

UNIVERSIDAD NACIONAL

TORIBIO RODRIGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL

**INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO ABASTECIDO
CON BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO DE DOBLE VÁLVULA PARA UNA
PARCELA DE CAFÉ, PROVINCIA DE RODRÍGUEZ DE MENDOZA,
REGIÓN AMAZONAS, 2010**

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

AUTORES:

Br. EBER GUEVARA TAFUR

Br. ALEXANDER MELÉNDEZ PANTOJA

ASESOR:

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

CHACHAPOYAS, 2011

DEDICATORIA

A mi familia quienes permanentemente me apoyaron, contribuyendo incondicionalmente a lograr las metas y objetivos propuestos para lograr el bien común.

ALEXANDER.

A Dios que me diste la oportunidad de vivir y por regalarme una familia maravillosa.

Con mucho cariño a mis padres que me dieron la vida y están conmigo en todo momento. Por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, por su lucha incondicional a pesar de los momentos difíciles.

EBER

AGRADECIMIENTO

A Dios Todopoderoso por habernos dado la existencia y por permitirnos culminar nuestra carrera profesional.

A los docentes que intervinieron en la formación de nuestras mentes y espíritu.

A todas las personas que hicieron posible la realización del presente trabajo de investigación.

Al:

Dr. Miguel a. Barrena Gurbillón.

Asesor del presente trabajo

A nuestras Madres:

Elsa Mavila Tafur López e

Iris Isabel Pantoja Miza.

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Ph.D,Dr.Hab. VICENTE MARINO CASTAÑEDA CHÁVEZ

RECTOR

MsC. ROBERTO JOSÉ NERVI CHACÓN

VICERRECTOR ACADÉMICO (e)

MsC. ZOILA ROSA GUEVARA MUÑOZ

VICERRECTORA ADMINISTRATIVA (e)

Ing. WILSON CASTRO SILUPÚ

DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGRARIAS (e)

VISTO BUENO DEL ASESOR DE TESIS

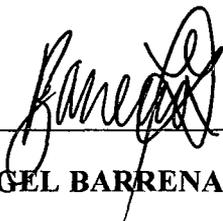
El Docente de la UNTRM-A que suscribe, hace constar que ha asesorado la realización de la tesis titulada **“INSTALACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO TECNIFICADO ABASTECIDO CON BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO DE DOBLE VÁLVULA PARA UNA PARCELA DE CAFÉ, PROVINCIA DE RODRÍGUEZ DE MENDOZA, REGIÓN AMAZONAS, 2011”** de los Tesistas egresados de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNTRM-A:

- Br. EBER GUEVARA TAFUR.

- Br. ALEXANDER MELENDEZ PANTOJA.

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 09 de diciembre de 2011.



Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

Profesor Principal de UNTRM-Amazonas

JURADO EVALUADOR



Ing. MEREGILDO SILVA RAMIREZ

Presidente



MsC. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES

Secretario



MsC. ELENA VICTORIA TORRES MAMANI

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	xi
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS	xii
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Bomba de ariete hidráulico	7
1.2. El golpe de ariete	8
1.2.1. Descripción del golpe de ariete en abastecimientos por gravedad	9
1.2.2. Bomba de ariete multipulsor	10
1.3. Selección del sitio de ubicación de la bomba de ariete hidráulico	12
1.4. Caudal bombeado	13
II. MATERIAL Y MÉTODOS	14
2.1. Instalación del sistema de bombeo mediante uso de bomba de ariete hidráulico	14
2.1.1. Embalse de captación	14
2.1.2. Tanque de alimentación	15

2.1.3. Tubería de alimentación a la bomba de ariete hidráulico	16
2.1.4. Bomba de ariete hidráulico	17
2.1.5. Medida de presión en el sistema	18
2.1.6. Tubería de conducción del agua bombeada	19
2.1.7. Tanque de almacenamiento del agua bombeada	19
2.2. Principio de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	20
2.3. Evaluación de la bomba de ariete hidráulico de doble válvula de cierre	23
2.3.1. Altura de elevación (H)	24
2.3.2. La altura de alimentación (h)	24
2.3.3. Caudal elevado teórico (Qt)	25
2.3.4. Caudal de alimentación (Qa)	26
2.3.5. Caudal desechado (Qd)	26
2.3.6. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico (η)	26
2.3.7. Frecuencia de cierre de las válvulas de impulso	26
III. RESULTADOS	27
3.1. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico	27
3.2. Presión del sistema de bombeo con bomba de ariete hidráulico	33
3.3. Análisis de regresión curvilínea mediante uso del SPSS (Caudal elevado vs Altura)	36
3.3.1. Análisis de regresión curvilínea, (Caudal elevado vs Altura) para la bomba de ariete sin resortes	36
3.3.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS para la bomba de ariete con resortes (Caudal elevado vs Altura)	38
3.4. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico	40
3.4.1. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura) para la bomba de ariete sin resortes	43
3.4.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura) para la bomba de ariete con resortes	46
3.5. Mantenimiento de la bomba de ariete hidráulico	50

IV. DISCUSIÓN	51
V. CONCLUSIONES	58
VI. RECOMENDACIONES	59
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
ANEXO 1: Planos de la bomba de ariete hidráulico Prototipo INDES 111	63
ANEXO 2: Secuencia fotográfica del ensamble de la bomba de ariete hidráulico Prototipo INDES 111	71
ANEXO 3: Secuencia fotográfica del sistema de bombeo instalado	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Disponibilidad y uso del agua a nivel nacional en millones de m ³	3
Tabla 2. Altura de bombeo de agua en función a la altura de alimentación del ariete	25
Tabla 3. Datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete sin resorte en sus válvulas.	28
Tabla 4. Datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete con resorte en sus válvulas.	29
Tabla 5. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m; con dos válvulas de cierre sin resortes.	29
Tabla 6. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m; con dos válvulas de cierre con resortes.	31
Tabla 7. Datos de presión del sistema de bombeo en función de la altura de descarga de la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m; con dos válvulas de cierre sin resortes.	34
Tabla 8. Datos de presión del sistema de bombeo en función de la altura de descarga de la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m; con dos válvulas de cierre con resortes.	35
Tabla 9. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura)	36
Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).	36
Tabla 11. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura)	37
Tabla 12. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura)	38
Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).	39
Tabla 14. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura)	39
Tabla 15. Eficiencia de la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m con dos válvulas de cierre sin resortes.	41

Tabla 16. Eficiencia de la bomba de ariete de 2" con $h = 3,2$ m con dos válvulas de cierre con resortes.	42
Tabla 17. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura)	44
Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).	44
Tabla 19. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura)	44
Tabla 20. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura)	46
Tabla 21. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).	46
Tabla 22. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura)	47
Tabla 23. Tiempo de llenado de 1 m^3 y del reservorio de 5 m^3 con el caudal bombeado (Q_r), a diferentes alturas (H), bomba sin resortes.	49
Tabla 24. Tiempo de llenado de 1 m^3 y del reservorio de 5 m^3 con el caudal bombeado (Q_r), a diferentes alturas (H), bomba con resortes.	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de instalación del sistema de bombeo	20
Figura 2. Primera etapa del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	21
Figura 3. Segunda etapa de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	22
Figura 4. Tercera etapa de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico	23
Figura 5. Rendimiento energético de una bomba de ariete hidráulico en función de H/h. Fuente: Izquierdo y Velásquez, 1992.	24
Figura 6. Caudal elevado teórico y caudal elevado real por la bomba de ariete sin resortes en sus válvulas.	30
Figura 7. Caudal elevado teórico y caudal elevado real de la bomba de ariete con resortes en sus válvulas.	32
Figura 8. Caudal real bombeado con y sin el uso de resortes en las válvulas de la bomba de ariete.	33
Figura 9. Presión de operación en función a la altura de descarga, con la bomba de ariete con y sin resortes en sus válvulas.	35
Figura 10. 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 sin resorte (Prototipo INDES 111).	38
Figura 11. 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).	40
Figura 12. Tendencia de la eficiencia de la bomba de ariete en función a la altura de descarga, con resortes y sin ellos en sus válvulas.	43
Figura 13. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 111).	45
Figura 14. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).	48

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Embalse de captación de la fuente de agua	15
Fotografía 2. Tanque de alimentación de la bomba de ariete	16
Fotografía 3. Tubería de alimentación del tanque a la bomba de ariete	17
Fotografía 4. Bomba de ariete hidráulico de doble válvula	18
Fotografía 5. Sistema de medición de presión instalado en la tubería de descarga del agua bombeada	19
Fotografía 6. Válvula de cierre desmontada	72
Fotografía 7. Válvula de cierre con resorte	72
Fotografía 8. Cuerpo de la bomba de ariete	72
Fotografía 9. Válvulas instaladas	72
Fotografía 10. Tanque de compresión de aire y tubo de descarga de 1"	73
Fotografía 11. Empaquetadura de jebe y lona de la válvula de descarga (check) con contrapeso empernado	73
Fotografía 12. Forma en la que abre la Válvula de descarga	73
Fotografía 13. Bomba de ariete ensamblada	73
Fotografía 14. Medición del caudal proporcionado por el embalse	75
Fotografía 15. Medición del caudal proporcionado por el tanque de alimentación	75
Fotografía 16. Bomba de ariete funcionando	76
Fotografía 17. Medición de caudal bombeado	76
Fotografía 18. Mapa distrital San Nicolás, Provincia Rodríguez de Mendoza	77
Fotografía 19. Parcelas de café	78
Fotografía 20. Punto de ubicación de la bomba de ariete instalado	79
Fotografía 21. Punto de ubicación de la bomba de ariete instalado	80

RESUMEN

El abastecimiento de agua, mediante el uso de la bomba de ariete hidráulico (BAH), es una opción para incrementar la productividad de los cultivos de agricultores de escasos recursos económicos. La BAH es aprovechada la energía de un pequeño salto de agua para elevar parte de su caudal a una altura superior, sin requerir el uso de combustibles fósiles o electricidad. La Provincia de Rodríguez de Mendoza, presenta gran potencial agrícola basado principalmente en el cultivo de café en zonas secas y de ladera, aunque con presencia de fuentes de agua las cuales no se aprovechan debido al costo que implica la instalación de un sistema de bombeo convencional. En la presente investigación, se instaló una bomba de ariete de doble válvula para abastecer con agua a una parcela de café en el lugar denominado Shipara, distrito San Nicolás, evaluando su comportamiento de bombeo con y sin el uso de resortes en sus válvulas de cierre. El resultado de la operación sin el uso de resortes en sus válvulas, mostró que a una elevación de 10 m, el caudal bombeado fue de 23,46 L/min con 39 cierres de válvulas/minuto, con una eficiencia de 43,02% y 20 psi de presión; a los 40 m de elevación, el caudal bombeado fue 3,64 L/min con 49 cierres de válvulas/minuto ; una eficiencia de 6,68% y 37,5 psi de presión; llenará el reservorio de 5m³ en un tiempo estimado de 22.89 horas. Realizada la operación bajo las mismas condiciones y haciendo uso de resortes en sus válvulas, a una de elevación de 10 m el caudal bombeado fue de 25,19 L/min con 36 cierres/minuto, una eficiencia de 41,72% y 20 psi de presión; a una elevación de 40 m el caudal bombeado fue 3,90 L/min y 37 cierres de válvula/ por minuto con una eficiencia de 6,46%, registrando 42,5 psi de presión, lográndose llenar el reservorio de 5m³ en 21.37 horas. El tratamiento de los resultados experimentales con el SPSS permitió determinar que el caudal elevado con respecto a la altura de descarga se modela con una ecuación cúbica, similar tendencia presentó la eficiencia con respecto a la altura de descarga.

Palabras claves: bomba multipulsora, eficiencia.

ABSTRACT

The water supply through the use of hydraulic ram pump (HRP) is an option to increase the productivity of crops for low-income farmers. The (HRP) uses the energy of a small waterfall to raise part of its flow to a higher level, without requiring the use of fossil fuels or electricity. The Province of Rodriguez de Mendoza has a great agricultural potential based mainly on coffee growing in dry areas and slope, although the presence of water sources which are not used because of the cost that involves installing a conventional pumping system. In this research, we installed a double valve ram pump to supply with water to a coffee parcel in a location called Shipara that belongs to San Nicolas district, in order to evaluate the pumping behavior with and without using springs in its valves. The result of the operation without the use of springs in the valves showed that at 10 m elevation from the ground, the flow rate was 23.46 L / min with 39 valve seals / min, with an efficiency of 43.02% and 20 psi of pressure, at 40 m elevation, the flow rate was 3.64 L / min with 49 valve seals / min. An efficiency of 6.68% and 37.5 psi of pressure would fill the 5m³ reservoir, at an estimated time of 22.89 hours. Performing the operation under the same conditions and using their valves springs, at 10 m elevation the flow rate was 25.19 L / min in 36 valve seals / min, registering an efficiency of 41.72% and 20 psi pressure, at 40m elevation the flow rate was 3.90 L / min and 37 valve seals / minute with an efficiency of 6.46%, registering 42.5 psi of pressure, would fill the 5m³ reservoir at 21.37 hours. The processing of experimental results with SPSS allowed determining the flow rate high respect to the discharge height is modeled with cubic equation, the ram pump efficiency presented similar trend over the discharge height.

Key words: multipulse pump, efficiency

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso sumamente escaso y dicha escasez se acentúa con el pasar de los años debido al crecimiento de la demanda ya sea por el incremento de la población, requerimientos de mayor producción de alimentos y servicios por un lado, y por otro, debido a la alteración del ciclo hidrológico (Lazo, 2006).

Estudios recientes confirman que en los próximos 20 años, el mundo enfrentará un estrés hídrico severo, donde las 2/3 partes de la población mundial tendrán serios problemas en cuanto al abastecimiento de dicho recurso. En este contexto la preocupación de los expertos en la materia, debe estar centrada en la búsqueda de la estrategia más acertada para enfrentar con éxito, los retos de esta nueva coyuntura (Lazo, 2006).

Uno de los grandes desafíos que enfrenta el Perú en el siglo XXI es lograr el progreso económico, reducir la pobreza y mejorar las condiciones de vida de la población rural. Para ello es indispensable elevar la rentabilidad y competitividad de la actividad agropecuaria. Con este propósito, entre otras acciones, el Perú ha desarrollado en los últimos 30 años importantes proyectos hidráulicos de múltiple propósito, especialmente en la costa, orientados al mejoramiento del riego y la ampliación de la frontera agrícola. Estas acciones no siempre han tenido el respaldo de políticas y estrategias integrales y coherentes, dirigidas a reforzar la institucionalidad y construir un adecuado marco normativo del recurso agua, tampoco han sido respaldadas por adecuadas políticas agrarias, tanto en su diseño como en su implementación. Por ello, subsisten problemas relacionados con: la tecnificación del riego, la formalización de

los derechos de agua, el desarrollo integral de la infraestructura de riego, la investigación y la capacitación de los usuarios, así como la mejora del financiamiento de la gestión y la preservación de la biodiversidad de los ecosistemas naturales, entre otros (Comisión Técnica Multisectorial del Perú, 2003).

El desarrollo de la agricultura en el Perú tiene una evidente correlación con los avances en el manejo del agua para riego. Los antiguos peruanos encararon seriamente el “problema del agua de riego” y esto, muy probablemente, dio inicio a importantes cambios en la agricultura y la sociedad, algunos de los cuales aún hoy tienen vigencia ya que una parte de la infraestructura de riego existente tiene antecedentes prehispánicos (Zegarra, 1998).

Los peruanos contemporáneos parecemos menos serios en cuanto al manejo adecuado del recurso hídrico. Sólo cabe recordar que en la última década, luego de discutir más de una decena de proyectos de nueva legislación de aguas, aún seguimos operando sin reglas de juego claras en un contexto de enormes ineficiencias en gestión y en la distribución del recurso (Zegarra, 1998).

La información estadística sobre el recurso agua en el Perú no es escasa, aunque actualmente no se encuentra actualizada (Zegarra, 1998). La mayor parte de los estudios al respecto han estado a cargo del Estado, especialmente en la década de los 1970s y 1980s.

El Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA) ha sistematizado la información disponible en una sola base de datos, la que ofrece información agregada sobre la oferta hídrica en el país. En términos de los caudales de los ríos,

la información se basa en las mediciones del SENAMHI en sus 139 estaciones hidrológicas a nivel nacional. Esta información es complementada con datos de la Dirección de Aguas del INRENA (Ministerio de Agricultura) para algunos ríos específicos. También existe información sobre la situación de los glaciares y las aguas subterráneas, en ambos casos sólo de la década de los 1980s.

El Perú cuenta con tres vertientes de agua superficial: Atlántico, Pacífico y Titicaca. La situación por vertiente de la disponibilidad y uso de agua superficial en el país se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Disponibilidad y uso del agua a nivel nacional en millones de m³.

Disponibilidad y Uso del Agua a Nivel Nacional							
Vertiente	Escurredo	Aprovechable		Usado		Agrícola	
Pacífico	34 624	20 951	60,50 %	12 954	62 %	11 988	93 %
Atlántico	1 998 751	29 514	1,50 %	2 245	8 %	1 996	89 %
Titicaca	10 171	701	6,90 %	93	13 %	71	76 %
Total	243 546	51 166	2,50 %	15 292	30 %	14 055	92 %

Fuente: Carrasco y otros, 1993.

La Tabla 1 refleja también la tremenda importancia del uso agropecuario del agua, con un 92% del uso total, es decir, sólo un 8% es usado por el consumo humano y no humano y por otras actividades económicas como la minería e industria.

Tras la realización del III Censo Agropecuario de 1994, el Perú actualizó sus cifras sobre superficie aprovechada bajo sistemas de riego a nivel nacional, llegando a un total estimado de casi 1,8 millones de hectáreas, muy por encima de Chile y Colombia. Cabe señalar que los datos censales se basan en las declaraciones de los propios agricultores respecto a la naturaleza del uso de sus tierras, por lo cual los datos presentados deben ser cruzados con otras fuentes. Sin embargo, también es probable que las cifras tradicionales sobre superficie bajo riego en la sierra hayan sido subestimadas en anteriores mediciones.

En muchas zonas geográficas del mundo, la disponibilidad de agua para riego ha sido históricamente escasa o está disminuyendo rápidamente. La reducción de este recurso ha generado diversos tipos y técnicas de riego para que se aproveche de una mayor y mejor manera, ya que es un factor importante en la producción agrícola (Castro, 2004).

El riego agrícola se define como: “La técnica de producción cuyo objetivo es la aplicación oportuna y uniforme de agua al suelo, para reponer en este, el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos” (Castro, 2004).

El riego, desde el punto de vista operacional, se le define como la reposición del agua al suelo para satisfacer el ritmo de consumo de las plantas. Esta reposición debe llevarse a cabo cuando el potencial del agua del suelo es todavía lo suficientemente alto para asegurar su flujo normal hacia las raíces de la planta. El normal suministro del agua, permite un funcionamiento fisiológico de la planta en concordancia al poder evaporante de la atmósfera de tal forma que, su producción no se vea afectada negativamente (Lazo, 2006).

En la Región Amazonas la implementación de sistemas de riego aún no es aplicada para el beneficio de pequeños productores salvo algunos casos como el de la provincia de Chachapoyas, en el distrito de Magdalena donde se está ejecutando un proyecto del Ministerio de Agricultura para irrigar 400 hectáreas, de las cuales se destinarán 6 hectáreas para riego por goteo para frutales y 394 hectáreas restantes para riego por aspersión y por gravedad (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

También en la provincia de Chachapoyas, en los distritos de Soloco y Cheto se está proyectando sistemas de riego para unas 340 hectáreas, aproximadamente, de pastos; también está en proyección la instalación de sistemas de riego en el distrito de Molinopampa para 20 hectáreas aproximadamente (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

En la provincia de Luya también se tiene el canal abierto Jucusbamba con un caudal aproximado de 500 L/s para poder abastecer a 1000 hectáreas pero su uso aun no está haciéndose efectivo, solo se riegan algunos terrenos con cultivos como papa y maíz (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

En la provincia de Bongará aún no existe intervención por parte del Ministerio de Agricultura. Las provincias de Bagua y Condorcanqui realizan riegos por inundación para sus cultivos de arroz pero lo realizan productores privados (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

En la provincia de Rodríguez de Mendoza existió intervención por parte de PRONAMACHS en el período 2000-2005 con sistemas de abastecimiento de agua

para uso múltiple (SAAUM) que se instaló para aproximadamente 4 ha destinadas al cultivo de piña (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

Según la Dirección Regional Agraria Amazonas existen en la parte sur de la Región aproximadamente 1000 hectáreas que utilizan sistemas de riego. También existen algunas experiencias privadas en cuanto a sistemas de riego como es el caso del Fundo Casa Blanca en la provincia de Luya que utiliza sistema de riego por goteo para sus frutales (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

En el distrito de Chachapoyas también existe el Fundo Achamaqui donde se tiene un sistema de riego por goteo para cultivos de chirimoya. En este mismo distrito, se está aplicando riego abastecido con una bomba de ariete en el fundo Vitaliano para regar cultivos de alfalfa (Dirección Regional Agraria Amazonas, 2010).

El sistema utilizado para realizar el abastecimiento de agua, propósito del presente estudio, será mediante la instalación de una bomba de ariete hidráulico de doble válvula, que utiliza la energía del golpe de ariete en un fluido (modificación de la presión en un conducto debido a la variación del estado dinámico del líquido) para elevar una parte de dicho fluido a un nivel superior. No necesita de otro tipo de energía exterior, se caracteriza por su sencillez que lo hace adecuado para lugares remotos o donde no hay un acceso a las nuevas tecnologías para producir energía eléctrica, o motores de otro tipo.

En la presente investigación se tuvo como objetivos los siguientes:

- Instalación de un sistema de riego tecnificado abastecido con bomba de ariete hidráulico de doble válvula para una parcela de café, en la provincia de

Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas.

- Construir una bomba de ariete de doble válvula (multipulsor) de 2”.
- Bombear agua, empleando energía renovable, hasta una altura de 40 m para emplearla en un sistema de riego tecnificado.
- Evaluar el comportamiento de las variables que intervienen en funcionamiento del equipo de bombeo.

1.1. Bomba de ariete hidráulico

La bomba de ariete hidráulico es un aparato que aprovecha la energía proveniente de un pequeño salto de agua para elevar parte de su caudal a una altura superior. Se difundió de una forma amplia y eficaz alrededor del mundo, y a su vez; se caracterizó por su aplicación en las fuentes de construcciones grandes como el Taj Mahal en la India o en el Ameer de Afganistán. Con el desarrollo posterior de inventos exitosos como la bomba centrífuga provocaron que la bomba de ariete cayera en desuso (Cavero La Rosa, 1982).

La invención de este aparato puede atribuirse a John Whitehurst del condado inglés de Cheshire que en el año de 1772, creó lo que él mismo denominaría como “máquina de pulsación”; sin embargo, no se conocen detalles sobre su invento. La primera bomba de ariete de la que se tiene conocimiento, y que es a su vez muy similar a la que se conoce actualmente; fue inventada en 1796 por el francés Joseph Michel Montgolfier quien la instaló en su fábrica de papel. En el transcurso del siglo XIX, la bomba de ariete tuvo mucha popularidad hasta que los motores baratos y la electricidad llegaron, este

invento cayó en desuso en países ricos; sin embargo, continúa utilizándose en los países más pobres, donde no existe el contacto con las nuevas tecnologías de electricidad (Montesinos y Gallardo, 2004).

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 (Sarduy, 2008).

1.2. El golpe de ariete

La física reconoce el fenómeno denominado golpe de ariete o choque hidráulico, que ocurre cuando varía bruscamente la presión de un fluido dentro de una tubería, motivado por el cierre o abertura de una llave, grifo o válvula; también puede producirse por la puesta en marcha o detención de un motor o bomba hidráulica. Durante la fluctuación brusca de la presión el líquido fluye a lo largo de la tubería a una velocidad definida como de propagación de la onda de choque.

El cambio de presión provoca deformaciones elásticas en el líquido y en las paredes de la tubería. Este fenómeno se considera indeseable porque causa frecuentes roturas en las redes hidráulicas de las ciudades y en las instalaciones domiciliarias, y también es causante de los sonidos característicos que escuchamos en las tuberías cuando abrimos un grifo bruscamente en nuestras casas. Por tal razón, con frecuencia se diseñan válvulas de efecto retardado o se instalan dispositivos de seguridad.

El científico ruso Zhukovski (1847-1921) estudió este fenómeno por primera vez en su obra “Sobre el choque hidráulico”, como parte de sus indagaciones hidroaeromecánicas, que constituyeron la base teórica para la ulterior comprensión del funcionamiento de la bomba de golpe de ariete o ariete hidráulico, lo que demuestra que los fenómenos físicos (y los naturales en general) no deben asumirse como negativos o positivos, sino como leyes que debemos incorporar a nuestro arsenal cognitivo hacia una armónica actuación del hombre en la naturaleza y hacia la plenitud creadora del ser humano.

El fenómeno del golpe de ariete, también denominado transitorio, consiste en la alternancia de depresiones y sobrepresiones debido al movimiento oscilatorio del agua en el interior de la tubería, es decir, básicamente es una variación de presión, y se puede producir tanto en impulsiones como en abastecimientos por gravedad (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real,[s.f]).

1.2.1. Descripción del golpe de ariete en abastecimientos por gravedad

Si el agua se mueve por una tubería con una velocidad determinada y mediante una válvula se le corta el paso totalmente, el agua más próxima a la válvula se detendrá bruscamente y será empujada por la que viene detrás. Como el agua es ligeramente compresible, empezará a comprimirse en las proximidades de la válvula, y el resto del líquido comprimirá al que le precede hasta que se anule su velocidad. Esta compresión se va trasladando hacia el origen conforme el agua va

comprimiendo al límite la que le precede, de manera que al cabo de un cierto tiempo toda el agua de la tubería está en estas condiciones, concluyendo la primera etapa del golpe de ariete.

En definitiva, se forma una onda de máxima compresión que se inicia en las proximidades de la válvula y se traslada al origen. La energía cinética que lleva el agua se transforma en energía de compresión.

Cuando el agua se detiene, ha agotado su energía cinética y se inicia la descompresión en el origen de la conducción trasladándose hacia la válvula, y por la ley pendular esta descompresión no se detiene en el valor de equilibrio, sino que lo sobrepasa para repetir el ciclo. Esta descompresión supone una depresión, que retrocede hasta la válvula para volver a transformarse en compresión, repitiendo el ciclo y originando en el conducto unas variaciones ondulatorias de presión que constituyen el golpe de ariete. En definitiva, se producen transformaciones sucesivas de energía cinética en energía de compresión y viceversa, comportándose el agua como un resorte.

1.2.2. Bomba de ariete multipulsor

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 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 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 (Pérez, 2003).

1.3. Selección del sitio de ubicación de la bomba de ariete hidráulico

El sitio para la instalación de las bombas de ariete hidráulico debe cumplir con las siguientes características (Aguilar, 2008):

- a) La fuente de captación de agua debe poseer un caudal mínimo de tres litros por minuto, ya que no existen bombas de ariete que puedan trabajar con un caudal menor al señalado.
- b) El terreno debe poseer ventajas topográficas para la construcción de un embalse de captación del agua, para conectar a este embalse la tubería de alimentación de la bomba de ariete.
- c) La mínima altura de caída desde el embalse hasta el sitio donde se instale la bomba de ariete hidráulico debe ser 0,5 m, ya que alturas menores a ésta impiden su funcionamiento.
- d) Es recomendable que el largo de la tubería de alimentación del ariete, sea mayor a cuatro veces la altura de caída (h). Debe haber un ángulo entre el suelo horizontal y esta tubería en el punto de conexión al ariete, menor a 45°.
- e) El terreno debe permitir la construcción de un dado de concreto para anclaje de la bomba de ariete, protegido de la acción erosiva del caudal de la fuente de agua.
- f) Debe ser posible la conexión de la tubería de alimentación de manera que quede perfectamente rectilínea y rígida desde la bomba de ariete hasta el embalse. Junto al dado de concreto se debe hacer un canal que conduzca el caudal desechado por el cierre de la válvula de impulso, hacia el curso

descendente de la fuente de agua; de manera que el agua no bombeada retorne a la fuente y siga su curso.

1.4. Caudal bombeado

El caudal bombeado depende del caudal y carga disponibles a la entrada del ariete. La entrada del ariete es la que determina cual es la condición de la energía viva en la tubería de entrada, es decir la cantidad de energía cinética que va a poder transformar en energía potencial mediante el cierre brusco y apertura de unas válvulas que producirán el golpe de ariete, la repetición de este fenómeno genera un incremento en la carga y permite al ariete llevar el agua a otro punto de cota superior. Para obtener una mayor energía, se debe aumentar la masa de agua en la tubería y para esto el ariete se debe ubicar lo más abajo posible de la toma; el agua no bombeada y que derrama la bomba al producir el golpe de ariete se conduce por un canal sencillo para retornarla al cauce de la fuente.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Instalación del sistema de bombeo mediante uso de bomba de ariete hidráulico

Para la instalación del sistema de bombeo de agua con la bomba de ariete hidráulico de doble válvula (multipulsor) se tuvo en cuenta las especificaciones señaladas en la sección 1.3 del presente trabajo de investigación. La instalación se realizó en el lugar denominado Shipara, entre las coordenadas UTM 9283740 y 18M 193361, distrito de San Nicolás, provincia de Rodríguez de Mendoza, Región Amazonas; cuyos componentes se describen a continuación.

2.1.1. Embalse de captación

En la quebrada Shipara, del sector Shipara, cuyo caudal de agua permanece constante durante todo el año (manantial), ayudados de la topografía, se ubicó un punto estratégico con fines de poder embalsar dicho caudal, para conducir el agua hasta el cilindro metálico de 200 L, y de este último a la bomba de ariete de manera eficiente. Para el embalse, se optó por utilizar material de la zona tales como cascajos, tierra, etc, contenidos en sacos de polietileno y revestidos con arcilla en el que se fijó un tubo de PVC de 4" de diámetro x 14 m de largo, la boca de entrada del tubo cubierta con una malla se sumergió en el agua para evitar el pase de materias extrañas.



Fotografía 1. Embalse de captación de la fuente de agua.

2.1.2. Tanque de alimentación

Se empleó un cilindro de fierro de 200 litros, ubicado a 14 m de distancia y a un desnivel de 1,7 m, con respecto al embalse. A la altura de la base de este cilindro se fijó, mediante el uso de cuatro pernos y empaquetadura de caucho para evitar fugas y pérdida de presión, un acople con tubería de fierro galvanizado de 2", a 40 cm de dicho acople se ubicó una válvula de paso de PVC del mismo diámetro para cerrar el paso del agua en caso de mantenimiento de la bomba de ariete hidráulico.



Fotografía 2. Tanque de alimentación de la bomba de ariete.

2.1.3. Tubería de alimentación a la bomba de ariete hidráulico

Se acopló a la válvula de salida del tanque de alimentación y estuvo constituida por tubos de PVC pesado de 2" para agua, unidos con adhesivo especial para material de PVC. Se ancló en toda su longitud con ayuda de caballetes de madera y travesaños, fijados firmemente evitando en gran medida las vibraciones como producto del golpe de ariete.

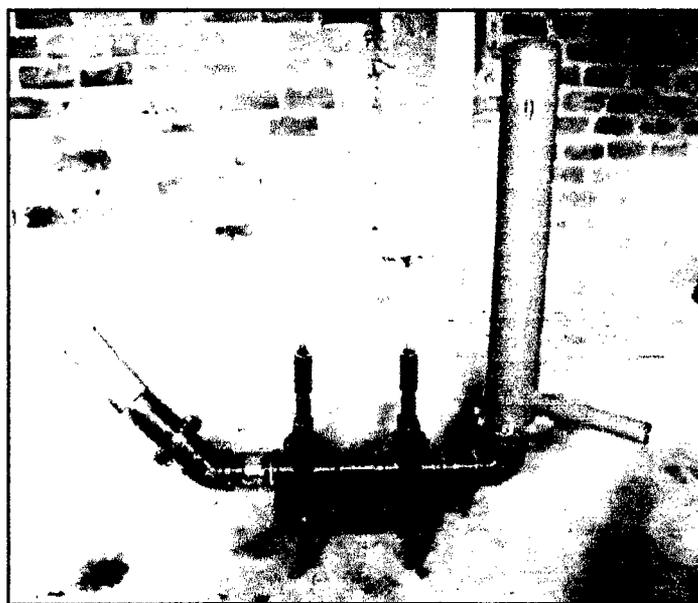


Fotografía 3. Tubería de alimentación del tanque a la bomba de ariete.

2.1.4. Bomba de ariete hidráulico

Se ha empleado los planos del prototipo INDES 111 de bomba de ariete hidráulico de dos válvulas de cierre (Anexo 1). Su ensamble se realizó en un taller de torno metálico haciendo uso de accesorios de tubería de fierro galvanizado de 2", ambas válvulas de cierre o impulso que abren hacia abajo, se forjaron en torno a partir de tubo de fierro de alta presión. La bomba tiene una descarga de 1", una cámara para compresión de aire de 10 L, en cuya base se encuentra una válvula check que abre hacia arriba, hecha de empaquetadura de jebe y lona con un disco de fierro de 2" de diámetro, sujetado con un perno central en su parte superior para ayudarlo a cerrar, junto con la cabeza hidráulica que se generará por el paso del agua a través de esta válvula hacia el tanque de compresión de aire y de allí hacia la tubería de descarga. La secuencia fotográfica de su ensamble se muestra el Anexo 2. A 3,2 m de

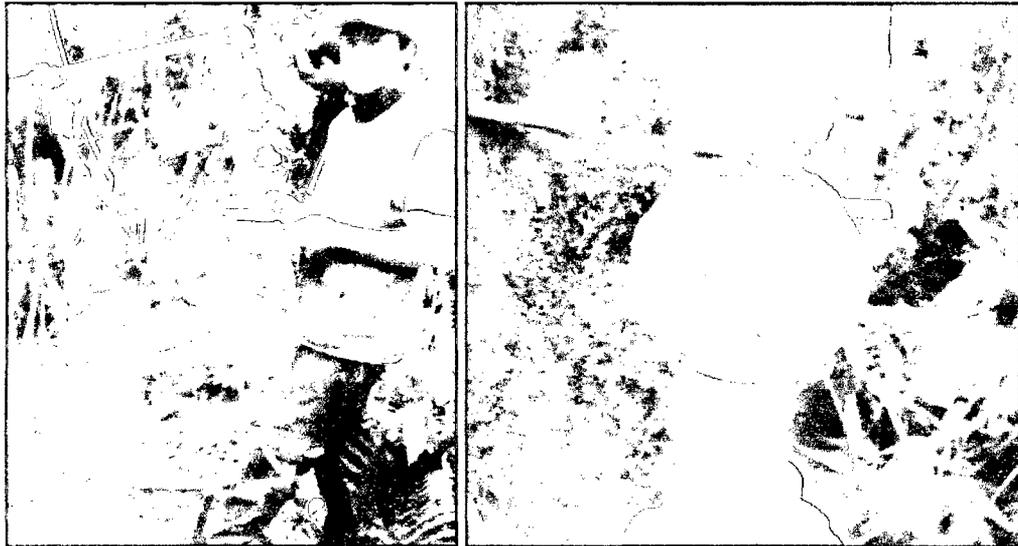
diferencia de altura con respecto a la base del tanque de alimentación, se ancló la bomba de ariete en un dado de concreto, con el objetivo de evitar movimientos bruscos ocasionados por el golpe de ariete.



Fotografía 4. Bomba de ariete hidráulico de doble válvula.

2.1.5. Medida de presión en el sistema

Para medir la presión generada por el golpe de ariete en función de la diferencia de altura de descarga de la bomba de ariete hidráulico, se instaló un manómetro de aguja, cuyo rango de medida va desde 0 hasta 85 lb/pulg² (psi), en la tubería de descarga de 1 pulg, a 2 m de distancia de la bomba de ariete.



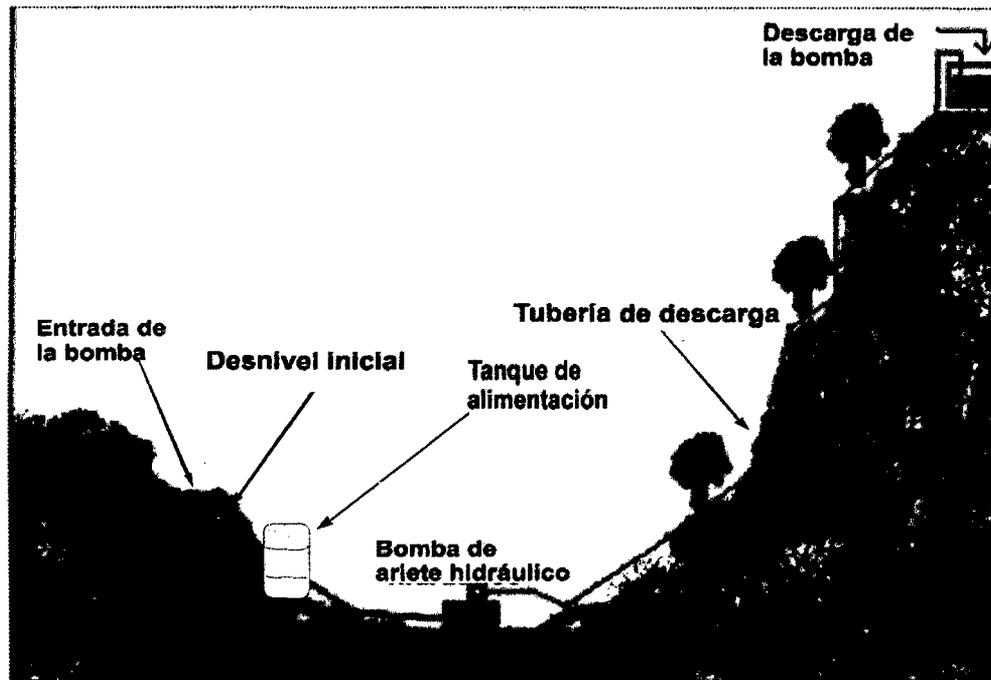
Fotografía 5. Sistema de medición de presión instalado en la tubería de descarga del agua bombeada.

2.1.6. Tubería de conducción del agua bombeada

La tubería que conduce el agua desde la bomba de ariete hidráulico hacia el reservorio, fue de PVC de 1/2", la cual se tendió sobre el suelo y se fijó con estacas, pendiente arriba.

2.1.7. Tanque de almacenamiento del agua bombeada

Para este propósito se empleó un cilindro de fierro de 200 L, en cuya base se soldó un niple de 1/2" para acoplar una manguera de PVC de 1/2" que abastece una tubería de distribución para el futuro sistema de riego por goteo de una plantación de café. Debido a la falta de recursos, el presente estudio se limitó a la evaluación del sistema de bombeo para determinar su rendimiento y eficiencia a diferentes alturas de descarga.



Fuente: elaboración propia.

Figura 1. Esquema de instalación del sistema de bombeo.

2.2. Principio de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico

La bomba de ariete hidráulico, es una máquina mediante la cual la presión dinámica del agua que circula bajo una pequeña caída, hace que impulse parte de esta misma agua a un nivel superior al de partida.

El sistema de bombeo tiene una tubería de alimentación AB (Figura 2), conectada en su extremo superior con la fuente de alimentación (cilindro de fierro de 200 L), y por el extremo inferior está conectada a la caja de válvulas E, que posee tres válvulas automáticas, las de derrame C_1 y C_2 que se abren hacia abajo y la de descarga G que se abre hacia arriba, sobre esta válvula G

está el tanque de compresión de aire F, del cual, cercano a su base, sale la tubería de descarga.

En la primera etapa de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, el agua de la fuente de alimentación ingresa por B, a la caja de válvulas E y la llena, produciendo el cierre de las válvulas C_1 y C_2 que cortan el flujo del agua causando el golpe de ariete. La válvula de descarga G se mantiene cerrada.

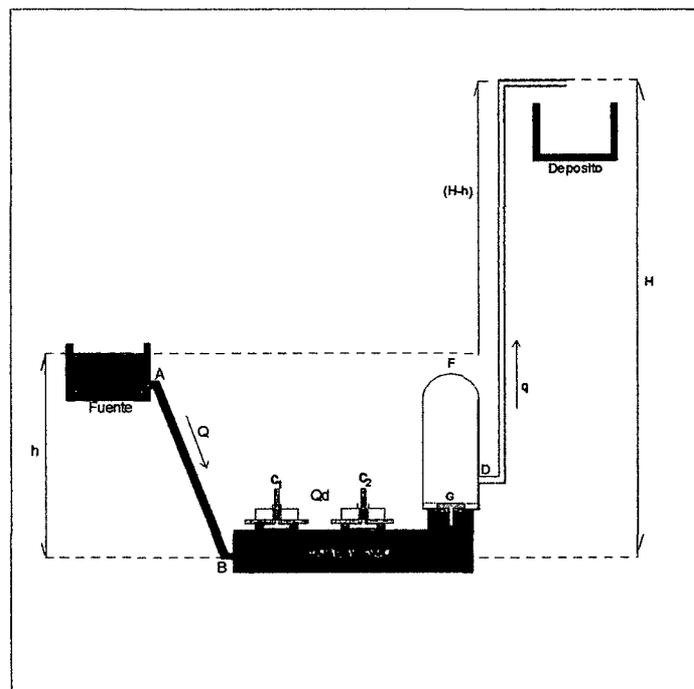


Figura 2. Primera etapa del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico.

En la segunda etapa, el golpe de ariete abre la válvula G (Figura 3), pasando un chorro de agua al depósito F donde se comprime el aire hasta que la mayor presión de aire reduzca 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.

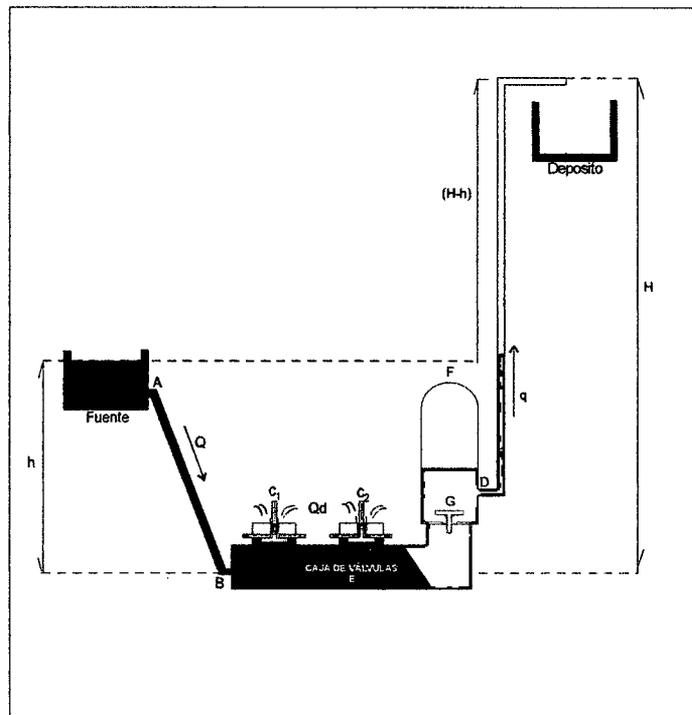


Figura 3. Segunda etapa de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico.

Cerrada la válvula G, la depresión oscilatoria (presión negativa) del golpe de ariete abre las válvulas C_1 y C_2 , completándose el ciclo (Figura 4). A cada golpe de ariete el agua pasa al depósito F donde se presuriza el aire. Este volumen de aire hace fluir el agua con continuidad por la tubería de descarga a un caudal (q), menor al alimentado (Q). El agua desechada mientras se cierran las válvulas C_1 y C_2 , regresará a la fuente sin generar desperdicio del preciado líquido, con un caudal Q_d . La bomba tendrá una operación automática durante la que se repiten los ciclos de funcionamiento que permitirán bombear el agua hasta el reservorio.

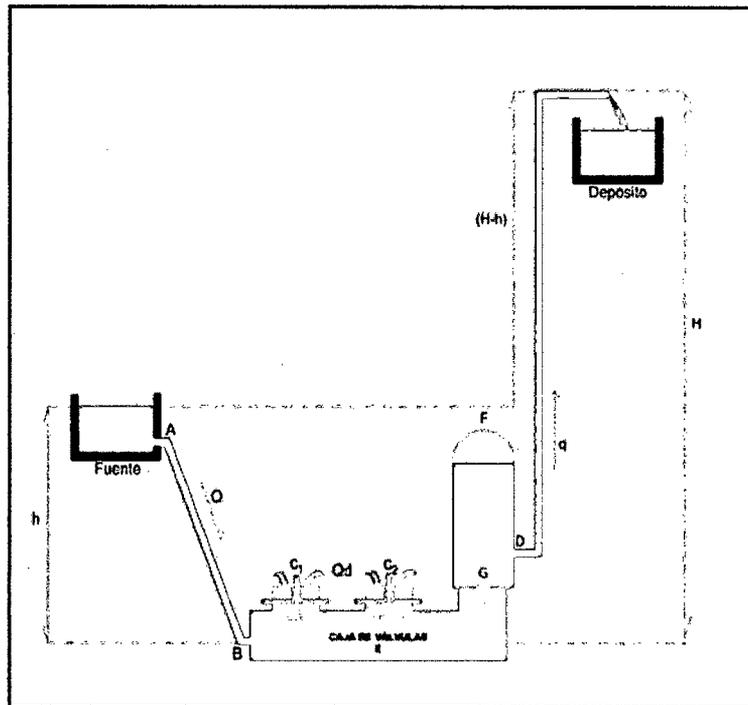


Figura 4. Tercera etapa de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico

2.3. Evaluación de la bomba de ariete hidráulico de doble válvula de cierre

Para esta evaluación se instaló el sistema de bombeo como se indicó en la Sección 2.1 del presente trabajo de investigación. Los parámetros que permitieron caracterizar a la bomba de ariete hidráulico y determinar su eficiencia se describen a continuación.

El rendimiento (R) de la bomba de ariete hidráulico representa el porcentaje de agua que se puede bombear en relación al total de la canalizada hacia esta bomba, y varía en función del cociente H/h (Sección 2.3.1 y 2.3.2 del presente trabajo de investigación). Al aumentar el valor de dicho cociente, el rendimiento disminuye. En la Figura 5 puede verse la variación del rendimiento en función de H/h .

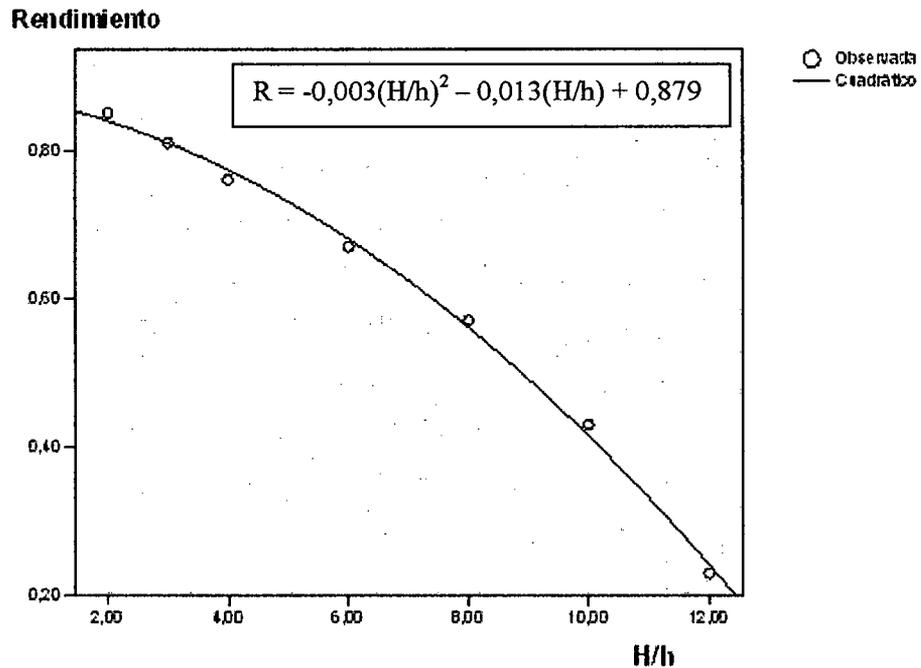


Figura 5. Rendimiento energético de una bomba de ariete hidráulico en función de H/h. Fuente: Izquierdo y Velásquez, 1992.

2.3.1. Altura de elevación (H)

Esta no debe superar más de 12 veces el desnivel de trabajo (h), ya que a partir de esta altura, el rendimiento de la bomba de ariete disminuye.

2.3.2. La altura de alimentación (h)

De ella dependerá la altura hasta la que bombeará el agua la bomba de ariete, para hacerla llegar hasta el tanque de almacenamiento final. Debe tener una caída mínima de 1 m de altura para que la bomba pueda elevar el agua. Por cada metro de desnivel, el ariete elevará el agua 10 metros de altura (Tabla 2).

Tabla 2. Altura de bombeo de agua en función a la altura de alimentación del ariete.

Altura de alimentación (m)	Altura de bombeo de Agua (m)
1,0	10
1,5	15
2,0	20
2,5	25
3,0	30

Fuente: Izquierdo y Velásquez, 1992.

2.3.3. Caudal elevado teórico (Qt)

Depende del rendimiento (R), del caudal de alimentación (Q_a), la altura de alimentación (h) y la altura de elevación (H). La ecuación por la que se relacionan es la siguiente:

$$Q_t = \frac{(R \cdot Q_a \cdot h)}{H} : \frac{L}{s}$$

Donde:

R = Rendimiento (de la Figura 5)

Q_a = Caudal de alimentación (L/s)

h = Altura de alimentación o desnivel de trabajo (m)

H = Altura de elevación (m)

2.3.4. Caudal de alimentación (Qa)

El ángulo de inclinación (α) del tubo de alimentación será de 45° con la horizontal. El caudal de alimentación de la bomba de ariete será igual al caudal elevado real (Q_e) más el caudal desechado (Q_d).

2.3.5. Caudal desechado (Qd)

Es el caudal de agua desechado en la etapa de cierre de las válvulas de impulso, en consecuencia no es elevada por la bomba y retornará al cauce de la fuente de agua en su curso descendente.

2.3.6. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico (η)

Es el cociente entre el caudal elevado o bombeado y el caudal alimentado a la bomba de ariete. Se calculó con la siguiente fórmula:

$$\eta = Q_e/Q_a$$

2.3.7. Frecuencia de cierre de las válvulas de impulso

Se contó la cantidad de golpes producidos por el cierre de las válvulas en una unidad de tiempo, para cada condición de trabajo. La unidad de medida utilizada será los golpes por minuto (golpe/min).

III. RESULTADOS

Se instaló el sistema de bombeo tal y como se indica en la Sección 2.1 del presente trabajo de investigación. Desde el embalse se condujo el agua mediante una tubería de PVC de 4" en una longitud de 14 m, con un caudal de 409,2 L/min hacia el cilindro de fierro de 200 L, ubicado a 1,7 m más abajo del embalse. Una vez lleno este cilindro, se abrió la llave de paso para alimentar la bomba de ariete hidráulico ubicada a 3,2 m hacia abajo de la base del cilindro, anclada en un dado de concreto, mediante una tubería de PVC de 2" pesada de 13 m de longitud. La fuerza del agua causó el cierre de las dos válvulas y la compresión de su resorte, el cual le ayudó a cada una a abrir de inmediato, iniciando de esta manera su funcionamiento automático y el consiguiente bombeo de una parte del agua alimentada a la bomba (Anexo 3).

3.1. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico

Para determinar la eficiencia del abastecimiento de agua por la bomba de ariete de doble válvula para el sistema de riego instalado, se tomó datos experimentales a diferentes alturas, con respecto a la ubicación de la bomba: 10 m, 15 m, 20 m, 25 m, 30 m, 35 m y 40 m. Para cada altura se determinó el caudal de agua elevado y el caudal de agua desechado; se contó el número de cierres de válvulas por minuto y se leyó la presión medida con el manómetro.

Para determinar el caudal de agua bombeado, se midió el tiempo en que se llenó un balde de plástico de 4 L, este procedimiento se repitió tres veces y se reportó el valor promedio. Para determinar el caudal desechado se colectó el

agua desechada por el cierre de las válvulas y se lo midió en la forma indicada anteriormente

El caudal de agua alimentado a la bomba de ariete, sin resorte en sus válvulas, fue de 54,53 L/min que resulta de la suma del caudal de agua desechada por la bomba (Q_d) más el caudal del agua elevada por la bomba (Q_r). El caudal alimentado a la bomba de ariete, con resorte en sus válvulas, fue de 60,38 L/min que fue calculado con el mismo procedimiento que para la bomba sin resortes.

Tabla 3. Datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete sin resorte en sus válvulas.

Altura de alimentación: h (m)	Altura de elevación: H (m)	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal elevado: Q_r (L/min)	Cierre de válvulas (cierre/min)
3,2	10	4	10,23	23,46	39
3,2	15	4	15,35	15,64	46
3,2	20	4	21,26	11,29	48
3,2	25	4	24,24	9,29	49
3,2	30	4	34,58	6,94	53
3,2	35	4	41,31	5,81	55
3,2	40	4	65,93	3,64	49

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete con resorte en sus válvulas.

Altura de alimentación: h (m)	Altura de elevación: H (m)	Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal elevado: Qr (L/min)	Cierre de válvulas (cierre/min)
3,2	10	4	9,53	25,19	36
3,2	15	4	14,29	16,79	36
3,2	20	4	19,78	12,13	37
3,2	25	4	24,04	9,98	37
3,2	30	4	32,17	7,46	37
3,2	35	4	38,46	6,24	38
3,2	40	4	61,53	3,90	37

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por la bomba de ariete de 2" con h = 3,2 m; con dos válvulas de cierre sin resortes. Qa = 54,53 L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Figura 5)	Caudal elevado teórico: Qt (L/min)	Caudal elevado real: Qr (L/min)	Diferencia de caudal (Qr - Qt)	Incremento de caudal bombeado (%)
10	3,13	0,81	14,12	23,46	9,34	166,15
15	4,68	0,75	8,75	15,64	6,89	178,74
20	6,25	0,68	5,94	11,29	5,35	190,07
25	7,81	0,59	4,15	9,29	5,14	223,86
30	9,37	0,49	2,87	6,94	4,07	241,81
35	10,94	0,38	1,88	5,81	3,93	309,04
40	12,5	0,25	1,08	3,64	2,56	337,04

Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse en el Tabla 5, la bomba de ariete ha bombeado 1,66 a 3,37 veces más caudal de lo teóricamente esperado. En la Figura 6 se muestra la variación del caudal bombeado por la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas sin resortes, en función de la altura de descarga.

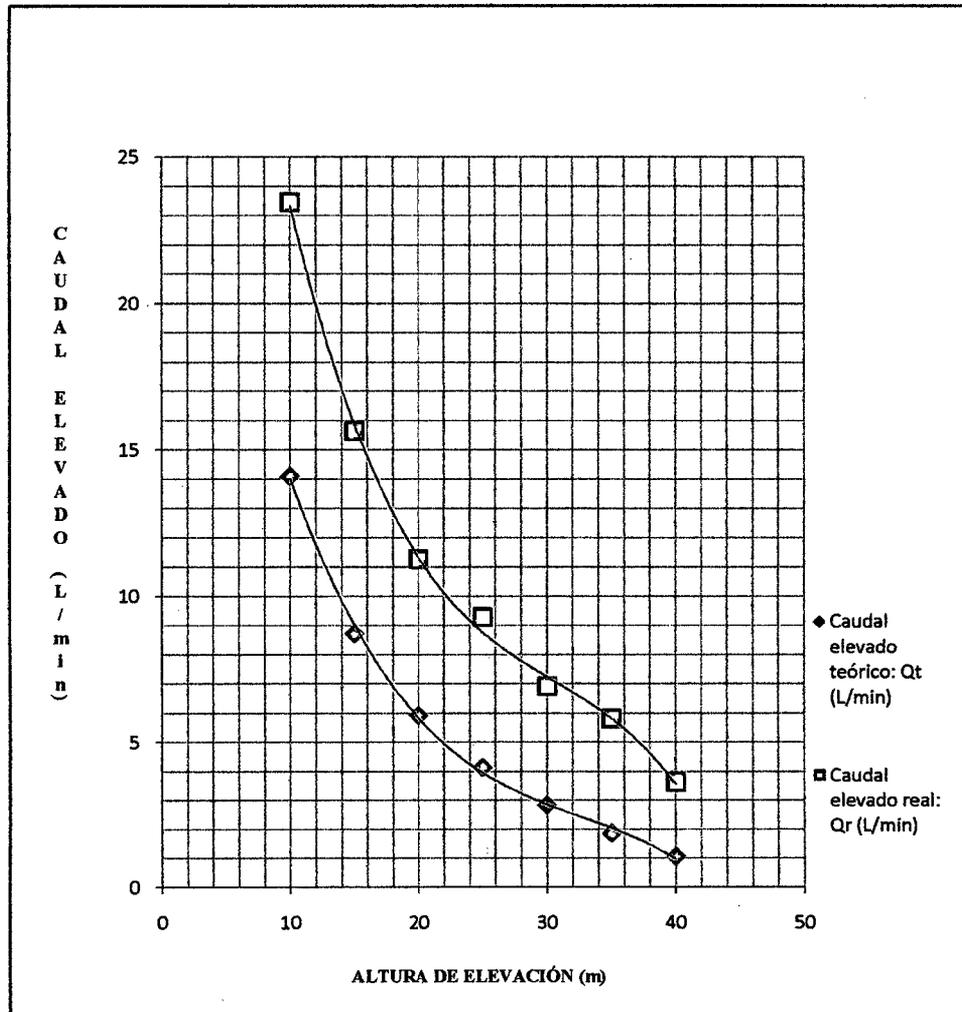


Figura 6. Caudal elevado teórico y caudal elevado real por la bomba de ariete sin resortes en sus válvulas.

Tabla 6. Diferencia entre el caudal real elevado y el caudal teórico elevado por la bomba de ariete de 2” con $h = 3,2$ m; con dos válvulas de cierre con resortes. $Q_a = 60,38$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	H/h	Rendimiento (Figura 5)	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	3,13	0,81	15,63	25,19	9,56	161,16
15	4,68	0,75	9,69	16,79	7,1	173,27
20	6,25	0,68	6,57	12,13	5,56	184,63
25	7,81	0,59	4,59	9,98	5,39	217,43
30	9,37	0,49	3,18	7,46	4,28	234,59
35	10,94	0,38	2,09	6,24	4,15	298,56
40	12,5	0,25	1,20	3,90	2,7	325,00

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia en la Tabla 6, la bomba de ariete ha bombeado 1,61 a 3,25 veces más caudal de lo teóricamente esperado. En la Figura 7 se muestra la variación del caudal bombeado por la bomba de ariete hidráulico de 2” con dos válvulas con resortes, en función de la altura de descarga.

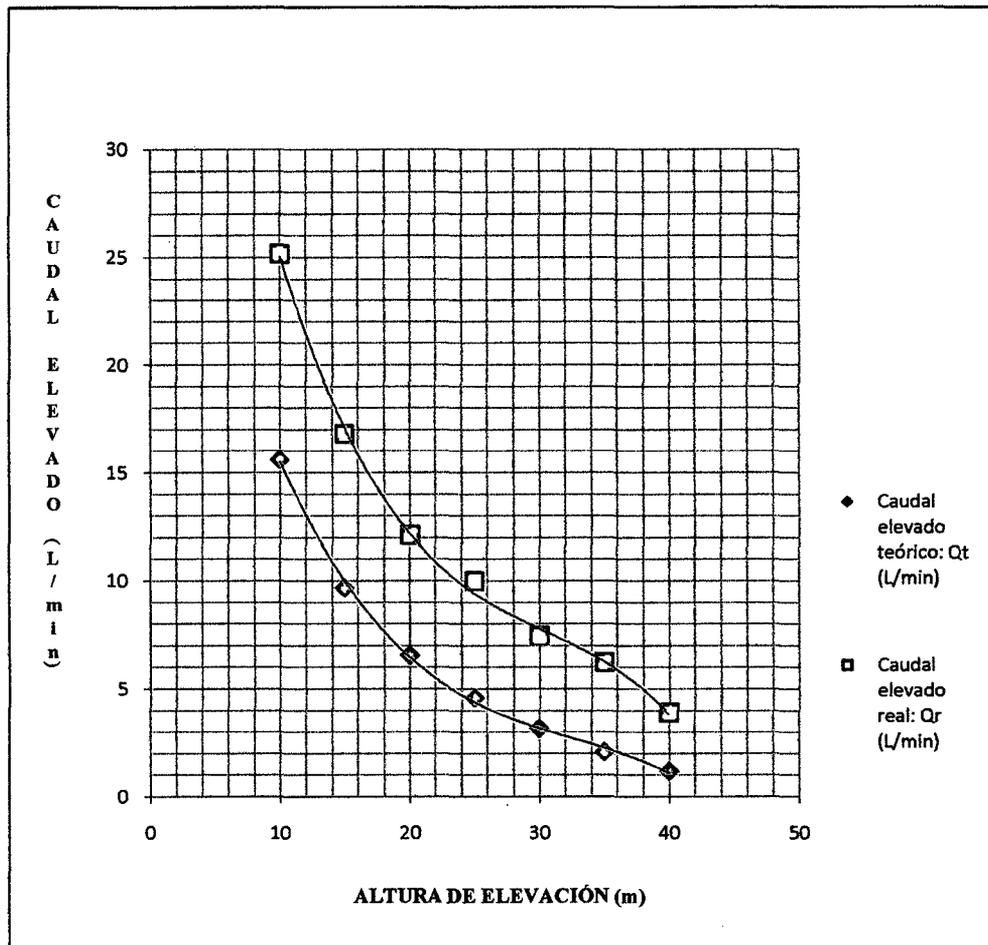


Figura 7. Caudal elevado teórico y caudal elevado real de la bomba de ariete con resortes en sus válvulas.

También se puede establecer una comparación entre los caudales reales elevados por la bomba con el uso de resortes en sus válvulas de cierre y sin el uso de estos, como se muestra en la Figura 8.

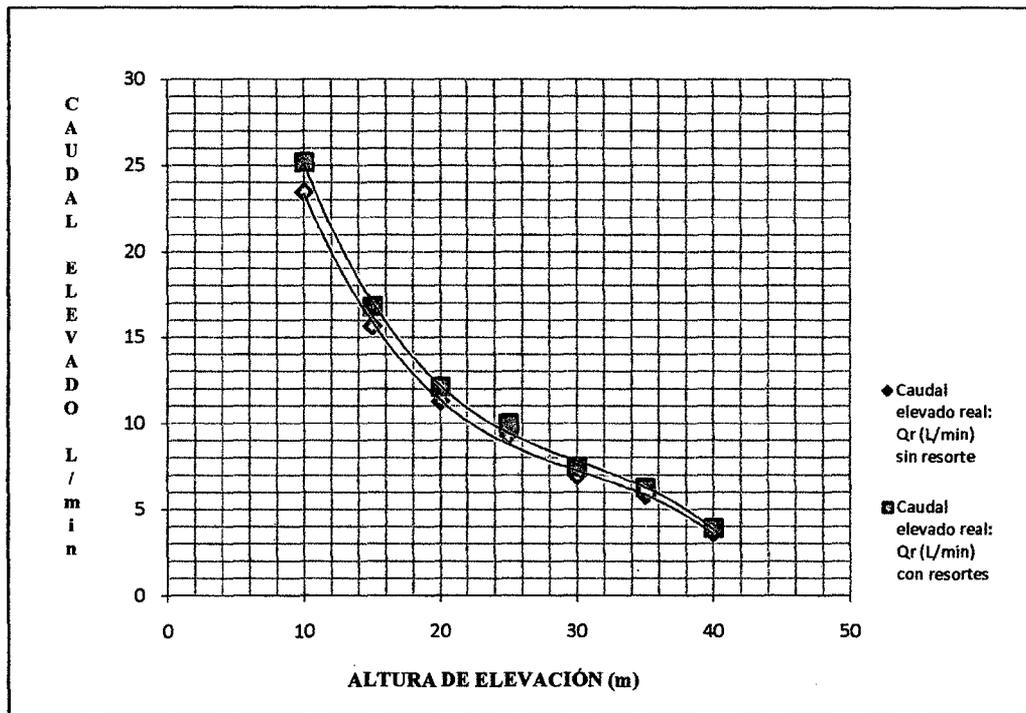


Figura 8. Caudal real bombeado con y sin el uso de resortes en las válvulas de la bomba de ariete.

3.2. Presión del sistema de bombeo con bomba de ariete hidráulico

Durante el funcionamiento de la bomba de ariete se generan pulsos de presión ocasionados por el cierre de válvulas. La presión del sistema de bombeo se incrementa con el incremento de la altura de descarga del agua bombeada.

Los datos de presión del sistema de bombeo de agua en función de la altura de descarga de la bomba de ariete sin resortes en sus válvulas se muestran en la Tabla 7. Se aprecia que la presión va desde 20 psi a 10 m de altura de

descarga, hasta 37,5 psi a 40 m de altura de descarga. El diferencial de presión esta en relación inversamente proporcional a la altura de descarga del agua.

Tabla 7. Datos de presión del sistema de bombeo en función de la altura de descarga de la bomba de ariete de 2" con $h = 3,2$ m; con dos válvulas de cierre sin resortes. $Q_a = 54,53$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Caudal elevado real: Q_r (L/min)	Presión Inicial P_0 (psi)	Presión Final P_f (psi)	Diferencia de presión ($P_f - P_0$) (psi)
10	23,46	10	20	10
15	15,64	15	22,5	7,5
20	11,29	20	25	5
25	9,29	22,5	30	7,5
30	6,94	25	32,5	7,5
35	5,81	30	35	5
40	3,64	32,5	37,5	5

Fuente: Elaboración propia.

La segunda prueba se realizó mediante el uso de resortes en las válvulas de cierre de la bomba de ariete. Los datos experimentales se muestran en la Tabla 8, siendo la presión final mayor que cuando la bomba no tiene resortes en sus válvulas, y los pulsos de presión van desde 10 psi a 10 m de altura de descarga, hasta 7,5 psi a 40 m de altura de descarga. El diferencial de presión también está en relación inversamente proporcional a la altura de descarga del agua.

Tabla 8. Datos de presión del sistema de bombeo en función de la altura de descarga de la bomba de ariete de 2" con $h = 3,2$ m; con dos válvulas de cierre con resortes. $Q_a = 60,38$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Caudal elevado real: Q_r (L/min)	Presión Inicial P_0 (psi)	Presión Final P_f (psi)	Diferencia de presión ($P_f - P_0$) (psi)
10	25,19	10	20	10
15	16,79	15	25	10
20	12,13	20	30	10
25	9,98	27,5	35	7,5
30	7,46	30	37,5	7,5
35	6,24	32,5	40	7,5
40	3,9	35	42,5	7,5

Fuente: Elaboración propia.

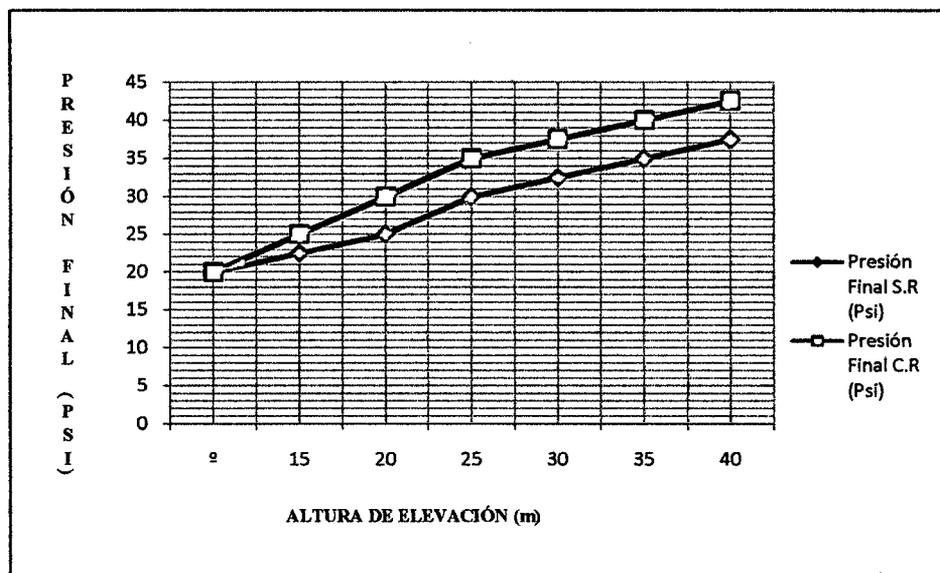


Figura 9. Presión de operación en función a la altura de descarga, con la bomba de ariete con y sin resortes en sus válvulas.

3.3. Análisis de regresión curvilínea mediante uso del SPSS (Caudal elevado vs Altura)

3.3.1. Análisis de regresión curvilínea, (Caudal elevado vs Altura) para la bomba de ariete sin resortes

Con el "Statistical Package for the Social Sciences" (SPSS 15.0 para Windows) 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 9, 10 y 11; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 10.

Tabla 9. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura). La variable independiente es Altura (m).

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0,999	0,998	0,997	0,383

Fuente: Elaboración SPSS

Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	276,814	3	92,271	627,554	0,000
Residual	0,441	3	0,147		
Total	277,255	6			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura (m).

Tabla 11. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura).

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura (m)	-3,766	0,365	-5,984	-10,322	0,002
Altura (m) ** 2	0,115	0,016	9,255	7,291	0,005
Altura (m) ** 3	-0,001	0,000	-4,285	-6,005	0,009
(Constante)	50,785	2,537		20,015	0,000

Fuente: Elaboración SPSS

La ecuación de la línea cúbica del caudal elevado (q) vs altura (H), para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, sin resorte, Prototipo INDES 111 será de la forma:

$$q = -0,001H^3 + 0,115H^2 - 3,766H + 50,785$$

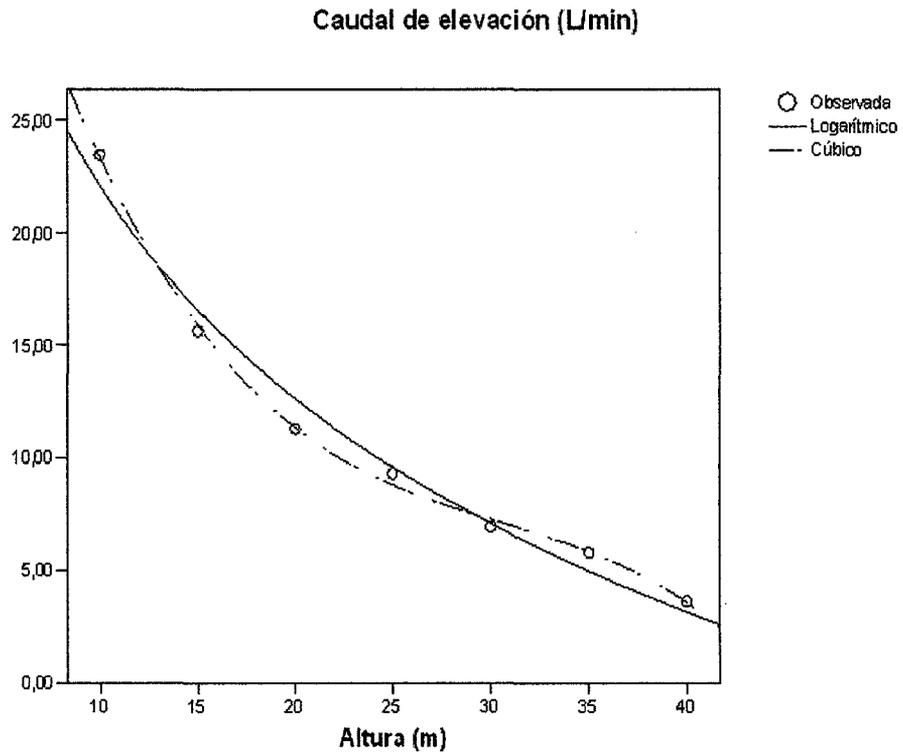


Figura 10. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para el caudal elevado vs altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 111).

3.3.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Caudal elevado vs Altura) para la bomba de ariete con resortes

Tabla 12. Resumen del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0,999	0,998	0,997	0,411

Fuente: Elaboración SPSS

La variable independiente es Altura (m).

Tabla 13. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Caudal elevado vs Altura).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	319,147	3	106,382	628,498	0,000
Residual	0,508	3	0,169		
Total	319,654	6			

Fuente: Elaboración SPSS

La variable independiente es Altura (m).

Tabla 14. Coeficientes de la ecuación cúbica (Caudal elevado vs Altura).

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura (m)	-4,047	0,391	-5,988	-10,337	0,002
Altura (m) ** 2	0,123	0,017	9,269	7,307	0,005
Altura (m) ** 3	-0,001	0,000	-4,295	-6,023	0,009
(Constante)	54,542	2,722		20,035	0,000

Fuente: Elaboración SPSS

La ecuación de la línea cúbica del caudal elevado (q) vs altura (H), para el funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas, con resortes, Prototipo INDES 111 será de la forma:

$$q = -0,001 H^3 + 0,123 H^2 - 4,047 H + 54,542$$

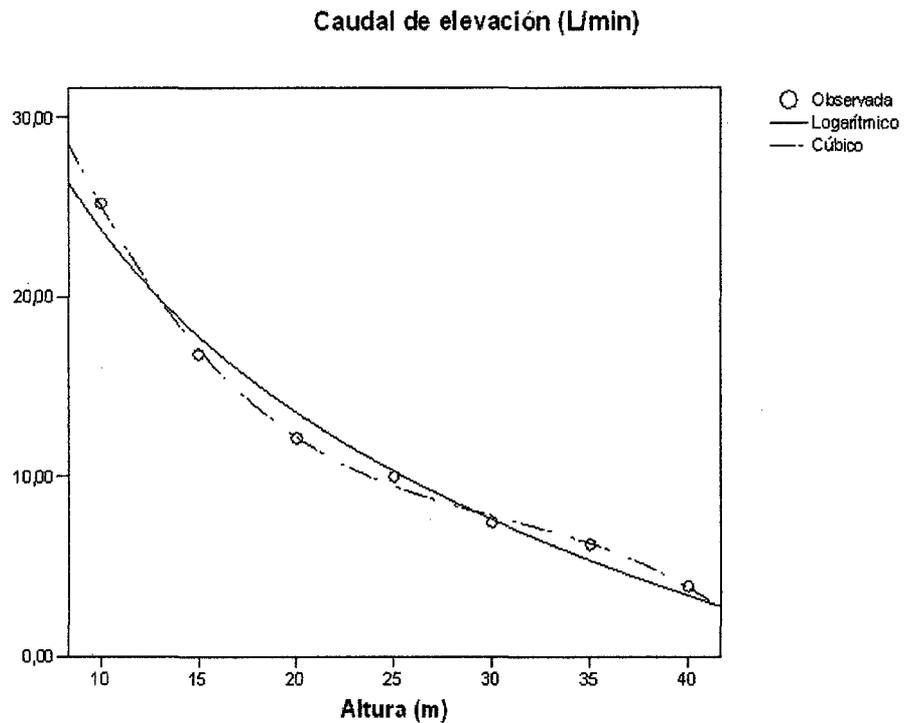


Figura 11. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para el caudal elevado vs altura.

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

3.4. Eficiencia de la bomba de ariete hidráulico

La bomba de ariete no eleva toda el agua que se le alimenta, su eficiencia puede ir desde 20 hasta 70 ó 90% en algunos casos y depende de la relación entre la cota de la toma y la cota de suministro. Con el nivel de referencia en la bomba, la eficiencia es inversamente proporcional a la altura a la que se va a suministrar el agua.

Tabla 15. Eficiencia de la bomba de ariete de 2" con $h = 3,2$ m con dos válvulas de cierre sin resortes. $Q_a = 54,53$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Caudal elevado real: Q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia: η (%)
10	23,46	31,07	43,02
15	15,64	38,89	28,68
20	11,29	43,24	20,70
25	9,29	45,24	17,04
30	6,94	47,59	12,73
35	5,81	48,72	10,65
40	3,64	50,89	6,68

Fuente: Elaboración propia.

De la comparación de los resultados de la Tabla 15 y Tabla 16, se aprecia que la eficiencia de la bomba de ariete con resortes en sus válvulas es ligeramente inferior a cuando trabaja sin resortes en sus válvulas.

Tabla 16. Eficiencia de la bomba de ariete de 2" con $h = 3,2$ m con dos válvulas de cierre con resortes. $Q_a = 60,38$ L/min.

Altura de elevación: H (m)	Caudal elevado real: Q_r (L/min)	Caudal desechado: Q_d (L/min)	Eficiencia: η (%)
10	25,19	35,19	41,72
15	16,79	43,59	27,81
20	12,13	48,25	20,09
25	9,98	50,40	16,53
30	7,46	52,92	12,36
35	6,24	53,24	10,33
40	3,90	56,48	6,46

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 12 se grafica la tendencia de la eficiencia de la bomba de ariete con la altura de descarga, cuando la bomba trabaja con resortes en sus válvulas y sin ellos.

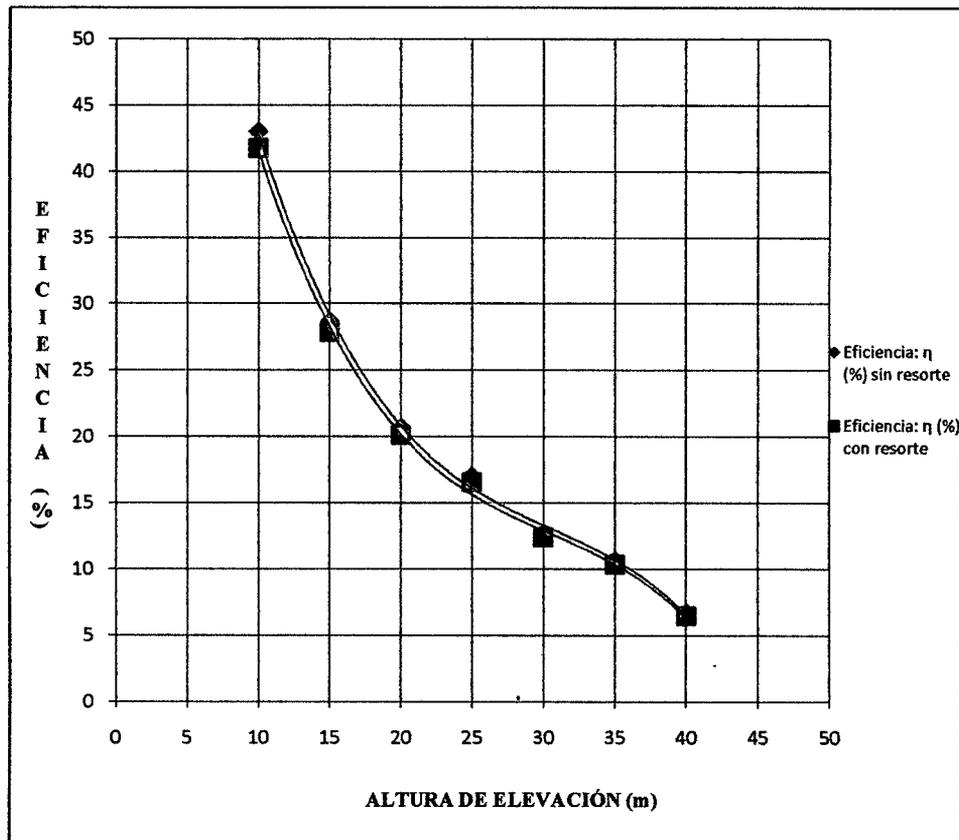


Figura 12. Tendencia de la eficiencia de la bomba de ariete en función a la altura de descarga, con resortes y sin ellos en sus válvulas.

3.4.1. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura) para la bomba de ariete sin resortes

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 y 19; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 13.

Tabla 17. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0,999	0,998	0,997	0,705

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 18. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	930,687	3	310,229	624,940	0,000
Residual	1,489	3	0,496		
Total	932,176	6			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

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

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura (m)	-6,905	0,670	-5,984	-10,301	0,002
Altura (m) ** 2	0,210	0,029	9,254	7,275	0,005
Altura (m) ** 3	-0,002	0,000	-4,284	-5,991	0,009
(Constante)	93,121	4,662		19,974	0,000

Fuente: Elaboración SPSS.

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

$$\eta = -0,002 H^3 + 0,210 H^2 - 6,905 H + 93,121$$

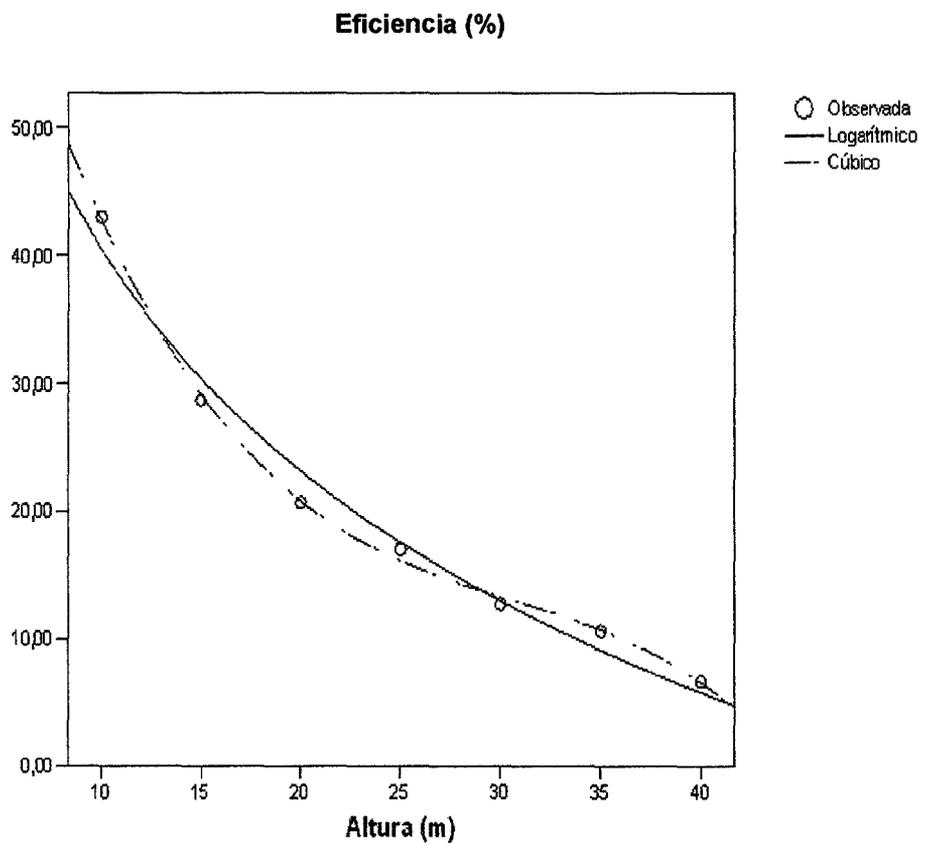


Figura 13. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas sin resorte (Prototipo INDES 111).

**3.4.2. Análisis de regresión curvilínea con el SPSS (Eficiencia vs Altura)
para la bomba de ariete con resortes**

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 20, 21 y 22; la gráfica correspondiente se muestra en la Figura 14.

Tabla 20. Resumen del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).

R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típico de la estimación
0,999	0,998	0,997	0,680

Fuente: Elaboración SPSS.

Tabla 21. Análisis de varianza (ANOVA) del modelo de regresión cúbica (Eficiencia vs Altura).

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Regresión	875,470	3	291,823	630,700	0,000
Residual	1,388	3	0,463		
Total	876,858	6			

Fuente: Elaboración SPSS. La variable independiente es Altura.

Tabla 22. Coeficientes de la ecuación cúbica (Eficiencia vs Altura)

	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típico	Beta	B	Error típico
Altura (m)	-6,701	0,647	-5,987	-10,353	0,002
Altura (m) ** 2	0,204	0,028	9,266	7,318	0,005
Altura (m) ** 3	-0,002	0,000	-4,293	-6,032	0,009
(Constante)	90,324	4,501		20,067	0,000

Fuente: Elaboración SPSS.

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

$$\eta = -0,002 H^3 + 0,204 H^2 - 6,701 H + 90,324$$

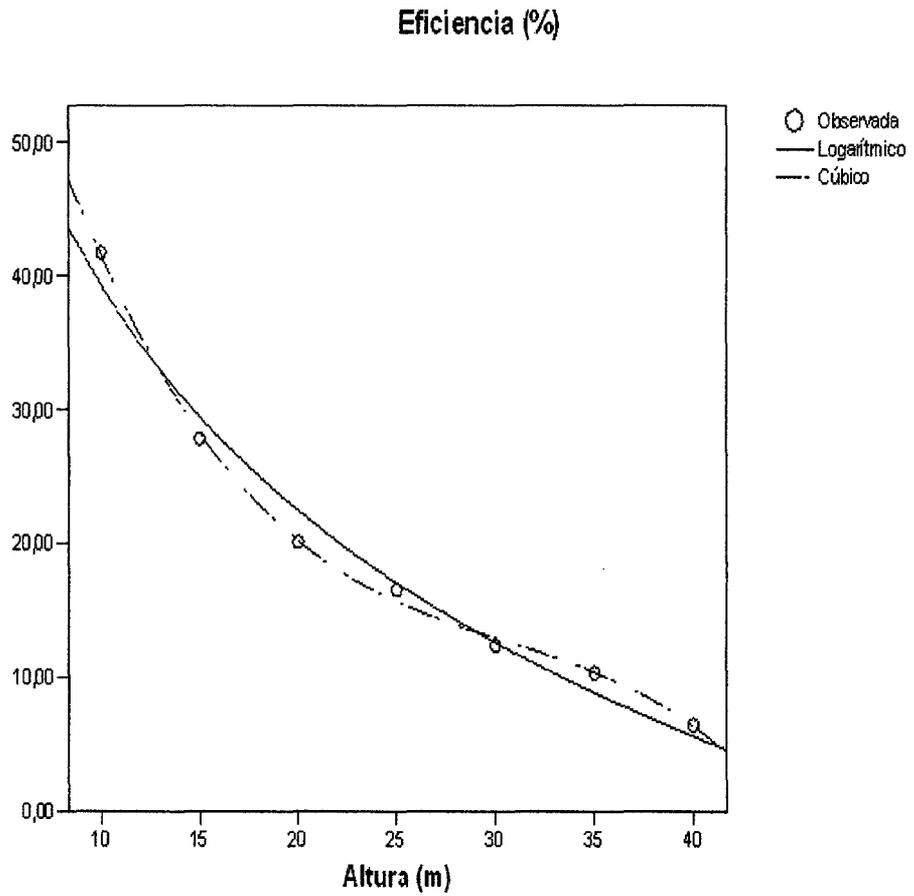


Figura 14. Representación de los datos experimentales (o) y de la línea cúbica (- -) generada por el SPSS para la eficiencia vs altura. Bomba con dos válvulas con resorte (Prototipo INDES 111).

Para tener una forma de comparación de los resultados experimentales, se calculó el tiempo necesario para que la bomba de ariete hidráulico de 2" con dos válvulas con resorte, llene 1 m^3 de agua, y el reservorio de 5 m^3 si se lo instala a esa altura; lo cual se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23. Tiempo de llenado de 1 m³ y del reservorio de 5 m³ con el caudal bombeado (Qr), a diferentes alturas (H), bomba sin resortes.

Altura de elevación: H (m)	Caudal real bombeado: Qr (L/min)	Tiempo de llenado de 1 m ³ (min)	Tiempo de llenado del reservorio de 5 m ³ (h)
10	23,46	42,63	3,55
15	15,64	63,94	5,33
20	11,29	88,57	7,38
25	9,29	107,64	8,97
30	6,94	144,09	12,01
35	5,81	172,12	14,34
40	3,64	274,73	22,89

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Tiempo de llenado de 1 m³ y del reservorio de 5 m³ con el caudal bombeado (Qr), a diferentes alturas (H), bomba con resortes.

Altura de elevación: H (m)	Caudal real bombeado: Qr (L/min)	Tiempo de llenado de 1 m ³ (min)	Tiempo de llenado del reservorio de 5 m ³ (h)
10	25,19	39,70	3,31
15	16,79	59,56	4,96
20	12,13	82,44	6,87
25	9,98	100,20	8,35
30	7,46	134,05	11,17
35	6,24	160,26	13,35
40	3,90	256,41	21,37

Fuente: Elaboración propia.

3.5. Mantenimiento de la bomba de ariete hidráulico

Si la bomba de ariete está bien fabricada y bien instalada, requerirá de un mínimo mantenimiento. Sus partes móviles son las dos válvulas de cierre o de impulso y la válvula de descarga, por lo que su desgaste es muy poco. Entre los mantenimientos a hacer tenemos:

- ✓ Cada mes se debe inspeccionar la bomba de ariete, pintar las partes oxidadas, limpiar los filtros o mallas de la boca de entrada de la tubería que viene del embalse, ajustar tuercas flojas y reponer el aire de la cámara.
- ✓ Después de un prolongado tiempo de uso, el aire de la cámara, por mezclarse con el agua, poco a poco se consume. Esta situación se hace notar cuando la bomba de ariete trabaja de manera brusca, con ruido metálico intenso y con una eficiencia cada vez menor. Por esta razón, cada cierto tiempo resulta necesario renovar con aire fresco la cámara.
- ✓ Las piezas móviles de la bomba de ariete, correspondientes a las válvulas de cierre, pueden superar fácilmente los 10 años de funcionamiento continuo, pero se recomienda al cabo de este tiempo, realizar una revisión de estas válvulas, por posibles desgastes. Es posible que la empaquetadura de jebe y lona de la válvula de descarga (check) dure menos tiempo, por lo que es recomendable tener una o dos disponibles para el cambio.
- ✓ En general, se contempla como vida útil de una bomba de ariete hidráulico, un lapso de 50 años como mínimo.

IV. DISCUSIÓN

Se instaló una bomba de ariete hidráulico de 2" denominada Prototipo INDES 111, en el lugar denominado Shipara, Distrito de San Nicolás, Provincia de Rodríguez, de la Región Amazonas, con la finalidad de irrigar las parcelas de café allí establecidas. Las zonas objeto de riego presentan las condiciones necesarias para la producción de dicho cultivo, sin embargo la producción alcanzada resulta deficiente en comparación a la producción obtenida en las zonas de llanura del distrito, debido a la falta de riego por las condiciones topográficas de las parcelas. Se aprovechó la topografía y el caudal de agua de la quebrada para embalsar y conducir parte del agua hacia un cilindro metálico de 200 litros, desde donde se abasteció a la bomba de ariete. El caudal conducido hacia dicho cilindro fue de 409,2 L/min, el cual supera ampliamente el requerimiento mínimo de 3 L/min necesario para que funcione una bomba de ariete hidráulico (Aguilar, 2008).

Teóricamente, por cada metro de diferencia de altura entre la fuente de abastecimiento de agua y la bomba de ariete, ésta debe elevar el agua 10 m (Izquierdo y Velásquez, 1992). Desde donde se ubicó el cilindro metálico hasta la ubicación de la bomba de ariete hidráulico, se tuvo una diferencia de altura de 3,2 m; por tanto, esta bomba debería elevar el agua hasta un máximo de 32 m. En este trabajo de investigación, en una primera prueba se alimentó con un caudal de 54,53 L/min a la bomba de ariete de doble válvula de cierre, sin resortes en ellas, alcanzando un caudal máximo de bombeo de 3,64 L/min, a 40 m de altura de descarga con respecto a la bomba de ariete, superando lo indicado en la teoría. Con el empleo de esta bomba se abastecerá un

reservorio proyectado de 5 m³, ubicado a 40 m de altura, que se llenará con el caudal indicado en aproximadamente 22,89 horas, con una eficiencia de 6,68%.

En la segunda prueba se alimentó con un caudal de 60,38 L/min a la bomba de ariete de doble válvula de cierre, con resortes en ellas, alcanzando un caudal máximo de bombeo de 3,90 L/min, a 40 m de altura de descarga con respecto a la bomba de ariete, superando también lo indicado en la teoría. En estas condiciones la bomba de ariete llenará el reservorio de 5 m³ en un tiempo aproximado de 21,37 horas, con una eficiencia de 6,46 %.

Mori y López (2011) trabajaron con una bomba de ariete similar empleando una tubería de descarga de PVC de 1" y una diferencia de altura entre el tanque de alimentación y la bomba de 3,8 m, alimentada con un caudal de 69,61 L/min, con lo cual bombearon agua hasta 40 m de altura con un caudal de 20,68 L/min y una eficiencia de 29,71%. Este resultado experimental es 5,3 veces mayor al que hemos obtenido, el cual se deberá a que empleamos una tubería de descarga de ½" en vez de 1"; además la diferencia de altura que empleamos fue de 3,2m (15% menor).

Salazar y Zuta (2011) emplearon una bomba de ariete similar sin resorte en sus válvulas, con tubería de descarga de PVC de 1" y diferencia de altura entre el tanque de alimentación y la bomba de 2,5 m, alimentada con un caudal de 55,87 L/min, con lo cual bombearon agua hasta 20 m de altura con un caudal de 15,44 L/min y una eficiencia de 27,64%. Cuando ellos hicieron funcionar la bomba de ariete con resorte en sus válvulas, se bombearon 14,33 L/min con una eficiencia de 23,59%, hasta la misma altura. En el presente trabajo de investigación, con la bomba de ariete sin

resortes, a 20 m de altura se ha bombeado 11,29 L/min con una eficiencia de 20,70%. Con la bomba de ariete con resortes, a la misma altura se bombeó 12,13 L/min con una eficiencia de 20,09%. Nuestro resultado experimental es 26.88% veces menor empleando la bomba sin resortes y 15.35% menor si empleamos la bomba con resortes. Ambos resultados menores pueden deberse a que hemos empleado una tubería de descarga de ½" en vez de 1" y una altura de alimentación 15% menor.

Conforme aumenta la altura de descarga, la presión aumentó; notándose que para el caso de la bomba de ariete con resorte en sus válvulas, la presión final generada por el golpe de ariete es mayor que para la bomba sin resortes. La presión mayor ayudó a bombear un caudal mayor de agua.

El caudal real elevado por la bomba de ariete evaluada sin el uso de resortes en sus válvulas, descendió desde 23,46 L/min a 10 m de altura de descarga hasta 3,64 L/min a 40 m. El procesamiento de los resultados experimentales del caudal real elevado frente a la altura de descarga, con el software SPSS ha permitido determinar que la tendencia es bien representada por la ecuación cúbica: $q = -0,001 H^3 + 0,115 H^2 - 3,766 H + 50,785$; cuyo ajuste (R^2) con respecto a los datos experimentales fue de 0,998.

El caudal real elevado por la bomba de ariete evaluada con el uso de resortes en sus válvulas, descendió desde 25,19 L/min a 10 m de altura de descarga hasta 3,9 L/min a 40 m. El procesamiento de los resultados experimentales del caudal real elevado frente a la altura de descarga, con el software SPSS ha permitido determinar que la tendencia

es bien representada por la ecuación cúbica: $q = -0,001 H^3 + 0,123 H^2 - 4,047 H + 54,542$; cuyo ajuste (R^2) con respecto a los datos experimentales fue de 0,998.

La eficiencia de la bomba de ariete hidráulico evaluada sin el uso de resortes en sus válvulas de cierre, descendió desde 43,02% a 10 m de altura de descarga hasta 6,68% a 40 m. El procesamiento de los resultados experimentales de la eficiencia frente a la altura de descarga, con el software SPSS ha permitido determinar que la tendencia es bien representada por la ecuación cúbica: $\eta = -0,002H^3 + 0,210 H^2 - 6,905 H + 93,121$; cuyo ajuste (R^2) con respecto a los datos experimentales fue de 0,998.

La eficiencia de la bomba de ariete hidráulico evaluada con el uso de resortes en sus válvulas de cierre, descendió desde 41,72% a 10 m de altura de descarga o bombeo hasta 6,46% a 40 m. El procesamiento de los resultados experimentales de la eficiencia frente a la altura de descarga, con el software SPSS ha permitido determinar que la tendencia es bien representada por la ecuación cúbica: $\eta = -0,002 H^3 + 0,204 H^2 - 6,701 H + 90,324$; cuyo ajuste (R^2) con respecto a los datos experimentales fue de 0,998.

Similar comportamiento cúbico para el caudal elevado y la eficiencia frente a la altura, ha sido encontrado por Mori y López (2011) y por Salazar y Zuta (2011).

Comparando los resultados de la Tabla 3 (datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete sin resortes en las válvulas) con los de la Tabla 4 (datos experimentales del funcionamiento de la bomba de ariete con resortes en sus válvulas), 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 las válvulas se

reduce y se hace casi constante fluctuando entre los 36 a 38 golpes por minuto a diferencia de lo que sucede en la bomba sin el uso de resortes en la que se aprecia un incremento considerable en los golpes por minuto empezando en los 39 llegando hasta los 55; mientras menos golpes por minuto se producen, más cantidad de agua es enviada a la cámara de presión, esta diferencia se puede apreciar en una misma altura de elevación en cuanto a la bomba usando resortes y sin su uso, también se puede regular el número de golpes controlando la longitud de cierre de las válvulas en cada cierre, conforme esta longitud sea menor, mayor cantidad de golpes se producirán y si es de mayor longitud se tendrán menos golpes por minuto, lo que se ve traducido en un aumento de caudal elevado tal y como indica el CENATA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria) de República Dominicana, y se corroboró con las Tablas 3 y 4 del presente estudio, el caudal se incrementa en cada una de las alturas de elevación como se puede apreciar en la Figura 6. El caudal real suministrado por la bomba con resortes es ligeramente mayor que el caudal real abastecido por la bomba sin resortes, a pesar que la eficiencia se ha reducido, como se aprecia en la Figura 12. La comparación entre las eficiencias de la bomba cuando usa resortes y cuando no los usa, permite rescatar el incremento del caudal bombeado con lo que abastecerá del recurso llenando 5 m^3 en un tiempo de 21,37 h a una altura de 40 m. Además, la bomba de ariete hidráulico con el uso de resortes permite elevar el agua a mayores alturas.

En cuanto a la presión generada en el sistema se puede notar que el comportamiento es directamente proporcional al incremento de la altura de descarga en las pruebas en las que se usan resortes como en la que no se usan; sin embargo, los valores alcanzados para la bomba con resortes son superiores a los de la bomba sin resortes como se

verifica en la Figura 9. Los diferenciales de presión para la bomba con resortes se mantuvieron constantes en 10 psi durante los primeros 20 m de elevación y luego disminuyeron a 7,5 psi a partir de la altura de 25 m manteniéndose constante hasta los 40 m de elevación; mientras que la bomba sin resortes experimentó una disminución más marcada en el diferencial de presión. Se puede establecer que los resortes permiten estabilizar los diferenciales de presión ya que se mantienen constantes en dos etapas de todo el tramo de elevación; a diferencia de los resultados en la bomba sin resortes en la cual los diferenciales fluctúan más que en la otra prueba.

Los resortes instalados en el equipo generan una elevación en los diferenciales de presión, lo que también genera un aumento de caudal elevado como se puede verificar en la Figura 7.

Las ecuaciones cúbicas obtenidas en el presente trabajo de investigación tanto para el caudal real elevado con y sin resortes en las válvulas de cierre así como para la eficiencia en función de la altura de descarga, para la bomba de ariete evaluada, pueden emplearse para modelar su operación, de manera que se pueda determinar hasta que altura puede elevar el agua, aunque sea un caudal mínimo. También servirán para determinar a cualquier altura, el caudal elevado y la eficiencia de esta bomba de ariete.

El caudal real elevado por la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas y sin resortes en ellas, supera en 1,66 veces al caudal teórico esperado a 10 m de altura; y es 3,37 veces mayor al esperado a 40 m de altura de descarga.

El caudal real elevado por la bomba de ariete hidráulico con dos válvulas y con resortes en ellas, supera en 1,61 veces al caudal teórico esperado a 10 m de altura; y es 3,25 veces mayor al esperado a 40 m de altura de descarga.

Para abastecer el reservorio de 5 m³ de agua a una altura de 35 m con respecto a la ubicación de la bomba de ariete sin el uso de resortes, se emplearán 14,34 h, lo cual será suficiente para abastecer del recurso a las parcelas objeto de riego, considerando que la bomba trabaja las 24 horas del día.

Para abastecer el reservorio de 5 m³ de agua a una altura de 35 m con respecto a la ubicación de la bomba de ariete con el uso de resortes, se emplearán 13,35 h, lo cual será suficiente para abastecer del recurso a las parcelas objeto de riego, considerando que la bomba trabaja las 24 horas del día, y además se previene su deterioro mediante los resortes que amortiguan los golpes de cierre de las válvulas, además aumentan el caudal elevado.

La altura de elevación más adecuada es la de 35 m ya que allí es donde se ubican los mejores puntos de eficiencia y de caudal elevado analizando las curvas de sus comportamientos, ya que el caudal bombeado demuestra una tendencia cúbica y podría alcanzar hasta una altura de descarga de 41 m, calculando el caudal de elevación con las respectivas curvas obtenidas en esta investigación se llegaría a 2,97 L/min para la bomba sin resortes y un caudal de 3,21 L/min para la bomba con resortes en sus válvulas, pero estos valores no serían los más eficientes para la operación de la bomba ya que tomaría más tiempo el llenado del reservorio con respecto a la altura de descarga.

V. CONCLUSIONES

- 1- Se captó 409,2 L/min de agua de la quebrada Shipara, el cual supera ampliamente el requerimiento mínimo de 3 L/min para que funcione una bomba de ariete hidráulico.
- 2- Con una diferencia de altura entre el tanque de abastecimiento de agua hasta la bomba de ariete de 3,2 m, se alimentó un caudal de 54,53 L/min a la bomba de ariete de doble válvula de cierre y sin resortes en ellas y ha elevado el agua hasta 40 m, haciendo llegar un caudal de 3,64 L/min con una eficiencia de 6,68 %.
- 3- Con la misma diferencia de altura se alimentó un caudal de 60,38 L/min a la misma bomba de ariete pero con resortes en sus válvulas, logrando elevar el agua hasta 40 m, haciendo llegar un caudal de 3,9 L/min con una eficiencia de 6,46 %.
- 4- La variación del caudal real elevado frente a la altura de descarga, para la bomba sin resortes en sus válvulas es modelada por la ecuación: $q = -0,001H^3 + 0,115H^2 - 3,766H + 50,785$; con R^2 de 0,998. La eficiencia en función a la altura de descarga es modelada por: $\eta = -0,002H^3 + 0,210H^2 - 6,905H + 93,121$; con R^2 de 0,998.
- 5- La variación del caudal real elevado frente a la altura de descarga, para la bomba con resortes en sus válvulas es modelada por la ecuación: $q = -0,001H^3 + 0,123H^2 - 4,047H + 54,542$; con R^2 de 0,998. La eficiencia en función a la altura de descarga es modelada por: $\eta = -0,002H^3 + 0,204H^2 - 6,701H + 90,324$; con R^2 de 0,998.
- 6- Se comprobó que existe menor perturbación en la bomba cuando se usan resortes en sus válvulas de cierre ya que se disminuyó el número de cierres por minuto y se incrementó el caudal elevado, con respecto a la bomba sin resortes en sus válvulas.

VI. RECOMENDACIONES

- 1- Difundir las ventajas de esta tecnología que emplea energía renovable para el bombeo de agua, en zonas rurales y de difícil acceso; además la inversión se recuperará en corto tiempo, debido a que no emplea ninguna otra fuente de energía
- 2- Instalar otra bomba similar junto a la evaluada para incrementar el caudal elevado. El embalse proporciona agua suficiente al tanque de alimentación para abastecer dos bombas.
- 3- Emplear las ecuaciones cúbicas obtenidas en el presente trabajo de investigación tanto para el caudal real elevado como para la eficiencia en función de la altura de descarga, para la bomba de ariete evaluada, para modelar su operación, de manera que se pueda determinar hasta que altura máxima puede elevar el agua, aunque sea un caudal mínimo. También servirán para determinar a cualquier altura, el caudal elevado y la eficiencia de esta bomba de ariete.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar Pedro. 2008. “La energía hidráulica”, Centro Integral de Tecnología Apropriada (CITA), Cuba.
- Castro Vera, Soraya. 2004. Diseño de un sistema de riego localizado en frutillas y estudio de la rentabilidad del cultivo, Tesis para obtener el grado de ingeniero agrónomo. Talca- Chile. Universidad de Talca.
- 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.
- Comisión Técnica Multisectorial, Ministerio de Agricultura, Vivienda, Economía y Finanzas, Junta Nacional de Usuarios. 2 003. Política y Estrategia Nacional de Riego En El Perú. RM 0498-2003-AG.
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. [S.F].Tema 10: El golpe de ariete. Obtenida el 23 de junio del 2 011, de <http://www.ingenieriaRural.com/catedradeingenieriarural/tema10>.
- Hadzich, Marín Miguel. 1988. Bomba de ariete. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima- Perú 1988
- Lazo Pérez, Cesar. 2 006. Tecnología para el riego. Lima- Perú. CONCYTEC.
- López Mas Mariños, Mori Ruiz Carmela.2011.Implementación de un sistema de riego tecnificado abastecido con bomba de doble ariete en el Distrito de Molinopampa, Provincia de Chachapoyas, Región Amazonas. Tesis para obtener el grado de ingeniero agroindustrial. Chachapoyas-Perú. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza.

- Montesinos Larrosa, Alejandro y Gallardo Quiñones, Leopoldo. 2004. Los secretos del ariete hidráulico. Energía y Tú. Revista científico-popular trimestral de CUBASOLAR, No. 25. ISSN 1028-9925.
- Pérez Hernández, Pedro Luis. 2003. El ariete hidráulico. Cuba. CITA.
- 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, ISSN 959-7102-16-1. Camagüey - Cuba.
- Salazar Cotrina Eider, Zuta Tochon Eder. 2011. Banco de prueba de arietes hidráulicos para el Laboratorio de Ingeniería de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas. Tesis para obtener el grado de ingeniero agroindustrial. Chachapoyas-Perú. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza.
- Zegarra Eduardo 1998. "Agua, estado y mercado, elementos institucionales y Económicos". Ediciones ProASur, Lima.

VIII. ANEXOS

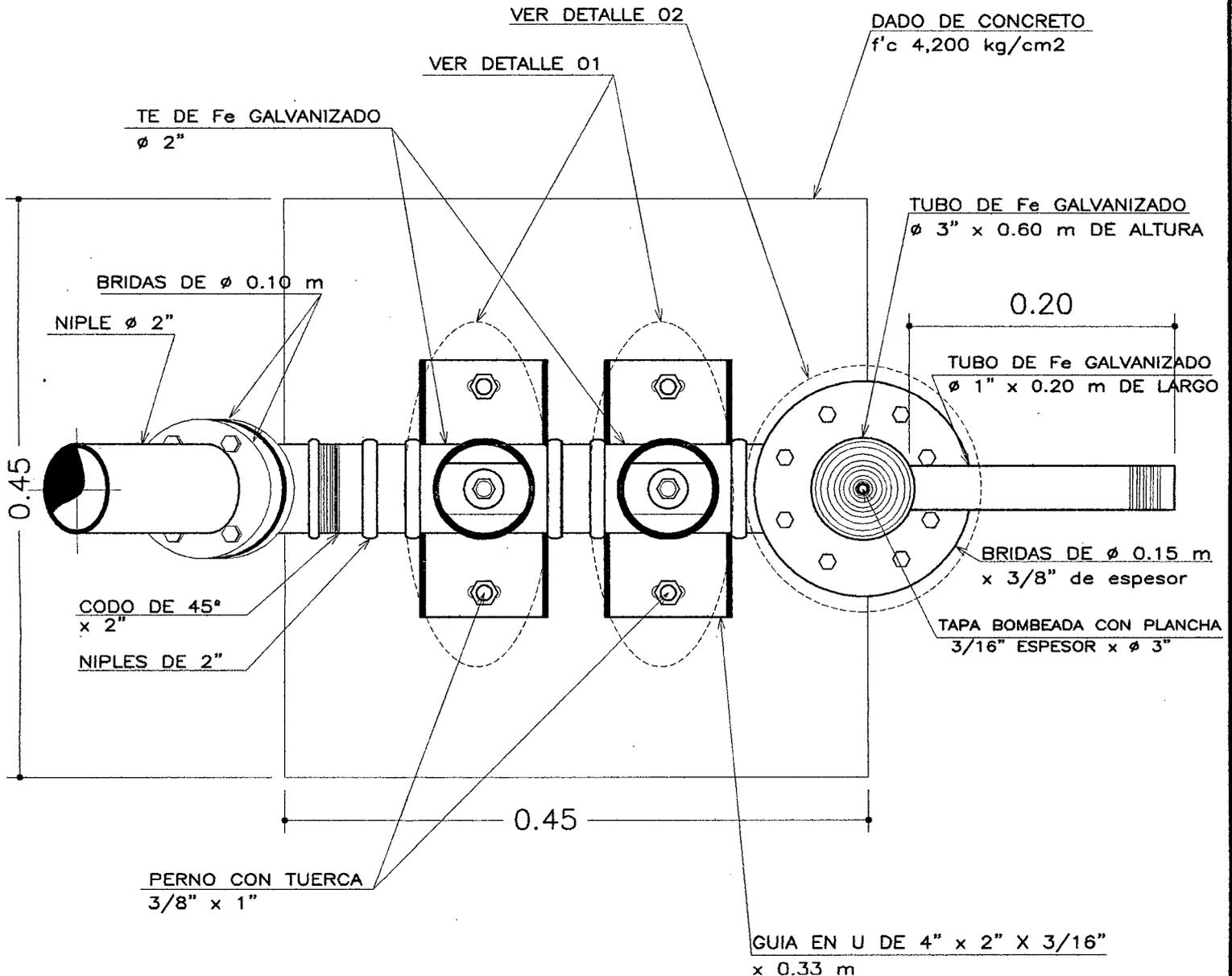
ANEXO 1

Planos de la bomba de ariete hidráulico Prototipo INDES 111

ANEXO 1

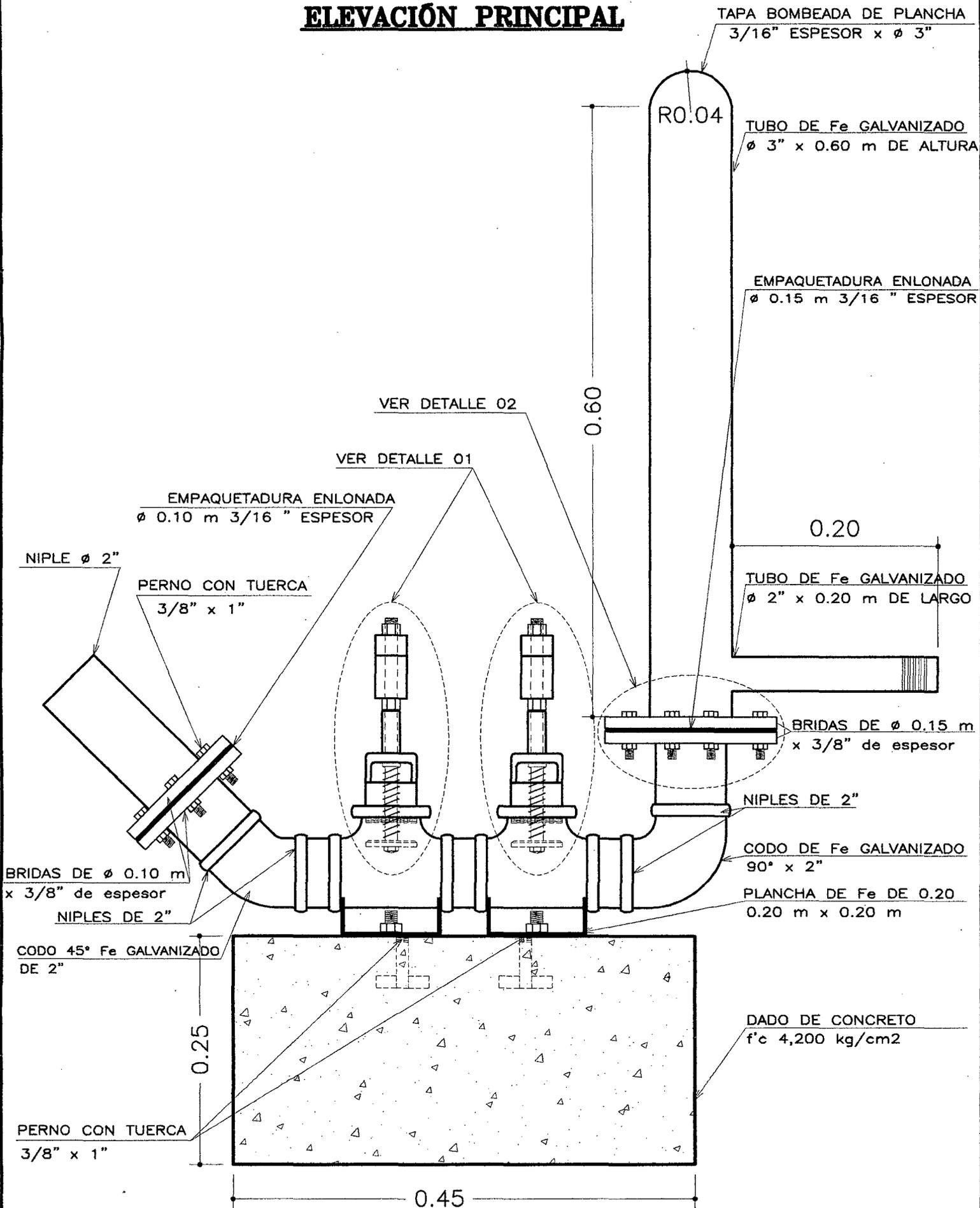
PLANOS DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO DE 2" DE DOS VALVULAS CON RESORTE PROTOTIPO INDES 111

PLANTA



PROYECTO: BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"					
UBICACION: ANEXO: SHIPARA		PLANTA			LAMINA: P-01
DISTRITO: SAN NICOLAS	PROVINCIA: ROD. DE MENDOZA	REGION: AMAZONAS	DIS: Barrena, Salazar	PAGINA: 64	FECHA: DIC-2011

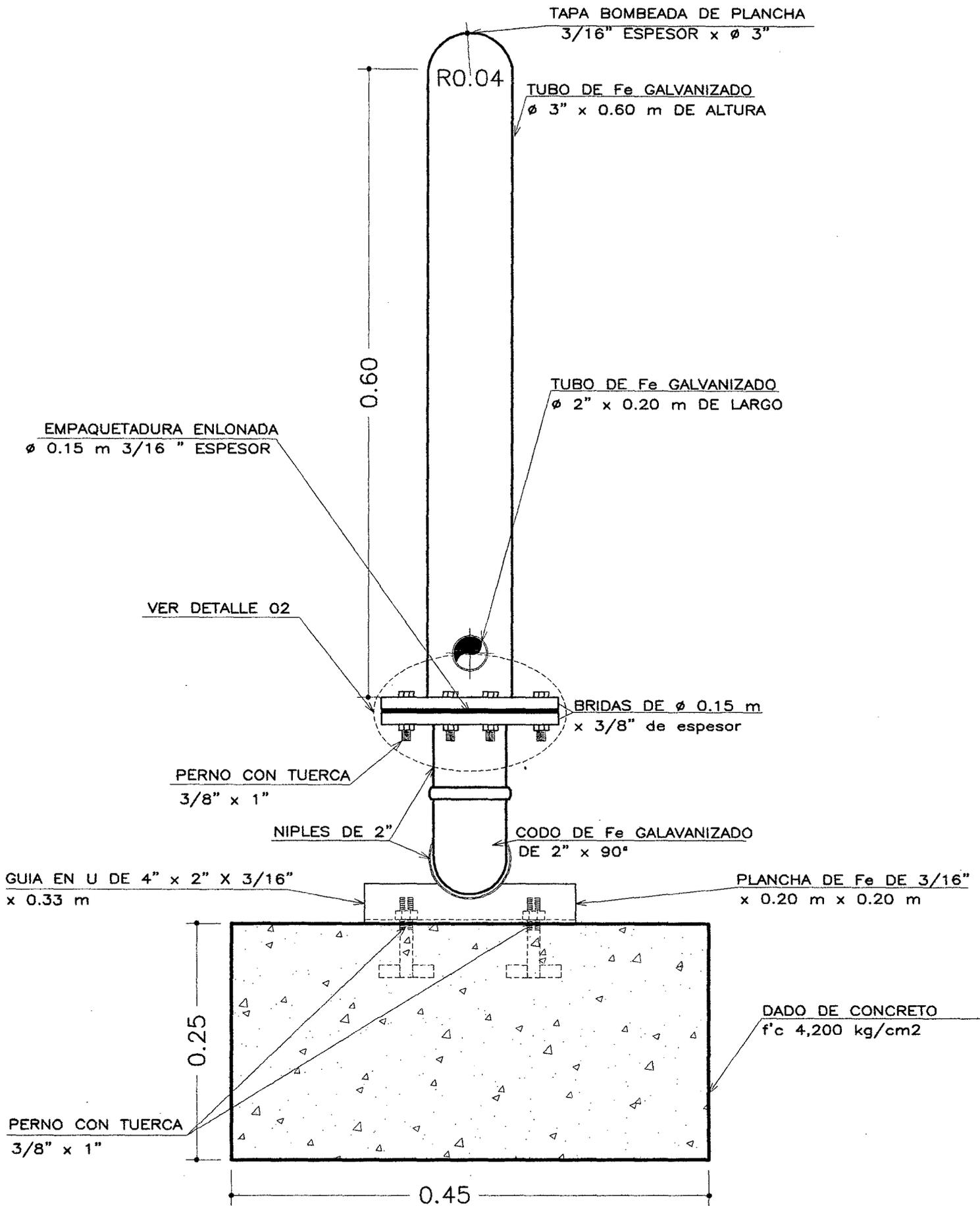
ELEVACIÓN PRINCIPAL



BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"

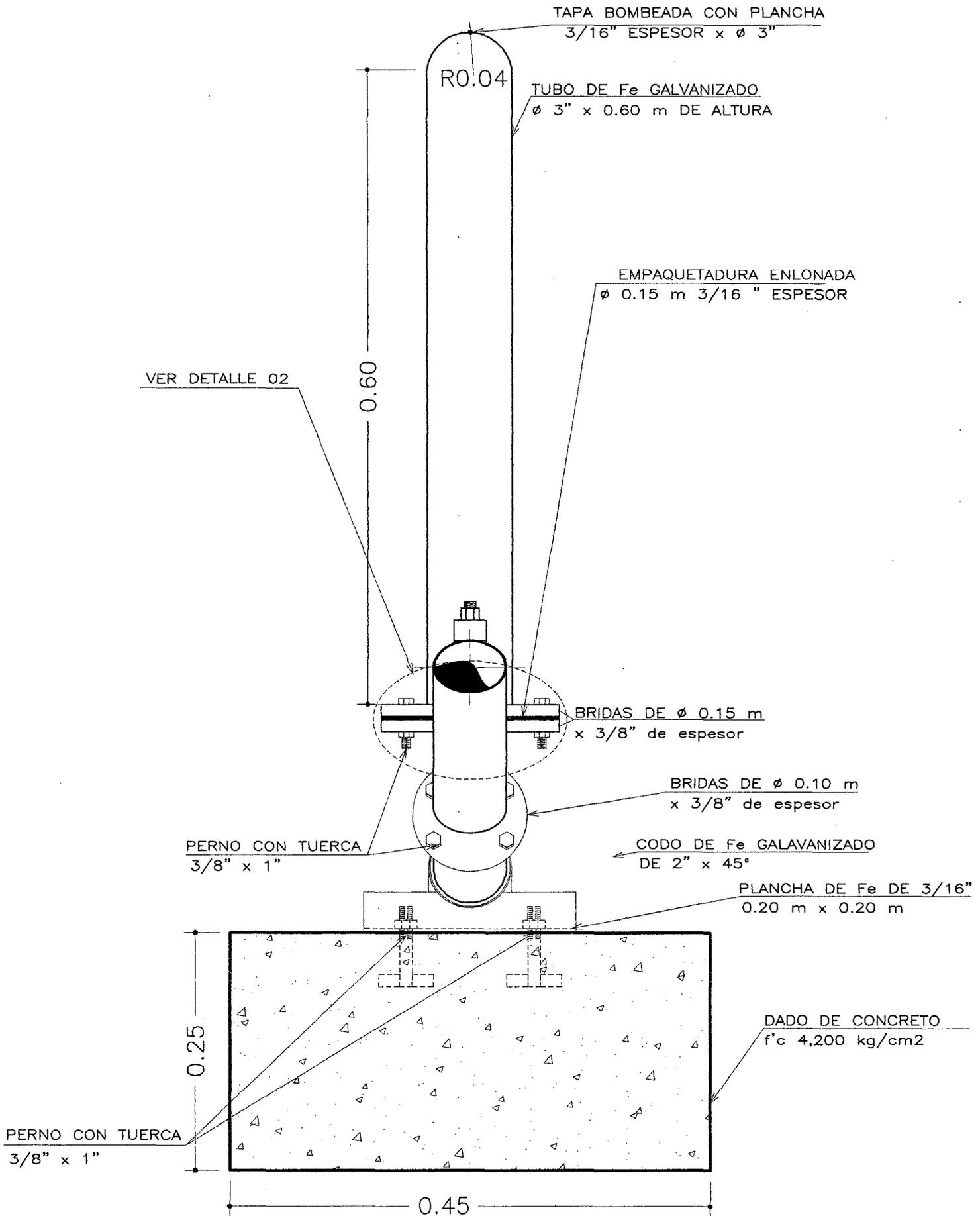
PROYECTO:		BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"		UBICACION:		PLANO:		ELEVACIÓN PRINCIPAL		LAMINA:	
ANEXO:		SHIPARA		DISTRITO:		PROVINCIA:		ROD. DE MENDOZA		REGION:	
AMAZONAS		DIS:		Barrena, Salazar		PAGINA:		65		FECHA:	
SAN NICOLAS		DIC-2011		E-01							

ELEVACIÓN LATERAL DERECHA



PROYECTO:						BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"					
UBICACIÓN:			ANEXO:			PLANO:			LAMINA:		
SHIPARA			ELEVACIÓN LATERAL DERECHA			E-02					
DISTRITO:		PROVINCIA:		REGION:		DIS:		PAGINA:		FECHA:	
SAN NICOLAS		ROD. DE MENDOZA		AMAZONAS		Barrena, Salazar		66		DIC-2011	

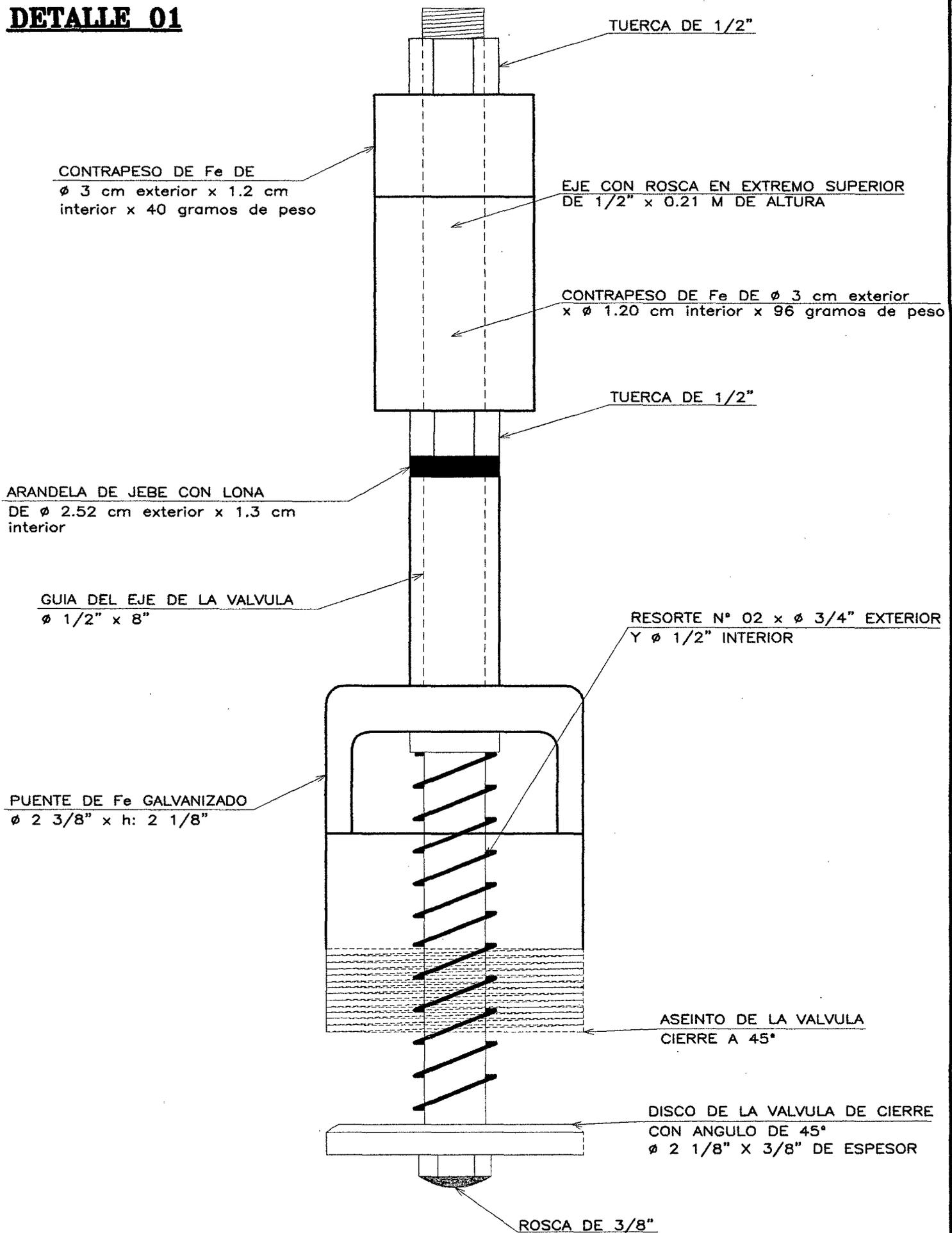
ELEVACIÓN LATERAL IZQUIERDA



BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"

PROYECTO:		BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"		LÁMINA:	
UBICACIÓN:		PLANO:		ELEVACIÓN LATERAL IZQUIERDA	
ANEXO: SHIPARA		LÁMINA: E-03			
DISTRITO: SAN NICOLAS	PROVINCIA: ROD. DE MENDOZA	REGION: AMAZONAS	DIS: Barrena, Salazar	PAGINA: 67	FECHA: DIC-2011

DETALLE 01



PROYECTO: BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"					
UBICACIÓN: ANEXO: SHIPARA		PLANO: DETALLE 01		LAMINA: D-01	
DISTRITO: SAN NICOLAS	PROVINCIA: ROD. DE MENDOZA	REGION: AMAZONAS	DIS: Barrena, Salazar	PAGINA: 68	FECHA: DIC-2011

DETALLE 02

0.04

TAPA BOMBEADA CON PLANCHA
3/16" ESPESOR x ϕ 3"

TUBO DE Fe GALVANIZADO
 ϕ 3" x 0.60 m DE ALTURA

TUBO DE Fe GALVANIZADO
 ϕ 2" x 0.20 m DE LARGO

VER DETALLE 03

BRIDAS DE ϕ 0.15 m
x 3/8" de espesor

PERNO CON TUERCA
3/8" x 1"

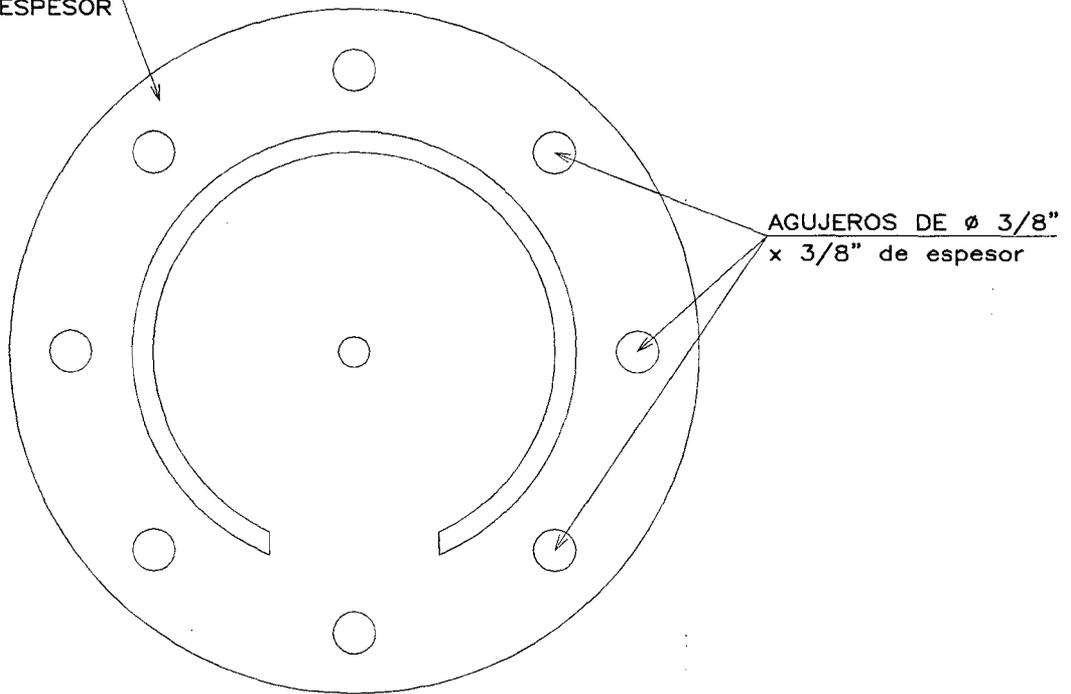
NIPLE DE Fe
GALVANIZADO DE
2" x 2"

CODO DE Fe GALVANIZADO
90° x 2"

PROYECTO: BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"						
UBICACION: ANEXO: SHIPARÁ		PLANO: DETALLE 02			LAMINA: D-02	
DISTRITO: SAN NICOLAS	PROVINCIA: ROD. DE MENDOZA	REGION: AMAZONAS	DIS: Barrena, Salazar	PAGINA: 69	FECHA: DIC-2011	

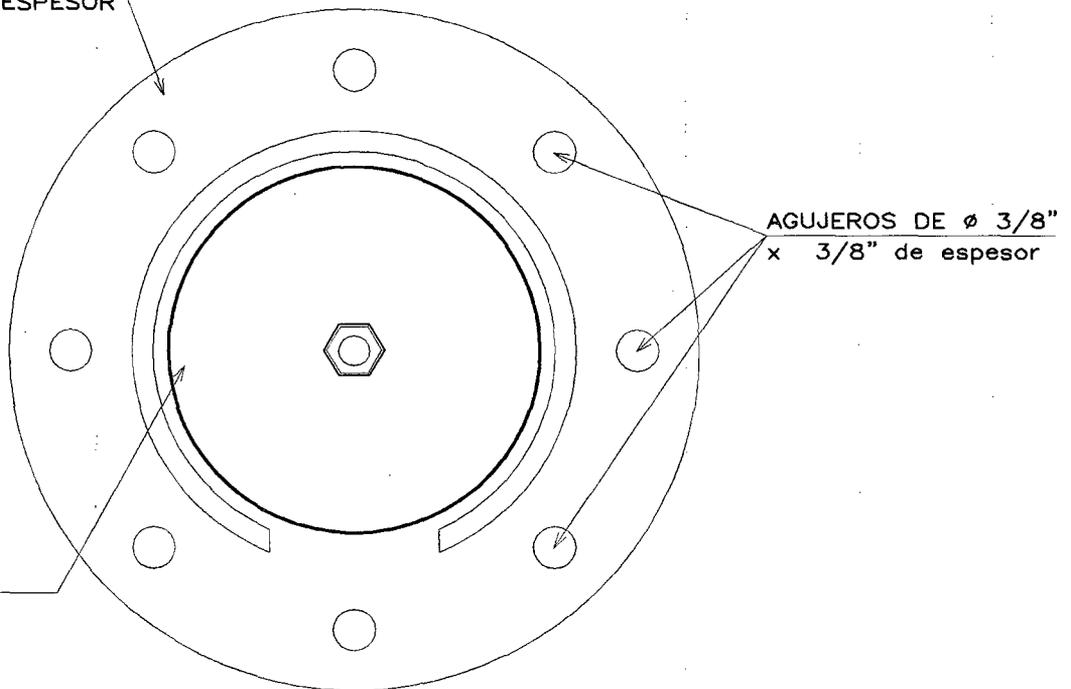
DETALLE 03

EMPAQUETADURA ENLONADA
Ø 0.15 m 3/16 " ESPESOR



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

EMPAQUETADURA ENLONADA
Ø 0.15 m 3/16 " ESPESOR



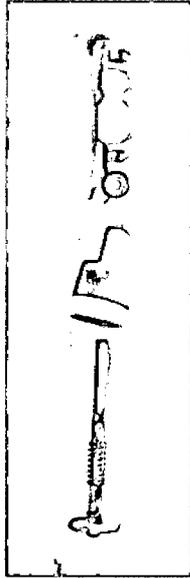
VISTA SUPERIOR DE LA EMPAQUETADURA DE JEBE Y LONA QUE SIRVE PARA SELLAR LA ENTRADA DE AGUA AL TANQUE DE COMPRESION DEL AIRE TIENE EMPERNADO UN DISCO DE METAL QUE AYUDA A SU CIERRE.

PROYECTO: BOMBA DE ARIETE HIDRAULICO DE 2"					
UBICACION: ANEXO: SHIPARA		PLANO: EMPAQUETADURA ENLONADA		LAMINA: D-03	
DISTRITO: SAN NICOLAS	PROVINCIA: ROD. DE MENDOZA	REGION: AMAZONAS	DIS: Barrena, Salazar	PAGINA: 70	FECHA: DIC-2011

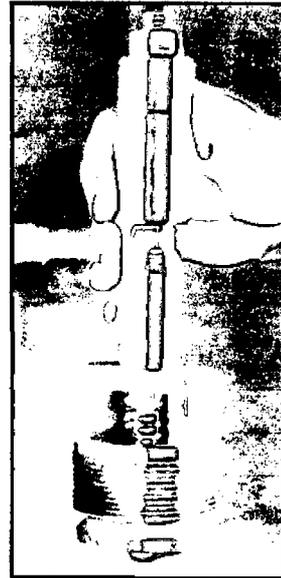
ANEXO 2

Secuencia fotográfica del ensamble de la bomba de ariete hidráulico

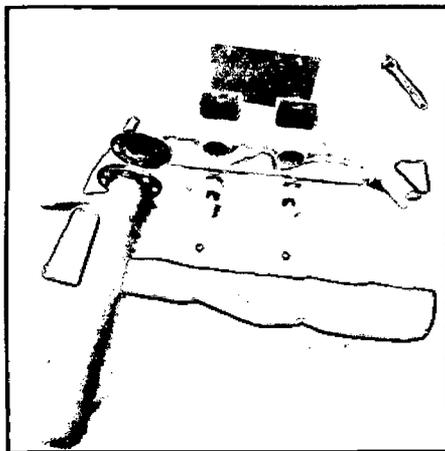
Prototipo INDES 111



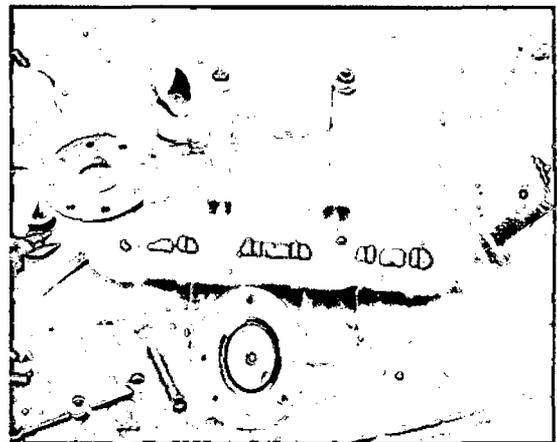
Fotografía 6. Válvula de cierre desmontada.
con resorte



Fotografía 7. Válvula de cierre



Fotografía 8. Cuerpo de la bomba de ariete.



Fotografía 9. Válvulas instaladas.



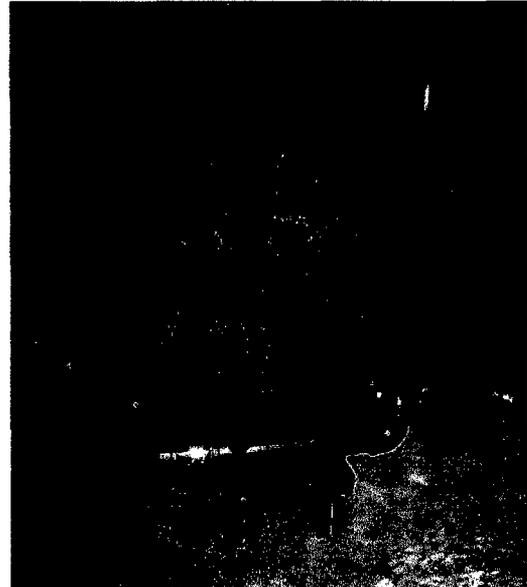
Fotografía 10. Tanque de compresión de aire y tubo de descarga de 1"



Fotografía 11. Empaquetadura de jebe y lona de la válvula de descarga (check) con contrapeso empernado



Fotografía 12. Forma en la que abre la Válvula de descarga



Fotografía 13. Bomba de ariete ensamblada

ANEXO 3

Secuencia fotográfica del sistema de bombeo instalado



Fotografía 14. Medición del caudal proporcionado por el embalse.



Fotografía 15. Medición del caudal proporcionado por el tanque de alimentación.

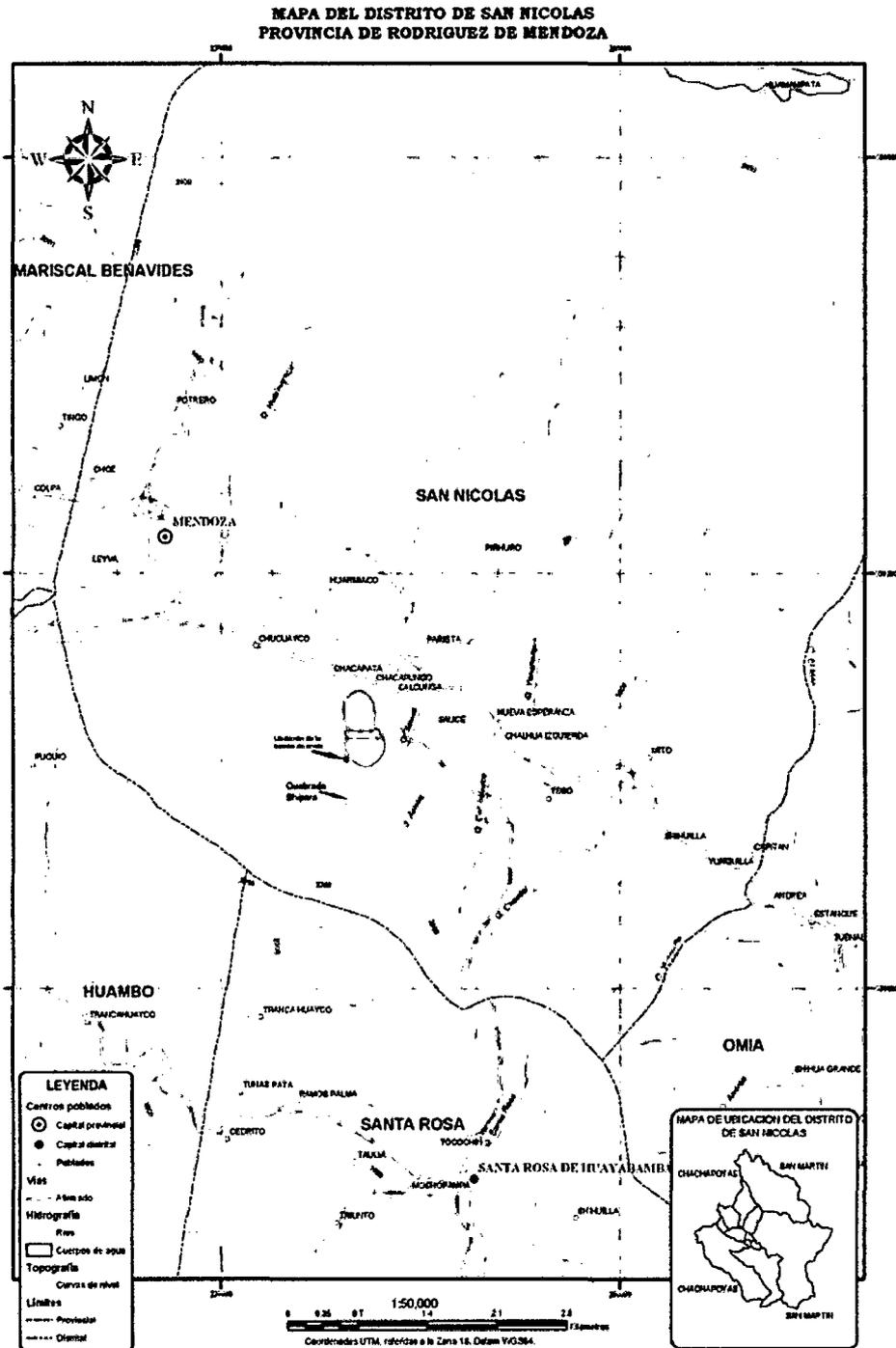


Fotografía 16. Bomba de ariete funcionando.



Fotografía 17. Medición de caudal bombeado.

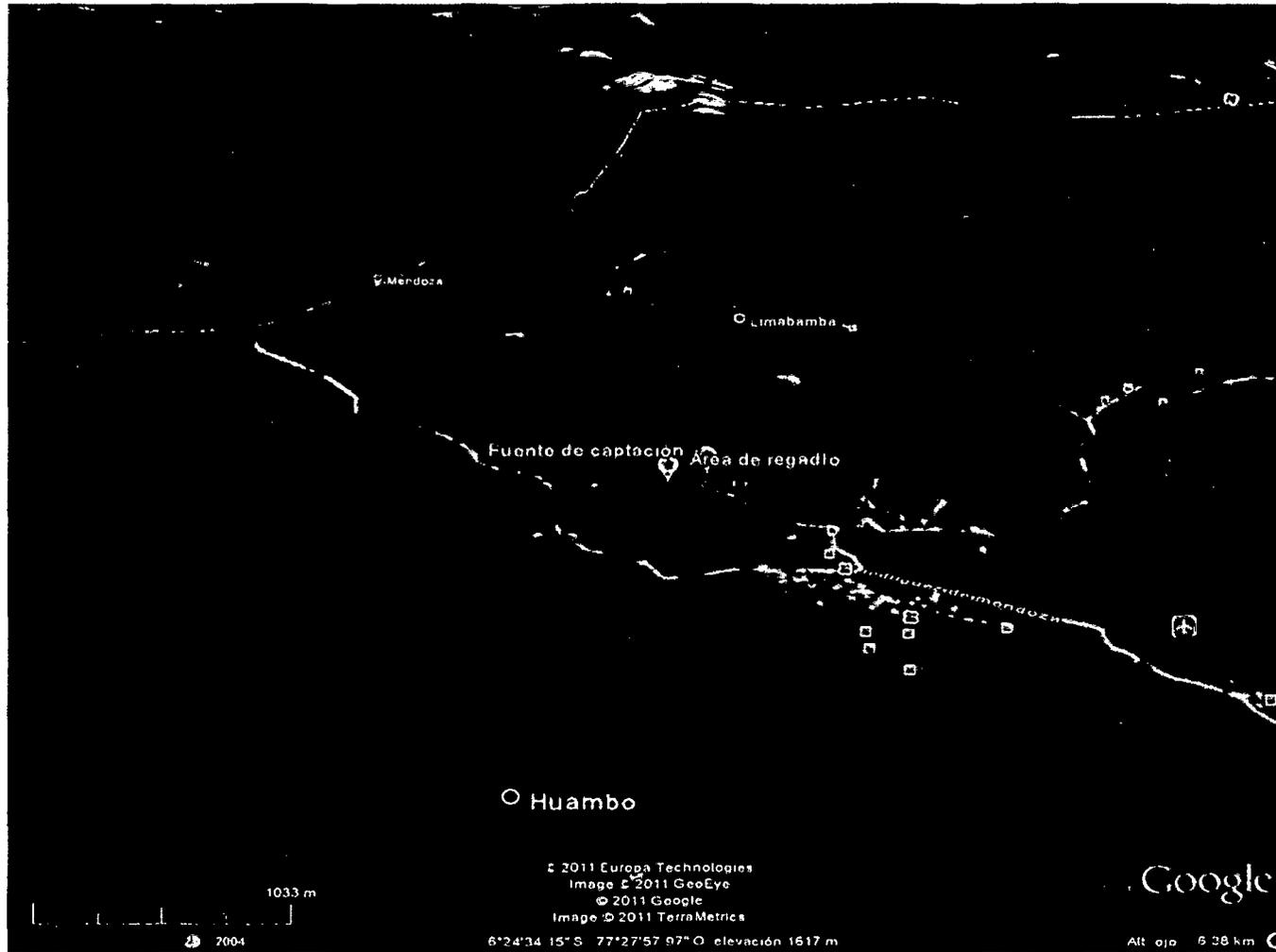
Fotografía 18. Mapa distrital San Nicolás, Provincia Rodríguez. de Mendoza.





Fotografia 19. Parcelas de café.

Fotografía 20. Punto de ubicación de la bomba de ariete instalado



Fotografía 21. Punto de ubicación de la bomba de ariete instalado

