

## Sistema de bombeo para riego mediante ariete hidráulico en sectores aislados de la provincia de Manabí

Pumping system for irrigation using hydraulic ram in isolated sectors of the province of Manabí

Sistema de bombeamento para irrigação por carneiro hidráulico em setores isolados da província de Manabí

**Betty Magdalena Forti Torres**

bforty8825@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2245-9456>

Maestría de Mecánica, Mención Eficiencia Energética, Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador.

**César Bernabé Cevallos Reyes**

cesar.cevallos@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5872-3824>

Maestría de Mecánica, Mención Eficiencia Energética, Instituto de Posgrado, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

### RESUMEN

Las características de funcionamiento de la bomba de golpe de ariete (ariete hidráulico) han sido objeto de un estudio analítico mientras se han determinado experimentalmente determinados parámetros. La eficiencia del sistema, la capacidad de bombeo, la potencia de la bomba hidráulica y el tiempo de ciclo se obtuvieron utilizando un modelo numérico simple. La comparación entre los resultados experimentales y los del modelo numérico proporcionó buenas correlaciones con respecto a la eficiencia de la bomba y su caudal. Por otro lado, la potencia hidráulica, así como la duración del ciclo no fueron predichas con mucha precisión, pero fue posible detectar las tendencias. El modelo numérico también mostró que se deben evitar pérdidas altas en las válvulas. Además, la velocidad en la línea de suministro a la que la válvula de rechazo comienza a cerrarse es el factor dominante que controla el funcionamiento del ariete. Finalmente, se demostró que el modelo teórico podría ser utilizado en el diseño de arietes hidráulicos, en la predicción del comportamiento del ariete en una determinada instalación y para la elección de sitios adecuados para el uso de un ariete hidráulico.

**Palabras claves:** bomba de golpe de ariete, ariete hidráulico, características de la bomba, golpe de ariete, energías renovables, modelo numérico, bombeo, bomba.

### ABSTRACT

The operating characteristics of the water hammer pump (hydraulic ram) have been the subject of an analytical study while certain parameters have been determined experimentally. System efficiency, pumping capacity, hydraulic pump power and cycle time were obtained using a simple numerical model. The comparison between the experimental results and those of the numerical model provided good correlations with respect to the efficiency of the pump and its flow rate. On the other hand, the hydraulic power as well as the cycle duration were not predicted with much precision, but it was possible to detect trends. The numerical model also showed that high valve losses should be avoided. Also, the speed in the supply line at which the reject valve begins to close is the dominant factor that controls the operation of the ram. Finally, it was shown that the theoretical model could be used in the design of hydraulic rams, in the prediction of the behavior of the ram in a given installation and for the selection of suitable sites for the use of a hydraulic ram.

**Keywords:** water hammer pump, hydraulic water hammer, pump characteristics, water hammer, renewable energies, numerical model, pumping, pump.

### RESUMO

As características de funcionamento da bomba de golpe de aríete (cartão hidráulico) foram objeto de um estudo analítico enquanto determinados parâmetros foram determinados experimentalmente. A eficiência do sistema, a capacidade de bombeamento, a potência da bomba hidráulica e o tempo de ciclo foram obtidos usando um modelo numérico simples. A comparação entre os resultados experimentais e os do modelo numérico forneceu boas correlações com relação à eficiência da bomba e sua vazão. Por outro lado, a potência hidráulica bem como a duração do ciclo não foram previstas com muita precisão, mas foi possível detectar tendências. O modelo numérico também mostrou que grandes perdas nas válvulas devem ser evitadas. Além disso, a velocidade na linha de alimentação na qual a válvula de rejeição começa a fechar é o fator dominante que controla a operação do aríete. Por fim, mostrou-se que o modelo teórico pode ser utilizado no projeto de carneiros hidráulicos, na previsão do comportamento do carneiro em uma determinada instalação e na seleção de locais adequados para a utilização de um carneiro hidráulico.

**Palavras-chave:** bomba de golpe de aríete, golpe de aríete hidráulico, características da bomba, golpe de aríete, energias renováveis, modelo numérico, bombeamento, bomba.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años la falta de energía eléctrica y el limitado uso de combustible fósil en el sector rural ha dificultado el desarrollo de las actividades agropecuarias especialmente en el abastecimiento del líquido vital para los diferentes usos como para consumo humano, riego en la agricultura, ganadería, etc. (Acitores Martínez, F. J. 2012).

En Ecuador históricamente el sector agrícola ha presentado problemas durante los ciclos de cultivo, como sequías, inundaciones, falta de recursos técnicos, costos elevados de insumos entre otros. A estos antecedentes se adiciona el problema que tienen ciertas comunidades de agricultores para adquirir o alquilar equipos de bombeos y una vez que están en funcionamiento deben invertir en la compra de combustibles fósiles, la utilización de estos combustibles produce gases de efecto invernadero que atrapan el calor en la atmósfera.

Siendo Ecuador un país que busca el desarrollo agrícola, es imprescindible encontrar soluciones técnicas ambientales y económicas en estas zonas específicas, para mejorar el desarrollo de sus actividades agropecuarias, por esta razón la bomba de ariete se convierte en una alternativa viable y sustentable para el bombeo de agua desde una fuente de abastecimiento hasta un nivel mucho más alto que la misma fuente, permitiendo abastecer de agua constante sin tener que pagar por consumo de energía eléctrica ni combustibles fósiles (Ecuador: Informe de Situación Sequía No. 1 - Ecuador ReliefWeb, n.d.). En todo caso el estudio de este proyecto nos permite dar solución al problema que acoge a la comunidad, realizando un estudio del sistema de energía con fuente renovable como la energía hidráulica, con el objetivo de proponer alternativas sostenibles para el bombeo de agua utilizando fuentes renovables de energía que permitan mejorar la eficiencia energética en el sector Mejía del cantón Portoviejo.

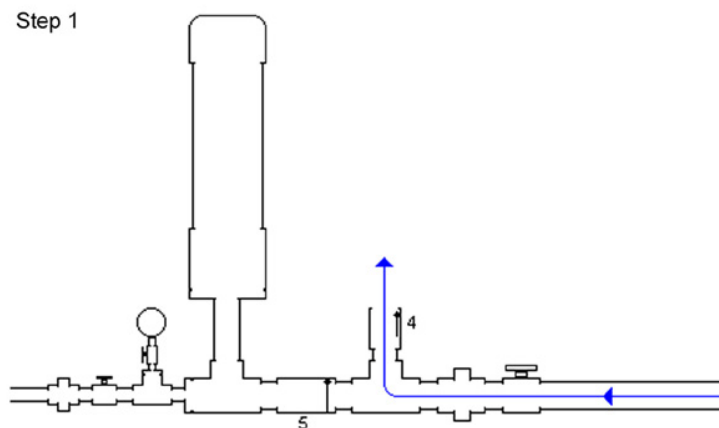
## MATERIALES Y MÉTODOS

En este proyecto se realizó una revisión de las diferentes fuentes bibliográficas, se realizó una búsqueda mediante palabras clave, de estos se escogieron fuentes basadas en conceptos científicos, nos permitió realizar una investigación de fuente de energía hidráulica en el de sistema de bombeo donde se realizará el riego y ponerla como una alternativa a ser implementada para solucionar la problemática de los agricultores rurales de Manabí.

Las bombas de ariete hidráulico funcionan utilizando la presión desarrollada por una onda de choque de "golpe de ariete" (Rivadeneira Carlosama, S. X., & Silva Espinosa, L. F. 2013). Cualquier objeto en movimiento tiene una fuerza de inercia. Se requiere energía para poner el objeto en movimiento, y también se requerirá energía para detener el movimiento, y se requerirá más energía si el movimiento se inicia o se detiene rápidamente. Un flujo de agua en una tubería también tiene inercia (o cantidad de movimiento) que resiste cambios repentinos de velocidad. Cerrar lentamente una válvula permite que esta inercia se disipe con el tiempo, produciendo un aumento de presión muy pequeño en la tubería. Cerrar una válvula muy rápidamente creará una oleada de presión u onda de choque cuando el agua que fluye se detiene, la cual se mueve hacia arriba por la tubería. Cuanto más rápido se cierra la válvula, mayor es la onda de choque producida. Un flujo de agua más rápido también producirá una onda de choque más grande cuando se cierre una válvula, ya que se involucra más inercia o impulso. Una tubería más larga también producirá una onda de choque más grande por la misma razón (Malca Abanto, J. R., & Quiroz Gamboa, R. A. 2016).

Paso 1: El agua (flechas azules) comienza a fluir a través de la tubería de conducción y sale de la válvula de "residuos" (N.º 4 en el diagrama), que inicialmente está abierta. El agua fluye cada vez más rápido a través de la tubería y sale de la válvula de desagüe.

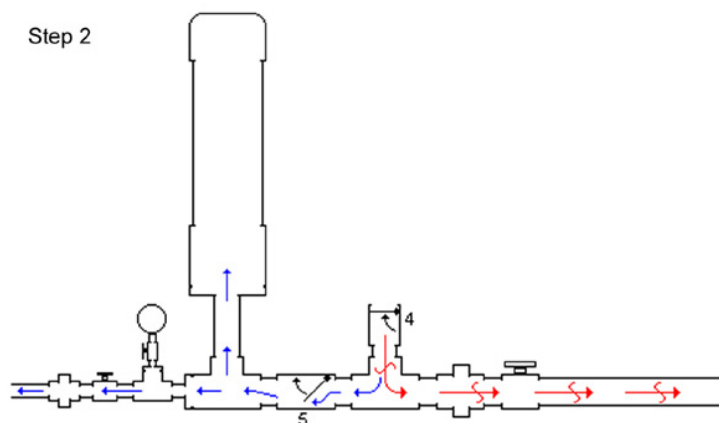
Figura 1. Funcionamiento de un ariete.



Fuente: W. Bryan Smith, Universidad de Clemson.

Paso 2: En algún momento, el agua se mueve tan rápido a través de la válvula de desagüe (N.º 4) que empuja la aleta de la válvula hacia arriba y la cierra de golpe. El agua en la tubería se movía rápidamente y tenía un impulso considerable, pero el cierre de la válvula detiene todo el peso y el impulso del agua. Eso crea un pico de alta presión (flechas rojas) en la válvula de desecho cerrada. El pico de alta presión fuerza un poco de agua (flechas azules) a través de la válvula de retención (N.º 5 en el diagrama) y hacia la cámara de presión. Esto aumenta ligeramente la presión en esa cámara. El “pico” de presión en la tubería también comienza a alejarse de la válvula de desagüe y sube por la tubería de impulsión (flechas rojas) a la velocidad del sonido y se libera en la entrada de la tubería de impulsión.

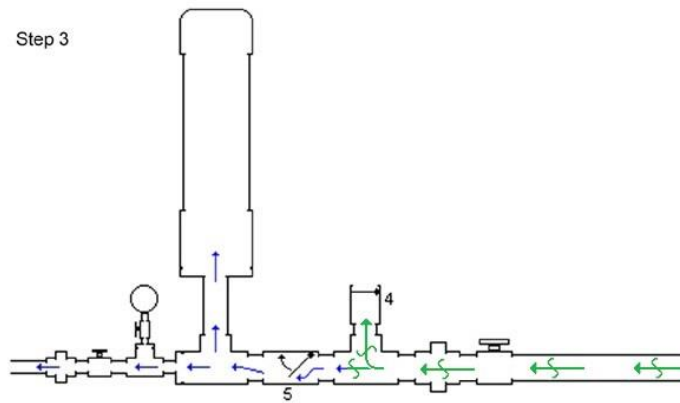
Figura 2. Funcionamiento de un ariete.



Fuente: W. Bryan Smith, Universidad de Clemson.

Paso 3: Después de que la onda de alta presión llega a la entrada de la tubería de impulsión, una onda de presión "normal" (flechas verdes) viaja de regreso por la tubería hasta la válvula de desagüe. La válvula de retención (N.º 5) aún puede estar ligeramente abierta dependiendo de la contrapresión, lo que permite que entre agua en la cámara de presión.

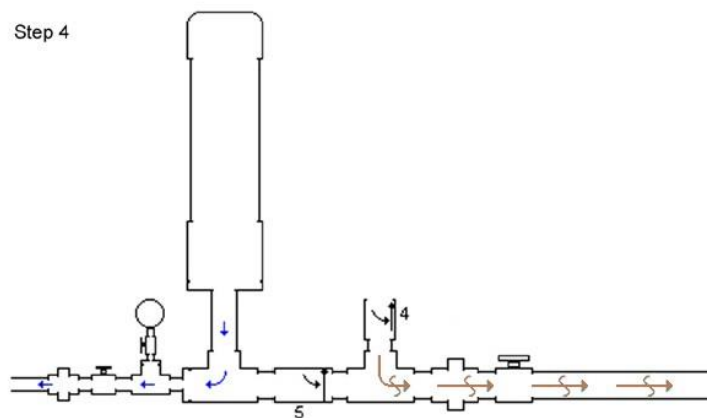
Figura 3. Funcionamiento de un ariete.



Fuente: W. Bryan Smith, Universidad de Clemson.

Paso 4: tan pronto como la onda de presión normal llega a la válvula de desecho, una onda de baja presión (flechas marrones) sube por la tubería de impulsión, lo que reduce la presión en las válvulas y permite que la válvula de desecho se abra y el control válvula (N.º 5) para cerrar.

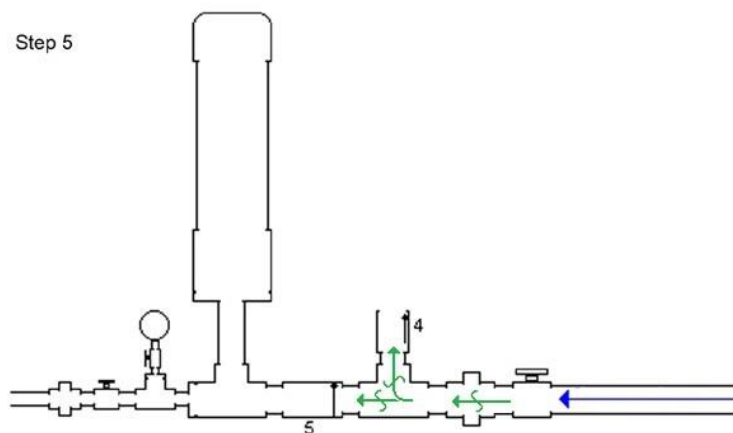
Figura 4. Funcionamiento de un ariete.



Fuente: W. Bryan Smith, Universidad de Clemson.

Paso 5: Cuando la onda de baja presión llega a la entrada de la tubería de impulsión, una onda de presión normal viaja por la tubería de impulsión hasta las válvulas. El flujo de agua normal debido a la elevación de la fuente de agua por encima del ariete sigue esta onda de presión y comienza el siguiente ciclo. El ciclo de la bomba de ariete hidráulico descrito en las figuras 1 a 5 puede repetirse de cuarenta a noventa veces por minuto dependiendo de la caída de altura de la bomba de ariete hidráulico, la longitud de la tubería de conducción desde la fuente de agua hasta la bomba de ariete y el material de tubería de conducción utilizado. (Crisóstomo Armas, E. F. 2020).

Figura 5. Funcionamiento de un ariete.



Fuente: W. Bryan Smith, Universidad de Clemson.

## Análisis de diseño

### Factores de diseño

La bomba de ariete consta esencialmente de dos partes móviles, las válvulas de impulso y de entrega. La construcción consiste básicamente en piezas de tubería según el diseño adecuado. Los principales parámetros a considerar en el diseño de un ariete hidráulico incluyen:

- La diferencia de altura entre la fuente de agua y el sitio de la bomba (llamada caída vertical).
- La diferencia de altura entre el sitio de la bomba y la pintura de almacenamiento o uso (vida útil).
- La cantidad (Q) de flujo disponible de la fuente.
- La longitud de la tubería desde la fuente hasta el sitio de la bomba (llamada tubería de drenaje).
- La cantidad de agua necesaria.
- La longitud de la tubería desde el sitio de almacenamiento (llamada tubería de entrega).

En la entrada el fluido fluye dentro de la tubería con una velocidad dada por la ecuación [1].

$$Vd = \frac{Q}{Ad}$$

[1]

Ecuación de Darcy-Wersbach que se muestra en la ecuación [2] utilizada para evaluar la pérdida en la cabeza para el flujo de fluidos en las tuberías.

$$hf = \frac{FLV^2}{d2g}$$

[2]

El fluido que está presente acelera lo suficiente como para cerrar la válvula de desagüe. Esto se debe al arrastre y la presión en el agua que es igual al peso de la válvula de desagüe. La ecuación [3] representa la fuerza de arrastre.

$$fd = C_d A_v p \left( \frac{Vr}{2} \right) \quad [3]$$

La ecuación [4] representa la fuerza que acelera el fluido que está dada por

$$fw = pAL \left( \frac{dv}{dt} \right) \quad [4]$$

La presión de salida, que es mucho mayor que la de entrada en un punto, viene dada por la ecuación [5].

$$Pw = \frac{Fw}{A} \quad [5]$$

La ecuación [6] representa la potencia desarrollada por el ariete hidráulico.

$$P = pgQh \quad [6]$$

La ecuación [7] representa la eficiencia de la bomba hidráulica.

$$\eta = \frac{Qh}{(Q + Q_w)H} \quad [7]$$

El cálculo de la caída y la elevación viene dado por la ecuación [8]

$$Q' = Vol \frac{H}{h} \eta \quad [8]$$

Donde,

$Q$  = Descarga,  $l/min$

$H$  = Altura de suministro, m

$h$  = Altura de salida, m

$d$  = Radio de la tubería, m

$L$  = Longitud de la tubería, m

$Vd$  = Velocidad del fluido, m/s

$Ad$  = Área de la tubería,  $m^2$

$\nu$  = Viscosidad cinemática,  $m^2/s$

$Re$  = Número de Reynolds

$f$  = Factor de fricción

$fd$  = Fuerza de arrastre, N

$Cd$  = Coeficiente de descarga

$Av$  = Área de la válvula de desecho,  $m^2$

$VT$  = Velocidad en la sección T, m/s

$dv/dt$  = Cambio en velocidad con respecto al tiempo,  $m/s^2$

$Pw$  = Presión en la válvula de desagüe, Pa

$P$  =Potencia generada, W

$Q'$  = Caudal a la salida, l/min

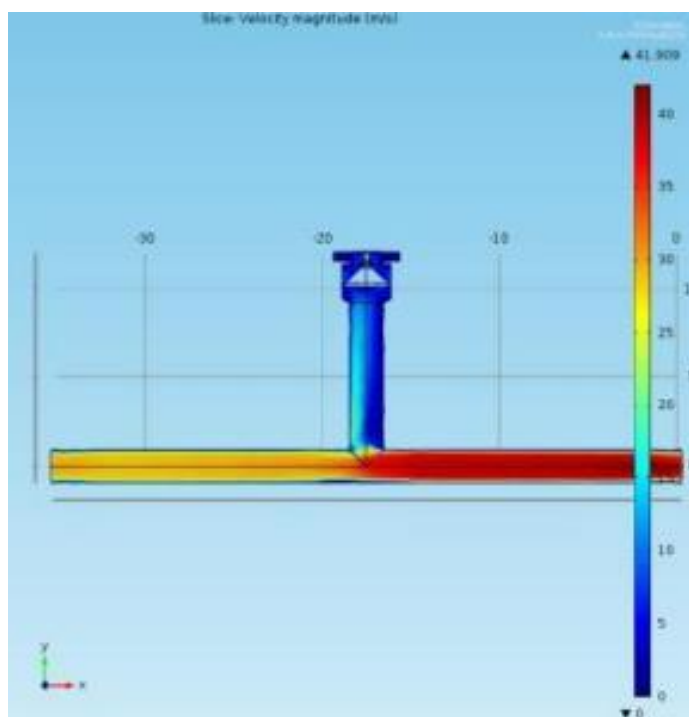
$Q_w$  = Descarga de agua residual, l/min

$\eta$  = Eficiencia del ariete, %

## Simulación de la Bomba de ariete

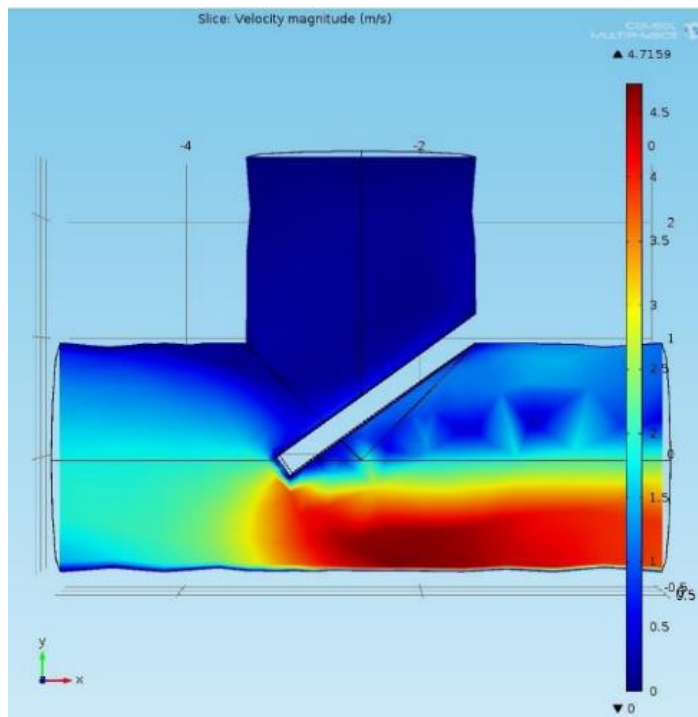
La simulación del Ariete consistió en estudiar el comportamiento del flujo en el interior de la tubería y la válvula además se utilizó para determinar el perfil de velocidad y presión en diferentes modelos de válvulas. La Figura 6 muestra la simulación hecha en COMSOL 5.3, en el software de simulación se evaluó el flujo laminar y la presión de la manguera de entrada del modelo se fijó en 1,42 Psi. Los datos recopilados de la simulación se compararon con datos experimentales. La simulación de la válvula de escape regulable consistió en estudiar el comportamiento de flujo de agua dentro del tubo y válvula de drenaje ajustable que se centra en el flujo laminar dentro del tubo en la que se puede obtener la velocidad y la presión en la válvula de alivio ajustable para cada carrera. Entonces los datos se compararon con los datos del experimento de la válvula de drenaje.

Figura 6. Velocidad de flujo en el modelo.



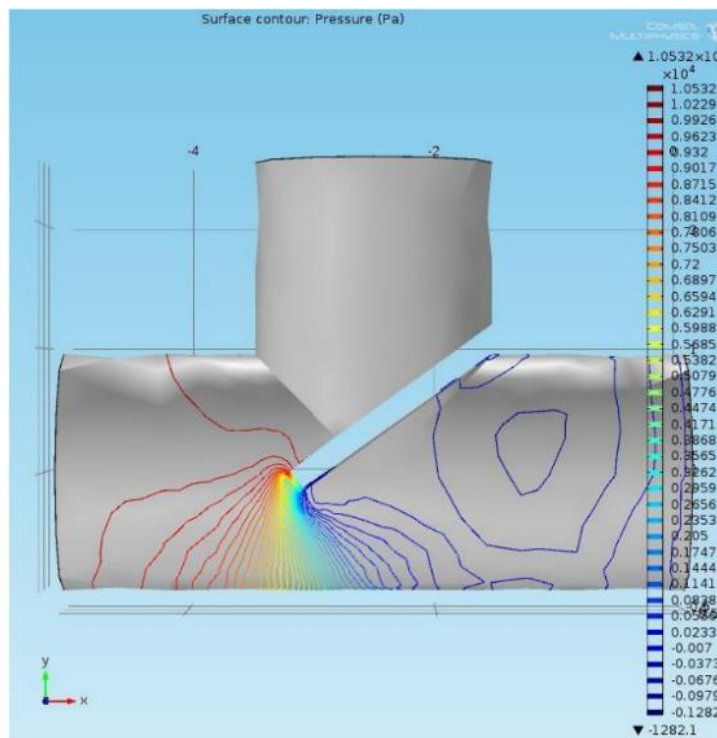
Fuente: Development and Testing of Hydraulic Ram Pump (Hydram).

Figura 7. Velocidad del agua para válvula de desagüe regulable de 5 mm.



Fuente: Development and Testing of Hydraulic Ram Pump (Hydrum).

Figura 8. Presión en la superficie para válvula de desagüe regulable de 5 mm.



Fuente: Development and Testing of Hydraulic Ram Pump (Hydrum)



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para realizar el cálculo, se debe considerar la especificación de los diversos elementos del ariete hidráulico. Debido a la modificación de las dimensiones, la salida se verá afectada en gran medida. El diámetro de la tubería de entrada y salida es de 50,8 mm y 25,4 mm. El diámetro de la válvula de retención oscilante es de 50,8 mm. Hay dos reductores que juegan un papel importante para aumentar la presión tiene 50,8 mm y 25,4 mm respectivamente. La cámara de aire tiene un diámetro de 101,6 mm y una longitud de 500 mm. La tubería de salida está a 45°, donde el agua se eleva. A partir de la experimentación se determina que el agua fluye a 4 litros/min en la entrada debido a la gravedad y en la salida el agua se bombea a 0,8 litros/min. El agua restante sale por la válvula de desagüe (Malca Abanto, J. R., & Quiroz Gamboa, R. A. 2016). El depósito recoge el agua en la región de la válvula de desecho y se recircula a la entrada. Esto evita el máximo desperdicio de agua que es muy vital en las zonas rurales (Acitores Martínez, F. J. 2012).

Tabla 1. Presión en la salida con el cambio en la longitud de la tubería de conducción.

No.	Longitud de la tubería de conducción(m)	Presión de salida (bar)
1	1	0,7
2	2	1,3
3	3	2

La Tabla 1 representa las diferentes presiones obtenidas en la tubería de salida para diferentes longitudes de tubería de suministro. La presión de la salida aumenta a medida que aumenta la longitud del suministro de entrada.

Tabla 2. Longitud de suministro real y teórica lograda frente a la longitud de la tubería de conducción.

No.	Longitud de la tubería de conducción (m)	Longitud teórica de la tubería de suministro (m)	Longitud real de la tubería de suministro (m)
1	1	3	3
2	2	6	6
3	3	9	7.5

La Tabla 2 representa la longitud real y teórica a la que se puede bombear el agua para un ángulo de 45° tomando la bomba funcionando con una eficiencia del 60 %.

Tabla 3. Longitud de la tubería de impulsión frente a la tasa de flujo de agua de salida.

No.	Longitud de la tubería de conducción (m)	Tasa de flujo de agua de entrada (litros/min)	Tasa de flujo de agua de salida (litros/min)
1	1	4	0,8
2	2	4	1
3	3	4	0,72

La Tabla 3 representa la cantidad de agua obtenida como salida por minuto para un suministro de agua de entrada de 4 litros/min para diferentes longitudes de caída. El triple de la longitud de entrada se toma como longitud de salida. A partir de la experimentación, se demuestra que, para una longitud de tubería de impulsión de 2 m, la tasa de flujo de agua de salida es máxima en comparación con los otros dos casos, que es de 1 m y 3 m.

Tabla 4. Determinación de la altura elevada del agua.

No.	Altura de caída (m)	Caudal de agua (l/min)	Eficiencia %	Requerimiento doméstico (Litros/min)	Altura total a la que se bombea el agua (m)
1	1,5	3	59,5	0,3472	9,375

Usando la ecuación [8] se puede determinar la altura a la que se bombea el agua, que se muestra en la Tabla 4. El agua requerida para el uso doméstico es de 500 litros por día (o 0,3472 litros por minuto) y considerando la eficiencia del ariete la bomba es del 60% (Montes, C. A. E., Baltasar, B. D. L., & Vila, O. P. H. 2007). La cantidad de agua suministrada es de 3 litros, que es mucho más alta de lo que se entrega, es decir, en la bomba de ariete se eleva alrededor del 10 al 12 % del agua y el agua restante sale por la válvula de desecho que será guiada a la entrada por el sistema de recirculación proporcionado. La altura de caída se considera de 1,5 m. Con la ayuda de la ecuación, la altura total a la que se puede bombear el agua es de 9,375 m.

Tabla 5. Cálculo de varios parámetros.

No.	Altura de suministro (m)	Caudal de descarga (l/min)	Velocidad del flujo de fluido (m/s)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdida de carga (mm)	Presión en válvula de desagüe (kPa)	Potencia (kW)	Eficiencia (%)
1	1,5	3	0,025	1573	0,05	3,1	4,13	0,73	59,5

La Tabla 5 muestra el cálculo de varios parámetros involucrados en el diseño de la bomba de ariete hidráulico. Se descubre que la bomba de ariete hidráulico diseñada anteriormente con las especificaciones dadas genera una potencia de 0,73 kW y una eficiencia del 59,5%.

Los resultados que se obtienen en la tabla 5 se comparan con los resultados obtenidos en el trabajo de investigación, los resultados son muy parecidos. La eficiencia del ariete hidráulico obtenido es muy determinante para determinar la altura de la entrega (Chávez, P., & Poli, R. 2018) (Iofrío González, A. (2020)).

Tabla 6. Tabla comparativa.

Diseño de Bomba de Ariete Hidráulico, en la Asociación San Miguel-Yacango Distrito Torata Región Moquegua.

No.	Altura de suministro (m)	Caudal de descarga (l/min)	Velocidad del flujo de fluido (m/s)	Número de Reynolds	Factor de fricción	Pérdida de carga (mm)	Presión en válvula de desagüe (kPa)	Potencia (kW)	Eficiencia (%)
1	1,5	3	0,027	1591	0,05	3,4	4,22	0,79	60

Fuente: Chavez, P., & Poli, R. 2018

## CONCLUSIONES

La conservación del agua y la energía sostenible es una de las cosas más importantes, especialmente en las zonas rurales, por lo tanto, el diseño de un ariete juega un papel importante para elevar el agua sin la ayuda de medios externos. Además, el costo de instalación de toda la configuración es muy inferior, compacto y simple. Podría probarse en la región donde el flujo de la corriente de agua horizontal tiene mayor presión y velocidad. Se podría adoptar la ecuación de energía de flujo constante para determinar las velocidades en varios puntos, ya que la descarga en varios puntos de la configuración no permanece constante. La variación en el diámetro de la cámara de aire cambiará la presión de salida y la descarga. Por lo tanto, una dimensión óptima podría determinarse mediante experimentación. Al proporcionar un sistema de recirculación de agua, se evita el desperdicio máximo de agua, lo cual es vital en las áreas rurales. A partir de las tablas, se demuestra que con el aumento de la longitud de la tubería de impulsión también aumenta la presión de salida. Pero en el caso que nos ocupa, para una longitud de tubería de impulsión de 2 metros, la descarga en la salida es máxima en comparación con los otros dos casos. El sistema actual que está diseñado produce una potencia de 0,73 kW y la eficiencia de 59,5% que es ideal. Al cambiar la descarga de entrada, se puede calcular la potencia y se puede representar con la ayuda de un gráfico. El trabajo puede continuar utilizando el agua bombeada para generar energía en plantas hidroeléctricas. Es decir, el agua elevada se hace girar las palas que genera la energía. Por lo tanto, toda esta configuración se comporta como una máquina de movimiento perpetuo donde no se requiere energía para generar energía ilimitada hasta el período de tiempo infinito. Los cálculos analíticos se pueden simplificar aún más escribiendo un programa de computadora que ayudará a determinar la solución óptima. El modelado y el análisis se pueden llevar a cabo utilizando el software COMSOL 5.3 que determina los diversos parámetros de diseño.

## Referencias bibliográficas

- Development and Testing of Hydraulic Ram Pump (Hydrum): Experiments and Simulations”, doi: 10.1088/1757-899X/440/1/012032.
- Design and analysis of hydraulic ram water pumping system. By N S M Hussin, S A Gamil, N A M Amin, M J A Safar, M S A Majid, M N F M Kazim and N F M Nasir
- Ecuador: Informe de situación sequía No. 1 - Ecuador | ReliefWeb.” <https://reliefweb.int/report/ecuador/ecuador-informe-de-situacion-C3%B3n-sequia-C3%ADa-no-1> (accessed Jul. 21, 2022).
- Falta de lluvias afecta a zona rural de Manabí y pone en riesgo abastecimiento de agua en dos cantones de Tungurahua | Ecuador | Noticias | El Universo.” <https://www.eluniverso.com/noticias/2020/11/20/nota/8055568/falta-lluvias-afecta-zona-rural-manabi-pone-riesgo-abastecimiento/> (accessed Jul. 21, 2022).
- J. Eduardo Quiroga-méndez, “Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones,” Rev. UIS.Ingenierías, vol. 12, no. 2, pp. 29–34, 2013.
- S. Binda et al., “8 Ficha Información generada y recopilada por”.
- D. Y. Construcción De Una Bomba De Ariete Hidráulico, C. Napoleón Campaña Calero, and D. Arturo Guamán Alarcón, “Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica Proyecto Previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico”.
- P. Acceder Al Título, “Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación Universidad de Cantabria Proyecto / Trabajo Fin de Carrera Ariete Hidráulico Para Riego. Diseño, Construcción y Montaje (Hydraulic Ram For Irrigation. Design, Construction And Mounting),” 2017.
- V. Xxiii, F. R. Mella, E. v Vinet, and A. M. Alarcón, “REVISTA ARGENTINA,” 2014.
- Rennie L C and Bunt E A1990 The Automatic Hydraulic Ram Experimental results Journal of Power and Energy 1990-1996 (vols 204-210) 204 p 23-31
- Seth J 2013 How to build a Hydraulic Ram Pump LandToHouse.com
- Young B W1996 Journal of Power and Energy 1990-1996 (vols 204-210) 210 p 245-248.