



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECÁNICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de diploma

En opción al título de ingeniero mecánico

Caracterización de un ariete hidráulico multipulsor

Autor: Elioiqui Guilarte Defino

Tutores: Ms.C. Rodney Martínez Rojas
Ms.C. Benigno Leyva De la cruz

Moa, 2017

Año 59 de la Revolución



DECLARACIÓN DEL AUTOR

Elíoiquí Guílarde Delfino, autor único de este trabajo, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo con fines convenientes.

Autor. Elíoiquí Guílarde Delfino

Ms.C. Rodney Martínez Rojas

Ms.C. Benigno Leyva De la Cruz



Dedicatoria y Agradecimientos

A Dios

Doy gracias a Dios porque en cada momento me ha acompañado y sin su gran ayuda no hubiese cumplido esta gran obra que con mucho esmero desarrolle.

A mis Padres

Eliecer Guílarde Lores y Aideé Delfino Fernández porque siempre han estado conmigo dándome fuerzas, aliento, esperanza de manera incondicional .porque siempre han buscado lo mejor para mí y lograron darme la herencia que un hijo puede tener, son mis estudios. Por todo el apoyo, moral y económico incondicional que me han brindado en todos estos años de duros esfuerzos.

A mi Hijo

Thiago Eli Guílarde Gonzales que con solo llegar a mi vida me hizo el papa más feliz del mundo...

A mis tutores

Rodney Martínez Rojas y Benigno Leyva De la Cruz a quienes les agradezco infinitamente su disposición y apoyo para la realización de este trabajo...



A mis Hermanos

Por toda la motivación que me daban y porque siempre creyeron en mí...

A mis compañeros

Fueron los partícipes de mis momentos de tristeza y felicidad...



Pensamiento

*“El éxito no se logra por hacer cosas extraordinarias,
sino por hacer cosas ordinarias extraordinariamente
bien”*

Ché



RESUMEN

En el presente trabajo se recoge una amplia información sobre el principio de funcionamiento de los arietes hidráulicos y los parámetros para su óptima instalación. Se formula las ecuaciones del principio teórico del ariete hidráulico multipulsor. Se determinaron las principales dimensiones de la bomba de ariete hidráulico multipulsor a partir del diámetro de alimentación con un valor de 50,8 mm. Mediante los procesos tecnológicos estudiados en la carrera se pudo construir el ariete en un taller mecánico en Santiago de Cuba. Se obtuvieron los parámetros de funcionamiento del ariete hidráulico multipulsor a partir de los experimentos realizados al mismo en diferentes condiciones de trabajo, variando la altura de alimentación, gasto o caudal de alimentación, recorrido de la válvula impulsora y altura de desnivel de descarga. Mediante un análisis de regresión se obtuvieron los modelos empíricos para el pronóstico del gasto de descarga y los rendimientos hidráulico, volumétrico y de Rankine. Se determinó según los resultados obtenidos la condición de máximo rendimiento de ariete hidráulico obteniéndose como condición el máximo recorrido de la válvula (7 mm), mayor caudal de alimentación (1,17 l/s) y la mayor altura de alimentación (2,37 m). La valoración económica y el análisis del efecto ambiental del trabajo desarrollo indica que por concepto de construcción de la bomba de ariete multipulsor se incurrió en un costo de 151 CUP y que las principales afectaciones ambientales están dadas por generación de ruido, y alteración del ecosistema por derrame de agua.



SUMMARY

In the present work an extensive information is collected on the principle of operation of the hydraulic rams and the parameters for its optimal installation. The equations of the theoretical principle of the hydraulic multi-ram are formulated. The main dimensions of the multipulse hydraulic ram pump were determined from the feed diameter with a value of 50.8 mm. By means of the technological processes studied in the race it was possible to build the ram in a mechanical workshop in Santiago de Cuba. The operating parameters of the multipulse hydraulic ram were obtained from the experiments carried out on the same in different working conditions, varying the feed height, feed flow or flow rate, drive valve travel and discharge height difference. By means of a regression analysis the empirical models were obtained for the forecast of discharge costs and hydraulic, volumetric and Rankine yields. According to the results obtained, the condition of maximum hydraulic ram performance was obtained, obtaining as a condition the maximum valve travel (7 mm), higher feed rate (1.17 l / s) and the highest feed height (2.37 m). The economic valuation and the analysis of the environmental effect of the work development indicates that for the construction of the multipulse hammer pump a cost of 151 CUP was incurred and that the main environmental effects are given by noise generation and alteration of the ecosystem by water spill.



ÍNDICE

Introducción.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO	4
1.1. Introducción	4
1.2. Estado del Arte	4
1.3. El agua fluido motriz de los arietes hidráulicos	6
1.4. Ariete hidráulico, configuración general de la bomba de ariete	7
1.4.1. Principio y funcionamiento de la bomba de ariete	8
1.4.2. Explicación del fenómeno del golpe ariete	9
1.4.3. Consecuencias del golpe de ariete.....	12
1.5. Ciclo hidráulico de la bomba de ariete	12
1.5.1. Nuevo ciclo de trabajo	16
1.6. Características de elementos básicos del ariete hidráulico	17
1.7. Conclusiones parciales del capítulo.....	20
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO PARA LA EVALUACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO	21
2.1. Introducción	21
2.2. Determinación de las principales dimensiones del ariete hidráulico multipulsor..	21
2.3. Metodología de cálculo de los parámetros técnicos de la red hidráulica	22
2.3.1. Pérdidas hidráulicas por fricción; primarias y secundarias	22
2.3.2. Altura desarrollada por el ariete y caudal circulante	23
2.3.3. Número de Reynolds.....	23
2.3.4. Cálculo del factor de fricción	24
2.3.5. Ecuaciones de flujo para el Ariete	25
2.3.6. Presión máxima y mínima de la instalación.....	25
2.4. Metodología para evaluar la eficiencia	26
2.5. Materiales y técnica experimental.....	27
2.5.1. Instrumentos empleados para la experimentación	27
2.6. Definición de los parámetros involucrados en el proceso	28



2.7 Diseño de experimento	29
2.7.1 Selección de las variables de entrada y sus niveles.....	29
2.7.2 Caracterización de la variable de salida	30
2.7.3 Matriz de planificación del experimento.....	30
2.8 Procedimiento estadístico para elaboración de los resultados	30
2.8.1 Ajuste de curva por regresión.....	31
2.9 Conclusiones parciales del capítulo.....	31
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRAULICO	
MULTIPULSOR.....	32
3.1. Introducción.....	32
3.2. Análisis del dimensionamiento del ariete hidráulico.....	32
3.3. Construcción del ariete hidráulico multipulsor.....	33
3.3.1. Cámara de aire del ariete hidráulico multipulsor.....	34
3.3.2. Ariete hidráulico multipulsor	35
3.4. Resultados obtenidos de manera experimental.....	35
3.5. Estimación del número de Reynolds, coeficiente de fricción de la tubería y las pérdidas existentes en la descarga.....	37
3.6. Comportamiento de las pérdidas con relación al caudal de descarga.....	38
3.7. Valores estimados de los rendimientos calculados	39
3.8. Modelos ajustados por regresión	40
3.9. Curva característica de la bomba de ariete	41
3.9.1. Curva característica de la bomba de ariete de altura de impulsión vs gasto de descarga.....	41
3.9.2. Comportamiento del rendimiento hidráulico vs gasto de descarga	42
3.9.3. Tendencia del rendimiento volumétrico vs gasto de descarga	43
3.9.4. Relación entre el rendimiento de Rankine y el caudal de descarga	44
3.9.5. Comportamiento de los rendimientos calculados	45
3.9.6. Comportamiento de los rendimientos calculados	46
3.9.7. Comportamiento de los rendimientos hidráulico, volumétrico y de Rankine..	48
3.10. Incidencias económicas y ambientales.....	49



3.11. Valoración ambiental	51
3.12. Indicaciones generales para la instalación y operación de un ariete	52
3.12.1. Regulación y ajuste del régimen de trabajo.....	53
3.13. Conclusiones parciales del capítulo	54
Conclusiones generales	55
Recomendaciones.....	56
Bibliografía	57



Introducción

Uno de los principales problemas que enfrentan los países en desarrollo es la imposibilidad de suministrar agua, en calidad y cantidad suficiente, a los sectores rurales y urbanos marginales. El abastecimiento de agua está supeditado a la disponibilidad de fuentes de energía compatibles con las condiciones sociales, culturales y económicas de los sectores con menores recursos. Con frecuencia, es necesario aplicar técnicas de elevación de agua para posibilitar su aprovechamiento mediante un trabajo de bombeo. Los equipos más difundidos para elevación de agua de tipo convencional son las motobombas y las electrobombas. Las primeras aprovechan la energía de combustibles derivados del petróleo y las segundas la energía eléctrica para impulsar una bomba centrífuga. Sin embargo, los combustibles hidrocarburos y la electricidad no son las fuentes de energía más adecuadas al ámbito rural y urbano marginal. Ello debido a las dificultades relacionadas con el almacenamiento, transporte y distribución de combustibles, además de los ocasionados por la generación de desechos que contaminan el ambiente Ayala (2005).

De otra parte, las elevadas inversiones requeridas no permiten contar con un suministro continuo y fiable de energía eléctrica e hidrocarburos en estas zonas. Mediante la aplicación de tecnologías apropiadas, se han desarrollado equipos para la elevación de agua que operan en base a energías no convencionales como la energía eólica, solar e hidráulica bajo la forma de pequeños saltos de caídas de agua, estas fuentes son, más ventajosas que las convencionales, debido a que su disponibilidad es prácticamente ilimitada, los costos son mínimos y no contaminan el medio ambiente.

Equipos como bombas de ariete hidráulico, aerobombas, turbobombas y bombas manuales forman un paquete de tecnologías evolutivas que son utilizadas para dotar de agua y saneamiento a poblaciones marginales. La evidencia experimental ha demostrado la aplicabilidad de estas tecnologías de bajo costo al bombeo de agua.

Esto significaba que los pueblos y aldeas aislados, que hasta entonces habían tenido que procurarse el agua con cubos o coches cisterna, por primera vez, con un esfuerzo considerablemente inferior, podrían abastecerse de agua potable. Como se documenta en las memorias de patente correspondientes, el ariete hidráulico se continuó mejorando



durante las décadas siguientes. Pero la práctica demostró, a pesar de todas las mejoras, que la construcción de arietes se veía afectada por muchas incógnitas. El comportamiento de la longitud de los tubos, las secciones del tubo, el comportamiento del desplazamiento volumétrico del agua en relación con la cantidad de agua, los caudales fluctuantes de las fuentes, la configuración de las válvulas, el emparejamiento de materiales, la fricción interna del agua y muchos otros aspectos debían reconsiderarse para cada instalación, fundamentalmente a partir de valores empíricos Montesino (2004).

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 & Langhanss, 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.

Para el desarrollo del presente trabajo se parte de la siguiente **situación problemática**:

En la asignatura Mecánica de los Fluidos se tratan como uno de los elementos fundamentales, los parámetros de trabajo de las bombas y de los sistemas de bombeo, la clasificación de las bombas, las curvas características de las bombas, la fuerza de empuje ascensorial y el choque hidráulico, además de tratarse la regulación de los parámetros de trabajo de las bombas como sistema de habilidades de la asignatura. De lo anteriormente planteado se desprender la necesidad de desarrollar prácticas de laboratorios, lo que se ha dificultado por la falta de equipamientos de laboratorio.

En la actualidad no se aborda, en profundidad, lo referente a la caracterización del ariete hidráulico como máquina de flujo, por lo que se requiere de la construcción de un equipo que permita facilitar el análisis del comportamiento de los parámetros operacionales de un ariete multipulsor, contribuyendo a mejoras de las prácticas de laboratorios con fines docentes y la elevación de la calidad de las asignaturas.

De lo anterior planteado se deriva como **problema a investigar**:

El insuficiente conocimiento de las características técnicas operacionales de un ariete hidráulico multipulsor.



Como **objeto de estudio** se plantea

Ariete hidráulico como sistema alternativo de bombeo de agua.

Entonces se define como **objetivo general**

Determinar el comportamiento de los parámetros de trabajo del ariete multipulsor para el bombeo de agua.

Su **campo de acción** seria: Rendimiento de bombas de ariete con fines de laboratorio.

Se establece como **hipótesis**

Mediante el análisis de los principales elementos mecánicos, tales como la válvula de impulso y el tanque hidroneumático, su combinación y parámetros del ariete hidráulico multipulsor; se puede demostrar la mejora en el gasto de descarga y rendimientos del equipo mediante la regulación de la válvula impulsora, y las variaciones del gasto, altura de alimentación y de descarga.

Los **objetivos específicos** serian:

1. Efectuar una revisión bibliográfica sobre los sistemas hidráulicos que utilizan al ariete como elemento para el bombeo.
2. Analizar los rendimientos del ariete teniendo en cuenta las modificaciones de la válvula de impulso.
3. Analizar las incidencias económicas y ambientales de la instalación.

Para darle solución a estos objetivos se proponen las siguientes **Tareas**:

- Estudio bibliográfico referente a la operación de arietes hidráulicos y prácticas de mecánica de fluidos.
- Recopilación de materiales e instrumentación para la construcción y prueba del ariete.
- Desarrollo de la metodología de operación y caracterización del ariete hidráulico multipulsor.
- Montaje, puesta en funcionamiento del ariete hidráulico y realización de corridas experimentales con agua.
- Análisis económico y ambiental de la construcción y uso del ariete hidráulico.



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO METODOLÓGICO

1.1. Introducción

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 Ayala (2005).

El agua es el fluido motriz del ariete hidráulico y debido a su importancia escribiremos sus cualidades y la manera de explotarla saludablemente. El agua es el elixir de la vida en el medio de los hombres y los animales, sin agua no se habrían originado vida en nuestro planeta. Del líquido vital se ha escrito mucho en la literatura pero se hace poco o nada para protegerla, el ariete hidráulico es un pequeño aporte para la solución de esta problemática global. Las bombas hidráulicas se clasifican en tres grandes grupos: Bombas de desplazamiento positivo, bombas de desplazamiento no positivo y las bombas de fluido impelente.

Como objetivo de este capítulo se plantea: Analizaremos 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 diseñar y construir un ariete eficiente y funcional. El ariete no puede funcionar en ningún caso por sí solo, necesita de una instalación completa en la que están todos sus componentes ajustados entre sí. Se describirá los elementos para su instalación, desde la captación de fuente hasta el almacenamiento del fluido.

1.2. Estado del Arte

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

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

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

Se ha disertado mucho sobre el verdadero creador empírico de esta bomba, pero una de las crónicas aceptadas es en la cual se atribuye la invención al inglés John Whitehurst en el año 1775, fermento su ingenio para construir un aparato con un principio de funcionamiento novedoso, accionaba manualmente un grifo en la tubería conectada a un tanque de abasto, en un nivel superior, para provocar el fenómeno físico conocido como golpe de ariete, que permitía elevar el líquido a un tanque de almacenamiento colocado a una altura mayor, (figura 1.1), aunque su aplicación no fue tan apetecida por el gran ruido y vibración propios de dicho equipo, además era manual. Este ariete fue capaz de levantar el agua hasta una altura de 4,9 m.

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

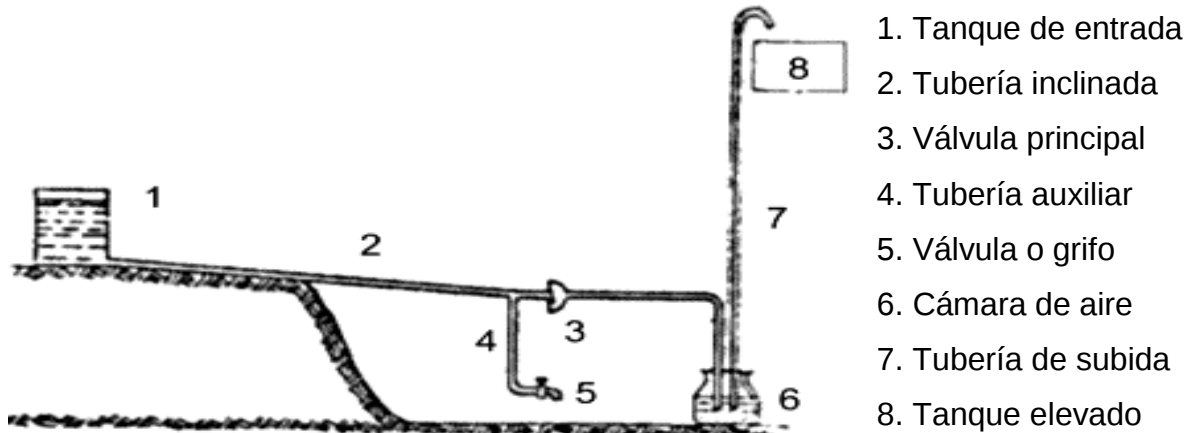


Figura 1.1. Esquema de funcionamiento del ariete ideado por John Whitehurst.

La sagacidad humana añadió elementos al invento cervecero, y seis años antes de que inventaran el globo aerostático los dos famosos hermanos franceses: Joseph Montgolfier junto a su hermano Etienne, concibieron un ariete automático, en principio, similar a los contemporáneos, aunque entonces lo denominó el golpe hidráulico figura (1.2). La mejora con la anterior radica en que ya no se utilizaba fuerza externa para abrir la válvula de

impulso, sino la fuerza inherente del agua en movimiento se encargaba de realizar esta tarea.

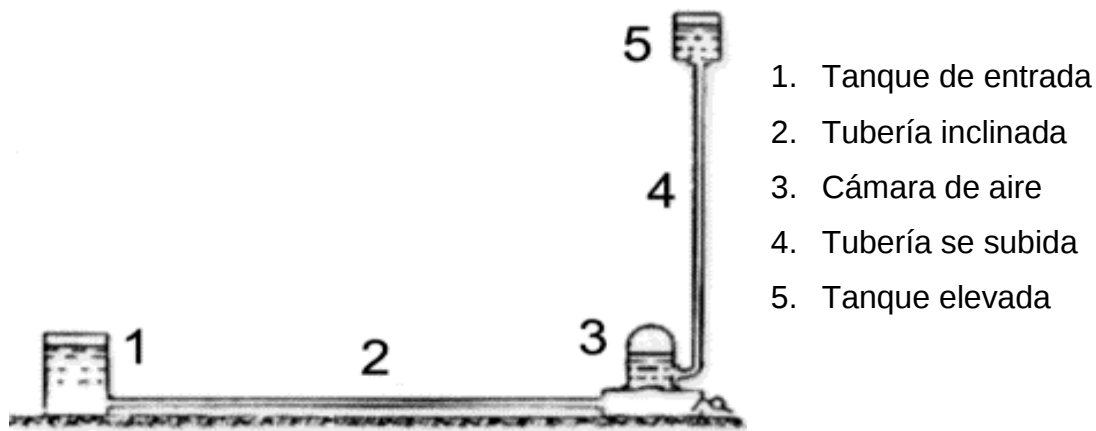


Figura 1.2. Ariete hidráulico ideado por Joseph Michael Montgolfier.

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

1.3. El agua fluido motriz de los arietes hidráulicos

Dos terceras partes de nuestra Tierra están cubiertas de agua. De ellas, se puede disponer de solo un 3% como agua dulce potable.

Desde el punto de vista químico, el agua es el óxido del hidrógeno y una molécula se origina de la fusión (unión por fusión) de dos átomos de hidrógeno con uno de oxígeno. La abreviatura es H_2O .

Conocemos el agua en tres apariencias, que los físicos denominan estados físicos: sólida en forma de hielo, líquido como el agua en su sentido propio y gaseosa en forma de vapor.

El agua en estado líquido existe en un rango relativamente pequeño de temperaturas, concretamente de 0 a 100 °C. Reacciona al calor o al frío de forma excepcionalmente

sensible. Además, es necesaria una presión atmosférica dominante sobre la Tierra. Si falta una sola de estas condiciones, el agua no existe en forma líquida.

El agua en estado líquido siempre existe en forma transitoria. Se evapora de forma continua, incluso a temperatura ambiente normal. Para ello, el agua necesita calor, que obtiene de su entorno más próximo. La percibimos como frescor, cuando por ejemplo nos mojamos la piel. Cuando hacemos evaporar el agua con aporte de energía. Esto ocurre también a temperatura ambiente, con solo disminuir la presión atmosférica. Por tanto en las montañas altas al hervir huevos se debe tener en cuenta que allí el agua hierve por debajo de los 100°C. El enorme coeficiente de expansión de volumen entre agua en forma líquida y vapor se utiliza para propulsar máquinas.

1.4. Ariete hidráulico, configuración general de la bomba de ariete

La configuración generalizada de cada ariete depende de su diseño y fabricación, pero el principio de funcionamiento sigue siendo el mismo en todos ver figura (1.3).

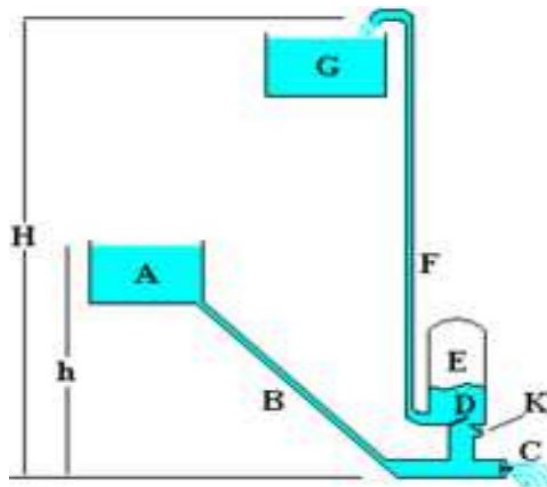


Figura 1.3. Configuración típica de la bomba de ariete.

En donde:

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

h - altura disponible entre el tanque y el punto más bajo del ariete hidráulico.

A - reservorio de alimentación.

B - tubería de conducción.

C - válvula de impulso.

D - válvula de retención, descarga.

E - cámara de aire.

F - tubería de descarga.

K - válvula de aire.

1.4.1. Principio y funcionamiento de la bomba de ariete

La bomba de ariete es una de las máquinas más sencillas. A continuación se presenta el ciclo de funcionamiento generalizado de un ariete hidráulico, como lo muestra la figura (1.4).

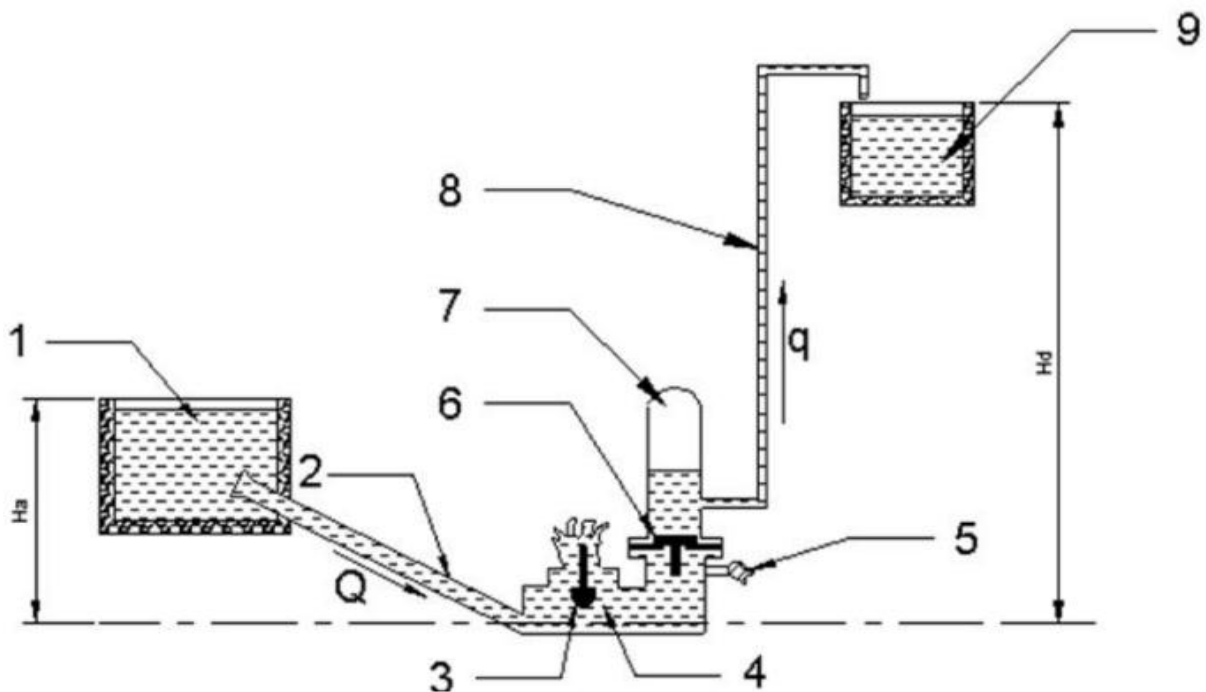


Figura 1.4. Esquema del Principio de funcionamiento del Ariete Hidráulico.

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

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

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

El retroceso del agua en la tubería de alimentación, produce una ligera succión en la caja de válvulas (4), creando una caída de presión que produce la apertura de las válvulas de impulsión y el cierre de la válvula check (6). De esta forma, el proceso se vuelve automático. El aire comprimido continúa impulsando el líquido almacenado en ella por la tubería de descarga, entre ciclos de operaciones; lográndose una entrega de agua casi uniforme hacia el tanque de almacenamiento (9).

El aire que es parte de la cámara de aire se consume en el flujo bombeado, sino se renovase, manteniendo el nivel se saturaría toda la cámara de agua, por esta razón se coloca la válvula de aire. (5), En su posición óptima que es debajo de la válvula check. Esta válvula funciona aprovechando la onda de presión negativa que produce una depresión en la caja del ariete y al producirse dicha depresión, succiona una pequeña cantidad de aire que va a renovar el aire de la cámara. Su mayor parte el caudal, se verterá afuera en el tanque reservorio.

La longitud del tubo no influye directamente en el caudal. Sí influye en el tiempo de ciclo del transporte mediante la masa del agua que contiene y el tiempo de aceleración. Una tubería larga tiene tiempos de aceleración largos y tiempos de ciclo alto. Si las tuberías son demasiado cortas, la dinámica propia de la válvula de impulsión y de la válvula checo, ejerce una influencia negativa. Debido a su inercia, las válvulas no tienen tiempo suficiente para abrirse y cerrarse por completo en un mismo ciclo.

1.4.2. Explicación del fenómeno del golpe 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 se escuchan 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 (1.5) se representa el incremento de la presión al momento del cierre de una compuerta. GUNT, (1998).

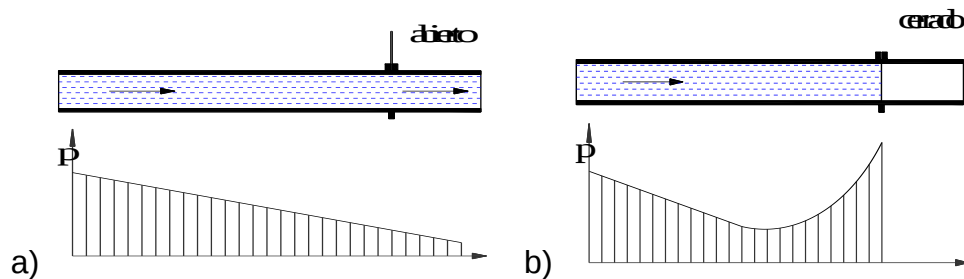


Figura 1.5. Representación de la presión. **a) Compuerta abierta** **b) Compuerta cerrada.**

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.

Debido a las propiedades ligeramente elásticas del fluido al ocurrir el cerrado brusco de la válvula por donde circula un a cierta velocidad y de cierta longitud, las partículas de fluido que se han detenido son empujadas por las que vienen detrás y que siguen aún en movimiento, situación que provoca el aumento de la presión que se desplaza por la

tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido. Este aumento de presión tiene dos efectos: comprime ligeramente el fluido, reduciendo su volumen, y dilata ligeramente la tubería. Cuando todo el fluido que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y, por tanto, ésta tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal.

Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario. El fluido se desplaza en dirección contraria pero, al estar la válvula cerrada, se produce una depresión con respecto a la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el fluido puede pasar a estado gaseoso formando una burbuja mientras que la tubería se contrae.

Desde el punto de vista energético puede considerarse la transformación de la energía cinética del fluido en energía potencial elástica (cambios de presión) y viceversa. Si la tubería carece de roce y es indeformable (condiciones ideales) donde no hay pérdidas de energía, el fenómeno se reproduce indefinidamente. Si hay roce y la tubería es elástica, parte de la energía se va perdiendo y las sobrepresiones son cada vez menores hasta que el fenómeno se extingue G.U.N.T (1998).

En el caso de cierre de una válvula, la fuerza viva con que el agua estaba animada se convertiría en trabajo, determinando en las paredes de la tubería presiones superiores a la carga inicial.

Si se pudiera cerrar la válvula en un tiempo $t = 0$, se produce el cierre instantáneo y considerando que el agua fuese incompresible y la tubería no fuese elástica, la sobrepresión tendría valor infinito. En la práctica, el cierre lleva algún tiempo (T_v), por pequeño que sea y la energía que va a absorberse se transforma en esfuerzos de compresión del agua y deformación de las paredes de la tubería.

La sobrepresión no es infinita, pero tiene un valor más o menos alto según el tiempo de cierre y el material de que esté hecha la tubería. La temperatura también influencia, aunque no mucha. Esta sobrepresión se origina en la válvula que se cierra, y viaja por la tubería a una velocidad que se llama celeridad " C_s ". Estas ondas de sobrepresión forman parte de las llamadas ondas transientes, y suelen ir seguidas de ondas de depresión.

En Ingeniería es muy importante determinar la magnitud de esta sobrepresión para diseñar las tuberías con suficiente resistencia para soportarla. En las válvulas operadas a discreción, la sobrepresión no es muy grande porque se procura que T_v sea grande (cierre lento).

Pero en las salidas de operación de equipos (parada de bombas, daño de válvulas) la sobrepresión puede ser muy grande, por lo que se procura disminuirla con válvulas de alivio, cámaras neumáticas, chimeneas de equilibrio.

1.4.3. Consecuencias del golpe de ariete

Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada puede llegar a entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos (grifos, válvulas). La fuerza del golpe de ariete es directamente proporcional a la longitud del conducto, ya que las ondas de sobrepresión se cargarán de más energía, e inversamente proporcional al tiempo durante el cual se cierra la llave: cuanto menos dura el cierre, más fuerte será el golpe. El golpe de ariete estropea el sistema de abastecimiento de fluido, a veces hace reventar tuberías de hierro colado, ensancha las de plomo, arranca codos instalados Ayala (2005).

1.5. Ciclo hidráulico de la bomba de ariete

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

Como partida se inunda el sistema aguas abajo, la válvula de impulsión se cierra debido a la presión inicial H_a , el agua hace que abra la válvula check, hasta el nivel H_a debido al principio de vasos comunicantes. Seguido de este primer paso, se debe accionar la válvula de impulso manualmente, así se extrae el aire de las tuberías, hasta que el ariete comience a funcionar automáticamente Rodríguez (2004).

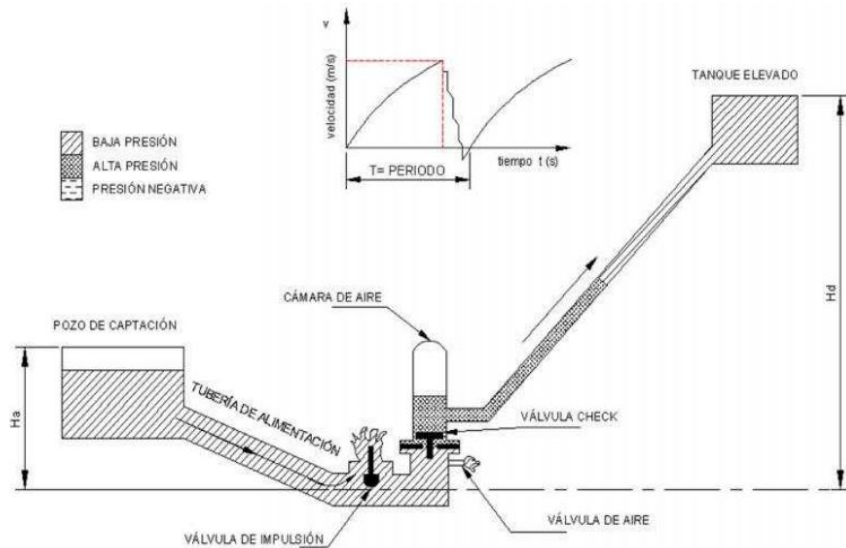


Figura 1.6. Eventos que se presentan en un ciclo.

Con esta grafica es más fácil observar el comportamiento de las presiones en cada sección del ariete, se observa que desde el tanque de alimentación hasta la válvula anti retorno que se encuentra en la parte inferior de la campana o cámara de aire la presión es baja, valor que se incrementa desde el paso del agua por la válvula de retención hasta la campana, y desde la campana hasta una parte de la tubería de descarga del ariete hidráulico figura (1.7).

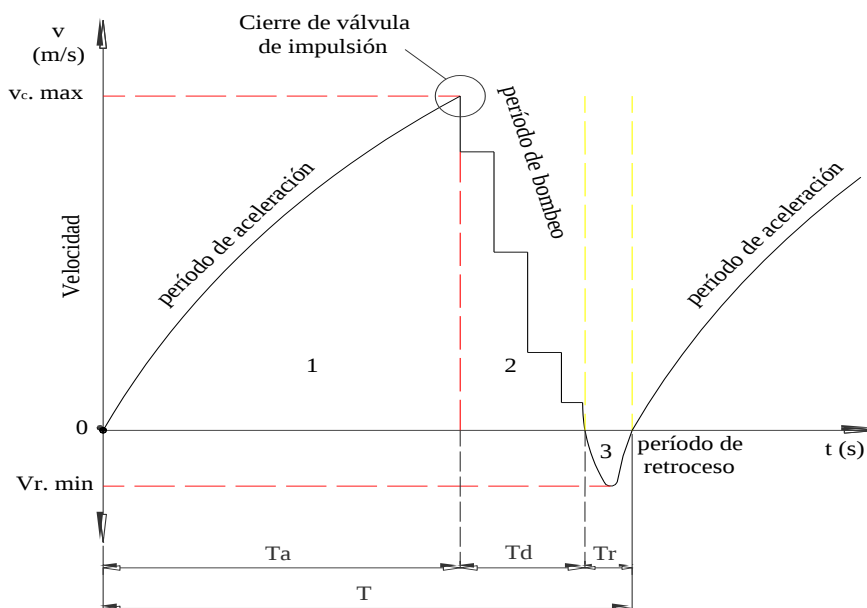


Figura 1.7. Representación gráfica de los periodos velocidad-tiempo.

Esta grafica se encuentra en función de la velocidad en que ocurren cada proceso y el tiempo que se demoran en hacerlo. Se nota claramente como el primer periodo llamado periodo de aceleración, existe un incremento de la velocidad de fluido en el tiempo T_a (tiempo de duración del periodo de aceleración), al cerrarse la válvula de impulso existe un paro repentino de la velocidad del fluido descendiendo de forma escalonada en un tiempo T_d (tiempo de duración de bombeo) dando lugar al segundo periodo llamado periodo de bombeo. En este periodo la velocidad del fluido alcanza el valor de cero, dando lugar al tercer periodo del ciclo hidráulico de la bomba de ariete llamado periodo de retroceso que ocurre en un tiempo T_r (tiempo de duración del periodo de retroceso), en este periodo el fluido alcanza el valor mínimo de velocidad. Como se puede observar en la gráfica la sumatoria de todos estos tiempos da como resultado el tiempo que dura el ciclo de trabajo del ariete.

Periodo 1: Aceleración. Se podría decir que este fenómeno inicia desde que la energía cinética del agua es nula, por lo que la velocidad es igual a cero, es decir el agua todavía se encuentra en el tanque de captación, seguido de esto el agua empieza a acelerar debido a la gravedad, las válvulas se encuentran en su posición baja hasta que el agua llega con una presión que está en función directa con la altura de alimentación H_a , haciendo que se cierren, terminando el periodo 1 e iniciando el periodo 2 figura (1.8).

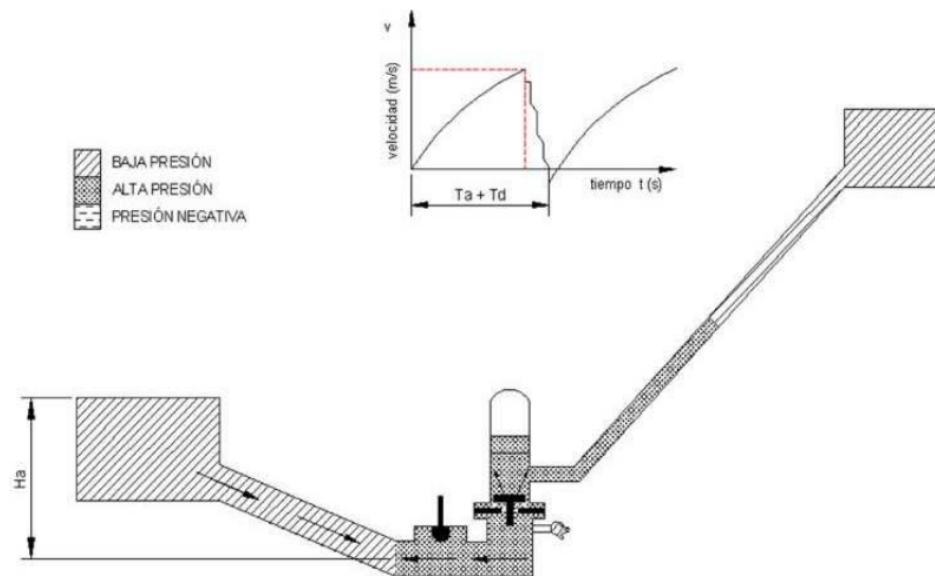


Figura 1.8. Cierre de las válvulas de impulsión.

Periodo 2: Bombeo. El instante en que las válvulas de impulso se cierran, inicia el periodo 2, este finaliza el momento que se produce una desaceleración del flujo en la cámara de aire como se puede observar en la figura (1.9). En este instante en el sector de la válvula de impulso se produce una presión muy alta, esta es amortiguada en la cámara de aire.

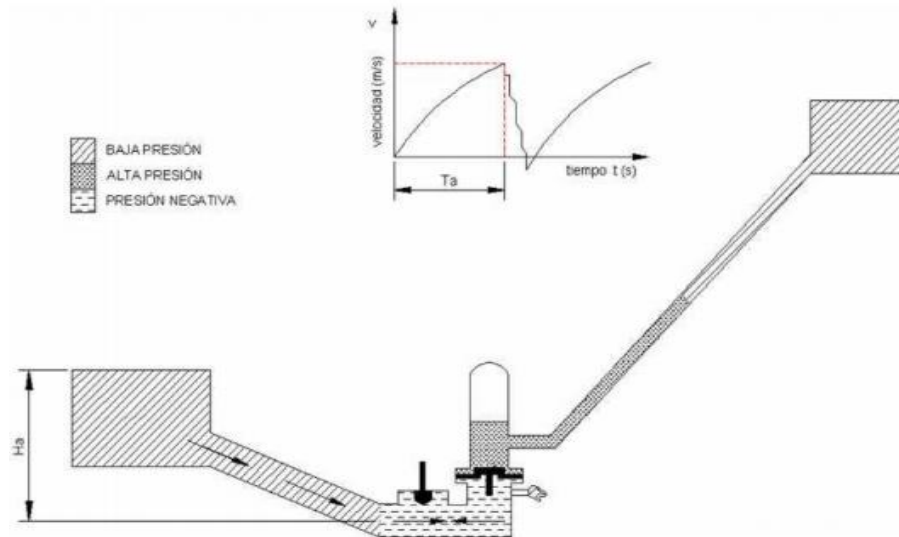


Figura 1.9. Amortiguación en la cámara de aire.

Periodo 3: Retroceso. El periodo 3 se observa en la figura (1.10), en el cual consta de 3 partes: la caída de presión, la reapertura de la válvula de impulso, y el tiempo durante el cual se cierra la válvula check. Aquí la velocidad vuelve a hacer cero, teniendo un nuevo ciclo en progreso.

Se observa que el colchón de aire que existe en la cámara de aire ejerce una presión sobre la válvula check haciendo que se cierre, el agua fluya por la tubería de descarga y no retorne a la tubería de impulso.

Al retroceder el agua por la tubería de alimentación se produce una sección de baja presión en el cuerpo del ariete, de esta manera se genera una renovación de aire en la cámara neumática por la válvula de aire, al mismo tiempo se abre nuevamente la válvula de impulsión, empezando un nuevo ciclo de trabajo Campoverde (2005).

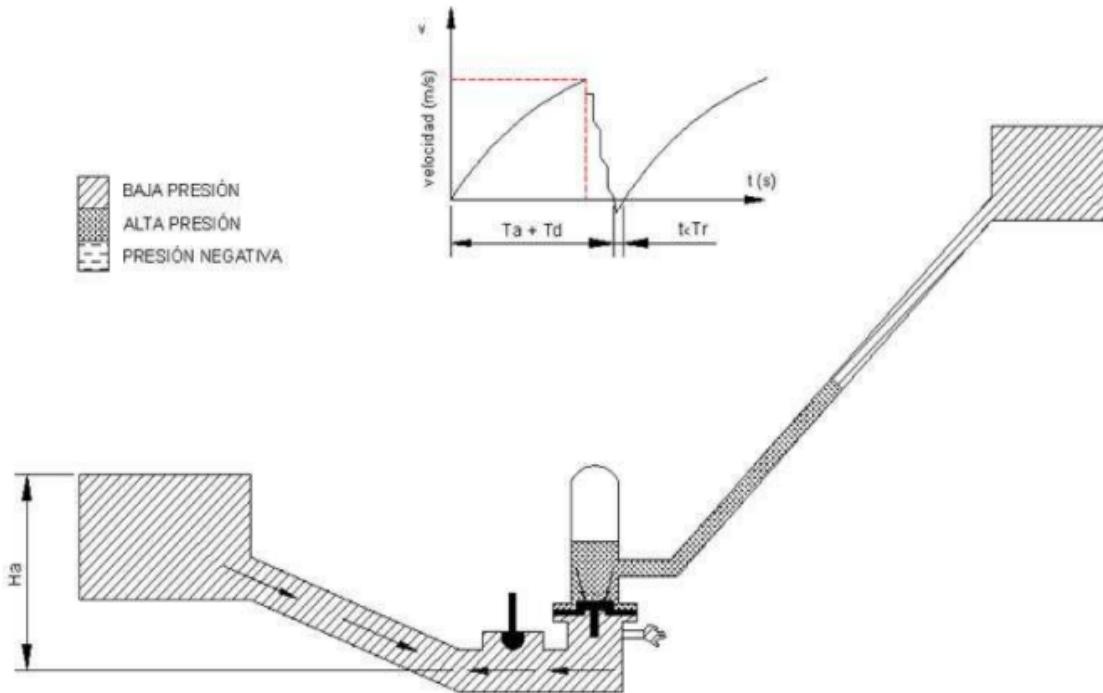


Figura 1.10. Cierre de la válvula de descarga.

1.5.1. Nuevo ciclo de trabajo

Luego de culminar el periodo número tres o periodo de retroceso con la caída de presión en el cuerpo del ariete, el cierre de la válvula anti retorno y la reapertura de las válvulas de impulso da lugar al comienzo de un nuevo ciclo de trabajo para el ariete hidráulico como se muestra en la figura (1.11).

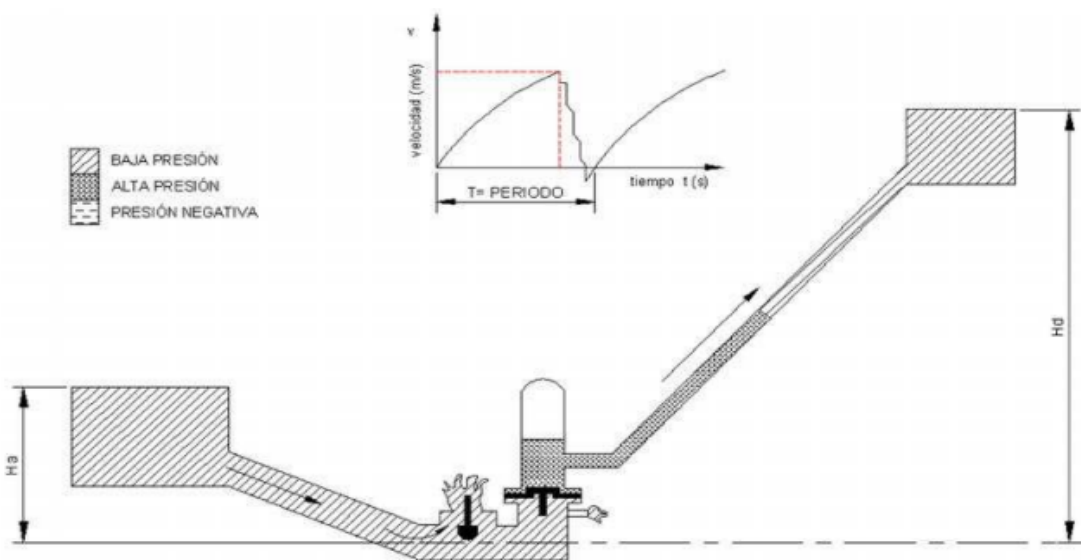


Figura 1.11. Reapertura de las válvulas nuevo ciclo de trabajo.

1.6. Características de elementos básicos del ariete hidráulico

Sus características generales son; no necesita combustible fósil, electricidad, ni ningún impulsor en absoluto fuera del flujo, no necesita un mantenimiento permanente. Este sistema es más económicos que los convencionales motorizados, no causa contaminación al medio ambiente, su operación es segura no necesita mano de obra durante su operación y su costo de funcionamiento teóricamente es nulo; ya que este dispositivo presenta únicamente dos partes móviles, la vida útil del equipo es larga y funciona continuamente las 24 horas del día. Ideal para terreno escarpado en donde se pueda realizar riego tecnificado (aspersión o riego por goteo) con finalidades agropecuarias, además puedan solventar otras necesidades como agua potable si esa fuese la necesidad Ayala (2005).

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

Colector

El colector puede tener diferentes tamaños. Puede ser un tubo de cemento de un diámetro de 0.6 m hasta 1m. Puede también ser un cilindro de plástico o de metal. De todas maneras el tubo de salida que va a la bomba del ariete debe siempre estar cubierto por unos 30 - 40 centímetros de agua para no dejar escapar el golpe de ariete.

El colector debe ser construido de manera que las burbujas de agua y a la fuente no entren en el tubo de salida. Para evitar que eventuales residuos sólidos como arena o piedras entren en el tubo de salida, el tubo debe de estar colocado unos 20 centímetros arriba del fondo del colector Ayala (2005).

En la toma del agua no debe haber entrada de aire por tanto es necesario hacer un reservorio de agua con cierta capacidad del volumen que permite al flujo continuo y guarde las condiciones de estabilidad y el sitio donde se ubica el ariete debe ser un desagüe ya que el agua salpica figura (1.12).

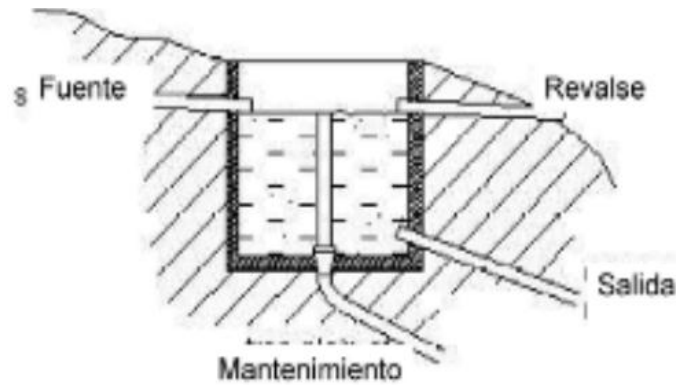


Figura 1.12. Colector del agua para el ariete.

Ducto de entrada

El ducto de entrada conecta el colector con la bomba de ariete. El diámetro de este tubo depende del tamaño del ariete utilizado. El tubo de entrada debe resistir los golpes del ariete y debe ser de material rígido y de metal. El tubo debe ser perfectamente hermético, no puede tener ninguna fuga y debe tener una pendiente constante figura (1.13).

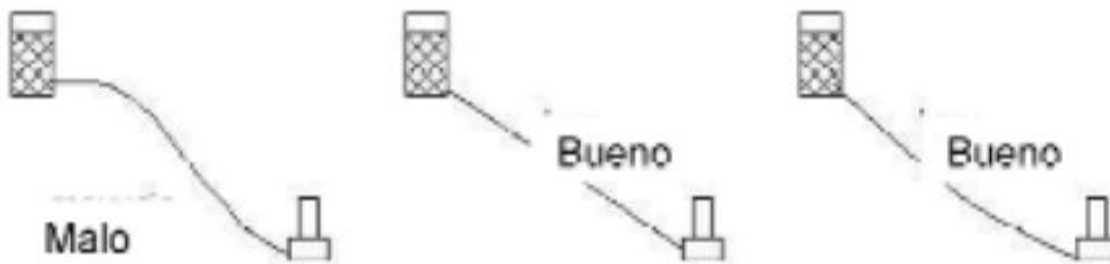


Figura 1.13. Ducto de entrada para el ariete

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.

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 abocardado en forma de trompeta, la corriente se rompe (Figura.1.14), lo que ocasiona torbellinos en el

agua por consiguiente pérdidas por fricción. La consecuencia es que se liberan gases del agua. Este gas forma burbujitas que permanecen en el conducto de impulsión. Estas burbujas quedan atrapadas en el conducto como parásitos que actúan como colchones neumáticos y frenan el funcionamiento del ariete. Un conducto de impulsión debe ser siempre de acero, un tubo de plástico o manguera son elásticos al golpe de ariete y compensarían su acción.

Utilice preferiblemente tubos de acero inoxidable con bridas soldadas. Los tubos enroscados con rosca y manguito tienen un punto de rotura bajo controlada en la rosca y se romperán por allí tras un uso prolongado Ayala (2005).

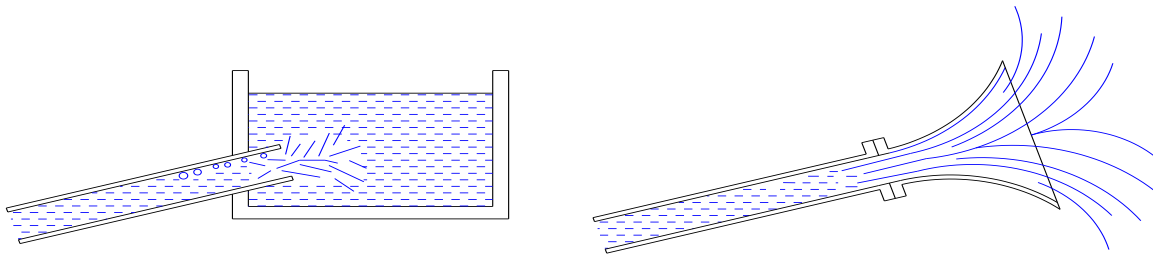


Figura 1.14. Entrada del tubo de impulsión.

La cara del tubo de impulsión no debe ser áspera ni tener cantos o rebabas ni costuras soldadas. Esto frenaría la columna de agua y reduciría el rendimiento del ariete de forma considerable. La posición óptima de un conducto de impulsión es ligeramente combada hacia el pozo de extracción (Figura1.15), aproximándose al ariete en forma casi asintota, la longitud óptima del tubo de impulsión según Weinmann (2004) es 4 veces la altura de impulsión.

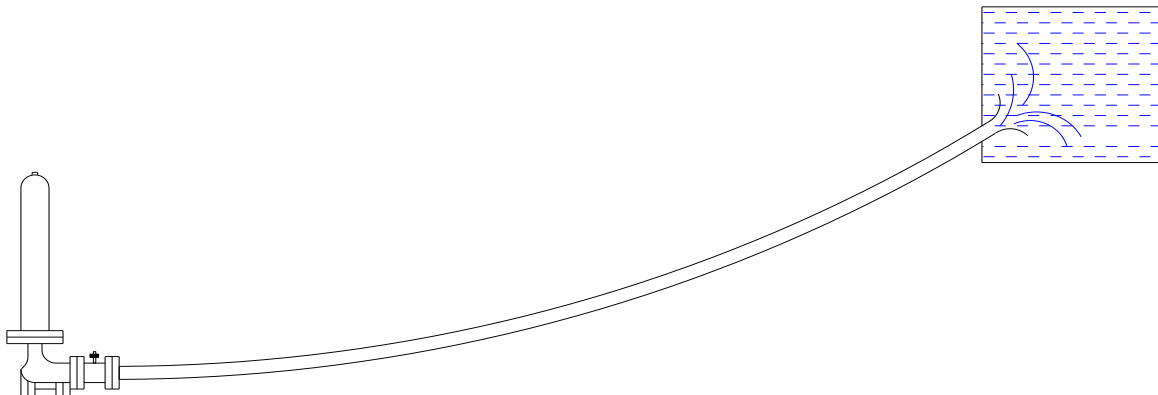


Figura 1.15. Instalación óptima del tubo de impulsión.



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.

1.7. 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 equipo, así como su estructura y partes que lo componen. Además, nos da una visión clara de la importancia que tiene la instalación completa y el tratamiento del agua como fluido motriz del equipo.



CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO PARA LA EVALUACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO

2.1. Introducción

Para desarrollar el procedimiento de cálculo y diseño de este tipo de bombas se debe tener muy en cuenta el principio de funcionamiento y la energía en la cual se basa, en el caso de un ariete multipulsor la energía que se explota es la hidráulica, pero además de esto, se debe manejar con claridad la Mecánica de Fluidos ya que el procedimiento para su respectivo cálculo se basa en esta rama.

Como objetivos del capítulo tenemos: Establecer el diseño de las principales dimensiones del ariete, el análisis de las ecuaciones que definen su funcionamiento, realizar el diseño de experimento y establecer el procedimiento para el ajuste de curvas.

2.2. Determinación de las principales dimensiones del ariete hidráulico multipulsor

El procedimiento en el cual se basó todo el dimensionado de las principales partes constructivas del prototipo del ariete multipulsor fue empírico, el cual nos determina las relaciones del diámetro de entrada, estas relaciones se muestran a continuación:

Diámetro válvula check	0,5 diámetro de entrada
Diámetro cámara de aire	3 diámetro de entrada
Diámetro de descarga	0,5 diámetro de entrada
Altura cámara de aire	10 diámetro de entrada

Estas relaciones han sido verificadas con diseños de prototipos por parte del investigador Rodríguez (2004), quien ha desarrollado esta tecnología.

Según hemos analizado el diseño de este proyecto, se tomó como el diámetro de entrada 2 in (50,8 mm) y una vez definido este valor se aplicó las relaciones anteriormente propuestas, obteniendo las dimensiones principales con las cuales se construirá el ariete multipulsor.

2.3. Metodología de cálculo de los parámetros técnicos del ariete hidráulico

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

2.3.1. Pérdidas hidráulicas por fricción; primarias y secundarias

Existe una gran variedad de expresiones para el cálculo de la pérdida primarias de carga en tuberías, entre las que se encuentra la que usualmente se denomina ecuación de Darcy- Weisbach Ayala, (2005), que fue inicialmente propuesta por Weisbach en 1855 y posteriormente por Darcy en 1875, y cuya expresión es:

$$h_{roz} = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} . \quad (2.1)$$

Dónde: 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:

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

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).

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

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).

2.3.2. 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):

$$H_i = H_d + h_{\text{local}} + h_{\text{roz}} + h_{\text{iner}} \quad (2.4)$$

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:

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

Dónde: dv/dt es la ley de variación de velocidad con respecto al tiempo, es decir

$$v = f(t)$$

2.3.3. Número de Reynolds

La frontera entre el régimen laminar y turbulento puede establecerse analíticamente a partir del valor del número de Reynolds, cuyo valor es:

$$Re = \frac{vD}{\nu} \quad (2.6)$$

Siendo la viscosidad cinemática del fluido en cuestión. En el caso de una tubería de sección circular, la expresión del número de Reynolds es:

$$Re = \frac{4Q}{\pi \nu D} \quad (2.7)$$

En la Empresa G.U.N.T. de Hamburg-Alemania se ha diseñado un equipo para efectuar ensayos de Osborne Reynolds y visualizarlos. Este equipo permite representar la corriente laminar y turbulenta. La corriente se puede ver gracias a un trazado en tinta en un fragmento de tubo transparente ver figura (2.1).

El cambio de régimen laminar a turbulento se produce cuando: $Re \approx 4000$

Relam. = 2300 corresponde a un régimen laminar.

Retur. ≥ 4000 corresponde a un régimen turbulento.

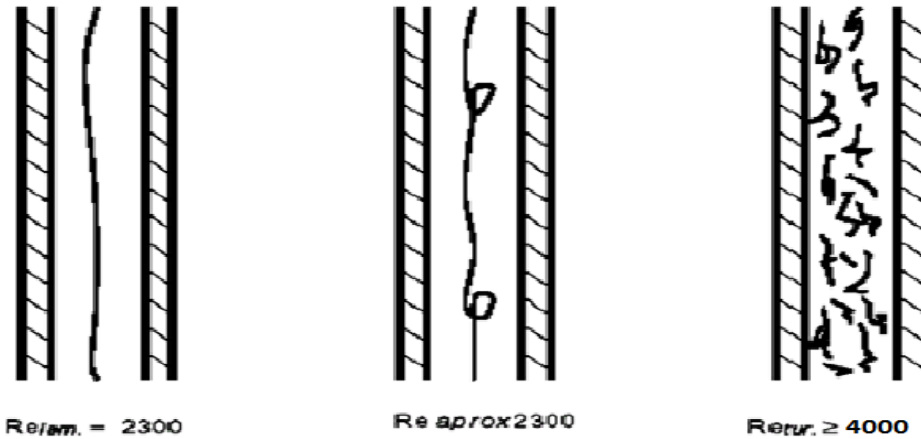


Figura 2.1. Representación del régimen laminar y turbulento.

2.3.4. Cálculo del factor de fricción

En régimen laminar ($Re < 2300$), el factor de fricción λ depende únicamente del número de Reynolds y puede calcularse mediante la expresión de Poiseuille:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.8)$$

En el caso del régimen turbulento ($Re \geq 4000$), el factor de fricción depende, en general, del número de Reynolds Re , y de la rugosidad relativa ε_r , siendo ésta última el cociente entre la rugosidad equivalente de la tubería y el diámetro D :

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (2.9)$$

La rugosidad equivalente absoluta cuantifica el estado superficial de la tubería y su incidencia sobre las pérdidas por fricción.

En el caso del régimen turbulento, puede calcularse el factor de fricción mediante la expresión de Colebrook-White (1938):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon_r}{3,7} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.10)$$

La fórmula anterior permite un cálculo bastante preciso del valor del factor de fricción en régimen turbulento, aunque presenta el inconveniente de que no se puede extraer el valor de λ de forma explícita.

Hay que tener en cuenta que la corrosión, incrustaciones, etc. aumentan la rugosidad en las tuberías, modificando el factor de fricción y aumentando las pérdidas de carga. Es conveniente prever esta situación pues los ábacos están realizados con valores obtenidos con tuberías nuevas y limpias.

2.3.5. Ecuaciones de flujo para el Ariete

En el ariete hidráulico 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:

$$\zeta_1 \cdot \frac{Q_1^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \zeta_2 \cdot \frac{Q_2^2}{2 \cdot g \cdot A^2} = \zeta_3 \cdot \frac{Q_3^2}{2 \cdot g \cdot A^2} \quad (2.11)$$

Dónde: ζ - Coeficiente de resistencia; (adimensional). g - aceleración de la gravedad (m/s^2). Q - caudal (m^3/s). A - área (m^2).

2.3.6. 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 2.12 y la presión mínima está expresada por la ecuación 2.13, en (m).

$$P_{\max} = (H_a + h_a) \quad (2.12)$$

$$P_{\min} = (H_a - h_a) \quad (2.13)$$

Dónde: 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).

2.4. Metodología para evaluar la eficiencia

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

$$\eta = \frac{N_u}{N_b} \cdot 100 \quad (2.14)$$

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):

$$N_u = q \cdot H_i \cdot g \cdot \rho ; [W] \quad (2.15)$$

Dónde: q - caudal de bombeo (m³/s). H_i - altura de impulsión (m).

Siendo:

$$H_i = h_d + \sum h + h_i \quad (2.16)$$

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/s²). ρ - densidad del agua (kg/m³).

$$N_b = (Q + q) \cdot H_a \cdot g \cdot \rho \quad (2.17)$$

Siendo: Q - caudal derramado por la válvula de impulso (m³/s). Q + q - Caudal de alimentación (m³/s). H_a - altura de alimentación (m).

$$\eta = \frac{q \cdot H_i}{(Q + q) \cdot H_a} \cdot 100 \quad (2.18)$$

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

$$N_u = q \cdot (H_i - H_a) \cdot g \cdot \rho \quad (2.19)$$

$$N_b = Q \cdot H_a \cdot g \cdot \rho \quad (2.20)$$

Entonces:

$$\eta_R = \frac{q \cdot (H_i - H_a)}{Q \cdot H_a} \cdot 100. \quad (2.21)$$

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

$$\eta_v = \frac{q}{Q + q} \cdot 100. \quad (2.22)$$

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.

2.5. 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, rendimiento hidráulico, de Rankine y volumétrico con relación al caudal o gasto de descarga del ariete hidráulico.

2.5.1. Instrumentos empleados para la experimentación

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. Instrumentos empleados en la experimentación.

Instrumentos	Variable a medir	UM
Cubo plástico	Volumen de agua que entra al ariete y el de descarga	dm ³
Pie de rey	Dimensiones de recorrido de la válvula de impulso	mm

Tabla 2.1. Instrumentos empleados en la experimentación (Continuación)

Cronómetro	Tiempo de cierre de la válvula de impulso y tiempo de trabajo de ariete	s
Cinta métrica	Altura de carga, altura de descarga, longitud de las tuberías y nivel de los tanques	m

2.6. Definición de los parámetros involucrados en el proceso

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).

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

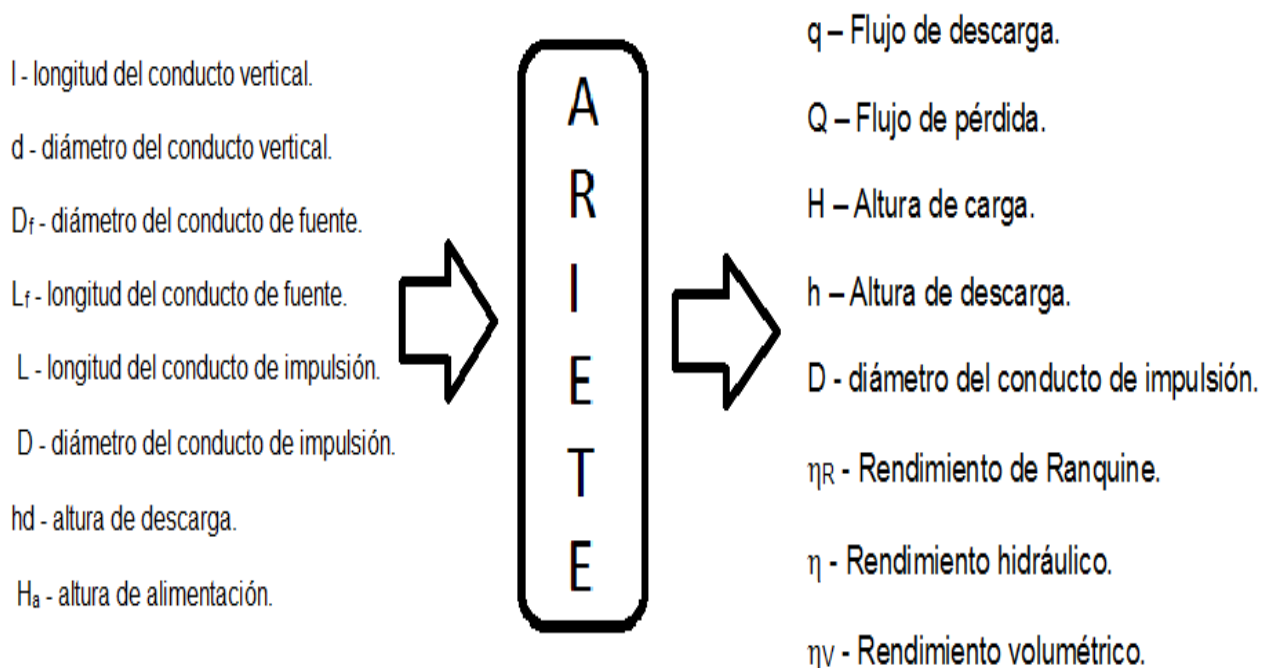


Figura 2.2. Relación entre parámetros del proceso.

2.7 Diseño de experimento

Para efectuar el diseño del experimento se tuvo en cuenta que es importante asegurar la simplicidad y la conducción de este tal que sea económico y eficiente. Se debe hacer todo el esfuerzo posible por lograr ahorro de tiempo, de dinero, de personal y de material experimental, de acuerdo con Hernández, (1997) y Chacín, (2000).

Para la caracterización del ariete en las condiciones de laboratorio se efectuó un diseño de experimento. Las variables de entrada consideradas fueron recorrido de la válvula(r), altura de alimentación del ariete (H_e), gasto de agua en la entrada del ariete (Q_e), y altura de impulsión del ariete (H_i). La variable de salida que se evaluó fue el gasto de agua en la descarga del ariete (Q_s).

2.7.1 Selección de las variables de entrada y sus niveles

Se escogieron las variables recorrido de la válvula (r), altura de alimentación del ariete (H_e), gasto de agua en la entrada del ariete (Q_e), y altura de impulsión del ariete (H_i), porque son la que se pudieron variar en las condiciones de experimentación disponibles a escala de laboratorio.

Los niveles del recorrido de la válvula fueron 3, 5 y 7 mm, estos se escogen por analogía con el trabajo realizado por Gonzalo y Campoverde (2011).

Los niveles de altura de alimentación del ariete son 1,97 – 2,07 – 2,13 – 2,23 y 2,37 m, los cuales se definieron teniendo en cuenta la altura máxima del tanque, y consideraciones prácticas pues no fue posible experimentar a un nivel de alimentación inferior a 1,97 m. El gasto de entrada se varió a dos niveles, el mínimo fue 0,87 l/s y el máximo 1,17 l/s, el mínimo se definió teniendo en cuenta que un gasto inferior a este valor no permite el funcionamiento del ariete y el máximo estuvo dado por la mayor abertura de la válvula del circuito de alimentación del ariete.

La altura de impulsión incluye a la altura del desnivel, la pérdida inercial, pérdida por rozamiento y local; el máximo se definió a partir del mayor desnivel que se pudo experimentar, el cual fue de 6,7 m y el mismo fue de 3 m que se especificó a partir del hecho de que un desnivel inferior a este valor no permite el funcionamiento el ariete; se escogen 10 niveles intermedios para un mayor estudio de la tendencia.

2.7.2 Caracterización de la variable de salida

Se escogió como variable de salida el gasto para caracterizar el ariete hidráulico multipulsor puesto que este se relaciona con el rendimiento a través de las ecuaciones (2.17; 2.20 y 2.21). La construcción de la curva característica del ariete, por analogía con una bomba para fluido a impelente, se basa en el comportamiento del gasto al variar la altura de la descarga.

Sobre la base de lo planteado anteriormente en este trabajo se precisa la significación de la variación del gasto y se establece la relación entre el gasto, recorrido de la válvula(r), altura de alimentación del ariete (H_e), gasto de agua en la entrada del ariete (Q_e), y altura de impulsión del ariete (H_i), así como la variación del rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine.

2.7.3 Matriz de planificación del experimento

En total, para el desarrollo de los experimentos se efectuaron 66 pruebas, 22 experimentos diferentes, dos réplicas para cada uno. La matriz de planificación de experimentos se expone en la tabla A1 del anexo 1.

2.8 Procedimiento estadístico para elaboración de los resultados

La cantidad de mediciones a realizar se determinaron sobre la base del sentido común y el modelo matemático propuesto por Miller *et al.* (2005). Comúnmente se efectúan tres mediciones de una cierta cantidad de magnitud para evaluar la medida de la tendencia central y, para determinar el tamaño de una muestra en un muestreo aleatorio simple se ha propuesto el siguiente modelo:

$$n = \left[Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{E} \right]^2 \quad (2.23)$$

Dónde:

n- es el tamaño de la muestra.

$Z_{\alpha/2}$ - es el estadístico de la distribución probabilística de Gauss. Se determinó en la tabla 3 de Miller *et al.* (2005).

σ - es la desviación típica poblacional.

E- Es el error máximo de estimación.

2.8.1 Ajuste de curva por regresión

El ajuste de curva por regresión se basó en el método de mínimo cuadrado, el cual se basa en el ajuste de una curva al conjunto de puntos ordenados, tal que se logra minimizar la distancia existente entre los puntos definidos por la recta ajustada y los puntos correspondientes. El método de mínimo cuadrado se expresa por un sistema de ecuaciones normales (Miller et al., 2005).

La bondad del ajuste realizado con el método de mínimo cuadrado se verificó utilizando tres criterios: el del coeficiente de determinación, de Student, y el de Fisher. Se consideró que el ajuste es significativo: según el criterio de Student, cuando se cumplió que p-Valor es inferior al nivel de significancia adoptado en la prueba; según el criterio de Fisher, cuando el Fisher de cálculo es mayor que el Fisher crítico o tabulado y según el criterio del coeficiente de determinación, cuando el valor de este estuvo próximo a 1 o -1.

En el Software Excel se utilizó la herramienta para análisis de datos que contiene programado la opción regresión, la misma permitió realizar el ajuste de curva con el método de mínimo cuadrado y chequear los tres criterios de bondad del ajuste.

2.9 Conclusiones parciales del capítulo

- Se estableció las condiciones de diseño del ariete hidráulico multipulsor.
- Se llevó a cabo el análisis de las ecuaciones que describen el funcionamiento del Ariete Multipulsor.
- Se dieron a conocer los principales instrumentos de medición que se utilizaron en cada experimento.
- Se planteó el diseño de experimento y los cálculos para el ajuste de curvas.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL ARIETE HIDRAULICO MULTIPULSOR

3.1. Introducción

El cálculo de cada una de las partes del ariete hidráulico multipulsor, 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 satisfactoriamente la función que les corresponde.

Como objetivo se plantea: Evaluar el desempeño hidráulico del ariete multipulsor, teniendo en cuenta las modificaciones de la válvula de impulso y la variación del caudal de alimentación, altura de alimentación y altura de impulso.

3.2. Análisis del dimensionamiento del ariete hidráulico

Luego de verificar el procedimiento de obtención de las principales dimensiones con las cuales se construyó el ariete multipulsor, se pasa a revisar y corroborar si estas dimensiones se aplicaron correctamente en el prototipo al momento de realizar su construcción, para esto nos valemos de una cinta métrica para la cámara de aire y para las tuberías no es necesario su medición debido a que sus dimensiones están normalizadas.

Con la medición realizada al ariete hidráulico se pudo corroborar las dimensiones correctas que este posee y poder a continuación verificar con el su respectivo diseño. Los resultados obtenidos en el proceso de análisis y comprobación de las dimensiones de ariete multipulsor, se muestran a continuación en la tabla 3.1:

Tabla 3.1. Dimensiones del ariete hidráulico multipulsor.

Componentes	Medidas por diseño	Dimensiones reales
Diámetro de entrada	2 in (50,8 mm)	2 in (50,8 mm)
Diámetro válvula check	1 in (25,4 mm)	1 in (25,4 mm)
Altura cámara de aire	20 in (508 mm)	12 in (304,8 mm)
Diámetro cámara de aire	6 in (152,4 mm)	9,5 in (241,3 mm)
Diámetro de descarga	1 in (25,4 mm)	1 in (25,4 mm)

Como se puede observar, los valores obtenidos en la tabla 3.1 en su mayoría concuerdan a excepción de las dimensiones de la cámara de aire. Según las condiciones de diseño planteadas en el capítulo 2, el valor de su diámetro debería ser de 152,4 mm, pero en realidad la cámara de aire que se utilizó cuenta con un diámetro de 241,3 mm, el valor de la altura de la cámara de aire debería ser 508 mm, pero el valor que tiene la que se utilizó es de 304,8 mm, esto se debe a que no se tenían los materiales para construir una con esas medidas, y tampoco se encontró una ya fabricada, como se observa en la figura 3.1.



Figura 3.1. Altura y diámetro de la campana

3.3. Construcción del ariete hidráulico multipulsor

El resultado del trabajo desarrollado para la construcción del ariete se muestra a continuación en la figura 3.2, como se puede observar el cuerpo del ariete está construido de acero inoxidable por obvias razones ya que el ariete cuando está en funcionamiento está sometido a variables valores de presión, las válvulas impulsoras están construidas de poliamida, material resistente a las condiciones de traba del ariete hidráulico, puesto que su funcionamiento es con agua la corrosión siempre será un problema a superar. Su construcción fue realizada en un taller mecánico en Santiago de Cuba.



Figura 3.2. Cuerpo del ariete y las válvulas impulsoras.

Como se puede observar para la fabricación del cuerpo del ariete y las válvulas impulsoras se utilizaron procesos tecnológicos como la soldadura en uniones de, entrada de las válvulas impulsoras, bridas para los acoplamientos, entrada a la campana o cámara de aire. También se utilizó el maquinado y taladrado para la fabricación de las válvulas impulsoras y la válvula anti retorno. Por último, para el acabado superficial se utilizó una pulidora para rebajar un poco los nudos de material de aporte derretidos por medio de la soldadura y luego se procedió a pintar el equipo.

3.3.1. Cámara de aire del ariete hidráulico multipulsor

Para la cámara de aire del ariete se utilizó una balita de refrigerante R22 que por su geometría alcanzaba a ser la más cercana a las medidas que por diseño se necesitaban, se muestra ya confeccionada en la siguiente figura 3.3.



Figura 3.3. Cámara de aire del ariete hidráulico multipulsor.

3.3.2. Ariete hidráulico multipulsor

A continuación, se puede observar en la figura 3.4 el ariete hidráulico multipulsor con todos sus elementos ensamblados.



Figura 3.4. Ariete hidráulico multipulsor

Para la unión de cada elemento al cuerpo del ariete se utilizaron tornillos M6 y juntas de goma para evitar los salideros ya que el ariete no puede tener ningún escape porque se incrementarían las pérdidas y afectaría el rendimiento del equipo.

3.4. Resultados obtenidos de manera experimental

Una vez que se ha revisado las características con las cuales se construyó el ariete multipulsor, se pasa a recopilar todos los valores obtenidos en los diferentes experimentos que se realizaron para este trabajo, donde se mantuvo un peso en la válvula de impulso (Pv) de 90 g para todos los experimentos, y se varió la altura de alimentación (He), gasto de alimentación (Qe), recorrido de la válvula impulsora y altura de desnivel. En la tabla 3.2 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.2. Valores obtenidos de manera experimental.

Qe (l/s)	He (m)	r (mm)	Qs (l/s)			Qspro (l/s)	Qs (m3/s)	Hdesn (m)
0,87	2,37	7	0,022	0,0225	0,022	0,02216	2,22E-05	6
			0,031	0,03	0,0305	0,0305	3,05E-05	5
			0,035	0,036	0,036	0,0356	3,57E-05	4
			0,037	0,04	0,037	0,038	3,80E-05	3,5
0,87	2,37	5	0,017	0,016	0,017	0,0166	1,66E-05	6,7
			0,025	0,025	0,025	0,025	2,50E-05	5,7
			0,03	0,03	0,0305	0,0301	3,02E-05	4,7
			0,037	0,037	0,037	0,037	3,70E-05	3,7
0,87	2,23	3	0,022	0,0225	0,022	0,0221	2,22E-05	6,3
			0,032	0,0315	0,032	0,0318	3,18E-05	5,3
			0,042	0,041	0,0415	0,0415	4,15E-05	4,3
1,17	2,13	3	0,035	0,036	0,035	0,0352	3,52E-05	6
			0,043	0,042	0,0425	0,0425	4,25E-05	5
			0,048	0,047	0,048	0,0476	4,76E-05	4
			0,054	0,051	0,053	0,0526	5,26E-05	3
1,17	2,07	5	0,04	0,039	0,0395	0,0395	3,95E-05	6
			0,044	0,045	0,045	0,0446	4,46E-05	5
			0,0505	0,05	0,0505	0,0503	5,03E-05	4
1,17	1,97	7	0,03	0,0305	0,03	0,0301	3,01E-05	6
			0,034	0,034	0,035	0,0343	3,43E-05	5
			0,041	0,04	0,0405	0,0405	4,05E-05	4
			0,0513	0,055	0,0528	0,053	5,30E-05	3

En la tabla se muestran los valores obtenidos mediante mediciones realizadas al ariete hidráulico multipulsor a escala de laboratorio, los parámetros medidos fueron la altura de alimentación (He, m), caudal de alimentación o de entrada al ariete (Qe, l/s), recorrido de la válvula impulsora (r, mm), peso de la válvula impulsora (Pv, g), altura de desnivel o distancia existente desde el nivel del líquido y la descarga del fluido (Hdesn, m), caudal o gasto de descarga (Qs, l/s) y la altura de impulsión (Hi, m). Para cada condición se realizaron tres mediciones de caudal de descarga y luego se calcula el caudal promedio de salida. Se varió el caudal de alimentación en dos niveles, la altura de alimentación en cuatro niveles, el recorrido de la válvula impulsora en tres niveles y la altura de desnivel, manteniéndose constante el peso de la válvula impulsora con un valor de 90 g. Los experimentos fueron realizados en la instalación de hidrotransporte del Instituto Superior minero Metalúrgico de Moa.

3.5. Estimación del número de Reynolds, coeficiente de fricción de la tubería y las pérdidas existentes en la descarga

En la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos del cálculo del número de Reynolds, coeficiente de fricción de la tubería, la altura de impulso y las perdidas existentes en la descarga, a partir de los resultados obtenidos de manera experimental.

Tabla 3.3. Resultados de los parámetros calculados al ariete.

Qe (l/s)	He (m)	r (mm)	Qspro (l/s)	Qs (m3/s)	Re	λ	hroz (m)	hi (m)	Hi (m)
0,87	2,37	7	0,02216	2,22E-05	1670,74	0,0383	0,00265	6	8,37
			0,0305	3,05E-05	2298,84	0,0278	0,00365	5	7,37
			0,0356	3,57E-05	2688,26	0,0238	0,00427	4	6,37
			0,038	3,80E-05	2864,12	0,0223	0,00455	3,5	5,87
0,87	2,37	5	0,0166	1,66E-05	1256,19	0,0509	0,00199	6,7	9,071
			0,025	2,50E-05	1884,29	0,0339	0,00299	5,7	8,072
			0,0301	3,02E-05	2273,71	0,0281	0,003612	4,7	7,073
			0,037	3,70E-05	2788,75	0,0229	0,004432	3,7	6,074
0,87	2,23	3	0,0221	2,22E-05	16670,74	0,0383	0,00265	6,3	8,53
			0,0318	3,18E-05	2399,33	0,0266	0,00381	5,3	7,53
			0,0415	4,15E-05	3127,93	0,0204	0,0049	4,3	6,53
1,17	2,13	3	0,0352	3,52E-05	2663,13	0,024	0,00423	6	8,13
			0,0425	4,25E-05	3203,3	0,0199	0,00509	5	7,13
			0,0476	4,76E-05	3592,72	0,0178	0,0057	4	6,13
			0,0526	5,26E-05	3969,58	0,0161	0,0063	3	5,13
1,17	2,07	5	0,0395	3,95E-05	29977,18	0,0214	0,00473	6	8,07
			0,0446	4,46E-05	3366,6	0,019	0,00679	5	7,07
			0,0503	5,03E-05	3793,71	0,0168	0,00602	4	6,07
1,17	1,97	7	0,0301	3,01E-05	2273,71	0,0281	0,003614	6	7,97
			0,0343	3,43E-05	2587,76	0,0247	0,004113	5	6,97
			0,0405	4,05E-05	3052,55	0,0209	0,004851	4	5,97
			0,053	5,30E-05	3997,21	0,016	0,006353	3	4,97

El cálculo del número de Reynolds (Re) se determinó para cada caudal de salida utilizando el diámetro de la tubería de descarga, la velocidad a la cual se transporta el fluido, la viscosidad dinámica del agua a temperatura ambiental y el peso específico. Como los valores de Reynolds en todos los casos no sobrepasan los cifras de 4000, el régimen es laminar, eso nos permite calcular los valores de λ para cada caso. Donde para régimen laminar se determina por la ecuación (2.8). Conocido los valores de λ se pasa a determinar las pérdidas que existen en la descarga, como la perdida por

rozamiento y las pérdidas inerciales. La suma de estas pérdidas juntamente con la altura de descarga nos da el estimado de la altura de impulsión.

3.6. Comportamiento de las pérdidas con relación al caudal de descarga

En la figura 3.5 se muestra el comportamiento de las pérdidas por rozamiento en la tubería de descarga del ariete con relación al caudal de descarga para cada condición de trabajo.

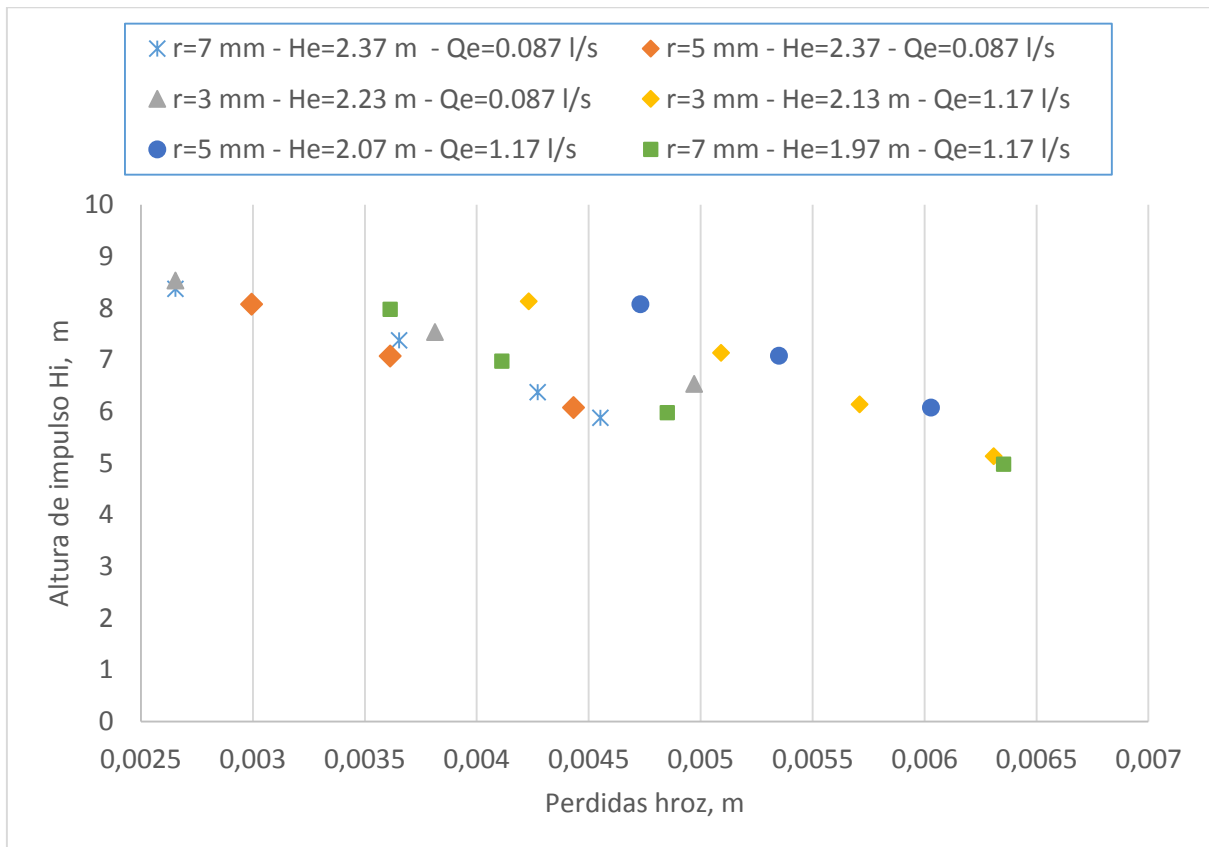


Figura 3.5. Pérdidas por rozamiento v/s caudal de descarga.

Para el cálculo de las pérdidas por rozamiento se tuvo en cuenta el factor de fricción que depende del régimen del fluido, la longitud de la tubería de descarga, el diámetro y la velocidad de transportación del fluido. El comportamiento de las pérdidas para cada condición de trabajo del ariete tienen la misma tendencia sus valores se van incrementado mientras disminuye la altura de impulsión, esto se debe a que a menor altura de impulsión para cada condición existe un aumento de caudal de descarga aumentando también la velocidad de propagación del fluido, y como las pérdidas son

directamente proporcional al cuadrado de la velocidad sus valores aumentan al aumentar la velocidad.

3.7. Valores estimados de los rendimientos calculados

En la tabla 3.4 se muestran los valores obtenidos de los cálculos de rendimientos hidráulicos, de Rankine y volumétricos para cada condición de trabajo de la bomba de ariete, partiendo de los parámetros de funcionamiento y resultados de manera experimental.

Tabla 3.4. Estimación de los rendimientos calculados.

Qe (l/s)	He (m)	r (mm)	Qspro (l/s)	Qs (m ³ /s)	Qs (l/día)	η_h (%)	η_v (%)	η_r (%)
0,87	2,37	7	0,02216	2,22E-05	1915,87	9,001	2,547	6,453
			0,0305	3,05E-05	2636,12	10,900	3,505	7,401
			0,0356	3,57E-05	3082,68	11,020	4,099	6,926
			0,038	3,80E-05	3284,35	10,820	4,367	6,458
0,87	2,37	5	0,0166	1,66E-05	1440,51	7,333	1,915	5,417
			0,025	2,50E-05	2160,76	9,788	2,873	6,915
			0,0301	3,02E-05	2607,31	10,349	3,467	6,882
			0,037	3,70E-05	3197,92	10,900	4,253	6,647
0,87	2,23	3	0,0221	2,22E-05	1915,87	9,749	2,547	7,201
			0,0318	3,18E-05	2751,36	12,361	3,659	8,701
			0,0415	4,15E-05	3586,86	13,978	4,770	9,209
1,17	2,13	3	0,0352	3,52E-05	3053,87	11,532	3,019	8,512
			0,0425	4,25E-05	3673,29	12,168	3,632	8,535
			0,0476	4,76E-05	4119,85	11,735	4,074	7,661
			0,0526	5,26E-05	4552,01	10,854	4,501	6,353
1,17	2,07	5	0,0395	3,95E-05	3414,01	13,169	3,376	9,793
			0,0446	4,46E-05	3860,55	13,051	3,817	9,233
			0,0503	5,03E-05	4350,33	12,627	4,301	8,325
1,17	1,97	7	0,0301	3,01E-05	2607,31	10,435	2,578	7,857
			0,0343	3,43E-05	2967,44	10,388	2,934	7,454
			0,0405	4,05E-05	3500,43	10,498	3,461	7,037
			0,053	5,30E-05	4583,69	11,451	4,532	6,917

Para el cálculo de los rendimientos se utilizaron las ecuaciones (2.20; 2.23 y 2.24) las cuales relacionan las alturas de alimentación y de descarga, y los caudales de alimentación y descarga.

El rendimiento hidráulica está definido por la relación existente entre la potencia útil entregada en la descarga (N_u) y la potencia recibida del agua de alimentación. Los valores de rendimiento hidráulica se encuentran entre 7,33 % y 13,97 %.

El rendimiento volumétrico relaciona el caudal de salida con el caudal o gasto de descarga puesto que a mayor caudal o gasto de descarga mayor será el rendimiento volumétrico existente. Sus valores se encuentran entre 1,91 % y 4,77 %.

Para determinar el rendimiento de Rankine se considera la instalación como un todo y se relacionan las alturas de impulsión y alimentación juntamente con los caudales de alimentación y descarga. Los valores de rendimientos obtenidos se encuentran entre 5,41 % y 9,71 %.

3.8. Modelos ajustados por regresión

En la tabla 3.5 se muestran los resultados obtenidos del ajuste realizado entre el gasto de descarga, el rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine, con las variables independientes: recorrido de la válvula, altura y caudal de alimentación y, altura de impulsión, respectivamente.

Tabla 3.5. Modelos ajustados que relacionan al gasto de descarga y los rendimientos con las variables de entradas.

$$M1 \quad Q_s = -0,00117 * r + 0,01708 * H_e + 0,04531 * Q_e - 0,058 * H_i$$

$$M2 \quad n_h = -0,127 * r - 3,174 * H_e - 10,896 * Q_e + 2,060 * H_i + 385,474 * Q_s$$

$$M3 \quad n_v = 0,032 * r + 0,867 * H_e - 3867 * Q_e + 0,068 * H_i + 108,025 * Q_s$$

$$M4 \quad n_r = 0,095 * r - 4,041 * H_e - 8,029 * Q_e + 1,993 * H_i + 277,449 * Q_s$$

Modelos	Coefficiente correlación	Fcál.	Fcrít.
M1	0,994	1329,4676	1,44E-58
M2	0,998	3910,90	4,83E-74
M3	0,999	8825,99	1,27E-84
M4	0,998	2734,14	2,14E-69

Al observar los resultados expuestos en la tabla anterior se infiere que los 4 modelos determinados son significativos, puesto que cumplen con tres criterios de idoneidad, en todos los casos se cumple que el coeficiente de correlación está próximo a 1, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico y, el P-valor es menor que el nivel de significancia escogido, el cual fue de 0,05 (95 % de confianza).

3.9. Curva característica de la bomba de ariete

Los caudales de entrada que se obtuvieron por medición en la realización de los experimentos fueron 0,87 l/s y 1,17 l/s, resultados que se le encontró un caudal intermedio que permitiera una mejor visualización de los resultados cuando fueran a graficarse.

3.9.1. Curva característica de la bomba de ariete de altura de impulsión vs gasto de descarga

En la figura 3.6 se muestra la representación gráfica de los resultados obtenidos de manera experimental de altura de impulsión y flujo volumétrico de descarga de la bomba de ariete.

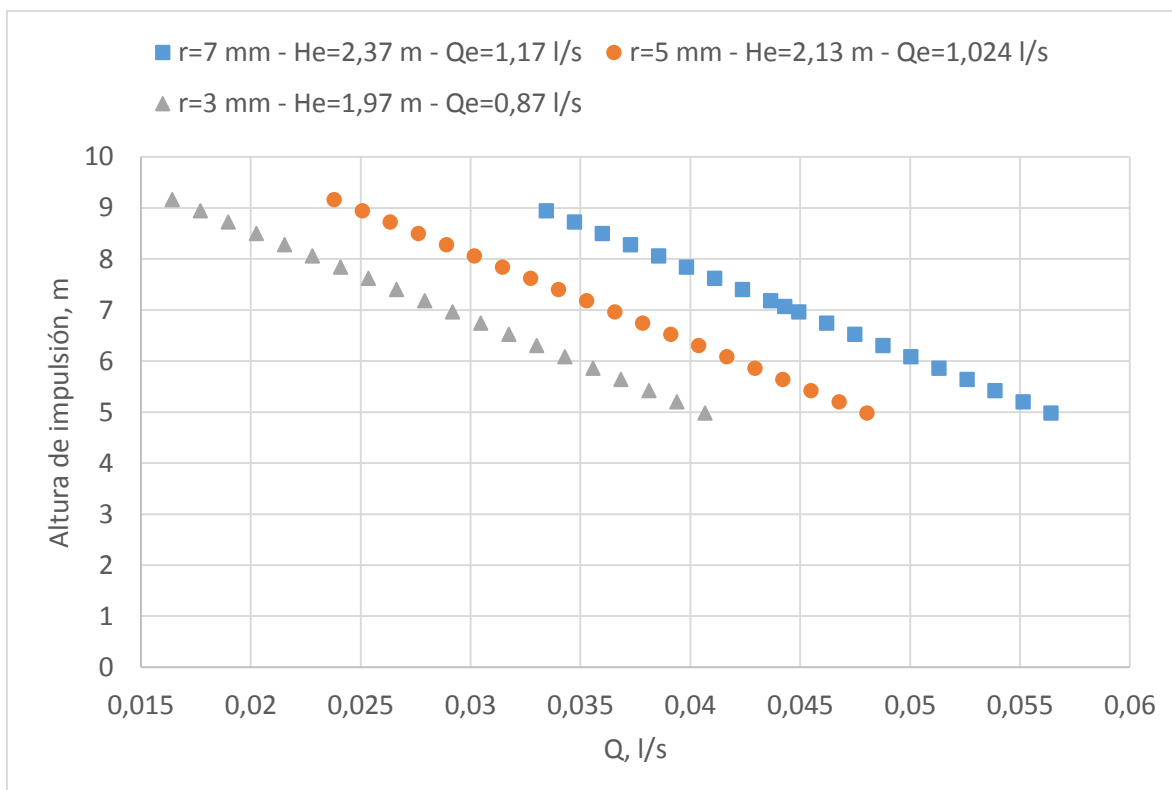


Figura 3.6. Caudal de descarga v/s altura de impulsión.

Como se observa en la gráfica los valores de caudal aumentan mientras la altura de impulso disminuye. La mayor altura de impulsión se logró para las condiciones de trabajo mínima e intermedia del ariete con recorridos en las válvulas impulsoras de 3 y 5 mm, altura de alimentación de 1,97 y 2,13 m, y flujo volumétrico de alimentación de 0,87 y 1,024 l/s respectivamente.

El punto donde se obtuvo mayor caudal de impulsión se encuentra la condición de 7 mm recorrido de la válvula impulsora, 2,37 m altura de alimentación del ariete y 1,17 l/s caudal de entrada, los valores alcanzados fueron, un flujo de 0,056 l/s a una altura correspondiente de 4,8 m.

3.9.2. Comportamiento del rendimiento hidráulico vs gasto de descarga

En la figura 3.7 se muestra el comportamiento del rendimiento hidráulico tomando como referencia el caudal de salida del ariete hidráulico, para las tres condiciones de trabajo.

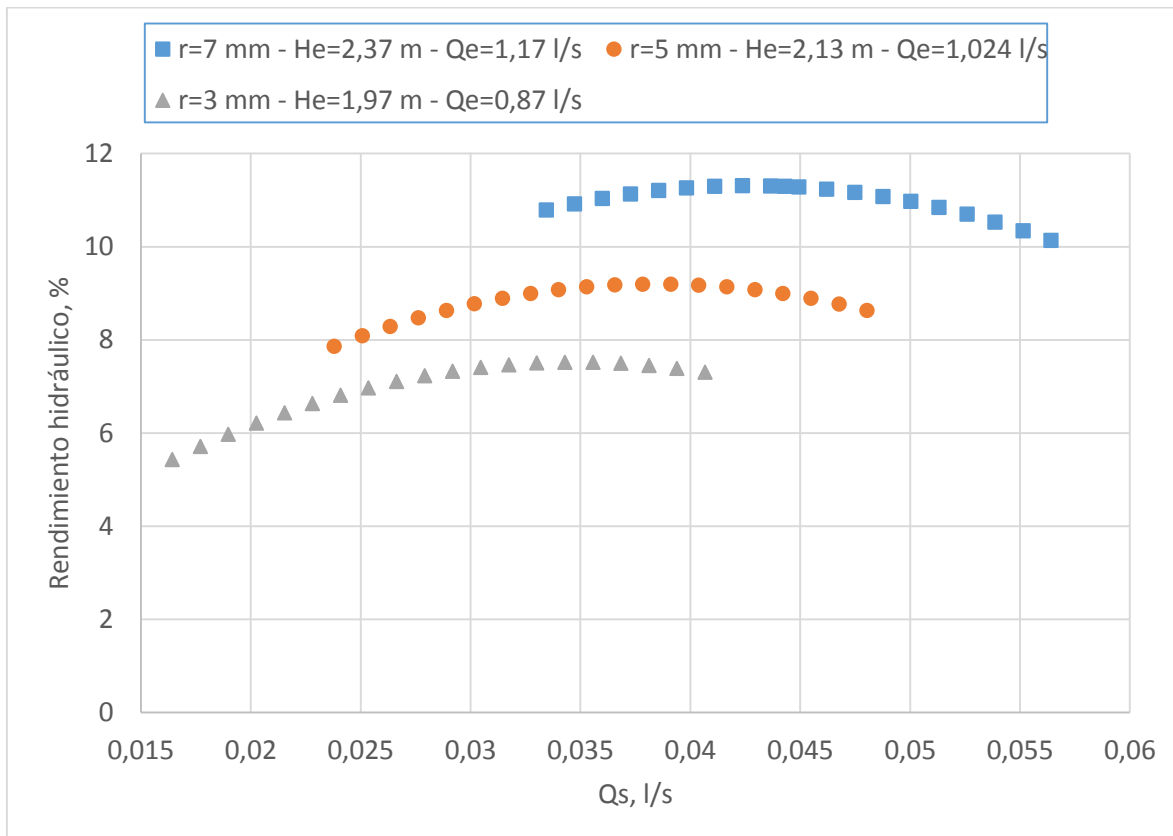


Figura 3.7. Rendimiento hidráulico v/s caudal de descarga.

Para el cálculo del rendimiento hidráulico se tuvo en cuenta potencia útil entregada en la descarga (NU) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (Nb). Como se puede observar el rendimiento hidráulico se plantea de manera creciente en las condiciones de trabajo de 3 y 5 mm de recorrido para la válvula impulsora, 1,97 y 2,13 m la altura de alimentación y caudales de entrada de 0,87 y 1,024 l/s, desde el valor de 5,43 % y 7,86 % hasta 7,52 % y 9,20 % respectivamente, a partir de estos puntos comienza a disminuir. En las condiciones de trabajo máximas cuando el ariete posee mayor caudal de alimentación, recorrido de la válvula de 7 mm y altura de alimentación de 2,37 m, el rendimiento hidráulico incrementa hasta alcanzar el valor de 11,31 % para un caudal de 0,042 l/s, a partir de este punto comienza a disminuir hasta llegar a 10,13 % y un caudal de 0,056 l/s.

3.9.3. Tendencia del rendimiento volumétrico vs gasto de descarga

En la figura 3.8 se muestra el comportamiento del rendimiento volumétrico para cada condición de trabajo del ariete hidráulico multipulsor con relación al caudal de descarga.

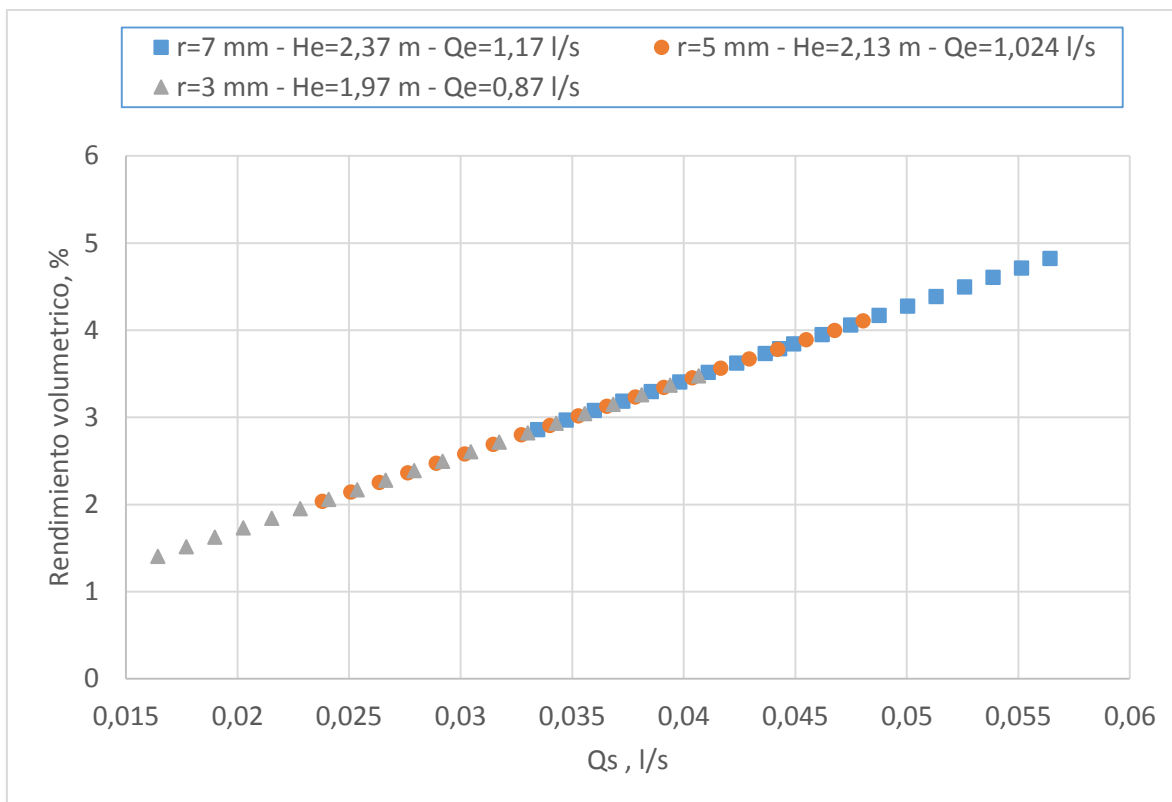


Figura 3.8. Relación entre el rendimiento volumétrico y el caudal de descarga.

Como se muestra en la figura el rendimiento volumétrico es la relación existente entre el caudal de alimentación y el caudal de descarga, por lo que para cada condición de trabajo el rendimiento aumenta cuando aumenta el caudal de descarga.

El menor rendimiento se obtuvo cuando el ariete trabajaba con un caudal de entrada de 0,87 l/s, recorrido de la válvula impulsora de 3 mm y altura de alimentación de 1,97 m, para un valor de 1,40 % y un caudal de descarga de 0,016 l/s.

El mayor rendimiento volumétrico se obtuvo cuando el ariete funcionaba con un caudal de alimentación de 1,17 l/s, recorrido de la válvula de 7 mm y altura de entrada de 2,37 m para un valor de 4,82 % y un caudal de descarga de 0,056 l/s.

3.9.4. Relación entre el rendimiento de Rankine y el caudal de descarga

En la figura 3.9 se muestra el comportamiento del rendimiento de Rankine con relación al caudal de descarga del ariete.

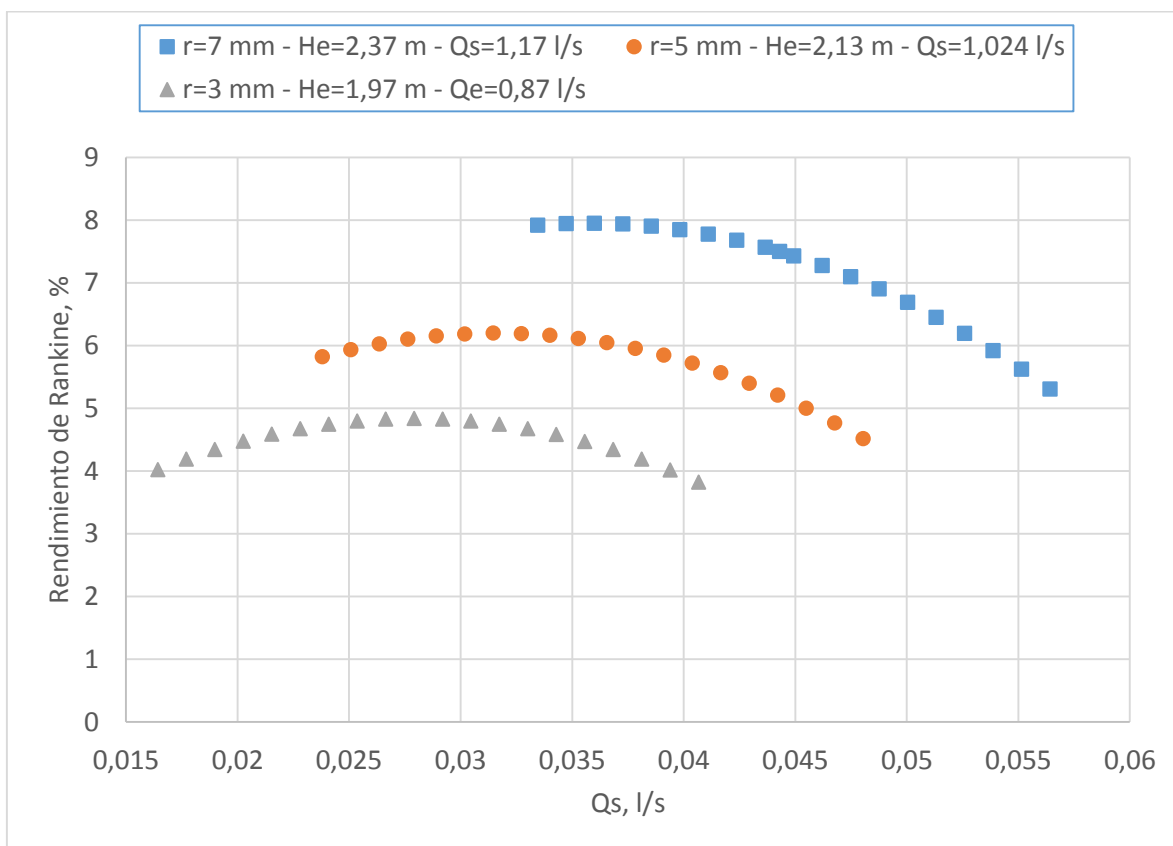


Figura 3.9. Rendimiento de Rankine contra flujo volumétrico de descarga.

Para determinar el rendimiento de Rankine, la misma toma como referencia el nivel, considerando la instalación como un todo, dependiendo entonces de los caudales de alimentación, de descarga, la altura de alimentación y la altura de impulso.

Cuando la bomba de ariete se encontraba trabajando con 7 mm de recorrido de la válvula de impulso, 2,37 m de altura de alimentación y 1,17 l/s el caudal de alimentación alcanzo el máximo rendimiento de Rankine para un valor de 7,95 % y un caudal de descarga de 0,036 l/s. Los puntos que describen la trayectoria del rendimiento de Rankine cuando la bomba de ariete se encuentra trabajando para 5 mm de recorrido de la válvula, 2,13 m de altura de alimentación y un caudal de entrada de 1,024 l/s son: 5,82 % para un caudal de 0,024 l/s, 6,12 % para un caudal de 0,035 l/s y 4,52 % para un caudal de descarga de 0,048 l/s. El valor mínimo lo alcanzo en el punto de 3,83 % y un caudal de descarga de 0,041 l/s bajo las condiciones de trabajo de 3 mm de recorrido de la válvula impulsora, 1,97 m la altura de alimentación y 0,87 l/s el valor del caudal de alimentación.

3.9.5. Comportamiento de los rendimientos calculados

La figura 3.10 muestra el comportamiento de los rendimientos calculados cuando la bomba de ariete se encuentra trabajando con 7 mm de recorrido, 2,37 m de altura de alimentación y 1,17 l/s el caudal de entrada.

En la figura 3.10 se muestra el comportamiento de los rendimientos calculados cuando la bomba de ariete funciona bajo los parámetros siguientes: 7 mm de recorrido de la válvula impulsora, 2,37 m la altura de alimentación y 1,17 l/s de caudal de entrada.

Los valores mayores de rendimiento en estas condiciones se obtuvieron para el rendimiento de hidráulico con un valor máximo de 11,31 % para un caudal de descarga correspondiente de 0,042 l/s; el valor mínimo se obtuvo en un 10,13 % para un flujo volumétrico de descarga de 0,056 l/s.

El rendimiento de Rankine alcanzo los valores medios de rendimiento describiendo su trayectoria por los puntos siguientes:

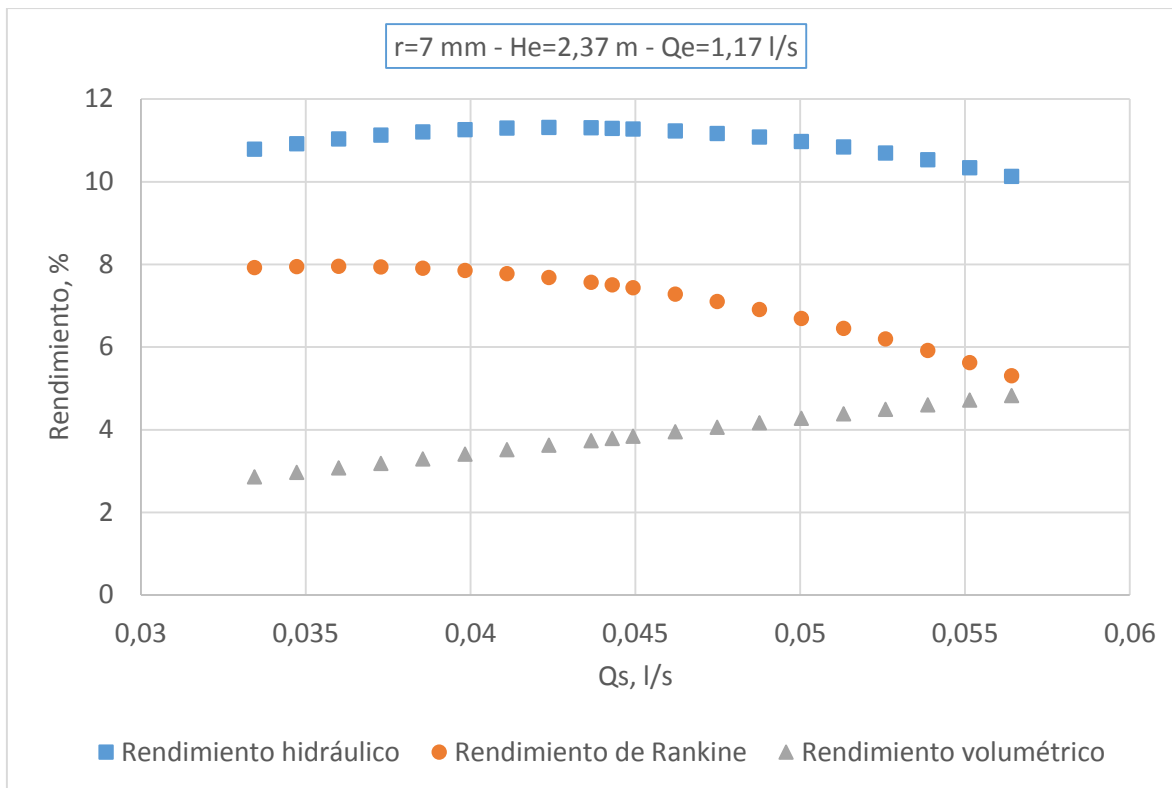


Figura 3.10. Rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine con relación al caudal de descarga.

El valor mínimo de rendimiento fue de 5,31 % alcanzado para un caudal de 0,056 l/s, los valores intermedios se encuentran cuando el ariete descargaba 0,045 l/s y un rendimiento de 7,43 %. Los valores máximos de rendimiento para esta curva se encuentran para los caudales de descarga de 0,035 y 0,036 l/s y un rendimiento de 7,95 %. Para esta condición el menor rendimiento que se obtuvo fue el volumétrico con valor de 2,86 % para un caudal de descarga de 0,033 l/s. Donde a partir de este punto su tendencia fue creciente hasta alcanzar valores de 4,82 % para un gasto de descarga de 0,056 l/s.

3.9.6. Comportamiento de los rendimientos calculados

La figura 3.11 se muestra la tendencia de los rendimientos calculados cuando la bomba de ariete se encuentra funcionando para la condición de trabajo descrita en la gráfica.

Para esta condición de trabajo los valores de máximo rendimiento fueron alcanzados por el rendimiento hidráulico, describiéndose su trayectoria por los puntos siguientes:

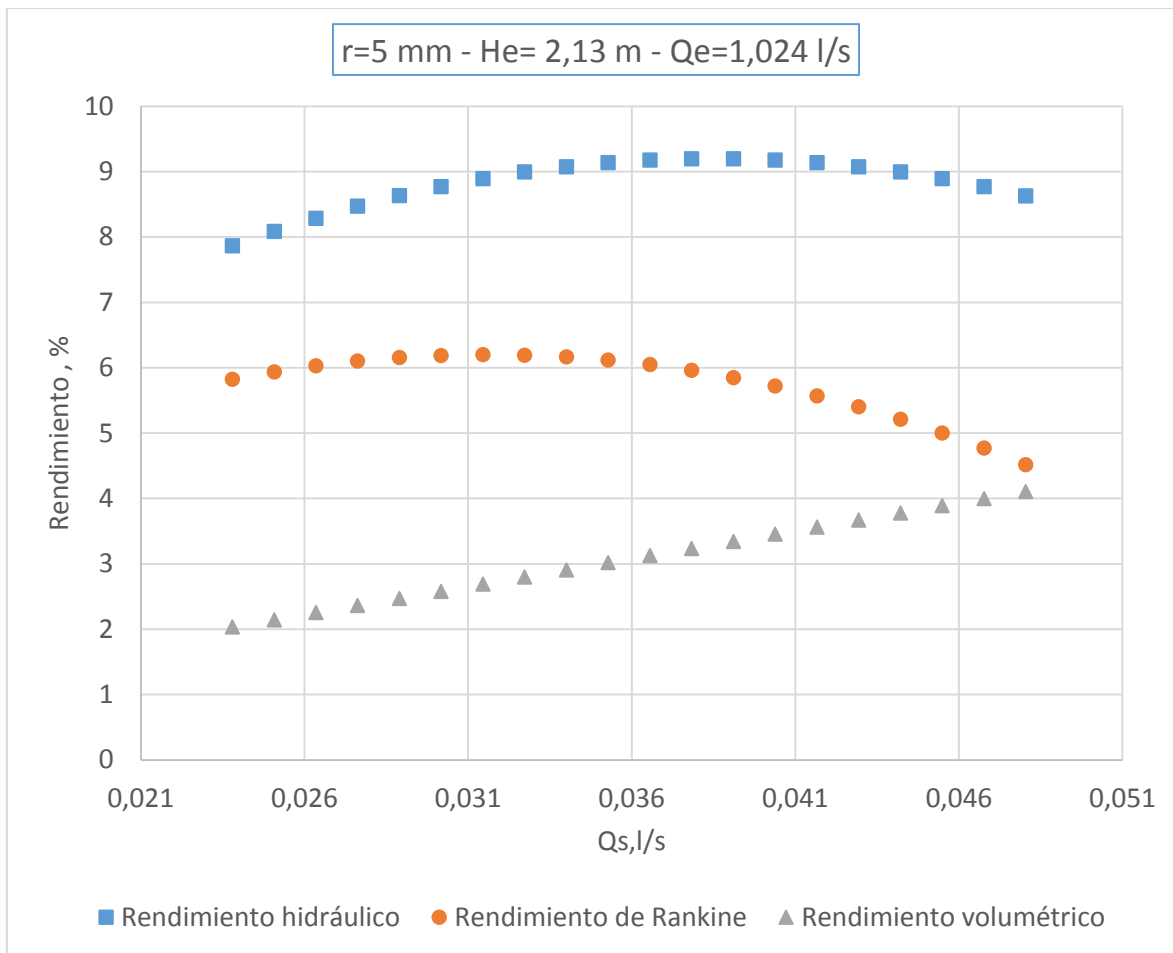


Figura 3.11. Rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine con relación al caudal de salida.

Cuando la bomba de ariete descarga 0,024 l/s el rendimiento hidráulico es de 7,86 %, para los valores de gastos de descarga de 0,038 y 0,039 l/s el ariete alcanza su mayor rendimiento hidráulico con un 9,20 %, desde este punto desciende hasta llegar a 8,63 % con un gasto de descarga correspondiente a 0,048 l/s.

El rendimiento de Rankine incrementa desde el 5,82 % y un caudal de salida de 0,024 l/s hasta 6,20 % y un gasto de 0,031. Luego su tendencia es a disminuir mientras aumenta el caudal de salida hasta llegar al valor de 4,52 % correspondiente a un caudal de 0,048 l/s.

El rendimiento volumétrico como se muestra en la figura 3.11 su tendencia es a incrementar al mismo tiempo que incrementa el caudal de descarga y disminuye la altura

de impulsión, entonces se puede decir que a menor altura de impulsión mayor rendimiento volumétrico.

3.9.7. Comportamiento de los rendimientos hidráulico, volumétrico y de Rankine

La figura 3.12 muestra la tendencia de los rendimientos para la condición de trabajo descrita en la gráfica.

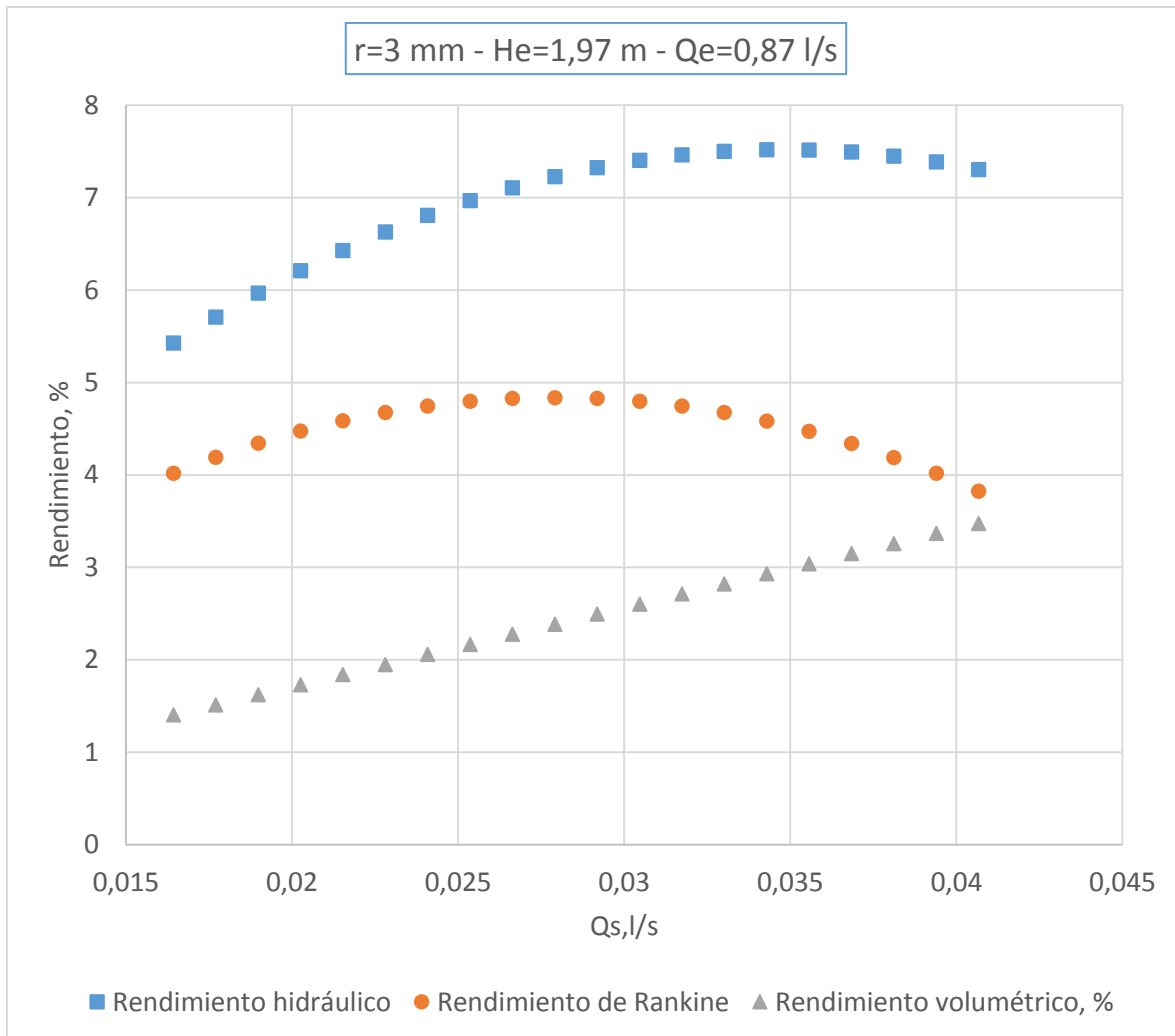


Figura 3.12. Rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine con relación al caudal de descarga.

Con los parámetros de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico multipulsor descritos en la gráfica anterior, los rendimientos calculados tienen el siguiente comportamiento:

El rendimiento hidráulico alcanza el mayor valor de los rendimientos con valores de 7,52 % para los caudales de descarga de 0,034 y 0,036 l/s. Para el caudal de 0,016 l/s el este rendimiento se encontraba en su valor mínimo con 5,43 %.

El rendimiento de Rankine esta descrito por la siguiente trayectoria, en el momento que la bomba de ariete descargaba 0,016 l/s tiene un rendimiento correspondiente a 4,02 %, desde este punto sus valores se incrementan al incrementar el caudal hasta 0,028 l/s correspondiéndole un rendimiento del 4,84 %, a partir de este valor de caudal el rendimiento se comporta de manera descendiente llegando a 3,83 % para un gasto de descarga del 0,041 %.

Como el rendimiento volumétrico es directamente proporcional al caudal de descarga su tendencia es a incrementar desde valores de 1,40 % hasta 3,48 % teniendo un comportamiento prácticamente lineal.

3.10. 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:

- Bomba de ariete hidráulico.

- Costo de fabricación.
- Sección de entrega (descarga) de líquido.

En la tabla 3.5 se muestra de forma general el costo estimado de los elementos componentes de la instalación de ariete.

Tabla 3.5. Costo estimado de elementos del ariete.

Denominación	Cant.	Costo unitario (CUC)	Costo total (CUC)
Tanque metálico de R22	1	4,00	4,00
Válvula de impulso	3	10,00	30,00
Válvulas anti retorno	1	12,10	12,10
Tubo plástico	1	60,00	60,00
Manguera plástica	1	18,00	18,00
Teflón industrial	4	3,00	12,00
		Total	136,00

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. En la tabla 3.6 se indica el valor de la mano de obra y la pintura utilizada en la fabricación del ariete.

Tabla 3.6. 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, se debe 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 $\frac{1}{2}$ 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, se debe 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.

3.11. 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.

3.12. 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, (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.
- 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 3.7):

Tabla 3.7. 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 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.
- 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.

- 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.
- 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.

3.12.1. 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 3.13).

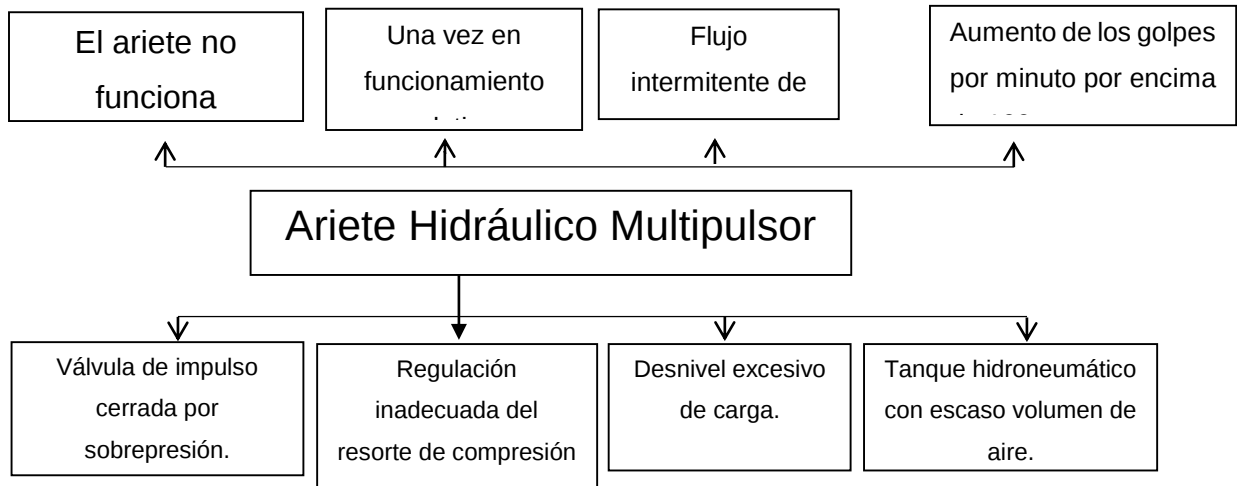


Figura 3.13. Matriz causa – efecto: árbol de problemas.

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.

3.13. Conclusiones parciales del capítulo

- Se determinaron las principales dimensiones del Ariete hidráulico multipulsor a partir de un diámetro de alimentación de 2 pulgadas aplicando los criterios de diseño de Rodríguez (2004), mencionar que solo la dimensión de la cámara de aire no cumple con dichos criterios.
- Se aplicó las ecuaciones de flujo y pérdidas hidráulicas para el ariete hidráulico multipulsor, donde se encuentra que la mayor pérdida en la tubería de descarga es de 0,006 79 m, influenciado por el aumento de la velocidad del fluido.
- Se muestran los resultados de los rendimientos calculados para cada condición de trabajo de la bomba de ariete.

Conclusiones generales

1. Se determinaron las dimensiones principales del ariete hidráulico multipulsor tomando como diámetro de entrada 2 in (50,08 mm) a partir de los criterios de diseño para ariete hidráulicos, donde en los resultados obtenidos solo las dimensiones de la cámara de aire del ariete quedaron fuera de las condiciones de diseño.
2. Se obtuvieron los modelos empíricos para el pronóstico del gasto de descarga y rendimientos de la bomba de ariete a partir de un análisis de regresión, los cuales son significativo puesto que en todos los casos el coeficiente de correlación estuvo próximo a la unidad, el Fisher calculado es mayor que el Fisher crítico y se cumplió con el criterio de Student ($P\text{-valor} \leq 0,05$).
3. Se determinó las curvas características de la bomba de ariete para las condiciones de trabajo de 0,87; 1,024 y 1,17 l/s de caudal de alimentación y una variación de la altura de alimentación de 1,97; 2,07; 2,13; 2,37 m. Para la parte funcional de la bomba se mantuvo un peso constante en las válvulas impulsoras de 90 g, se varió el recorrido de estas en tres niveles 3; 5 y 7 mm y la altura de desnivel en el rango de 3 – 6,7 m.
4. Se obtuvieron los valores de rendimiento hidráulico, volumétrico y de Rankine para cada condición de trabajo de la bomba de ariete hidráulico multipulsor, a partir de los caudales y alturas obtenidos en los experimentos. Según los resultados obtenidos la condición de máximo rendimiento del equipo fue para el máximo recorrido de la válvula ($r=7$ mm), máxima altura de alimentación ($H_e=2,37$ m) y máximo valor de gasto de alimentación ($Q_e=1,17$ l/s).
5. La valoración económica y el análisis del efecto ambiental del trabajo desarrollo indica que por concepto de construcción de la bomba de ariete multipulsor se incurrió en un costo de 151 CUP y que las principales afectaciones ambientales están dadas por generación de ruido, y alteración del ecosistema por derrame de agua.



Recomendaciones

- Tener en cuenta para la construcción de ariete hidráulico que tubería de alimentación sea de materiales rígidos, para evitar pérdidas de las magnitudes del golpe de ariete.
- Construir la cámara de aire de la bomba de ariete con las medidas que se obtienen por los cálculos de la metodología de diseño.
- Determinar la mayor altura de bombeo que desarrollaría el ariete multipulsor construido, variando los recorridos de la válvula impulsora y el contrapeso que se coloca sobre la misma.
- Emplear el ariete hidráulico fabricado para el desarrollo de los conocimientos y habilidades en los estudiantes sobre la mecánica de los fluidos.



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”, CECOSA; 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>.

Anexo 1**Tabla A.1** Matriz de planificación del experimento

	r,mm	He (m)	Qe (l/s)	Hi (m)
1	7	2,37	0,87	8,63
2	7	2,37	0,87	7,37
3	7	2,37	0,87	6,37
4	7	2,37	0,87	5,87
5	7	2,37	0,87	8,63
6	7	2,37	0,87	7,37
7	7	2,37	0,87	6,37
8	7	2,37	0,87	5,87
9	7	2,37	0,87	8,63
10	7	2,37	0,87	7,37
11	7	2,37	0,87	6,37
12	7	2,37	0,87	5,87
13	5	2,37	0,87	9,07
14	5	2,37	0,87	8,07
15	5	2,37	0,87	7,07
16	5	2,37	0,87	6,07
17	5	2,37	0,87	9,07
18	5	2,37	0,87	8,07
19	5	2,37	0,87	7,07
20	5	2,37	0,87	6,07
21	5	2,37	0,87	9,07
22	5	2,37	0,87	8,07
23	5	2,37	0,87	7,07
24	5	2,37	0,87	6,07
25	3	2,23	0,87	8,53
26	3	2,23	0,87	7,53

Tabla A.1 Matriz de planificación del experimento (continuación).

27	3	2,23	0,87	7,53
28	3	2,23	0,87	8,53
29	3	2,23	0,87	7,53
30	3	2,23	0,87	7,53
31	3	2,23	0,87	8,53
32	3	2,23	0,87	7,53
33	3	2,23	0,87	7,53
34	3	2,23	1,17	8,13
35	3	2,23	1,17	7,14
36	3	2,23	1,17	6,14
37	3	2,23	1,17	5,14
38	3	2,23	1,17	8,13
39	3	2,23	1,17	7,14
40	3	2,23	1,17	6,14
41	3	2,23	1,17	5,14
42	3	2,23	1,17	8,13
43	3	2,23	1,17	7,14
44	3	2,23	1,17	6,14
45	3	2,23	1,17	5,14
46	5	2,07	1,17	8,07
47	5	2,07	1,17	7,07
48	5	2,07	1,17	7,07
49	5	2,07	1,17	8,07
50	5	2,07	1,17	7,07
51	5	2,07	1,17	7,07
52	5	2,07	1,17	8,07
53	5	2,07	1,17	7,07
54	5	2,07	1,17	7,07
55	7	1,97	1,17	7,97
56	7	1,97	1,17	6,97



Tabla A.1 Matriz de planificación del experimento (continuación).

57	7	1,97	1,17	5,97
58	7	1,97	1,17	4,98
59	7	1,97	1,17	7,97
60	7	1,97	1,17	6,97
61	7	1,97	1,17	5,97
62	7	1,97	1,17	4,98
63	7	1,97	1,17	7,97
64	7	1,97	1,17	6,97
65	7	1,97	1,17	5,97
66	7	1,97	1,17	4,98