

9

Diseño de un prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor de abastecimiento de agua para irrigación

Fran Reinoso¹, Augusto Bustamante², Manuel Quezada²

1. Introducción

A pesar que en Ecuador se ha venido empujando la difusión de las tecnologías de energías renovables desde la década de los ochenta y, de que en la actualidad existen esfuerzos del Ministerio de Energía y Minas con fondos propios o del Banco Mundial, ONG, universidades y aun de empresas privadas, no se puede decir que éstas se encuentren difundidas y contribuyendo de manera significativa al mejoramiento de la calidad de vida de la población rural. La hidroelectricidad es la energía renovable más difundida en el Ecuador y su potencial es aún poco explotado; razón por la cual, cada vez es más necesario integrar decididamente fuentes de energía limpias y renovables, que por sus ventajas sean un sustituto a formas de energías que día a día van escaseando y tienen un impacto ambiental negativo global, como aquellas desarrolladas a partir de los hidrocarburos.

El bombeo de agua y la energía renovable son socios naturalmente compatibles que pueden crear soluciones económicas para cualquier aplicación de bombeo y transporte de agua, ya sea para consumo humano o

1 Director del Proyecto de Investigación, Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador.

2 Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, Ecuador

riego. La fuerza que mueve el equipo de bombeo, que es una rueda hidráulica por ariete hidráulico, es definitivamente un arroyo, un canal u otra forma de corriente de agua que pueda suministrar la energía suficiente para bombear a alturas superiores; de igual manera el viento es otro medio, que proporciona la fuerza necesaria para que sistemas de bombeo eólico operen.

En el mismo sentido, la actividad agropecuaria en el Ecuador sin vías expeditas, sin servicios de transferencia tecnológica, sin capacidad de valor agregado y sin capacitación; no logrará el impulso necesario para mejorar sus niveles de participación en el producto interno bruto del país, ni tampoco alcanzará niveles de competitividad nacional e internacional.

En este contexto; el riego viene a ser el factor técnico preponderante para el desarrollo de la agricultura, por lo que es una necesidad implementar sistemas eficientes para conseguir que el sector agroindustrial se convierta en un polo de desarrollo socioeconómico del país. Uno de los factores principales que limita la actividad productiva del sector rural, es por un lado, la falta de sistemas de riego técnicamente implementados; y, por otro, el costo de operación de los sistemas de bombeo de agua convencionales usados generalmente, lo que ocasiona un incremento en los costos de producción. Sumado a esto, en la zona sur del país y en particular en la provincia del Azuay, aproximadamente el 60% de terrenos cultivables tienen una pendiente no menor a 40°, haciendo que las actividades productivas sean cada vez menos rentables, lo que conlleva al abandono del campo.

2. Materiales y métodos

2.1 Análisis de la zona de estudio para el dimensionado del sistema de bombeo mediante ariete hidráulico

Se procede a identificar las instituciones y organizaciones relacionadas con la agricultura y el riego en la región austral del país. En vista de que la información técnica obtenida es insuficiente para poder estandarizar y definir los datos de partida para el diseño del prototipo de bomba de arie-

te hidráulico, se ha optado por la alternativa de definir una zona específica para el estudio del proyecto.

Aprovechando que paralelamente se desarrolla un proyecto para el cultivo de hortalizas y otros productos en zonas con grandes pendientes, precisamente en los predios de la Universidad Politécnica Salesiana Campus Yumacay de Paute, y en vista de la presente necesidad de riego y análisis de los requisitos indispensables como: zona de cultivo, un caudal firme de agua y salto hidráulico aprovechable para garantizar la sostenibilidad en el tiempo de los cultivos. Yumacay viene a constituirse en una alternativa viable para el desarrollo del proyecto de investigación, la planimetría de la zona se muestra en la figura 1.

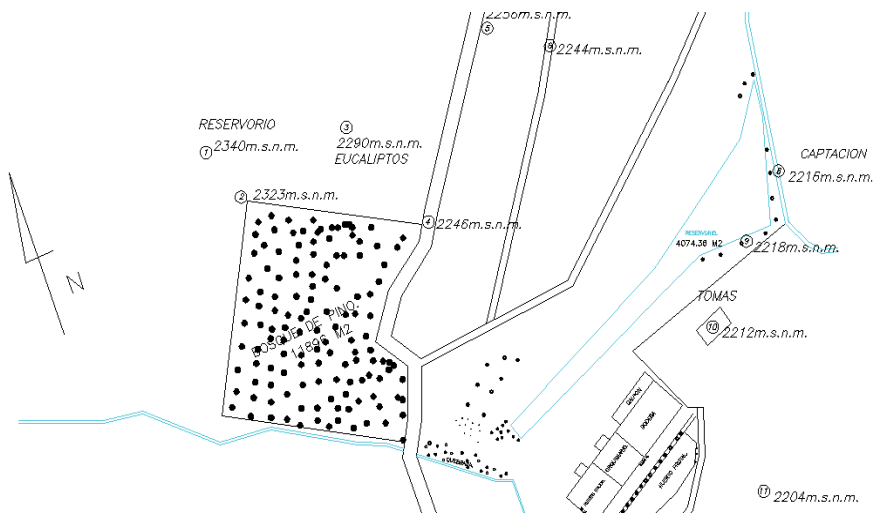


Figura 1. Planimetría de la zona de Yumacay - Paute

La zona de Yumacay dispone 10 hectáreas de terrenos para ser cultivados, con pendientes de aproximadamente del 40° y alturas entre 50 y 150 m sobre el nivel de la captación de agua, de aproximadamente 40.000 m³ construido en la parte baja de la zona en estudio, el embalse está alimentado por la quebrada Yumacay.

2.2 Determinación de alturas y caudal instalado de la zona de estudio

Se procede a realizar mediciones preliminares de altura y longitudes de emplazamiento en todas las inmediaciones del sitio seleccionado, aguas arriba y aguas abajo del embalse existente, volumen y captación de agua, área de cultivo, sitio de emplazamiento posible del sistema y otros. Para el efecto se utilizó el método de determinación de hitos mediante GPS (*Global Position System*), para la determinación de longitudes se utilizaron además cintas métricas y flexómetros; concluyendo con la elaboración de una planimetría de la zona Yumacay, mostrada en la figura 1.

Para la determinación del caudal instalado se utilizó un método de medición volumétrico, instalando aguas arriba del embalse un vertedero metálico triangular de 90° (ver figura 2) con el objeto de realizar el aforo de caudal en la quebrada Yumacay, en el mismo que se han monitoreando los valores de caudal y posibilitó definir los datos de partida para el diseño (Q, H) del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor.



Figura 2. Medición del caudal de quebrada Yumacay- Vertedero Triangular de 90°

De esta forma se determinó que la altura aprovechable, también conocida como salto hidráulico es de 12 m, superando así las expectativas de diseño que son de 3 a 5 m, se determina una altura de descarga de 120 m, una distancia de bombeo 760 m y finalmente una distancia de alimentación 30 m superando también los valores de diseño que son de 6 a 12 m.

El aforo del caudal de la quebrada Yumacay realizada durante doce meses durante el año 2007, de cuatro mediciones por mes, con la técnica de vertedero triangular, para obtener una hidrógrafa anual del año 2007 como se muestra en la figura 3.

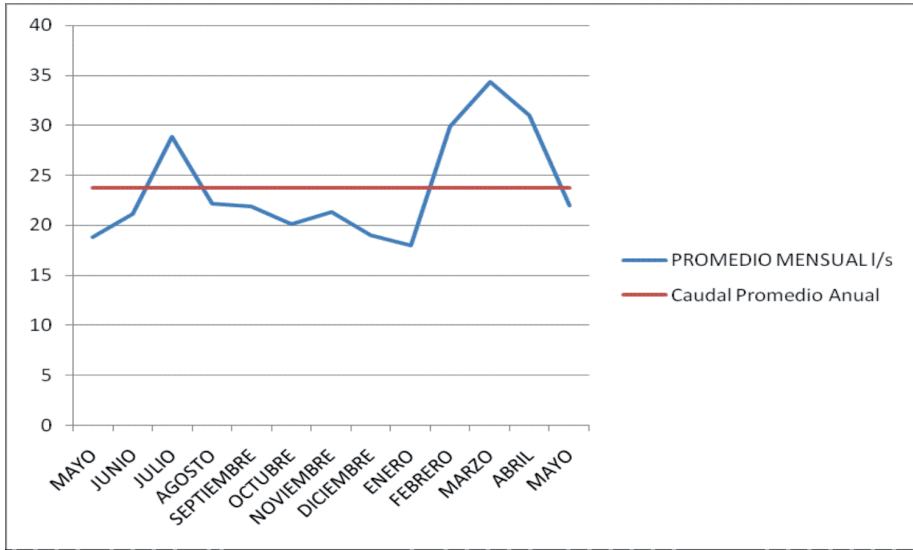


Figura 3. Hidrógrafa Anual 2007 - Quebrada Yumacay, los valores máximos en crecida son de 34 [l/s], y los mínimos en época de estiaje son de 17 [l/s]

Con estos datos se calculó que el caudal promedio es de aproximadamente 23 l/s; para la operación del ariete hidráulico se requieren 5 l/s que significa únicamente el 30 % del caudal instalado.

2.3 Diseño hidráulico y mecánico del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor

2.3.1 El procedimiento de cálculo

Con los datos de partida reales de alturas de bombeo y caudal aprovechable; se realiza una investigación bibliográfica exhaustiva para establecer el procedimiento de cálculo idóneo, que permita definir los diferentes

parámetros hidráulicos que intervienen en la operación del prototipo de bomba de ariete hidráulico, así como las dimensiones generales para su construcción. Con la intención de agilizar el análisis, se sistematizó mediante software (Excel) el proceso de cálculo y dimensionado de la bomba de ariete hidráulico multipulsor.

El dimensionado de la bomba de ariete hidráulico multipulsor, se ha desarrollado a partir de los lineamientos del procedimiento de cálculo a detalle establecido de la bibliografía recomendada, obteniéndose una longitud de tubería de impulsión de 30 m, un ángulo de inclinación de 10° , la velocidad de flujo en la tubería de alimentación es de 2,29 m/s, el diámetro de entrada del aceite es de 50,8 mm, y el caudal circulante calculado fue de $0,004639 \text{ m}^3/\text{s}$.

Acercas del diámetro de la válvula check, de descarga y, de la cámara de aire, fueron de 1, 1 y 3 pulgadas respectivamente; la altura de cámara de aire fue de 10 pulgadas. El número de Reynolds fue de 102045,61 que indicaba un régimen turbulento, la rugosidad relativa se determinó en 333,33 y el factor de fricción fue de 0,0322.

Las pérdidas por fricción en la tubería de alimentación fueron de 5,33 m, el diámetro del eje de la válvula de impulsión se calculó en 8 mm, con un área de derrame total de $5,3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. La velocidad de salida de las válvulas fue de 1,44 m/s con un ciclo de duración de 1 s en el que se bombeaba un caudal de $3,8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Los cálculos determinaron que la presión dinámica fue de 1036,8 Pa, el pulso de Zhukovsky de 1,84 MPa, con presión máxima y mínima de 1,88 MPa y 1,78 MPa, con una sobrepresión de 187,88 m. Así, la celeridad de onda de presión fue de 1274,55 m/s, el tiempo de cierre de la válvula fue de 0,047 s, y el coeficiente de arrastre de la válvula de impulsión de 32,8.

En cuanto a la válvula de impulsión su peso fue de 1,05 kg, su coeficiente de arrastre fue de 32,8, soportando una fuerza hidráulica de 4,23 kg. El volumen total de la cámara de aire fue de $6,44 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ que soporta una presión antes del choque hidráulico de 1,08 MPa.

En la cámara de aire, se determinó que el volumen total de agua fue de $2,7 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ con un volumen de aire inicial y final de $3,64 \times 10^{-3}$ y $3,72 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ respectivamente, la presión soportada fue de 1,09 MPa.

En lo que se refiere al conducto vertical, se calcula una velocidad de 0,806 [m/s], donde el número de Reynolds fue de 13468 generándose también un régimen turbulento, con una rugosidad relativa de 63500, y pérdidas inerciales de 8,21 m. El factor de fricción de la tubería de descarga fue de 0,0286.

Con estos parámetros calculados, el ariete desarrolla una altura mínima de 113,18 m, con una eficiencia de bomba del 19%, y un rendimiento volumétrico del 0,844%.

2.3.2 El proceso de diseño mecánico

Basándonos en los resultados obtenidos del proceso de cálculo, se realiza el dibujo técnico (plano de conjunto y particulares) del Prototipo de Bomba de Ariete Hidráulico, utilizando el Software de diseño mecánico Inventor Auto Desk. El esquema del prototipo se muestra en la figura 4.

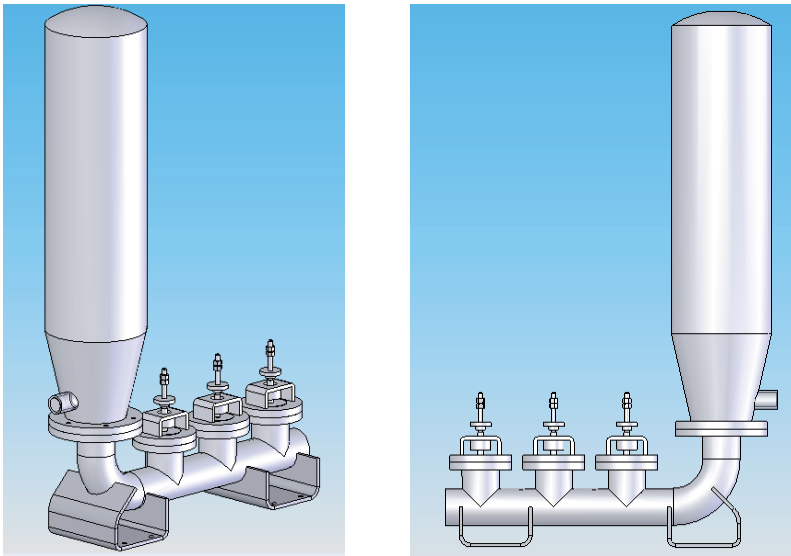


Figura 4. Perspectiva de Prototipo de bomba de Ariete Hidráulico Multipulsor

Los resultados del proceso de modelado del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor, permitieron la comprobación de resultados del proceso de cálculo antes de su construcción; en lo referente a definir presiones totales, presiones dinámicas sobre las válvulas y velocidades del flujo en los diferentes elementos de la bomba. Los valores se muestran a en la Tabla 1:

Tabla 1. Datos comparativos de proceso de modelado

Ítem	Descripción/variable	Valor (Pa, m/s)	Valores de diseño (Pa, m/s)
01	Presión estática cámara de aire	0,42 MPa	1,09 MPa
02	Presión dinámica válvulas de impulsión	1000 Pa	1036,8 Pa
03	Velocidad en la cámara de aire	0,24 m/s	-
04	Velocidad en válvula de impuso	1,49 m/s	1,44 m/s
05	Velocidad en la brida de entrada	2,48 m/s	2,29 m/s
06	Velocidad en brida de descarga	1,24 m/s	1,66 m/s

2.3.2 El modelado hidráulico

Para tener una primera aproximación del comportamiento mecánico e hidráulico del prototipo de ariete hidráulico, antes de materializarlo en su construcción; fue necesario realizar el modelado de la operación en lo referente a presiones y velocidades del flujo; para el efecto se utilizó el software Cosmos Flow Auto DesK, las figuras 5, 6, y 7 muestran como éste software ofrece el modelo hidráulico, el diagrama de presiones dinámicas y el diagrama de las velocidades en la cámara de aire del ariete hidráulico.

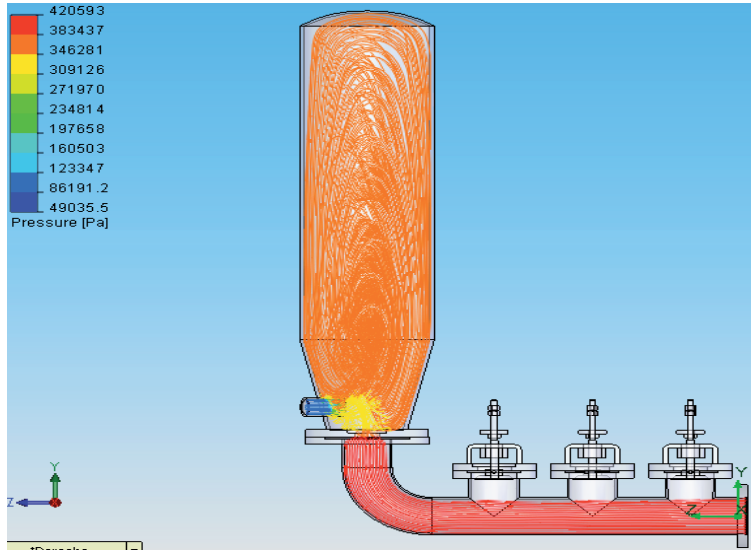


Figura 5. Modelado hidráulico de prototipo de Ariete Hidráulico-Presiones

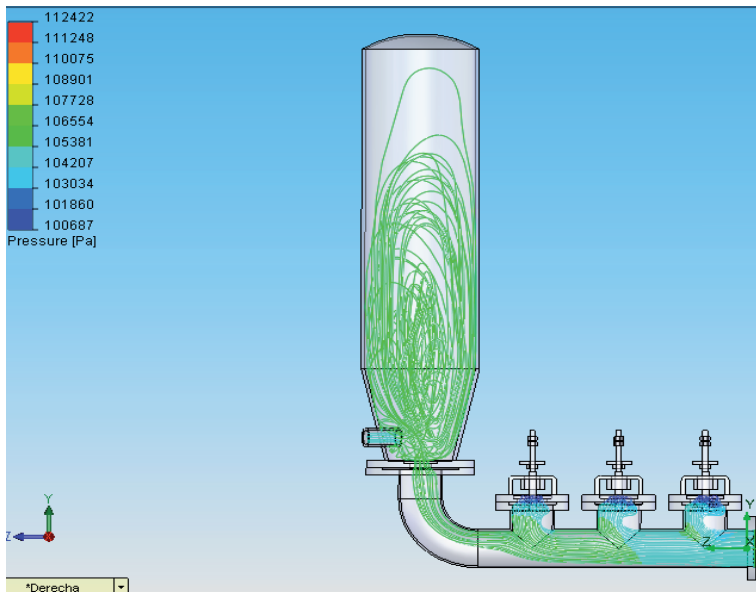


Figura 6. Diagrama de presiones dinámicas de cámara de aire de Ariete Hidráulico

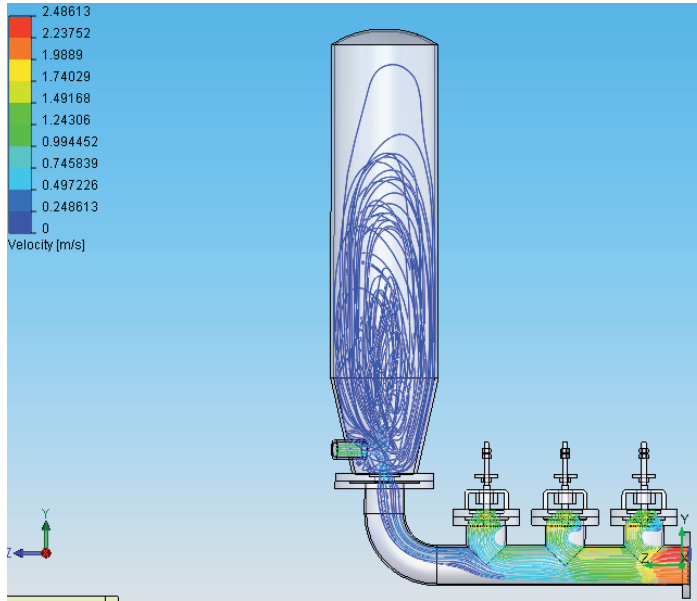


Figura 7. Diagrama de velocidades de cámara de aire de Ariete Hidráulico

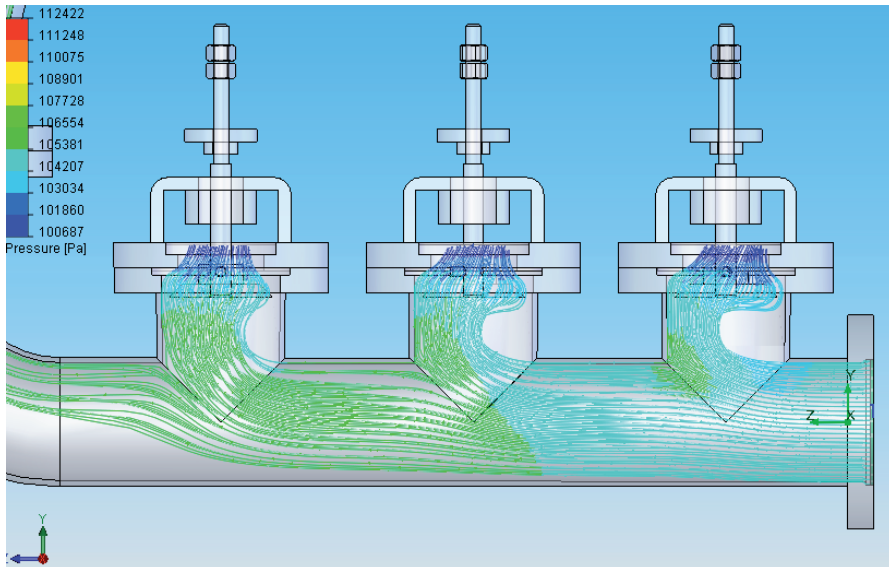


Figura 8. Diagrama de presiones dinámicas de válvulas de impulsión de Ariete Hidráulico

Las figuras 8 y 9 muestran los diagramas de presiones dinámicas y de velocidades en las válvulas de impulso de ariete hidráulico en detalle. Como se puede apreciar, la presión de salida aumenta decididamente al final de la tubería de las válvulas.

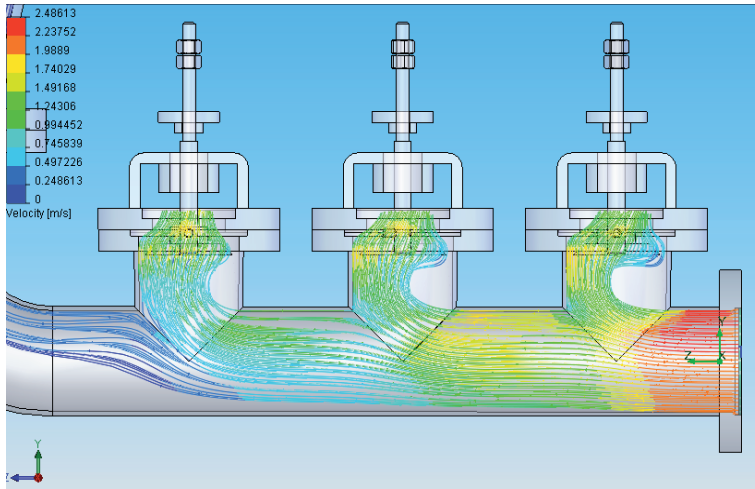


Figura 9. Diagrama de velocidades en válvulas de impulso de Ariete Hidráulico

2.4 Construcción del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor

La construcción del prototipo de bomba de ariete hidráulico, se llevó a cabo en su totalidad en los laboratorios de la Facultad de Ingenierías de la UPS-Cuenca (ver figura 10); este proceso involucró actividades como la adquisición y empleo de materiales económicos existentes en el medio, de los cuales se mencionan tubos galvanizados de acero de diámetro de 2'' x 500 mm y 5'' x 600 mm, tres Ac. de transmisión galvanizado de diámetro 4'' x 20 mm y dos de 8'' x 30 mm, cuatro Ac. inoxidables de diámetro 1 _ '' x 30 mm y tres de 3/8'' x 100 mm, cuatro bronce forsfóricos de 1'' x 50 [mm] de diámetro y una platina galvanizada de 5'' x 3'' x 500 mm.

Además, se incluyen de 30 barras de plomo de 140 g para pesa, válvula e impulso, una balanza electrónica de capacidad 2 kg, y un cronómetro digital. El proceso de construcción incluye el mecanizado de particulares, el tratamiento superficial de galvanizado, el montaje y puesta a punto (control de estanqueidad de válvulas).



Figura 10. Proceso de construcción de prototipo de Ariete Hidráulico

2.5 Diseño y construcción del banco de pruebas de Golpe de Ariete

En un primer momento, se realiza la construcción de partes y adecuaciones mecánicas del banco para pruebas de golpe de ariete (ver figura 11); utilizando partes del equipo existente (tanque hidrodinámico) en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos del la Carrera de Ingeniería Mecánica de la UPS, Sede Cuenca. El banco de pruebas consta de dos tanques plásticos de 1 m³, un tanque plástico de 500 cm³, doce metros de tubería galvanizada de 2'' de diámetro, treinta metros de tubería de PVC de diámetro

de 1/2", dos manómetros con capacidad de 0 a 20 bares, dos pares de válvulas esféricas de 2" y 1" pulgadas, una válvula de aguja de 1/2", un canal vertedero, una bomba centrífuga con caudal de 50 l/min, un motor trifásico de 2 hp y 1740 rpm y por último un relé térmico de 220 V y 10 A.

Al mismo tiempo, se ha realizado la automatización completa de dicho banco de pruebas; con lo cual es posible controlar y medir las diferentes variables como: caudal, presión y revoluciones del motor de la bomba.



Figura 11. Banco para Pruebas de Golpe de Ariete- Tanque Hidrodinámico

Luego de las pruebas de operación y debido a la imposibilidad de manejar de manera independiente las variables de caudal, altura y la estabilidad en la operación de la bomba de ariete hidráulico; se realiza variantes al banco de pruebas desarrollando un nuevo diseño, manejando las condicionantes anteriores; para lo cual se construye un depósito de una

capacidad y salto hidráulico determinado, se instalan los instrumentos y dispositivos para la medición del caudal y altura de operación; y además, se cuenta con un sistema cerrado de bombeo par garantizar la operación permanente del sistema, tal como se muestra en la figura 12.



Figura 12. Banco para Pruebas de Bomba de Ariete Hidráulico

2.6 Determinación de las características de funcionamiento del prototipo de bomba de ariete hidráulico multipulsor

En esta etapa final de la investigación, se pretende obtener las curvas características de comportamiento de la bomba de ariete hidráulico multipulsor (ver figura 13); principalmente la curva motriz caudal-altura ($H-Q$) y la curva de rendimiento ($1/2-Q$), en diferentes condiciones de operación; esto significa, la determinación de las características de funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico operando con una, dos y tres válvulas de impulso.

Para el efecto, se utilizó el método de regulación a la descarga, mediante una válvula de aguja colocada en la tubería de impulsión, con la cual a diferentes aperturas de la válvula se obtuvieron los valores de altura y caudal. La altura o presión de descarga H se mide mediante un manómetro instalado en la cámara de aire de la bomba de Ariete Hidráulico y para la medición del caudal Q , se emplea un canal abierto y vertedero triangular.



Figura 13. Banco para pruebas de bomba de ariete hidráulico multipulsor

Para garantizar la operación continua del banco de pruebas, se dispone de un reservorio de purgas, conectado al reservorio mediante un circuito cerrado de bombeo, en donde se recolecta el volumen de agua desalojado en la etapa de impulso de la bomba de ariete hidráulico y el caudal de entrega de la misma. Al mismo tiempo se garantiza de esta manera mantener un salto hidráulico H constante durante el desarrollo de las diferentes pruebas.

El proceso de ejecución de pruebas de laboratorio de la bomba de ariete hidráulico, contempla la obtención de la curva motriz Altura - Caudal (H-Q) de la Bomba de Ariete para una, dos y tres válvulas. El esquema de la instalación utilizado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca; para la ejecución de las pruebas de operación mencionadas anteriormente, se muestra en la figura 14.

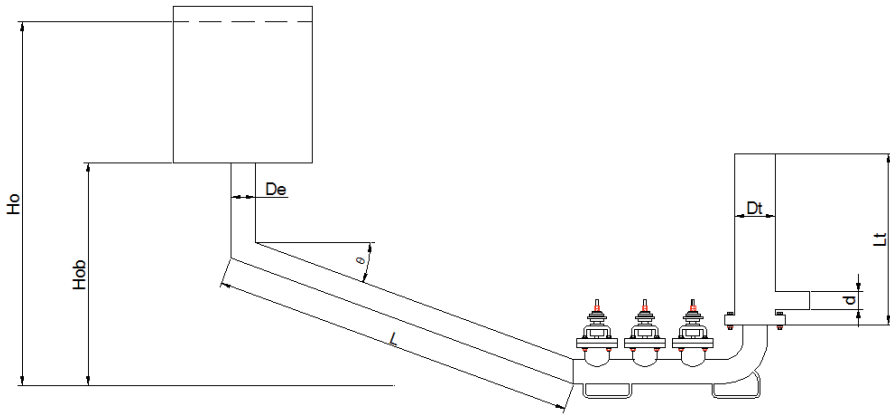


Figura 14. Esquema de instalación de banco de pruebas de ariete hidráulico

Las variables principales de entrada para el análisis y la obtención de las curvas de operación de la bomba se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Variable de entrada de banco de pruebas de ariete hidráulico

Descripción/variable	Símbolo	Dimensión
Altura desde la bomba hasta la superficie del agua.	Ho	3 metros
Altura desde la bomba hasta la base del tanque.	Hob	2 metros
Largo de la tubería.	L	6 metros
Diámetro de la cámara de aire.	Dt	5 pulgadas
Ángulo de inclinación de la tubería.	q	30 °
Diámetro tubería de descarga.	D	1/2 pulgada
Altura de cámara de aire.	Lt	0,46 metros
Diámetro de tubería de entrada.	De	2 pulgadas

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para el ensayo hecho a la bomba de ariete hidráulico, con un peso de 1.400 g y una carrera de 3 mm:

Tabla 3. Datos de Curva H – Q de la bomba de ariete para una válvula

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [lt/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	4,2	0
2	0,1092557	2,7	0,004
3	0,1638836	2	0,009
4	0,1969635	1,5	0,013
5	0,2185114	1	0,016
6	0,2443032	0,2	0,02

Tabla 4. Datos de Curva H - Q de la bomba de ariete para dos válvulas.

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [lt/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	12,3	0
2	0,1221516	8,5	0,005
3	0,1445317	7,41	0,007
4	0,1545109	6,8	0,008
5	0,1727484	5,38	0,01
6	0,2043987	3,04	0,014
7	0,2443032	0	0,02

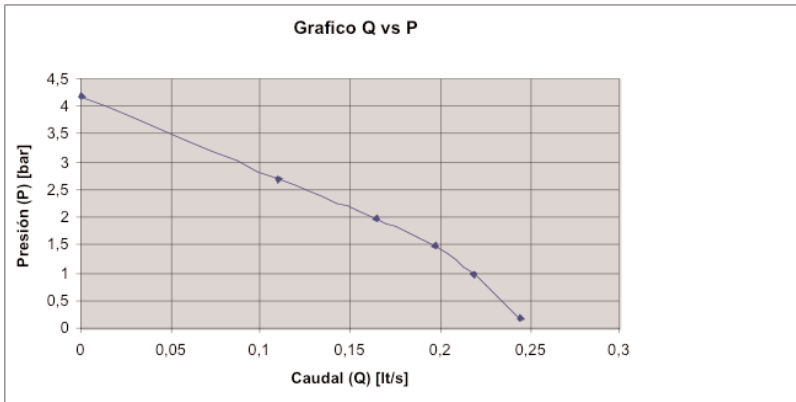


Figura 15. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico con una válvula de impulso

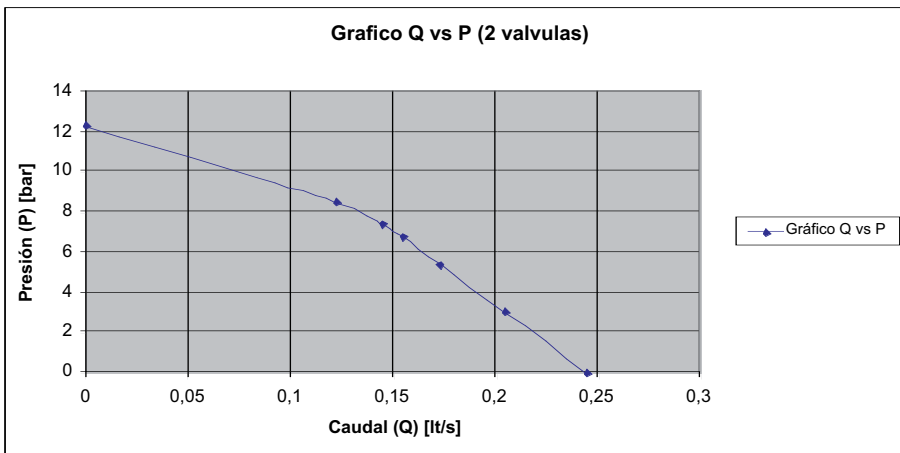


Figura 16. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico, 2 válvulas de impulso

Tabla 5. Datos de Curva H - Q de la bomba de ariete para tres válvulas.

MEDICIÓN	CAUDAL (Q) [m3/s]	PRESIÓN (P) [bar]	PULSOS [n/s]
1	0	13,5	0
2	0,1221516	8	0,005
3	0,1545109	6,5	0,008
4	0,1727484	5,5	0,01
5	0,1811801	4,5	0,011
6	0,1892364	4	0,012
7	0,2043987	2	0,014
8	0,2115728	0	0,015

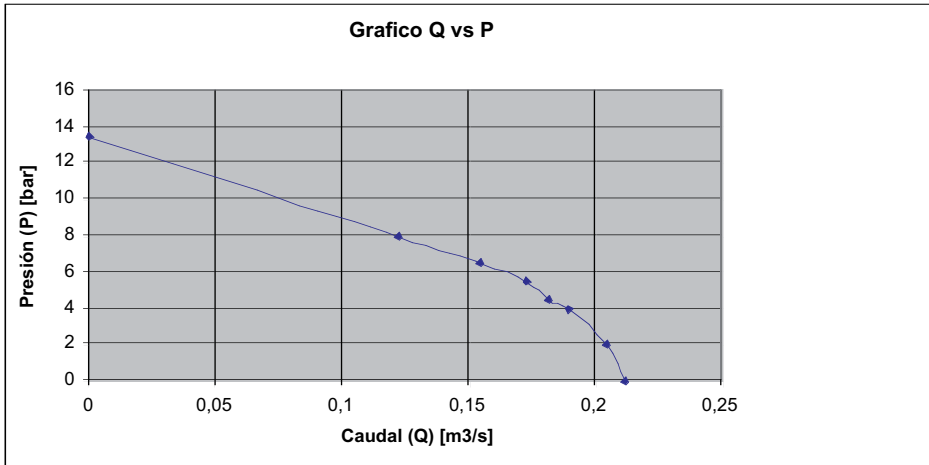


Figura 17. Curva característica motriz H-Q de la bomba de ariete hidráulico, 3 válvulas de impulso

3. Resultados

La presión máxima, obtenida con caudal cero, del ariete multi-impulsión en condiciones convencionales, es decir, con sólo una válvula de impulsión, es de 4,2 bar ó 42 m, en relación con la presión obtenida con 2 válvulas que es de 12,3 bar ó 123 m y para 3 válvulas que tenemos una presión máxima de 13,5 bar ó 135 m, lo que indica que existe una clara mejora en la sobrepresión, con la adición de válvulas en serie, es decir con una mejora en el diseño mecánico.

Acerca del punto de trabajo óptimo, se determinó que al tener una válvula y 3 m de altura de entrega ya que se obtienen entre 20 y 27 m de altura para la descarga, acumulando entre 46 y 140 litros por día; para 2 válvulas la altura se encuentra entre 85 y 60 m para la descarga obteniendo un almacenaje entre 60 y 95 litros por día, y para 3 válvulas es entre 100 y 65 m en este rango se puede acumular una cantidad de entre 60 y 117 litros por día.

La válvula check cumple un papel fundamental en el momento de conservar las condiciones de presión máxima entregada por la máquina, por lo que el diseño de la misma deberá registrar una eficiencia muy alta, ya que esta es la encargada de acumular el agua en la cámara de aire, además, se debe conservar siempre el nivel del agua en el tanque de alimentación ya que si no se lo conserva los resultados obtenidos no van a ser los reales, ya que según el teorema de Bernoulli la diferencia de nivel ya no va a ser la misma.

4. Recomendaciones

Es necesario que las investigaciones realizadas en el área de las energías renovables, cuyo alcance fue lograr construir prototipos, se implementen en el sitio seleccionado, donde se generó la información técnica necesaria para los diseños; a fin de presentar a la sociedad un modelo de parque hidráulico, que en la práctica se constituya en alternativas de solución para el riego de cultivos. Caso contrario, el esfuerzo comprometido en las investigaciones desarrolladas, no alcanzará el fin último que es el servicio a la comunidad.

Bibliografía

STRETER Victor

1996 *Mecánica de fluidos*. Mc Graw –Hill, Tercera edición, México 1996.

MATAIX, Claudio

Mecánica de fluidos y Máquinas Hidráulicas, Edit. del Castillo, 2da Edición, Madrid.

E RUSSEL, Johnston Jr.

1998 *Mecánica de materiales*, Mc Graw-Hill, Segunda Edición, Santa fe Bogotá.

1961 *Pipe Friction Manual*, Hydraulic Institute, New York.

Plan estratégico del austro, UPS.

III CENSO NACIONAL AGROPECUARIO-DATOS Azuay-ECUADOR INEC-MAG-SICA.

Páginas Web

http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/c-uso_de_suelo.doc

<http://www.sica.gov.ec/agronegocios/Biblioteca/Ing%20Rizzo/agricultura/principal.htm>

<http://uazuay.edu.ec/promsa/metadatos/g-agricultura.doc>

<http://www.bae.ncsu.edu/bae/programs>

<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia25/HTML/articulo05.htm>

<http://www.mer.gov.ec/pagina/ministerio.htm>

