

Artículo Original

Determinación de Parámetros Hidráulicos de una Bomba de Ariete para Medir la eficiencia del caudal, en el Municipio de Caripuyo

Determination of Hydraulic Parameters of a Ram Pump to Measure Flow Efficiency in the Municipality of Caripuyo

César Chumacero Vásquez^{1*}, Rogelio Canaviri Colque², Marcial Plaza Santos³

*Autor de correspondencia: cesarchumacerovasquez@gmail.com

^{1, 2, 3} Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Agronómica, Potosí, Bolivia

Recibido: 01/11/2024 Aceptado para publicación: 01/12/2024

Resumen

El estudio aborda la implementación y optimización de bombas de ariete hidráulico de 1, 2 y 4 pulgadas en el municipio de Caripuyo, Potosí, Bolivia, una región con limitaciones de acceso al agua para riego agrícola. Mediante pruebas experimentales, se evaluaron configuraciones de una y dos válvulas para maximizar la eficiencia de caudal en diversas condiciones topográficas. Se empleó el método volumétrico para medir caudales en diferentes alturas de descarga y se analizó estadísticamente la relación entre estos parámetros y el rendimiento hidráulico. Los resultados indican que las configuraciones de dos válvulas incrementan significativamente el caudal en comparación con una sola válvula, especialmente en el ariete de 4 pulgadas, donde se registró un aumento de hasta el 1091%. Se confirma una correlación negativa entre la altura de descarga y el caudal, permitiendo la modelación precisa del flujo a través de ecuaciones polinómicas con coeficientes de determinación superiores al 97%. Este sistema de bombeo, sin necesidad de energía externa, se perfila como una solución eficiente y sostenible para mejora de la producción agrícola en Caripuyo. La investigación destaca la relevancia de esta tecnología en zonas rurales y su potencial de replicabilidad en otros contextos similares.

Palabras clave: rendimiento hidráulico, correlación, modelación

Abstract

This study investigates the implementation and optimization of hydraulic ram pumps measuring 1, 2, and 4 inches in Caripuyo, Potosí, Bolivia, a region with limited access to water for agricultural irrigation. Experimental tests assessed both single and double-valve configurations to maximize flow efficiency under various topographic conditions. The volumetric method was applied to measure flow rates at different discharge heights, and statistical analysis examined the relationship between these parameters and hydraulic performance. Results indicate that two-valve configurations significantly increase flow compared to single-valve setups, particularly for the 4-inch ram pump, where a flow increase of up to 1091% was observed. A negative correlation between discharge height and flow rate was confirmed, allowing for precise modeling through polynomial equations with determination coefficients exceeding 97%. This energy-independent pumping system emerges as an efficient and sustainable solution for boosting agricultural production in Caripuyo. The research underscores the importance of this technology in rural areas and its potential for replication in similar contexts

Keywords: hydraulic performance, correlation, modeling

Introducción

La escasez de agua para riego constituye uno de los mayores desafíos en las zonas rurales de Bolivia, especialmente en municipios como Caripuyo, Potosí, donde la topografía accidentada y las condiciones climáticas adversas dificultan el acceso a este recurso vital (PDM Caripuyo, 2016). Esta limitación afecta directamente la productividad agrícola y la seguridad alimentaria, perpetuando una situación de vulnerabilidad socioeconómica en las comunidades locales (BMZ, 2011; Hillmann, 2010). A pesar de que Caripuyo dispone de recursos hídricos provenientes de microcuencas como Juntavi y Huanacoma, la falta de infraestructura adecuada y de tecnología eficiente en bombeo ha llevado a una subutilización de estos recursos (PDM Caripuyo, 2016).

El cambio climático ha exacerbado esta problemática, incrementando la frecuencia de sequías y fenómenos climáticos extremos, lo que complica aún más la gestión de los recursos hídricos en la región (BMZ, 2011; Aranguri, 2018). En este contexto, las bombas de ariete hidráulico surgen como una solución sostenible y económica para el aprovechamiento de los recursos hídricos, ya que permiten bombear agua a alturas superiores sin necesidad de electricidad ni combustibles fósiles (Peralta, 2015). Esta tecnología se presenta como una opción viable en áreas rurales con recursos limitados, donde el costo operativo de las bombas convencionales resulta prohibitivo (Aranguri, 2018).

Diversos estudios previos han resaltado la efectividad de las bombas de ariete hidráulico en aplicaciones agrícolas, destacando su bajo impacto ambiental y su capacidad para operar en áreas remotas y de difícil acceso (Gómez, 2012; Rojas, 2023). En configuraciones optimizadas, como aquellas con doble válvula de impulso, se ha logrado incrementar la eficiencia en el transporte de agua hasta en un 1091%, lo que evidencia su gran potencial para satisfacer las necesidades hídricas de sectores agrícolas en regiones similares a Caripuyo.

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo evaluar los parámetros hidráulicos de bombas de ariete de diferentes tamaños (1", 2" y 4") y configuraciones (una y dos válvulas), con el fin de determinar su eficiencia en el transporte de agua bajo las condiciones típicas de la región. Para ello, se utilizó una metodología experimental basada en el método volumétrico para medir caudales a distintas alturas de descarga, analizando estadísticamente la relación entre los parámetros de diseño y el rendimiento hidráulico de las bombas (Rojas, 2023; Camacho & Meza, 2017). Los resultados de este estudio permitirán optimizar el diseño y uso de bombas de ariete hidráulico, promoviendo su implementación como una tecnología replicable y sostenible en comunidades rurales con necesidades hídricas similares.

Materiales y métodos

Ubicación

La presente investigación se realizó en la localidad de Caripuyo. Políticamente, se encuentra ubicada en el municipio de Caripuyo perteneciente a la segunda sección de la provincia José Alonso de Ibáñez del departamento de Potosí. La ubicación geográfica corresponde a 18°14'4.054" de latitud sur; 66°28'19.045" longitud oeste, a una altura de 3344 m.s.n.m. (PDM Caripuyo, 2016).

Diseño Experimental

Se implementó un diseño factorial completo, evaluando bombas de diferentes tamaños (1", 2" y 4") bajo dos factores principales: el diámetro de las tuberías y el número de válvulas (una o y dos). Las seis configuraciones experimentales (4"x1, 4"x2, 2"x1, 2"x2, 1"x1 y 1"x2) permitieron analizar tanto los efectos individuales como las interacciones entre los factores. Este diseño proporcionó una base sólida para comprender cómo estas variables influyen en las tasas de flujo y la eficiencia operativa (Ecuación 1).

$$(Q = aH^2 + bH + c)$$

Donde:

- Q: Caudal (m³/día).

- H: Altura de descarga (m).

- (a, b, c): Coeficientes obtenidos mediante regresión polinómica (Galarza, 2013; Bello y Pino, 2000).

Esta ecuación permitió modelar con precisión la relación entre las variables y predecir el rendimiento del sistema en diferentes condiciones operativas.

Técnicas de Medición

Se empleó el método volumétrico para medir las tasas de flujo. Un recipiente calibrado de 5 litros capturó el agua descargada, registrándose el tiempo requerido para llenarlo. Cada medición se repitió nueve veces por configuración y altura de descarga (entre 10 y 40,74 metros) para garantizar la precisión. Los promedios obtenidos redujeron posibles inconsistencias y proporcionaron datos fiables para el análisis (Galarza, 2013; Camacho y Meza, 2017).

Recolección y Análisis de Datos

Se realizaron las siguientes etapas:

- *Preparación del Sitio.* Se adecuó la infraestructura de captación para garantizar un flujo continuo y estable de agua desde las microcuencas locales (PDM Caripuyo, 2016).
- *Instalación de Bombas:* Se instalaron bombas de 1", 2" y 4", con configuraciones de una y dos válvulas de impulso. La instalación se realizó siguiendo los parámetros establecidos por estudios previos (Gómez, 2012; Peralta, 2015).
- *Recolección de Datos:* Se registraron los volúmenes de agua bombeados a diferentes alturas y se calcularon los caudales promedio por configuración (Ramírez y González, 2019; Aranguri, 2018).
- *Análisis Estadístico.* Los datos recolectados se analizaron mediante regresión polinómica para modelar la relación entre las variables estudiadas. También se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la significancia estadística de los resultados (Bello y Pino, 2000).

Variables Evaluadas

Las principales variables consideradas fueron:

- *Altura de Descarga:* Varió entre 10 y 40 metros, registrándose su influencia en el caudal (Galarza, 2013).
- *Configuración de la Bomba:* Se evaluaron configuraciones de una y dos válvulas para cada tamaño de bomba.
- *Caudal:* Se determinó el volumen de agua transportado por unidad de tiempo, expresado en m³/día (Rojas, 2023).

Justificación del Diseño Experimental

El uso de diferentes configuraciones y tamaños de bombas permitió identificar las condiciones óptimas de operación. Este enfoque proporciona una base para la replicabilidad en otros contextos rurales con limitaciones similares (Camacho y Meza, 2017; Gómez, 2012).

Resultados

Los resultados obtenidos a partir de las diferentes configuraciones de las bombas de ariete hidráulicas muestran patrones claros que nos permiten hacer diversas interpretaciones sobre la relación entre los factores estudiados: el diámetro de la bomba, el número de válvulas y la altura de descarga.

Configuraciones de 4" (4"x1 y 4"x2)

La configuración de 4"x1 (Figura 1), alcanzó un caudal máximo de 48 m³/día a 10 metros, pero el caudal disminuyó significativamente con el aumento de la altura de descarga. Esto es coherente con la relación inversa entre caudal y altura, que se observó en todas las configuraciones. El modelo polinómico con R² cercano a 0.97 refleja un buen ajuste a los datos, lo que sugiere que la relación altura-caudal en este caso es predecible y consistente. (Camacho y Meza, 2017).

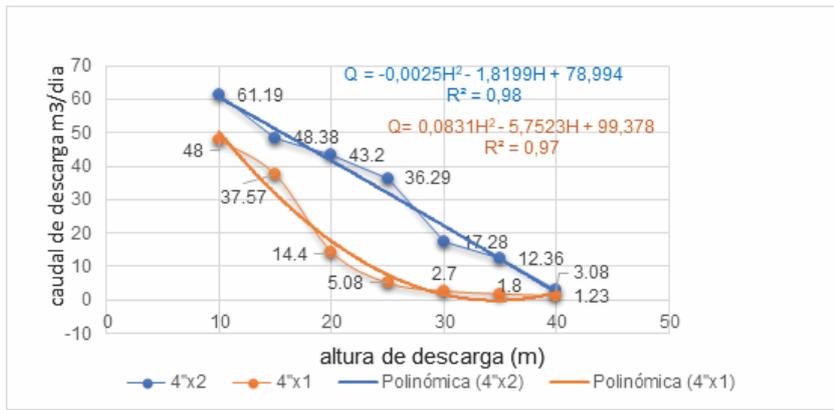


Figura 1. Altura vs caudal de descarga de la configuración de ariete hidráulico (4''x2 y 4''x1)

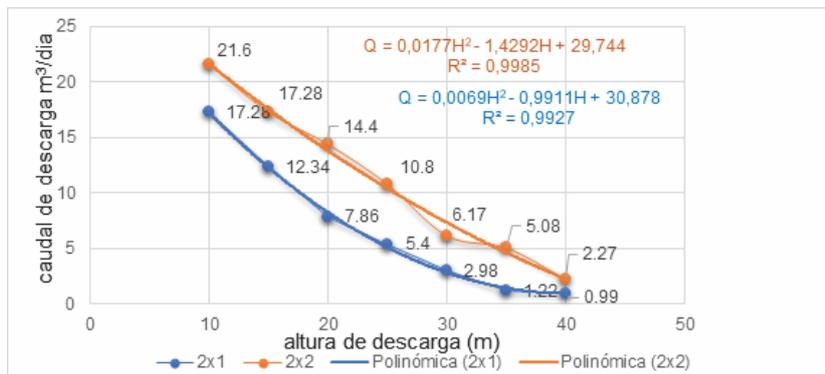


Figura 2. Altura vs caudal de descarga de la configuración de ariete hidráulico (2''x1 y 2''x2)

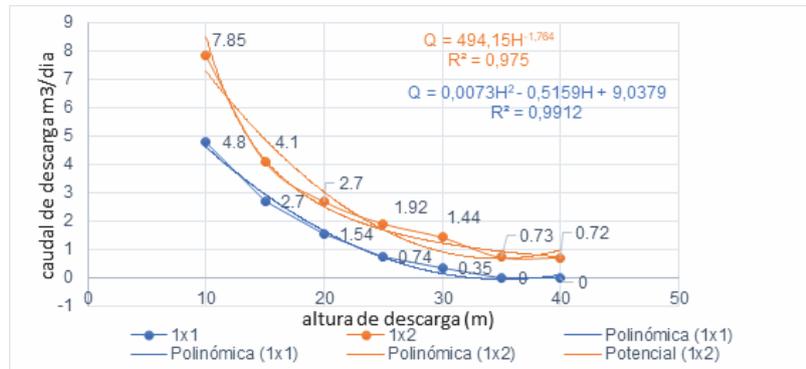


Figura 3. Altura vs caudal de descarga de la configuración de ariete hidráulico (1''x1 y 1''x2)

La configuración de 4''x2 (Figura 1), mostró un incremento de hasta un 28% en el caudal en comparación con 4''x1, lo que resalta la eficiencia adicional de agregar una válvula. Este aumento puede explicarse por la mejora en la presión y el flujo que proporciona una válvula adicional (Aranguri, 2018).

Configuraciones de 2'' (2''x1 y 2''x2)

El caudal máximo fue de 5.08 m³/día de la configuración 2''x1 (Figura 2), con una relación inversa similar entre el caudal y la altura de descarga. El modelo de regresión con un R² de 0.99 muestra una alta precisión en los datos. Con dos válvulas ((2''x2)(Figura 2), se logró un caudal de 21.6 m³/día, mucho mayor que 2''x1, lo que indica que la adición de una válvula puede significar un incremento de hasta un 400% en la eficiencia a bajas alturas. Este hallazgo resalta la importancia de las válvulas de impulso para optimizar el rendimiento, especialmente en sistemas de menor diámetro, donde el flujo inicial es más limitado (Ramírez y González, 2019).

Configuraciones de 1" (1"x1 y 1"x2)

La configuración 1"x1 (Figura 3), presentó un caudal máximo de hasta 4.8 m³/día a 10 metros, mostrando que las bombas más pequeñas tienen un caudal significativamente menor en comparación con las de mayor diámetro. A pesar de esto, el modelo de regresión ajustado con R² de 0.99 indica que se puede predecir con alta precisión el comportamiento de estas bombas en función de la altura de descarga. También, la configuración 1"x2 (Figura 3), alcanzó un caudal de 7.85 m³/día a 10 metros, lo que representa un incremento de 2.5 veces en comparación con 1"x1. Aunque la ecuación de regresión para esta configuración presenta un valor poco claro, se espera que el modelo real sea de tipo exponencial o potencial, lo que podría mejorar la precisión de las predicciones (Ramírez & González, 2019).

Validación estadística

Para validar los resultados obtenidos, se realizó una prueba de hipótesis utilizando el análisis de varianza (ANOVA), con el objetivo de evaluar la relación entre el desnivel de descarga y el caudal generado en las distintas configuraciones del ariete hidráulico. Los análisis mostraron que, en todas las configuraciones evaluadas (4"x1 y 4"x2), el valor F calculado superó el valor F crítico, lo que permitió rechazar la hipótesis nula y concluir que existe una relación estadísticamente significativa entre el desnivel y el caudal (Rojas, 2023).

Configuración 4"x2: El análisis ANOVA de esta configuración mostró un alto nivel de confiabilidad (95%), con un coeficiente de correlación negativo cercano a -0.98. Esto confirma de manera robusta la tendencia observada de que, a medida que aumenta el desnivel de descarga, el caudal disminuye. Este resultado refuerza la conclusión de que el modelo de comportamiento del caudal está fuertemente influenciado por el desnivel, y la relación entre ambas variables es altamente significativa.

Configuración 1"x2: En esta configuración, el análisis estadístico arrojó un valor F observado de 19.23, superando el valor F tabulado de 6.61 para un nivel de confianza del 95%. Esto también permitió rechazar la hipótesis nula, confirmando que existe una relación significativa entre el desnivel y el caudal. La presencia de una segunda válvula en esta configuración mejora de manera notable la generación de golpes de ariete controlados, lo que resulta en un aumento significativo de la eficiencia del sistema. Esta mejora permite que el sistema mantenga caudales más constantes, incluso en terrenos con desniveles elevados, lo que sugiere que la configuración con dos válvulas es más eficaz para operar en condiciones desafiantes.

Discusión

La presente investigación evaluó la eficiencia de bombas de ariete hidráulico bajo diferentes configuraciones, variando el diámetro de la tubería y el número de válvulas de impulso. Los resultados obtenidos ofrecen información valiosa sobre el funcionamiento y la optimización de este sistema de bombeo, especialmente relevante para comunidades rurales con recursos hídricos limitados.

Influencia del Número de Válvulas de Impulso

Uno de los hallazgos más consistentes fue la superioridad de las configuraciones con dos válvulas de impulso (x2) sobre las de una sola válvula (x1) en todos los diámetros probados (1", 2" y 4"). Este resultado se explica por el mecanismo de funcionamiento de la bomba de ariete. La adición de una segunda válvula permite un mejor aprovechamiento del fenómeno del golpe de ariete. Al tener dos válvulas trabajando en conjunto, se logra una mayor frecuencia de pulsos de presión y una mejor regulación del flujo, lo que se traduce en un mayor caudal de agua impulsado (Aranguri, 2018).

En la configuración de una sola válvula, la eficiencia se ve limitada por la menor frecuencia y la menor intensidad de los golpes de ariete. Esto concuerda con la teoría hidráulica que describe el ciclo de funcionamiento de la bomba de ariete, donde la eficiencia depende en gran medida de la correcta generación y control de las ondas de presión (Bello & Pino, 2000; Camacho & Meza, 2017).

Los resultados muestran que el incremento en la eficiencia al usar dos válvulas es considerable,

llegando hasta un 1091% en el caso del ariete de 4". Este hallazgo subraya la importancia de optimizar el diseño de la bomba de ariete, priorizando la configuración de dos válvulas para maximizar su rendimiento (Galarza, 2013).

Influencia del Diámetro de la Tubería

El diámetro de la tubería también demostró ser un factor determinante en la eficiencia del sistema. Se observó una tendencia general a un mayor caudal a medida que aumentaba el diámetro de la tubería. Esto se debe a que un mayor diámetro reduce la fricción del agua dentro de la tubería, permitiendo un mayor flujo y una menor pérdida de energía (Peralta, 2015).

La configuración de 4" con dos válvulas (4"x2) se destacó como la más eficiente en términos absolutos de caudal, lo que la convierte en la opción más recomendable para aplicaciones que requieran un alto volumen de agua. Sin embargo, la elección del diámetro adecuado dependerá de las necesidades específicas de cada aplicación, considerando factores como la disponibilidad de agua, la altura de descarga requerida y el costo de los materiales (Ramírez & González, 2019).

Relación Inversa entre Altura de Descarga y Caudal

Los resultados confirmaron la relación inversa entre la altura de descarga y el caudal, un principio fundamental en el funcionamiento de las bombas de ariete. A medida que se incrementa la altura a la que se desea elevar el agua, el caudal de descarga disminuye. Este comportamiento se ajustó bien a modelos de regresión polinómica con altos coeficientes de determinación ($R^2 > 0.97$), lo que indica que estos modelos pueden predecir con precisión el comportamiento del sistema en diferentes condiciones de descarga (Gómez, 2012; Aranguri, 2018).

Este hallazgo concuerda con la teoría hidráulica y con estudios previos como el de Aranguri (2018), quien también encontró una disminución significativa en el caudal en función de mayores alturas de descarga. Esta limitación inherente a las bombas de ariete debe ser considerada al diseñar un sistema de bombeo, seleccionando la configuración adecuada para la altura de descarga requerida (Bello & Pino, 2000).

Implicaciones Prácticas y Socioeconómicas

Los resultados de esta investigación tienen importantes implicaciones prácticas para comunidades rurales que enfrentan problemas de acceso al agua. La bomba de ariete se presenta como una alternativa viable y sostenible a las motobombas convencionales, ya que no requiere energía externa (combustible o electricidad) para su funcionamiento (BMZ, 2011). Esto reduce significativamente los costos operativos y el impacto ambiental, haciendo de esta tecnología una opción atractiva para regiones con recursos limitados.

La eficiencia demostrada por la configuración de dos válvulas (especialmente la 4"x2) sugiere que esta configuración puede mejorar significativamente la disponibilidad de agua para riego agrícola, lo que a su vez puede contribuir al aumento de la productividad agrícola, la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las comunidades rurales. La comparación de hasta un 537% de incremento en la eficiencia de caudal a alturas bajas en la configuración 2"x2 respecto a la 2"x1, refuerza esta idea. El rango de caudal global con las configuraciones de dos válvulas entre 6,07 m³/día hasta 91,14 m³/día amplía el rango de aplicabilidad del sistema (Ramírez & González, 2019; Rojas, 2023).

Limitaciones del Estudio y Futuras Investigaciones

Es importante señalar algunas limitaciones del presente estudio. La investigación se centró en un número limitado de configuraciones y se realizó en condiciones específicas de campo en Caripuyo. Futuras investigaciones podrían explorar un rango más amplio de diámetros de tubería y configuraciones de válvulas, así como evaluar el rendimiento de las bombas de ariete en diferentes condiciones climáticas y geográficas. Adicionalmente, se podría investigar el efecto de la longitud de la tubería de alimentación y otros parámetros de diseño. Además, sería interesante realizar un análisis más profundo del impacto socioeconómico de la implementación de bombas de ariete en las comunidades rurales, incluyendo estudios sobre la adopción de la tecnología, la capacitación de los usuarios y el impacto en la calidad de vida.

Conclusión

En conclusión, este estudio ha demostrado la eficacia de las bombas de ariete hidráulico, especialmente con la configuración de dos válvulas, como una opción altamente eficiente y sostenible para el bombeo de agua en zonas rurales. Los resultados revelaron que la configuración 4"x2 ofrece una mejora significativa en caudal, con un aumento de hasta un 1091% (para altura de descarga de 27,86 m "el calvario" posibilidad donde se realizará el tanque de almacenamiento), respecto a la configuración de una válvula. Además, la tecnología de bombas de ariete, al no requerir energía externa, se presenta como una alternativa rentable y amigable con el medio ambiente, lo que puede contribuir al desarrollo agrícola y socioeconómico de comunidades rurales.

Declaración de conflictos

Los autores declaramos que no tenemos conflicto de interés

Referencias

- Acitores, F. (2012). Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete (Proyecto de fin de carrera). Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería y Térmica de Fluidos, Área de Ingeniería Térmica.
- Anaya, W., Atao, R., & otros. (2016). Trabajo dirigido: Instalación de una bomba de ariete. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Agrícola, Mecánica de Fluidos.
- Aranguri, D. (2018). Efectividad del sistema de bombeo con ariete hidráulico en la zona rural de la provincia San Pablo – Cajamarca (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Cajamarca, Escuela de Posgrado.
- Arapa, Q. (2016). Evaluación del rendimiento del ariete hidráulico (155 pág.). <https://doi.org/10.21704/ac.v77i2.485>
- Arévalo, D. (2022). Evaluación de los principales parámetros de la bomba de ariete para mejorar su funcionamiento (Tesis de grado). Universidad de Cuenca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Carrera de Ingeniería Agronómica, Cuenca, Ecuador.
- Bello, M., Pino, M., & otros. (2000). Boletín de investigaciones agropecuarias (Nº 28). Comisión Nacional de Riego. INIA.
- BMZ (Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung). (2011). Bolivien. Länderkonzept. Bonn.
- Camacho, D., Meza, J., & otros. (2017). Diseño y construcción de un sistema de bombeo de ariete hidráulico multipulsor a escala de laboratorio (Tesis). Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química.
- Campaña, C., Guamán, D., & otros. (2011). Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico (Tesis). Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador.
- Chero, A. (2018). Diseño de un sistema de bombeo mediante ariete hidráulico (Tesis para optar el título de Ingeniero Civil). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería, Programa Académico de Ingeniería Civil, Piura, Perú.
- Enríquez, B. (2017). Evaluación de factores hidráulicos en una bomba de ariete que permitan el abastecimiento de agua potable en el área rural del distrito de Independencia – Huaraz (Tesis de grado). Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, Facultad de Ciencias del Ambiente, Huaraz, Ancash, Perú.
- Galarza, R. (2013). Estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia (Trabajo de investigación). Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.
- Gálvez, A., & Mosquera, J. (2009). Diseño y construcción de un ariete hidráulico de aguas bravas como un sistema económico y eficiente para el bombeo de agua (Tesis).
- Gómez, P. (2012). Diseño paramétrico de una bomba de ariete hidráulico (Tesis de maestría). Instituto Politécnico Nacional, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Cómputo, México.
- Hillmann, F. (2010). New geographies of migration. *Schwerpunktheft "Die Erde"*.
- Peralta, H. (2015). Aplicación del golpe de ariete hidráulico para el aprovechamiento del agua de manantial en Quequerana Moho, Provincia de Moho, Perú (Tesis). Universidad Nacional del Altiplano. Recuperado de <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/4602>
- PDM Caripuyo. (2016). Plan de desarrollo municipal. Provincia Alonso de Ibáñez, Departamento de Potosí.
- Ramírez, B., & Gonzáles, J. (2019). Construcción e instalación de una bomba de ariete hidráulico para alimentar el sistema de riego en un área definida para una finca agrícola (Trabajo final de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Rengifo, S., Gallego, J., & otros. (2016). Diseño y construcción de un sistema ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias (Tesis). Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías, Pereira, Colombia.
- Rivadeneira, S., & Silva, L. (2013). Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico con el desarrollo de un software para su dimensionamiento (Tesis). Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito, Facultad de Ingenierías, Carrera de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador.
- Rojas, G. (2023). Desarrollo de una bomba de golpe de ariete para uso en el área subandina de Bolivia (Tesis de maestría en ingeniería mecánica y electromecánica). Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería Mecánica – Electromecánica, La Paz, Bolivia.