

Formulación de una metodología, basada en ábacos de interacción, para el dimensionamiento de sistemas de impulsión empleando bombas de ariete

Formulation of a methodology, based on interaction charts, for the sizing of pumping systems using ram pumps

Galo Muñoz Vasequez¹, Andres Gonzales Amaya², Jaime Colque Coñaca³

Correo de correspondencia: g.munoz@umss.edu

Resumen

La ausencia de metodologías de diseño sistematizadas para bombas de ariete hidráulico limita su implementación como alternativa autosustentable en zonas rurales con limitado acceso a energía convencional. Este estudio desarrolla y valida una metodología de dimensionamiento basada en ábacos de interacción mediante la evaluación experimental de tres prototipos de bomba de ariete de hierro galvanizado con variaciones en el diámetro del cuerpo y en el número de válvulas de impulso. Utilizando el método del Gradiente Reducido Generalizado, se determinó que el comportamiento hidráulico de estas bombas se ajusta con rigor a la ecuación característica $H_m = \alpha - \beta\sqrt{Q}$. Los hallazgos cuantitativos demuestran una elevada precisión del modelo, con coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0.9 y errores operativos de validación de apenas 2.5% para la presión y 7 % para el caudal. Se identificó que la adición de válvulas de impulso incrementa notablemente la presión de salida y la eficiencia energética, alcanzando rendimientos máximos cercanos al 40%. Esta investigación entrega una herramienta técnica validada y de alta fidelidad para el diseño de sistemas de impulsión de bajo costo, facilitando la gestión de recursos hídricos en comunidades vulnerables a estrés hídrico.

Palabras claves: bomba de ariete, golpe de ariete, impulsiones

Abstract

This study develops and validates a sizing methodology based on interaction charts through the experimental evaluation of three galvanized iron ram pump prototypes with variations in body diameter and the number of impulse valves. Using the Generalized Reduced Gradient method, it was determined that the hydraulic behavior of these pumps closely matches the characteristic equation $H_m = \alpha - \beta\sqrt{Q}$. The quantitative findings demonstrate high model accuracy, with Nash-Sutcliffe coefficients greater than 0.9 and operational validation errors of only 2.5% for pressure and 7% for flow rate. It was identified that the addition of impulse valves significantly increases outlet pressure and energy efficiency, reaching maximum efficiencies close to 40%. This research provides a validated, high-fidelity technical tool for the design of low-cost pumping systems, facilitating water resource management in communities vulnerable to water stress.

Keywords: ram pumps, water hammer, pumping system

1. Introducción

Las bombas de ariete son dispositivos hidromecánicos autónomos que operan bajo el principio de conversión de energía cinética en energía de presión mediante el fenómeno del golpe de ariete (Ferguson , 1823) (Ortega Nebra, 2013) (Chaiña Chaiña, 2016). Esta tecnología permite elevar una fracción del caudal de alimentación hacia cotas superiores sin requerir aporte de energía eléctrica ni combustibles fósiles, consolidándose como una solución técnica y económicamente viable para el suministro de agua en comunidades rurales aisladas y zonas con recursos energéticos limitados (Rivadeneira & Silva Espinoza, 2013).

¹Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0008-2232-0562>

²Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0000-0002-6292-7587>

³Laboratorio de Hidráulica, Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba, Bolivia. <https://orcid.org/0009-0002-0959-8910>

Su resurgimiento en las últimas décadas responde a su bajo costo operativo, mantenimiento simplificado y alta sostenibilidad en contextos donde los sistemas de bombeo convencionales resultan prohibitivos.

A diferencia de las bombas centrífugas, el ariete hidráulico aprovecha la sobrepresión transitoria generada por el cierre súbito de una válvula de impulso para forzar el flujo a través de una sobrepresión transitoria generada por el cierre súbito de una válvula de impulso para forzar el flujo a través de una válvula de retención hacia una cámara de aire y una tubería de descarga.

En el estado del arte actual, el estudio de las bombas de ariete ha evolucionado desde los modelos teóricos clásicos, como el de Krol en 1951 (Krol, 1951), hacia metodologías de diseño generalizadas y simulaciones avanzadas. Investigaciones recientes han empleado la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar el efecto hidrodinámico de la configuración de las válvulas y optimizar la eficiencia mediante modelos de turbulencia $k-\epsilon$ (Simpson, 1986). Asimismo, se han desarrollado herramientas en plataformas como LabVIEW y modelos basados en el análisis dimensional para predecir el rendimiento hidráulico bajo diferentes condiciones operativas. Estos estudios coinciden en que parámetros como la longitud de la tubería de aducción, el tiempo de cierre de la válvula de impulso y el volumen de la cámara de aire son críticos para maximizar la celeridad de la onda de presión y, por ende, la capacidad de elevación del sistema (Fatahi-Alkouhi & Lashkar-Ara, 2017) (Fatahi-Alkouhi & Lashkar-Ara, 2017).

Sin embargo, a pesar de los avances en la modelación numérica y el análisis de componentes individuales, persiste una brecha de conocimiento significativa en la sistematización de una metodología de diseño práctica que permita el dimensionamiento integral y rápido de estos sistemas. Los enfoques actuales suelen limitarse a prototipos específicos o requieren simulaciones complejas que no son fácilmente aplicables en el campo por ingenieros proyectistas. Existe una carencia de herramientas validadas, como ábacos de interacción, que integren de forma simultánea variables constructivas - como el diámetro del cuerpo de la bomba y el número de válvulas de impulso - con las condiciones hidráulicas del sitio. Esta falta de estandarización metodológica limita la implementación a gran escala de esta tecnología en proyectos de desarrollo hídrico.

El presente estudio tiene como objetivo formular y validar una metodología de dimensionamiento para sistemas de impulsión por bombas de ariete, fundamentada en la generación de ábacos de interacción obtenidos mediante experimentación. Se plantea como hipótesis científica que el comportamiento hidráulico de estas bombas, a diferencia del comportamiento parabólico de las bombas centrífugas (Edgara & Krombergs, 2021), se ajusta con alta fidelidad a la ecuación característica $H_m = \alpha - \beta\sqrt{Q}$. Asimismo, se postula que el incremento en el número de válvulas de impulso y la variación del diámetro del cuerpo de la bomba sugieren la posibilidad de optimización de la transferencia de cantidad de movimiento, mejorando significativamente la eficiencia energética y la presión de salida del sistema. La investigación busca entregar una herramienta técnica robusta que facilite la gestión autosustentable del agua en comunidades rurales vulnerables.

2. Materiales y métodos

Configuración experimental y prototipado. La fase experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Mayor de San Simón (LHUMSS), utilizando la infraestructura de recirculación de agua consistente de un reservorio de nivel constante de 50 m³ de volumen y situado a 6.8 m de elevación respecto al eje de las bombas, responsable de proporcionar la carga estática del estudio. El sistema de aducción consistió en una tubería principal de PVC de 300 mm de diámetro y 19.6 m de longitud,

conectada a una derivación de PVC de 2" (8.8 m) que finalizaba en un tramo de hierro galvanizado de 2" y 15 m para acoplar los prototipos.

Se fabricaron tres prototipos de bombas de ariete empleando tuberías de hierro galvanizado bajo la norma ISO LIGHT II C/C, seleccionadas por su capacidad para resistir las sobrepresiones transitorias. Los componentes de control (válvulas de retención, codos y tees) fueron de bronce y fierro galvanizado. Las especificaciones técnicas de los prototipos fueron:

- Bomba 1: Cuerpo de 1½" (48.3 mm de diámetro exterior, espesor 3.26 mm), una válvula de impulso y cámara de aire de 4.79 litros.
- Bomba 2: Cuerpo de 2" (60.3 mm de diámetro exterior, espesor 5.0 mm), una válvula de impulso y cámara de aire de 4.79 litros.
- Bomba 3: Cuerpo de 2", dos válvulas de impulso en serie y cámara de aire esférica de 3.49 litros.

La Figura 1 muestra momentos de la construcción de una de las bombas de ariete en instalaciones del Laboratorio de Hidráulica de la UMSS; la Figura 2 muestra la nomenclatura de las partes de la bomba adoptada en este estudio.

Figura 1

Momentos de la soldadura de las partes de la Bomba 4



Figura 2

Partes que conforman una típica bomba de ariete



Para la tubería de impulsión se utilizó una tubería de poliestireno (HDPE) de $\frac{3}{4}$ " de diámetro y de una longitud de 100 m.

Adquisición y procesamiento de datos. El registro de datos se realizó bajo condiciones de flujo estabilizado, verificando la uniformidad de la presión en la cámara de aire mediante un manómetro Genebre 3802-010 con precisión de 0.2 bar y rango nominal de 10 bar. La cuantificación del caudal impulsado (Q_{imp}) y del caudal excedentario (Q_{exc}) se efectuó mediante el método volumétrico. Las bombas se dispusieron sobre un receptáculo de vidrio de $0.60 \times 1.20 \times 0.60$ m³ equipado con reglas metálicas inoxidable graduadas en milímetros para medir variaciones de nivel de agua.

El Programa de Pruebas comprendió cinco ensayos para la Bomba 1; siete ensayos para la Bomba 2 y ocho ensayos para la Bomba 3. Para minimizar errores fortuitos, cada medición de caudal se repitió al menos tres veces, empleando un cronómetro digital con resolución de centésimas de segundo. El número de ensayos para cada bomba, estuvo restringido al grado de apertura que se podía imponer a la válvula de regulación en el espectro de caudales posibles de las curvas características de cada bomba. En total se ejecutaron sesenta ensayos útiles.

El caudal total de alimentación se determinó como la suma aritmética de Q_{imp} y Q_{exc} . La validación del modelo se realizó mediante escenarios de elevación relativa variable entre el eje de la bomba y la elevación del extremo de la tubería de descarga de agua a la atmósfera.

Formulación del modelo y marco teórico. El comportamiento hidráulico se modeló mediante una aproximación de flujo permanente basada en la ecuación de Bernoulli aplicada entre la salida de la cámara de aire y el extremo de la tubería descarga de agua a la atmósfera:

$$z_b + \frac{p_m}{\gamma} + \frac{v_{imp}^2}{2g} = z_t + \frac{p_{atm}}{\gamma} + \frac{v_{imp}^2}{2g} + \Delta F \quad (1)$$

El primer punto está situado sobre el eje del cuerpo de la bomba y contiguo a la cámara de aire z_b ; el término p_m/γ representa la presión proporcionada por la bomba de ariete H_m , medida en el manómetro de registro; v_{imp} es la velocidad del agua a la salida de la cámara de aire y en el extremo de la tubería de impulsión. El chorro de agua emergente de la tubería de impulsión lo realiza a la atmósfera, por ello, mientras todo se refiera a presiones relativas, este término puede ser descontado. El término ΔF considera las pérdidas de energía que el flujo sufre cuando atraviesa los dispositivos (válvulas y codos) montados en la tubería y las pérdidas de carga resultado de la viscosidad del fluido y del flujo turbulento a lo largo del conducto de impulsión.

La presión proporcionada por la bomba H_m se definió mediante la ecuación característica propuesta:

$$H_m = \alpha - \beta \sqrt{Q} \quad (2)$$

Los parámetros α y β , que tienen embebidas las dimensiones geométricas del sistema y la dinámica de las partes móviles de la bomba de ariete. Estos dos parámetros se determinaron mediante el método del Gradiente Reducido Generalizado (GRG), minimizando la suma de los cuadrados de los residuos entre valores observados y calculados. La eficiencia energética (η) se calculó mediante la expresión de Rankine (Seemin & Ninawe, 2013):

$$\eta = \frac{Q_{imp} \times H_m}{(Q_{imp} + Q_{exc}) \times H_{res}} \quad (3)$$

Las pérdidas por fricción, ΔF , se modelaron con la fórmula de Darcy calculado mediante la expresión de Manadilli (Ghanbari, Farshad, & Rieke, 2011) para flujo turbulento. La bondad de ajuste del modelo numérico fue evaluada con el coeficiente de Nash-Sutcliffe (N&S).

3. Resultados

Caracterización hidráulica y calibración del modelo. El comportamiento experimental de los tres prototipos reveló una relación funcional decreciente entre la presión manométrica liberada H_m y el caudal impulsado Q_{imp} , caracterizada por una concavidad hacia abajo, morfología que diverge de la naturaleza parabólica convencional de las bombas centrífugas. Mediante la aplicación del algoritmo de optimización del Gradiente Reducido Generalizado, se determinó que la ecuación característica $H_m = \alpha - \beta\sqrt{Q}$ describe con alta fidelidad el desempeño de los sistemas.

Los parámetros de ajuste α (desplazamiento de la ordenada al origen) y β (pendiente de decaimiento) sintetizaron las particularidades constructivas y las pérdidas de energía, intrínsecas de cada configuración de bomba de ariete. Por ejemplo, el valor de α se puede interpretar como la máxima altura de entrega teórica posible que puede generar la bomba antes de que el agua deje de ser impulsada hacia el extremo de la tubería de descarga. El parámetro β podría interpretarse como la energía del golpe de ariete que se pierde por ciclo al acelerar el agua. Un valor de β pequeño indicaría una bomba de ariete muy eficiente, lo opuesto, un valor de β grande sugeriría que extraer un poco más de caudal destruiría rápidamente la presión del golpe de ariete, haciendo que la altura de elevación decrezca.

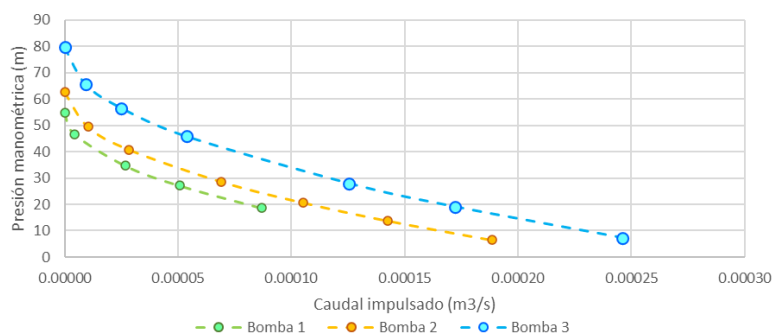
Para la Bomba 1, se obtuvo un coeficiente de Nash-Sutcliffe (N&S) de 0.98, con una presión máxima teórica (α) de 54.74 m. La Bomba 2 exhibió el ajuste más robusto con un N&S de 0.99, mientras que la Bomba 3 (configuración multimpulsor) alcanzó un N&S de 0.97, destacándose por su capacidad de elevación superior, logrando presiones significativamente mayores para rangos de caudal equivalentes en comparación con los modelos de una sola válvula. La Figura 3 presenta los pares ordenados (H_m , Q_{imp}) obtenidos durante las pruebas experimentales y la Figura 4 presenta el transcurso de la eficiencia de la bomba de ariete conforme el caudal varía.

Eficiencia energética y dinámica del flujo. La evaluación de la eficiencia mediante la expresión de Rankine identificó un comportamiento ascendente conforme aumentaba el caudal impulsado, alcanzando rendimientos máximos cercanos al 40%. Se observó una correlación crítica entre el número de ciclos (golpes por minuto) y el beneficio hidráulico: los mayores caudales de impulsión no derivaron necesariamente de una mayor frecuencia de batido de la válvula de impulso. De hecho, se registró una zona de operación óptima donde un menor número de transitorios por unidad de tiempo permitió maximizar el Q_{imp} y reducir el caudal excedente (Q_{exc}), ver Figura 4.

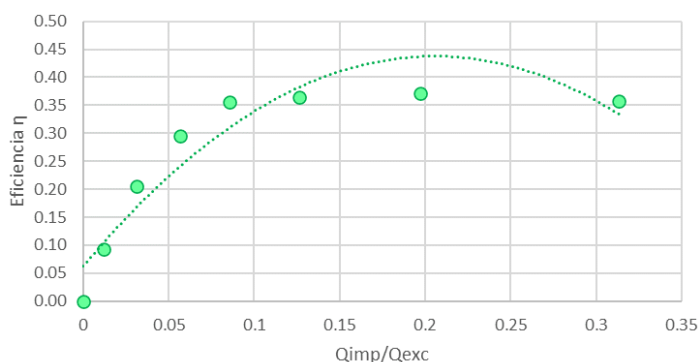
El rol amortiguador de la cámara de aire fue fundamental para la estabilización de las lecturas manométricas. Tras un periodo inicial de inestabilidad transitoria, la presión de salida se mantuvo virtualmente invariable, transformando el flujo pulsante intrínseco del golpe de ariete en una descarga casi homogénea y continua hacia la línea de impulsión.

Figura 3

Comparación de los pares ordenados (H_m , Q_{imp}) obtenidos durante las pruebas de laboratorio frente a las curvas de ajuste de los parámetros α


Figura 4

Transcurso de la eficiencia de la bomba de ariete η conforme varía la proporción de caudal impulsado y el caudal excedente. Es observable una zona de mayor eficiencia para la bomba 3



Escenarios de validación y error operativo. La validación de la metodología se realizó mediante la comparación de los caudales pronosticados por el modelo frente a mediciones *in situ* en tres escenarios de elevación relativa variable ($z_t - z_b$). Para la Bomba 2, el modelo numérico predijo presiones manométricas de 8.79 m, 10.21 m y 14.36 m para alturas de entrega de -1 m, 3.05 m y 8 m respectivamente.

Al contrastar estos valores con los registros experimentales, se determinó un error relativo de apenas 2.5% para la presión y de 7.0% para el caudal impulsado. Estas métricas confirman la robustez de la aproximación en estado permanente propuesta para el dimensionamiento de estos sistemas, demostrando que la metodología basada en ábacos de interacción es una herramienta de confiable para el diseño de infraestructuras de bombeo autosustentable.

Finalmente, la metodología formulada sugiere seguir los pasos siguientes: a) definir el desnivel topográfico entre el punto a donde se desea llegar el agua y la elevación de la bomba ($z_t - z_b$), b) habiendo seleccionado una bomba de ariete con su respectiva curva característica y cuidando que su parámetro α sea mayor al desnivel antes señalado, se calcule el caudal que llegará el punto destino (z_t) al resolver simultáneamente las ecuaciones (1) y (2).

4. Discusión

Contextualización y comparación con la literatura. Los resultados obtenidos en esta investigación, específicamente la eficiencia máxima cercana al 40%, guardan una estrecha correlación con estudios previos que sitúan el rendimiento de las bombas de ariete en rangos variables dependiendo de la configuración. Mientras que Aranguri (2021) reportó eficiencias superiores al 55% para sistemas específicos en Perú, el presente estudio se alinea más estrechamente con los hallazgos de Bustamante y Quezada (2009), quienes obtuvieron rendimientos del 33.46% para diseños multi-impulsor. La divergencia en los valores de eficiencia sugiere que factores como la carrera de la válvula y el peso del obturador, mencionados por Evangelista et al. (2023), desempeñan un rol determinante que debe ser estandarizado en futuras metodologías.

Un hallazgo disruptivo de este trabajo es la confirmación de la morfología de la curva característica H_m versus Q . Mientras que las bombas centrífugas operan bajo una curva de concavidad descendente tipo parabólica, los datos experimentales aquí presentados muestran una tendencia decreciente con concavidad dirigida hacia abajo, lo cual coincide con las caracterizaciones de flujo exponencial decreciente propuestas por Rojas (2023). Este comportamiento ratifica que la dinámica del golpe de ariete impone una caracterización hidráulica única, donde la presión disponible decae de forma más drástica ante incrementos mínimos de caudal en comparación con las turbomáquinas convencionales.

Interpretación mecanicista del comportamiento hidráulico. La superioridad operativa de la Bomba 3 (dos válvulas de impulso) frente a los modelos mono-válvula sugiere un mecanismo de transferencia de cantidad de movimiento más eficiente. Este fenómeno indica que el área de alivio incrementada permite una mayor aceleración de la columna de agua en la tubería de aducción antes del cierre súbito, lo que genera picos de sobrepresión más elevados. Este resultado es consistente con las simulaciones de CFD (Brito Tigre, 2022), quien demostró que el incremento en el número de válvulas mejora significativamente la capacidad de elevación del sistema.

Asimismo, se observó que la eficiencia no es una función lineal de la frecuencia de ciclos operacionales. Los datos sugieren que existe una zona de operación óptima donde un menor número de ciclos por minuto permite una mayor ganancia de energía cinética por ciclo, traducándose en caudales de impulsión más altos y una reducción del caudal de desecho (Q_{exc}). Esto implica que la calibración de la válvula de impulso debe buscar la maximización de la velocidad crítica de cierre antes que la rapidez de la repetición del ciclo. Por otro lado, la cámara de aire demostró ser el componente crítico para la transformación del flujo pulsante en flujo cuasi-permanente, actuando como un acumulador hidroneumático que absorbe las oscilaciones de alta frecuencia detectadas en la literatura.

Análisis de incertidumbre y limitaciones. A pesar de la alta precisión del modelo ($NSE > 0.9$), la principal limitación de esta metodología radica en la utilización de una aproximación en estado permanente (Ecuación de Bernoulli) para describir un fenómeno intrínsecamente transitorio. Si bien los errores de validación (2.5% en presión y 7.0% en caudal) son bajos, estos podrían incrementarse en sistemas con tuberías de impulsión significativamente más largas o con diámetros que favorezcan la separación de la columna líquida, un riesgo advertido por Simpson (1986).

Otra fuente de incertidumbre es la pérdida gradual de aire en la cámara de presión debido a la disolución gaseosa en el agua bajo condiciones de alta presión. La ausencia de una válvula de admisión de aire automatizada en algunos prototipos podría degradar el rendimiento a largo plazo si no se realiza un

mantenimiento preventivo. Finalmente, el factor de fricción de Darcy se calculó bajo el supuesto de flujo turbulento estabilizado, omitiendo los efectos de la fricción inestable (unsteady friction) que ocurre durante las fases de reflexión de la onda de choque.

Implicaciones prácticas y valor de diseño. La validación exitosa de los ábacos de interacción en un escenario real (Cochabamba) demuestra que la metodología propuesta es una herramienta de ingeniería robusta para el diseño de sistemas de riego autosustentables. La capacidad de predecir el caudal de entrega con un margen de error reducido permite a los proyectistas dimensionar reservorios de almacenamiento con mayor certeza técnica, optimizando la inversión en comunidades donde los recursos son escasos.

Desde la perspectiva de la gestión hídrica, la bomba de ariete se consolida como la alternativa más viable para zonas con aguas de alta turbidez o presencia de solutos minerales (comunes en áreas mineras de Potosí), ya que su simplicidad mecánica y el bajo número de piezas móviles reducen la vulnerabilidad a la abrasión en comparación con las bombas eléctricas convencionales. La implementación de esta tecnología, respaldada por el modelo numérico propuesta, ofrece una ruta científica para cerrar la brecha de acceso al agua en regiones rurales vulnerables.

5. Conclusión

Se formula y valida con éxito una metodología de dimensionamiento para sistemas de impulsión por ariete hidráulico fundamentada en ábacos de interacción. La investigación demuestra que la aproximación en estadio permanente, basada en la ecuación de Bernoulli, constituye una herramienta técnica viable para el diseño de infraestructura hídrica.

Se ratifica la hipótesis científica de que el comportamiento hidráulico de estas bombas se ajusta con rigor a la función característica $H_m = \alpha - \beta\sqrt{Q}$, presentando coeficientes de bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe superiores a 0.9. La morfología de las curvas experimentales exhibe una concavidad hacia abajo distintiva, divergiendo del comportamiento parabólico de las bombas centrífugas convencionales.

La metodología de diseño propuesta alcanza una elevada precisión operativa, registrando errores relativos de validación de apenas 2.5% para la presión manométrica y del 7% para el caudal impulsado. Estos resultados confirman que el modelo numérico derivado mediante el método del Gradiente Reducido Generalizado es una herramienta de fidelidad para la predicción del funcionamiento del sistema en condiciones reales.

El incremento en el número de válvulas de impulso optimiza significativamente la transferencia de energía y la presión de salida; la configuración de dos válvulas en serie (Bomba 3) eleva el agua a alturas notablemente superiores que los modelos de una sola válvula para un mismo rango de caudal.

Las bombas evaluadas alcanzan eficiencias energéticas máximas cercanas al 40%, pudiéndose considerarse como alternativa técnica y económicamente frente a motobombas en zonas sin acceso a energía convencional.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no existir ningún tipo de conflicto de interés en la investigación realizada.

6. Referencias bibliográficas

- Brito Tigre, J. (2022). Estudio mediante simulación del efecto hidrodinámico del número de válvulas de impulso en las características operativas de una bomba de ariete hidráulico. Cuenca - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Chaiña, H. (2016). Diseño de un sistema de abastecimiento de agua mediante impulsión por golpe de ariete hidráulico en la comunidad de Anansaya distrito Nicsio - Lampa - Puno. Juliaca - Perú: Facultad de Ingeniería y Arquitectura - Universidad Alas Peruanas.
- Edgara, R., & Krombergs, E. (2021). Investigation of centrifugal pump characteristics. *ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT*, 551 - 556.
- Fatahi-Alkouhi, R., & Lashkar-Ara, B. (2017). Experimental evaluation of effective parameters on characteristic curves of hydraulic ram pumps. *Scientia Iranica*, 283-294.
- Ferguson, J. (1823). Lectures on select subjects in mechanics, hydrostatics, hydraulics, pneumatics, optics, geography, astronomy and dialling. Edinburgh - Scotland: Stirling & Slade, Bell & Badfute..
- Ghanbari, A., Farshad, F., & Rieke, H. (2011). Newly developed friction factor correlation for pipe flow. *Journal of Chemical Engineering and Materials Science*, Vol 2 (6) pp. 83-86.
- Krol, J. (1951). The Automatic Hydraulic Ram. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 165(1):53-73.
- Ortega Nebra, J. (2013). Construcción, caracterización hidráulica y estudio de aplicación de una bomba de ariete para el riego de una finca agrícola. Huesca - España: Escuela Politécnica Superior de Huesca.
- Rivadeneira, C., & Silva Espinoza, L. (2013). Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento. Quito - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Seemin, S., & Ninawe, A. (2013). Design methodology for hydraulic ram pump - HYDRAM. *Journal of Mechanical Engineering* Vol 2 N° 4.
- Simpson, A. (1986). Large water hammer pressure due to column separation in sloping pipes. Michigan - USA: University of Michigan.