

UNIVERSIDAD NACIONAL

TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**BANCO DE PRUEBA DE ARIETES HIDRÁULICOS PARA EL LABORATORIO
DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRÍGUEZ
DE MENDOZA DE AMAZONAS, 2010**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AGROINDUSTRIAL**

AUTORES:

Br. EIDER SALAZAR COTRINA

Br. EDER JHÓN ZUTA TOCHON

ASESOR:

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

CHACHAPOYAS, AMAZONAS – 2011

DEDICATORIA

A mi familia, fuente de inspiración para cumplir las metas propuestas en beneficio de mis semejantes; EIDER.

A mi señor padre WALDEMAR ZUTA MONTENEGRO por su enseñanza y amor. Por su herencia: mi educación, aunque no estés conmigo físicamente, siempre te recordare.

A mi señora madre BELERMINA TOCHON SANTILLÁN por su innegable apoyo en todos estos años, por su infinito amor, comprensión y por apoyarme a que este momento llegara. ¡Gracias Mamá...!

A mis hermanos: Conrado, Grover y Nancy por todo su apoyo; EDER JHON

AGRADECIMIENTO

Queremos manifestar nuestro agradecimiento a los maestros Unatinos, quienes intervinieron durante el proceso de nuestra formación universitaria brindándonos sus conocimientos e inculcándonos los buenos modales y valores, y a aquellos que gustosamente colaboraron en la elaboración de este trabajo; como también muy en especial a nuestra familia gracias a ellos somos lo que ahora somos. En especial:

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN.

Asesor del presente trabajo

A nuestras Madres aquellas muy especiales y hermosas:

BELERMINA TOCHON SANTILLÁN

FLORENTINA COTRINA ZEPEDA

Por todo su apoyo infinito

A los amigos:

HUGO ESTELA ROMERO.

JOSE ANTONIO RAMOS LARÍCO.

EQUIPO DE TRABAJO DE FONCODES - CHACHAPOYAS

Por las facilidades brindadas y los buenos momentos compartidos.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Ph D. VICENTE MARINO CASTAÑEDA CHÁVEZ

RECTOR

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

VICERRECTOR ACADÉMICO

Blga. ZOILA ROSA GUEVARA MUÑOZ

DECANA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

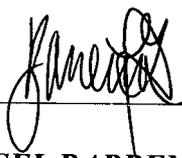
El Docente de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la Tesis titulada **“BANCO DE PRUEBA DE ARIETES HIDRÁULICOS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS, 2010”** de los Tesisistas egresados de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNTRM-A:

- Br. EIDER SALAZAR COTRINA

- Br. EDER JHÓN ZUTA TOCHON

El Docente de la UNTRM-A que suscribe, da el **Visto Bueno** al Informe Final de la Tesis mencionada, dándole pase para que sea sometida a la revisión por el Jurado Evaluador, comprometiéndose a supervisar el levantamiento de observaciones para su posterior Sustentación.

Chachapoyas, 19 de abril del 2011



Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN
Profesor Principal De la UNTRM-Amazonas

JURADO EVALUADOR



Ing. MEREGILDO SILVA RAMÍREZ

Presidente



Ing. ERICK ALDO AUQUIÑIVIN SILVA

Secretario



Ing. HELI HUMBERTO AGUIRRE ZAQUINAULA

Vocal

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
AUTORIDADES UNIVERSITARIAS	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS	iv
JURADO EVALUADOR	v
ÍNDICE GENERAL	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MATERIAL Y MÉTODOS	6
2.1. Funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	6
2.2. Bomba de ariete hidráulico de 1"	8
2.3. Bomba de ariete hidráulico de 2". Prototipo INDES 111	9

2.4. Area de prueba de las bombas de ariete hidráulico de 1” y de 2”	10
III. RESULTADOS	12
3.1. Bomba de ariete hidráulico de 1”	13
3.2. Bomba de ariete hidráulico de 2”	14
3.2.1. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).	16
3.2.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).	18
3.2.3. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).	24
3.2.4. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).	26
IV. DISCUSIÓN	32
V. CONCLUSIONES	35
VI. RECOMENDACIONES	37
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
ANEXO 1: Ensamble de la bomba de ariete hidráulico de 1”	40
ANEXO 2: Secuencia fotográfica de operación de la bomba de ariete hidráulico de 1”	42
ANEXO 3: Planos de la bomba de ariete hidráulico de 2”	44

ANEXO 4: Ensamble de la bomba de ariete hidráulico de 2". Prototipo INDES 111	51
ANEXO 5: Secuencia fotográfica de la operación de la bomba de ariete hidráulico de 2"	54
ANEXO 6: Diagramas para bombas de ariete hidráulico	58
ANEXO 7: Guía de Práctica de Transporte de Fluidos. Determinación de la Eficiencia de una Bomba de Ariete Hidráulico de 2"	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rendimiento energético de una bomba de ariete hidráulico en función de H/h.	12
Tabla 2. Datos experimentales y calculados para el ariete simple de PVC de 1” con h=2,5 m.	13
Tabla 3. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 1” con h = 2,5 m.	13
Tabla 4. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2” con h = 2,5 m; con una válvula de cierre sin resorte. Q = 37,63 L/min.	15
Tabla 5. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2” con h = 2,5 m; con una válvula de cierre sin resorte. Q = 37,63 L/min.	15
Tabla 6. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2” con h = 2,5 m. Con dos válvulas de cierre sin resorte. Q = 55,87 L/min.	16
Tabla 7. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	17
Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	17
Tabla 9. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	17
Tabla 10. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	19

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	19
Tabla 12. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.	19
Tabla 13. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre sin resorte. $Q = 55,87$ L/min.	21
Tabla 14. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m con una válvula de cierre con resorte. $Q = 44,2$ L/min.	22
Tabla 15. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre con resorte. $Q = 44,2$ L/min.	23
Tabla 16. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = 60,73$ L/min.	23
Tabla 17. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	24
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	24
Tabla 19. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	25
Tabla 20. Términos excluidos para la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	25

Tabla 21. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	27
Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	27
Tabla 23. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	27
Tabla 24. Términos excluidos para la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.	28
Tabla 25. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = 60,73$ L/min.	29
Tabla 26. Tiempo de llenado de 1 m^3 con el caudal bombeado (q) a diferentes alturas (H) por una bomba de ariete hidráulico de 2".	29
Tabla 27. Caudal bombeado y eficiencia leídos de la Figura 5 y de la Figura 6, respectivamente, del Anexo 6.	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Primera etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.	6
Figura 2. Segunda etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.	7
Figura 3. Tercera etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.	7
Figura 4. Cuarta etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.	8
Figura 5. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para el Caudal elevado vs Altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).	18
Figura 6. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).	20
Figura 7. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para el caudal elevado vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).	26
Figura 8. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).	28
Figura 9. Diagrama para elegir el tamaño de la bomba de ariete hidráulico a utilizar con los valores de q y H/h. Fuente: Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al Sector Rural de la PUCP.	58
Figura 10. Diagrama para calcular la eficiencia (η) de la bomba de ariete hidráulico con los valores H/h. Fuente: Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al Sector Rural de la PUCP.	59

INDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Bomba de ariete hidráulico de 1”.	9
Fotografía 2. Bomba de ariete hidráulico de 2”.	10
Fotografía 3. Área de prueba de las bombas de ariete hidráulico de 1” y de 2” en la UNTRM.	11
Fotografía 4. Bomba de ariete hidráulico de 1” en operación.	14
Fotografía 5. Medición del caudal elevado por la bomba de ariete hidráulico de 2” a 5 m, 10 m, 15 m y 20 m de altura en el área de prueba de la UNTRM.	21
Fotografía 6. Bomba de ariete hidráulico de 2” en operación.	30
Fotografía 7. Inicio del ensamble en el Laboratorio de Ingeniería de la UNTRM.	40
Fotografía 8. Llave de alimentación y válvulas check instaladas.	40
Fotografía 9. Ensamble de la línea de descarga.	40
Fotografía 10. Presentación de la botella de plástico que servirá como tanque de compresión de aire.	40
Fotografía 11. Bomba de ariete hidráulico de 1”.	41
Fotografía 12. Tubería de alimentación del ariete de 1” desde el reservorio del módulo SIPIAG a 2,5 m de altura. Observe el agua desechada.	42
Fotografía 13. Ariete en operación. Observe el nivel de agua y el aire comprimido en el tanque (botella).	42
Fotografía 14. Chorro de agua bombeado por el ariete de 1” a 5 m de altura	42

Fotografía 15. Chorro de agua a más de 5 m de altura, bombeado por el ariete de 1".	42
Fotografía 16. Derrame de agua previo al cierre de la válvula de impulso.	43
Fotografía 17. Tubería de alimentación de 1" y manguera de descarga de ½" de la bomba de ariete hidráulico de 1".	43
Fotografía 18. Accesorios de fierro galvanizado de 2". 1 codo de 90°, 4 niples, 2 tes y 1 codo de 45°. Se muestran en el orden en que serán ensamblados.	51
Fotografía 19. Válvula de cierre o de impulso desmontada.	51
Fotografía 20. Parte inferior de la válvula de cierre.	51
Fotografía 21. Válvula de cierre armada. Observe la forma cónica de la parte superior del disco de cierre.	52
Fotografía 22. Vista del asiento cónico en el cuerpo de la válvula de cierre.	52
Fotografía 23. Válvulas instaladas en el cuerpo de la bomba.	52
Fotografía 24. Tanque de compresión del aire. Observe el tubo de descarga de 1" del agua que será bombeada.	52
Fotografía 25. Empaquetadura de jebe y lona de la válvula check en la base del tanque de compresión del aire.	53
Fotografía 26. El golpe de ariete abrirá de esta manera la válvula check. La cabeza hidráulica y el disco de fierro sobre la empaquetadura la cerrarán.	53
Fotografía 27. Bomba de ariete hidráulico de 2", anclada en el dado de concreto.	53
Fotografía 28. Reservorio de agua para alimentar a la bomba de ariete.	54
Fotografía 29. Bomba de ariete conectada al desagüe del reservorio.	54

Fotografía 30. Bomba de ariete operando con una sola válvula de impulso.	54
Fotografía 31. Presión manual sobre las válvulas para que la bomba de ariete inicie su funcionamiento automático.	54
Fotografía 32. Bomba de ariete operando con sus dos válvulas de impulso.	55
Fotografía 33. Medición del caudal desechado por el cierre de válvulas que causan el golpe de ariete. ³²	55
Fotografía 34. Tubo que conduce el caudal desechado para facilitar su medición.	55
Fotografía 35. Balde de 3,8 L lleno para medición del caudal desechado.	55
Fotografía 36. Fotocomposición de la trayectoria de conducción del agua bombeada.	56
Fotografía 37. Área de prueba en la UNTRM.	57
Fotografía 38. Medición del caudal elevado a 5 m, 10 m, 15 m y 20 m.	57

RESUMEN

La bomba de ariete hidráulico (BAH) emplea el golpe de ariete, que ocurre al cerrarse bruscamente el flujo de agua originándose sobrepresiones dentro del conducto, para bombear una porción de agua a una altura mayor con flujo continuo e ininterrumpido, sin empleo de combustibles fósiles ni de la electricidad. La BAH recibe un gran caudal (Q) con una baja carga (h) y produce un flujo de mayor presión (H) con un menor caudal (q). Para aplicar la energía hidráulica, de gran potencial en nuestra Región, se planteó como objetivo habilitar un banco de prueba de BAH para el Laboratorio de Ingeniería de la UNTRM de Amazonas, constituido por una BAH de 1", una BAH de doble válvula (multipulsor) de 2", un tanque de alimentación de agua, un tanque de recepción de agua, tubería de alimentación y de conducción con sus accesorios correspondientes; para evaluar su funcionamiento y dar las recomendaciones para su diseño, instalación, operación y mantenimiento en campo. La BAH de 1" bombea agua hasta 10 m de altura con un caudal de 2,86 L/min y eficiencia de 29,30 %, llena 1 m³ en 5,83 horas. La BAH de 2" con una válvula de cierre con resorte, con respecto a la válvula sin resorte, a 10 m de altura de descarga: reduce el cierre de válvulas en 3,7 veces, incrementa el caudal en 1 L/min pero la eficiencia se reduce ligeramente, llena 1 m³ en 61,35 minutos; no funciona para alturas mayores a 10 m. La BAH de 2" con dos válvulas de cierre con resorte, con respecto a dos válvulas sin resorte, a 20 m de altura de descarga: el cierre de válvulas se reduce en 2,36 veces, esto perturbará menos a la bomba y permite el bombeo a alturas mayores, a pesar que disminuyen ligeramente el caudal elevado y la eficiencia; llena 1 m³ en 69,78 minutos. La BAH con dos válvulas de impulso (multipulsor), incrementa el caudal bombeado con respecto a cuando se emplea una sola válvula.

Palabras clave: energías renovables, ariete multipulsor.

ABSTRACT

The Hydraulic Ram Pump (HRP) uses the hammer, which occurs when closing the flow of water suddenly sprung up over pressure within the duct, to pump a trickle of water at a higher altitude with continuous and uninterrupted flow without the use of fuels fossil or electricity. The HRP receives a large flow rate (Q) with a low load (h) and produces a higher flow pressure (H) with a lower flow rate (q). To apply hydraulic power with great potential in our region, therefore seeks to enable a test of HRP for the engineering laboratory of the Amazons of the UNTRM comprising a HRP 1 ", a double valve HRP (multipulsor) 2 ", a main water supply tank, a water receiving tank, supply line and driving with corresponding accessories, to evaluate their performance and make recommendations for design, installation, operation and field maintenance. The HRP 1 "pumps water up to 10 m high with a flow rate of 2.86 L / min and efficiency of 29.30%, full 1 min 5.83 hours. The HRP 2 " with a valve with shutoff valve spring, with respect to the valve without spring, to 10 m high discharge: closing valves reduce by 3.7 times, increases the flow rate 1 L / min but the efficiency is slightly reduced, full 1 m at 61, 35 minutes does not work for heights above 10 m. The HRP 2 "with two spring-loaded check valves with respect to two valves without spring, to 20 m high discharge: the closing of valves is reduced by 2.36 times, that disturb less to pump and allows pumping to higher elevations, although decreasing slightly higher flow and efficiency; full 1 m in 69.78 minutes. The two valves HRP momentum (multipulsor) increases the flow rate compared to when using a single valve.

Keywords: Renewable energy, Multipulsor ram.

I. INTRODUCCIÓN

El ariete hidráulico irrumpe en la historia al principio de la era de los grandes inventos y alcanzó la adultez paralelamente a las máquinas de vapor y el motor de combustión interna. En una cervecería del condado inglés de Cheshire, John Whitehurst construyó un aparato con un principio de funcionamiento novedoso: accionaba manualmente una llave de paso en una tubería conectada hacia abajo de un tanque de alimentación, que se ubicaba 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 a la que está el tanque de abasto. Un niño se ocupaba de accionar la llave de paso del artefacto, que funcionó desde 1772 hasta 1800 (Montesinos y Gallardo, 2004).

La sagacidad humana añadió elementos al invento cervecero, y seis años antes que Joseph Montgolfier junto a su hermano Étienne inventara el globo aerostático, inventó un ariete automático, en principio similar a los contemporáneos. La novedad reconocida en 1776, libró a los infantes y a los adultos de la servidumbre humana como fuerza motriz. Las innovaciones nos legaron un aparato que durante más de un siglo figuró entre las máquinas hidráulicas más apreciadas y experimentadas (Montesinos y Gallardo, 2004).

Con la consolidación de los criterios de la industria moderna disminuyó el uso del ariete hidráulico convencional hasta casi desaparecer en el contexto tecnológico contemporáneo. Lo que más se recuerda de la era victoriosa de los arietes convencionales es el escaso mantenimiento que requerían y su vida útil, en Ameya, Nicaragua, se encuentra un ariete funcionando desde 1884 (Pérez, 2003).

Desde el aparato construido por Whitehurst y la inventiva de Montgolfier, el ariete hidráulico experimentó cambios constructivos notables, pero ninguno tan trascendental como el nuevo concepto multipulsor, porque supera las limitaciones relacionadas con los grandes volúmenes y pesos del equipo, y su potencia relativamente baja; o sea, el factor determinante no radicaba en el potencial de energía hidráulica disponible en una situación determinada, sino en la propia capacidad de admisión del flujo hidráulico en el aparato (Montecinos y Gallardo, 2004).

El ariete hidráulico multipulsor consiste en la sustitución de la única válvula de impulso de los arietes convencionales por un conjunto adecuado de válvulas en posiciones óptimas, en dependencia de determinadas condiciones de producción e instalación para aprovechar mejor los caudales disponibles y aumentar la potencia y los rendimientos. Esto permite una baja relación entre la velocidad máxima del agua en el sistema y la velocidad del agua al momento del cierre de las válvulas, con un mínimo de contraimpulso para su abertura automática, lo que permite reducir el largo y el diámetro del tubo de impulso. También aporta la ventaja de la reducida necesidad de amortiguación en la magnitud de inyección de agua en la cámara de aire, por lo que puede reducirse su volumen. Por último, aparece la posibilidad de utilizar un solo tubo de descarga o impulso con una gran cantidad de unidades multipulsoras, lo que permite aumentar la potencia con unidades livianas estandarizadas y producidas en serie a bajo costo, mientras que con los arietes convencionales se necesita diseñar un aparato en función de un diámetro dado, de gran volumen y peso, y por consiguiente de un alto costo (Pérez, 2003; Sarduy, 2008).

El ariete hidráulico es un ingenio tecnológico que utiliza la energía hidráulica, es un excelente medio de bombeo de agua sin utilización de combustibles fósiles ni de la electricidad. Realmente es una bomba de fluido impelente que emplea la energía

disponible de cierto líquido, generalmente agua, para bombear una parte o porción de éste a una mayor carga o altura. Este equipo está diseñado para elevar el agua a grandes alturas utilizando positivamente el fenómeno físico conocido en la hidráulica como golpe de ariete, el cual ocurre al cerrarse bruscamente el flujo de agua originándose sobrepresiones dentro del conducto (Pérez, 2008).

El abastecimiento de agua a la ganadería y el riego a 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.

La bomba de golpe de ariete o ariete hidráulico es un motor hidráulico que utiliza la energía de una cantidad de líquido (comúnmente agua) situada a una altura mayor (el desnivel de un río, presa, acequia u otro depósito o caudal), con el objetivo de elevar una porción de esa cantidad de líquido hasta una altura mayor que la inicial, mediante el golpe de ariete. Este equipo bombea un flujo continuo y funciona ininterrumpidamente sin necesidad de otra fuente de energía. El ariete recibe un gran caudal (Q) con una baja carga (h) y produce un flujo de mayor presión (H) con un menor caudal (q) (Lorente, 2005; Sarduy, 2008).

Un ariete hidráulico debe ser considerado como una alternativa económica de bombeo, cuando hay una fuente que puede proporcionar por lo menos siete veces más agua de la que se bombeará. El agua debe estar libre de basura y arena. Debe haber un sitio para ubicar el ariete por lo menos 0,5 m por debajo de la fuente de agua para que el ariete la pueda elevar a un nivel superior al de esta fuente (Cavero, 1982).

Debido a la geografía accidentada de gran parte de la Región Amazonas, tiene lugares muy adecuados para implementar sistemas de uso de energías renovables (solar, eólica, hidráulica y biomasa), las cuales son amigables con el medio ambiente porque no emplean combustibles fósiles de ningún tipo. Este sistema de bombeo de agua se aplicará para el cultivo de pastos y forrajes en laderas, las cuales únicamente se pueden cultivar en épocas de lluvia; además, se podrá emplear para abastecer de agua a un vivero, hato ganadero y vivienda, ubicadas en zonas altas con respecto a una fuente de agua. El ahorro por no usar combustibles fósiles y el insignificante costo de mantenimiento de las bombas de ariete hidráulico, 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.

Las bombas de ariete simples o básicas sólo tienen dos piezas móviles, por lo tanto, hay poco desgaste. Los arietes hidráulicos son económicos y fáciles de instalar. Pueden construirse con planos detallados y, debidamente instalados darán muchos años de servicio sin costos de bombeo. Por estas razones, la bomba de ariete hidráulico es una solución atractiva para bombeo donde existe una caída de agua.

La Universidad es el centro de investigación donde se deben evaluar tecnologías que han dado buenos resultados en otras regiones y que se pueden aplicar en nuestra Región. Para esta tarea es necesario contar con un banco de pruebas que permita evaluar la capacidad y rendimiento de los equipos, que se constituirán en una alternativa viable para solucionar problemas, con costos de operación y mantenimiento mínimos, que aseguren su sostenibilidad.

Motivados por la aplicación de las energías renovables y en especial de la energía hidráulica, en la cual nuestra Región tiene un gran potencial, hemos establecido como objetivo del presente trabajo de investigación, habilitar un banco de prueba de bombas de ariete hidráulico para el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, el que consistió de una bomba de ariete hidráulico simple de 1", una bomba de ariete hidráulico de doble válvula (multipulsor) de 2", un tanque de alimentación de agua para la bomba, un tanque de recepción de agua bombeada, tubería de alimentación y de conducción con sus accesorios correspondientes.

Este banco de prueba permitirá evaluar una serie de parámetros de funcionamiento de los arietes para caracterizarlos plenamente y establecer las recomendaciones para su diseño, instalación, operación y mantenimiento en campo.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico

La secuencia de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico se muestra en las Figuras 1 a la 4. Las válvulas C cierran hacia arriba y la válvula G cierra hacia abajo. El agua se acelera con un caudal Q en su caída desde la fuente a lo largo del tubo de alimentación AB, alcanza una velocidad suficiente que hace que se cierren las válvulas C (Figura 1), durante lo cual se desecha parte del agua (Q_d); el cierre produce una percusión y crea una fuerte presión al detenerse bruscamente el agua.

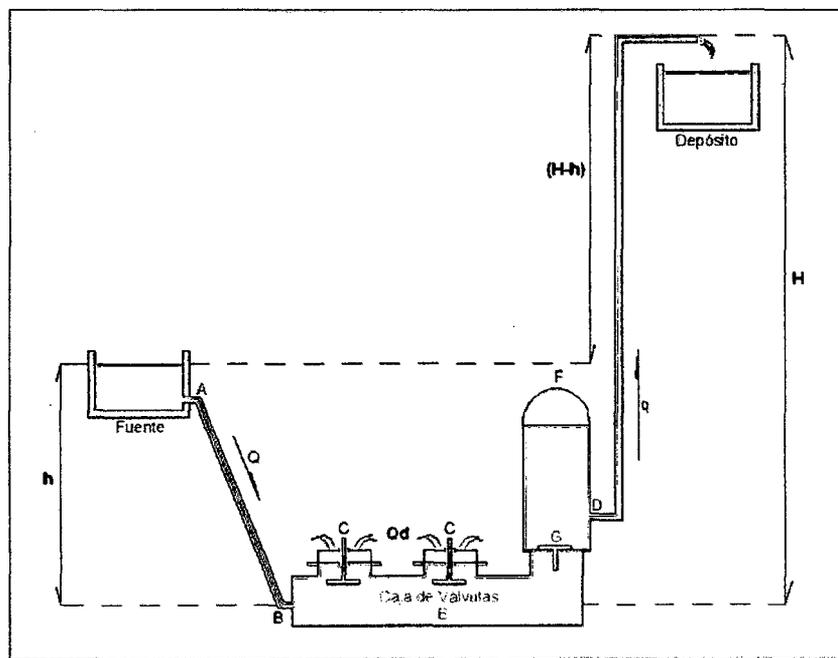


Figura 1. Primera etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.

Las válvulas de derrame C quedan cerradas por efecto de la presión del agua (debido a la altura " h "), la válvula de descarga G se mantiene cerrada por la presión de descarga (debido a la altura " H ") (Figura 2).

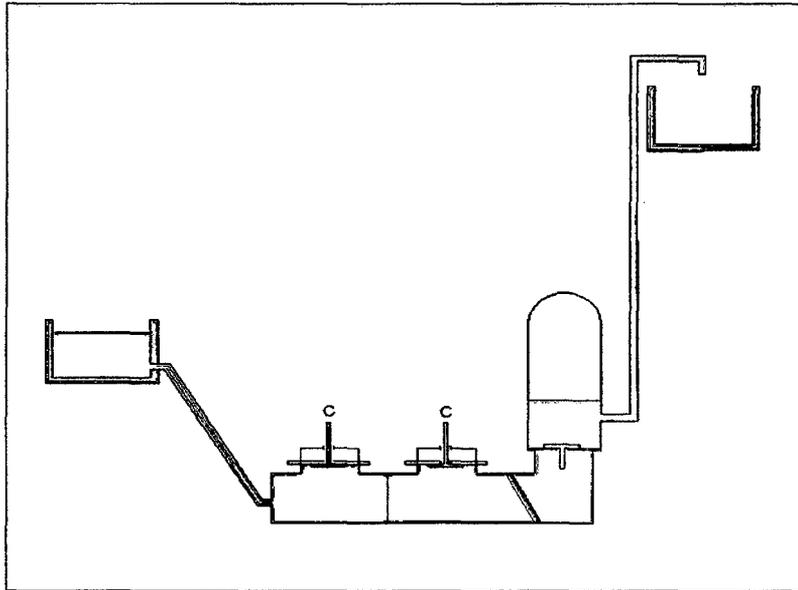


Figura 2. Segunda etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.

El golpe de presión abre la válvula G pasando un chorro de agua al depósito F donde se comprime el aire hasta la mayor presión existente, reduce a cero la velocidad, entonces la válvula G se cierra aprisionando el volumen de agua que penetró y que, por efecto de la elasticidad del aire, es impulsada a través de la tubería de descarga D hacia el reservorio (Figura 3).

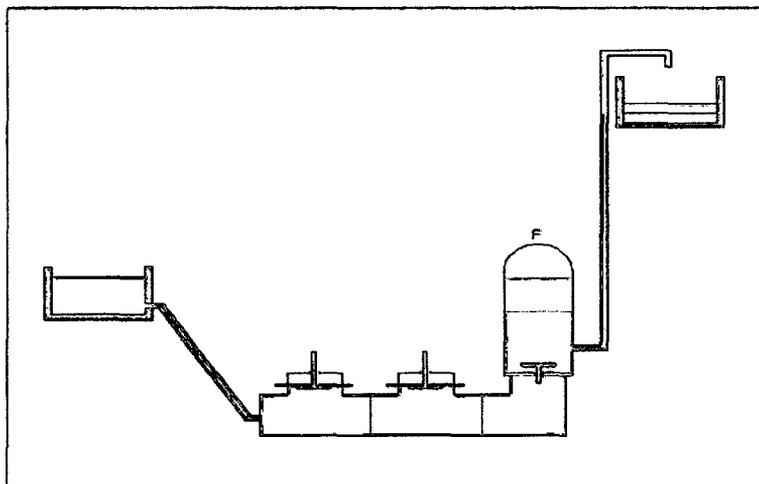


Figura 3. Tercera etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.

Cerrada la válvula G, la depresión oscilatoria (presión negativa) del golpe de ariete

hace descender las válvulas C, completándose el ciclo (Figura 4). A cada golpe de ariete el agua pasa al depósito donde se presuriza el aire. Este volumen de aire hace fluir el agua con continuidad por la manguera de descarga a un caudal q , menor al alimentado (Q). El agua desechada mientras se cierra la válvula C, regresará a la fuente sin generar desperdicio del preciado líquido, con un caudal Q_d .

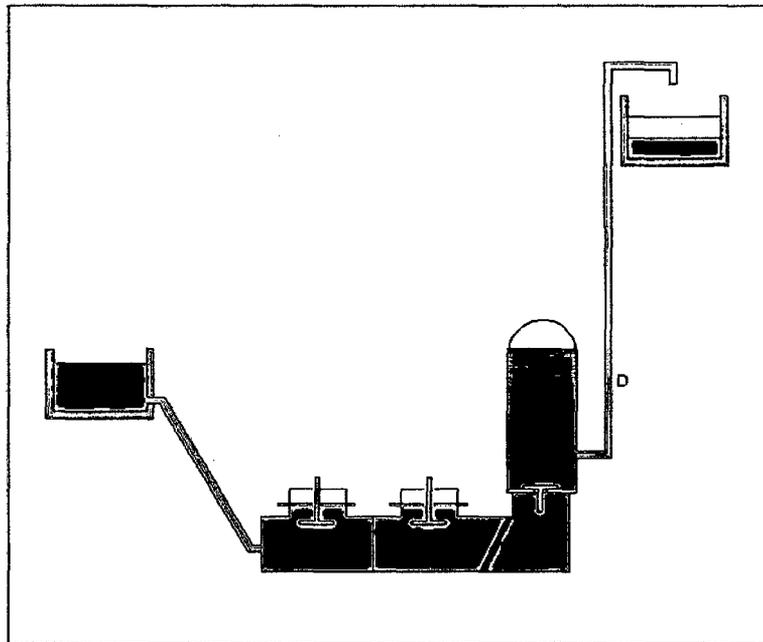


Figura 4. Cuarta etapa del funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.

El automatismo del aparato se logra después de accionar varias veces las válvulas C, moviendo su vástago. Para interrumpir la marcha del ariete es suficiente mantener cerrada dichas válvulas durante algunos instantes.

2.2. Bomba de ariete hidráulico de 1"

Se tomó como base los principios de generación del golpe de ariete hidráulico, para ensamblar una bomba de ariete hidráulico de 1" empleando accesorios de gasfitería de 1" de PVC, una válvula check de bronce de 1" para insertar en tubería y otra de

canastilla para fondo de pozo; los detalles de su ensamble se muestran en el Anexo

1. La bomba se aprecia en la Fotografía 1.



Fotografía 1. Bomba de ariete hidráulico de 1”.

2.3. Bomba de ariete hidráulico de 2”. Prototipo INDES 111

La bomba de ariete hidráulico de 2”, fue diseñada y ensamblada con accesorios de fierro galvanizado de 2”. Cada una de las dos válvulas impulsoras se fabricó en un torno a partir de tubo de fierro de alta presión de 1,5” de diámetro; el disco de cierre, su eje guía y sus contrapesos se fabricaron de fierro comercial, en torno se le dio la forma y el acabado final (Prototipo INDES 110), a cada válvula se le colocó un resorte en su eje guía, entre el disco de cierre y el puente (Prototipo INDES 111). El tanque de compresión de aire se confeccionó a partir de un tubo de fierro galvanizado de 3” de diámetro por 60 cm de largo; en un extremo de este tubo se soldó una brida de seis orificios y en el otro extremo se soldó una semiesfera de fierro para cerrarlo. En la base del tanque se colocó una válvula check constituida

por una empaquetadura de neopreno con lona sobre la que se sujetó firmemente, con un perno, un disco de fierro como contrapeso para ayudarla a cerrar. Los planos se muestran en el Anexo 3 y la secuencia fotográfica de su ensamble se muestra en el Anexo 4.

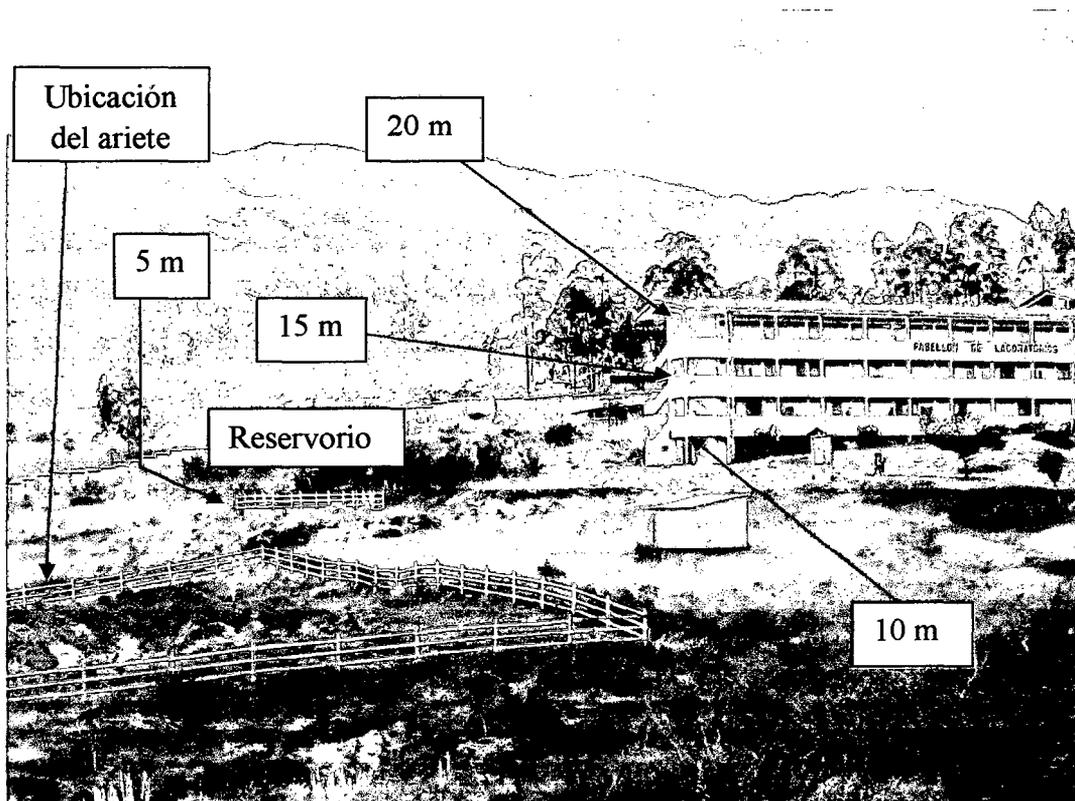


Fotografía 2. Bomba de ariete hidráulico de 2".Prototipo INDES 111.

2.4. Área de prueba de las bombas de ariete hidráulico de 1" y de 2"

El área de prueba se ubicó en el Pabellón de Laboratorios de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), específicamente las escaleras del primer al cuarto piso. La bomba de ariete se ancló en un dado de concreto al pie del reservorio de agua del Sistema Integral de Producción e Investigación Agroecológica (SIPIAG) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES). La diferencia de altura entre la tubería que sale del fondo del reservorio hasta donde se ubicó el ariete (dado de concreto) fue de 2,5 m. La llave de descarga se abrió completamente para que el agua fluya del reservorio hacia la bomba a través de una tubería PVC de 1" para la bomba de 1" y de 2" para la bomba de 2", con un ángulo de inclinación de 45° en ambos casos.

La descarga de la bomba de ariete de 1" fue de ½" y de la bomba de ariete de 2" fue de 1". Para la primera se empleó manguera reforzada de 5/8" y para la segunda se empleó tubería de PVC de 1" para conducir el agua hasta las cotas que se establecieron cada cinco metros, en la trayectoria de la ubicación de la bomba de ariete hasta el 4to piso del Pabellón mencionado, hasta donde se alcanzó los 20 m de diferencia de altura. El cierre de válvulas produce un golpe fuerte, los cuales se contaron en un tiempo de 1 minuto (cierres/min). El caudal desechado se midió en el canal que conduce el agua desechada por el ariete hacia un desagüe.



Fotografía 3. Área de prueba de las bombas de ariete hidráulico de 1" y de 2" en la UNTRM.

III. RESULTADOS

El rendimiento (R) de la bomba de ariete hidráulico varía en función del cociente H/h. Al aumentar el valor resultante, el rendimiento disminuye; en la Tabla 1 se muestra la variación del rendimiento energético. Como puede deducirse de la Tabla 1, la altura de elevación (H) no debe superar más de 12 veces el desnivel de trabajo.

Tabla 1. Rendimiento energético de una bomba de ariete hidráulico en función de H/h.

H/h	2	3	4	6	8	10	12
R	0,85	0,81	0,76	0,67	0,57	0,43	0,23

Fuente: Cavero, 1982.

El caudal elevado teórico (q_t), depende del rendimiento (R), el caudal de alimentación ($Q = q_r + Q_d$), el desnivel de trabajo (h) y la altura de elevación (H); se calculó con la ecuación:

$$q_t = R \cdot Q \cdot h / H$$

Se registraron los datos experimentales para calcular el caudal real elevado (q_r). El caudal desechado es el caudal de agua que la bomba de ariete no eleva (Q_d). Se empleará para evaluar la eficiencia (η) de la bomba de ariete con la ecuación:

$$\eta = (Q - Q_d) / Q$$

3.1. Bomba de ariete hidráulico de 1”

La tubería de alimentación a esta bomba de ariete hidráulico, desde el reservorio de agua fue de PVC de 1”. Para determinar el caudal elevado se midió el tiempo en que se llenó un volumen de 10 L en un balde. Para determinar el caudal desechado se midió el tiempo en que se llenó un balde de 3,8 L (Anexo 2).

Tabla 2. Datos experimentales y calculados para el ariete simple de PVC de 1” con $h=2,5$ m.

Altura de elevación H (m)	Cierre válvulas (cierre/min)	Caudal elevado q_r (L/min)	Caudal desechado Qd (L/min)	Caudal alimentado Q (L/min)	Eficiencia η (%)
5	120	7,52	6,13	13,65	55,09
10	160	2,86	6,90	9,76	29,30

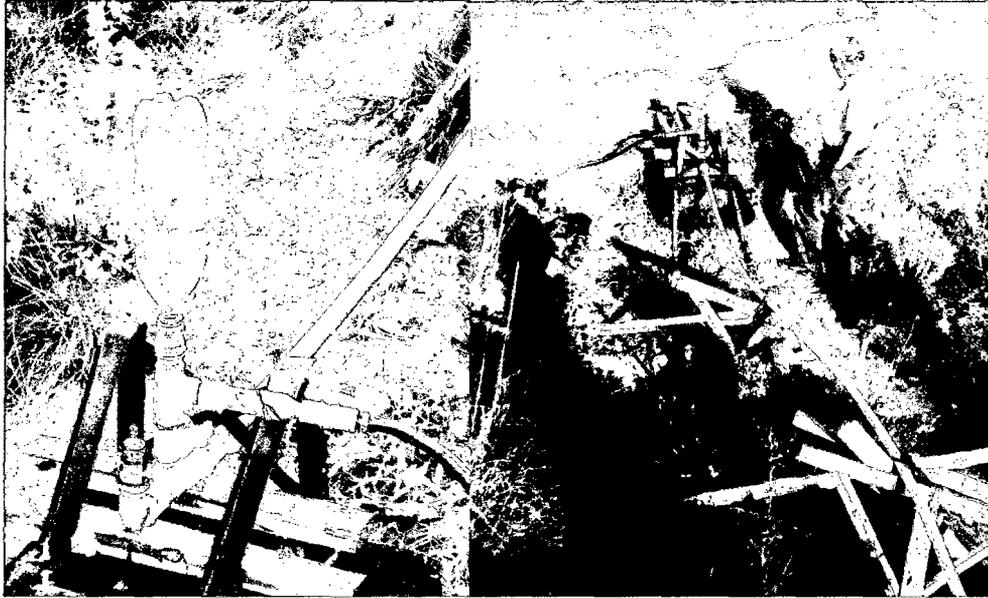
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 1” con $h = 2,5$ m.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$) (L/min)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85	5,80	7,52	1,72	29,66
10	4	0,76	1,85	2,86	1,01	54,59

Fuente: Elaboración propia.

Se midió los caudales de descarga hasta 10 m de altura porque esta bomba no funcionó para alturas mayores, debido al incremento de la cabeza hidráulica (presión del agua) sobre su válvula de impulso, la que no le permite abrir.



Fotografía 4. Bomba de ariete hidráulico de 1” en operación.

3.2. Bomba de ariete hidráulico de 2”

Para determinar la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico de 2” con dos válvulas de cierre, primero se hizo trabajar la bomba con una válvula sin resorte y la otra se mantuvo cerrada (Anexo 5). En estas condiciones, la bomba hizo llegar el agua hasta 10 m de altura (H) porque el ariete, sin resorte en su válvula, no funciona para alturas mayores. Para determinar el caudal elevado se midió el tiempo en que se llenó un volumen de 10 L en un balde. Para determinar el caudal desechado se midió el tiempo en que se llenó un balde de 3,8 L. Los resultados se muestran en la Tabla 4, donde se aprecia que cuando se incrementa la altura de descarga, la bomba realiza más cierres por minuto, por lo que el caudal desechado se incrementa, haciendo disminuir su eficiencia a 41,14 %, la cual es aún buena.

Tabla 4. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre sin resorte. $Q = 37,63$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre de válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η (%)
5	180	21,11	16,52	56,09
10	185	15,48	22,15	41,14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre sin resorte. $Q = 37,63$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$) (L/min)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85	15,99	21,11	5,12	32,02
10	4	0,76	7,15	15,48	8,33	116,50

Fuente: Elaboración propia.

Los datos experimentales de la operación de la bomba con dos válvulas de cierre sin resorte, se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m.

Con dos válvulas de cierre sin resorte. $Q = 55,87$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre de válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η (%)
5	75	27,67	28,20	49,53
10	78	24,53	31,34	43,91
15	80	20,21	35,66	36,17
20	85	15,44	40,43	27,64

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados experimentales (Tabla 6) del caudal elevado real (q_r) en función de la altura de elevación (H), y de la eficiencia (η) también en función de la altura (H); fueron procesados con el software estadístico SPSS 15.0 para Windows, para obtener las ecuaciones correspondientes, las cuales se constituyen en el modelo matemático del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas de cierre sin resorte.

3.2.1. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).

Con el SPSS se ha determinado la curva correspondiente a varios modelos de regresión curvilínea, en base a ello se ha seleccionado como el más representativo al modelo de regresión cúbica, cuyo análisis estadístico se muestra en las Tablas 7, 8 y 9; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 5.

Tabla 7. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).

Bomba con dos válvulas sin resorte.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	.	.

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 8. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	84,782	3	28,261	.	.
Residual	0,000	0	.		
Total	84,782	3			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 9. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura	-0,006	,000	-0,008	.	.
Altura ** 2	-0,053	,000	-1,628	.	.
Altura ** 3	0,001	,000	0,646	.	.
(Constante)	28,900	,000		.	.

Fuente: Elaboración SPSS.

La ecuación de la línea cúbica del caudal elevado vs altura, para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, sin resorte, será de la forma:

$$y = 0,001x^3 - 0,053x^2 - 0,006x + 28,9$$

Caudal elevado (L/min)

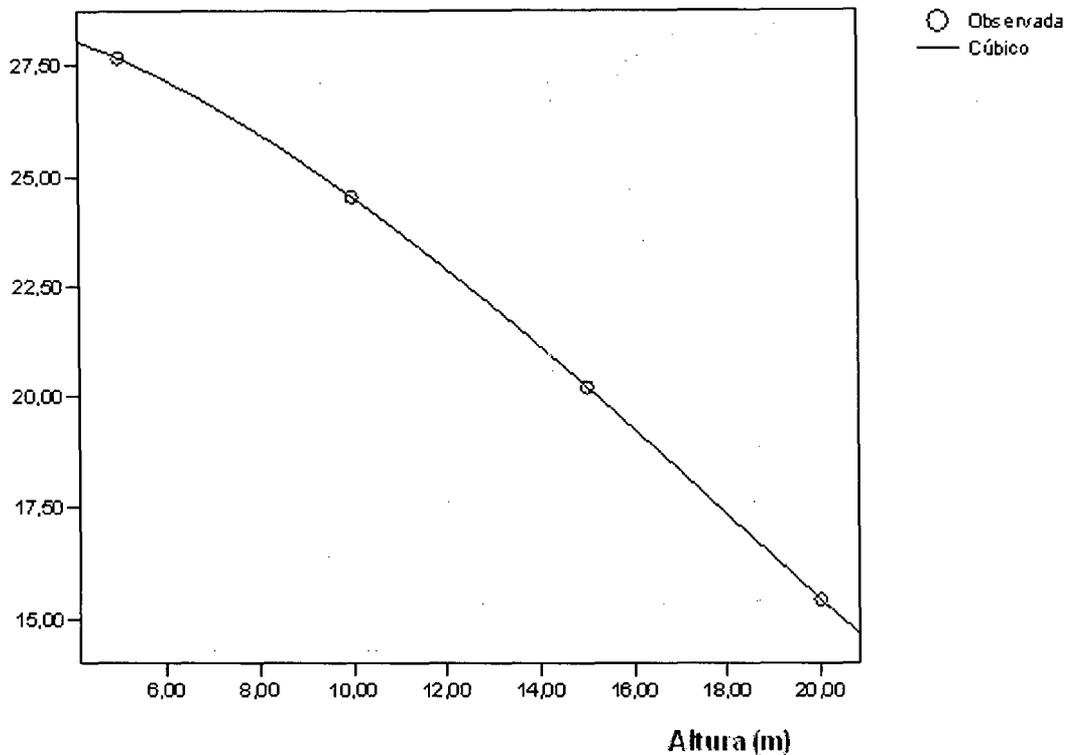


Figura 5. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para el Caudal elevado vs Altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).

3.2.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura).

Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).

Con el SPSS se determinó la curva para varios modelos de regresión curvilínea, y se seleccionó como el más representativo al modelo de

regresión cúbica, cuyo análisis estadístico se muestra en las Tablas 10, 11 y 12; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 6.

Tabla 10. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	.	.

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 11. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	271,657	3	90,552	.	.
Residual	0,000	0	.	.	.
Total	271,657	3			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 12. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas sin resorte.

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura	0,000	,000	0,000	.	.
Altura ** 2	-0,096	,000	-1,647	.	.
Altura ** 3	0,002	,000	0,657	.	.
(Constante)	51,700	,000		.	.

Fuente: Elaboración SPSS.

La ecuación de la línea cúbica de la eficiencia vs altura, para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, sin resorte (Prototipo INDES 110), será de la forma:

$$y = 0,002x^3 - 0,096x^2 + 51,7$$

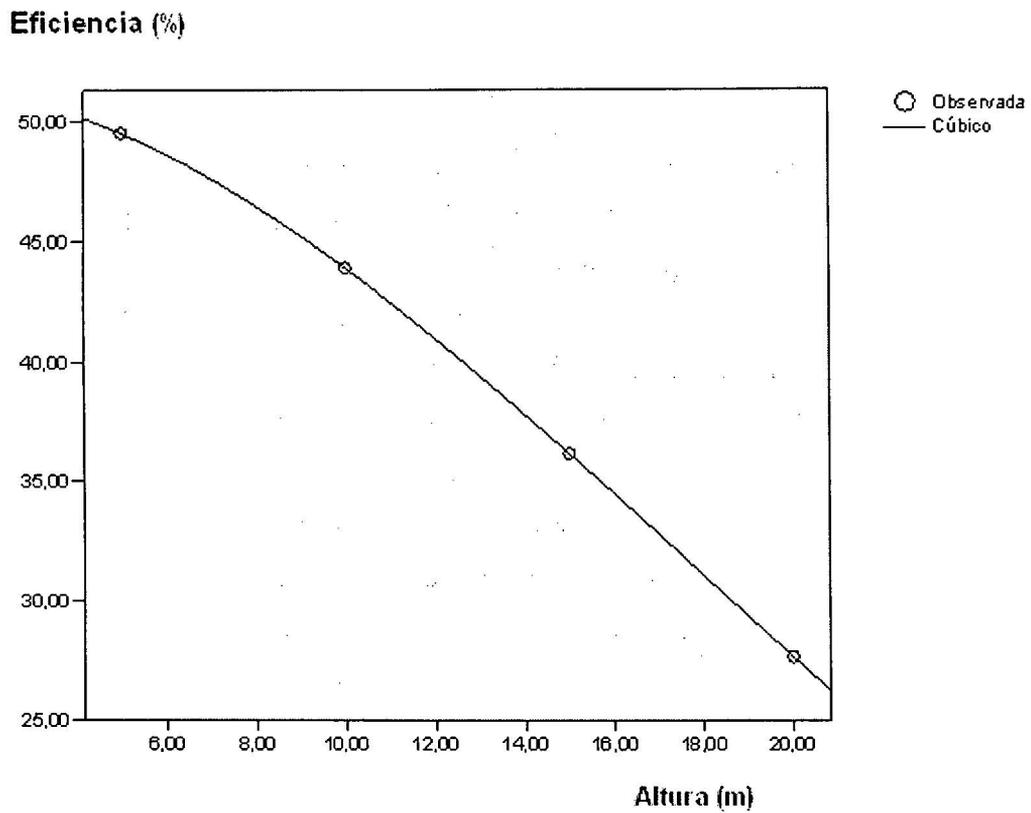


Figura 6. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 110).

Tabla 13. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre sin resorte. $Q = 55,87$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$) (L/min)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85	23,74	27,67	3,93	16,55
10	4	0,76	10,62	24,53	13,91	130,98
15	6	0,67	6,24	20,21	13,97	223,88
20	8	0,57	3,98	15,44	11,46	287,94

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 5. Medición del caudal elevado por la bomba de ariete hidráulico de 2" a 5 m, 10 m, 15 m y 20 m de altura en el área de prueba de la UNTRM.

El ariete con resorte en su válvula no funciona para alturas menores a 10 m, porque la cabeza hidráulica no logra hacer cerrar la válvula con resorte, quedando estática sin producir los cierres que harían que el agua sea impulsada a través de la tubería de descarga. Al quedar abierta la válvula, solo habrá derrame de agua y no bombeo. Los datos experimentales se muestran en la Tabla 14. Comparando los datos de las Tablas 4 y 14 a 10 m de altura, el cierre de válvulas se reduce a la tercera parte; se incrementó el caudal elevado en 5,29%, sin embargo la eficiencia disminuyó en 10,35%.

Tabla 14. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m.

Con una válvula de cierre con resorte. $Q = 44,2$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η (%)
10	50	16,30	27,90	36,88
15	55	12,48	31,72	28,24
20	60	9,21	34,99	20,84

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre con resorte. $Q = 44,2$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$)	Incremento de caudal bombeado (%)
10	4	0,76	8,40	16,30	7,90	94,05
15	6	0,67	4,94	12,48	7,54	152,63
20	8	0,57	3,15	9,21	6,06	192,38

Fuente: Elaboración propia.

Los datos experimentales del funcionamiento de la bomba con las dos válvulas de cierre con resorte, se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = 60,73$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia: η (%)
10	28	24,50	36,23	40,34
15	30	19,36	41,37	31,88
20	36	14,33	46,40	23,59

Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).

Con el SPSS se ha determinado la curva correspondiente a varios modelos de regresión curvilínea, en base a ello se ha seleccionado como el más representativo al modelo de regresión cúbica, cuyo análisis estadístico se muestra en las Tablas 17, 18, 19 y 20; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 7.

Tabla 17. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	.	.

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.

	Suma de cuadrados	GI	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	51,716	2	25,858	.	.
Residual	0,000	0	.		
Total	51,716	2			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 19. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura).

Bomba con dos válvulas con resorte.

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura	-1,051	,000	-1,034	.	.
Altura ** 3	4,89E-5	,000	0,034	.	.
(Constante)	34,963	,000		.	.

Fuente: Elaboración SPSS.

Tabla 20. Términos excluidos para la ecuación cúbica (Caudal elevado vs

Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.

	Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Tolerancia mínima
Altura ** 2	-1,265	0,000	0,000	-0,680	0,000

Fuente: Elaboración propia.

La ecuación de la línea cúbica del caudal elevado vs altura, para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, con resorte, será de la forma:

$$y = 0,0000489x^3 - 1,051x + 34,963$$

Caudal elevado (L/min)

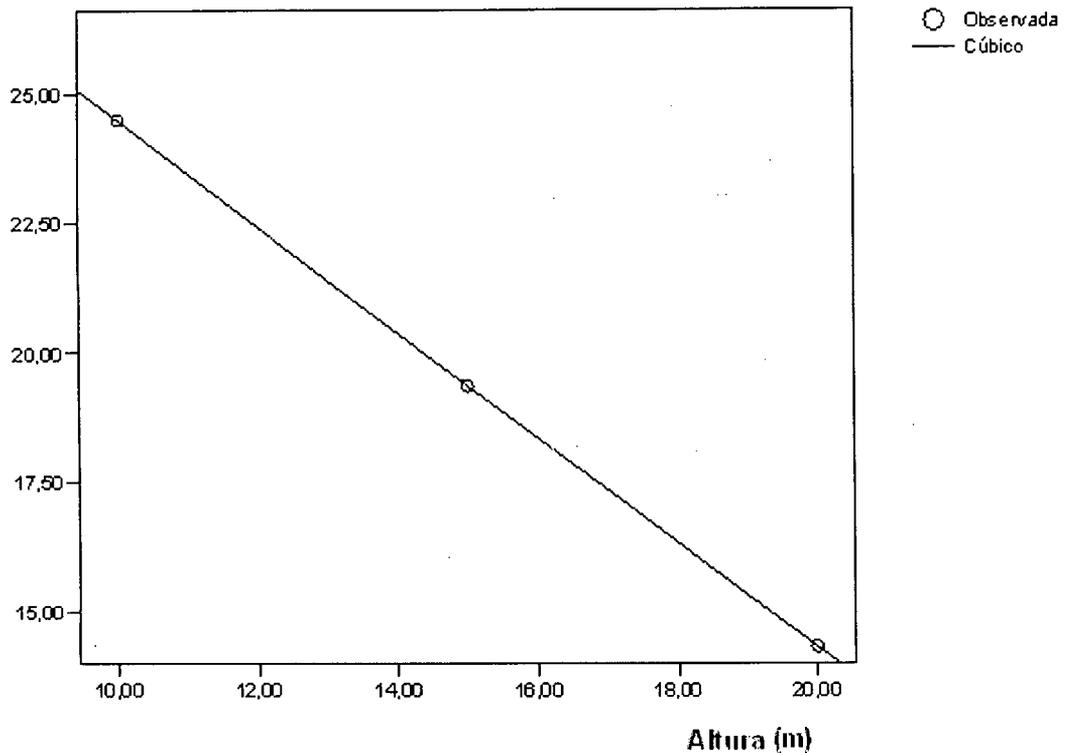


Figura 7. Representación de los datos experimentales (O) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para el caudal elevado vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).

3.2.4. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura).

Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).

Con el SPSS se ha determinado la curva correspondiente a varios modelos de regresión curvilínea, en base a ello se ha seleccionado como el más representativo al modelo de regresión cúbica, cuyo análisis estadístico se muestra en las Tablas 21, 22, 23 y 24; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 8.

Tabla 21. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).

Bomba con dos válvulas con resorte.

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
1,000	1,000	.	.

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 22. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	140,286	2	70,143	.	.
Residual	0,000	0	.	.	.
Total	140,286	2	.	.	.

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 23. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura).

Bomba con dos válvulas con resorte.

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura	-1,777	,000	-1,061	.	.
Altura ** 2	0,003	,000	0,061	.	.
(Constante)	57,770	,000	.	.	.

Fuente: Elaboración SPSS.

Tabla 24. Términos excluidos para la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura). Bomba con dos válvulas con resorte.

	Beta dentro	t	Sig.	Correlación parcial	Tolerancia mínima
Altura ** 3	-0,411	0,000	0,000	-0,561	0,000

Fuente: Elaboración SPSS.

La ecuación de la línea cúbica de la eficiencia vs altura, para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, con resorte (Prototipo INDES 111), queda de la forma cuadrática y será de la forma:

$$y = 0,003x^2 - 1,777x + 57,77$$

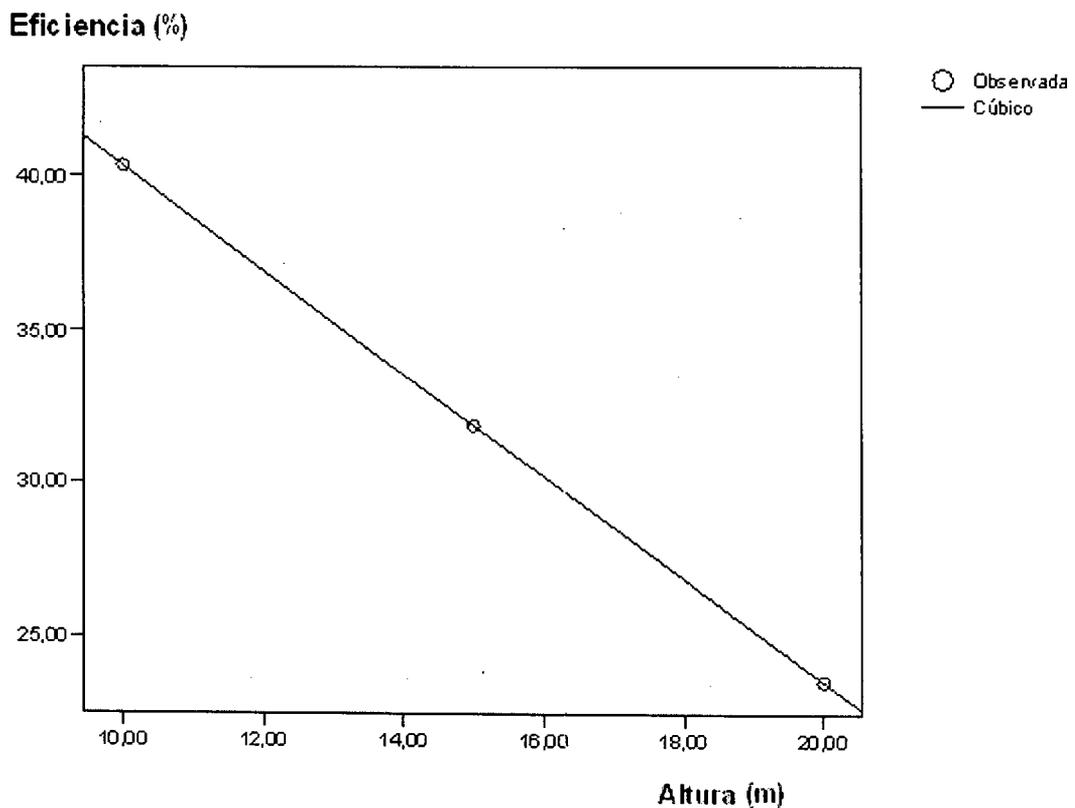


Figura 8. Representación de los datos experimentales (0) y de la línea cúbica (-) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).

Tabla 25. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = 60,73$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$)	Incremento de caudal bombeado (%)
10	4	0,76	11,54	24,50	12,96	112,31
15	6	0,67	6,78	19,36	12,58	185,55
20	8	0,57	4,33	14,33	10,00	230,95

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 26 se muestra el tiempo requerido para llenar 1 m^3 de agua, a cada una de las condiciones de trabajo de la bomba de ariete hidráulico de 2".

Tabla 26. Tiempo de llenado de 1 m^3 con el caudal bombeado (q) a diferentes alturas (H) por una bomba de ariete hidráulico de 2".

Altura de elevación H (m)	q_{r1} (L/min)	Tiempo llenado 01 m^3 (min)	q_{r2} (L/min)	Tiempo llenado 01 m^3 (min)	q_{r3} (L/min)	Tiempo llenado 01 m^3 (min)	q_{r4} (L/min)	Tiempo llenado 01 m^3 (min)
5	21,11	47,37	27,67	36,14	--	--	--	--
10	15,48	64,60	24,53	40,77	16,30	61,35	24,50	40,82
15	--	--	20,21	49,48	12,48	80,13	19,36	51,65
20	--	--	15,44	64,77	9,21	108,58	14,33	69,78

Fuente: elaboración propia.

Donde:

q_{r1} : Caudal real elevado con 01 válvula sin resorte

q_{r2} : Caudal real elevado con 02 válvulas sin resorte

q_{r3} : Caudal real elevado con 01 válvula con resorte

q_{r4} : Caudal real elevado con 02 válvulas con resorte



Fotografía 6. Bomba de ariete hidráulico de 2" en operación.

Tabla 27. Caudal bombeado y eficiencia leídos de la Figura 9 y de la Figura 10, respectivamente, del Anexo 6.

H/h	Caudal bombeado (L/min)	Eficiencia (%)
2	18	70
4	16	50
6	15	40
8	14	34

Fuente: elaboración propia.

En el Anexo 7 se encuentra la Guía de Práctica de Transporte de Fluidos para Determinación de la Eficiencia de una Bomba de Ariete Hidráulico de 2", en la cual se explica la instalación, operación y toma de datos experimentales; asimismo tiene las Tablas para anotar los datos experimentales y procesados. Esta guía de uso del banco de prueba de bombas de ariete hidráulico servirá para las prácticas de laboratorio de transporte de fluidos con energía renovable, que realizarán los estudiantes de las carreras profesionales de Ingeniería Agroindustrial, Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil; además, también lo emplearán los estudiantes de Ingeniería Agrónoma e Ingeniería Zootecnista, como módulo demostrativo de un sistema de bombeo de agua para abastecer un sistema de riego tecnificado para diversos cultivos, abrevaderos o fuentes de agua para poblaciones.

IV. DISCUSIÓN

Con la bomba de ariete hidráulico hecha con accesorios de PVC de 1", se midió los caudales de descarga hasta 10 m de altura porque esta bomba no funcionó para alturas mayores, debido al incremento de la cabeza hidráulica (presión del agua) sobre su válvula de cierre o impulso, la que no le permitió abrir para mantener su funcionamiento. Esta bomba elevó a 10 m de altura el agua con un caudal de 2,86 L/min, con un eficiencia de 29,30%; con estas condiciones, se llenará 1 m³ de agua a 10 m de altura en 5,83 horas. Téngase en cuenta que las bombas de ariete hidráulico pueden trabajar día y noche con mantenimiento mínimo debido al escaso desgaste por tener solo dos componentes móviles.

Comparando los resultados de la Tabla 4 (bomba operando con una válvula sin resorte) con los de la Tabla 14 (bomba operando con una válvula con resorte), a 10 m de altura, se aprecia la influencia del resorte en la válvula de cierre, permitiendo los siguientes beneficios en la operación de la bomba: el cierre de válvulas se reduce en 3,7 veces, el caudal se incrementa en casi 1 L/min; a pesar que la eficiencia se ha reducido en 4 puntos porcentuales. Lo rescatable es el incremento de caudal bombeado, con lo que llenará 1 m³ en 61,35 minutos. Además, la bomba de ariete hidráulico con una válvula de cierre sin resorte no funciona para bombear el agua a alturas mayores a 10 m. Sin embargo, el resorte incorporado a la válvula le permite seguir funcionando a mayores alturas.

En la Tabla 5 se aprecia que la bomba de ariete hidráulico de 2" evaluada con una válvula de cierre sin resorte ha bombeado un caudal equivalente al 116,50 % superior al teórico esperado para este tipo de bomba, a una altura de 10 m. En la Tabla 15 se

aprecia que esta bomba con resorte en su válvula, incrementa el caudal bombeado con respecto al teórico esperado.

Comparando los datos de la Tabla 6 (bomba operando con dos válvulas sin resorte) con los de la Tabla 16 (bomba operando con dos válvulas con resorte) a 20 m de altura de descarga, los resortes influyen para que el cierre de válvulas se reduzca en 2,36 veces, lo cual perturbará menos a la bomba por los fuertes impactos de estos cierres; sin embargo, disminuyen el caudal elevado en 1,11 L/min (7,19%) y la eficiencia en 4,05 puntos porcentuales (14,65%).

De la Tabla 16, se deduce que los resortes colocados en cada válvula han contribuido a reducir la frecuencia de cierre de válvulas y permiten el bombeo de agua a alturas mayores, pero no incrementan el caudal bombeado ni la eficiencia. Sin embargo, la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas de cierre o impulso (multipulsor), incrementan el caudal bombeado entre 31,08 % (a 5 m de altura) a 58,46 % (a 10 m de altura) para la bomba sin resortes en sus válvulas (Prototipo INDES 110); hasta 50,31 % (a 10 m de altura), 55,13 % (a 15 m de altura) y 55,59 % (a 20 m de altura), para la bomba con resortes en sus dos válvulas (Prototipo INDES 111).

El tiempo requerido para bombear 1 m³ de agua es ligeramente mayor con las dos válvulas con resortes que cuando están sin ellos. Sin embargo, recomendamos trabajar con la bomba con dos válvulas, con resortes en cada una de ellas (Prototipo INDES 111), para alargar su vida útil al reducir los impactos por el cierre de las válvulas.

Comparando los resultados experimentales de caudal bombeado, con las lecturas de caudal bombeado (q) en función de H/h para una bomba de ariete hidráulico de 2", obtenidas de la Figura 9 (Anexo 6) que se muestran en la Tabla 27, se aprecia que cuando se operó la bomba de ariete hidráulico de 2" con una sola válvula sin resorte

(Tabla 4), el caudal bombeado con el caudal leído son prácticamente similares. Sin embargo, cuando se opera la bomba con una sola válvula con resorte (Tabla 14), ambos caudales son similares a H/h de 4, es 16 % menor el caudal bombeado que el leído a H/h de 6 y 34 % menor a H/h de 8. Cuando la bomba trabajó con dos válvulas sin resorte (Tabla 6), el caudal bombeado es 53 % mayor que el leído a H/h de 2 y 4, 34 % mayor a H/h de 6 y 10 % mayor a H/h de 8 (Prototipo INDES 110). Esta comparación de valores es favorable para la bomba de 2" que hemos empleado cuando la hacemos trabajar con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111) (Tabla 16), alcanzando un caudal bombeado 53 % superior al leído para H/h de 4, es 29 % superior para H/h de 6 y es ligeramente mayor para H/h de 8, pero su frecuencia de cierre de válvulas es menor; por tanto, con el tiempo perjudicará menos al equipo.

Con el software SPSS se ha determinado que la ecuación representativa del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas de cierre, con o sin resortes en ellas, será cúbica; tanto para representar la variación del caudal bombeado con la altura, como para representar la variación de la eficiencia con la altura.

En general, la bomba de ariete hidráulico de 2" que hemos diseñado, construido y evaluado con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111); supera los valores publicados en el Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al Sector Rural de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

V. CONCLUSIONES

- 1- La bomba de ariete hidráulico hecha con accesorios de PVC de 1", puede bombear el agua hasta 10 m de altura con un caudal de 2,86 L/min y eficiencia de 29,30 %. A estas condiciones, llenará 1 m³ de agua a 10 m de altura en 5,83 horas.
- 2- La operación de la bomba de ariete hidráulico de 2" con una válvula de cierre con resorte brinda los siguientes beneficios, con respecto a la válvula sin resorte, a 10 m de altura de descarga: reduce el cierre de válvulas en 3,7 veces, incrementa el caudal en 1 L/min y la eficiencia se reduce en 4 puntos porcentuales. Llenará 1 m³ en 61,35 minutos.
- 3- La bomba de ariete hidráulico de 2" con una válvula de cierre sin resorte no funciona para bombear el agua a alturas mayores a 10 m.
- 4- La operación de la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas de cierre con resorte brinda los siguientes beneficios, con respecto a dos válvulas sin resorte, a 20 m de altura de descarga: el cierre de válvulas se reduce en 2,36 veces, esto perturbará menos a la bomba; sin embargo, disminuyen el caudal elevado en 1,11 L/min (7,19%) y la eficiencia en 4,05 puntos porcentuales (14,65%). Llenará 1 m³ en 69,78 minutos a 20 m de altura.
- 5- Los resortes colocados en cada válvula de impulso reducen la frecuencia de cierre y permiten el bombeo de agua a alturas mayores.

- 6- La bomba de ariete hidráulico con dos válvulas de cierre o impulso (multipulsor), incrementan el caudal bombeado con respecto a cuando se emplea una sola válvula.

- 7- El tiempo para bombear 1 m^3 de agua es ligeramente mayor con las dos válvulas con resortes que sin ellos. Se debe trabajar la bomba con dos válvulas con resortes, para alargar su vida útil al reducir los impactos por el cierre de las válvulas.

- 8- La ecuación representativa del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas de cierre, con o sin resortes en ellas, será cúbica; tanto para la variación del caudal bombeado con la altura, como para la variación de la eficiencia con la altura.

- 9- Las bombas de ariete hidráulico pueden trabajar día y noche con mantenimiento mínimo debido al escaso desgaste por tener pocos componentes móviles.

VI. RECOMENDACIONES

- 1- Emplear el área de prueba de este trabajo de investigación para evaluar otros modelos de bomba de ariete hidráulico.
- 2- Emplear la guía de práctica del Anexo 7 del presente trabajo de investigación para incentivar en los alumnos el empleo y la difusión de las energías renovables.
- 3- Trabajar la bomba de ariete hidráulico, en aplicaciones en campo, con dos válvulas con resortes, para alargar su vida útil al reducir los impactos por el cierre de las válvulas y por bombear agua a mayor altura.
- 4- Instalar una tercera válvula de cierre o de impulso a la bomba de ariete hidráulico para evaluar su eficiencia comparándola con una y dos válvulas.
- 5- En la clase práctica con los alumnos, desmontar una válvula de cierre, el tanque de compresión de aire y la válvula check, para observar sus componentes y comprender mejor su funcionamiento.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavero La Rosa, Pablo. 1982. Agua para el mundo. Diseño de un ariete hidráulico. Nota Técnica N° RWS.4.D.5 E.E.U.U. AID.
- Lorente, Christophe. 2005. Concepción, fabricación e instalación de sistemas de bombeo con el uso de la energía hidráulica. Chile.
- Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al Sector Rural de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Montecinos Larrosa, Alejandro y Leopoldo Gallardo Quiñones. 2004. Los secretos del ariete hidráulico. Energía y Tú, Revista científico-popular trimestral de CUBASOLAR, No. 25, enero-marzo 2004, ISSN 1028-9925.
- Pérez Hernández, Pedro Luis. 2003. El ariete hidráulico. CITA. Cuba.
- Sarduy Valedón, Lorenzo. 2008. Posibilidades de uso de la energía hidráulica. Tecnología Apropriada, Boletín del Centro Integrado de Tecnologías del Agua, Año 12, No. 1, Nov. 2008. ISSN 959-7102-16-1. Camagüey, Cuba.
- T.D. Jeffery, T.H. Thomas, A.V. Smith, P.B. Glover, P.D.Fountain. The Department Technology Unit – Warwick University. MDG Publishing, Warwickshire 2005.
- Hadzich M; Miguel. Bomba de Ariete. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima-Perú 1989.

ANEXOS

ANEXO 1

Ensamble de la bomba de ariete hidráulico de 1”



Fotografía 7. Inicio del ensamble en el Laboratorio de Ingeniería de la UNTRM.



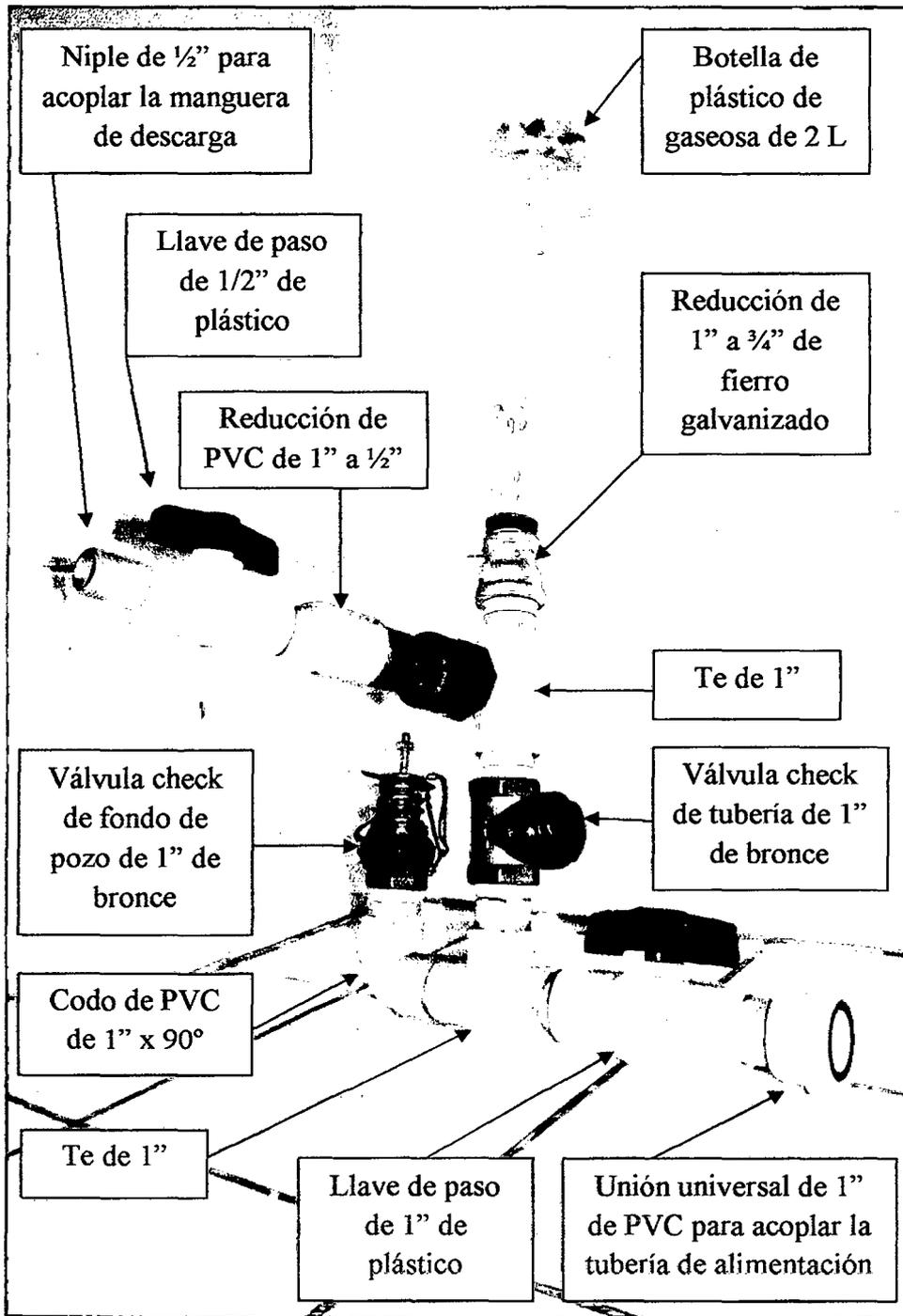
Fotografía 8. Llave de alimentación y válvulas check instaladas.



Fotografía 9. Ensamble de la línea de descarga.



Fotografía 10. Presentación de la botella de plástico que servirá como tanque de compresión de aire.



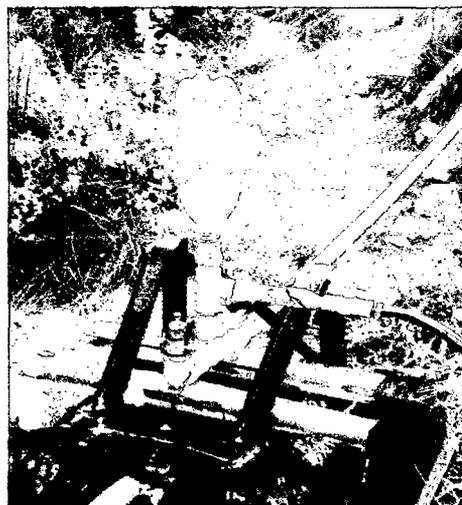
Fotografía 11. Bomba de ariete hidráulico de 1".

ANEXO 2

Secuencia fotográfica de operación de la bomba de ariete hidráulico de 1"



Fotografía 12. Tubería de alimentación del ariete de 1" desde el reservorio del módulo SIPIAG a 2,5 m de altura. Observe el agua desechada.



Fotografía 13. Ariete en operación. Observe el nivel de agua y el aire comprimido en el tanque (botella).



Fotografía 14. Chorro de agua bombeado por el ariete de 1" a 5 m de altura.



Fotografía 15. Chorro de agua a más de 5 m de altura, bombeado por el ariete de 1".



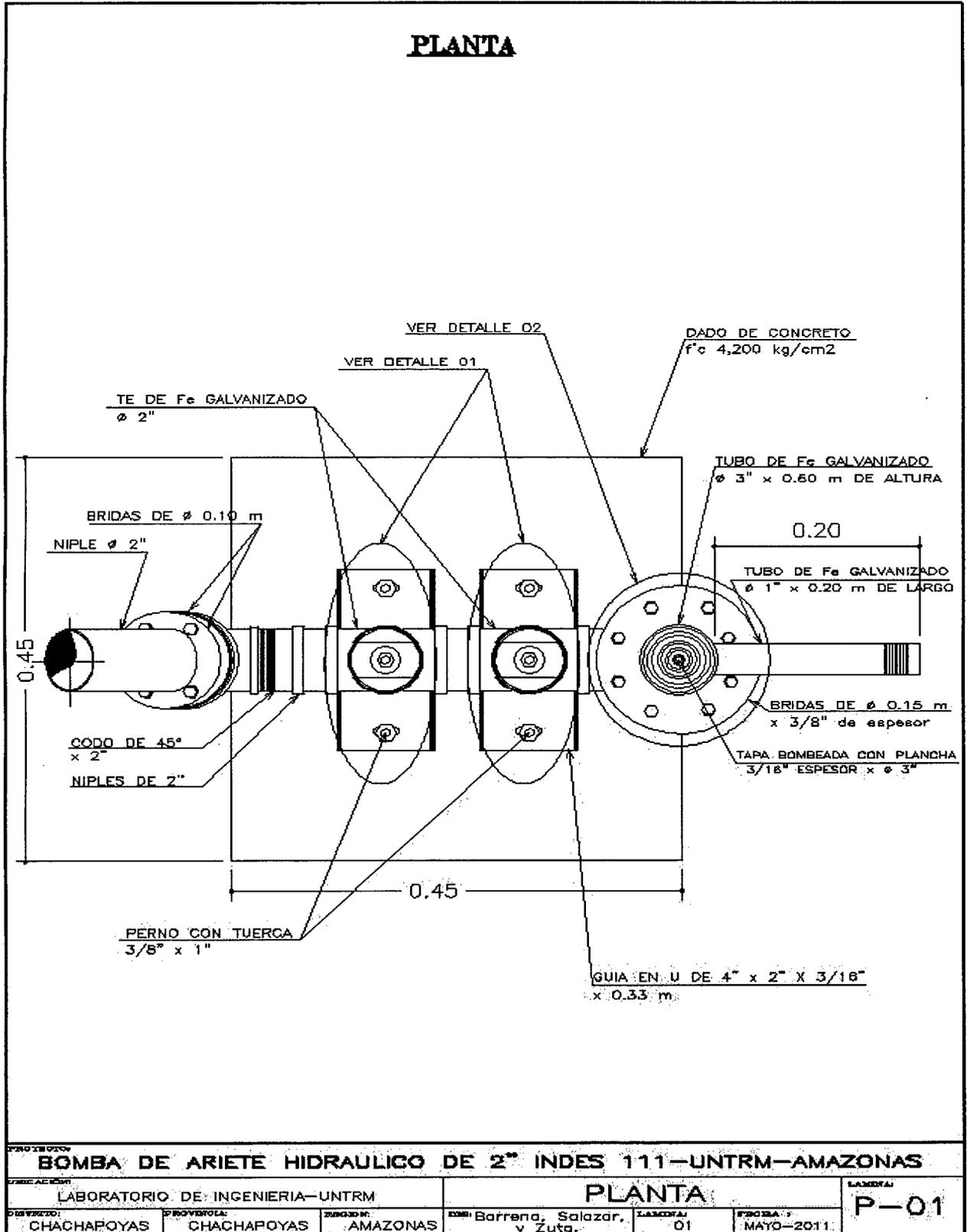
Fotografía 16. Derrame de agua previo al cierre de la válvula de impulso.



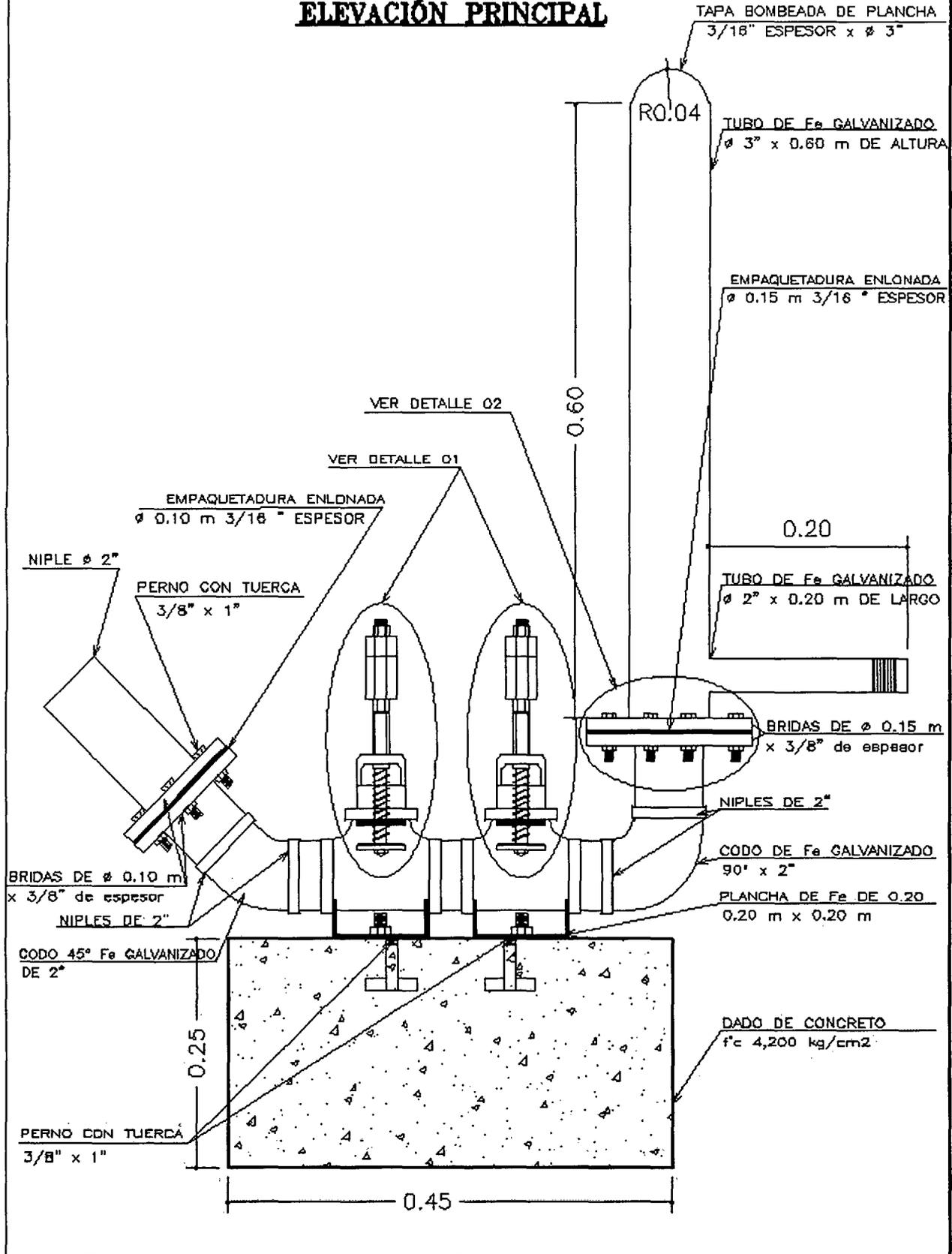
Fotografía 17. Tubería de alimentación de 1" y manguera de descarga de 1/2" de la bomba de ariete hidráulico de 1".

ANEXO 3

Planos de la bomba de ariete hidráulico de 2"

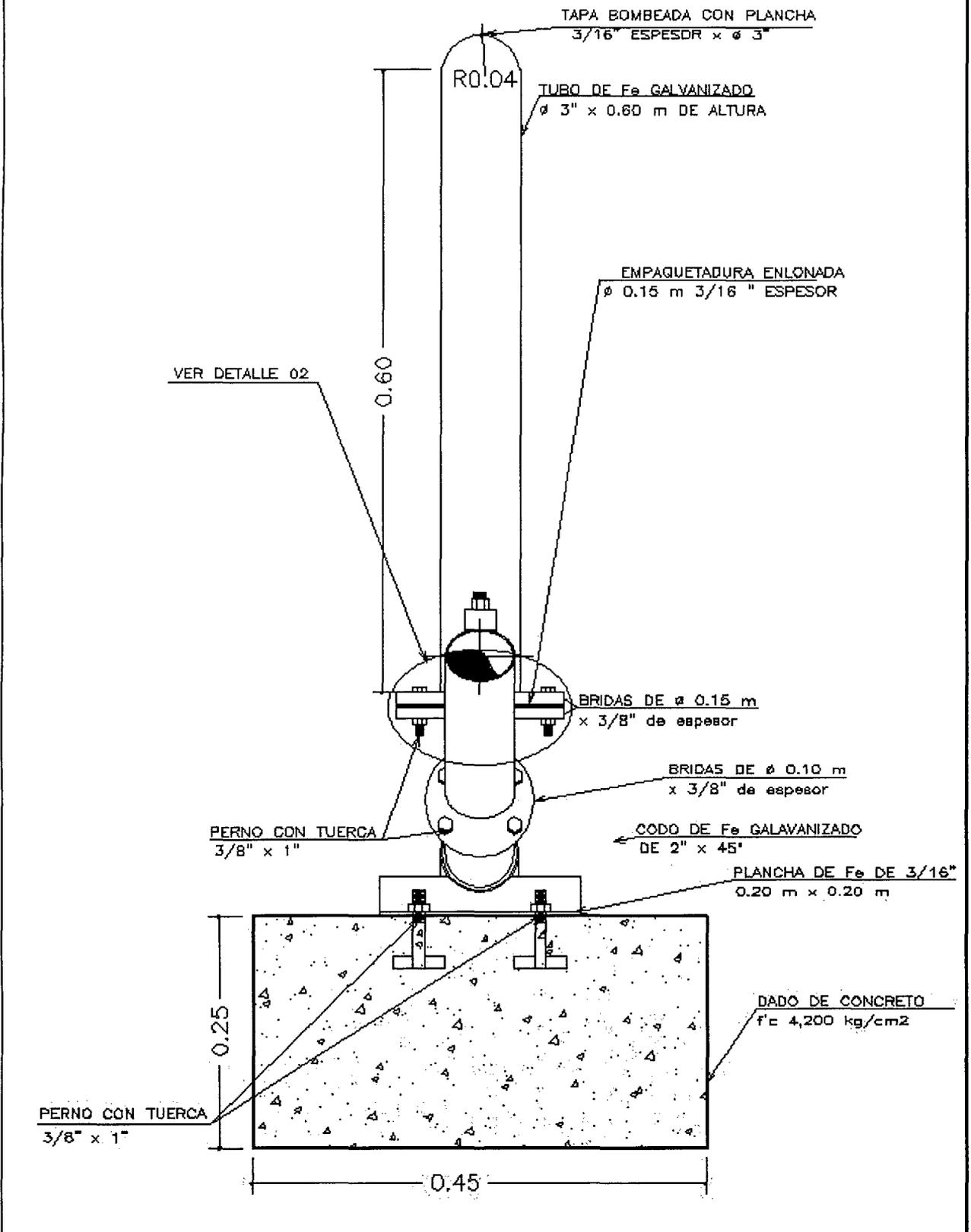


ELEVACIÓN PRINCIPAL



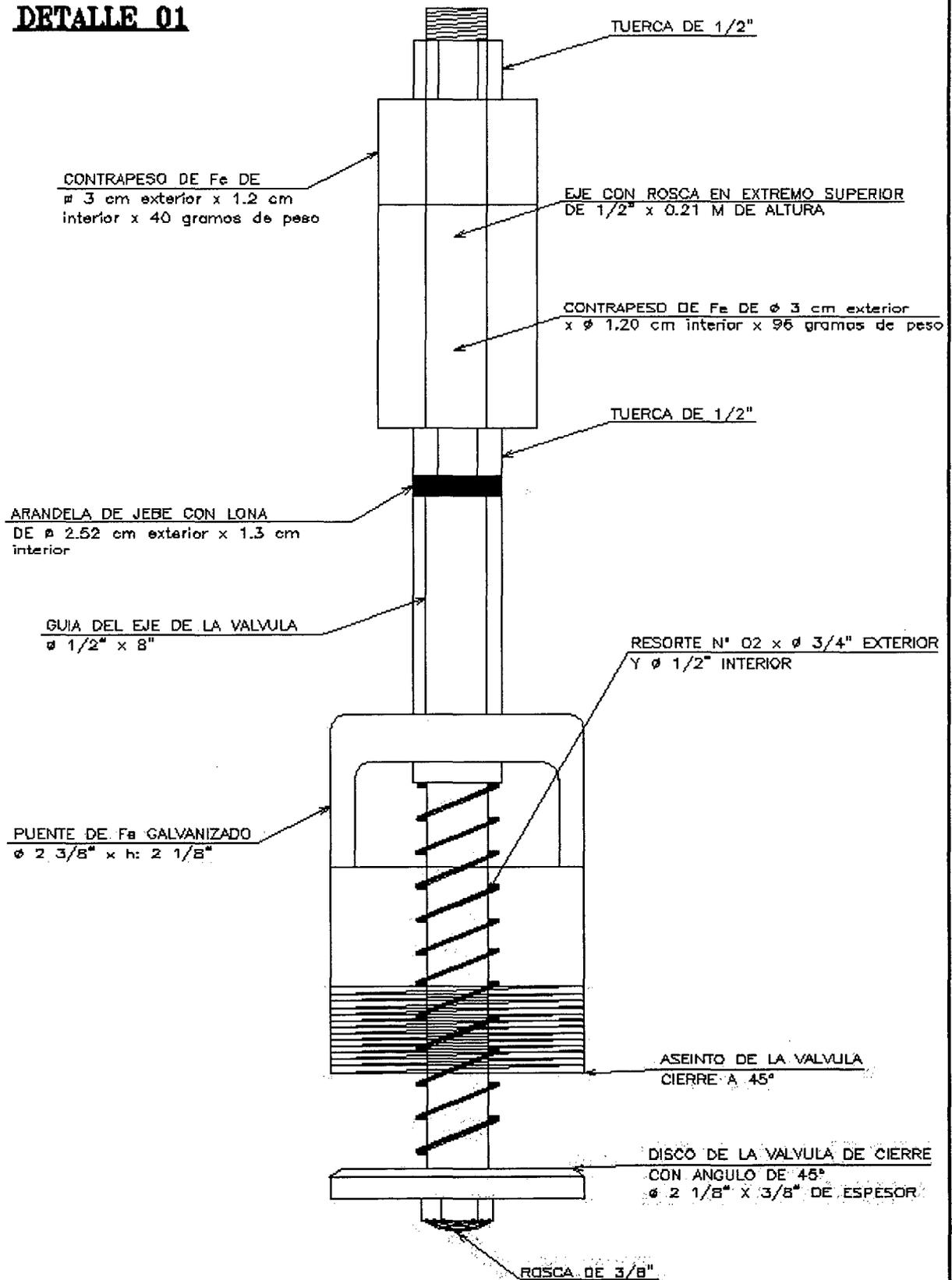
BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2" INDES 111-UNTRM-AMAZONAS					
LABORATORIO DE INGENIERIA-UNTRM			PLANO : ELEVACIÓN PRINCIPAL		LÁMINA :
DE DISEÑO: CHACHAPOYAS	DISEÑADA POR: CHACHAPOYAS	DISEÑADA EN: AMAZONAS	DISEÑADA POR: Barrena, Salazar, y Zuta.	LÁMINA: 02	FECHA: MAYO-2011
					E-01

ELEVACIÓN LATERAL IZQUIERDA



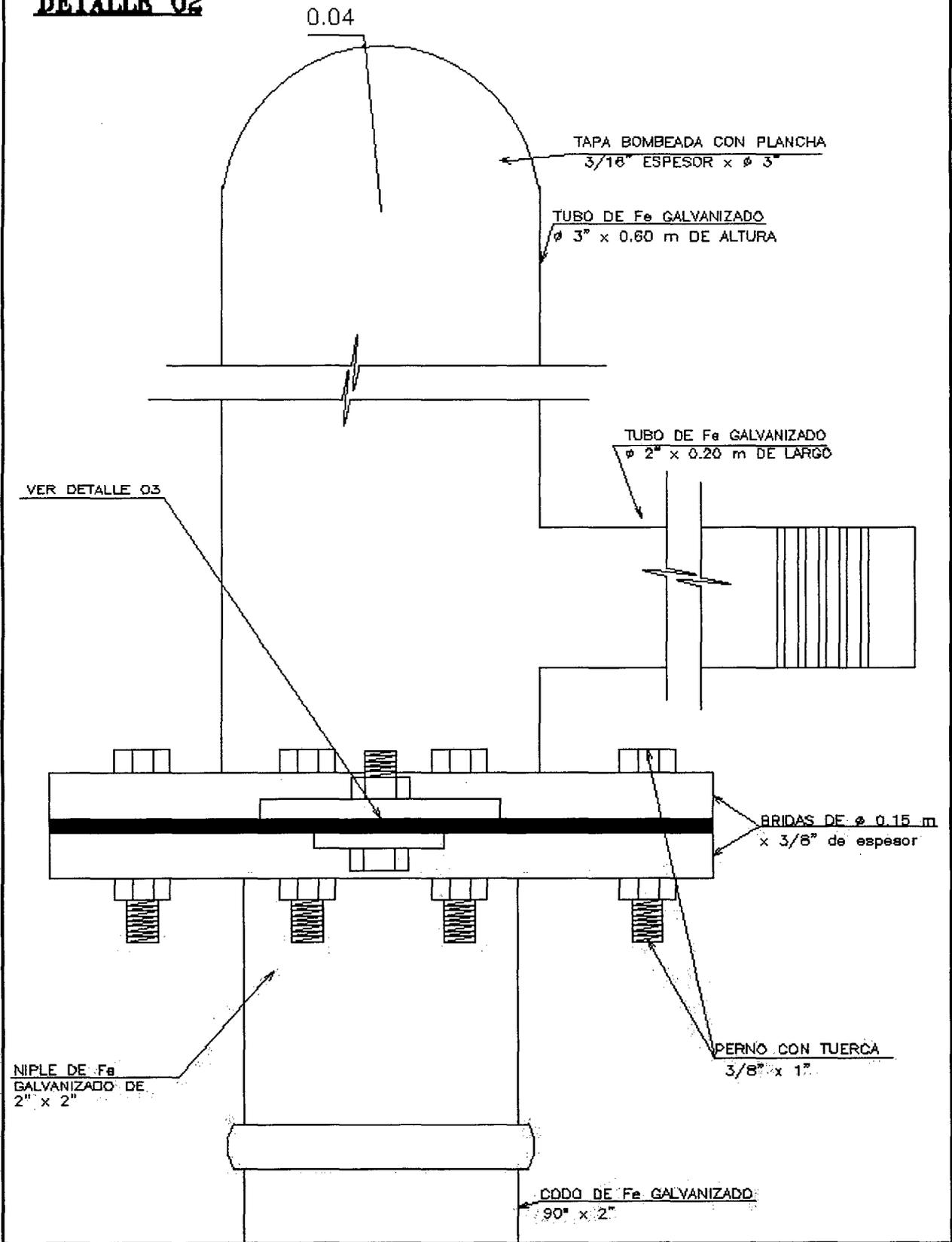
BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2" INDES 111-UNTRM-AMAZONAS					
LABORATORIO DE INGENIERIA-UNTRM			ELEVACIÓN LATERAL IZQUIERDA		LAMINA
CHACHAPOYAS	CHACHAPOYAS	AMAZONAS	Barrena, Salazar, y Zuta.	04	E-03
					MAYO-2011

DETALLE 01



BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2" INDES 111-UNTRM-AMAZONAS					
LABORATORIO DE INGENIERIA-UNTRM			PLANO: DETALLE 01		LAMINA:
DISEÑADO: CHACHAPOYAS	PROYECTADO: CHACHAPOYAS	FUNCION: AMAZONAS	DISEÑADO: Barrena, Salazar, y Zúta.	LAMINA: 05	FECHA: MAYO-2011
					D-01

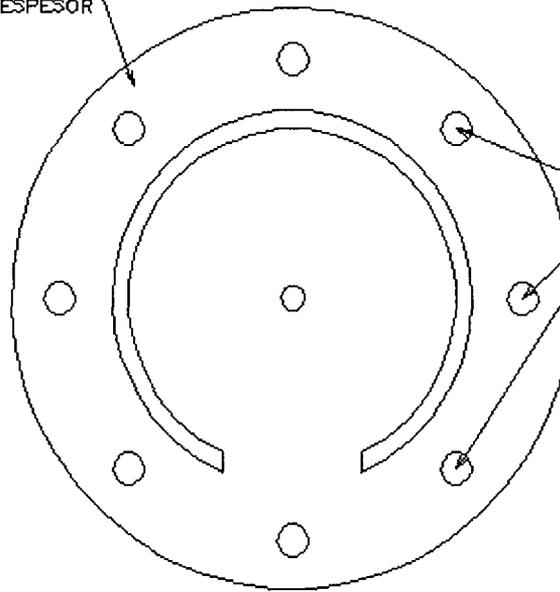
DETALLE 02



BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2" INDES 111-UNTRM-AMAZONAS					
LABORATORIO DE INGENIERIA-UNTRM			PLANO: DETALLE 02		LAMINA:
DISEÑO: CHACHAPOYAS	PROYECTO: CHACHAPOYAS	REGION: AMAZONAS	DISEÑADO POR: Barrena, Salazar, y Zuta.	LAMINA: 06	FECHA: MAYO-2011
					D-02

DETALLE 03

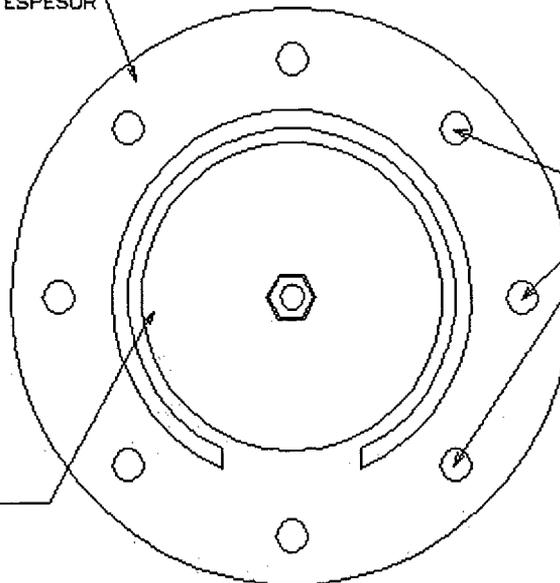
EMPAQUETADURA ENLONADA
 ϕ 0.15 m $\frac{3}{16}$ " ESPESOR



AGUJEROS DE ϕ $\frac{3}{8}$ "
 \times $\frac{3}{8}$ " de espesor

FORMA DE LA EMPAQUETADURA DE JEFE Y LONA PARA CERRAR
 LA ENTRADA DE AGUA AL TANQUE DE COMPRESION DE AIRE

EMPAQUETADURA ENLONADA
 ϕ 0.15 m $\frac{3}{16}$ " ESPESOR



AGUJEROS DE ϕ $\frac{3}{8}$ "
 \times $\frac{3}{8}$ " de espesor

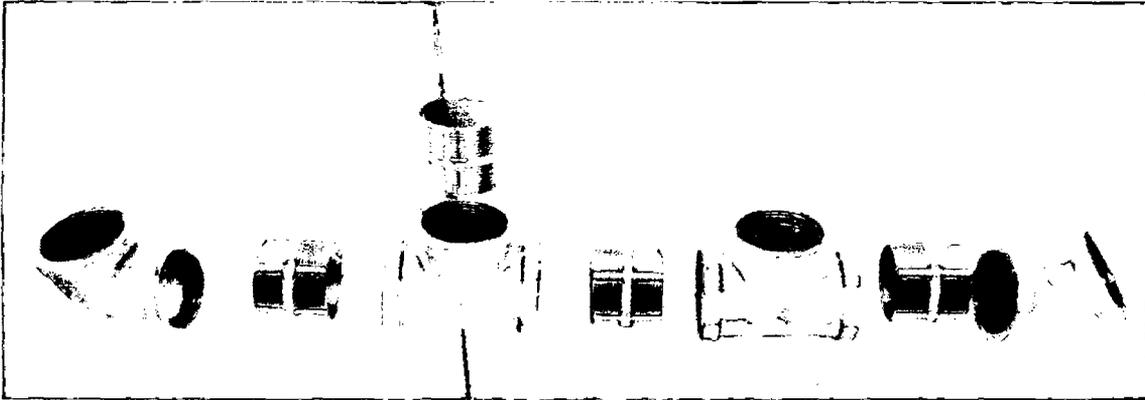
DISCO DE FIERRO DE
 ϕ 2 $\frac{1}{2}$ "

VISTA SUPERIOR DE LA EMPAQUETADURA DE JEBE Y LONA QUE SIRVE
 PARA SELLAR LA ENTRADA DE AGUA AL TANQUE DE COMPRESION DEL AIRE
 TIENE EMPERNADO UN DISCO DE METAL QUE AYUDA A SU CIERRE.

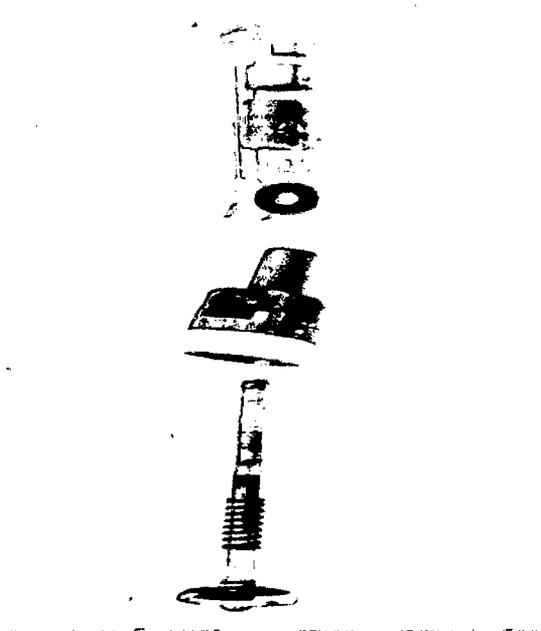
PROYECTO: BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2" INDES 111-UNTRM-AMAZONAS					
LABORATORIO DE INGENIERIA-UNTRM			PLANO: EMPAQUETADURA ENLONADA		LAMINA:
DISEÑADO:	PROYECTADO:	REVISADO:	ELABORADO:	LAMINA:	FECHA:
CHACHAPOYAS	CHACHAPOYAS	AMAZONAS	Barrena, Salazar, y Zuta.	07	MAYO-2011
					D-03

ANEXO 4

Ensamble de la bomba de ariete hidráulico de 2" .Prototipo INDES 111



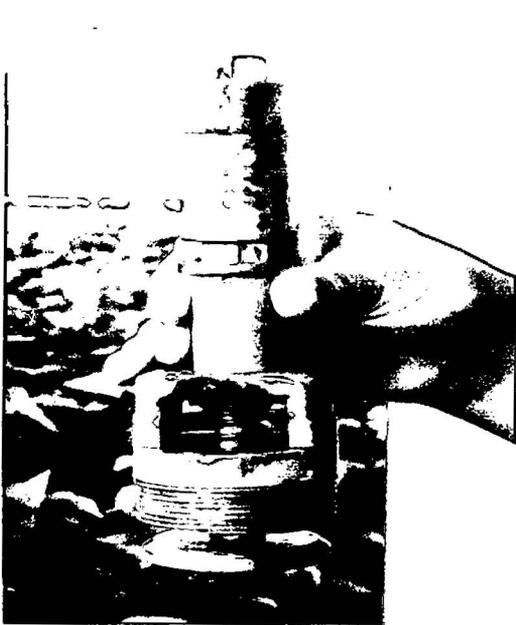
Fotografía 18. Accesorios de fierro galvanizado de 2". 1 codo de 90°, 4 niples, 2 tes y 1 codo de 45°. Se muestran en el orden en que serán ensamblados.



Fotografía 19. Válvula de cierre o de impulso desmontada.



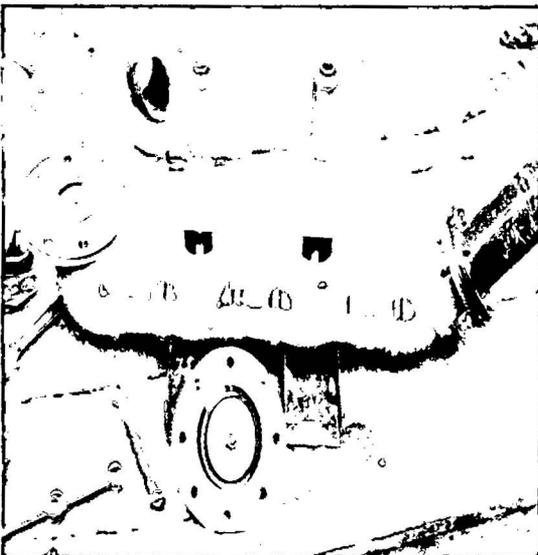
Fotografía 20. Parte inferior de la válvula de cierre.



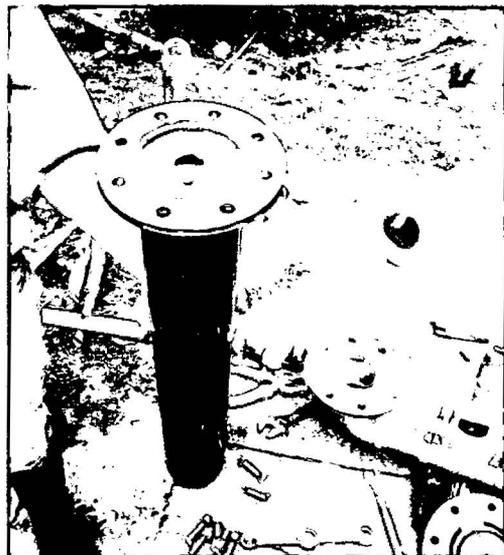
Fotografía 21. Válvula de cierre armada.
Observe la forma cónica de la parte superior del disco de cierre.



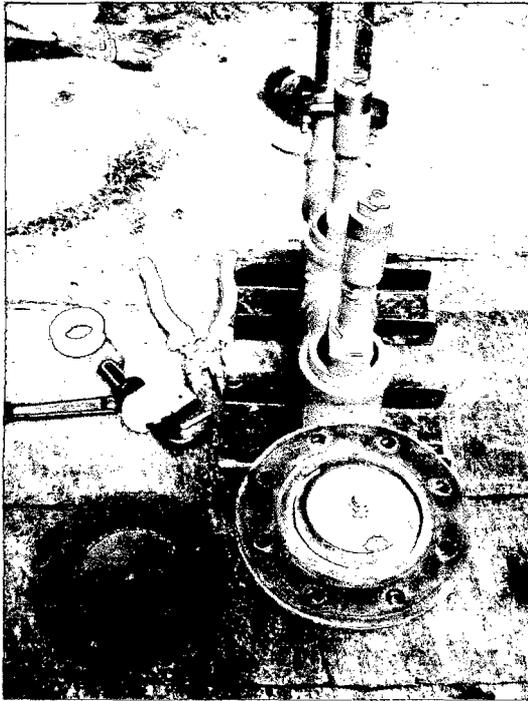
Fotografía 22. Vista del asiento cónico en el cuerpo de la válvula de cierre.



Fotografía 23. Válvulas instaladas en el cuerpo de la bomba.



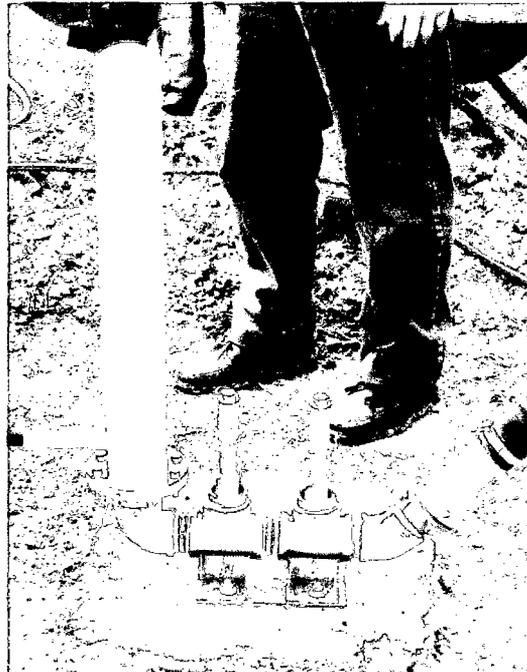
Fotografía 24. Tanque de compresión del aire. Observe el tubo de descarga de 1" del agua que será bombeada.



Fotografía 25. Empaquetadura de jebe y lona de la válvula check en la base del tanque de compresión del aire.



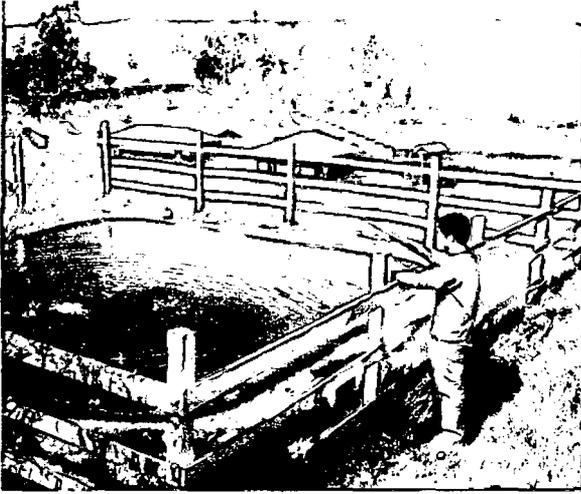
Fotografía 26. El golpe de ariete abrirá de esta manera la válvula check. La cabeza hidráulica y el disco de hierro sobre la empaquetadura la cerrarán.



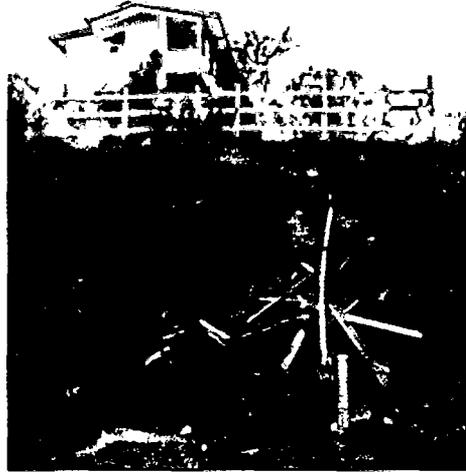
Fotografía 27. Bomba de ariete hidráulico de 2", anclada en el dado de concreto.

ANEXO 5

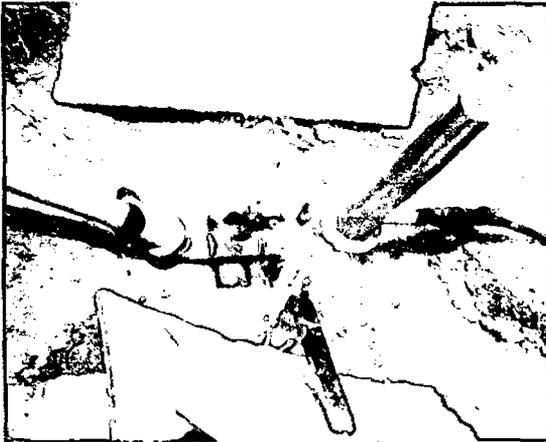
Secuencia fotográfica de la operación de la bomba de ariete hidráulico de 2"



Fotografía 28. Reservorio de agua para alimentar a la bomba de ariete.



Fotografía 29. Bomba de ariete conectada al desagüe del reservorio.



Fotografía 30. Bomba de ariete operando con una sola válvula de impulso.



Fotografía 31. Presión manual sobre las válvulas para que la bomba de ariete inicie su funcionamiento automático.



Fotografía 32. Bomba de ariete operando con sus dos válvulas de impulso.



Fotografía 33. Medición del caudal desechado por el cierre de válvulas que causan el golpe de ariete.



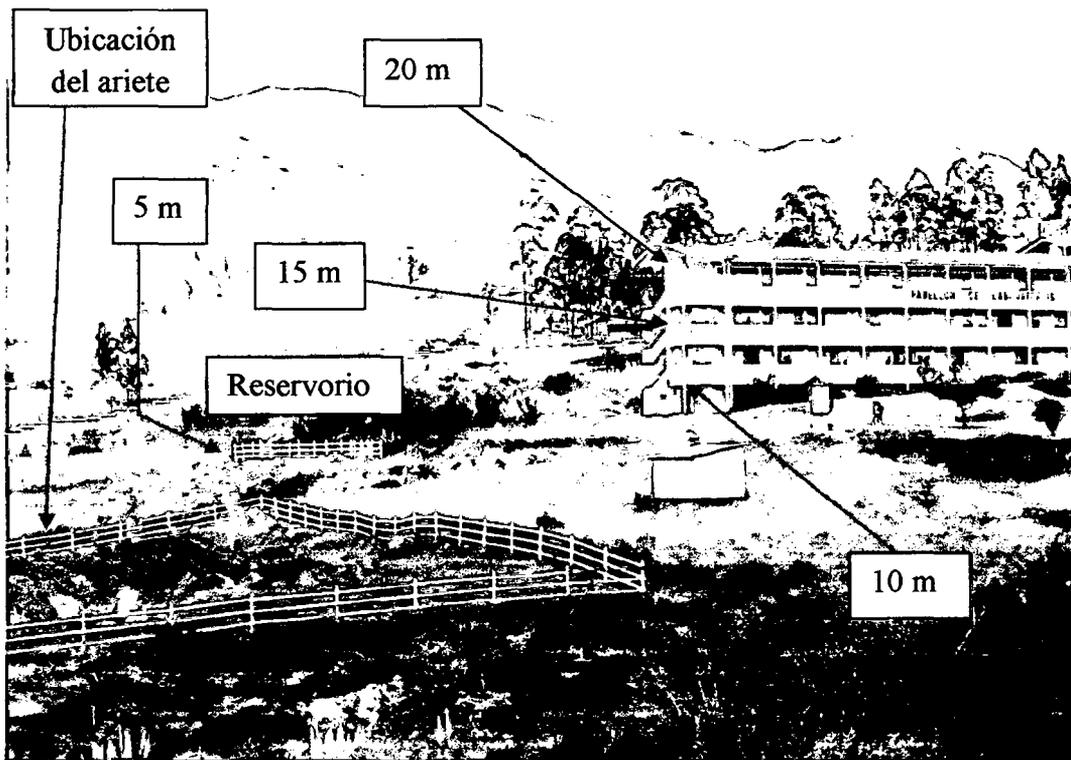
Fotografía 34. Tubo que conduce el caudal desechado para facilitar su medición.



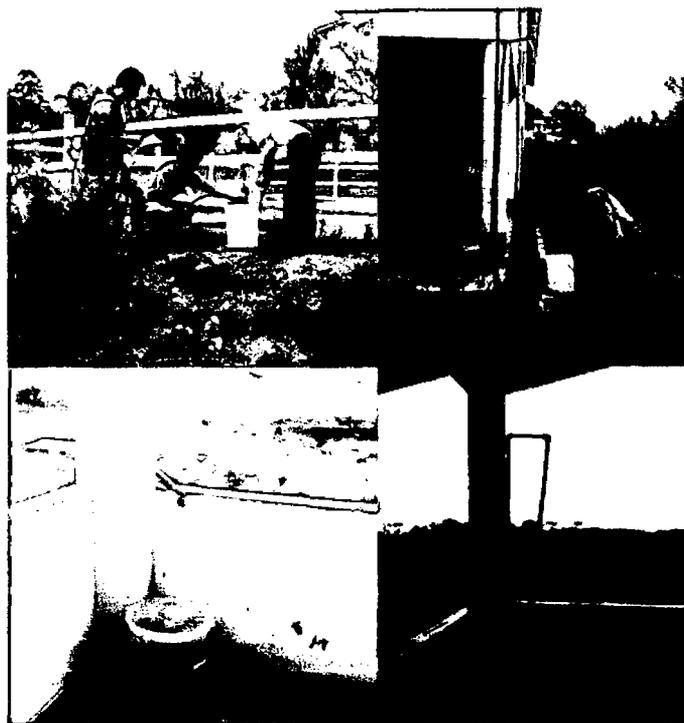
Fotografía 35. Balde de 3,8 L lleno para medición del caudal desechado.



Fotografía 36. Fotocomposición de la trayectoria de conducción del agua bombeada.



Fotografía 37. Área de prueba en la UNTRM.



Fotografía 38. Medición del caudal elevado a 5 m, 10 m, 15 m y 20 m.

Diagramas para bombas de ariete hidráulico

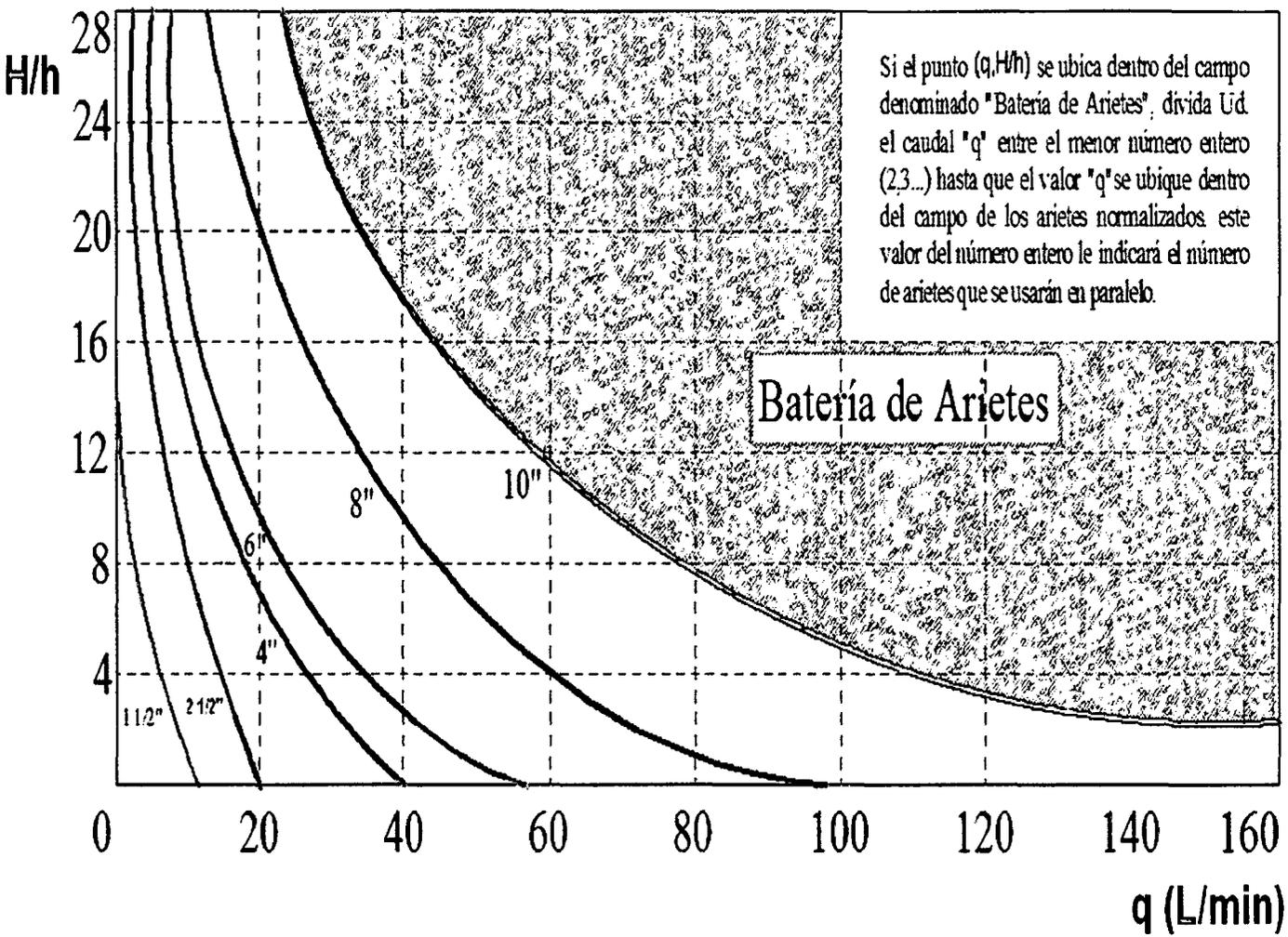


Figura 9. Diagrama para elegir el tamaño de la bomba de ariete hidráulico a utilizar con los valores de q y H/h. Fuente: Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al

Sector Rural de la PUCP.

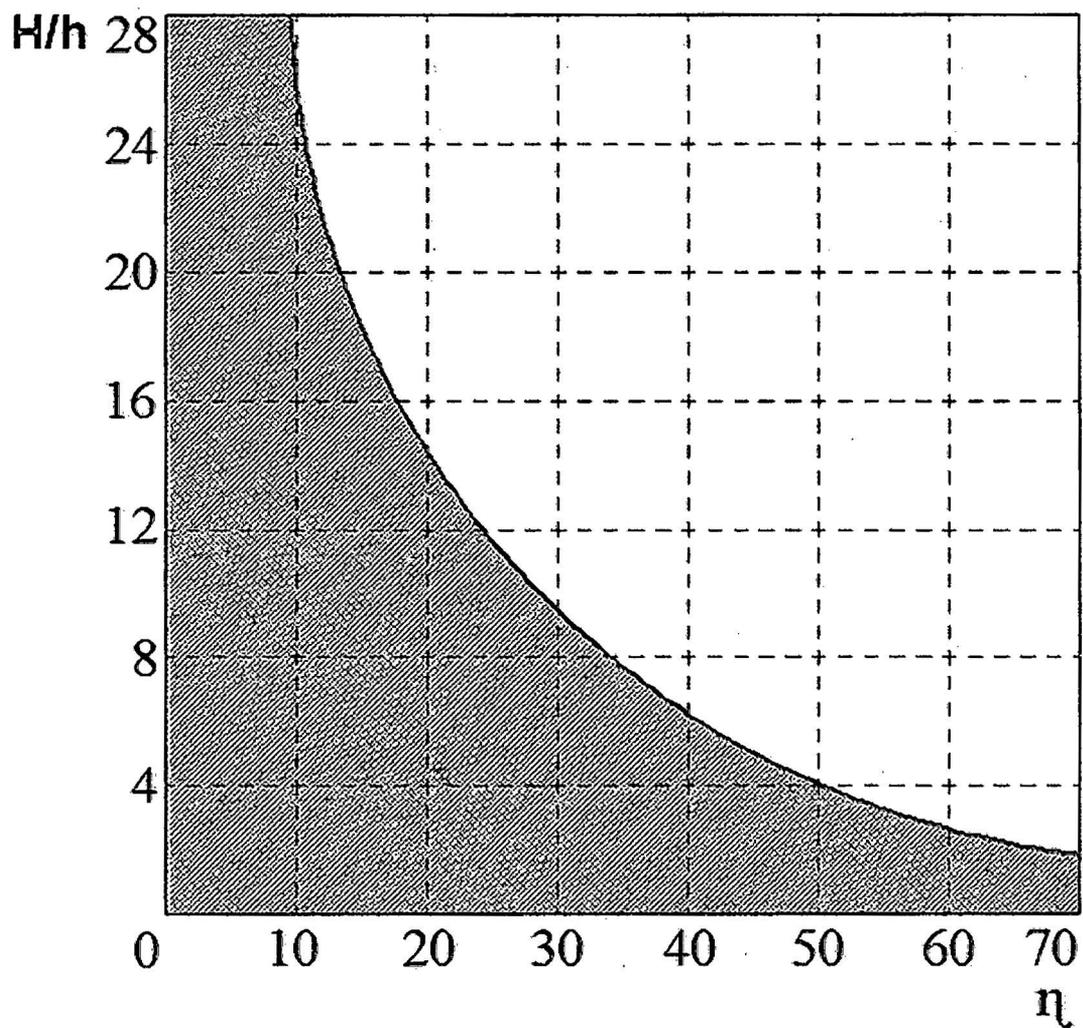


Figura 10. Diagrama para calcular la eficiencia (η) de la bomba de ariete hidráulico con los valores H/h . Fuente: Manual de Bombas de Ariete del Grupo de Apoyo al Sector Rural de la PUCP.

ANEXO 7

Guía de Práctica de Transporte de Fluidos

Determinación de la Eficiencia de una Bomba de Ariete Hidráulico de 2"

I. Objetivos

- 1- Reconocer las partes de una bomba de ariete hidráulico de 2".
- 2- Instalar la bomba de ariete hidráulico de 2" a su alimentación y descarga.
- 3- Medir los caudales elevado y desechado por la bomba de ariete hidráulico de 2" a alturas de 5 m, 10 m, 15 m y 20 m; con una válvula y luego con dos válvulas de impulso sin resorte.
- 4- Medir los caudales elevado y desechado por la bomba de ariete hidráulico de 2" a alturas de 5 m, 10 m, 15 m y 20 m; con una válvula y luego con dos válvulas de impulso con resorte.
- 5- Determinar la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico de 2" para los objetivos 2 y 4.

II. Fundamento teórico

La bomba de golpe de ariete o ariete hidráulico es un motor hidráulico que utiliza la energía de una cantidad de líquido (comúnmente agua) situada a una altura mayor (el desnivel de un río, presa, acequia u otro depósito o caudal), con el objetivo de elevar una porción de esa cantidad de líquido hasta una altura mayor que la inicial, mediante el empleo de un fenómeno físico conocido como golpe de ariete. Este equipo bombea un flujo continuo y funciona ininterrumpidamente sin necesidad de otra fuente de energía. El ariete recibe un gran caudal (Q) con una baja carga (h) y

produce un flujo de mayor presión (H) con un menor caudal (q) (Lorente, 2005; Sarduy, 2008).

El ariete hidráulico multipulsor consiste en la sustitución de la única válvula de impulso de los arietes convencionales por un conjunto adecuado de válvulas para aprovechar mejor los caudales disponibles y aumentar la potencia y los rendimientos. También aporta la ventaja de la reducida necesidad de amortiguación en la magnitud de inyección de agua en la cámara de aire, por lo que puede reducirse su volumen. Por último, aparece la posibilidad de utilizar un solo tubo de impulso con una gran cantidad de unidades multipulsoras, lo que permite aumentar la potencia con unidades livianas (Pérez, 2003; Sarduy, 2008).

Debido a la geografía accidentada de gran parte de la Región Amazonas, tiene lugares muy adecuados para implementar sistemas de uso de energías renovables (solar, eólica, hidráulica y biomasa), las cuales son amigables con el medio ambiente porque no emplean combustibles fósiles de ningún tipo. Este sistema de bombeo de agua se aplicará para el cultivo de pastos y forrajes en laderas, las cuales únicamente se pueden cultivar en épocas de lluvia; además, se podrá emplear para abastecer de agua a un vivero, hato ganadero y vivienda, ubicadas en zonas altas con respecto a una fuente de agua. El ahorro por no usar combustibles fósiles y el insignificante costo de mantenimiento de las bombas de ariete hidráulico, 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.

III. Material y equipos

Se utilizó una bomba de ariete hidráulico de 2", que fue diseñada y ensamblada con accesorios de fierro galvanizado de 2". Cada una de las dos válvulas impulsoras se

fabricó en un torno a partir de tubo de fierro de alta presión de 1,5" de diámetro; el disco de cierre y su eje guía se fabricó de fierro comercial. El tanque de compresión de aire se confeccionó a partir de un tubo de fierro galvanizado de 3" de diámetro por 60 cm de largo. En la base de este tanque se colocó una válvula check.

IV. Procedimiento

El área de prueba se ubicó en el Pabellón de Laboratorios de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), específicamente las escaleras del primer al cuarto piso. La bomba de ariete se ancló en un dado de concreto al pie del reservorio de agua del Sistema Integral de Producción e Investigación Agroecológica (SIPIAG) del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva (INDES-CES). La diferencia de altura entre la tubería que sale del fondo del reservorio hasta donde se ubicó el ariete (dado de concreto) es de 2,5 m. La llave de descarga se abrió completamente para que el agua fluya del reservorio hacia la bomba a través de una tubería PVC de 2" con un ángulo de inclinación de 45°.

La descarga de la bomba de ariete fue de 1" y se empleó tubería de PVC de 1" para conducir el agua hasta las cotas que se establecieron cada cinco metros, en la trayectoria de la ubicación de la bomba de ariete hasta el 4to piso del Pabellón mencionado, hasta donde se alcanzó 20 m de diferencia de altura. El cierre de válvulas produce un golpe fuerte, los cuales se contaron en un tiempo de 1 minuto (cierre/min). El caudal desechado se midió en el canal que conduce el agua desechada por el ariete hacia un desagüe.

Para el funcionamiento del ariete hidráulico, el agua se acelera con su caída a lo largo del tubo de alimentación hasta alcanzar una velocidad suficiente como para que se cierre la válvula A (Figura 1), creando una fuerte presión al detenerse bruscamente el agua. Este golpe de presión abre la válvula B pasando un pequeño chorro de agua al tanque de compresión del aire hasta que se equilibran las presiones. Enseguida, la gravedad abre la válvula A y se cierra la B, repitiéndose de nuevo el ciclo. En cada golpe de ariete el agua pasa al tanque donde se presuriza el aire. Este volumen de aire hace fluir el agua con continuidad por la tubería de elevación. El ritmo suele ser de uno o dos golpes por segundo. El agua desechada al ir cerrándose la válvula regresará a la fuente sin generar desperdicio del preciado líquido.

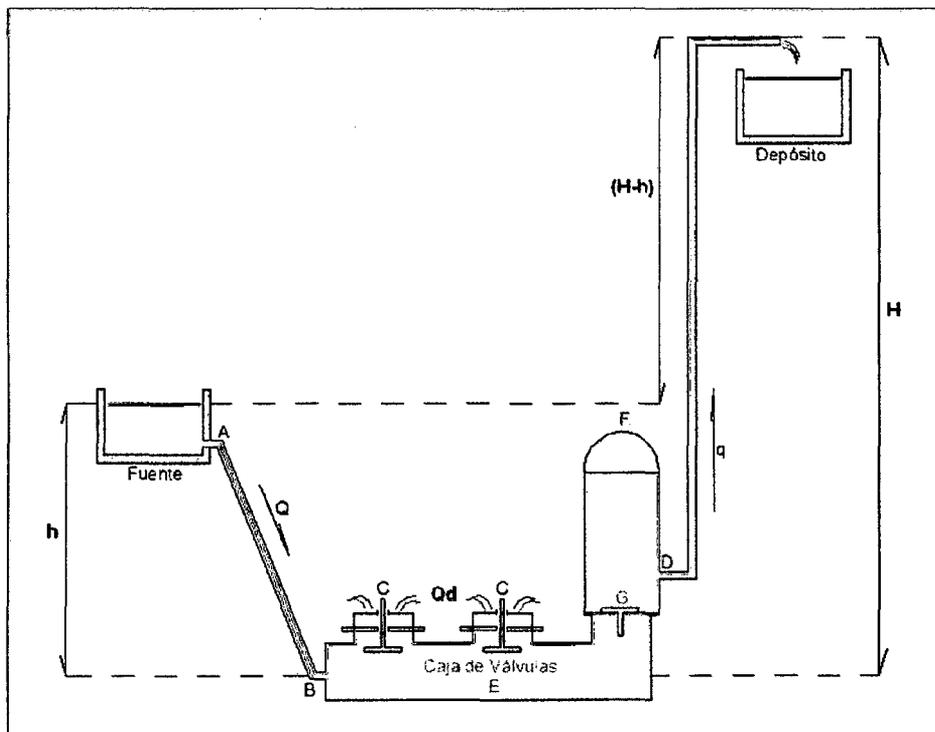


Figura 1. Funcionamiento de una bomba de ariete hidráulico.

V. Resultados

El rendimiento (R) del ariete hidráulico varía en función del cociente H/h. Al aumentar el valor resultante, el rendimiento disminuye; en la Tabla 1 se muestra la variación del rendimiento energético. Como puede deducirse de la Tabla 1, la altura de elevación (H) no debe superar más de 12 veces el desnivel de trabajo.

Tabla 1. Rendimiento energético de un ariete hidráulico en función de H/h.

H/h	2	3	4	6	8	10	12
R	0,85	0,81	0,76	0,67	0,57	0,43	0,23

Fuente: Cavero, 1982.

El caudal elevado teórico (q_t), depende del rendimiento (R), el caudal de alimentación ($Q = q_r + Q_d$), el desnivel de trabajo (h) y la altura de elevación (H); se calculó con la ecuación:

$$q_t = R \cdot Q \cdot h/H.$$

Se registraron los datos experimentales para calcular el caudal real elevado (q_r). El caudal desechado es el caudal de agua que la bomba de ariete no eleva (Q_d). Se empleará para evaluar la eficiencia (η) de la bomba de ariete con la ecuación:

$$\eta = (Q - Q_d)/Q$$

Para determinar el rendimiento de la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas de cierre, primero se hizo trabajar la bomba con una válvula sin resorte y la otra se mantuvo cerrada.

Para determinar el caudal elevado se midió el tiempo en que se llenó un volumen de 10 L en un balde. Para determinar el caudal desechado se midió el tiempo en que se llenó un balde de 3,8 L. Los resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre sin resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre de válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η (%)
5				
10				
15				
20				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre sin resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$) (L/min)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85				
10	4	0,76				
15	6	0,67				
20	8	0,57				

Los datos experimentales de la operación de la bomba con dos válvulas sin resorte, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m. Con dos válvulas de cierre sin resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre de válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η (%)
5				
10				
15				
20				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre sin resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$) (L/min)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85				
10	4	0,76				
15	6	0,67				
20	8	0,57				

Tabla 6. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m. Con una válvula de cierre con resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia η
5				
10				
15				
20				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con una válvula de cierre con resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85				
10	4	0,76				
15	6	0,67				
20	8	0,57				

Tabla 8. Datos experimentales y calculados para el ariete de 2" con $h = 2,5$ m con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Cierre válvulas (cierres/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia: η
5				
10				
15				
20				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por el ariete de 2" con $h = 2,5$ m; con dos válvulas de cierre con resorte. $Q = \dots$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Tabla 1)	Caudal elevado teórico: q_t (L/min)	Caudal elevado real: q_r (L/min)	Diferencia de caudal ($q_r - q_t$)	Incremento de caudal bombeado (%)
5	2	0,85				
10	4	0,76				
15	6	0,67				
20	8	0,57				

Tabla 10. Tiempo de llenado de 1 m³ con el caudal bombeado (q) a diferentes alturas (H).

Altura de elevación H (m)	q _{r1} (L/min)	Tiempo o llenado 01 m ³ (min)	q _{r2} (L/min)	Tiempo llenado 01 m ³ (min)	q _{r3} (L/min)	Tiempo llenado 01 m ³ (min)	q _{r4} (L/min)	Tiempo llenado 01 m ³ (min)
5								
10								
15								
20								

q_{r1}: Caudal real elevado con 01 válvula sin resorte

q_{r2}: Caudal real elevado con 02 válvulas sin resorte

q_{r3}: Caudal real elevado con 01 válvula con resorte

q_{r4}: Caudal real elevado con 02 válvulas con resorte.

VI. Discusión

VII. Conclusiones

VIII. Referencias bibliográficas

- Lorente, Christophe. 2005. Concepción, fabricación e instalación de sistemas de bombeo con el uso de la energía hidráulica. Chile.
- Pérez Hernández, Pedro Luis. 2003. El ariete hidráulico. CITA. Cuba.
- Sarduy Valedón, Lorenzo. 2008. Posibilidades de uso de la energía hidráulica. Tecnología Apropriada, Boletín del Centro Integrado de Tecnologías del Agua, Año 12, No. 1, Nov. 2008. ISSN 959-7102-16-1. Camagüey, Cuba.
- www.ikkaro.com/bomba-ariete-hidraulico

Anexos

(Incluir secuencia fotográfica de la práctica realizada)