h_r) = E_c - E_{cp}$$

$$q = \frac{E_c - E_{cp}}{(h + h_r)}$$

Donde:

q : cantidad de agua descargada durante un ciclo del ariete hidráulico.

$V_5=0$ no hay movimiento del fluido en la tubería de alimentación en este periodo.

Del teorema de la cantidad de movimiento aplicada al periodo 5 tenemos:

$$Fdt = mdv$$

$$(h + h_r)\gamma A t_5 = \frac{\gamma A L}{g} (V_4 - V_3)$$

Si:

$$V_4 = V_3 - (h + h_r) \frac{g}{c}$$

$$V_2 = V_3$$

Se tiene:

$$t_5 = \frac{L}{(h + h_r)g} \left[\sqrt{\frac{Wg}{Av\gamma Cd}} - \frac{(h + h_r)g}{c} \right]$$

Donde:

t_5 : tiempo del periodo 5.

El tiempo de descarga decrece rápidamente con el incremento de la altura de descarga.

Periodo 6.

Al final del periodo 5 la energía disponible para la descarga se ha consumido y la válvula de descarga se cierra completamente debido al resorte, esto representa el cambio de carga de $(H+h+h_r)$ a H en la tubería de impulso.

Este periodo debe ser corto y se estima como en el periodo 4 como el tiempo requerido para la reflexión de la onda de presión en la tubería de impulso.

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

Donde:

t_6 : tiempo del periodo 6.

El cambio de presión se transforma en energía cinética lo que produce movimiento del agua hacia el suministro.

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

Ec perdida en el retardamiento = Ec producida para el retroceso del agua

$$\frac{\gamma ALg(h + h_r)^2}{2c^2} = \frac{\gamma Al}{2g} V_6^2$$

$$V_6 = -\frac{(h + h_r)g}{c}$$

Donde:

V_6 : Velocidad al final del periodo 6.

Periodo 7.

Al final del periodo 6 el agua en la tubería de impulso tiene una velocidad negativa, entonces la válvula de descarga se abre por la fuerza del resorte y la diferencia de presión debida al retroceso del agua.

$V_7=0$ no hay movimiento del fluido en la tubería de alimentación en este periodo.

Este periodo determina el tiempo en que el agua se mueve lejos de la válvula de impulso, puede encontrarse mediante la ecuación base del periodo 1.

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

Solucionando:

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

Reemplazando V_6 se tiene:

$$t_7 = \frac{L(h + h_r)}{H_a}$$

Donde:

t_7 : tiempo del periodo 7.

La magnitud de la distancia y debida al retroceso del agua dentro de la tubería de impulso puede ser determinada igualando:

$$V_1 = V_6$$

$$\sqrt{\frac{2gHy}{L}} = \frac{(h + h_r)g}{c}$$

Obtenemos:

$$y = \frac{(h + h_r)^2 Lg}{2Hc^2}$$

Donde:

y : distancia debido al retroceso del agua en la tubería de impulso.

Hasta aquí se describe el modelo realizado por Kroll.

Resumiendo y destacando las ecuaciones más importantes.

8. Cantidad de agua descargada en un ciclo.

$$q = \frac{E_c - E_{cp}}{(h + h_r)}$$

9. Cantidad de agua desechada por ciclo.

$$Q_{perd} = Q_2 + Q_3$$

10. Duración total del ciclo.

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

11. Eficiencia global.

$$\eta = \frac{q * h}{Q_{total} * H}$$

Donde:

q: caudal descargado en un ciclo.

h: altura de descarga.

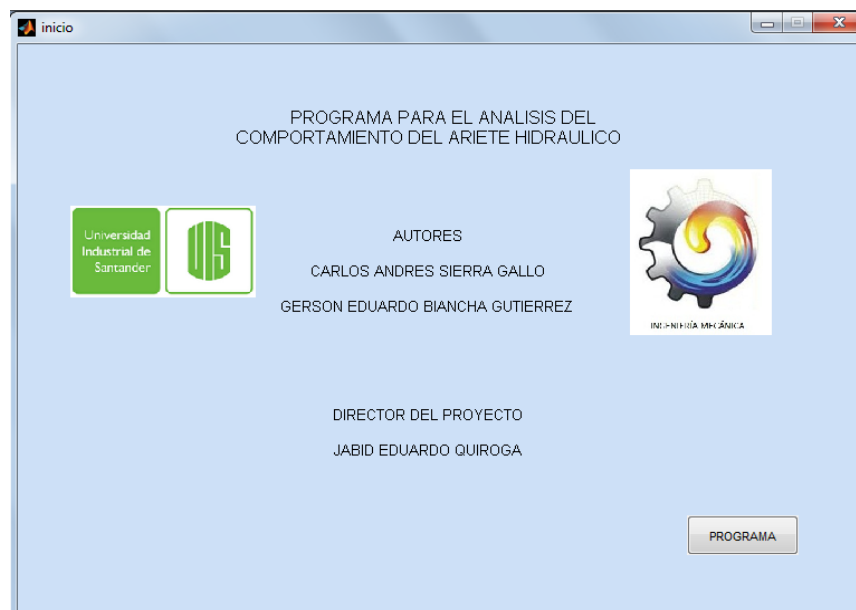
Q_{total} : caudal resultante de la suma del caudal descargado con el caudal perdido.

H: altura de suministro o alimentación.

ANEXO B. PROGRAMA PARA ANÁLISIS TEÓRICO DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO.

El programa realizado en la plataforma de interfaz gráfica de matlab (GUI) tiene una serie de ventanas mediante las cuales el usuario puede interactuar y realizar un rápido análisis del funcionamiento del ariete hidráulico, a continuación se describe el programa para análisis del funcionamiento del ariete hidráulico.

- Ventana de presentación.



Esta ventana muestra la finalidad del programa, la información de los autores y el director del proyecto. Tiene un botón que permite ingresar al programa de análisis.

➤ Ventana de ingreso de datos.

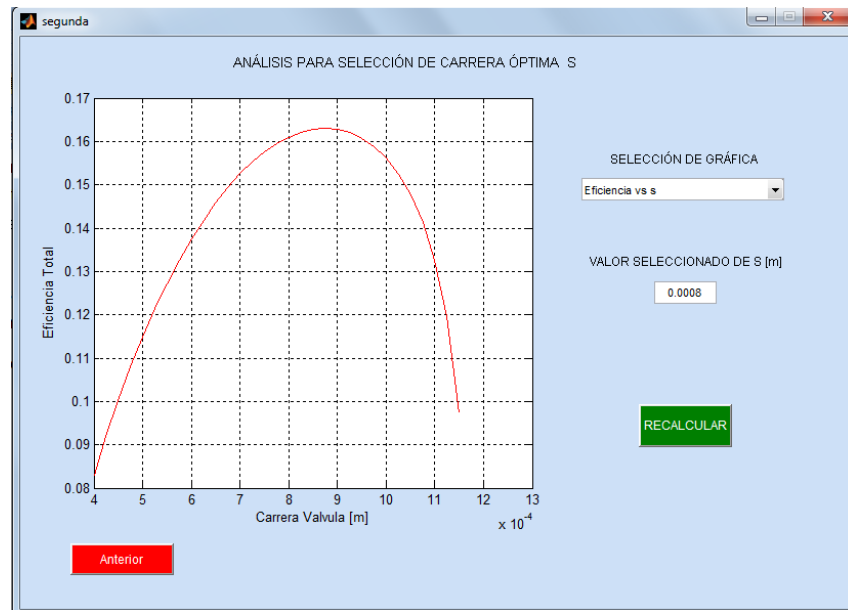
The screenshot shows a software interface for data entry. It is titled "primera" and "INGRESO DE DATOS PARA ANÁLISIS". The interface is divided into several sections:

- DATOS GENERALES:**
 - PROPIEDADES:** Fluidos de Trabajo (agua), Material de Tubería (hierro galva...).
 - CONDICIONES:** Altura Alimentación [m] (1.2), Altura Descarga [m] (6.2), Longitud Alimentación [m] (6), Perdidas Accesorios (K) (2.53).
- DATOS DIMENSIONALES ARIETE:**
 - RESORTE:** Constante [N/m] (593), Carrera Min (0.0004), Carrera Max (0.00115).
 - Area Valvula Impulso [m2] (Dval=1-1/2), Area Valvula descarga [m2] (Dval=1-1/2), Area Alimentación [m2] (Dali=1-1/2).
 - Espesor Tubería [m] (0.004), Volumen Acumulador [m3] (0.00116).
- Diagrama:** A schematic diagram showing a green tank labeled "Hall" connected to a pipe system. The pipe has a valve and is labeled "Lali". The diagram also shows a vertical line labeled "hdes" and a horizontal line labeled "Lali".
- Botón:** A green button labeled "RESOLVER".

En esta ventana se realiza el ingreso de los datos para el análisis, tiene elementos que permiten introducir el valor de las variables y menús para características predefinidas.

Tiene un gráfico que muestra la forma de tomar el valor de la variable en el modelo físico, además posee un botón mediante el cual se pasa al cálculo del funcionamiento del ariete en función la carrera de la válvula.

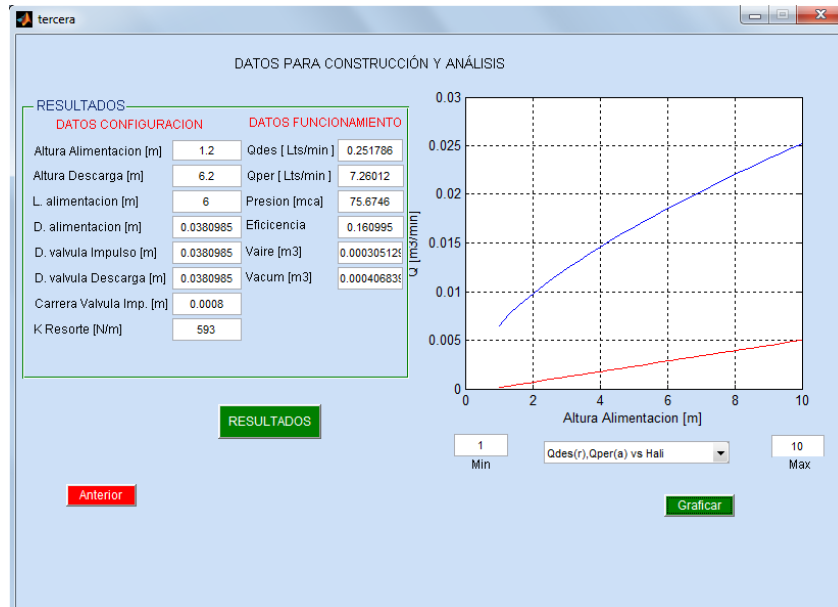
- Ventana de análisis en función de la carrera de la válvula de impulso.



Después del ingreso de los datos se tiene una ventana en la cual se puede realizar un análisis de algunas variables como el caudal descargado, el caudal perdido, la eficiencia, la frecuencia de los pulsos, entre otras; eso en relación con la carrera de la válvula de impulso que es el parámetro principal en el funcionamiento del ariete hidráulico.

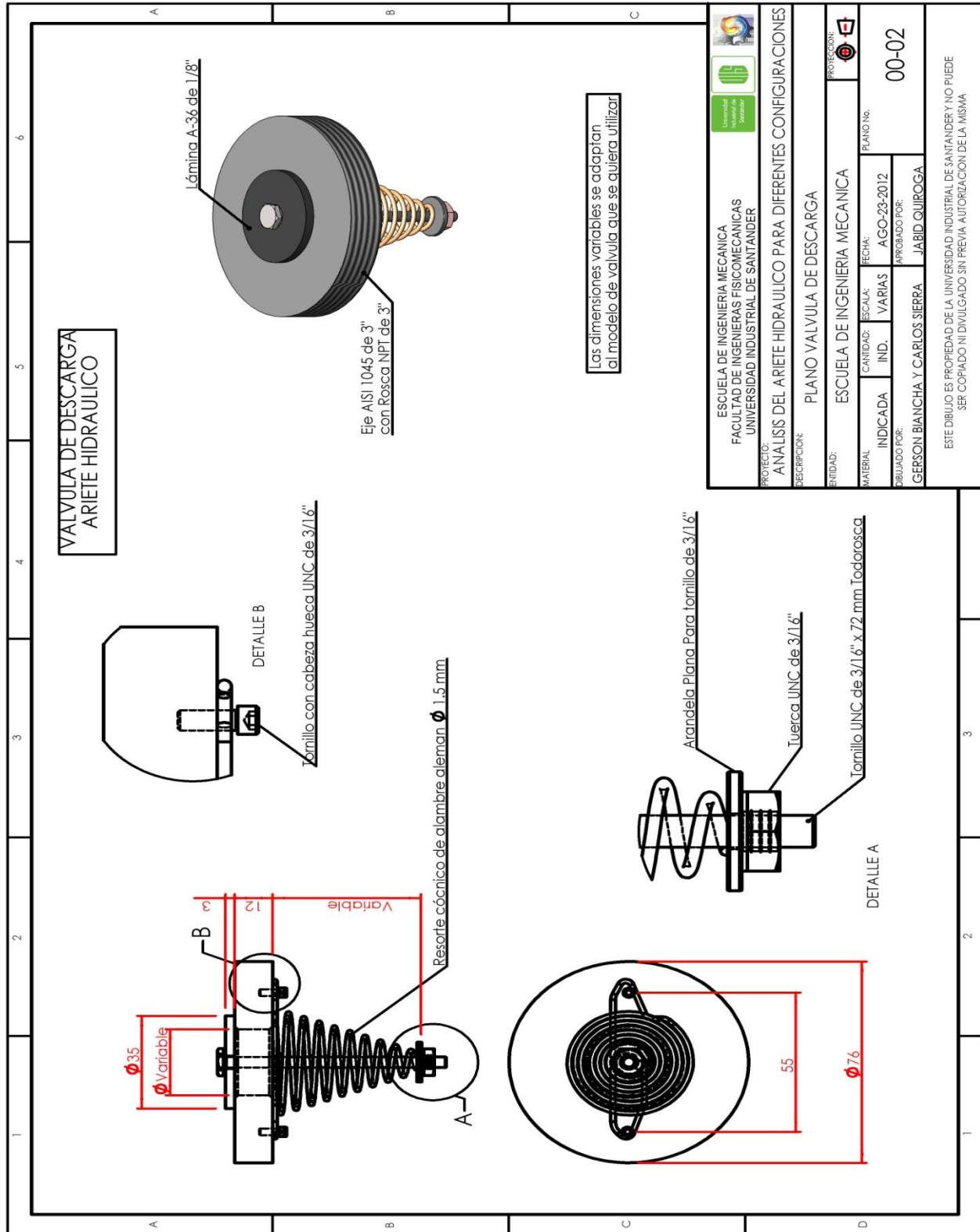
De esta ventana se concluye cual es la carrera de válvula que se necesita para un funcionamiento deseado, este valor se introduce en la casilla respectiva y procede a recalcularse el sistema.

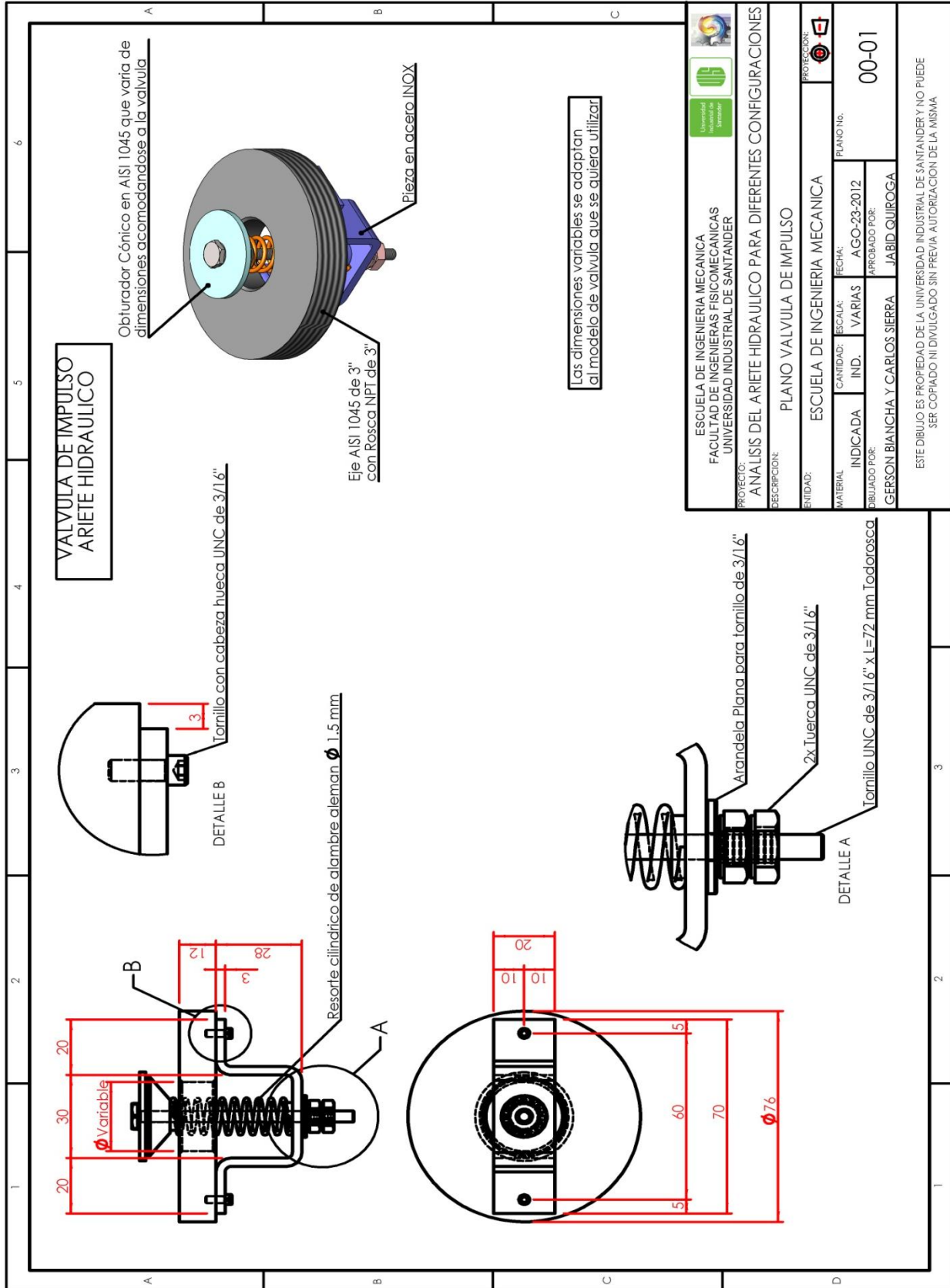
➤ Ventana de resultados finales.



Finalmente se obtiene una ventana en la cual se muestran los resultados que determinan la configuración y los datos teóricos de funcionamiento para el sistema. Además tiene otra zona donde se puede realizar un análisis más detallado de la configuración obtenida observando la influencia de las variables presentes en el funcionamiento del ariete.

ANEXO C. PLANOS VÁLVULAS DESCARGA E IMPULSO.





ANÁLISIS DEL ARIETE HIDRÁULICO PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES

CARLOS ANDRÉS SIERRA GALLO

GERSON EDUARDO BIANCHA GUTIÉRREZ

RESUMEN

En este trabajo se estudia la influencia de algunos parámetros en la operación del ariete hidráulico. Las variables analizadas son el resorte de la válvula de impulso, el acumulador, la carrera de la válvula de impulso y la combinación de las áreas de impulso y descarga en la eficiencia del ariete. El análisis experimental se realiza con la construcción de modelos de ariete hidráulico que permitan variar los parámetros para análisis para cada experimento se tiene en cuenta la carrera de la válvula de impulso como parámetro principal.

Adicionalmente, un modelo teórico del ariete es validado usando los resultados experimentales. El modelo permite extender el estudio de los parámetros analizados incluyendo un análisis específico de la carrera de la válvula de impulso. De los resultados obtenidos se concluye que el resorte de la válvula de impulso influye significativamente en la eficiencia del ariete, que el acumulador no representa significativa influencia en el ariete y que la combinación de las válvulas afecta considerablemente el funcionamiento del sistema.

PALABRAS CLAVES: Golpe de Ariete, Relación de Parámetros, Energía Alternativa.

INTRODUCCIÓN

La bomba de ariete es un sistema que aprovecha la energía del agua proveniente de una altura determinada para el bombeo de parte de la misma, este sistema antiguo ha tomado importancia en los últimos años ya que es uno de los dispositivos que aprovecha la llamada energía alternativa y que es amigable con el medio ambiente. Autores han analizado su funcionamiento desde la experimentación de algunos de sus parámetros hasta proponer modelamientos matemáticos de su comportamiento.

En la literatura se reportan estudios en los que se ha buscado la influencia de los parámetros del ariete hidráulico en la eficiencia del sistema de bombeo por ariete hidráulico. Cararo, D.C. et al. [1] estudia experimentalmente la influencia del volumen, el diámetro de descarga y material del acumulador y la posición de las válvulas de descarga e impulso con respecto al cuerpo del ariete hidráulico. Determina que se obtiene un mejor rendimiento del ariete cuando el acumulador utilizado tiene un volumen pequeño y se construye con material elástico. Adicionalmente, diámetros de descarga del acumulador de mayor tamaño y la posición horizontal de la válvula de impulso reportaron un mejor desempeño, del ariete. En este estudio no se consideró la influencia de la carrera de la válvula de impulso.

Krol [2] realizó un modelamiento del ariete dividiendo el ciclo de operación de este en 7 periodos. Este modelo no tiene en cuenta las pérdidas presentes en la válvula de impulso por fuerzas de arrastre y pérdidas por efecto

tobera. Filipan, V. et al. [3] redujo este sistema a solo 3 periodos e implementó un modelo en el cual tomó como nodos cada elemento del sistema de bombeo. Rennie & Bunt [4] también realizaron un modelo teórico. Ambos autores [3] y [4] utilizaron la misma configuración para poner a prueba el modelamiento. En estos estudios no se validaron a través de la experimentación.

Los autores de este trabajo se realiza un estudio experimental de la operación del ariete y se valida a través de un análisis teórico, para dicho análisis se realizaron modelos de ariete los cuales permiten la variación de el volumen de acumulador, la constante del resorte de la válvula de impulso y la relación de las áreas de las válvulas de impulso y descarga, para así determinar su influencia en el funcionamiento del sistema de bombeo.

MARCO TEÓRICO

GOLPE DE ARIETE.

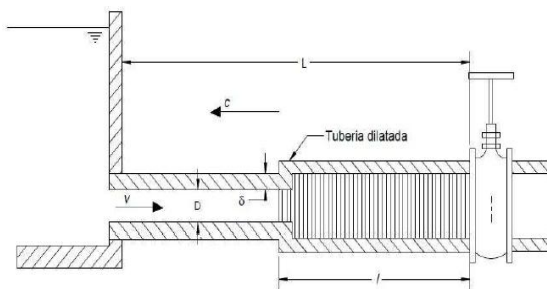
El golpe de ariete es un fenómeno transitorio en que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible. Este fenómeno se produce en los conductos cuando se presentan abruptas detenciones o aperturas de flujo.

La figura 1 muestra una tubería de longitud L , espesor δ y diámetro interior D por la que circula un fluido y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si ésta se cierra rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la

energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última: se ha producido una sobrepresión, o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo.

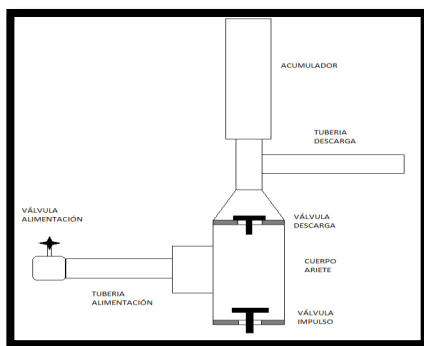
Figura 18. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula.



FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRÁULICO

La figura 2 muestra el esquema de la configuración de los modelos de ariete hidráulico para la realización de los experimentos.

Figura 2. Esquema del ariete Hidráulico.



El ciclo de bombeo que ocurre en un ariete hidráulico se describe mediante los siguientes pasos:

Se inicia con la apertura de la válvula de alimentación, luego el agua se va acelerando hasta llegar a la velocidad que comienza a cerrar la válvula, debido a la fuerza de arrastre realizada por el agua la válvula se cierra esto ocurre tan rápido que se genera un golpe de ariete, con la sobrepresión generada se abre la válvula de descarga y el agua pasa a la tubería de descarga, la salida del agua reduce la presión y las válvulas vuelven a su posición inicial por los resortes que tienen cada una, esto da inicio a un nuevo ciclo con la aceleración del agua nuevamente.

Debido al funcionamiento continuo mediante pulsos se puede obtener un sistema de bombeo mediante la utilización de una diferencia de altura entre la alimentación y el ariete, la ventaja de este principio es que se pueda bombear cualquier tipo de fluido con pocas impurezas.

DESARROLLO

Los parámetros seleccionados para el análisis son:

La constante elástica de los resortes de las válvulas.

El volumen del acumulador.

Las áreas de las válvulas.

La carrera de la válvula de impulso

El procedimiento de la experimentación es de la siguiente manera:

Se inicia el primer ciclo de bombeo.

Se da paso al agua proveniente de la alimentación, el sistema comienza a funcionar pero hay q esperar a que estabilice esto es cuando el caudal de descarga sea constante, se consignan los datos que son constantes para el experimento, se gradúa una carrera de válvula que permita la frecuencia más alta posible y que bombee una cantidad considerable de agua, esto es requerido para el análisis; estando estable el sistema se toman los datos de caudal de descarga y perdido por la válvula de impulso, se toman también la cantidad de pulsos todos estos datos para un minuto. Se gradúa nuevamente a una frecuencia menor que la anterior y se espera que se estabilice, se vuelven a medir caudales y pulsos y el proceso termina cuando la frecuencia es muy baja y el caudal descargado tiende a cero.

Este procedimiento es únicamente para analizar una sola variable, para las demás variables se modifica la variable que se va a analizar y se dejan los demás parámetros constantes.

El modelo analítico usado en esta investigación se realiza en la plataforma de interfaz gráfica de matlab (GUI), este programa permite realizar un estudio del ariete hidráulico para varias configuraciones dependiendo de la carrera de la válvula de impulso y posteriormente definir una configuración específica y obtener los resultados teóricos.

El modelo matemático utilizado se basa principalmente en el planteado por [2]. Este modelo se ha modificado incluyendo las

variables referentes a la fuerzas de arrastre y pérdidas por efecto tobera en las válvulas.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó un análisis estadístico de DUNCAN para determinar cuál es el mejor valor para cada variable analizada.

Análisis de la influencia de la constante del resorte de la válvula de impulso.

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron:

D válvula impulso: 40 mm

D válvula descarga: 40 mm

H alimentación: 1.2 m

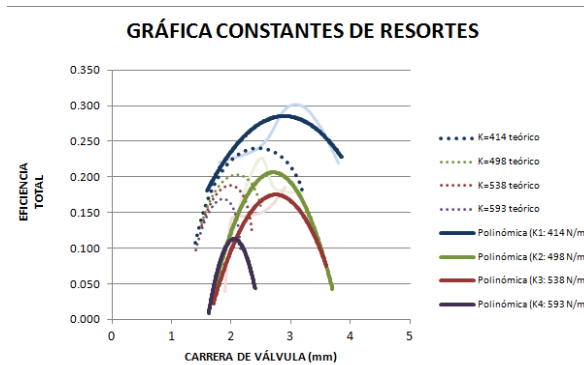
H descarga: 6.1 m

Volumen de acumulador: 1.16 litros

Se realiza el análisis de los resultados teóricos comparándolos con los resultados experimentales.

Se observa en Figura 3 que la eficiencia total con respecto a la carrera de la válvula de impulso presenta una forma de parábola invertida, lo cual indica que hay un valor máximo para la eficiencia total del sistema con respecto a una configuración determinada.

Figura 3. Gráfica constante de los resortes



Otra observación es que a medida que la constante del resorte aumenta la eficiencia total disminuye, esto se observa teóricamente como experimentalmente. Para una menor constante el cierre de la válvula de impulso es más rápido lo cual reduce el caudal perdido y esto hace que la eficiencia total aumente.

También a medida que la constante del resorte aumenta la curva de funcionamiento del ariete se corre hacia la izquierda, es decir funciona a una carrera de válvula menor, este comportamiento se observa tanto experimentalmente como teóricamente.

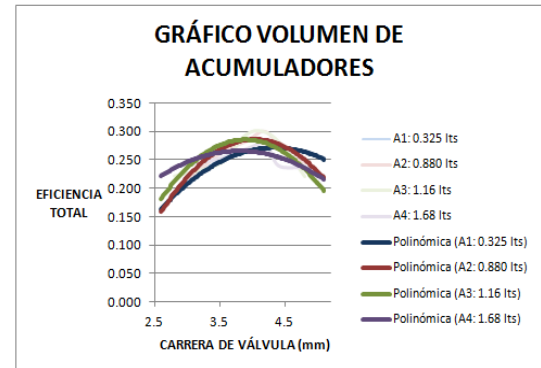
Volumen del acumulador

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron las mismas del experimento anterior solo que aquí se modificó los volúmenes del acumulador y se dejó el resorte fijo:

Resultados:

En la figura 4 se muestran los resultados experimentales para los acumuladores.

Figura 4. Gráfica de los acumuladores



Conclusiones parciales del experimento.

El análisis Duncan para la experimentación con los acumuladores concluye:

El acumulador no tiene una influencia significativa en la eficiencia global del sistema. El aumento de caudal descargado no es considerable.

Experimentalmente se observó que un volumen de acumulador mayor presenta un flujo más continuo.

Combinación de las áreas de las válvulas descarga e impulso

Para este experimento las condiciones de funcionamiento fueron:

H alimentación: 1.2 m

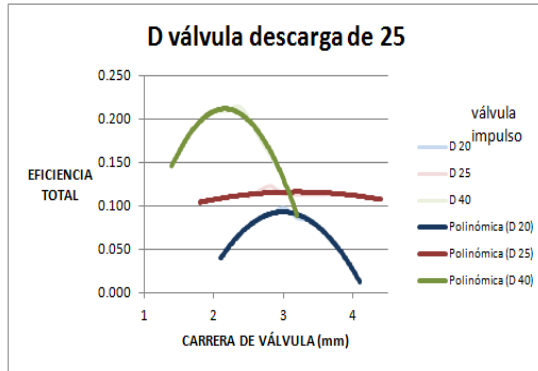
H descarga: 4.5 m

Constante del resorte: Dependiendo de la válvula de impulso

Volumen de acumulador: 1.16 litros

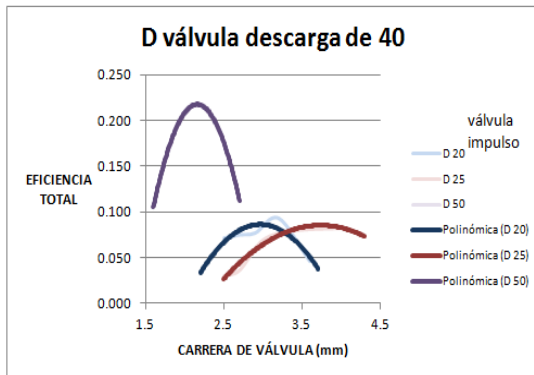
Resultados:

Figura 5. Área val. Descarga 2: d 25



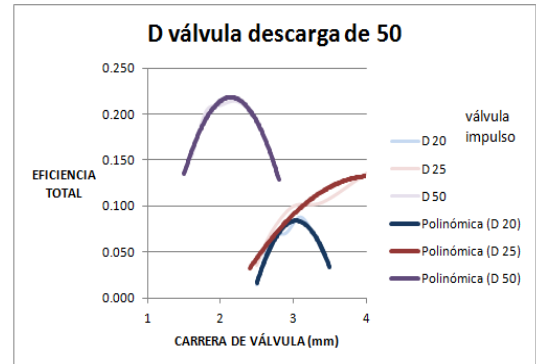
Se observa que a medida que la válvula de impulso es mayor se tiene una mayor eficiencia, esto para una válvula de descarga fija.

Figura 6. Área val. Descarga 3: d 40



La válvula de descarga es grande y facilita la salida del fluido en la descarga. Al igual que los experimentos anteriores para una válvula de impulso mayor es mejor la eficiencia global.

Figura 7. Área val. Descarga 4: d 50



Se mantiene la tendencia que para una válvula de impulso mayor aumenta la eficiencia global.

El análisis Duncan para la experimentación con las áreas concluye:

La configuración de las válvulas influye significativamente en la eficiencia global del sistema.

Una mayor área en la válvula de descarga permite una mayor salida del fluido lo cual reduce las pérdidas en la descarga. Se debe tener en cuenta la fuerza realizada por el resorte de esta válvula.

A medida que el área de la válvula de impulso es mayor se obtiene una mayor eficiencia.

CONCLUSIONES

La influencia del resorte de la válvula de impulso afecta significativamente la eficiencia global del sistema, se determinó que hay un límite superior y uno inferior que debe tener la constante del resorte para un debido funcionamiento del ariete, además

que para una constante menor la eficiencia global es mayor.

El acumulador como parámetro en el sistema de bombeo por ariete hidráulico no afecta la eficiencia global pero si permite un flujo continuo en la descarga cuando se tiene un volumen de acumulador grande.

La relación de las válvulas afecta considerablemente la eficiencia global del sistema, se requiere que la válvula de descarga sea un poco mayor que la válvula de impulso y estas áreas las determina las condiciones del medio en que va a trabajar el ariete hidráulico.

Para una válvula de descarga fija, una válvula de impulso de mayor área es más eficiente que una válvula de impulso de menor área.

Una válvula de descarga mayor permite más facilidad de descarga del fluido.

REFERENCIAS

- [1] Cararo, D.C., Damasceno, F.A.,Griffante, G., Alvarenga, L.A. 2007. *Hydraulic ram pump manufacturer features using alternative materials* | [Características construtivas de um carneiro hidráulico com materiais alternativos]. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 11 (4) , pp. 349-354
- [2] Krol, J. "The automatic hydraulic ram: Its theory and design". Paper Nº 76-JE-17. ASME. 1976.
- [3] Filipan, V.; Virag, Z.; Bergant, A. (2003). Mathematical Modelling of a Hydraulic Ram Pump System | [Matematično modeliranje hidravličnega ovna]. *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering* 49 (3), pp. 137-149
- [4] Rennie, L. C., E. A., Bunt (1981) The automatic hydraulic ram. The South African Mech. Eng., Vol. 31, No. 10, 258-273, No. 11, 286-311.