



INSTITUTO SUPERIOR MINERO
METALURGICO DE MOA
DR. ANTONIO NUÑEZ JIMENEZ

FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Diploma

En opción al Título de

Ingeniero Mecánico

**Título: Evaluación de los parámetros de operación de un ariete
hidráulico monopulsor para prácticas de laboratorio**

Autor: Adelki Fonsca Urquía

Tutor: Dr. C. Héctor Luis Laurencio Alfonso.

Ms. C. Rodney Martínez Rojas

Moa, 2015
“Año 57 de la Revolución”



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Adelki Fonseca Urquía, aspirante al título de Ingeniero Mecánico, autor del Trabajo titulado: Evaluación de los parámetros de operación de un ariete hidráulico monopulsor para prácticas de laboratorio realizado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", y los tutores Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso y Ms. C. Rodney Martínez Rojas certificamos la propiedad intelectual y la calidad del mismo a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

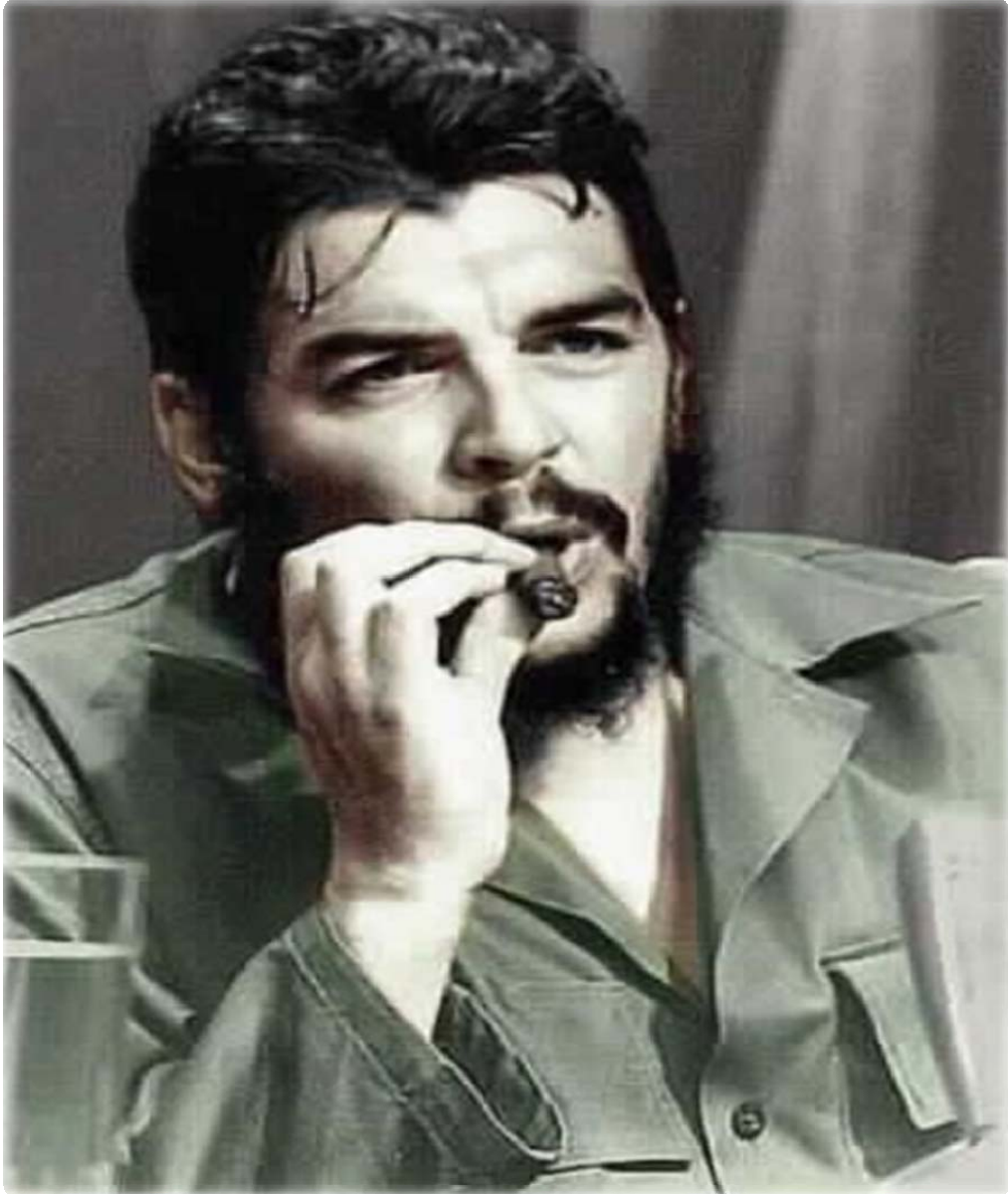
Para que así conste firmamos la presente:

Autor: Adelki Fonseca Urquía _____

Tutor: Dr.C. Héctor Luis Laurencio Alfonso _____

Tutor: Ms. C. Rodney Martínez Rojas _____

PENSAMIENTO



“Debemos preocuparnos por prestar servicios con eficiencia y óptima calidad, y simultáneamente producir el nuevo hombre que constituye y crea la nueva sociedad socialista, que es el hombre que produce, sirve, dirige, controla y supervisa. Hace falta tener control y supervisión para prestar servicios con eficiencia....”

Ernesto Che Guevara

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a mi Dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento.

A mi familia por quienes soy lo que soy.

A mis dos hijas, mi hermana Barbarita y mi esposa las cuales han sido mi motivo y mi inspiración.

A mi Madre por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos difíciles, y por ayudarme con los recursos necesarios para estudiar. Me ha dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para seguir mis objetivos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de tesis realizado en la Universidad de Moa, ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, es un esfuerzo en el cual, directa o indirectamente, participaron distintas personas, opinando, corrigiendo, teniéndome paciencia, dando ánimo, acompañando en los momentos de crisis y en los momentos de felicidad. Me ha permitido aprovechar la competencia y la experiencia de muchas personas que deseo agradecer.

En primer lugar a mis tutores Dr. C. Héctor Laurencio Alfonso y Ms. C. Rodney Martínez Rojas, mi más amplio agradecimiento por haberme confiado este trabajo en persona, por su paciencia, por su valiosa dirección y apoyo por seguir este camino de tesis y llegar a la conclusión del mismo.

Todos mis compañeros estén donde estén, se merecen muchas y buenas palabras, ya que con ellos he compartido despachos, laboratorios e incontables horas de estudio y buenos ratos, lo cual no tiene precio. Nos hemos dado ánimos por el camino y eso siempre ayuda. Por todo el tiempo que me han dado, en especial Dennis, Sadis, Francisco, Sablón, Michel y Jorge, gracias por el respaldo y la amistad.

Un especial agradecimiento a mi amiga Yarelis por ser incondicional, por su gran ayuda y amistad sin la cual todo hubiera resultado más difícil de lograr.

No puedo olvidar en mis agradecimientos a mis amigos Osmany, Bron, Miguelito, Tony, Raulito, Pancho, Yonniss, María Elena, Ángela, Jorgito y Ramón. Por estar siempre conmigo, por su apoyo en las buenas y las malas, muchas gracias.

Todo esto nunca hubiera sido posible sin el amparo incondicional que me otorgaron y el cariño que me inspiraron mi madre María Antonia, mis hijas Claudia y Brenda, mi esposa Yaneivi, mi suegra Anita, mis hermanos Barbarita, Arleidis, Andy, Alibeth, Arletis y Alexey, mis padres Manuel y Raudel, mis abuelos Toñito y Regina, mis tíos Eva, María, Arelis, y Cheo, mis primos Ibrain, Rolandito, Edgar, Yury, Pochy Ariannys y Jose, que, de forma incondicional, entendieron mis ausencias y mis malos momentos. Que a pesar de la distancia siempre estuvieron a mi lado para saber cómo iba mi proceso. Las palabras nunca serán suficiente para testimoniar mi aprecio y mi agradecimiento.

A todos ustedes mi mayor reconocimiento y gratitud.

RESUMEN

El trabajo reseña una amplia información sobre el principio de funcionamiento de los arietes hidráulicos y los parámetros para su óptima instalación. El estudio realizado ha permitido formular las ecuaciones del principio teórico del ariete hidráulico monopulsor y su comprobación experimental.

Se formuló el sistema de ecuaciones del principio teórico-experimental del ariete hidráulico considerando la relación entre las variables: flujo volumétrico de carga, flujo volumétrico de pérdida y flujo volumétrico de bombeo, altura de carga y de descarga, relación de flujo y número de golpes por minuto de la válvula de impulso.

Se modifica la válvula de impulso empleando una válvula de compuerta, donde se obtienen mejoras significativas del rendimiento volumétrico, alcanzando un valor máximo de 72,24 %, y en el número de golpes, el que varía entre 77 y 99 golpes por minuto; para estas las mejores condiciones de trabajo se obtienen para el valor de flujo volumétrico de 0,22 m³/h, correspondiéndose a la altura de descarga de 2,8 m.

Se realiza una valoración considerando el costo equivalente para 24 horas de trabajo del ariete donde se indican las ventajas económicas de la utilización del equipo para el bombeo de agua.

ABSTRACT

The paper outlines extensive information on the operating principle of the hydraulic rams and parameters for optimal installation. The study has allowed us to formulate the equations of theoretical principle of monopulsor ram and its experimental verification.

The system of equations of the theoretical-experimental principle of the hydraulic battering ram was formulated considering the relationship among the variables: the system of equations of theoretical and experimental beginning of ram considering the relationship between the variables was made per minute impulse valve.

The impulse valve is modified using a gate valve, where significant improvements are obtained volumetric efficiency, reaching a maximum value of 72.24%, and the number of strokes, which varies between 77 and 99 beats per minute; for this the best working conditions are obtained for the value of volumetric flow of 0.22 m³ / h, corresponding to the discharge height of 2.8 m.

An assessment is made considering the cost equivalent to 24 working hours ram where the economic benefits of the use of equipment for pumping water are indicated.



INDICE

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Introducción.....	4
1.2. Estado del arte.....	4
1.3. Golpe de ariete	6
1.4. Principio de funcionamiento del ariete hidráulico y elementos para la instalación	7
1.4.1. Elementos para la instalación de arietes	9
1.5. Períodos en que se divide el ciclo de trabajo del ariete	9
1.6. Conclusiones parciales del capítulo	15
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO PARA LA EVALUACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO	16
2.1. Introducción.....	16
2.2. Pérdidas hidráulicas por fricción; primarias y secundarias	16
2.3. Altura desarrollada por el ariete y caudal circulante	17
2.3.1. Diámetro de la tubería forzada	18
2.4. Magnitud del golpe de ariete	19
2.4.1. Tiempo de cierre de la válvula.....	20
2.5. Ecuaciones de flujo y pérdidas hidráulicas para el Ariete Monopulsor	22
2.5.1. Fuerzas hidráulicas sobre la válvula de derrame o impulso.....	23
2.5.2. Presión máxima y mínima de la instalación	25
2.6. Metodología para evaluar la eficiencia	25
2.7. Materiales y técnica experimental	27
2.7.1. Descripción de la parte hidráulica de la instalación	29
2.8. Conclusiones parciales del capítulo.....	30
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE MONOPULSOR.....	31
3.1. Introducción.....	31
3.2. Determinación del régimen de trabajo.....	31
3.3. Comportamiento operativo de la válvula de impulso	35
3.4. Evaluación del rendimiento del ariete	37



3.5. Incidencias económicas y ambientales	41
3.5.1. Valoración ambiental.....	44
3.6. Indicaciones generales para la instalación y operación de un ariete	44
3.6.1. Regulación y ajuste del régimen de trabajo	48
3.7. Conclusiones parciales del capítulo.....	49
CONCLUSIONES GENERALES.....	50
RECOMENDACIONES	51
BIBLIOGRAFÍA	52
ANEXOS	



INTRODUCCIÓN GENERAL

La humanidad se encuentra ante un dilema con la generación de energía: por un lado, las fuentes convencionales de energía; carbón, gas y petróleo son agotables y altamente contaminantes, y por el otro, las fuentes de energía renovables: hidráulica, eólica, fotovoltaica y otras, son de poca densidad energética distribuida, y discretas con la secuencia de los días y las noches y las estaciones.

Una de las mayores aplicaciones de las fuentes renovables de energía, es la utilización de la energía hidráulica, aprovechada mediante el empleo de máquinas diseñadas con estos fines.

La bomba de ariete hidráulico es una máquina de construcción y funcionamiento muy sencillo y de bajo costo, este aprovecha la elevada presión generada por el fenómeno conocido como “golpe de ariete hidráulico” para impulsar un fluido a una altura superior de su altura inicial.

Por el bajo costo de construcción, costo de operación cero y muy baja contaminación (no se utiliza ningún tipo de energía ni combustible, fuera de la fuerza del fluido) se considera que este equipo puede ser utilizado en casi toda actividad donde el caudal inicial de fluido no sea un problema o pueda ser reciclado.

El ariete hidráulico provoca los denominados Golpes de Ariete, estos se producen por variaciones muy rápidas de las condiciones de funcionamiento de una instalación (velocidad-presión). En todo caso se debe analizar la variación de presión producida por la desaceleración del fluido consecuencia del cierre rápido de una válvula.

Situación problemática:

En la asignatura Mecánica de los Fluidos se tratan como uno de los elementos fundamentales la fuerza de empuje ascensorial y el choque hidráulico, la clasificación de las bombas, los parámetros de trabajo de las bombas y de los sistemas de bombeo, las curvas características de las bombas, además de tratarse la regulación

de los parámetros de trabajo de las bombas como sistema de habilidades de la asignatura.

Dada la situación planteada, urge la necesidad de la introducción de prácticas de laboratorio para dar solución a las necesidades antes planteadas, como son las propiedades de un sistema de bombeo por gravedad para la creación de habilidades prácticas en los estudiantes, lo que se ha dificultado por la falta de equipamientos de laboratorio; por lo que se requiere de una instalación que permita facilitar el análisis del comportamiento del agua por gravedad a través de un ariete, contribuyendo a mejoras de las prácticas de laboratorios con fines docentes y la elevación de la calidad de las asignaturas.

El problema lo constituye:

Insuficiencia de equipamientos para un sistema de bombeo por gravedad, donde se determinen los parámetros de trabajo de la bomba de ariete, como son, el flujo, la presión, la altura y los rendimientos; lo que dificulta el desarrollo de prácticas docentes en este sentido.

Se establece como **objeto** del trabajo:

La instalación de bombeo de agua por gravedad mediante ariete hidráulico monopulsor.

Campo de acción:

Rendimiento de bombas de ariete con fines de laboratorio.

Dado el problema a resolver se plantea la siguiente: **hipótesis:**

Mediante el análisis de los principales elementos mecánicos, tales como la válvula de impulso y el tanque hidroneumático, su combinación y parámetros de la instalación del ariete hidráulico monopulsor; se puede demostrar la mejora en el pulso y rendimiento del equipo mediante el uso de una válvula de paso modificada, utilizada para la generación del golpe de ariete.



Se define como **objetivo** del trabajo:

Evaluar los parámetros de trabajo del ariete monopulsor para el bombeo de agua; contribuyendo en este sentido a la realización de investigaciones y prácticas docentes.

Para cumplir el objetivo central, se desarrollaron los siguientes **objetivos específicos**:

- + Analizar los rendimientos del ariete teniendo en cuenta las modificaciones de la válvula de impulso, donde se emplea una válvula de paso de compuerta.
- + Exponer los pasos de operación para la obtención de datos.
- + Analizar las incidencias económicas y ambientales de la instalación.

De acuerdo al objetivo propuesto, se plantean las siguientes **tareas del trabajo**:

- + Estudio bibliográfico referente a la operación de arietes hidráulicos y prácticas de mecánica de fluidos.
- + Recopilación de materiales e instrumentación para la instalación.
- + Desarrollo de la metodología de operación del ariete.
- + Realización de corridas experimentales con agua.
- + Análisis económico y ambiental de la instalación en operación.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

1.1. Introducción

Las bombas hidráulicas se clasifican en tres grandes grupos: Bombas de desplazamiento positivo, bombas de desplazamiento no positivo y las bombas de fluido impelente, encontrándose dentro de estas los arietes hidráulicos Izquierdo, R. (2007), siendo de gran importancia el principio de funcionamiento y los parámetros para su instalación, además recopilaremos información de los tipos de arietes existentes en el mundo, con el **objetivo** de plantear los fundamentos teóricos relacionados con el diseño hidráulico de arietes garantizando su trabajo eficiente y funcional.

1.2. Estado del arte

El Ariete Hidráulico, inventado por Montgolfier, (1797), permite elevar parte del agua de un río, arroyo o manantial a una altura superior utilizando tan sólo la energía del agua que fluye. Para ello se aprovecha el efecto que se consigue al detener de golpe el flujo de agua en una tubería, y que consiste en convertir en energía potencial la energía cinética inherente al agua, a este tipo de ariete se los denomina convencionales Boytell, (1972).

El ariete hidráulico, en su versión convencional, es un equipo pesado, voluminoso y relativamente costoso en comparación con otros. Además, su utilización queda limitada a condiciones específicas; o sea, debemos disponer de un caudal de agua constante y un desnivel suficiente para lograr la potencia deseada. Estas limitaciones fueron superadas a partir de la concepción y diseño del ariete hidráulico monopulsor.

El ingeniero belga Jan Haemhouts en el año de 1988 inició en Nicaragua un estudio para superar las principales limitaciones del concepto convencional del ariete y adecuó esta tecnología a los requerimientos modernos de un proceso industrial.

En Cuba en el año de 1990 el ingeniero Jan Haemhouts con miembros de la Asociación Nacional de Agricultores Pequeños (ANAP), y luego en Camagüey, en el

Centro Integrado de Tecnología Apropriada (CITA), del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, logró resultados tanto cualitativos como cuantitativos. El primer paso consistió en confirmar en la práctica el contenido de la memoria descriptiva de su patente relacionada con el ariete hidráulico monopulsor.

La esencia del nuevo método consiste en la sustitución de la única válvula de impulso de los arietes convencionales por un conjunto adecuado de válvulas en posiciones óptimas, en dependencia de determinadas condiciones de producción e instalación para aprovechar mejor los caudales disponibles, aumentando la potencia y los rendimientos. Esto permite una baja relación entre la velocidad máxima del agua en el sistema y la velocidad del agua al momento del cierre de las válvulas, con un mínimo de contra impulso para su abertura automática, lo que permite reducir el largo y el diámetro del tubo de impulso, Ayala (2005). También aporta la ventaja de la reducida necesidad de amortiguación en la magnitud de inyección de agua en la cámara de aire, por lo que puede reducirse su volumen. El funcionamiento del ariete hidráulico depende de muchas variables y es difícil pensar en reglas absolutas, pues es una máquina muy versátil. Con experiencia en la fabricación y explotación de este tipo de bombas se ha logrado establecer parámetros que nos permiten construir eficientemente este tipo de instalaciones Dubbel, (1975).

El golpe de ariete fuerza motriz del ariete hidráulico se encuentra desarrollado en algunas aplicaciones e investigaciones, Ayala, (2005) en su trabajo investiga el incremento de la eficiencia de la maquina aumentando el número de campanas neumáticas, Ayala, (2005) aplica el golpe de ariete para accionar una bomba de diafragma y Léveillé, (2004) aplica el golpe de ariete para accionar un compresor de aire. Los trabajos citados no exponen los resultados de estas aplicaciones que permitan valorar el aprovechamiento del golpe de ariete. Nuevas herramientas, como el diseño asistido por computadoras, permiten facilitar las investigaciones relacionadas con los Arietes Hidráulicos, en particular el concepto monopulsor y sus bondades para superar las limitaciones de los modelos convencionales.

1.3. Golpe de ariete

La Física reconoce el fenómeno denominado golpe de ariete o choque hidráulico, que ocurre cuando varía bruscamente la presión de un fluido dentro de una tubería, motivado por el cierre o abertura de una llave, grifo o válvula; también puede producirse por la puesta en marcha o detención de un motor o bomba hidráulica. Durante la fluctuación brusca de la presión, el líquido fluye a lo largo de la tubería a una velocidad definida como de propagación de la onda de choque. El cambio de presión provoca deformaciones elásticas en el líquido y en las paredes de la tubería. Este fenómeno se considera indeseable porque causa frecuentes roturas en las redes hidráulicas de las ciudades y en las instalaciones intradomiciliarias, y también es causante de los sonidos característicos que escuchamos en las tuberías cuando abrimos un grifo bruscamente en nuestras casas.

El choque de ariete que se produce involuntariamente puede provocar daños importantes en las tuberías. Sobre todo en las turbinas de agua con caída desde grandes alturas se intenta evitar que este choque de ariete no provoque daños con medidas constructivas adecuadas. Por tal razón, con frecuencia se diseñan válvulas de efecto retardado o se instalan dispositivos de seguridad. En la Figura 1.1 (b) se representa el incremento de la presión al momento del cierre de una compuerta. GUNT, (1998).

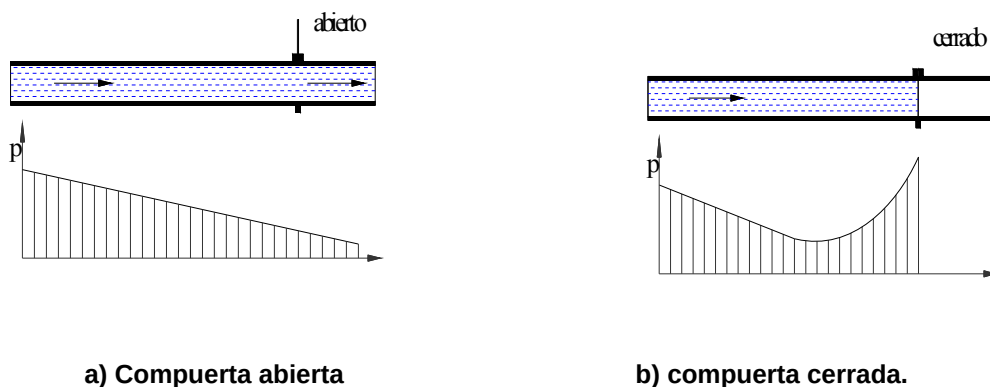


Figura 1.1. Representación de la presión

Además, en las tuberías bajo presión se montan cámaras de equilibrio que reciben el choque de ariete y lo amortiguan. Con el ariete hidráulico, este efecto se consigue de forma selectiva mediante una válvula que se cierra a intervalos (válvula de impulsos). El choque de ariete resultante se suaviza, porque el agua puede fluir a través de una válvula de presión e ir a parar a una cámara de aire. La cámara de aire amortigua el choque y permite que el agua siga fluyendo de forma constante hasta el tubo ascendente, que la conduce a un segundo depósito elevado.

1.4.Principio de funcionamiento del ariete hidráulico y elementos para la instalación

Para comprender mejor el principio de funcionamiento del Ariete Hidráulico monopulsor, nos auxiliaremos de la figura 1.2. El agua procedente de la fuente de alimentación (1) desciende por gravedad por la tubería de alimentación (2) bajo la acción de la diferencia de nivel (H_a), derramándose por la válvula de impulso o ímpetu (3), hasta adquirir una velocidad suficiente para que la presión dinámica, dada por la ecuación 1.1, sea capaz de cerrarla, contrarrestando su peso.

$$P = \frac{v^2}{2} \cdot \rho \quad (1.1)$$

Donde: v - es la velocidad media del fluido; (m/s). ρ - es la densidad del agua a la temperatura ambiente; (kg/m^3).

El cierre rápido de la válvula de impulso, produce el efecto conocido como, golpe de ariete o choque hidráulico, originando una sobrepresión en la tubería de alimentación. La válvula de descarga (6) que se abre por el efecto de dicha sobrepresión, deja pasar cierta cantidad de agua hacia la cámara de aire (7), comprimiendo el aire existente, y cierta cantidad de agua (q) fluye por la tubería de descarga (8). El retroceso del agua en la tubería de alimentación, produce una ligera succión en el cuerpo del Ariete o caja de válvula (4), creando una caída de presión que produce la apertura de las válvulas de ímpetu y el cierre de la válvula de descarga. De esta forma, se crean las condiciones para que se repita el ciclo de

operaciones. El aire comprimido continúa impulsando el líquido almacenado en ella por la tubería de descarga, entre ciclos de operaciones; lográndose una entrega de agua casi uniforme hacia el tanque de almacenamiento (9). El aire de la cámara neumática se pierde en el flujo bombeado, sino se renovase, manteniendo el nivel de aire se saturaría de agua, por esta razón se coloca la válvula de aire (5) en su posición óptima que es debajo de la válvula check. Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en la caja del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire que va a renovar el aire de la cámara.

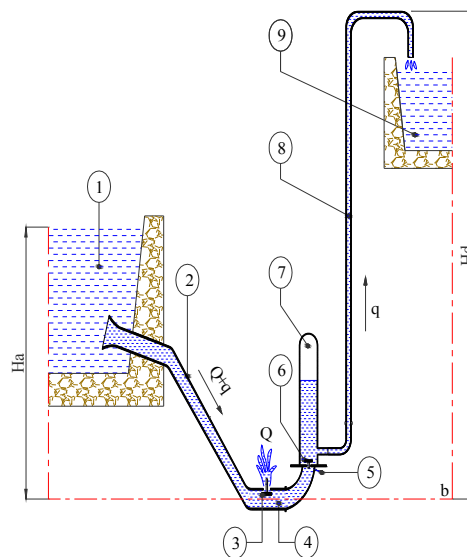


Figura 1.2. Esquema del principio de funcionamiento

El grado de efectividad se define como la relación entre uso y consumo. El uso describe la energía de la cantidad de agua transportada; el consumo es la energía del agua utilizada. El grado de efectividad del Ariete Hidráulico es relativamente inferior al de otras bombas. No obstante, si se tiene en cuenta que la estructura del aparato es muy sencilla y que funciona con agua, el resultado no está nada mal GUNT, (1998).

1.4.1. Elementos para la instalación de arietes

Captación de fuente: Se puede decir que una fuente es por donde sale agua de la tierra voluntariamente. En la bibliografía encontramos normas básicas de cómo debe realizarse la captación. Ayala, (2005).

Colector de fuente: Conectado al drenaje de la fuente se encuentra el colector de fuente, es un pozo que colecta el agua de la fuente y se deja que repose. Por su capacidad de acumulación, el colector de fuente se encarga en sentido inverso de que se mantengan condiciones hidráulicas constantes en la fuente.

Pozo de extracción o tanque de abastecimiento: El pozo de extracción está montado a continuación del colector de fuente. De este modo se suministra agua limpia y sedimentada al pozo de extracción o tanque de abastecimiento.

Tubería de impulsión: El conducto de impulsión, es decir, el motor de la instalación de ariete, merece una atención especial en la construcción. Cuando la entrada del tubo no está abocardada en forma de trompeta, la corriente se rompe, lo que ocasiona torbellinos en el agua y por consiguiente pérdidas por fricción.

Conducto vertical o tubería de descarga: En el conducto vertical se impulsa el agua desde la cámara de aire hacia el tanque elevado. En este conducto no se produce ningún tipo de golpe siempre y cuando el ariete este bien dimensionado. La presión total a vencer depende de la altura geodésica (presión de altura) más la altura de pérdida por fricción en el tubo.

Tanque elevado o de almacenamiento: El tanque elevado es el depósito donde se capta y almacena el agua transportada por el ariete y, gracias a su altura definida, ejerce una presión uniforme en la columna de agua de la red de consumo. La posición del tanque elevado determina por tanto la presión en el conducto de consumo.

1.5. Períodos en que se divide el ciclo de trabajo del ariete

En la figura 1.3 se muestra la secuencia de los eventos que se presentan durante el ciclo de operaciones completo y a la vez, la relación de la velocidad del agua al final

de la tubería de alimentación (cercana a la caja de válvulas) en función del tiempo y el tiempo de duración de cada uno de estos eventos.

A partir de estas relaciones se puede determinar el agua que se escapa a través de las válvulas de ímpetu o impulsión y la cantidad de agua bombeada por ciclos.

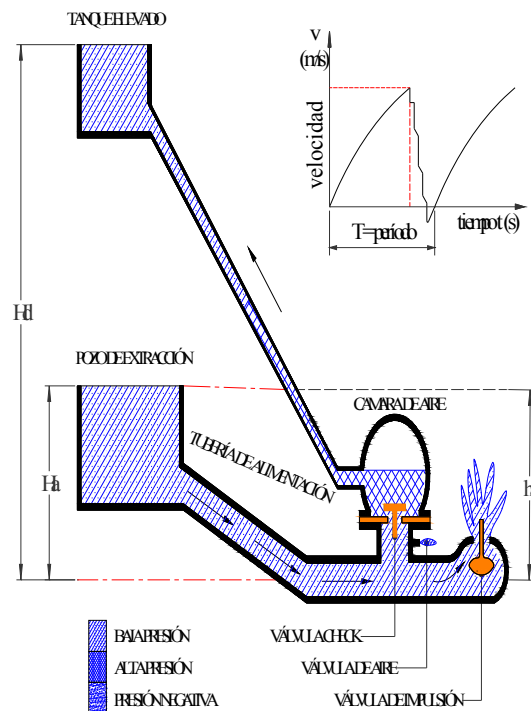


Figura 1.3. Eventos que se presentan en un ciclo

Inicialmente se llena el sistema, la válvula de impulso se cierra por la presión de la carga inicial " H_a " y el agua sube a través de la válvula de retención, que se abre por la misma presión, hasta el nivel " h_a " por el principio de los vasos comunicantes. Luego se acciona la válvula de impulso manualmente, extrayendo el aire de las tuberías, hasta que el ariete empiece a funcionar automáticamente.

Luego de haber analizado los periodos en que se divide los ciclos de trabajo, buscamos la relación entre la velocidad en la tubería de alimentación (v_a) y el tiempo

(t) se puede determinar el caudal de bombeo (q_b) y el caudal derramado (Q_p) por la válvula de impulso, siendo Q el caudal total (Tacke, 1985).

$$Q = Q_p + q_b \quad (1.2)$$

Período 1: de aceleración o derrame

Este periodo se inicia desde el instante en que la velocidad del agua en la tubería de alimentación es nula ($v = 0$), las válvulas de impulso se encuentran abiertas y la de descarga cerrada, el agua se acelera bajo el efecto de la altura de alimentación H_a (Figura 1.4) hasta que la fuerza del flujo contra las válvulas de impulsión es demasiado potente y las cierra (Figura 1.5), iniciándose el periodo 2.

$$(0 \leq t \leq T_a) ; (0 \leq v \leq v_c)$$

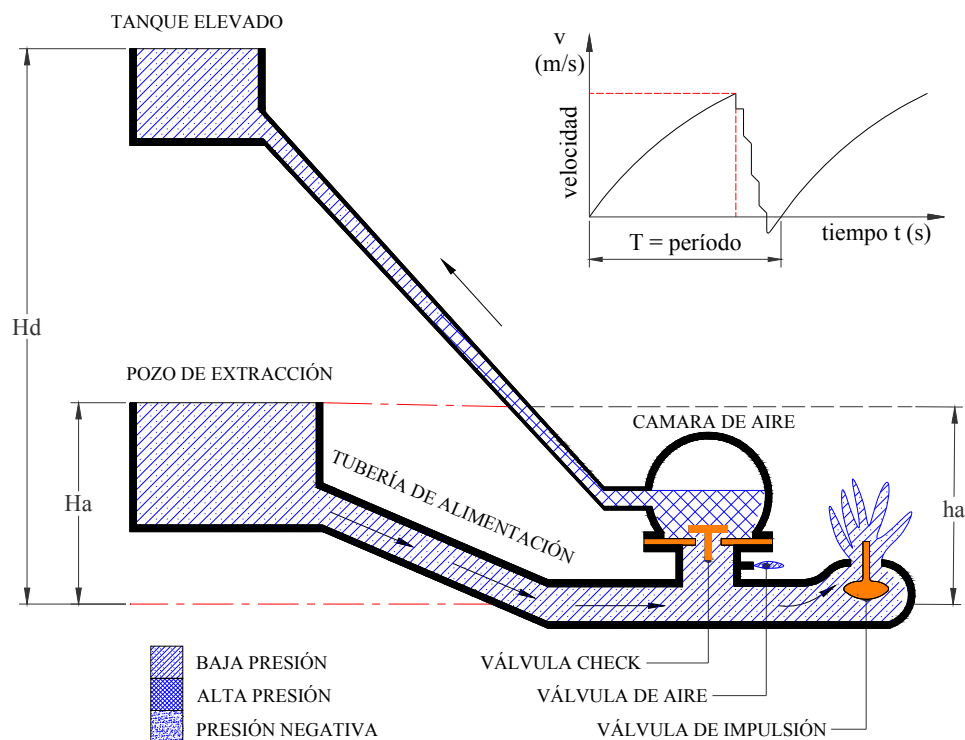


Figura 1.4. Aceleración del fluido y derrame por la válvula de impulsión

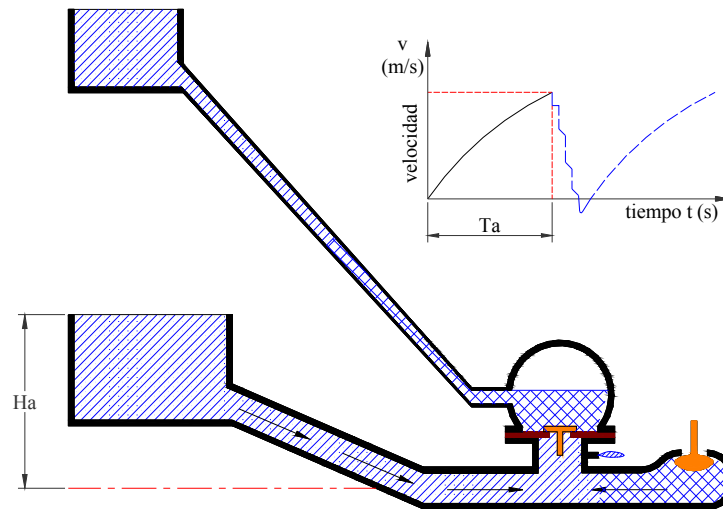


Figura 1.5. Cierre de las válvulas de impulsión

Periodo 2: de retardación o bombeo

Este periodo se inicia desde el instante en que se cierran las válvulas de impulso hasta el momento en que se produce la desaceleración del flujo en la cámara de aire (Figura 1.6). La columna de agua en la tubería se frena considerablemente y en este instante en la caja de válvulas se produce una sobrepresión, que se amortigua en la cámara de aire.

$$(T_a < t < T_a + T_d); \quad (0 < v < v_c)$$

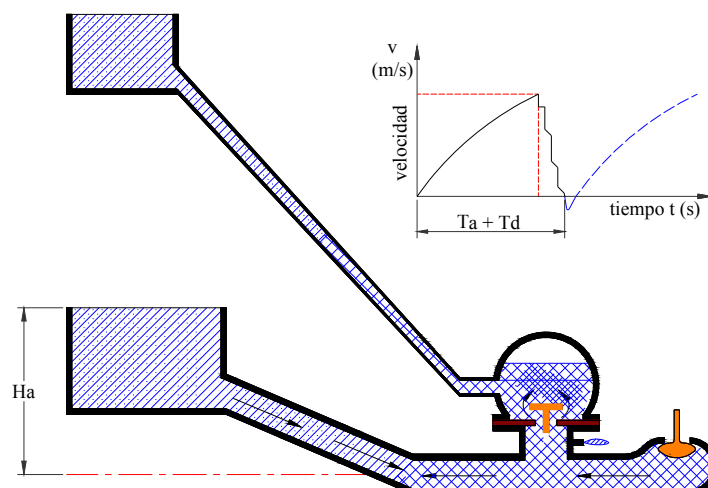


Figura 1.6. Amortiguación en la cámara de aire

Periodo 3: de retroceso o de flujo invertido

Este periodo incluye el tiempo durante el cual se cierra la válvula de descarga (figura 1.7), se produce la caída de presión y la reapertura de las válvulas de impulso al instante en que la velocidad se hace cero ($v = 0$), iniciándose un nuevo ciclo ($T_a + T_d < t < T$); ($v_t < v < 0$). En la figura 1.7 se representa una gran presión en la cámara de aire que provoca el cierre de la válvula check, impidiendo el retroceso del agua hacia la caja de válvulas. El flujo toma sentido negativo (en dirección al tanque de abastecimiento).

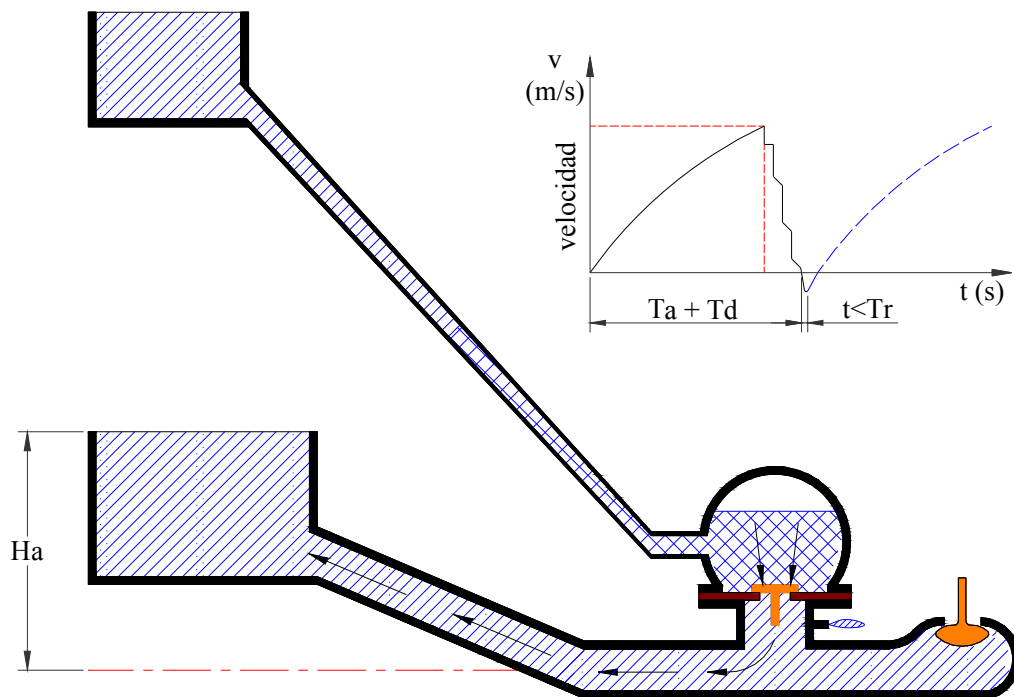


Figura 1.7. Cierre de la válvula de descarga

El retroceso del agua por la tubería de alimentación produce una caída de presión (succión) en la caja de válvulas de la figura 1.8, generándose la renovación de aire en la campana neumática por la válvula de aire y al mismo tiempo se produce la reapertura de la válvula de impulsión, empezando un nuevo ciclo de trabajo en la figura 1.9.

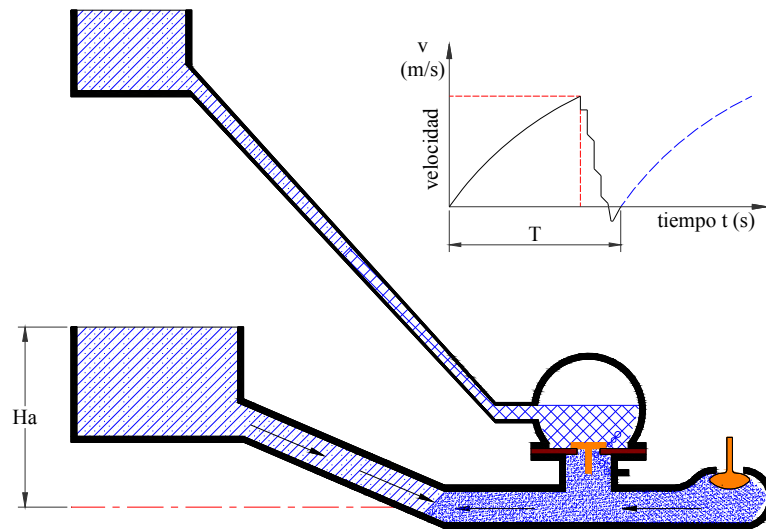


Figura 1.8. Caída de presión en la caja de válvulas

El aire de la cámara de neumática se pierde en el flujo bombeado, sino se renovase, manteniendo el nivel el aire se saturaría de agua, por esta razón se coloca la válvula de aire. Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en la caja del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire que va a renovar el aire de la cámara neumática.

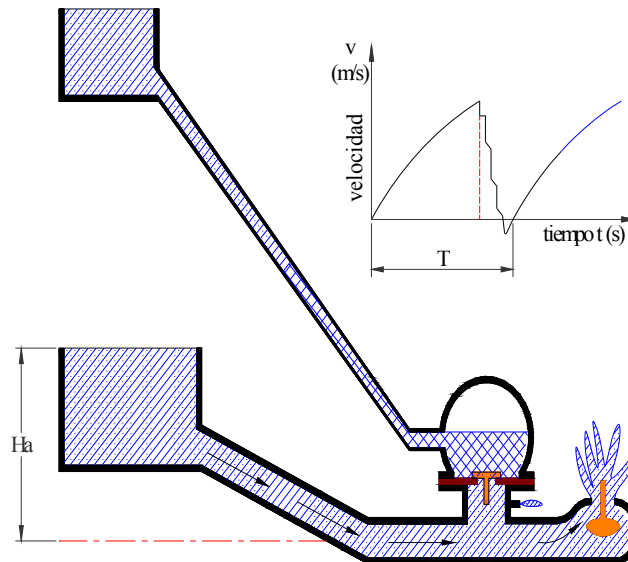


Figura 1.9. Reapertura de las válvulas nuevo ciclo de trabajo



1.6. Conclusiones parciales del capítulo

- ✚ En este capítulo se llevó a cabo el análisis de las fuentes y se establecieron los fundamentos teóricos, en el cual se expuso el principio de funcionamiento del ariete monopulsor. Además nos da una visión clara de la importancia que tiene la instalación del equipo.
- ✚ Se analizó el principio de funcionamiento del ariete hidráulico, además se recopiló información de arietes existentes en el mundo con el objetivo de actualizar, comparar y evaluar.



2.1. Introducción

Para la evaluación del ariete hidráulico Monopulsor, se aplicaron las leyes de la hidráulica, ciencia que estudia los líquidos en su estado de reposo y en movimiento Trueva, S (1986).

Donde: λ - Factor de fricción; (adimensional). L - Longitud de la tubería; (m).

D - Diámetro de la tubería; (m). v - Velocidad del fluido; (m/s).

La expresión en función del flujo volumétrico es:

$$h_{roz.} = \frac{8 \cdot \lambda \cdot L}{\pi^2 \cdot g \cdot D^5} \cdot Q^2 \quad (2.2)$$

La ecuación 2.2 es completamente general y sirve para el cálculo de pérdidas de carga tanto para un flujo laminar como turbulento.

Algunos elementos y complementos especiales de las tuberías, como cuadrantes de tubo o codos, ramificaciones de tubos, modificaciones de la sección transversal o incluso válvulas, generan pérdidas de presión adicionales además de las pérdidas por fricción de la pared Ayala, (2005).

$$h_{loc} = \zeta_{loc.} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.3)$$

Cuando se modifica la sección transversal y las velocidades asociadas, en la pérdida de presión total también se deben tener en cuenta porcentajes de la pérdida de presión de Bernoulli (presión dinámica) Ayala, (2005).

2.3. Altura desarrollada por el ariete y caudal circulante

Para calcular la altura desarrollada por el ariete H_i tenemos que sumar a la altura de descarga h_d , los elementos de pérdidas hidráulicas (locales, rozamiento, inercia):

$$H_i = h_d + h_{roz.} + h_{loc.} + h_{iner.} \quad (2.4)$$

La variable $h_{iner.}$ representa la carga de inercia que es la resistencia de inercia al movimiento o la energía gastada para vencer las fuerzas de inercia. Se calcula según la ecuación:

$$h_{iner.} = \frac{l}{g} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (2.5)$$

Donde: dv/dt es la ley de variación de velocidad con respecto al tiempo, es decir $v = f(t)$.

Para obtener el caudal circulante por la tubería tomamos como datos: el diámetro D , la pérdida de carga hroz. y la rugosidad absoluta ϵ_r . En el problema presente, desconocemos si el régimen es laminar o turbulento puesto que la incógnita es el caudal.

En el caso de que el régimen es turbulento, se determina el caudal circulante mediante la ecuación siguiente (Grupo de mecánica de fluidos Politécnica de Valencia, 2000).

$$Q = -6,958 \sqrt{D^5 h_{roz.}} \log_{10} \left(\frac{\epsilon_r}{3,7} + \frac{0,5667 v}{D^{1.5}} \sqrt{\frac{L}{h_{roz.}}} \right) \quad (2.6)$$

2.3.1. Diámetro de la tubería forzada

Para dimensionar la tubería, los datos a considerar son el caudal circulante Q , la pérdida de carga hroz. y la rugosidad absoluta ϵ_r . En el régimen turbulento se puede utilizar la siguiente relación (Ayala, 2005):

$$\frac{1}{D^{2.5}} = -6,958 \sqrt{\frac{h_{roz.}}{Q^2 L}} \log_{10} \left(\frac{\epsilon_r}{3,7} + \frac{0,5667 v}{D^{1.5}} \sqrt{\frac{L}{h_{roz.}}} \right) \quad (2.7)$$

En este caso, combinando las ecuaciones de Darcy-Weisbach y Colebrook-White, se plantea una expresión para el cálculo del diámetro en régimen turbulento, aunque no en forma explícita. El diámetro se calcula en este caso siguiendo un proceso iterativo, tomando un primer valor de referencia para D como por ejemplo, el diámetro que corresponde a una velocidad de 1 m/s. Finalmente sería necesario

calcular el número de Reynolds para comprobar que la hipótesis de régimen turbulento era cierta.

En cualquier caso, una vez obtenido el diámetro de la tubería, encontraremos que el valor obtenido raramente corresponde con un diámetro comercialmente disponible.

2.4. Magnitud del golpe de ariete

El científico ruso N. Zhukovski, (1847-1921) estudió este fenómeno por primera vez en su obra “Sobre el choque hidráulico”, como parte de sus indagaciones hidroaeromecánicas, que constituyeron la base teórica para la ulterior comprensión del funcionamiento de la bomba de golpe de ariete o ariete hidráulico, lo que demuestra que los fenómenos físicos (y los naturales en general) no deben asumirse como negativos o positivos, sino como leyes que debemos incorporar a nuestro arsenal cognitivo hacia una armónica actuación del hombre en la naturaleza y hacia la plenitud creadora del ser humano. Si se asume un flujo sin pérdidas, se puede aplicar el principio de conservación de la energía.

Cuando no hay pérdidas al inundar la tubería, la velocidad máxima que puede alcanzar el agua con una caída de h_1 es de:

$$v_1 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} \quad (2.8)$$

Con los caudales másicos, se obtiene la relación de caudal:

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} = \frac{h_2}{h_1} \quad (2.9)$$

Es decir, el caudal másico m_2 , transportado hasta la altura h_2 depende de la relación entre las alturas. A menor cantidad de agua, mayor altura de elevación. Por supuesto, esta simple relación sólo es válida si:

En el tubo de entrada toda la energía potencial se puede convertir en velocidad.



En la práctica, hay pérdidas a causa del funcionamiento impreciso de las válvulas y de las resistencias al flujo, por lo que se da una reducción considerable de la relación de caudal másico.

En el Golpe de Ariete el efecto de modificar una condición de funcionamiento se transmite al resto de la instalación a una velocidad finita. Las variables hidráulicas son la altura piezométrica y el caudal (velocidad media) en cada punto de la instalación, matemáticamente expresados como una función de la posición en la instalación y del tiempo Streeter, (1993).

Para evaluar el tiempo de cierre de las válvulas tenemos que calcular el período, para luego determinar si el cierre es rápido o lento.

$$T = \frac{2 \cdot L}{a} \quad (2.10)$$

20

Cuando la onda llega, al regresar, ella cambia el sentido, haciendo de nuevo el mismo recorrido de ida y vuelta en el mismo tiempo T , pero con signo contrario, bajo la forma de onda de depresión

El tiempo de cierre de la válvula es un importante factor. Si el cierre es muy rápido, la válvula quedará completamente cerrada antes de actuar la depresión. Por otro lado, si la válvula es cerrada lentamente, habrá tiempo para que la onda de depresión actúe, antes de la obturación completa. De ahí la clasificación de las maniobras de cierre. Si la maniobra es rápida se determina con (2.11), si la maniobra es lenta con (2.12).

$$t_c < \frac{2L}{a} \quad (2.11)$$

$$t_c > \frac{2L}{a} \quad (2.12)$$

La sobrepresión ocurre cuando la maniobra es rápida. En estas condiciones tiene lugar un choque hidráulico directo. Si $t_c > \frac{2L}{a}$, surge el llamado choque hidráulico indirecto, la onda de choque reflejándose del recipiente regresa a las válvulas antes de que estas sean cerradas por completo.

Si el cierre es rápido la sobrepresión máxima o pulso de Joukowsky se calcula con la siguiente ecuación.

$$h_a = \frac{a \cdot v}{g} \quad (2.13)$$

Para un cierre lento se puede aplicar la formula aproximada de Michaud, que considera la proporción de la velocidad con T/t_c (válida para maniobras con variación lineal de velocidad).

$$h_a = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c} \quad (2.14)$$

La ecuación de Michaud también puede ser aplicada para la determinación del tiempo de cierre a ser adoptado, con el fin de que la sobrepresión no sobrepase determinado límite pre establecido, esta fórmula lleva a valores superiores a los verificados experimentalmente. Sin embargo, todavía viene siendo aplicada en la práctica por ser más segura.

$$h_a = \frac{H_a}{2} \left(C^2 \pm C \sqrt{4 + C^2} \right) \quad (2.15)$$

Siendo:

$$C = \frac{L \cdot v}{g \cdot H_a \cdot t_c} \quad (2.16)$$

Donde: v - Velocidad media del agua; (m/s). h_a - Sobrepresión o aumento de presión; (m). H_a - Altura de impulsión; (m). C - Celeridad; (m/s). t_c - Tiempo de maniobra, (s).

El signo $\pm$ de la ecuación de Allievi indica que la fórmula proporciona el valor de la sobrepresión (+) y el de la subpresión (-).

2.5. Ecuaciones de flujo y pérdidas hidráulicas para el Ariete Monopulsor

En el ariete hidráulico monopulsor el gasto se distribuye entre las válvulas, si estas son idénticas $Q_1 = Q_2 = Q_3$. La altura de alimentación H_a encuentra en su recorrido una resistencia hidráulica que se divide en tres partes es decir tres veces menor, lo cual favorece al caudal total $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$, el resultado de esta construcción es una máquina de mayor eficiencia ya que aprovecha mejor la carga de alimentación y el volumen de agua que fluye en el ariete es mayor Feodosiev V.I., (1985), donde se cumple que:

$$\zeta_1 \cdot \frac{Q_1^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \zeta_2 \cdot \frac{Q_2^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \zeta_3 \cdot \frac{Q_3^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \quad (2.17)$$

Donde: ζ - Coeficiente de resistencia; (adimensional). g - aceleración de la gravedad; (m/s²). Q – caudal; (m³/s). A - área, (m²).

Las ecuaciones (2.17) describe cuantitativamente las magnitudes de gastos que se obtienen en un ariete monopulsor.

Cuando se abren las válvulas del ariete la altura H_a produce la aceleración de la corriente en los primeros instantes, pero al aumentar la velocidad, la altura aceleradora se reduce por el rozamiento y por las pérdidas menores. Si L_e es la longitud equivalente del sistema de tuberías, la velocidad v tiende a v_o asintóticamente, es decir, matemáticamente tiene que transcurrir un tiempo infinito para que v alcance el valor de v_o . Prácticamente para que v alcance el valor de 0,99 v_o , el tiempo que pasa es:

$$T_a = \frac{L_e v_o}{2gH_a} \ln \frac{1,99}{0,01} = 2,646 \frac{L_e v_o}{gH_a} \quad (2.18)$$

2.5.1. Fuerzas hidráulicas sobre la válvula de derrame o impulso

Durante el periodo de aceleración, la fuerza hidráulicas sobre la válvula de derrame va en aumento hasta que empieza a exceder la fuerza “F”, y éste es el momento en el cual la válvula de derrame empieza su movimiento de cierre.

Según Stevenazzi, (1942) el resultado de investigaciones para obtener el máximo rendimiento de un ariete es necesario que la velocidad de la corriente de agua en el momento que se cierra la válvula de derrame sea inferior a la velocidad del régimen bajo la carga constante H_a . La relación entre estas dos velocidades varía de 0.3 a 0.8, es decir: $0,3 V_{m\acute{a}x} < V_o < 0,8 V_{m\acute{a}x}$, donde: V_o - Velocidad en el instante que se cierra la válvula de derrame, cuando $t = T_a$ (m/s). v_{max} - Velocidad máxima que se obtiene en la tubería de alimentación para un diámetro D (m/s).

Por la mecánica de fluidos Mataix (1982) se sabe que la fuerza de arrastre que se ejerce sobre la cara inferior de la válvula, en el momento en que esta válvula empieza a cerrarse, está dada por:

$$F_d = C_d \left(\frac{\rho v_o^2}{2} \right) A_d \quad (2.19)$$

Donde: F_d - Fuerza de arrastre sobre la válvula de derrame; (N). C_d - Coeficiente de arrastre; (adimensional). ρ - Densidad del fluido, (kg/m³). v_o - Velocidad del fluido al iniciarse el cierre; (m/s). A_d - Área proyectada de la válvula de derrame; (m²).

La fuerza “F” de la válvula de derrame es igual al peso W con dirección hacia abajo, y la fuerza de arrastre F_d que tiene una dirección en contra de la fuerza “F” (hacia arriba) tiene que ser mayor para que se cierre la válvula de derrame, empezando el movimiento de la válvula cuando estas fuerzas son iguales.

El factor C_d también varía según la carrera de la válvula, por lo que se tiene que encontrar una expresión de C_d que sea función de la carrera, y la única manera de evaluarlo es experimental.

Krol, (1957) ha desarrollado una expresión para la válvula hidrodinámica o de cuerpo esférico que relaciona el coeficiente de arrastre C_d con la carrera de la válvula “s”. Esta válvula tiene la forma de una gota lo que permite que el agua fluya rápidamente, esta ecuación empírica se expresa como:

$$C_d = \frac{0,282 - 8,854 s + 0,8 \cdot 10^{(0,52-270 s)}}{s} \quad (2.20)$$

Donde: C_d - Coeficiente de arrastre sobre la cara inferior de la válvula de derrame. s - Carrera de la válvula de derrame (m).

Para el caso en estudio, la válvula propuesta es del tipo de compuerta, por lo que la ecuación 2.20 no se ajusta a las características particulares de esta válvula.

Según el resultado de investigaciones de Stevenazzi, (1942) para obtener el máximo rendimiento de un ariete, es necesario que la sección de descarga de la válvula de derrame sea igual a la sección del cuerpo tubular de la tubería de alimentación.

Krol, (1957) después realizar pruebas experimentales determinó que con el uso de la válvula hidrodinámica, se obtiene un rendimiento mayor en un 18 % que en las válvulas de plato; y por razón de estudio, ya que matemáticamente se puede demostrar las pérdidas que origina la válvula.

2.5.2. Presión máxima y mínima de la instalación

La presión máxima generada por el golpe de ariete en las tuberías de circulación por gravedad está expresada por la ecuación 2.21 y la presión mínima está expresada por la ecuación 2.22, en (m).

$$P_{\text{máx}} = (H_a + h_a) \cdot \rho \cdot g \quad (2.21)$$

$$P_{\text{mín}} = (H_a - h_a) \cdot \rho \cdot g \quad (2.22)$$

Donde: H_a - presión ejercida por la altura de alimentación

h_a - presión generada por el golpe de ariete.

La presión máxima debido al golpe de ariete positivo es la suma de la presión ejercida por la altura de alimentación y la presión generada por el golpe de ariete (h_a); mientras que la presión mínima debido al golpe de ariete negativo es la diferencia de la presión ejercida por la altura de alimentación y la presión generada por el golpe de ariete (h_a).

2.6. Metodología para evaluar la eficiencia

Por definición, el rendimiento está dado por la relación entre la potencia útil entregada en la descarga (N_U) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (N_b).

$$\eta = \frac{Nu}{Nb} \cdot 100 \quad (2.23)$$

El rendimiento de un Ariete puede considerarse desde dos puntos de vistas: analizando el primer punto de vista obtenemos la llamada relación de eficiencia de D'Aubuisson. Considerando solamente el cuerpo del Ariete entonces la potencia entregada en la descarga será, Pashkov, (1977):

$$Nu = q \cdot H_i \cdot g \cdot \rho \quad [W] \quad (2.24)$$

Donde: q - caudal de bombeo; (m^3/s). H_i - altura de impulsión; (m).

Siendo:

$$H_i = h_d + \sum h + h_i \quad (2.25)$$

Para la cual: h_d - diferencia de nivel; (m). $\sum h$ - Sumatoria de pérdidas hidráulicas; (m). h_i - pérdidas inerciales; (m). g - aceleración de la gravedad; (m/s^2). ρ - densidad del agua; (kg/m^3).

$$Nb = (Q + q) \cdot H_a \cdot g \cdot \rho \quad (2.26)$$

Siendo: Q - caudal derramado por la válvula de impulso; (m^3/s). $Q + q$ - Caudal de alimentación; (m^3/s). H_a - altura de alimentación; (m).

Sustituyendo la ecuación 2.26 y 2.24 en la 2.23, se obtiene:

$$\eta = \frac{q \cdot H_i}{(Q + q) \cdot H_a} \cdot 100 \quad (2.27)$$

Desde otro punto de vista, se determina el rendimiento de Rankine. El mismo toma como referencia el nivel, a considerando la instalación como un todo. Entonces:

$$Nu = q \cdot (H_i - H_a) \cdot g \cdot \rho \quad (2.28)$$

$$N_b = Q \cdot H_a \cdot g \cdot \rho \quad (2.29)$$

Entonces:

$$\eta_R = \frac{q \cdot (H_i - H_a)}{Q \cdot H_a} \cdot 100 \quad (2.30)$$

El rendimiento volumétrico es la relación entre el caudal de alimentación ($Q + q$) y el de descarga (q)

$$\eta_v = \frac{q}{Q + q} \cdot 100 \quad (2.31)$$

Mediante el análisis de estos rendimientos, se puede determinar la cuantía de eficiencia del ariete, y comparar en qué medida se ha mejorado en este diseño, con relación a otros.

2.7. Materiales y técnica experimental

Los resultados del estudio experimental de ariete, se obtuvieron en la investigación realizada en la instalación de hidrotransporte del Instituto Superior minero metalúrgico de Moa, donde se determinó el régimen de trabajo del ariete una vez instalado con las modificaciones propuestas para evaluación del desempeño de la válvula de impulso. La experimentación se realizó con agua para diferentes niveles de altura de carga y de impulso. Se comprueba para cada combinación la relación de los rendimientos de operación, de Ranquine y volumétrico. En la figura 2.1, se muestra el ariete instalado para las pruebas planificadas.



Figura 2.1. Esquema de instalación del ariete hidráulico monopulsor

En la experimentación se emplearon diferentes instrumentos y técnicas, garantizándose la correcta selección de los mismos, con los cuales se obtienen los datos para la evaluación. Los medios empleados se dan según la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Medios e instrumentos empleados en la experimentación

Medio	Variable a Medir	Unidad de Medida
Cinta métrica	Altura de carga, longitud de tuberías y mangaras, nivel de los tanques.	m
Pie de rey	Dimensiones de las tuberías, válvulas y codos.	mm
Cronómetro	Tiempo de cierre de válvula de impulso, tiempo de trabajo.	s
Probeta graduada	Volumen de agua perdido por la válvula de impulso y de descarga.	dm ³
Bandeja plástica	Recolección del agua de derrame por la válvula de impulso.	Unidad
Cubo	Recolección del volumen de agua entregado a la descarga.	Unidad
Manómetro	Medición de presión de trabajo.	kPa

Para la experimentación se pone en funcionamiento el ariete, una vez instalado en el área de operación. Se realiza un experimento con una réplica para cada nivel de altura de carga, para garantizar mejor precisión en los resultados.

2.7.1. Descripción de la parte hidráulica de la instalación

En el cálculo de la parte hidráulica se tendrá en cuenta las dimensiones de la instalación, el tipo de régimen, las pérdidas por fricción, las pérdidas locales, la sobrepresión producida por el golpe de ariete para finalmente determinar la eficiencia y rendimiento volumétrico Fox R., Kenneth, (1984).

Mediante los datos tomados de la válvula de impulso, se realiza el ajuste de funcionamiento de la misma, donde se obtendrá el modelo matemático que describa dicho comportamiento.

En la figura 2.2 representamos un esquema de las variables involucradas en el proceso de experimentación.

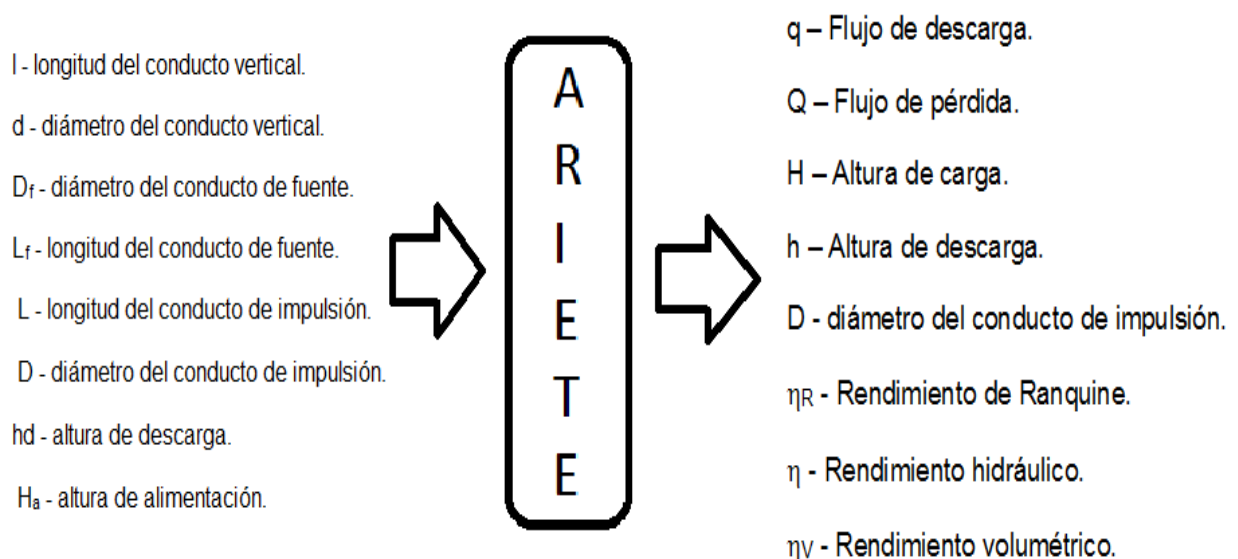


Figura 2.2. Relación entre variables del proceso

El número de corridas experimentales se tomó para seis niveles de altura de carga variándose la altura de descarga en igual número; obteniéndose seis niveles de caudales, para una réplica de cada nivel.

2.8. Conclusiones parciales del capítulo

-  Se realizó la descripción de las ecuaciones de flujo y perdidas hidráulicas para el Ariete Monopulsor.
-  Se llevó a cabo el análisis hidráulico de funcionamiento del Ariete Monopulsor, en el cual se expuso los fundamentos y principios teóricos aplicados al equipo.
-  Se plantean los fundamentos para evaluar la eficiencia del ariete.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE MONOPULSOR

3.1. Introducción

El cálculo de cada una de las partes del ariete hidráulico monopulsor, tiene una singular importancia debido a que el mismo permite determinar las condiciones en que se deben encontrar las piezas que lo componen para que estas cumplan a cabalidad la función que les corresponde. Como objetivo se plantea: Evaluar el desempeño hidráulico del ariete monopulsor, teniendo en cuenta las modificaciones de la válvula de impulso.

3.2. Determinación del régimen de trabajo

El número de Reynolds caracteriza el tipo de régimen de trabajo, en este caso se tomará en cuenta los aspectos analizados en el capítulo 2 del presente trabajo para lo cual el diámetro de la tubería es de 28 mm. Una vez conocida la rugosidad relativa, se determinó el factor de fricción. El análisis se parte de los datos obtenidos de manera experimental, resultados que se indican en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Resultados experimentales de flujo y altura de descarga del ariete

H_{imp} (m)	Q_{imp} (l/min)			Q_{imp} Promedio	$Q_{pér}$ (l/min)	Q (m ³ /h)
5,75	0,85	0,86	0,85	0,85	0,49	0,05
5	1,6	1,85	1,62	1,69	1,00	0,10
3,9	2,4	2,15	2,15	2,23	1,50	0,13
2,8	3,6	3,7	3,6	3,63	2,20	0,22
1,7	5,3	5,2	5,3	5,27	3,20	0,32
0,8	6,8	6,7	6,8	6,77	2,60	0,41

Para el análisis de los resultados mostrados en la tabla 3.1, se hace necesario la interpretación gráfica de relación entre variables, donde se parte de la interacción entre la altura de carga y el flujo volumétrico, según se indica en la figura 3.1.

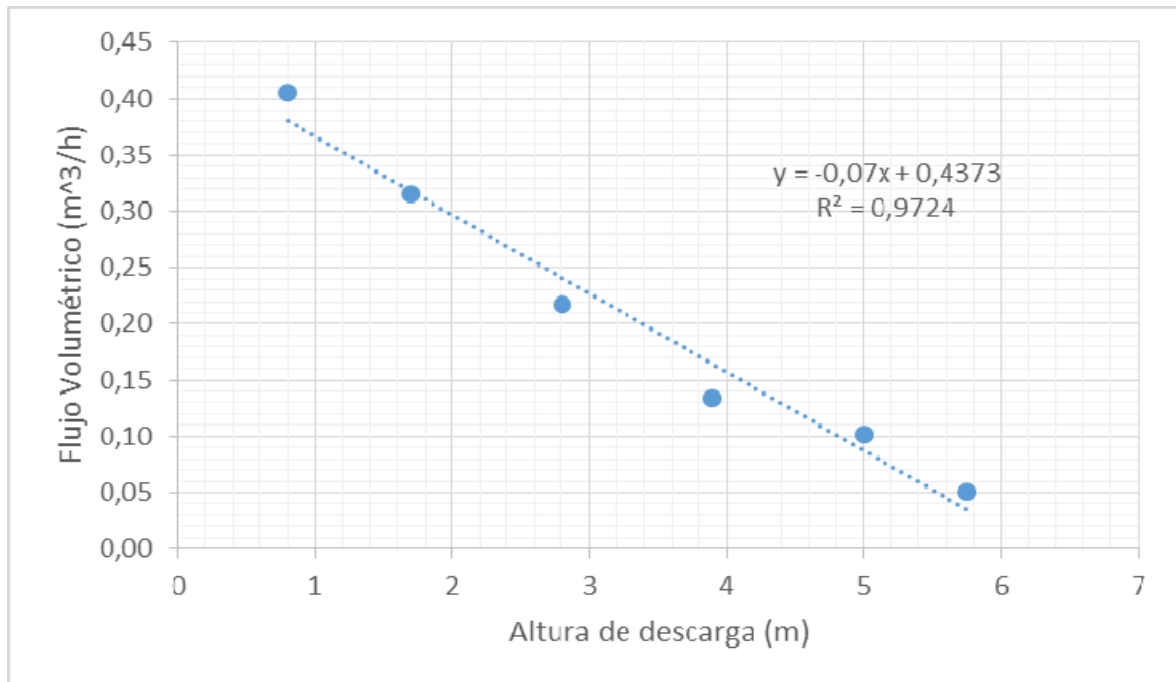


Figura 3.1. Relación entre el flujo volumétrico y la altura de carga

Según la tendencia observada en la figura 3.1, existe una relación inversa entre el flujo volumétrico y la altura de carga, comportamiento asociado al incremento de las pérdidas hidráulicas y volumétricas que se originan en las válvulas y los demás componentes de ariete. Con el aumento de la altura se incrementa la resistencia de descarga, lo que realiza oposición al paso del agua por el sistema de descarga, al mismo tiempo se disminuye la cantidad de cierres de la válvula y aumenta el flujo de pérdida por la válvula de impulso. Se obtiene que para la altura de descarga de un metro se alcanza un flujo volumétrico de 0,354 m³/h.

Se obtiene para estas condiciones que el flujo volumétrico se rige por la ecuación:

$$Q = -0,07 \cdot Hd + 0,4373 \quad (3.1)$$

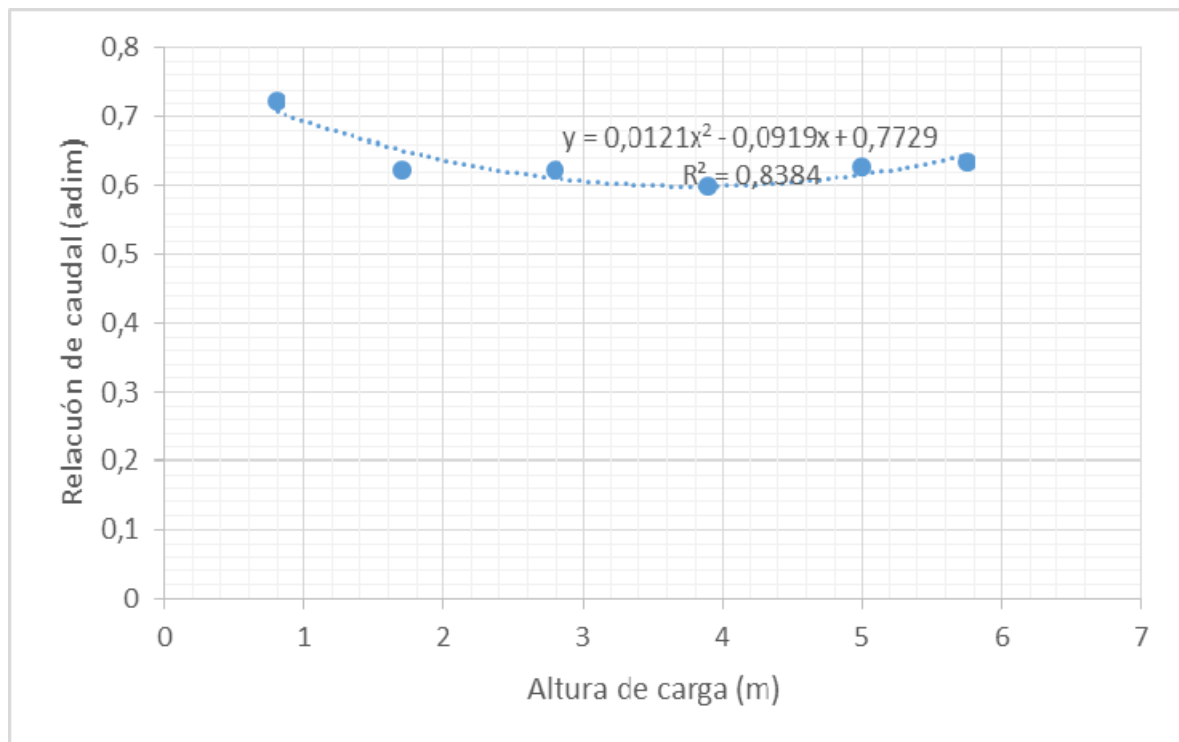
Para conocer la carga entregada por el golpe de ariete se procede a determinar las pérdidas de presión en la tubería de descarga durante el trabajo del ariete (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Estimación de las pérdidas de presión en la descarga

$Q(m^3/s)$	$H_c (m)$	$H_i(m)$	Re_{imp}	λ	$H_t (m)$	$H_{desc} (m)$	%
0,000014	3	5,75	5521,48	0,036	0,0052	5,74	0,09
0,000028	2,8	5	11042,96	0,030	0,0179	4,98	0,35
0,000037	2,6	3,9	14592,49	0,028	0,0298	3,87	0,75
0,000061	1,9	2,8	24057,89	0,025	0,0710	2,72	2,53
0,000088	1,3	1,7	34706,47	0,023	0,1358	1,56	7,99
0,000113	0,6	0,8	44566,26	0,021	0,2113	0,58	26,42

Según los resultados obtenidos, en la conductora de descarga las pérdidas se incrementan desde 0,09 hasta 26 % con relación a la presión entregada por el ariete en la descarga, esto se relaciona con la cinética del flujo de agua, siendo proporcional al cuadrado de la velocidad.

En muchos casos es recomendable la utilización de los flujos en función de la relación de caudal, según se indica en la figura 3.2.


Figura 3.2. Relación caudal con la altura de carga

La relación de caudal se ha estimado con una aproximación de 84 %, donde se brinda la siguiente relación.

$$\mu = 0,0121 \cdot Hd^2 - 0,0919 \cdot Hd + 0,7729 \quad (3.2)$$

Donde: μ - es la relación de flujo volumétrico; (adimensional).

Dicho comportamiento se relaciona con la cinemática del flujo para la cual aumenta al aumentar la velocidad a partir del límite de reacción de presión. Así para menor altura de resistencia se obtiene mayor caudal, por lo que aumentan las pérdidas por rozamiento, por lo que para mayor altura de descarga se tiene menor pérdida en la tubería de descarga, mostrándose el comportamiento de la figura 3.3.

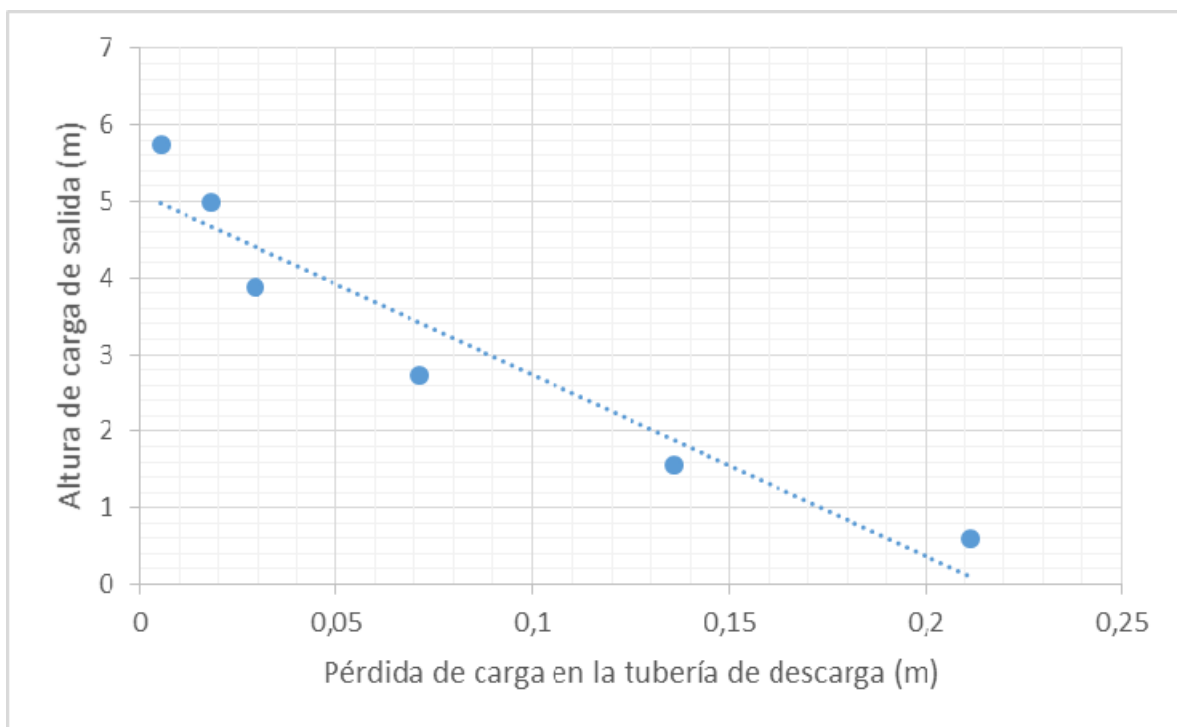


Figura 3.3. Relación pérdidas de carga para valores de altura de descarga

3.3. Comportamiento operativo de la válvula de impulso

El diámetro de salida de la válvula de impulsión es de 0,0254 m. En cuanto se recomienda por la literatura que este debe ser igual o aproximado al diámetro de la tubería forzada.

El caudal de pérdida en la válvula se relaciona con la altura de carga, donde se observa un comportamiento inversamente proporcional, según se rige el comportamiento mostrado en la figura 3.4.

Por otra parte se hace necesario la estimación de esta pérdida, para la adecuada evaluación del ariete en cuanto a su rendimiento.

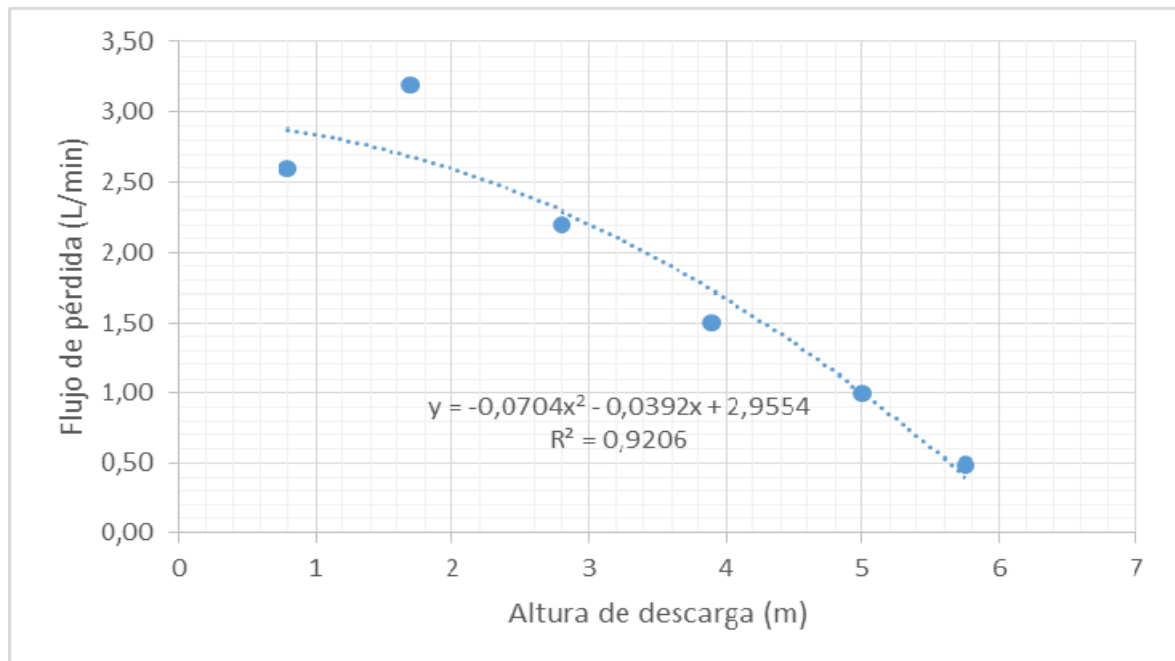


Figura 3.4. Relación entre el flujo volumétrico de pérdida y la altura de carga

Con los resultados del comportamiento mostrado en la figura 3.2, se obtiene la ecuación mediante la cual se podrá estimar el flujo volumétrico de pérdidas en la válvula de impulso, ajustada para un coeficiente de regresión múltiple de 92 % (ecuación 3.3).

$$Q_{per} = -0,0704 \cdot Hd^2 - 0,0392 \cdot Hd + 2,9554. \quad (3.3)$$

Se ha determinado que la válvula la velocidad máxima de salida del agua es de 1,6 m/s; relacionado con esta magnitud, la presión dinámica en la válvula es de 1280 Pa. La energía cinética y con ella la capacidad de bombeo depende de la altura de alimentación y la cantidad de agua en el conducto de impulsión Pérez, D. (1984). Cuanto mayor es la cantidad de agua que fluye en el conducto de impulsión, más abrupta resulta la interrupción y mayor es la energía de choque, en estas condiciones el valor calculado es de 8,64 N·m .

Con el incremento de la altura a la descarga, se obtuvo que la cantidad de golpes por minuto de la válvula de impulso aumenta paulatinamente; figura 3.5.

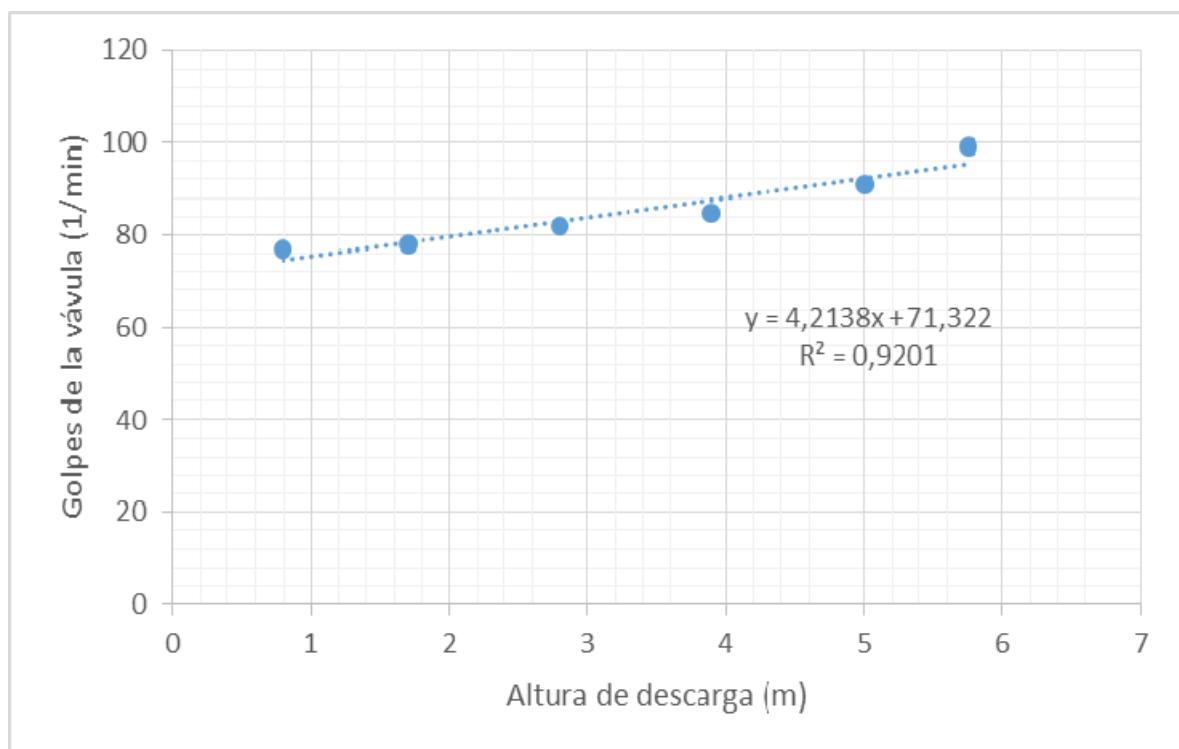


Figura 3.5. Comportamiento de los golpes de la válvula con el aumento de la altura de carga

La expresión obtenida por la tendencia de los datos, relacionará el comportamiento de la variable, cantidad de golpes por minuto, particularizada para la válvula de compuerta modificada; resultado central y aporte de esta investigación, siendo:

$$Nu_{gol} = 4,2138 \cdot Hd + 71,322 \quad (3.4)$$

Para los resultados obtenidos, el número de golpes varía entre 77 y 99 golpes por minuto, resultados superiores a lo planteado por la teoría, siendo estos de 75 golpes por minuto, esto garantiza un mayor rendimiento del ariete.

3.4. Evaluación del rendimiento del ariete

Considerando que el ariete es una máquina de flujo, se plantea la definición de rendimiento hidráulico, el que está dado por la relación entre la potencia útil entregada en la descarga (N_U) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (N_b). Varios criterios de rendimiento son aplicado a los arietes, encontrándose además del antes mencionado, el rendimiento volumétrico, el que define la relación entre el flujo entregado y el perdido, y el rendimiento de Rankine que aporta sobre el comportamiento ante la relación de alturas. En la tabla 3.3 se resume el comportamiento de dichos rendimientos, relacionándose estos con el flujo volumétrico.

Tabla 3.3. Relación de rendimientos de ariete con el flujo volumétrico

$Q(m^3/s)$	η_H	η_{Ra}	η_v
0,000014	33,14	61,51	63,52
0,000028	35,18	67,12	62,82
0,000037	39,88	74,44	59,82
0,000061	42,26	78,22	62,28
0,000088	47,56	50,64	62,20
0,000113	54,18	40,55	72,24

El rendimiento hidráulico de ariete está dado por la relación entre la potencia útil entregada en la descarga (N_U) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (N_b). Esta relación se manifiesta según la carga de trabajo para cada tipo de ariete en particular, en el caso tratado dicho comportamiento se manifiesta por la relación indicada en la figura 3.6.

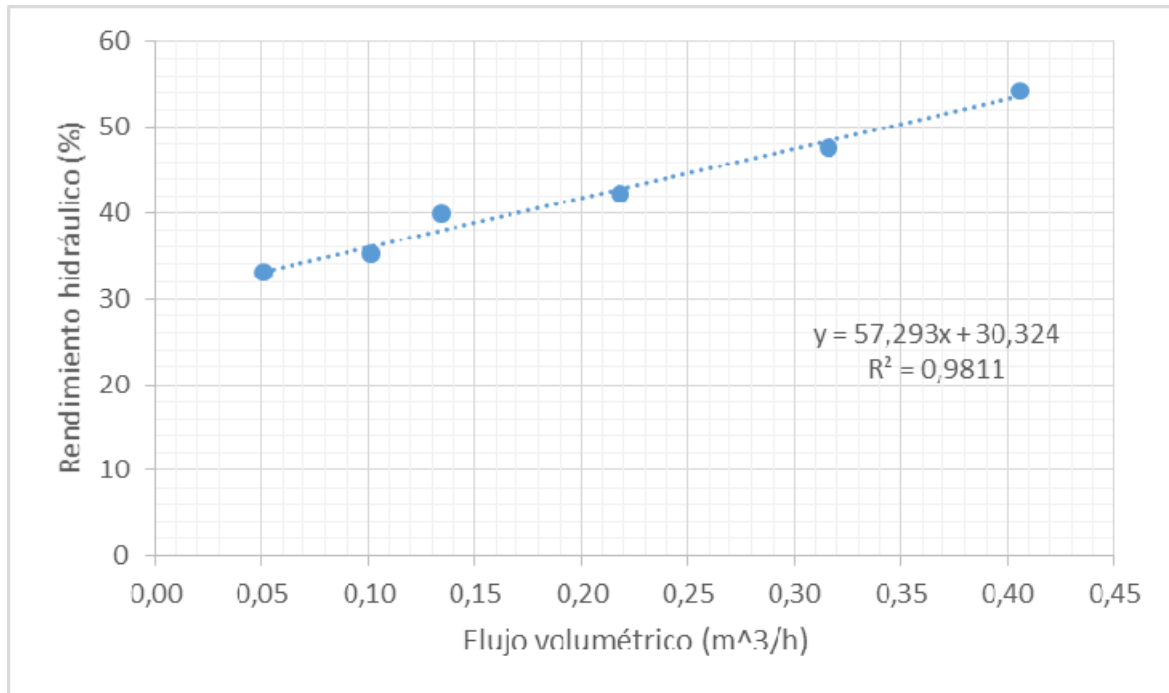


Figura 3.6. Relación del rendimiento hidráulico con el flujo volumétrico

Del comportamiento observado se obtiene la relación que define los valores del rendimiento para distintos valores del flujo volumétrico, planteándose la ecuación 3.5.

$$\eta_H = 57,293 \cdot Q + 30,324 \quad (3.5)$$

Como se observa, el rendimiento hidráulico de ariete aumenta con el aumento del flujo volumétrico, desde el valor de 33,14 hasta 54,18 %, para el rango de flujo experimentado.

Desde otro punto de vista, se determina el rendimiento de Rankine. El mismo toma como referencia el nivel, donde se a considerando la instalación como un todo. De esta manera se muestran las relaciones de la variable en su conjunto (figura 3.7).

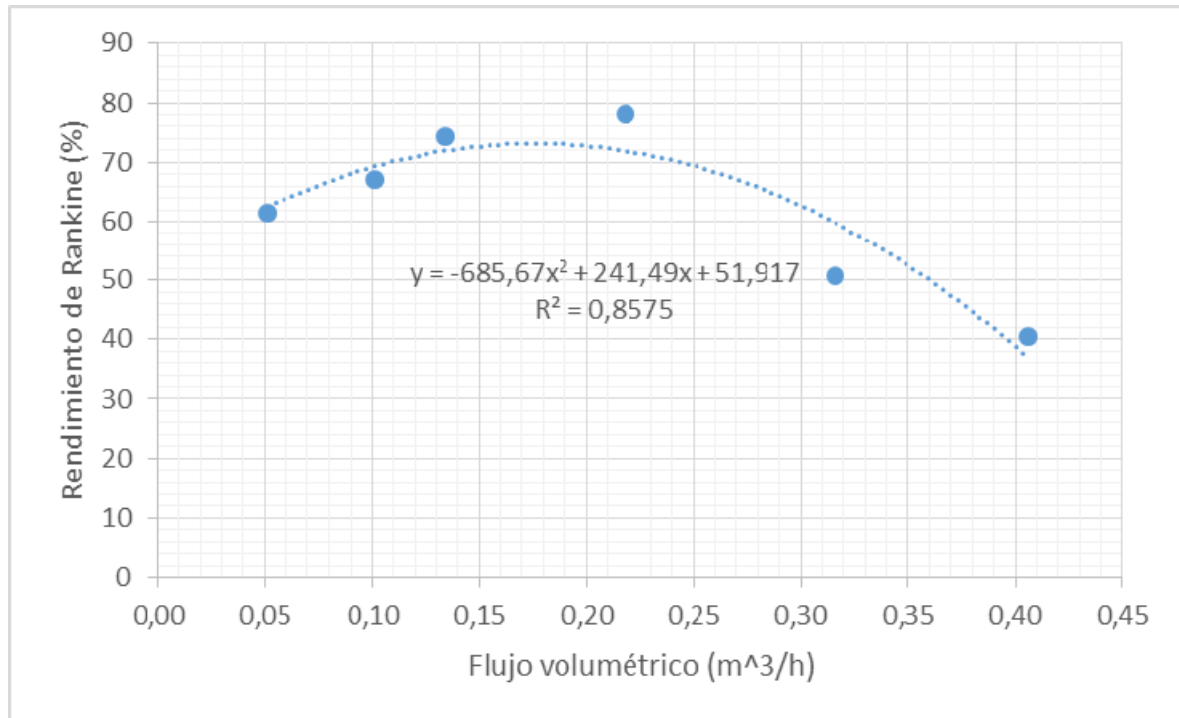


Figura 3.7. Relación del rendimiento de Rankine con el flujo volumétrico

Según se indica en la figura, el rendimiento de Rankine muestra una tendencia en aumento hasta valores del flujo volumétrico de 0,20 m³/h, con un valor máximo de 78,22 %, por encima del valor de flujo antes mencionado, la tendencia es a disminuir, comportamiento asociado a la relación entre la energía cinética del fluido y la potencial para la cual a partir de una altura de carga determinada aumenta el flujo de pérdida; dicho comportamiento se rige mediante el modelo propuesto (ecuación 3.6).

$$\eta_R = -685,67 \cdot Q^2 + 241,49 \cdot Q + 51,917 \quad (3.6)$$

El rendimiento volumétrico que es la relación entre el caudal de alimentación ($Q + q$) y el de descarga (q), da en qué medida se encuentra la relación de flujo de pérdidas. En la figura 3.8 se muestra la tendencia de la relación del rendimiento volumétrico con el flujo.

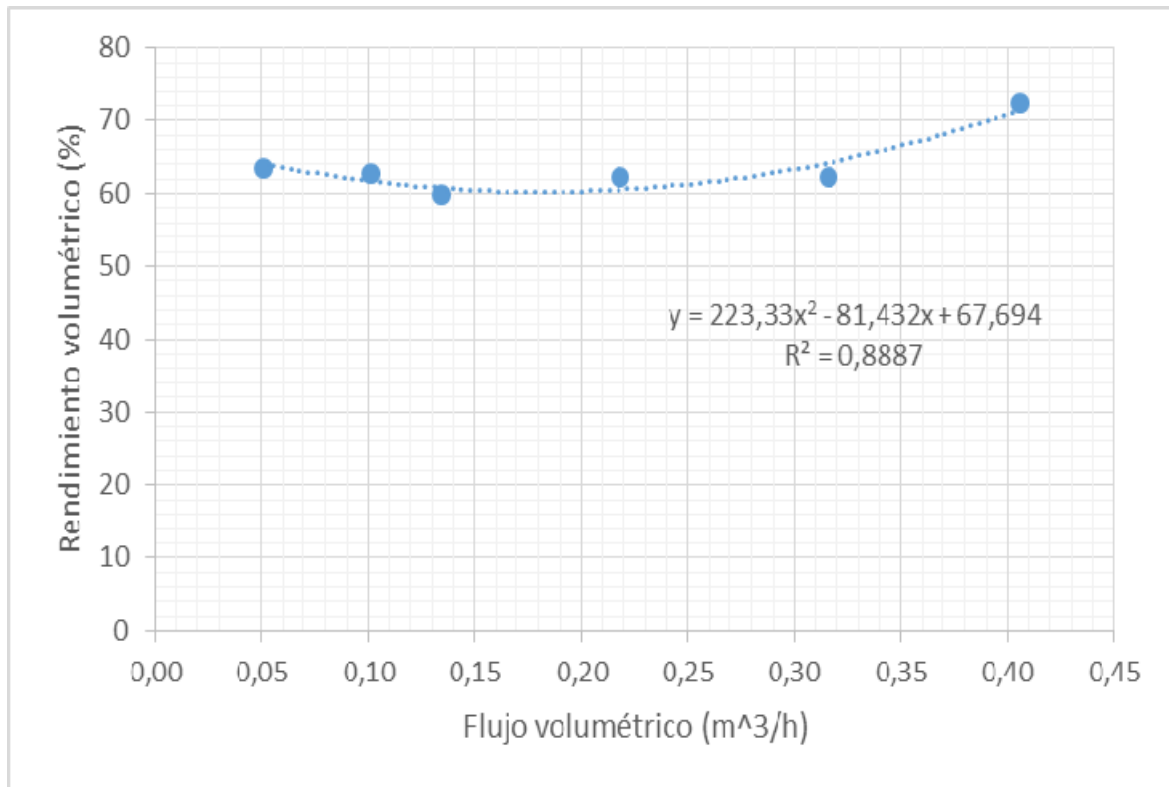


Figura 3.8. Relación del rendimiento volumétrico con el flujo volumétrico

Hasta el límite de flujo de 0,2 m³/h, el comportamiento del rendimiento volumétrico es ligeramente decreciente, en lo adelante el mismo aumenta alcanzando un valor máximo de 72,24 %, resultados favorables relacionados con las modificaciones realizadas a la válvula de impulso; para estimar los valores de este se recomienda el empleo de la ecuación 3.7, obtenida en esta investigación.

$$\eta_v = 223,33 \cdot Q^2 - 81,432 \cdot Q + 67,694 \quad (3.7)$$

Del análisis de los rendimientos se deduce que las mejores condiciones de trabajo de ariete se obtienen para el valor de flujo volumétrico de 0,22 m³/h, correspondiéndose a la altura de descarga de 2,8 m; para estas condiciones se alcanza un rendimiento total de 20,59 %.

3.5. Incidencias económicas y ambientales

Cuba reacomoda su economía y en particular el concepto de su desarrollo energético sostenible. En ese escenario el uso de los arietes hidráulicos (junto a otras tecnologías que utilizan las fuentes renovables de energía) puede y debe acercar el agua a los cubanos que aún no disponen del servicio de acueducto, allí donde un simple salto de agua en un río, presa o acequia permitan la instalación de estos equipos.

El abastecimiento de agua a la ganadería y el riego a pequeñas parcelas se presentan como actividades que potencialmente pueden satisfacerse con el accionar de los arietes hidráulicos, con una probada eficiencia y rentabilidad

El ahorro de combustibles fósiles que implica el uso de los arietes hidráulicos y el insignificante costo de su mantenimiento le confieren a esta tecnología una competitividad singular a la hora de decidir la solución del bombeo de agua en zonas rurales y de difícil acceso.

A continuación se presenta un detalle de los costos incurridos en la elaboración del siguiente proyecto separados por sección de la siguiente manera:

- ✚ Sección de suministro de líquido.
- ✚ Bomba de ariete hidráulico.
- ✚ Costo de fabricación.
- ✚ Sección de entrega (descarga) de líquido.

En la tabla 3.4 se muestra de forma general el costo estimado de los elementos componentes de la instalación de ariete.

Tabla 3.4. Costo estimado de elementos del ariete

Denominación	Cantidad	Costo unitario (CUC)	Costo total (CUC)
Tanque metálico de 55 galones	1	38,19	38,19
Adaptador para tanque	1	7,29	7,29
Válvula de bola	1	26,20	26,20
Niple acero galvanizado	3	2,10	6,30
Válvulas de compuerta	2	12,27	36,81
Codo 90° acero galvanizado	2	4,14	8,21
Tubo plástico	1	60,00	60,00
Teflón industrial	4	3,00	12,00
		Total	195,00

Es el caso del ariete construido para la evaluación propuesta, el costo de fabricación resultó relativamente bajo, con relación a la adquisición de estos en el mercado internacional. El valor alcanzado no sobrepasa los 15 CUC, según se indica en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Descripción del costo de fabricación para la bomba de ariete

Denominación	Costo (CUC)
Mano de obra (mecanizado de piezas y montaje)	10
Acabado superficial (pintura)	5
Total	15

Para evaluar económicamente la utilización de una bomba de ariete hidráulico, debemos considerar que esta clase de equipos solamente pueden ser aplicables en zonas rurales donde se dispone de fuente naturales de provisión de agua tales como ríos y lagunas, además de las condiciones geográfica adecuadas, en este caso, una bomba eléctrica de ½ HP puede entregar un caudal equivalente y tiene un costo aproximado de 80 CUC, lo cual indicaría que esta es una mejor alternativa. Por otra parte debemos considerar el ahorro económico que puede obtenerse con el uso de la bomba de ariete hidráulico al no incurrir en el consumo eléctrico, lo cual implicará a largo plazo una ventaja económica, además de las consideraciones de que esta

clase de bomba es adecuada en lugares donde no se tiene acceso a energía eléctrica.

La energía equivalente consumida por el ariete, es la energía que recibe de la fuente de captación, a modo de exposición de esta se refiere la potencia entregada para cada flujo, relacionándose al costo equivalente de energía eléctrica, indicado en la figura 3.9.

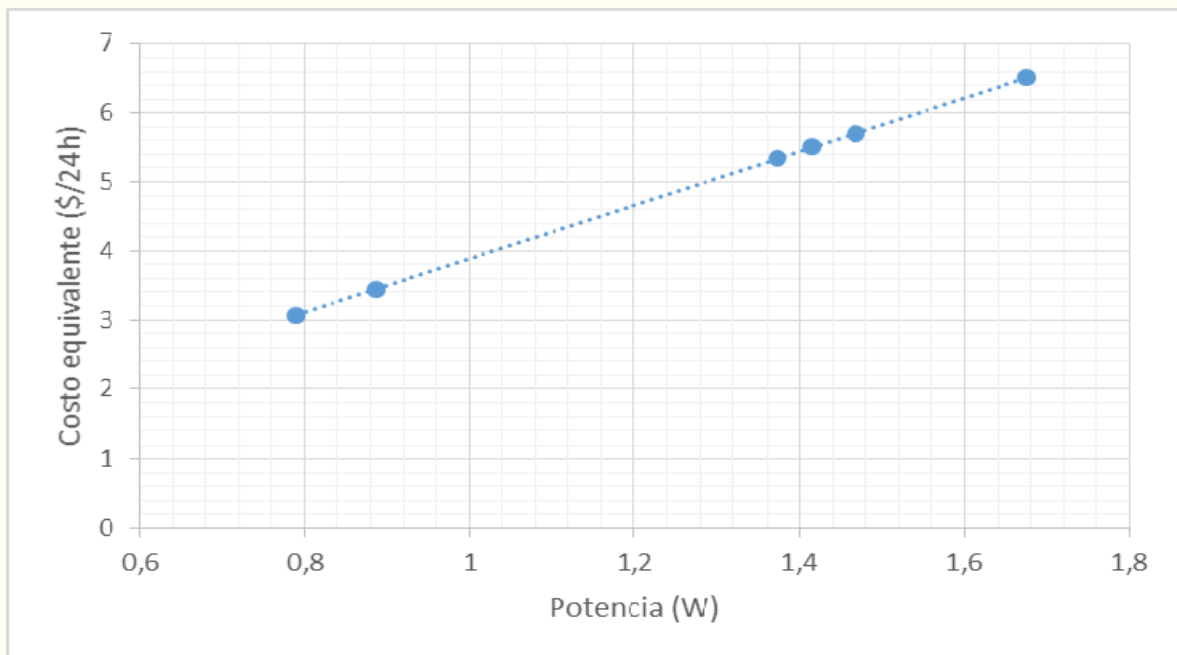


Figura 3.9. Comportamiento del costo equivalente en función de la potencia

Según indica la tendencia de la figura, si se tiene en cuenta el valor equivalente del costo de bombeo, es evidente las ventajas económicas aportadas por el funcionamiento de un ariete hidráulico, en este caso objeto de estudio se han tenido resultados superiores a los logrados por otros arietes; resultados logrado por el tipo de válvula de impulso empleada.

3.5.1. Valoración ambiental

La bomba de ariete hidráulico al tratarse de un equipo que aprovecha la energía renovable de fuentes naturales de agua, no puede ser evaluada económicamente en base a equipos existentes que realizan el mismo trabajo.

Por lo expuesto se considera a la bomba de ariete hidráulico un equipo indispensable para una aplicación doméstica, en zonas rurales donde no exista disponibilidad de energía eléctrica (Douglas, M. Considine 2005).

Además al considerar que utiliza energía renovable, lo hace un equipo invaluable debido a que protege el medio ambiente, ya que no contamina, además de no utilizar energía eléctrica.

Además de otras ventajas tales como su requerimiento de limitado mantenimiento, operación continua, fácil construcción, se manifiestan consecuencias negativas en los embalses de las que se deben tener presente para minimizar el impacto, tales como:

- ✚ Fuerte impacto ambiental en la etapa inicial sobre los ecosistemas zonales: flora y fauna terrestre y acuática, sobre el clima, incorporación de ruidos, incremento de material sólido en suspensión en el cuerpo de agua, inundación de tierras fértiles.
- ✚ Sobre los ecosistemas acuáticos: cambios en la calidad del agua y de su normal escurrimiento, mortalidad, disminución y/o reemplazo de especies. Impedimento del viaje migratorio de las especies acuáticas para el desove.

3.6. Indicaciones generales para la instalación y operación de un ariete

De las experiencias obtenidas por la experimentación y por consultas bibliográficas, se plantean varias consideraciones para proceder al elegir el tamaño del equipo **Pipo, J.** (2002).

- ✚ Es necesario conocer el caudal de estiaje, es decir determinar el flujo de agua disponible en la fuente y en dependencia de esta magnitud escoger el tamaño de la máquina, tomando como referencia los caudales máximos y mínimos, tomados para el ariete construido como 0,05 y 0,45 m³/h.
- ✚ La tubería de alimentación debe estar construida de un material rígido y de elevada dureza preferiblemente hierro galvanizado o acero. Esta a su vez debe ser hermética lo más recta posible y estar fuertemente anclada para evitar vibraciones. Se recomienda la siguiente relación de diámetro en función del caudal de agua disponible (tabla 3.6):

Tabla 3.6. Relación de diámetros en función de caudal disponible

Caudal de alimentación- Q	litros/min	30	60	90	120	250	500	1000
Diámetro recomendable del tubo de alimentación	pulgadas	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2	3	5	8
	mm	35	41	52	70	80	125	200

- ✚ La longitud de la tubería de descarga (L_2) debe ser de 2 a 7 veces la altura de alimentación.
- ✚ La caja de válvulas debe reunir los mismos requisitos que la tubería de alimentación. Generalmente la caja de válvula está formada por una T de hierro galvanizado (figura 3.10) o de acero y un codo del mismo material y debe ubicarse a nivel sobre una base o cimiento que le brinde rigidez y estabilidad al equipo.



Figura 3.10. Caja de válvulas del ariete

- ✚ La cámara de aire debe tener una dimensión no menor de 0,5 metros de longitud ni mayor de 1 metro y pueden utilizarse relaciones de 2 a 3 veces el diámetro de la tubería de alimentación (D) para elegir el diámetro de la base.
- ✚ Para la tubería de descarga como fue experimentado en el prototipo, se pueden usar mangueras de goma siempre y cuando soporten las cargas hidráulicas en la descarga. El diámetro de la misma debe ser entre 0,3 a 0,5 veces del diámetro de la tubería forzada. Cuando la altura de descarga es superior a 20 metros es conveniente reforzarla al inicio (en la salida de la campana) con tubo de acero estándar al menos los primeros 8 metros, pues se corre el riesgo de que la sobre presión generada por el golpe de arietes se transmita a esta y como consecuencia se quiebre, en la práctica esto ha sucedido en los puntos más bajos, donde la goma se rompe longitudinalmente.
- ✚ El diámetro de abertura de la válvula de impulso debe estar entre 1 a 2 veces el diámetro de la tubería forzada, teniéndose en el objeto en estudio diámetros iguales. Para lograr estas relaciones es necesario construir la caja de válvulas con una dimensión mayor que la tubería de alimentación (figura 3.11).



Figura 3.11. Relación de diámetros de la válvula de impulso

- ✚ La salida del agua en la válvula de impulso debe ser lo más libremente posible y cuanto mayor sea el espacio anular entre el pistón y el tubo mejor será el funcionamiento del equipo.
- ✚ La abertura de la válvula de descarga debe estar en la relación siguiente, 0,5 a 2 del diámetro de la tubería forzada.
- ✚ La inclinación del tubo debe ser de unos 30° por debajo de la horizontal para un funcionamiento adecuado, aunque podría hacerlo con ángulos menores.
- ✚ El ariete hidráulico debe funcionar entre 60 y 90 golpes por minuto y cuanto más lento sea el funcionamiento, más agua utiliza para el bombeo.
- ✚ Para que funcione el ariete hidráulico se necesita un salto de agua que varíe entre 0,20 m a 30 m. Cuando el salto de agua sea mayor, el ariete hidráulico va a ser más pequeño y económico y menos cantidad de agua va a requerir para elevar otra cantidad de agua.

3.6.1. Regulación y ajuste del régimen de trabajo

La regulación consiste en variar el ángulo de ataque de la válvula de impulso, modificada para estos fines, por medio de un tornillo regulador. Las veces en que la válvula de impulso se abre o se cierra en un minuto se conoce como, golpes por minutos (GPM), a medida que el ángulo de ataque aumenta se disminuye el caudal bombeado.

Cuando se dispone de suficiente agua en la captación se debe ajustar o regular la válvula de impulso a una frecuencia tal que permita bombear el máximo, sin importarnos el agua que se pierda. De lo contrario, si el agua disponible es limitada la regulación debe limitarse de manera tal que el caudal bombeado más el derramado sea ligeramente menor que el disponible con lo que se evitará que la bomba se detenga por falta de agua.

Para el régimen de trabajo del ariete se planteó una matriz causa efecto, relacionada con el adecuado funcionamiento del mismo (figura 3.12).

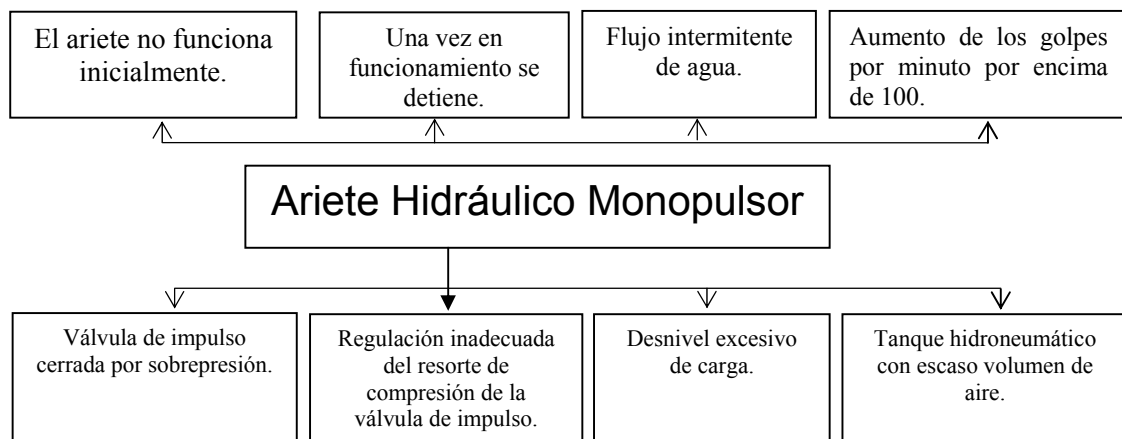


Figura 3.12. Matriz causa – efecto: árbol de problemas

Mediante la matriz causa-efecto, quedan simplificados los principales problemas de funcionamiento manifestados durante las pruebas operativas del ariete. Se posibilita la solución rápida del problema identificado por la causa que lo origina.

3.7. Conclusiones parciales del capítulo

- ✚ Se aplicó las ecuaciones de flujo y pérdidas hidráulicas para el Ariete Monopulsor, donde se encuentra que la mayor pérdida en la tubería de descarga es de 26,42 %, influenciado por el aumento de la velocidad del fluido.
- ✚ Se realiza una comparación de consumo energético teniendo en cuenta el costo equivalente para 24 horas de trabajo, demostrándose un consumo de 6,5 \$ para la máxima potencia alcanzada por el ariete.
- ✚ Se calculó la resistencia de las partes esenciales de la bomba y se analiza la eficiencia según método de Rankine, donde se incluye el producto de todos los rendimientos.

CONCLUSIONES GENERALES

- ✚ El estudio realizado ha permitido formular las ecuaciones del principio teórico y experimental del ariete hidráulico monopulsor; para el mismo se ha considerado la relación entre las siguientes variables: flujo volumétrico de carga, flujo volumétrico de pérdida y flujo volumétrico de bombeo, altura de carga y de descarga, relación de flujo y número de golpes por minuto de la válvula de impulso.
- ✚ Se obtienen mejoras en el pulso y rendimiento del equipo mediante el uso de una válvula de paso modificada para válvula de impulso. El comportamiento del rendimiento volumétrico aumenta alcanzando un valor máximo de 72,24 %, resultados favorables relacionados con las modificaciones realizadas a la válvula de impulso.
- ✚ En la válvula de impulso modificada, el número de golpes varía entre 77 y 99 golpes por minuto, resultados superiores a lo planteado por la teoría, siendo estos de 75 golpes por minuto, lo que garantiza un mayor rendimiento operacional del ariete.
- ✚ Del análisis de los rendimientos se deduce que las mejores condiciones de trabajo de ariete se obtienen para el valor de flujo volumétrico de 0,22 m³/h, correspondiéndose a la altura de descarga de 2,8 m; para estas condiciones se alcanza un rendimiento total de 20,59 %.
- ✚ El costo equivalente para 24 horas de trabajo del ariete es proporcional a 6,5 \$ para la máxima potencia alcanzada por el ariete, lo que indica la rápida recuperación de inversión del mismo, considerándose que su costo por componentes es de 195 CUC más 15 CUC de fabricación.



RECOMENDACIONES

Luego de la realización de este trabajo, recomendamos que:

- ✚ Se les dé seguimiento, a este campo de aplicación de las fuentes renovables de energías, ya que las mismas, van a contribuir al desarrollo del programa agropecuario, al ahorro de energía para el bombeo de agua y por consiguiente a disminuir el costo del m^3 de agua transportada.
- ✚ Implementar la investigación de la aplicación de combinaciones en serie y paralelo del ariete.
- ✚ Realizar un estudio comparativo de las posibles combinaciones de las partes componentes del ariete y su relación con el rendimiento volumétrico, hidráulico y de Rankine.



BIBLIOGRAFÍA

1. **Ayala, M I**, (2005) Proyecto de Tesis “Diseño y Construcción de un Ariete Multipulsor”, Loja- Ecuador
2. **Boytell, f.** (1972) Ariete Hidráulicos. Investigación comparativa, Take JHPM. geografía de Oriente, Ciudad de la Habana.
3. **Douglas, M. Considine.** (2005), Tecnología de las energías: Solar, Hidráulica, Geotérmica y Combustibles químicos.
4. **Dubbel**, (1975), Manual de Construcción de Máquinas - Tomo I, Editorial. Labor S.A., Barcelona. España.
5. **Feodosiev V.I.**, (1985) Resistencia de Materiales, tercera edición, Editorial MIR, Moscú-Rusia.
6. **Fox R., Kenneth**, (1984), Manual de diseño construcción, instalación, mantenimiento de arietes hidráulicos. Predesur, Loja-Ecuador.
7. Grupo de mecánica de fluidos Politécnica de Valencia, 2000.
8. **G.U.N.T** (1998) Manual de experimentos, Geraütebau GmbH, Barsbüttel-Alemania.
9. **Izquierdo, R.** (2007), Folleto de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. IV Modulo. Electromecánica.
10. **Krol J.** (1957), The Automatic Hydraulic Ram, Inst. Mech. Eng. Proc, Londres.
11. **Mataix C**, (1982), Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas – 2da Edición, Editorial. Harla, México.
12. **Montecinos, A.**, (2004) Energía y tú conciencia energética: Respeto Ambiental, Revista Científico-Popular trimestral CUBA SOLAR, #25.
13. **N. Zhukovski.**, (1847-1921) “Sobre el choque hidráulico”
14. **Pashkov, N.N., Dolqachev, F.M.**, (1977), Hidráulica y máquinas hidráulicas, Editorial Mir Moscú-Rusia.
15. **Pérez, D.**, (1984), Equipos de Bombeo. Editorial Pueblo y educación.



16. **Pipo, J.**, (2002), Folleto Ariete Hidráulicos, diseño, construcción y explotación, ISMM.
17. **Stevenazzi D.**, (1942), El Ingeniero – Año V. N°47, Órgano Oficial del centro de Ingenieros de Córdoba, Argentina.
18. **Tacke J.H.P.M.** (1985) Arietes Hidráulicos. Investigación comparativa, Delf-Suiza.
19. **Trueva, S.** (1986), “Hidráulica”, CECSA; México.
20. **Wylie, E.B., Streeter, V.L.** (1993), Fluid transients in systems, Editorial. Prentice Hall, New Jersey-U.S.A.
21. http://www.flowtite.es/cast/apartado5/apart5_05.asp (programa golpe de ariete, Grupo Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia).
22. <http://www.cubasolar.cu/arietesmultipulsores>.
23. <http://www.hydraulic.com>.

ANEXOS







Hoja de cálculo para la evaluación del ariete y datos experimentales.

