



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA INDEPENDIENTE

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**“ESTUDIO DE FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA
DE ARIETE Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA”**

AUTOR:

Egdo. Raúl Fernando Galarza Chacón

TUTOR:

Ing. Alex Mayorga

AMBATO-ECUADOR
2013

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del trabajo de investigación, bajo el tema “ESTUDIO DE FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA DE ARIETE Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA”, desarrollado por el estudiante Raúl Fernando Galarza Chacón, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, considero que dicho informe investigativo reúne los requisitos suficientes para ser sometido a la evaluación del Tribunal Examinador designado por el Consejo Directivo de esta Facultad.

EL TUTOR

.....
Ing. Alex Mayorga

AUTORÍA DEL TRABAJO DE GRADO

Declaro que los criterios expresados en la investigación denominada “ESTUDIO DE FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA DE ARIETE Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA”, así como también las ideas, análisis, conclusiones y propuesta son auténticas y de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor de la presente investigación de grado.

EL AUTOR

.....
Egdo. Raúl Fernando Galarza Chacón
C.I. 180433399-3

DEDICATORIA

Todo esfuerzo realizado con amor y dedicación tiene su recompensa; el mismo que tiene una inspiración:

- ✚ El presente trabajo está dedicado a Dios por permitirme cumplir mis metas y sueños.
- ✚ A mis padres Raúl y Leonor allá en el cielo; sé que ellos estarían felices de mis logros, ya que su anhelo fue que culmine mi carrera Universitaria.
- ✚ A mí querida abuelita Cenelia, mi segunda madre que con amor y sacrificio me ha ayudado a superarme.
- ✚ A mi hermanito David, por quien siempre saldré adelante, pues él, es mi más grande inspiración y mi fuerza espiritual para lograr todas mis metas y anhelos.
- ✚ A mi querido tío “Pepito” Chacón, por su apoyo incondicional y estar junto a mí en los momentos de alegría y tristeza. Gracias por sus sabios consejos y paciencia.
- ✚ Al Sr. Dr. Luis Noé Mayorga y a su esposa Dra. Cecilia Gavilanes, por darme su apoyo constante sin esperar nada a cambio y sobre todo por enseñarme a vivir.
- ✚ A mi amigo Oscar, por ser un verdadero hermano y enseñarme que todo se puede cuando tenemos a Dios en nuestra vida.
- ✚ Y a todas aquellas personas que fueron parte importante de mi vida y se involucraron directa e indirectamente, para que mi sueño profesional se cumpla.

Raúl Fernando

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento profundo y reiterativo a Dios por haber hecho posible en mí el sueño profesional tan anhelado.

- ✚ Al Ing. Alex Mayorga tutor y guía del presente trabajo, con quien he aprendido que el trabajo duro y la constancia rinden sus frutos, gracias por su dedicación y tiempo brindado para sacar adelante la presente tesis.
- ✚ A los Ingenieros Miguel Ortiz y Hernán Torres, por compartir sus sabios conocimientos en la parte técnica de este trabajo.
- ✚ Como no mencionar el gran agradecimiento que tengo a la Universidad Técnica de Ambato y a mi tan apreciada Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por haber sido mi segundo hogar de formación y por haberme abierto las puertas para llenarme de conocimientos, gracias a todos aquellos profesores que fueron parte de mi formación profesional, por sus sabias enseñanzas, estoy seguro que me serán útiles en mi vida profesional.
- ✚ Un agradecimiento profundo a mis hermanos, amigos y demás familiares por el apoyo incondicional y por la confianza en mí brindada, para que pueda realizarse esta meta en mi trazada.

Gracias a todos

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PÁGINAS PRELIMINARES

Página del título.....	I
Página de aprobación por el tutor.....	II
Página de autoría de la Tesis.....	III
Página de dedicatoria.....	IV
Página de agradecimiento.....	V
Índice de Contenidos.....	VI
Índice de gráficos y tablas.....	X
Resumen Ejecutivo.....	XVI

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.2.1 Contextualización del problema.....	1
1.2.2 Análisis Crítico.....	3
1.2.3 Prognosis.....	4
1.2.4 Formulación del problema.....	4
1.2.5 Preguntas Directrices.....	4
1.2.6 Delimitación.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4 OBJETIVOS.....	6
1.4.1 Objetivo General.....	6
1.4.2 Objetivos Específicos.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	7
2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA.....	12
2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL.....	12
2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES.....	13
2.4.1 Factores hidráulicos en una bomba de ariete.....	14
2.4.1.1 Sistemas hidráulicos 1.....	14
2.4.1.2 Sistemas hidráulicos 2.....	20
2.4.1.3 Recursos energéticos no convencionales.....	22
2.4.2 Eficiencia.....	44
2.4.2.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	45
2.5 HIPÓTESIS.....	51
2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES.....	51
2.6.1 Variable Independiente.....	51
2.6.2 Variable Dependiente.....	51
2.6.3 Término de relación.....	51

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	52
3.2 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	52
3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA.....	53
3.3.1 Población o universo.....	53
3.3.2 Muestra.....	53
3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	54
3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN.....	55
3.6 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	55
3.6.1 Plan que se empleó para procesar la información recogida.....	55
3.6.2 Plan de análisis e interpretación de resultados.....	57

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	58
4.1.1 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para una válvula de impulsión.....	60
4.1.2 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para dos válvulas de impulsión.....	60
4.1.3 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para tres válvulas de impulsión.....	61
4.1.4 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para cuatro válvulas de impulsión.....	61
4.1.5 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para cinco válvulas de impulsión.....	62
4.1.6 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para seis válvulas de impulsión.....	62
4.1.7 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para siete válvulas de impulsión.....	63
4.1.8 Análisis de la comparación de la eficiencia de los diferentes números de válvulas de impulsión.....	63
4.1.9 Análisis de variación de la eficiencia para diferentes alturas de impulsión.....	64
4.1.10 Análisis del ángulo de caída de la tubería de impulsión para diferentes valores de altura-longitud de tubería de impulsión.....	64
4.1.11 Análisis de la eficiencia en función del material utilizado en la tubería de impulsión.....	65
4.1.12 Gráfico de ciclo teórico del ariete multimpulsor.....	65
4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	66
4.3 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS.....	72
4.3.1 Efecto de la altura de impulsión (H) sobre la eficiencia.....	72
4.3.2 Efecto de altura de descarga (h) sobre la eficiencia.....	73
4.3.3 Efecto del material de la tubería de impulsión sobre la eficiencia.....	75

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES.....	77
5.2 RECOMENDACIONES.....	80

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

6.1 DATOS INFORMATIVOS.....	81
6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA	82
6.3 JUSTIFICACIÓN.....	83
6.4 OBJETIVOS.....	83
6.4.1 Objetivo General.....	83
6.4.2 Objetivos Específicos.....	83
6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD.....	84
6.5.1 Análisis económico.....	84
6.5.2 Análisis de costos.....	84
6.5.3 Análisis tecnológico.....	89
6.5.4 Análisis ambiental.....	89
6.6 Fundamentación.....	90
6.6.1 Determinación de los factores hidráulicos para el diseño.....	90
6.6.2 Diseño hidráulico de ariete multimpulsor.....	91
6.6.3 Cálculo de propiedades físicas del ariete.....	95
6.6.4 Cálculo del coeficiente total de pérdidas en tubería de impulso.....	97
6.6.5 Diseño mecánico de ariete multimpulsor.....	100
6.7 METODOLOGÍA.....	121
6.7.1. Instalación hidráulica.....	121
6.7.3 Instrumentos de medida.....	124
6.7.4 Estructura.....	125
6.8. ADMINISTRACIÓN.....	125
6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN.....	127

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 2.1: Categorías Fundamentales.....	13
Figura. 2.2: Onda de Presión en el cierre instantáneo de una válvula.....	16
Figura. 2.3: Explicación del golpe de ariete.....	17
Figura. 2.4: Mecanismo del fenómeno.....	18
Figura. 2.5: Funcionamiento del ariete hidráulico.....	25
Figura. 2.6: Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.....	35
Figura. 2.7: Simulación de Fluidos utilizando computadora.....	47
Figura 4.1: Eficiencia vs número de válvulas de impulsión.....	66
Figura 4.2: Eficiencia vs Altura de impulsión.....	67
Figura 4.3: Eficiencia vs Caudal Bombeado.....	68
Figura 4.4: Eficiencia vs Caudal desperdiciado.....	69
Figura 4.5: Eficiencia vs Velocidad de cierre de la válvula de impulsión.....	70
Figura 4.6: Eficiencia vs Caudal de alimentación variable.....	71
Figura 4.7: Verificación de hipótesis (Altura de impulsión).....	73
Figura 4.8: Verificación de hipótesis (Altura descarga).....	74
Figura 4.9: Ciclo teórico de operación del ariete hidráulico.....	76
Figura 4.10: Ciclo teórico de operación del ariete hidráulico.....	76
Figura 6.1: Tanque de alimentación.....	91
Figura 6.2: Instalación de la bomba de ariete.....	95
Figura 6.3. Mitad de la tubería sometida a presión interna.....	101
Figura 6.4. Cámara de aire sometida a presión interna.....	105
Figura 6.5: Válvula de descarga.....	110
Figura 6.6: Gráfico del ciclo de operación de la bomba de ariete.....	115
Figura 6.7: Modelo geométrico de la bomba de ariete.....	116
Figura. 6.8: Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.....	128
Figura. 6.9: Sistema de Arietes hidráulicos en serie.....	129
Figura. 6.10: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión.....	129
Figura. 6.11: Implementación de resorte para la válvula de impulsión.....	130
Figura. 6.12: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión.....	130
Figura. 6.13: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión.....	131

Figura 6-14: Eficiencia vs Caudal de descarga.....	150
Figura 6-15: Curvas características de operación de la bomba de ariete.....	151

TABLAS

Tabla 2.1: Número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.....	37
Tabla 2.2: Longitud de tubería de impulsión en función del diámetro.....	38
Tabla 2.3: Longitud de la tubería de impulsión en función del altura de impulsión....	38
Tabla 2.4: Diámetro de la tubería de impulsión.....	39
Tabla 2.5: Parámetros de la cámara de aire.....	41
Tabla 3.1: Operacionalización de la variable Independiente.....	54
Tabla 3.2: Operacionalización de la variable Dependiente.....	55
Tabla 3.3: Requisitos hidráulicos de instalación.....	56
Tabla 3.4: Parámetros hidráulicos de diseño.....	56
Tabla 3.5: Especificaciones hidráulicas de ingeniería.....	56
Tabla 4.1: Requisitos hidráulicos de instalación.....	58
Tabla 4.2: Especificaciones hidráulicas.....	59
Tabla 4.3: Especificaciones hidráulicas del ariete de 1 válvula de impulsión....	60
Tabla 4.4: Especificaciones hidráulicas del ariete de 2 válvulas de impulsión...	60
Tabla 4.5: Especificaciones hidráulicas del ariete de 3 válvulas de impulsión...	61
Tabla 4.6: Especificaciones hidráulicas del ariete de 4 válvulas de impulsión...	61
Tabla 4.7: Especificaciones hidráulicas del ariete de 5 válvulas de impulsión..	62
Tabla 4.8: Especificaciones hidráulicas del ariete de 6 válvulas de impulsión...	62
Tabla 4.9: Especificaciones hidráulicas del ariete de 7 válvulas de impulsión...	63
Tabla 4.10: Eficiencia para diferente número de válvulas de impulsión.....	63
Tabla 4.11: Eficiencia para diferentes alturas de impulsión.....	64
Tabla 4.12: Eficiencia para diferentes alturas de impulsión.....	64
Tabla 4.13: Eficiencia para diferentes materiales de tubería de impulsión.....	65
Tabla 4.14: Valores de eficiencia para diferentes configuraciones de la bomba.....	75
Tabla 6.1: Costo de materiales mecánicos.....	85
Tabla 6.2: Costo de materiales para la instalación hidráulica.....	86
Tabla 6.3: Costo de materiales varios.....	86
Tabla 6.4: Costo Directos.....	87

Tabla 6.5: Costo de maquinaria utilizada.....	87
Tabla 6.6: Costo de mano de Obra.....	88
Tabla 6.7: Costo Indirectos.....	88
Tabla 6.8: Costo Total para construcción e instalación.....	88
Tabla 6.9: Costo Total para construcción e instalación.....	89
Tabla 6.10: Condiciones de borde para el sistema de bombeo.....	95
Tabla 6.11: Cálculo de pérdidas de carga en la impulsión del sistema.....	98
Tabla 6.12: Características de la tubería de impulsión.....	100
Tabla 6.13: Especificaciones mecánicas de la tubería galvanizada.....	100
Tabla 6.14: Ciclo teórico de operación de la bomba de ariete.....	115
Tabla 6.15: Características del tanque de alimentación.....	121
Tabla 6.16: Características de la tubería de impulsión.....	121
Tabla 6.17: Características de la tubería de descarga.....	122
Tabla 6.18: Características para el tanque de caudal desperdiciado.....	122
Tabla 6.19: Características para la bomba centrífuga.....	123
Tabla 6.20: Características del Pulsador on/off.....	123
Tabla 6.21: Características del Rotámetro.....	124
Tabla 6.22: Características del Manómetro.....	124
Tabla 6.23: Características del Mantenimiento.....	126
Tabla 6.24: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete.....	132
Tabla 6.25: Gráficos de curvas de funcionamiento.....	132
Tabla 6.26: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete.....	133
Tabla 6.27: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas y Experimentales).....	133
Tabla 6.28: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas y Experimentales).....	134
Tabla 6.29: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete.....	134
Tabla 6.30: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas y Experimentales).....	135
Tabla 6.31: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete.....	136
Tabla 6.32: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas y Experimentales).....	136
Tabla 6.33: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	139
Tabla 6.34: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	140
Tabla 6.35: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	141
Tabla 6.36: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Altura de descarga).....	142
Tabla 6.37: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Caudal de descarga).....	142

Tabla 6.38: Análisis de la Curva (Altura vs Caudal de descarga).....	143
Tabla 6.39: Análisis de la Curva (Potencia de salida vs Altura de descarga)....	143
Tabla 6.40: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	144
Tabla 6.41: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	145
Tabla 6.42: Hoja de resultados del ensayo para 3 válvulas de impulsión.....	146
Tabla 6.43: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Altura de descarga).....	147
Tabla 6.44: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Caudal de descarga).....	147
Tabla 6.45: Análisis de la Curva (Altura vs Caudal de descarga).....	148
Tabla 6.46: Análisis de la Curva (Potencia de salida vs Altura de descarga)....	148
Tabla 6.47: Análisis de la Curva (Caudal de descarga vs Número de golpes por min)	149
Tabla 6.48: Análisis de la Curva (Peso de la válvula vs Número de golpes por min)	149
Tabla 6.49: Análisis de la Curva de operación de un ariete multimpulsor.....	151

SIMBOLOGÍA

- f:** Factor de fricción.
- ϵ** : Rugosidad relativa
- N_R** : Número de Reynolds
- cr:** Coeficiente experimental de pérdida.
- h_{max}:** Carga de servicio máxima.(m)
- H:** Altura de impulsión (m)
- L:** Longitud de la tubería de impulsión. (m)
- y:** Distancia debido al retroceso del agua (m)
- V_1** : Velocidad del agua durante el periodo 1(m/seg).
- g:** Gravedad (m/seg²)
- W:** Peso de la válvula de impulsión. (Kg)
- $\Phi_{(s)}$** : Coeficiente de arrastre en la válvula de impulso.
- A:** Área de la válvula de impulso (m²)
- γ** : Peso específico (N/m³)
- S:** Carrera (pulg)
- Z:** Coeficiente total de pérdidas.
- k_0** : Coeficiente de resistencia de cierre de la válvula.
- Z_1** : Coeficiente de corrección.
- M:** Coeficiente de pérdidas agrupado.
- $R_{(s)}$** : Coeficiente de pérdida en la válvula (adimensional).
- h_r** : Pérdida de carga durante el bombeo.
- h_{max}** : Altura máxima de descarga del ariete (m).
- A_t** : Área interior de la tubería de impulso.(m²).
- h:** Altura real de bombeo [m].
- hn:** Altura neta de bombeo [m].
- hf:** Pérdida de carga o energía [m].
- H:** Altura de caída máxima que se puede lograr [m].
- h** : Altura a la que se desea bombear el agua [m].
- Q:** Caudal disponible en la fuente, río o vertiente [l/min].
- q:** Caudal de agua que se desea bombear [l/min].
- l:** Distancia a la que se desea bombear el agua [m].

N: Número de golpes por minuto.

nu: Potencia útil entregada a la descarga en W.

qb: Caudal de bombeo en m^3/seg .

Hi: Altura que desarrollada por el ariete en m.

g: Aceleración de la gravedad en m/seg^2 .

ρ : Densidad del agua en kg/m .

hd: Diferencia de nivel en m.

Σh : Sumatoria de pérdidas hidráulicas en m.

h_L : Pérdida por fricción (N-m/N, m, lb-pie/lb, pie).

L: Longitud de la tubería de impulsión. (m).

D: Diámetro del conducto (m o pie).

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación se realizó con la finalidad de analizar el cambio de los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia, tanto teórica como experimental.

Este trabajo se basó en la modificación del diseño mecánico del Ariete Hidráulico convencional por un ariete multimpulsor, teniendo como objetivo la configuración idónea de la válvula de impulsión mejorando su eficiencia, lo que se comprobó mediante la instalación de la bomba.

Para esto se diseñó un sistema de válvulas colocadas en serie (ariete multimpulsor), aprovechando el caudal y la energía remanente que generalmente se desperdicia.

Mediante la instalación de la bomba se comprobó que el ariete de tres impulsores es el más eficiente, para lo cual se tomaron tres valores de carrera de 3, 5 y 10mm utilizando contrapesos de 0,6 y 1,6 kg. En cada configuración fueron evaluadas las relaciones entre caudal y altura de descarga, observando que existe una relación directa entre carrera y peso de la válvula de impulsión.

De los ensayos realizados se observó que la eficiencia del ariete llega a su máximo cuando se tiene una moderada altura de entrega. Sin embargo, en el caso de una válvula de impulsión con contrapeso liviano, la eficiencia va a decrecer al aumentar la altura de descarga.

Finalmente la investigación reveló que con la configuración de 3 válvulas, carrera de 10mm y peso de 0,6 kg se obtiene un caudal de 8 litros/min, altura de descarga de 2,5m y eficiencia de 28,57%, siendo la más apropiada si se necesita elevar grandes caudales; pero si se utiliza 3 válvulas, carrera de 10 mm y peso de 1,6 kg se obtiene un caudal de 1 litros/min ,altura de descarga de 32m y eficiencia de 22,86%, siendo la apropiada si se necesita descargar a una altura mayor.

Por tanto se concluye que el uso del ariete multimpulsor es más adecuado que el ariete convencional cuando se habla de eficiencia.

SUMMARY

The present research was conducted in order to analyze the change of hydraulic factors in a ram pump and its effect on efficiency, both theoretically and experimentally.

This work was based on the modification of the mechanical design of a conventional hydraulic ram multimpulsor, targeting the right configuration of the discharge valve to improve efficiency, which was found in the test bench.

This was designed for a system of valves placed in series (ram multimpeler), exploiting the residual energy flow and usually wasted.

Through the test found that the ram of three drivers is the most efficient, for which race. Three values of 3, 5 and 10mm using counterweights of 0,6 and 1,6 kg.

Finally, the research revealed that the configuration of three 3 valves, stroke 10 mm and weight of 0.6 kg yields a flow rate of 8 liters / min, discharge height of 12m and efficiency of 28,57%, the most appropriate if you need to raise large flow but; if you use 3 valve, stroke of 10 mm and weight of 0.6 kg yields a flow rate of 1 liter / min, discharge head of 32m and efficiency 22,86%, of with the appropriate if you need to download to a greater height.

It is therefore concluded that the use of the ram multimpeler is more suitable than the ram conventional when it comes to efficiency.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 TEMA DE INVESTIGACIÓN

“ESTUDIO DE FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA DE ARIETE Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA.”

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Contextualización del problema

La bomba de ariete hidráulico se ha utilizado por más de dos siglos en muchas partes del mundo; la sencillez y fiabilidad hizo de ella un éxito comercial especialmente en Europa en días previos a la corriente eléctrica y al motor de combustión interna, con una amplia disponibilidad de tamaños y modelos. En la actualidad, las fuentes de energías no renovables como el petróleo, carbón y gas natural tienden a agotarse, entonces se trata de racionalizar su utilización. Una manera de lograr este objetivo es desarrollar diferentes fuentes de energía alternativa en proyectos que beneficien de manera directa al hombre. Desde el siglo diecinueve hasta la actualidad, el desarrollo del ariete hidráulico ha ido en dos direcciones: el mejoramiento del diseño mecánico y la teoría del principio de operación. Universidades de Estados Unidos como O'Brien y Gasline en California se han enfocado en el análisis de diseño, construcción y puesta en marcha de arietes hidráulicos; otras como Landsford y Dugan en Illinois han conducido investigaciones y experimentos sobre bombas de ariete. Países como Rusia y China son pioneros en estos sistemas; todas las indagaciones realizadas en estas naciones tienen el claro objetivo de mejorar la eficiencia de la máquina. En Sudamérica, ciertos países como Cuba y Nicaragua, en menor escala en relación a países desarrollados industrialmente, realizan estudios de mejoramiento del diseño de la bomba de ariete hidráulico en busca de mejorar su

eficiencia. Los parámetros analizados en estas naciones han sido enfocados principalmente a ciertas condiciones técnicas como son: la altura de elevación de la bomba en relación al desnivel de trabajo y la generación de mayor caudal elevado ya que este parámetro de funcionamiento actúa de forma directamente proporcional a la eficiencia de la bomba. Otros estudios realizados en estos países van encaminados hacia el diseño de nuevos tipos de bombas de ariete, como lo es el ariete hidráulico multimpulsor que consiste en el desarrollo en la parte de diseño mecánico, específicamente en la sustitución de la única válvula de impulsión del ariete convencional por un sistema de válvulas colocadas en serie para aprovechar el caudal remanente que normalmente se desperdicia en un ariete convencional, teniendo así una mejora en la eficiencia.

A nivel nacional son muy pocas las empresas que se dedican o están incursionando en energías alternativas y específicamente en bombas de ariete hidráulico. En su gran mayoría son de elaboración artesanal, pero no por ello se deja a un lado la excelente calidad de las mismas; su eficiencia es muy baja, por tal motivo se las encuentra a precios convenientes. En Ecuador contamos con distribuidoras de bombas de ariete, siendo la más importante SETCOMET INGENIERÍA PARA EL DESARROLLO, así que la gran mayoría de las bombas de ariete son importadas de países industrializados.

En la provincia de Tungurahua el desarrollo del estudio de bombas de ariete multimpulsor es prácticamente nulo, lo cual impide la evolución tecnológica en el ámbito de energías alternativas. Por lo tanto, se crea la necesidad de repotenciar la bomba de ariete convencional en cuanto a su eficiencia. En consecuencia, se presenta el siguiente proyecto consistente en el estudio de los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia, con la que se pueda aplicar la mayoría de factores en busca de optimizar los sistemas de bombeo no convencionales a través de arietes.

Se sabe que los combustibles fósiles o los que se están usando actualmente se van agotando y llegará el momento que ya no existan; por tanto, las máquinas hidráulicas que utilizan este tipo de combustibles quedarán inutilizadas. De ahí que se considera que el presente proyecto de investigación es muy importante para estar dispuestos a reemplazar los sistemas de bombeo convencional con una bomba de ariete, que

puede ser utilizada en todas las situaciones donde se requiera elevar agua de un punto a otro.

1.2.2 Análisis Crítico

Dentro del área de energías alternativas y específicamente en las bombas de ariete hidráulico se observa la falta de innovación y bases técnicas en el bombeo de agua que trae como consecuencia diseños obsoletos, con bajo rango de operación y eficiencia muy bajas.

La sociedad actual en nuestro país debe tener muy en cuenta, que la educación científica, técnica y práctica sobre el estudio en energías alternativas, debe ser uno de los aspectos más importantes, por tal motivo en la UTA existe la materia de Recursos Energéticos no Convencionales como materia de investigación, para con esto establecer el compromiso de desarrollar la tecnología necesaria para lograr una mayor eficiencia y potencia de las bombas de ariete.

Para conseguir la máxima eficiencia de las bombas de ariete hidráulico, además de manejar parámetros de diseño que sean controlables, se debe tener mucha predisposición a la investigación, es decir a la innovación tecnológica que es parte fundamental para el diseño y fabricación de nuevos sistemas que cumplan con altos rango de operación y rendimiento.

Entonces debemos concientizar que cuando se aplica adecuadamente el conocimiento científico y técnico de esta ciencia, se traduce en beneficios económicos para el sector productivo y la sociedad en general, pues se crea productos de mayor calidad, los cuales proporcionan mayor confiabilidad y seguridad de los clientes.

1.2.3 PROGNOSIS

De no llevarse a cabo el presente estudio, se desconocería el efecto de los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia, así como también se desconocería los siguientes aspectos:

- ✚ Requisitos hidráulicos para la instalación y operación de una bomba de ariete.
- ✚ Parámetros hidráulicos de diseño que rigen el funcionamiento de una bomba de ariete.
- ✚ Especificaciones hidráulicas que rigen el funcionamiento de una bomba de ariete.
- ✚ Ciclo de funcionamiento de una bomba de ariete.

1.2.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Este trabajo de investigación está orientado al estudio de factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia; por lo tanto, la pregunta que guía la presente investigación es la siguiente:

¿Cuáles son los factores hidráulicos de una bomba de ariete que afectan a la eficiencia?

1.2.5 Preguntas Directrices

¿Cuáles son los requisitos hidráulicos de instalación para el funcionamiento de una bomba de ariete?

¿Cuáles son los parámetros hidráulicos de diseño que rigen el funcionamiento de una bomba de ariete?

¿Cuáles son las especificaciones hidráulicas que rigen el funcionamiento en una bomba de ariete?

1.2.6 DELIMITACIÓN

1.2.6.1 De contenido

- ✓ Recursos Energéticos no Convencionales.
- ✓ Energías Alternativas.
- ✓ Ingeniería Mecánica.

1.2.6.2 Espacial

La recopilación bibliográfica se realizó en libros, revistas y catálogos; así como accediendo a páginas de internet de la biblioteca virtual de la FICM.

1.2.6.3 Temporal

Esta investigación se realizó en los meses de Mayo 2012 a Enero 2013.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los sistemas de bombeo convencional que operan con combustibles fósiles o energía eléctrica son costosos y con tendencia al alza.

En vista del alto costo de combustibles fósiles y lubricantes, dificultades en transportación y escasez de mano de obra preparada, es imperativo animar al uso de nuevos sistemas de abastecimiento de agua eficientes y de costo moderado tanto en instalación como en operación. Se presenta el siguiente proyecto de investigación que hará más eficiente las bombas de ariete hidráulico existentes, para lo cual se innovará el sistema de bombeo convencional aplicando nuevos procesos de diseño, ingeniería y fabricación en busca del máximo rendimiento de éstas, analizando los diferentes factores hidráulicos que afectan a la eficiencia de la bomba de ariete.

El presente estudio será el reflejo y aplicación de los conocimientos adquiridos durante la carrera estudiantil, con el que se pretende facilitar y brindar fuentes de investigación en lo relacionado a bombas de ariete, con la finalidad de incentivar el espíritu innovador y técnico de las personas en todo lo relacionado a alternativas energéticas en sistemas de bombeo no convencionales, en busca de energías verdes sin contaminación e impacto ambiental, pero con el claro objetivo de buscar la máxima eficiencia de estos sistemas.

Los ensayos permitirán tener presente los factores hidráulicos controlables necesarios en el sistema, para buscar rendimientos óptimos en la bomba de ariete con la finalidad de que cuando tenga se tenga que instalar (generalmente en comunidades rurales), se contribuya a mejorar el nivel de vida y desarrollo del sector. Además, del uso de una máquina ecológica como lo es la bomba de ariete, que permitirá a las comunidades cuidar sus fuentes de energías renovables.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General:

Investigar los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- ✚ Estudiar los requisitos hidráulicos de instalación para el funcionamiento de una bomba de ariete.
- ✚ Averiguar los parámetros hidráulicos de diseño que rigen el funcionamiento de una bomba de ariete.
- ✚ Investigar las especificaciones hidráulicas que rigen el funcionamiento en una bomba de ariete.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Se ha investigado alguna referencia sobre el tema del trabajo de investigación en los proyectos y tesis de la FICM de la Universidad Técnica de Ambato, pero no se ha encontrado ninguna; por lo tanto, se ha ampliado la investigación a otras Universidades del País encontrándose las siguientes Tesis de la Escuela Politécnica Nacional:

Fuente de información: Tesis

Autor: María José Espinosa Gómez, David Eduardo Villota Chicaiza.

Año de Publicación: 2011

Lugar: Escuela Politécnica Nacional

Tema: “Planificación y diseño de un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua en el barrio San Miguel de Paquiestancia del cantón Cayambe ubicado a 3200 m.s.n.m.”^[1]

Resumen

El presente documento contempla la planificación y el diseño de un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua en el barrio San Miguel de Paquiestancia del cantón Cayambe ubicado a 3200 m.s.n.m.

Para dicho propósito se ha diseñado una bomba de ariete capaz de satisfacer la necesidad de agua de la comunidad y se realizó un estudio para conocer la mejor trayectoria para facilitar la instalación de las tuberías.

En primer lugar se procedió a realizar el marco teórico del ariete hidráulico y su ciclo

¹ Tesis, María José Espinosa Gómez, David Eduardo Villota Chicaiza, (2011). “Planificación y diseño de un sistema hidráulico para el abastecimiento de agua en el barrio San Miguel de Paquiestancia del cantón Cayambe ubicado a 3200 m.s.n.m.”. Escuela Politécnica Nacional. Quito. Web site: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2759>

de operación. Una vez concluida esta parte se procedió a analizar y escoger las alternativas posibles para el diseño de la bomba hidráulica. Ya escogida la alternativa se realizó los cálculos pertinentes para el dimensionamiento.

Con la ayuda de un software AutoCAD Civil 3D se trazó la trayectoria de la tubería y se colocó los diferentes elementos del sistema basándonos en los planos topográficos, se realizó un programa utilizando Microsoft Excel para que al colocar ciertos parámetros de diseño se pueda conocer qué tipo de bomba se requiere, se realizó los planos de conjunto y despiece; finalmente se realizó la simulación del movimiento del fluido dentro de la bomba de ariete hidráulico utilizando ANSYS.

Finalmente se realizó un estudio económico para conocer el valor estimado de la construcción e instalación de este sistema hidráulico.

Conclusiones

- La bomba de ariete permite elevar agua a grandes alturas gracias a la energía que produce la caída de agua.
- Los valores del caudal de descarga, caudal de desecho, rendimiento y potencia desarrollada decrecen con el incremento de la altura de descarga.
- El número de ciclos óptimos para las válvulas tipo Blake es de 60 – 75 golpes por minuto, la bomba de ariete diseñada produce 62,5 ciclos por minuto, al encontrarse dentro del rango óptimo, se puede concluir que es funcional.
- La construcción del ariete hidráulico en nuestro medio es factible por la disponibilidad de materiales existentes en el mercado, al igual que la mano de obra necesaria.
- El software utilizado (ANSYS), específicamente el módulo Fluid Flow (CFX), permitió conocer por simulación en tiempo real el comportamiento del fluido dentro de la bomba de ariete hidráulico.
- El uso de los arietes hidráulicos para elevar agua a grandes alturas es rentable entre otros beneficios al compararlo con sistemas que utilicen otras.
- Esta bomba hidráulica representa una alternativa amigable con el medio ambiente ya que al no utilizar ningún tipo de fuente de energía no renovable, no produce contaminación alguna, por lo que este tipo de bomba puede ser una opción ideal en lugares donde se desea cuidar el medio ambiente.

- En el estudio de factibilidad se demuestra que la bomba de ariete aparte de cumplir con los requerimientos de la comunidad, proporcionará agua a un costo mucho más bajo del que paga actualmente.

Fuente de información: Tesis

Autor: Cristian Napoleón Campaña Calero, Darwin Arturo Guaman Alarcón.

Año de Publicación: 2011

Lugar: Escuela Politécnica Nacional

Tema: “Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico”^[2]

Resumen

El presente trabajo se lo ha realizado con la finalidad de abastecer agua a una propiedad ubicada en la zona de Calacali; mediante el uso de una bomba de ariete hidráulico. Para el estudio, se ha dividido en cinco capítulos en los cuales se detallan los temas necesarios para el consecuente desarrollo.

En el primer capítulo se describe la reseña histórica, principio de funcionamiento, configuración y características propias del ariete hidráulico, conjuntamente con la topografía e hidrografía de la zona donde funcionará el equipo y ubicación de los puntos necesarios para el diseño.

El segundo capítulo refiere al comportamiento de la onda o pulso de presión dentro del funcionamiento del hydram, estudio del fluido de trabajo, métodos de análisis del golpe de ariete y el desarrollo del modelo matemático del hydram.

En el tercer capítulo se detallan la investigación y diseño preliminar, métodos de evaluación de soluciones, determinación de los parámetros de diseño de los elementos de la bomba como son válvulas, cámara de aire y el cuerpo del hydram, estudio de los esfuerzos en cilindros y tamaño de la tubería de envasado y de entrega; finalmente se detallan el diseño estático y dinámico de los distintos elementos del hydram.

En el capítulo cuatro se detallan los materiales de construcción, diagramas de operaciones, construcción y montaje, planos de taller y conjunto, el ensamblaje del equipo, la puesta a punto de la bomba de ariete, que hacer si no funciona y el mantenimiento de los diferentes elementos.

² Tesis, Cristian Napoleón Campaña Calero, Darwin Arturo Guaman Alarcón.(2011).” Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico”. Escuela Politécnica Nacional. Quito Web site: [http:// bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4020](http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4020)

En el quinto capítulo se desarrollan el análisis de resultados y discusión con la ayuda de una hoja de cálculo realizada en Excel.

Finalmente, se describen las conclusiones y recomendaciones referentes al proyecto.

Conclusiones

- La bomba de golpe de ariete, ariete hidráulico, ram o hydram, es un arreglo de válvulas, que dispuestas de manera estratégica utiliza la energía de una cantidad de líquido, con el objetivo de elevar una porción de ésta hasta una altura mayor, mediante el empleo del fenómeno físico de golpe de ariete.
- Mediante el estudio de diferentes modelos matemáticos se adaptó los principios concernientes a las condiciones del medio de operación para el diseño del equipo.
- Previo al diseño de la bomba de ariete se seleccionó el espacio físico y los parámetros como son caudal, altura de suministro y cabeza de entrega para que la operación sea garantizada.
- Se diseñó los elementos mecánicos con forma y dimensiones adecuadas para el posterior ensamble y con las propiedades físicas y mecánicas idóneas para el funcionamiento requerido.
- Esta bomba de ariete está hecha con métodos de soldadura, su construcción es simple y de bajo costo.
- El ariete hidráulico permite elevar agua a distintos niveles de alturas de acuerdo a la sintonización de la carrera-peso de la válvula de impulso.
- La frecuencia de bombas de ariete Blake es de 40-75 golpes por minuto; el hydram de esta tesis de grado trabaja bajo un régimen 45 a 50, al encontrarse dentro del rango óptimo, se puede concluir que es funcional.
- Comparando con otros dispositivos de bombeo; el ram es relativamente fácil de construir en un taller con un mínimo de equipamiento.
- Debido a la naturaleza del ariete su instalación es conveniente, cuando existe suficiente agua disponible, lo cual significa que el agua desperdiciada por la válvula de impulso no es de gran importancia. Bajo este enfoque lo que se busca es que el ariete desarrolle la máxima potencia posible sin que esto implique el máximo rendimiento o eficiencia.
- La optimización del ariete para cada condición, se reduce a una sintonización de peso y carrera en el sitio de instalación.

- La construcción del ariete hidráulico en nuestro medio es factible por la disponibilidad de materiales existentes en el mercado, al igual que la mano de obra necesaria.
- El uso de arietes hidráulicos es rentable en comparación con otros sistemas de bombeo bajo determinadas condiciones de diseño.
- El hydram representa una alternativa amigable con el medio ambiente ya que al no utilizar ningún tipo de fuente externa no produce contaminación alguna, por lo que este tipo de bomba puede ser una opción ideal en lugares donde se necesita preservar el medio ambiente.
- El equipo debe tener un mantenimiento tanto preventivo como correctivo para lograr un buen funcionamiento y cumplir satisfactoriamente su tiempo de vida útil.

Recomendaciones:

- La válvula de impulso es el elemento que se encuentra sometido a la mayor suma de esfuerzos por lo cual se debe tener las precauciones necesarias en el diseño construcción y montaje.
- Las pérdidas en la etapa de bombeo deben ser reducidas al mínimo en la instalación; esto se logra haciendo un tendido rectilíneo del conducto de entrega.
- Se puede utilizar la hoja de cálculo de Excel, ya que dicho programa indica los parámetros de diseño bajo distintos escenarios, por lo que se puede tener una idea rápida de las características que tendrá el sistema.
- El usuario debe evitar fuerzas externas a la cámara de aire; ya que su correcto funcionamiento depende de su posición vertical. Por ningún motivo, la válvula de desperdicio debe ser obstruida de lo contrario el dispositivo deja de funcionar. Si se requiere cambiar alguna pieza por mantenimiento; hacerlo con las válvulas cerradas.
- Se debe fijar correctamente la bomba de ariete en una posición horizontal; bien anclada para evitar deslizamiento por vibración.

2.2 FUNDAMENTACIÓN FILOSÓFICA

La investigación se realizó aplicando un paradigma crítico-propositivo; crítico por que se analizó los diferentes factores hidráulicos y su mejor selección debido a la innovación de nuevos métodos y técnicas que permiten repotenciar los sistemas de bombeo no convencionales, y propositiva por que se buscó plantear alguna solución práctica al problema propuesto.

La perspectiva del proyecto dio una visión total y completa de los diferentes factores que influyen en la eficiencia de la bomba de ariete.

El diseño de la investigación debe ser abierto y flexible debido a los diferentes cambios y propuestas que se pueden dar para mejorar el procedimiento del diseño de la bomba de ariete.

2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

La presente investigación se desarrolló con el objeto de aplicar las especificaciones técnicas de la DTU (Unidad de Desarrollo de Tecnología) correctamente en todo lo concerniente al Programa de Bombas de Ariete; en esta fundamentación se describe los siguientes anexos:^[3]

- Ram pump system design notes (Notas para el diseño de bombas de ariete. *(Anexo 1)*)
- Technical Release 11: DTU S1 Pump: User Instructions.
DTU S1 Bombas: Instrucciones para el usuario. *(Anexo 2)*
- Technical Release 12: DTU P90 Pump
DTU P90 Bomba.
- Technical Release 13: New developments in hydraulic ram pumping.
Novedades en desarrollo de bombas de ariete hidráulico.

³ DTU, Unidad de desarrollo de tecnología, Ram Pump Programme.

- Technical Release 14: DTU S2 Pump: Instructions.
DTU S2 Bombas: Instrucciones.
- Technical Release 15: How ram pumps works
Cómo funcionan las bombas de ariete.
- Technical Release 16: An introduction to hydraulic ram pumps
Introducción a las bombas de ariete hidráulico.

2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES

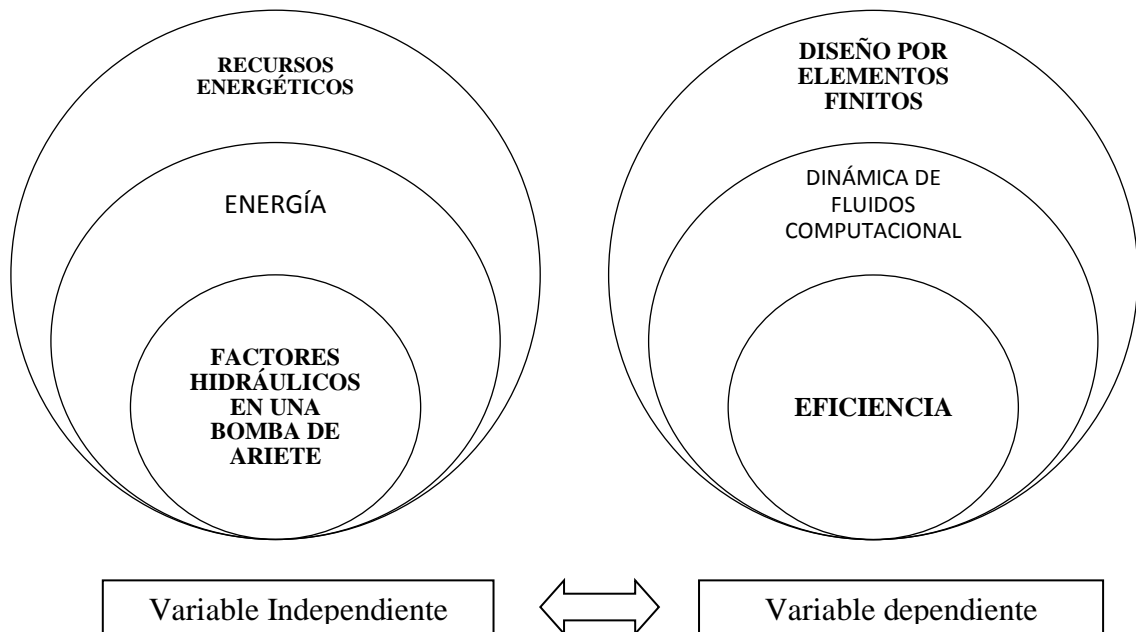


Figura 2.1: Categorías Fundamentales
Elaborado por: Fernando Galarza

2.4.1 FACTORES HIDRÁULICOS EN UNA BOMBA DE ARIETE

2.4.1.1 ENERGÍA

Núñez Rodríguez en su libro ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS afirma que: “Uno de los campos de la física más complicados de estudiar son los fluidos, es fundamental en campos tan diversos como la aeronáutica, la ingeniería química, civil, mecánica e industrial, la meteorología, las construcciones navales y la oceanografía”.^[4]

Flujo Permanente

Se dice que el flujo es permanente cuando las propiedades del fluido y las condiciones del movimiento en cualquier punto no cambian en el transcurso del tiempo. La expresión analítica que define éste concepto es: $(\partial V / \partial t) = 0$. También no existen cambios en la densidad ρ , en la presión P , ni en la temperatura T , con el tiempo en cualquier punto.^[5]

Flujo No Permanente

El flujo es no permanente cuando las condiciones en cualquier punto cambian con el tiempo, $(\partial V / \partial t) \neq 0$, $(\partial T / \partial t) \neq 0$, etc. Ejemplo: Bombeo por un sistema con caudal variable, creciente decreciente. Éste flujo también es denominado flujo transitorio.^[6]

Flujo Incompresible

Se denomina Flujo Incompresible a todo aquel flujo que mantiene su densidad relativamente constante en el tiempo mientras se mueve por un campo de flujo, esto es: $\frac{dp}{dt} = 0$.

Esto no exige que la densidad sea constante en todos los puntos. Tanto los flujos líquidos como los flujos de gases a baja velocidad, son considerados incompresibles.

Flujo Compresible

Todo aquel flujo en el que la densidad varía significativamente en el tiempo mientras se mueve por un campo de flujo, se denomina Flujo Compresible. Estas variaciones de densidad son significativas tanto en los gases como en los líquidos. Lo que hace

⁴ RODRIGUEZ NUÑEZ, Yoissell, 2009. "Ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos". El Cid Editorial. Pag.3. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10337840&p00=mecanica%20fluidos>

^{5,6} MENDEZ, Manuel Vicente. 1994. "Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua". Caracas. Pág.33



que el líquido se comprima ligeramente y que el material de la tubería experimente deformaciones muy pequeñas es la interacción de los cambios de momentos y las fuerzas aplicadas. Estos cambios de presión pueden ser perjudiciales, esto se conocen como **Golpe de Ariete**.

Esto va acompañado por perturbaciones de presión y velocidad que viajan a velocidades muy altas, cercanas a la velocidad del sonido en el líquido, además, la acción ondulatoria resultante ocurre a frecuencias relativamente altas.

Golpe de Ariete^[7]

El término Golpe de Ariete se refiere a las fluctuaciones de presión debido a un repentino incremento o decremento en la velocidad del flujo. Este fenómeno de estado estable se encarga del cambio entre la energía cinética y la energía de presión, el cual puede ser positivo o negativo.

Algunas causas del golpe de ariete son:

-  Abertura o cierre repentino de válvulas en un sistema de tuberías.
-  Al arrancar o detener una bomba en un sistema de bombeo.

Si la presión al cerrar un conducto disminuye por debajo de la presión de vapor del líquido se forma un espacio o cavidad (donde la columna de agua es separada por un espacio de aire). Este fenómeno es llamado separación de columna de agua, esta es la peor condición de golpe de ariete, y puede provocar que la tubería no sea capaz de soportar las fuerzas externas y colapse. Esto puede ser un problema para tuberías de pared delgada y grandes diámetros y tuberías plásticas con rangos de presión bajos o transportando líquidos calientes. La respuesta de columna de agua separada puede producir altas presiones y poner la tubería en riesgo.

En el estudio de este fenómeno hay que abandonar las dos hipótesis normalmente utilizadas en la mecánica de fluidos: fluido incompresible y régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible.

Este fenómeno se produce en los conductos al cerrar o abrir una válvula y al poner en marcha o parar una máquina hidráulica, o también al disminuir bruscamente

⁷ MATAIX, Claudio. (1986). Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Ediciones del Castillo S.A. España. Madrid. Pág.312-315.

el caudal.

Un caso importante ocurre en las centrales hidroeléctricas, donde se ha de reducir bruscamente el caudal suministrado a las turbinas hidráulicas acopladas a alternadores, cuando se anula la cara del alternador: en este caso la instalación debe proyectarse de manera que no se produzca un golpe de ariete excesivo.

La Fig.2.2 representa una tubería de longitud L , espesor b y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un embalse y que termina en su extremo derecho en una válvula. Si se cierra ésta rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía, al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y en el trabajo necesario para dilatar esta última: se ha producido una sobrepresión, o un golpe de ariete positivo.

Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión, o golpe de ariete negativo. El estudio de este fenómeno nos hará ver de qué factores depende para poderlo aminorar, para calcular las sobrepresiones que se estiman en la instalación a fin de seleccionar el espesor de la tubería para resistir a esta sobrepresión, etc.

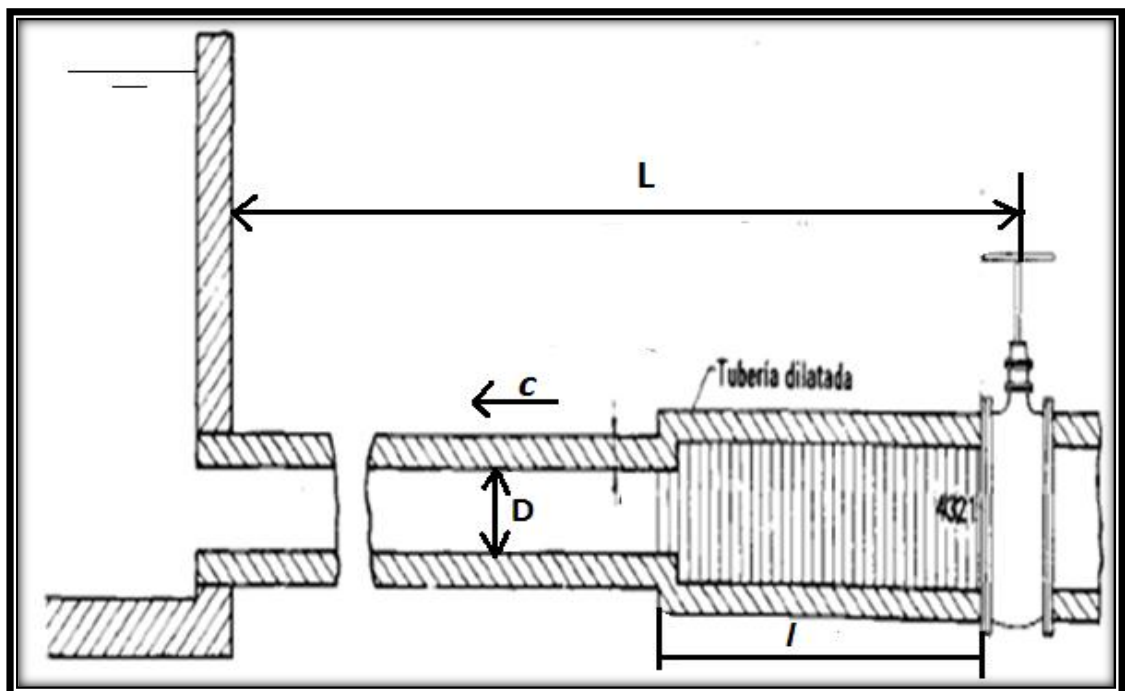


Figura. 2.2: Onda de Presión en el cierre instantáneo de una válvula. La tubería se dilata(o se contrae) al avanzar la onda de presión (o depresión)

Fuente: Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas de Claudio Mataix

Explicación del fenómeno

Al cerrarse por completo e instantáneamente la válvula (R) de la figura 2.3, y si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, como 1, 2, 3, 4, etc. indicadas en la figura 2.3, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc., necesitando un cierto tiempo.

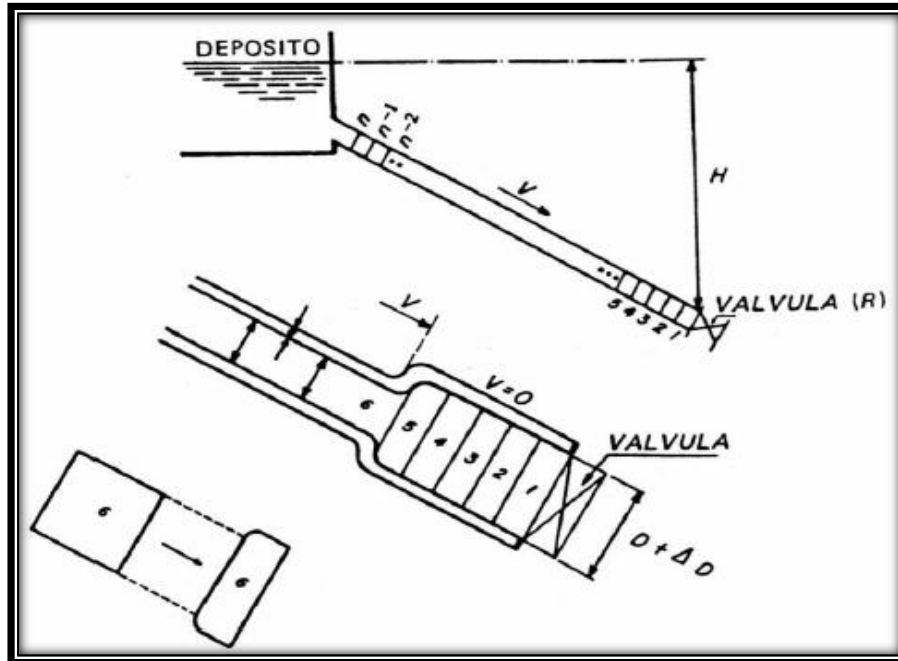


Figura. 2.3: Explicación del golpe de ariete

Fuente: Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas de Claudio Mataix

Es decir, en la válvula se ha originado una onda de presión que se propaga con velocidad “C”, la cual en el instante considerado tiene dirección contraria a la velocidad “v” del fluido: se ha creado una onda elástica, o sea una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el embalse, vuelve a la válvula, de nuevo al embalse, y así sucesivamente; originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda. Siendo “C” la velocidad de la onda (celeridad) y “L” la longitud de la tubería, el tiempo que tarda la onda en recorrer una vez la distancia entre la válvula y el embalse es $t_0 = \frac{L}{C}$. Al cabo de un tiempo $T = 4t_0 = 4 \frac{L}{C}$ el ciclo se repite.

Consideremos en la figura 2.4 la serie de los acontecimientos en la tubería durante un período $T = 4 \frac{L}{C}$.

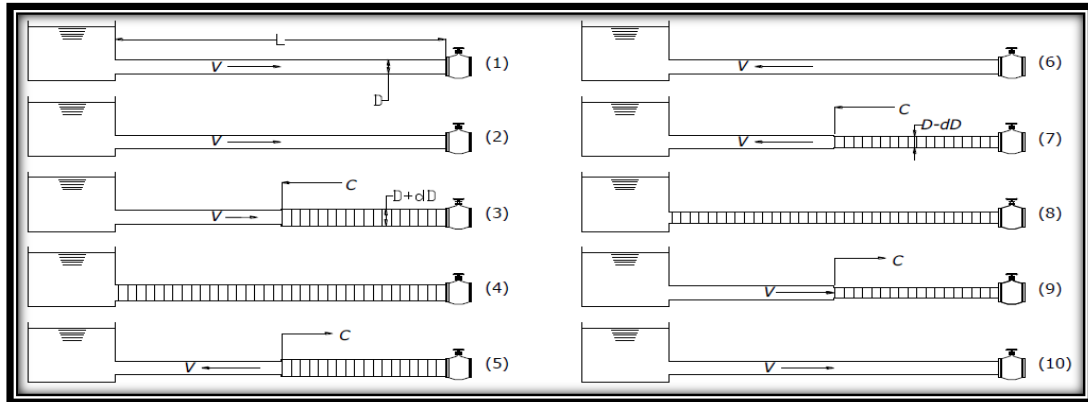


Figura. 2.4: Mecanismo del fenómeno

Fuente: Manuel Vicente Méndez. Tuberías a Presión.

1. No hay perturbación. Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad “v” del embalse a la válvula. Diámetro de la tubería normal.
2. Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería.
3. Tiempo $\frac{t_0}{2} = \frac{1}{2} \frac{L}{C}$. La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad “C” y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. Mitad izquierda, diámetro normal. En esta mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad “v” hacia la válvula. En la mitad derecha, “v=0”.
4. Tiempo $t_0 = \frac{L}{C}$. La onda de presión ha llegado al embalse. En toda la tubería el líquido está en reposo, “v=0”, pero no en equilibrio. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se expande el agua en la tubería comienza a moverse con velocidad “v”, pero dirigida en sentido contrario al de la figura 2.4 (1). El líquido empieza a ponerse en movimiento comenzando, por decirlo así, por las rodajas contiguas al estanque.
5. Tiempo $\frac{3}{2} t_0 = \frac{3}{2} \frac{L}{C}$. La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad “C”. En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con la velocidad “v”.
6. Tiempo $2 t_0 = 2 \frac{L}{C}$. Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el embalse con velocidad “v”; o sea en dirección contraria a la de las figuras 2.4 (1, 2 y 3). No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería; pero por la inercia la presión continúa disminuyendo, la onda

elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad “C”: el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal.

7. Tiempo $\frac{5}{2}t_0 = \frac{5L}{2C}$ La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad derecha de la tubería contiene agua en reposo y a una presión por debajo de la normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

8. Tiempo $3t_0 = 3\frac{L}{C}$.El agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad “v” dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

9. Tiempo $\frac{7}{2}t_0 = \frac{7L}{2C}$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad “v” hacia la válvula. En la mitad derecha el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; “C” y “v” tienen el mismo sentido.

10. Tiempo $4t_0 = 4\frac{L}{C}$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad “v” hacia la válvula. Todo igual que en el tiempo 0. Luego el periodo de este movimiento es:

$$T = 4t_0 = 4\frac{L}{C} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Teóricamente este movimiento oscilatorio continuaría indefinidamente. Prácticamente la deformación de la tubería y la viscosidad del líquido disipa la energía y las oscilaciones se amortiguan.

Fórmulas de la presión máxima o sobrepresión

Para realizar el cálculo de la sobrepresión se tiene en cuenta el tiempo de cierre de la válvula t_c , y este cierre puede ser:

- Instantáneo: t_c . Este caso es teóricamente imposible, pero es utilizado para la explicación del fenómeno del golpe de ariete.
- Rápido: $0 < t_c < 2t_0 = 2\frac{L}{C} = \frac{T}{2}$. La presión máxima es la misma que el caso anterior; aunque la curva de presiones en la tubería como función del tiempo es distinta. En el cierre rápido una de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo.

➤ Lento: $t_c > 2t_0 = 2\frac{L}{c} = \frac{T}{2}$. La presión máxima es menor que en los dos casos precedentes, porque la depresión de la onda elástica llega a la válvula antes de que se complete el medio ciclo e impide el aumento ulterior de la presión. Este último caso es el más frecuente en la práctica.

Pérdidas de energía ^[8]

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún otro dispositivo, ocurren pérdidas de energía debido a la fricción interna en el fluido. Como se indica en la ecuación general de la energía 2.2, tales pérdidas de energía traen como resultado una disminución de la presión entre dos puntos del sistema de flujo.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

En donde:

$\frac{P_1}{\gamma}; \frac{P_2}{\gamma}$: Cabezas de presión.

$z_1; z_2$: Cabezas de elevación.

$\frac{V_1^2}{2g}; \frac{V_2^2}{2g}$: Cabeza de velocidad.

El término h_L se define como la energía perdida por el sistema. Una componente de la pérdida de energía se debe a la fricción en el fluido en movimiento. La fricción es proporcional a la cabeza de velocidad del flujo y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente de flujo, para el caso de flujo en conductos y tubos. Lo anterior se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

En la que:

h_L =pérdida de energía debido a la fricción (N-m/N, m, lb-pie/lb, pie)

L =longitud de la corriente de flujo (m o pie)

D = diámetro del conducto (m o pie)

⁸ MOTT, Robert L. 4^{ta} edición. Mecánica de fluidos aplicada. Pearson Prentice Hall. Pág.237-338.

V= velocidad de flujo promedio (m/s o pie/seg)

f= factor de fricción (adimensional)

La ecuación de Darcy se puede utilizar para calcular la pérdida de energía en secciones largas y rectas de conductos redondos, tanto para flujo laminar como para turbulento. La diferencia entre los dos está en la evaluación del factor de fricción, f, que carece de dimensiones.

El factor o coeficiente de fricción f puede deducirse matemáticamente en el caso de régimen laminar, más en el caso de flujo turbulento no se dispone de relaciones matemáticas sencillas para obtener la variación de f con el número de Reynolds.^[9]

Ecuación explícita para el factor de fricción

La siguiente ecuación, que permite el cálculo directo del valor del factor de fricción, fue desarrollada por R.K. Swamee y A.K. Jain.^[10]

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{D}{\varepsilon} \right) + N_R^{0,9}} \right) \right]^2} \quad \text{Ecuación 2-4}$$

En donde:

f = factor de fricción.

D= diámetro del conducto (m o pie).

ε = Rugosidad relativa.

N_R =Número de Reynolds.

Mediciones de Fluidos^[11]

Las mediciones de fluidos incluyen la determinación de presión, velocidad de descarga, ondas de choque, gradientes de densidad, turbulencia y viscosidad. Existen muchas maneras de llevar a cabo estas mediciones por ejemplo, directa, indirecta, gravimétrica, volumétrica, electrónica, electromagnética y óptica. Las mediciones directas de la descarga se refieren a la determinación del volumen o peso de un fluido que pasa a través de una sección en un intervalo de tiempo. Los métodos indirectos

⁹ GILES, Ranalt V, Mecánica de los Fluidos e Hidráulica, Pág. 99.

¹⁰ MOTT, Robert L. 4^{ta} edición. Mecánica de fluidos aplicada. Pearson Prentice Hall. Pág. 248.

¹¹ STREETER, Victor L, WYLIE, E Benjamin. 8^{ta} edición. Mecánica de los fluidos. McGRAW-HILL. Pág. 354-356.

de medición de descarga (o gasto) requieren la determinación de la altura piezométrica o carga, diferencia de presión o velocidad en varios puntos de una sección transversal; con estos valores se calcula la descarga. Los métodos más precisos son las determinaciones gravimétricas o volumétricas en donde se miden el peso o el volumen a través de un tanque calibrado en un intervalo de tiempo medido.

Medición de Presión: En muchos dispositivos que determinan la velocidad o la rapidez de flujo de una corriente fluida es necesario medir la presión, debido a la relación que la ecuación de energía establece entre la velocidad y la presión. La presión estática de un fluido en movimiento es la presión cuando la velocidad no ha sido perturbada por la medición.

Medición de Velocidad: Como la determinación de la velocidad en un cierto número de puntos de una sección transversal permite evaluar la descarga, la medición de la velocidad es una fase importante para medir el flujo. La velocidad se determina midiendo el tiempo que requiere una partícula determinada para viajar una distancia conocida.

2.4.1.2 RECURSOS ENERGÉTICOS NO CONVENCIONALES

Se considera como recurso energético a toda sustancia sólida, líquida o gaseosa de la cual podemos obtener energía a través de diversos procesos. El amplio grupo de sustancias que conforman el conjunto de los recursos energéticos puede ser agrupado en dos categorías generales en función de su proceso de formación y de su disponibilidad.

Las **energías renovables** son aquellas que de forma periódica fluyen en la naturaleza de forma permanente y el hombre puede utilizar transformándolas en energía útil para satisfacer las demandas de la sociedad. Por el contrario, las **energías no renovables** han sido generadas en procesos geológicos muy lentos a lo largo de millones de años, por tanto, la energía consumida no es regenerada de nuevo, se trata de recursos energéticos limitados que se van agotando. Por otra parte, su utilización ocasiona problemas medioambientales, ya que son energías sucias contaminantes que

producen residuos; además, constituyen fuentes de energía muy centralizadas que generan alta dependencia exterior.

García Gregorio en su libro *Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas*, explica que “El uso masivo del carbón, petróleo y gas, que ha hecho nuestra sociedad, ha provocado un aumento de la prosperidad material, al menos para la mayoría de los países industrializados. Pero, también ha tenido numerosas consecuencias adversas, entre ellas la contaminación del aire y del agua, accidentes en las minas, incendios y explosiones en el caso del petróleo y el gas, conflictos con respecto al acceso al combustible y quizá, de modo más profundo, el **cambio climático global** que probablemente traiga como resultado un aumento en la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera, originado fundamentalmente por la combustión de los materiales fósiles”.^[12]

La preocupación de los ciudadanos por la escasez creciente de los recursos naturales y energéticos, así como las degradaciones que ha realizado el ser humano en su medio ambiente a través de sus actuaciones, muchas veces irracionales y contra la naturaleza, han planteado en el mundo entero la imprescindible necesidad de un mejor conocimiento de su hábitat natural dentro del cual se desenvuelve.

La adecuada planificación de las actividades humanas que las circunstancias actuales exigen han de descansar en la relación de un inventario más completo y actualizado de las riquezas naturales nacionales e internacionales, ya sean agrícolas, forestales, hidrológicas, mineras, etc.... De igual forma, la vigilancia sobre el medio ambiente debe ser mayor y esta actitud producirá una reducción en los impactos sufridos por el medio hasta la fecha.^[13]

Bomba de Ariete^[14]

El ariete hidráulico en términos generales es una bomba que eleva agua desde un nivel inferior a uno superior, sin usar electricidad o combustible alguno, gracias al fenómeno de golpe de ariete, dicho de otra forma se emplea la energía cinética de una columna de agua para elevar una parte de ésta, desde una fuente de

¹² GARCIA, Gregorio, 2008. “Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas”. Mundi Prensa. Pag.25. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10268752&p00=recursos%20energeticos>

¹³ FRANCISO, Sacristán Romero, 2005. “La tecnología al servicio del medio ambiente”. El Cid Editor. Pag.12. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10088659&p00=medio%20ambiente>

¹⁴ IVERSEN, H.W. “An Analysis of the Hydraulic Ram”. Journal of the Fluids Engineering. Pag.191-196. Junio de 1975.

abastecimiento que puede ser un río, quebrada, canal o reservorio, hasta un nivel mayor a dicha fuente.

Principio de Funcionamiento

El sistema se basa en el fenómeno conocido en la hidráulica como golpe de ariete, el cual se observa cuando se interrumpe el flujo de agua cerrando bruscamente una tubería. La energía cinética, que trae el agua en movimiento, al ser detenida, origina un aumento brusco o golpe de presión. Con el ariete hidráulico se producen continuamente estos golpes en un tubo que se alimenta con agua de una presa, de un río o cualquier desnivel, y se aprovechan los aumentos de presión para mandar una parte del agua que pasa por el tubo a una altura superior.

Componentes de la Bomba de Ariete

En la Fig. 2.5, se muestran los elementos esenciales para el funcionamiento del ariete hidráulico, que son:

- ✚ La presa, río, tanque de suministro o cualquier otro medio que permite crear un desnivel en relación con la Bomba de Ariete.
- ✚ La tubería de impulsión.
- ✚ La válvula de impulso con su cámara.
- ✚ La válvula de retención o descarga la cual generalmente es la mitad del diámetro de la válvula anterior, depende en primer lugar del caudal de bombeo y la frecuencia de los golpes.
- ✚ Encima de la válvula de retención se encuentra la cámara de aire.

Funcionamiento del Ariete Hidráulico

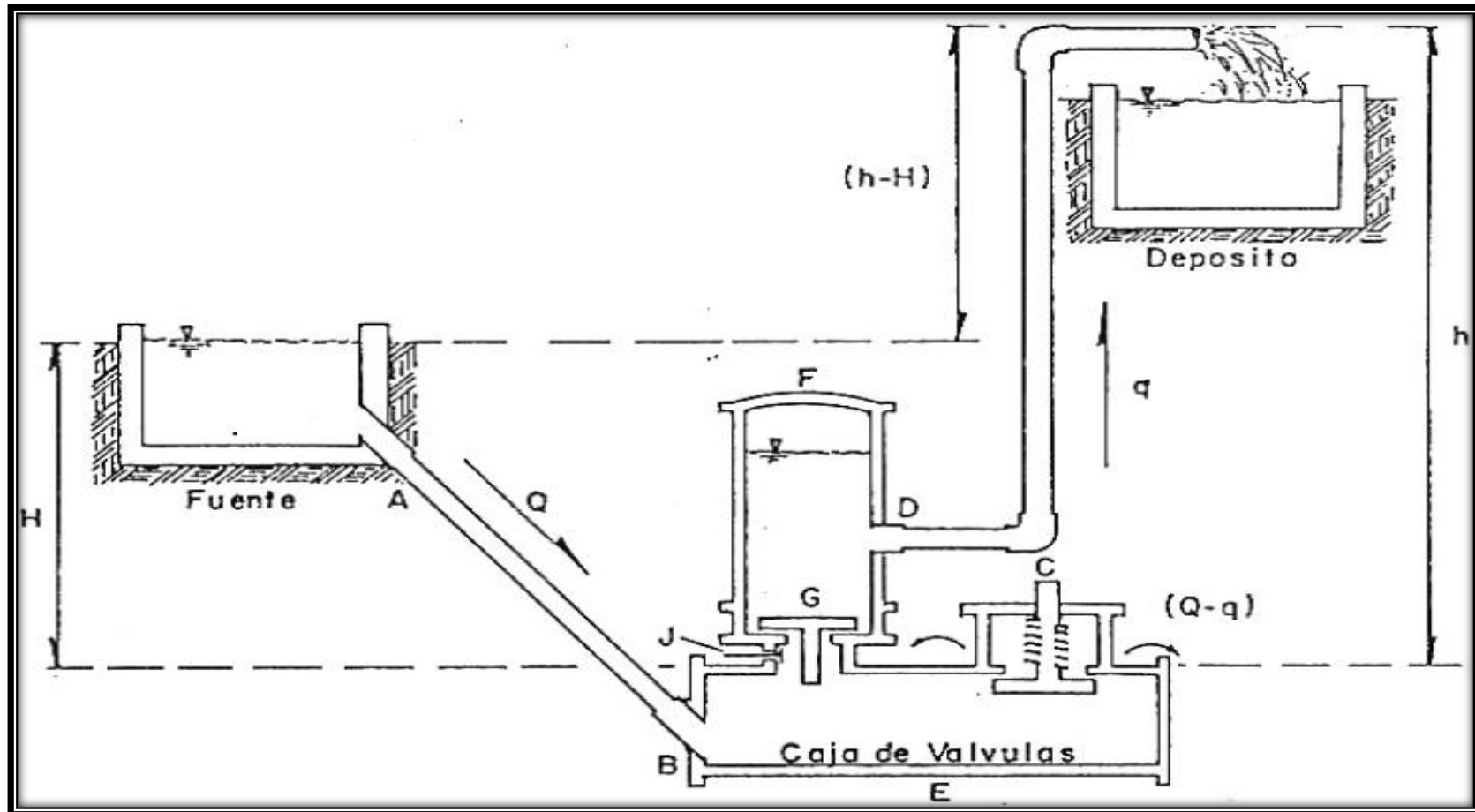


Figura. 2.5: Funcionamiento del ariete hidráulico

Fuente: Manual de instalación las "gaviotas"

La figura 2.5, muestra el principio de funcionamiento del ariete hidráulico. Desde el tanque o fuente de abastecimiento (A), el agua fluye hacia abajo por la tubería de impulso (B) y escapa hacia afuera por la válvula de impulso (C) hasta alcanzar cierta velocidad necesaria para que la presión dinámica actúe sobre el extremo de la válvula venciendo su propio peso y haciéndola cerrar.

Esta interrupción del flujo de agua produce el efecto del golpe de ariete, este efecto es una presión instantánea de gran empuje que obliga a abrir la válvula de descarga (G), entrando el flujo de agua hacia la cámara de aire (F), lo cual provoca que el aire existente dentro de la cámara de aire se comprima y aumente la presión hidráulica de tal modo que el agua fluye hacia la tubería de descarga (D), cuando la presión de aire en la cámara aumenta hasta ser igual o mayor que la fuerza impulsora ocurre el retroceso de agua cerrando la válvula de impulso y abriendo la válvula de descarga, con lo que se repite de nuevo el ciclo.

Esta operación se puede repetir de 40 a 200 veces por minuto, dependiendo de las condiciones iniciales y los parámetros de diseño; cuando la válvula de impulso está cerrada debido al peso y retroceso del agua la presión del aire obliga al agua a subir por la tubería de descarga hasta restablecer el equilibrio de presión. El retroceso del agua permite la inyección de aire por medio de la válvula de aire (J), con el fin de compensar el aire absorbido por el agua. ^[15]

Desarrollo del modelo matemático

Modelos matemáticos existentes ^[15]

En esta parte se realiza una descripción de los estudios más destacados, realizados en torno a los modelos matemáticos del ariete.

Aparte del modelo de Krol, que es el modelo más completo se presenta cuatro modelos sobresalientes de los cuales se aprovecha las características más relevantes.

¹⁵ KROL, J., Automatic Hydraulic Pump, 1951. Web site: [http://www.cepeige.org/Documentos/2003\(78-98\).pdf](http://www.cepeige.org/Documentos/2003(78-98).pdf)

Hipótesis generales para todos los modelos

- 1.- Tipo de flujo: Flujo unidimensional a lo largo del tubo de impulsión.
- 2.- Pérdidas de carga: Los factores de pérdida de carga en los diferentes elementos del ariete, se determinan experimentalmente en condiciones de flujo estacionario y se los utiliza en el modelo durante el flujo.
- 3.- Elementos considerados: Ningún modelo considera cuantitativamente la presencia de la cámara como de la válvula de aire.
- 4.- El cierre de las válvulas se consideran instantáneos: Es decir no poseen inercia. Esta restricción es necesaria por la escasez de conocimiento sobre el comportamiento dinámico de la válvula.
- 5.- Sólo la velocidad de flujo y variaciones de diferencia de presión promedio son considerados en el sistema.

Modelos de Iversen

Considera la válvula de impulso; pero únicamente en dos aspectos: como elemento que provoca pérdidas de carga y como causante de división del ciclo en dos etapas:

- ✓ Cuando está abierta: Aceleración o impulso, y
- ✓ Cuando está cerrada: Desaceleración o bombeo.

Se considera la presencia de la válvula de servicio, como componente que contribuye en la pérdida de carga durante el bombeo.

Modelo de Schiller

Utiliza las ecuaciones del modelo anterior con consideraciones que mejoran la precisión en la obtención de datos.

Se considera que la pérdida de carga “hr”, durante el período de bombeo (período en el que ocurre la desaceleración de la columna de agua en el tubo de impulso), se puede expresar por la ecuación:

$$hr = cr \left(1 - \frac{h}{h_{max}} \right) \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Donde:

cr: es un coeficiente experimental de pérdida de carga en el período de bombeo.

hmax: es la carga de servicio máxima que el ariete puede desarrollar en exceso, sobre la carga de alimentación.(m)

Modelo de Lansford y Dugan

En éste modelo se propone obtener una relación entre la velocidad de la columna de agua en el tubo de impulso con el tiempo, para cada uno de los seis períodos en los cuales Lansford y Dugan, dividen al ciclo hidráulico del ariete. A partir de éstas relaciones se pueden encontrar la cantidad de agua bombeada y desperdiciada además del tiempo consumido en un ciclo.

Modelo matemático de Krol

Dado al gran análisis al cual ha sido objeto el ariete posee un sin número de modelos matemáticos, como se presentó anteriormente. Pese a ello el modelo que se encuentra más desarrollado, es el de Krol, que presenta una correlación satisfactoria de lo teórico con lo experimental. Dada su gran exactitud para tareas de ingeniería se usa éste modelo para obtener las principales variables del hydram.

Teoría de Krol

Krol utiliza las ecuaciones del modelo de Schiller, y utiliza un modelo teórico experimental, además para un estudio aceptable divide al ciclo hidráulico del ariete en siete periodos, a los cuales aplica las leyes generales físicas. Su teoría está sustentada con el estudio experimental de un ariete especialmente diseñado para este fin.

Esta teoría presenta una desviación máxima del 15% entre lo teórico y lo experimental. Las variables que se pueden regular son:

- a. La cabeza de entrega.
- b. La longitud de la carrera de la válvula de impulso.
- c. El peso de la válvula de impulso.
- d. Tipo de válvula de servicio.

e. Volumen de la cámara de aire.

Periodo 1:

En este periodo la válvula de impulso está abierta, debido al retroceso del agua al final del periodo anterior (Periodo 7) causando una presión negativa en el cuerpo del ariete, que es la distancia que viaja por la columna de agua en la tubería de impulso. En el periodo 1 se considera al agua con un fluido incompresible.

Al período 1 también se lo conoce como de aceleración, ya que la masa de agua se desperdicia hasta adquirir una energía cinética suficiente para iniciar el cierre de la válvula.

La presión en el cuerpo del ariete es la atmosférica y al agua en el tubo de alimentación está completamente en reposo; estado que será cambiado por la acción de la carga de agua del reservorio de alimentación. La válvula de descarga se mantiene en su asiento o cerrada gracias a la carga que actúa sobre ella. Se forma una bolsa de aire; ésta pequeña cantidad de aire se asegura gracias al vacío o succión que se genera en los alrededores de la válvula de impulso por efecto del desperdicio de agua.

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

En donde:

H=Altura de impulsión (m)

L=Longitud de la tubería de impulsión. (m)

y= distancia debido al retroceso del agua (m)

V₁= Velocidad del agua en la tubería de impulso durante el periodo 1(m/seg).

g= gravedad (m/seg²)

Periodo 2:

El flujo se incrementa al máximo a través de la válvula de impulso que se encuentra abierta. La aceleración del agua continúa hasta que esta alcanza a llegar a la velocidad V_2 , necesaria para que la válvula de impulso se cierre, esta velocidad viene dada por la ecuación:

$$V_2 = \sqrt{\frac{Wg}{\Phi_{(s)}A\gamma}} \quad \text{Ecuación 2-8}$$

$$\Phi_{(s)} = \frac{0,345 - 0,275S + 10^{(0,52 - 6,85S)}}{S} \quad \text{Ecuación 2-9}$$

En donde:

W=Peso de la válvula de impulsión. (Kg).

$\Phi_{(s)}$ = Coeficiente de arrastre en la válvula de impulso.

A= Área de la válvula de impulso (m^2).

γ =Peso específico (N/m^3).

S= Carrera (pulg).

La velocidad en la tubería necesaria para que ocurra el cierre de la válvula de impulso es:

$$V_2 = (0,3 - 0,5) \sqrt{\frac{2gH}{Z}} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Donde:

Z=Coeficiente total de pérdidas.

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_0}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_0}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)} \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Donde:

k_0 = Coeficiente de resistencia de cierre de la válvula de impulso.

Periodo 3:

La velocidad del agua es ahora tal que, la acción de la fuerza en la superficie interior de la válvula de impulso es superior que el peso de la misma. La válvula de impulso comienza a cerrarse y es completado su cierre al final del periodo.

$$V_3 = V_2 \quad \text{Ecuación 2-12}$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3LSV_2}{2g^2H\left(1-\frac{WM}{Z_1^2}\right)}} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

$$Z_1 = \sqrt{2\Phi_{(s)}AH\gamma} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

$$M = 1 + \sum j + 4f\left(\frac{L}{D}\right) + R_{(s)} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

$$R_{(s)} = \frac{2,43-1,06S+10^{(0,95-13,3S)}}{S} \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Donde:

Z_1 = Coeficiente de corrección.

M= Coeficiente de pérdidas agrupado.

$R_{(s)}$ =Coeficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso (adimensional).

Periodo 4:

Cuando llega al fin el periodo 3, la válvula de impulso es cerrada completamente y una retardación brusca da lugar causando que se abra la válvula de descarga mientras que al mismo tiempo la velocidad en la tubería es reducida en proporción a la cabeza de presión ($h + h_r$) generada en exceso de la carga estática H.

El periodo 4 tiene una duración muy corta de modo que se puede asumir que:

$$t_4 = \frac{2L}{a} \quad \text{Ecuación 2-17}$$

$$V_4 = V_3 - (h + h_r)\frac{g}{a} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

$$h_r = 5,64\left(1 - \frac{h}{h_{\max}}\right) \quad \text{Ecuación 2-19}$$

$$h_{\max} = \frac{aV_3}{g} \quad \text{Ecuación 2-20}$$

Donde:

h =Altura de descarga. (m)

h_r = Pérdida de carga durante el bombeo.

h_{\max} = Altura máxima de descarga desarrollada por el ariete (m).

Periodo 5:

La válvula de descarga se abre completamente y el agua es descargada dentro de la cámara de aire a una velocidad V_4 , en ese instante es aprovechada la energía disponible para bombear la cantidad q , contra la carga $(h + h_r)$ que es igual a la energía cinética desarrollada al final del periodo 3-4, menos la energía cinética gastada en la compresión del agua y en la dilatación de las paredes de la tubería.

$$V_5 = 0 \quad \text{Ecuación 2-21}$$

$$t_5 = \frac{L}{(h+h_r)g} \left(\sqrt{\frac{Wg}{A\gamma k_0}} - \frac{(h+h_r)g}{a} \right) \quad \text{Ecuación 2-22}$$

Periodo 6:

Al final del periodo 5, el recorrido del agua en la válvula de descarga es nulo y el total de la energía disponible para bombear es consumida, la válvula de descarga está cerrada. Este cierre de válvula pretende que la tubería de impulso permanezca bajo la altura de presión total $(H + h + h_r)$, súbitamente retornando a la altura estática disponible H .

El tiempo de duración que este cambio tiene es muy corto y puede ser estimado como el tiempo requerido para una reflexión completa de una onda de presión.

$$t_6 = \frac{2L}{a} \quad \text{Ecuación 2-23}$$

La magnitud de la velocidad negativa con la que el agua retrocede desde la válvula de impulso puede ser obtenida igualando la energía de deformación del agua y la de la tubería de impulso para la energía cinética que produce V_6 .

$$V_6 = -\frac{(h+h_r)g}{a} \quad \text{Ecuación 2-24}$$

Periodo 7:

Al final del periodo 6, el agua en la tubería de impulso adquiere una velocidad negativa, consecuentemente la válvula de impulso se abre bajo la acción del peso y una diferencia de presión causada por el retroceso del agua.

$$V_7 = 0 \quad \text{Ecuación 2-25}$$

$$t_7 = \frac{L(h+h_r)}{Ha} \quad \text{Ecuación 2-26}$$

Una forma rápida de estimar el caudal descargado por el sistema de bombeo empleando un ariete hidráulico, se lo realiza con la aplicación de la siguiente ecuación:

$$q = \frac{1}{T} * \frac{\pi * D_{\text{Check}}^2}{4} * \int_{t_1}^{t_1+t_4} V_2(t) dt$$

En dónde:

D_{Check} =Diámetro de la válvula check (m)

$V_2(t)$ = Velocidad en la tubería de impulsión (m/seg)

T= Tiempo de ciclo (seg)

Modelo matemático que define la eficiencia del ariete convencional

$$q = \frac{\frac{\gamma A_t L V_3^2}{2g} - \frac{\gamma A_t L g (h+h_r)^2}{2a^2}}{(h+h_r)} \quad \text{Ecuación 2-27}$$

Reemplazando: $V_3 = \sqrt{\frac{Wg}{\Phi_{(s)}AY}}$

Por lo tanto el caudal bombeado por ciclo es:

$$q = \frac{\frac{L}{2g} * \frac{Wg}{0,345-0,275S+10(0,52-6,85S)} - \frac{\gamma A_t L g (h+h_r)^2}{2a^2}}{(h+h_r)} \quad \text{Ecuación 2-28}$$

Donde:

A_t =Área interior de la tubería de impulso.(m²)

La fórmula que nos permite calcular la eficiencia del sistema de bomba de ariete es:

$$\eta = \frac{P_{\text{salida}}}{P_{\text{entrada}}} = \frac{qh}{QH} \quad \text{Ecuación 2-29}$$

En donde

Psalida= Potencia de salida del sistema

Pentrada=Potencia de entrada del sistema

Eficiencia vs Peso

$$\eta = \frac{h}{QH} * \frac{\frac{L}{2g} * \frac{Wg}{0,345-0,275S+10(0,52-6,85S)} - \frac{\gamma A_f L g (h+h_r)^2}{2a^2}}{S} \quad \text{Ecuación 2-30}$$

Modelo matemático que define la eficiencia del ariete multimpulsor

Es de mucha importancia explicar el modelo matemático que explica el funcionamiento de un ariete multimpulsor; es decir, a partir de dos válvulas de impulsión. Para lo cual, se va a aplicar las diferentes sustituciones de ecuaciones que rige a este tipo de arietes en el modelo básico del ciclo de operación de la máquina hidráulica.

El flujo volumétrico que está distribuido entre las válvulas de un Ariete Hidráulico Multimpulsor con la condición que estas sean las mismas, se puede definir con la siguiente relación:

$$Q_{A1} = Q_{A2} = Q_{A3} = Q_{A4} = Q_{AN}$$

En donde: Q_A = Flujo volumétrico que circula por las válvulas.

Mediante la disposición de las válvulas en serie, es decir, de manera que una este a continuación de otra, se obtiene el mismo efecto que se obtendría si el ariete fuera un ariete convencional, con la diferencia que ahora no solo se va a levantar solo una masa muy pesada, sino que ahora se van a levantar n masas de menor tamaño, por lo tanto:

Ariete convencional $\rightarrow W$

Ariete multimpulsor $\rightarrow n*W$

En donde: n = número de válvulas de impulsión.

Por lo tanto para poder sacar el modelo matemático de un ariete multimpulsor de n válvulas de impulsión, basta con reemplazar el valor correspondiente en el modelo básico de caudal bombeado por ciclo, para después reemplazarlo en la ecuación de eficiencia del sistema.

Arietes hidráulicos en serie y paralelo^[16]

Existen algunas alternativas para el mejoramiento de la eficiencia de estos sistemas, como por ejemplo colocar varios arietes en forma paralela alimentados con un solo tubo de alimentación, esto depende de la condición del sitio donde se los va instalar. En el caso de que la fuente de agua sea abundante y la demanda de agua sea alta, un set de ariete hidráulico podría no elevar la suficiente cantidad de agua para abastecer la demanda, por lo que es recomendable la instalación de algunos sets de arietes hidráulicos en paralelo, como lo podemos ver la figura 2,6. Para la instalación en serie de estos sistemas, se tiene en cuenta la altura a la que se quiere llegar, porque si la altura es muy elevada un solo ariete tendría que ser muy grande, por lo que se coloca varios arietes hasta alcanzar la altura deseada, los arietes a medida que se los coloca a diferentes alturas, son de menor tamaño.

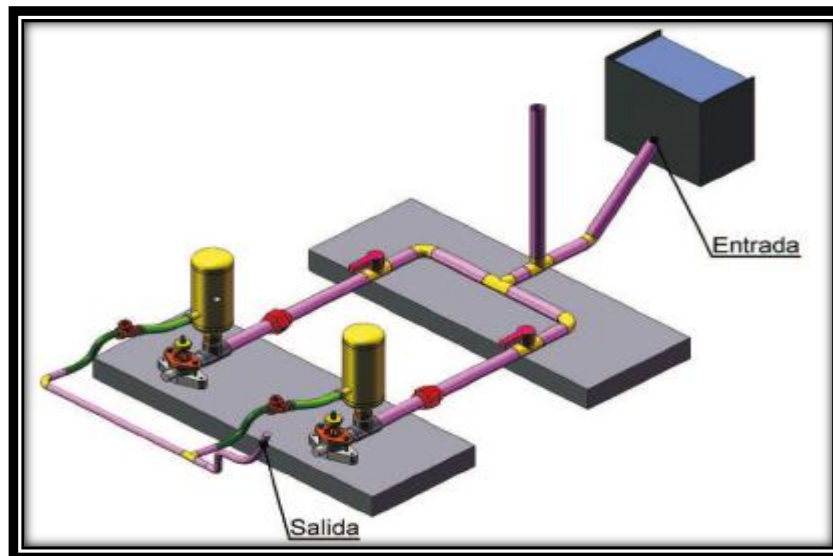


Figura. 2.6: Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.

Fuente: Manual de ariete Las Gaviotas

Criterios Hidráulicos

La instalación de un sistema de bombeo no debe entenderse como armar las piezas y ponerla en operación. Se requiere de una serie de cálculos sencillos pero fundamentales para determinar, a partir de los datos de partida, las características de la bomba como su rendimiento, caudal de descarga y altura máxima de elevación o de bombeo. A continuación se detallan los criterios hidráulicos concernientes al cálculo.

¹⁶ Manual de instalación y operación las gaviotas.

Criterios de selección de una bomba de ariete hidráulico

Para determinar el tamaño o tipo de una Bomba de Ariete con el mejor rendimiento para las condiciones requeridas se requiere conocer los siguientes datos de partida:

- ❖ H = altura de caída máxima que se puede lograr [m]
- ❖ h = altura a la que se desea bombear el agua [m]
- ❖ Q = caudal disponible en la fuente: acequia, río o vertiente [l/min]
- ❖ q = caudal de agua que se desea bombear [l/min]
- ❖ l = distancia a la que se desea bombear el agua [m]

Requisitos hidráulicos de instalación para un Ariete Hidráulico^[17]

➤ Caudal de impulsión.

Para el correcto funcionamiento de la bomba de ariete se necesita un caudal de impulsión continuo; es decir es importante mantener el nivel del agua en el reservorio de alimentación tratando que este no disminuya para evitar que no ingrese aire a la tubería de impulsión, lo que ocasionaría una deficiente operación del ariete y podría producir cavitación en la máquina.

Es importante que la instalación de la bomba de ariete se realice en un sitio conveniente, ya que si no se hace esto, las condiciones propias del sitio como pueden ser el calor, polvo, viento, etc., pueden ser agentes aceleradores para que se produzca el desgaste prematuro de la máquina; por lo tanto el lugar de instalación del ariete tiene que ser estudiado antes de la puesta en marcha de la bomba.

➤ Dimensionamiento del tanque de impulsión.

En el caso de que se use el tanque, se tendrá un tubo de alimentación y uno de desagüe, también es necesario colocar la toma del tubo de impulsión lo más arriba del fondo del tanque para evitar la entrada de sedimentos en el tubo, sobre la toma se recomienda por lo menos 40 cm de agua para que el tubo no absorba aire lo que podría afectar directamente a la eficiencia del sistema.

^[17] Peace Corps. "A Training Manual in Conducting a Workshop in the Design, Construction, Operation, Maintenance and Repair of Hydram". 1981.

Es importante mantener la cota del nivel de agua en el tanque, ya que si no se lo hace la velocidad de salida en la tubería de impulsión no es constante y por lo tanto el caudal es variable afectando la normal operación de la bomba.

Los tanques de impulsión varían con el sitio, y se los puede usar o no, dependiendo del tipo de fuente que se tenga o el uso que el agua requiera, prestando especial atención si es para consumo humano, en donde se debe evitar la contaminación.

➤ **Altura vertical de la bomba al sitio de entrega.**

La altura de descarga o elevación h , es la altura a la cual se desea obtener el caudal de descarga. Se mide desde el nivel de la válvula de descarga hasta el nivel que llega el agua en el tanque de descarga.

➤ **Longitud de la tubería de impulsión.**

De la longitud del conducto de impulso depende el funcionamiento automático de un ariete. Si no tiene la dimensión correcta, el cambio en volumen entre expansión y contracción no es suficiente para producir la succión necesaria para abrir la válvula de impulso, o el tiempo entre los dos extremos, será demasiado corto para superar la inercia de la misma válvula. La onda de compresión de agua deberá alcanzar la fuente abierta y ser disipado antes de que el agua fluya de nuevo a través de la válvula, las paredes interiores del tubo debe ser lo más liso posible para evitar pérdidas por fricción, que afecta el rendimiento del ariete.

La longitud de la tubería de impulsión es uno de los factores que influye de gran manera en el valor de la sobrepresión y eficiencia de funcionamiento del ariete la misma que se puede calcular mediante dos métodos; en función del diámetro de la tubería de impulsión y en función de la altura de impulsión “H”.

En función del diámetro de la tubería “D”:

Tabla 2.1: Longitud de tubería de impulsión en función del diámetro

Longitud mínima	$L = 150 D$
Longitud óptima	$L = 500 D$
Longitud máxima	$L = 1000 D$

Elaborado por: Fernando Galarza

En general la longitud no debe ser muy corta ya que esto provoca un cierre temprano de la válvula de impulsión lo cual no permite un aumento de presión adecuado; si la dimensión es muy larga las pérdidas por fricción dominan reduciendo la capacidad de la bomba además una tubería de impulso de gran extensión dañaría los elementos del sistema; por lo tanto la relación longitud diámetro de la tubería de impulsión debe encontrarse en el rango de la ecuación 2-31, ya que fuera de este rango la operación del ariete puede verse afectada notoriamente.

$$150 \leq \frac{L}{D} \leq 1000 \quad \text{Ecuación 2-31}$$

En función de la altura de impulsión “H”:

Tabla 2.2: Longitud de la tubería de impulsión en función del altura de impulsión

H	L
$H \leq 4,5 \text{ m}$	$L=5 H$
$4,5 < H \leq 8 \text{ m}$	$L=4 H$
$4,5 < H \leq 16 \text{ m}$	$L=3 H$
$H \geq 16 \text{ m}$	$L=2 H$

Elaborado por: Fernando Galarza

Por lo tanto la longitud de la tubería de impulsión depende tanto del diámetro como de la altura de impulsión, requerimientos de resistencia, consideraciones de costo, disponibilidad de materiales en el mercado para su respectivo dimensionamiento y selección.

Eytelwei mediante investigaciones relacionó las alturas de descarga e impulso para determinar la dimensión de la tubería de impulsión, esta fórmula empírica es la ecuación 2-40, vale la pena acotar que esta relación no tiene base matemática como si la tienen las anteriores:

$$L = h + 0,3 \frac{h}{H} \quad \text{Ecuación 2-32}$$

➤ **Diámetro de la tubería de impulsión:**

El correcto dimensionamiento del diámetro de la tubería de impulsión es lo que nos va a permitir asegurar la correcta velocidad de cierre de la válvula de impulsión; de ahí que es necesario su correcta selección, la tabla 2,5 permite la selección del diámetro de la tubería de impulsión a partir del caudal de impulsión.

. **Tabla 2.3:** Diámetro de la tubería de impulsión

Diámetro del tubo de impulsión(pulg)	Caudal de impulsión(litros/min)	
	Caudal min	Caudal máx.
0,75	3	8
1	8	38
1,5	38	57
2	57	95
2,5	95	170
3	170	265
4	265	473

Elaborado por: Fernando Galarza

Parámetros de diseño para un Ariete Hidráulico

➤ **Golpes por minuto de la válvula de impulsión.**

A pesar de varias investigaciones experimentales, no se llega a un acuerdo racional acerca de la extensión de tubería que debería ser usada; investigadores rusos recomiendan la siguiente fórmula:

$$N = \sqrt{\frac{900 H}{D L}} \quad \text{Ecuación 2-33}$$

El número de golpes por minuto para las válvulas de impulsión en las mismas condiciones de funcionamiento son:

Tabla 2.4: Número de golpes por minuto de la válvula de impulsión

Tipo de válvula	Número de golpes por minuto
Blake	60-80
Movimiento Axial	40-50
Muelle restitutor	55-65

Elaborado por: Fernando Galarza

Como se ilustra en tabla 2.4 el rango de funcionamiento de las válvulas de impulsión tipo Blake son las que producen el mayor número de golpes por minuto, garantizando el paso continuo de agua hacia la tubería de descarga.

Si se tiene en el sistema un mayor número de golpes por minuto se produce un mayor caudal de bombeo y por lo tanto es más eficiente

➤ Carrera de la válvula de impulsión.

La carrera de la válvula de impulsión es una de las especificaciones hidráulicas que se puede manipular una vez instalada la bomba de ariete, la correcta sintonización de la carrera nos permite obtener mayores caudales de descarga y por lo tanto mayor eficiencia.

➤ Peso de la válvula de impulsión.

Otro factor que se puede manipular ya instalado el sistema de bombeo es el peso de la válvula de impulsión, al igual que la carrera la correcta sintonización del peso nos puede permitir mejorar notablemente la eficiencia del sistema.

➤ Cámara de aire.

La cámara de aire ayuda a proporcionar una continua entrega de agua a una tasa relativamente uniforme. Es decir cambia el funcionamiento intermitente de la bomba a un comportamiento continuo. Está debe ser tan grande como sea posible, para comprimir y amortiguar el pulso de presión. Si la cámara llega a llenarse completamente con agua, el golpeteo es brusco lo cual lleva a la rotura de la instalación.

El volumen de la cámara de aire deberá encontrarse entre 20 a 50 veces el diámetro de la tubería de impulsión; está probado que un funcionamiento apropiado se consigue cuando el nivel de agua dentro de la cámara de aire se encuentra por encima de la salida de la tubería de entrega; recientes investigaciones sugieren que el dimensionamiento de la cámara de aire tiene que estar entre los siguientes rangos.

Tabla 2.5: Parámetros de la cámara de aire

Parámetro	Valor
Diámetro de cámara de aire	3 Diámetro de la tubería de impulsión
Altura de cámara de aire	10 Diámetro de la tubería de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

➤ Diámetro de la válvula de impulsión.

El correcto dimensionamiento y selección del material de la válvula de impulsión, es de vital importancia para el correcto funcionamiento del sistema de bombeo; el dimensionamiento del diámetro de la válvula debe estar orientado a disminuir al máximo las pérdidas volumétricas, y la selección del material del asiento de la válvula encaminado a disminuir el ruido metálico del golpe de ariete.

➤ Material de la tubería de impulsión.

Es un muy importante en el sistema de conducción de agua el valor de la sobrepresión, este se debe tener en cuenta al momento de dimensionar este tubo, mientras que en general el peligro de rotura debido a la depresión no es importante, más aún si los diámetros son pequeños. No obstante si el valor de la depresión iguala a la tensión del vapor de líquido se producirá cavitación.

De la longitud del conducto de impulso depende el funcionamiento automático de un ariete. Si no tiene la dimensión correcta, el cambio en volumen entre expansión y contracción no es suficiente para producir la succión necesaria para abrir la válvula de impulso, o el tiempo entre los dos extremos, será demasiado corto para superar la inercia de la misma válvula.

➤ Material de la tubería de descarga.

El agua puede ser bombeada a cualquier distancia, pero la longitud de la tubería involucra trabajo adicional para la bomba de ariete, ya que tiene que vencer la fuerza de fricción ofrecida por las paredes de la tubería.

A diferencia de la tubería impulsión, la de descarga o entrega puede ser de cualquier material; que sea capaz de soportar una pequeña presión de agua ascendiendo al tanque de descarga.

Generalmente es de la mitad del diámetro del tubo de impulso, aunque es más lógico determinarlo según el caudal del bombeo, el largo del tubo y la potencia disponible.

➤ **Vibración**

Las vibraciones que produce el golpe de ariete hacen necesario prever un tubo de impulso, preferiblemente de acero, que resista un régimen de trabajo caracterizado por una fatiga excesiva.

Especificaciones hidráulicas para un Ariete Hidráulico

➤ **Coefficientes de rozamiento en la tubería de entrada (pérdidas).**

La onda de compresión de agua deberá alcanzar la fuente abierta y ser disipado antes de que el agua fluya de nuevo a través de la válvula, las paredes interiores del tubo debe ser lo más liso posible para evitar pérdidas por fricción, que afecta la eficiencia del ariete. En general la longitud no debe ser muy corta ya que esto provoca un cierre temprano de la válvula de impulsión lo cual no permite un aumento de presión adecuado; si la dimensión es muy larga las pérdidas por fricción dominan reduciendo la capacidad de la bomba.

➤ **Altura de alimentación (H [m])^[18]**

La altura o salto de agua es la caída aprovechable que suministra energía para accionar la válvula que produce el golpe de ariete. Ésta altura no debe ser inferior a 1m. El rango de las alturas varía entre 1 a 30 m. Con caídas menores a 1 m se tendrá una deficiente operación y con alturas superiores a los 30 m, el funcionamiento de la Bomba es inestable con el riesgo de desgaste de las válvulas y el percutor de la Bomba.

$$1\text{m} \leq H \leq 30\text{ m}$$

Ecuación 2-34

¹⁸ Investigación realizada en la (PUCP-GRUPO, 2007)

La longitud (L) puede variar entre 4 y 10 veces la altura de impulsión (H):

$$4H \leq L \leq 10H \quad \text{Ecuación 2-35}$$

Usualmente, con fines prácticos, su valor es:

$$L = 5 \cdot H \quad \text{Ecuación 2-36}$$

Donde:

L = longitud tubería [m]

H = Altura de alimentación [m]

➤ Longitud de la tubería de descarga (l [m])

Se sabe que a mayor longitud de la tubería de descarga, se tendrá más pérdida de energía, por consiguiente, su longitud debe estar en relación con la altura a la que se desea elevar el agua y debe tener la menor cantidad posible de accesorios como uniones.

➤ Número de bombas

Dependiendo de las necesidades de bombeo se pueden requerir sistemas en serie o en paralelo. Los sistemas en serie se emplean para adicionar energía para desplazar más altura. Los sistemas en paralelo adicionan energía al sistema para elevar mayor caudal del que una sola bomba pueda ofrecer.

El número de Bombas para un sistema en paralelo se calcula con la ecuación:

$$n \text{ Bombas} = \frac{q \text{ bombeado}}{q \text{ cada bomba}} \quad \text{Ecuación 2-37}$$

El número de Bombas para un sistema en serie se calcula con la ecuación:

$$n \text{ Bombas} = \frac{h \text{ bombeado}}{h \text{ cada bomba}} \quad \text{Ecuación 2-38}$$

➤ Potencia (P [W])

La potencia en vatios que puede proporcionarnos una fuente con desnivel viene expresada por:

$$P = 10 Q H \quad \text{Ecuación 2-39}$$

2.4.2. EFICIENCIA

La eficiencia de un Ariete hidráulico se considera desde dos puntos de vista: desde el criterio de D'Aubuisson y de Rankine. Por definición la eficiencia está dada por la relación entre la potencia útil entregada en la descarga (nu) y la potencia recibida (absorbida) del agua de alimentación (nb).^[19]

$$\eta = \frac{nu}{nb} \quad \text{Ecuación 2-40}$$

En la eficiencia de **D'Aubuisson** la potencia entregada en la descarga será:

$$nu = qb * H_i * g * \rho \quad \text{Ecuación 2-41}$$

En donde:

nu = Potencia útil entregada a la descarga en W.

qb = Caudal de bombeo en m^3/seg

H_i = Altura desarrollada por el ariete en m.

g = Aceleración de la gravedad en m/seg^2

ρ = Densidad del agua en kg/m

Entendiendo a H_i como la altura desarrollada por el ariete definida anteriormente como:

$$H_i = hd + \sum h \quad \text{Ecuación 2-42}$$

En donde:

hd = Diferencia de nivel en m.

$\sum h$ = Sumatoria de pérdidas hidráulicas en m.

¹⁹ IZQUIERDO, Raúl, Instalación de Arietes Hidráulicos de Alta Eficiencia, ISMM, 1992

En donde:

Q = Caudal derramado por la válvula de impulso en m^3/s .

$Q + q_b$ = Caudal de alimentación en m^3/s .

H_a = altura de alimentación en m.

Finalmente:

$$\mathbf{n_D} = \frac{\mathbf{q_b * H_i}}{\mathbf{(Q + q_b) * H_a}} \quad \text{Ecuación 2-43}$$

La eficiencia de **Rankine** toma como referencia el nivel, considerando la instalación como un todo.

Entonces:

$$n_u = q_b * (H_i - H_a) * g * \rho$$

$$n_b = Q * H_a * g * \rho$$

Finalmente:

$$\mathbf{n_R} = \frac{\mathbf{q_b * (H_i - H_a)}}{\mathbf{Q * H_a}} \quad \text{Ecuación 2-44}$$

2.4.2.1 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

La mecánica computacional sirve como puente entre los nuevos adelantos científicos y sus aplicaciones tecnológicas, proveyendo a la Ingeniería herramientas indispensables tanto para desarrollar nuevas tecnologías como para optimizar la aplicación de las ya existentes. Los métodos de la mecánica computacional son hoy moneda corriente en el proceso de diseño de productos que comprenden desde electrodomésticos y artículos deportivos a satélites espaciales, y desde prótesis óseas a turbinas de aeronaves y estructuras civiles que, por su eficiencia, elegancia y belleza pueden asimilarse. La mecánica computacional hace uso de modelos para resolver problemas. En este contexto se denomina modelo al resultado del proceso de generar una representación matemática abstracta de un fenómeno, sistema o proceso a fin de describirlo y simularlo.^[20]

²⁰ CISILINO, Adrián Pablo, 2010. "Mecánica Computacional: fusión de arte, ciencia y técnica". ANÍ, Academia Nacional de Ingeniería. Pag.128. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10431165&p00=mecanica%20fluidos%20computacional>

Al observar nuestro alrededor es posible contemplar multitud de fenómenos asociados a los fluidos y a las leyes que los rigen. Van desde el vuelo de un ave hasta el agua que fluye por una tubería, desde la aerodinámica de un carro de fórmula uno hasta la fricción del traje de baño de un nadador, desde las emisiones de contaminantes por parte de industrias hasta el comportamiento atmosférico del aire. A partir de la curiosidad y necesidad de comprender el trasfondo del comportamiento de los fluidos, los científicos plantearon formulaciones para su estudio utilizando las matemáticas.^[21]

Definición

La dinámica de fluidos computacional es una de las ramas de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para estudiar y analizar problemas que involucran fluidos en movimiento, mediante la solución de ecuaciones, transferencia de calor e incluso otras (reacciones químicas) en el computador.

Los túneles de viento siguen siendo hoy en día muy empleados en todo tipo de estudios sobre fluidos y los datos resultantes de estas experiencias son muy valorados. Sin embargo, actualmente existe una alternativa a estos experimentos y son los CFD (acrónimo procedente de la denominación inglesa, «Computational Fluid Dynamics»).
«

Conceptos básicos

La dinámica de fluidos computacional proporciona información cualitativa y cuantitativa de la predicción del flujo de fluido por medio de la solución de las ecuaciones fundamentales usando métodos numéricos.

La CFD permite a los científicos e ingenieros desarrollar “experimentos numéricos” (simulaciones computacionales) en un “laboratorio virtual” (computador). Estos experimentos permiten predecir comportamientos y conocer datos de las variables involucradas en el proceso. Por ejemplo, un diseñador requiere conocer el comportamiento aerodinámico del ala de un avión (datos de velocidades, presiones y fuerzas alrededor del ala).

²¹ ORRERO, Santiago, 2009, “Simulación de fluidos utilizando computadora”, Universidad EAFIT, Colombia, Medellín, Web site: http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

Con la herramienta CFD se puede “montar” un experimento virtual que permita conocer en detalle el valor y comportamiento de las variables necesarias en un determinado escenario. La información generada es importante y clave para comprobar el diseño y mejorar la eficiencia y comportamiento del ala. La figura 2.7 muestra una imagen comparativa de los resultados obtenidos por métodos experimentales y métodos numéricos, sobre un mismo escenario y problema.

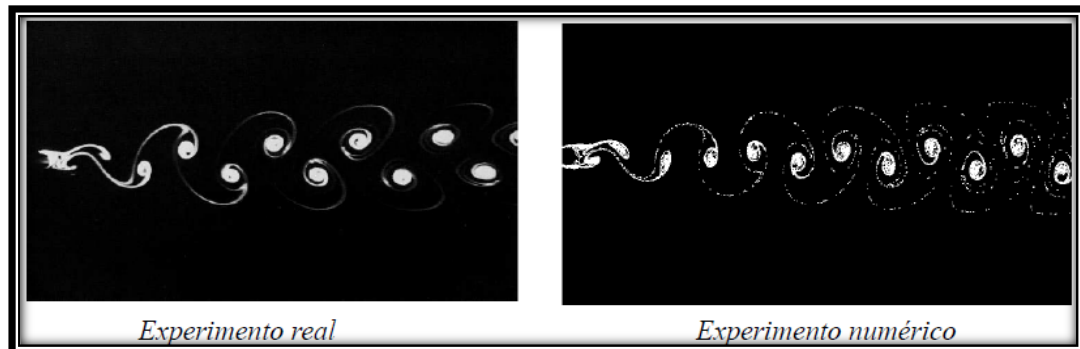


Figura. 2.7: Simulación de Fluidos utilizando computadora

Fuente: Vórtices de Von Karman. Kuzmin

Aplicaciones^[22]

En la actualidad son múltiples los campos a los que se aplican la dinámica de fluidos computacional.

La industria del automóvil es uno de estos campos, donde, por ejemplo, se puede simular el comportamiento aerodinámico del coche, de hecho las escuderías de fórmula uno emplean este tipo de software para mejorar el rendimiento de sus coches. También en el ámbito deportivo cabe destacar el uso en estudios aerodinámicos en el ciclismo, de diseño de embarcaciones e incluso en diseño de ropa de baño de alta competición.

Usando CFD es posible construir un modelo computacional que represente un sistema o equipo que se quiera estudiar. Después se especifican las condiciones físicas y químicas del fluido al prototipo virtual y el software entregará la predicción de la dinámica del fluido. Por lo tanto, CFD es una técnica de diseño y análisis implementada en el computador. La herramienta CFD ofrece la capacidad de simular flujos de gases, líquidos, transferencia de masa y calor, cuerpos en

²² ORRERO, Santiago, 2009, "Simulación de fluidos utilizando computadora", Universidad EAFIT, Colombia, Medellín, Web site: http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

movimiento, física multi-fases, reacciones químicas, interacción fluido-estructura y acústica a través de la modelación en el computador.

Las posibilidades de aplicación de la CFD a distintos procesos son enormes.

Algunos ejemplos son:

- ✚ Sistemas de calefacción, ventilación, climatización y refrigeración
- ✚ Aeroespacial/Defensa: perfiles de alas, misiles y estudios de aerodinámica externa
- ✚ Industria agroalimentaria: procesado y envasado de alimentos, diseño de equipos
- ✚ Industria automoción: aerodinámica, combustión en motores, componentes
- ✚ Energía: petróleo, gas, nuclear, generación eléctrica, turbomaquinaria, células de combustible.
- ✚ Industria química: combustión, filtración, mezcla, separadores, reactores
- ✚ Industria electrónica: semiconductores, enfriamiento de elementos.
- ✚ Industria biomédica.
- ✚ Industria naval.
- ✚ Industrias del metal.
- ✚ Industria deportiva: automovilismo, vela, estadios.
- ✚ Medio ambiente.
- ✚ Control de polvos.

Ventajas de la CFD

Si se cuenta con un dispositivo o un diseño de un sistema el cual presenta dificultades de prototipado o de realizar pruebas experimentales para comprobar y verificar su diseño, el uso de la herramienta CFD permite virtualmente conocer el comportamiento del funcionamiento interior. Existen muchos fenómenos que se pueden evidenciar a través de CFD, que no se pueden apreciar mediante ningún otro método. El CFD ofrece un conocimiento interno más detallado de los diseños.

Las principales ventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- ✚ Predice las propiedades del fluido con gran detalle en el dominio estudiado.
- ✚ Ayuda al diseño y al prototipaje y soluciones rápidas evitando costosos experimentos.

- ✚ Se obtiene una visualización y animación del proceso en términos de las variables del fluido.

Desventajas de la CFD

Las principales desventajas que tiene el uso de la herramienta CFD son:

- ✚ Requiere usuarios con amplia experiencia y formación especializada.
- ✚ Consume recursos de hardware y software que requieren inversiones iniciales significativas.
- ✚ En algunos casos, el costo computacional es elevado.

2.4.2.2 DISEÑO POR ELEMENTOS FINITOS

Una simulación numérica está compuesta por tres etapas: pre procesamiento, procesamiento y pos procesamiento. Durante la etapa de pre procesamiento se genera la geometría, el enmallado y configuración de la simulación. Durante la etapa de procesamiento se resuelven numéricamente las ecuaciones fundamentales y la etapa de pos procesamiento está definida por la visualización y análisis de resultados

Una simulación CFD comienza con la modelación geométrica CAD del dominio a analizar, es decir representar en el computador la geometría de lo que se quiera simular. Este dominio representa el fluido sobre el cual se quiere tener información, analizar y predecir el comportamiento.

Una vez se tenga el dominio computacional o modelo CAD del fluido, éste se discretiza o divide espacialmente en celdas para formar una malla o grilla. Las mallas pueden ser regulares, definidos por celdas en formas de triángulos (2D) o en tetraedros (3D), o pueden ser regulares definidos por celdas en formas de cuadrado (2D) o hexaedros (3D). Las propiedades físicas del fluido, tales como temperatura o velocidad, son calculadas en cada uno de estos volúmenes como solución de las ecuaciones fundamentales. Un mayor número de elementos necesita mayor capacidad computacional.

Simulación Vs. Experimentos^[23]

Se puede pensar que el software CFD que nos ofrecen estas capacidades de predicción es lo último en tecnología, pues pulsamos un botón y obtenemos una solución. Existen una multitud de dificultades que se han de afrontar antes de obtener una buena solución.

En primer lugar se puede perder de vista que la solución debe de ser acorde a la realidad. De nada sirve una “bonita” solución si no se aproxima a los experimentos físicos reales. Es por esto que cualquier simulación numérica debe buscar un método de validación experimental y/o analítica. De nada sirve visualizar campos de presiones y velocidades, si los datos plasmados en la respuesta son falsos.

Por esta razón el CFD se conoce jocosamente como Color Fluid Dynamics es altamente recomendando que cualquier simulación numérica lleve un proceso de validación y control de calidad de resultados. Esto garantiza la confiabilidad de los datos obtenidos.

La tendencia de la industria mundial al utilizar este tipo de herramientas es utilizar siempre ambos métodos de diseño, pruebas experimentales y simulaciones numéricas; las pruebas experimentales necesitan de simulaciones numéricas y viceversa, obteniendo los mismos resultados.

Comparaciones de aplicaciones industriales manifiestan que se alcanzan porcentajes de error hasta de 10%; un valor bastante aceptado a la hora de diseñar y proponer procesos de optimización.

Actualmente existen diversos software comerciales especializados en generar modelaciones CFD. Algunos de ellos son: Pro Engineer, Catia, Solid Works, Ansys, Solid Edge, etc.

²³ ORRERO, Santiago, 2009, “Simulación de fluidos utilizando computadora”, Universidad EAFIT, Colombia, Medellín, Web site: http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

2.5 HIPÓTESIS

La correcta evaluación de los factores hidráulicos en una bomba de ariete permitirá mejorar la eficiencia.

2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES

En la presente investigación se han identificado como variable independiente los factores hidráulicos en una bomba de ariete

Se indica como variable dependiente la eficiencia.

2.6.1 Variable Independiente

Factores hidráulicos en una bomba de ariete.

2.6.2 Variable Dependiente

Eficiencia.

2.6.3 Término de relación

Permitirá mejorar

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN

❖ **Bibliográfica:** La investigación bibliográfica se la realizó en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato; además de libros, revistas y páginas WEB, las cuales proporcionaron apoyo tecnológico y científico.

❖ **Experimental:** En este tipo de investigación se realizó diferentes experimentos para la comprobación o verificación del funcionamiento de la bomba de ariete hidráulico, logrando obtener una lista de datos y poder comprobar su correcto funcionamiento.

En esta investigación se estudió las relaciones de causalidad utilizando la metodología experimental con la finalidad de controlar los factores. Se fundamentó en el manejo activo y el control sistemático de las variables.

3.2 NIVEL O TIPO DE INVESTIGACIÓN

❖ **Explorativa:** Se investigó todos y cada uno de los detalles del proyecto, tanto su diseño como su funcionamiento. Para esto se indagó cada uno de los factores de análisis, generando hipótesis y reconociendo las variables de interés investigativo.

❖ **Descriptiva:** Describe los pasos realizados en el diseño para tener así un respaldo documentado de la bomba de ariete, además se comparó entre varios

factores, situaciones o formas. Se debe clasificar los modelos de comportamiento en base a ciertos criterios.

❖ **Correlacional:** Este tipo de investigación tiene como finalidad determinar el grado de relación o asociación no causal existente entre dos o más variables.

❖ **Explicativa:** Se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.3.1. Población o universo

La población o universo en la presente investigación está relacionada dentro de una población infinita, debido a los diferentes factores hidráulicos que pueden variar dentro de la investigación.

El objeto de estudio en este caso específico fueron los factores hidráulicos, los cuales fueron modificados para investigar el comportamiento de la eficiencia de la bomba de ariete hidráulico.

3.3.2. Muestra

Como la población en la presente investigación es infinita debido a las características explicadas anteriormente, se puede decir que la muestra en este caso son los once factores hidráulicos que afectan directamente a la eficiencia de la bomba de ariete; de los cuales para este trabajo de investigación se han seleccionado tres: número de válvulas, carrera y peso de la válvula de impulsión. Se planteó variaciones para siete configuraciones del número de válvulas, para cada una se tendrá tres variaciones en cuanto a carrera y peso dando un total de **21 pruebas.**

3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.4.1 Variable Independiente: Factores hidráulicos en una bomba de ariete.

Tabla 3.1: Operacionalización de la variable Independiente

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Para aprovechar toda la energía hidráulica es necesario optimizar y regular los factores hidráulicos que contribuyen a buscar este objetivo, tales como la carrera, peso y número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.</p> <p>Para el mejor aprovechamiento de la energía mediante la bomba de ariete, es necesario que se realice en las mejores condiciones de operación.</p>	Carrera de la válvula de impulsión	Aumentar carrera de la válvula	¿Se obtiene la máxima tasa de flujo?	Observación directa
		Reducir la carrera de la válvula	¿Se obtiene la máxima eficiencia?	Observación directa
	Número de válvulas de impulsión	Ariete Convencional	¿Qué sucede con 1 válvula?	Simulación en programa
		Ariete Multimpulsor	¿Qué sucede con más de 1 válvula?	
	Peso de la válvula de impulsión	0,6 kg	¿Se obtiene un alto número de golpes por minuto?	Observación directa
		1,6 kg	¿Se obtiene un bajo número de golpes por minuto?	

Elaborado por: Fernando Galarza

3.4.2 Variable Dependiente: Eficiencia.

Tabla 3.2: Operacionalización de la variable Dependiente

Elaborado por: Fernando Galarza

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍTEMS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
La eficiencia en la bomba de ariete es el cociente entre la potencia útil entregada en la descarga y la potencia recibida del agua de alimentación.	Eficiencia	Alta Media Baja	(30-40)% (20- 30)% < 20%	Observación directa. Simulación en programa Bibliografía

3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Las técnicas utilizadas para la recolección de la información son:

1. La observación directa, puesto que se estuvo en contacto con el objeto de estudio en escenarios y ambientes virtuales debidamente preparados y equipados para realizar la investigación.
2. En la investigación en diversas fuentes bibliográficas mediante la investigación documentada de los factores que se está investigando.

3.6 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.6.1 Plan que se empleó para procesar la información recogida:

Cuando se diseña un sistema de abastecimiento agua como lo es una bomba de ariete. Antes de la construcción se deberá conocer la cantidad de agua que se entregará, la altura de descarga que se requiere y conocer la eficiencia del sistema. La manipulación de todos los factores utilizados en la metodología de

diseño para la entrada de diferentes parámetros es un proceso muy largo y cansado. Por lo tanto, con el fin de procesar y evaluar los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia, es necesario la aplicación de un código informático, que permita fácilmente manipular los valores de modo que la carga de trabajo manual sería descargada, aumentando así la rapidez del proyecto y el tiempo de diseño se reduciría.

Para esto lo que se tiene que hacer es ingresar los factores hidráulicos, es decir los datos necesarios como son: requisitos de instalación, parámetros hidráulicos y especificaciones, y dejar que el programa evalúe todos los factores de diseño. Con la ayuda de este código, se puede comparar los diferentes resultados para las configuraciones de entrada para poder seleccionar la especificación que nos dará una eficiencia óptima, cumpliendo así el propósito de mejorar el diseño, como también el de reducir el tiempo de cálculo. Mediante la aplicación de éste programa se procesó la información obtenida de los factores hidráulicos de la bomba de ariete como son:

- Requisitos hidráulicos de instalación.

Tabla 3.3: Requisitos hidráulicos de instalación

Caudal de impulsión	Dimensionamiento del tanque de impulsión.
Altura vertical de la bomba al sitio de entrega.	Longitud de la tubería de impulsión.
Diámetro de la tubería de impulsión.	

Elaborado por: Fernando Galarza

- Parámetros hidráulicos de diseño.

Tabla 3.4: Parámetros hidráulicos de diseño

Golpes por minuto de la válvula de impulsión.	Carrera de la válvula de impulsión.
Peso de la válvula de impulsión.	Diámetro de la válvula de impulsión.
Material de la tubería de impulsión	Material de la tubería de descarga.
Vibración.	

Elaborado por: Fernando Galarza

- Especificaciones hidráulicas de ingeniería.

Tabla 3.5: Especificaciones hidráulicas de ingeniería

Coeficientes de rozamiento en la tubería de entrada (pérdidas).	Altura de alimentación.
Longitud de la tubería de descarga	Número de bombas
Potencia	

Elaborado por: Fernando Galarza

Después de procesar los factores hidráulicos mencionados anteriormente, se procedió mediante la aplicación del programa a variar los requisitos, parámetros y especificaciones hidráulicas, con el fin de buscar la máxima eficiencia de la máquina.

3.6.2 Plan de análisis e interpretación de resultados

Para el análisis de los resultados se recolectó los datos obtenidos en el programa, los mismos que serán analizados mediante el diseño completo con las mejores alternativas para obtener una alta eficiencia del sistema.

Con la información recolectada se procedió a elaborar tablas para una mejor interpretación de los resultados obtenidos. Además se elaboró graficas de dispersión con los factores más idóneos para un ideal desempeño de la bomba de ariete. Con las pruebas realizadas se procedió a verificar y comparar los factores hidráulicos que más influyen en una bomba de ariete, con el fin de comparar las distintas eficiencias para cada caso y así poder establecer las conclusiones y recomendaciones del estudio realizado.

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestra los datos obtenidos del estudio de bombas de ariete de manera teórica; se presenta en forma de tablas los resultados obtenidos para comprobar la eficiencia de la bomba de ariete con las variaciones de peso, carrera y número de válvulas de impulsión, además de otros factores hidráulicos.

En la tabla 4.1 y 4.2 se ilustran los diferentes factores hidráulicos que fueron objetos de investigación con la finalidad de analizar e interpretar las variaciones de requisitos, parámetros y especificaciones hidráulicas para obtener los datos y conclusiones del presente estudio.

Los requisitos hidráulicos de instalación que se necesitaron para efectuar el análisis de resultados de la bomba de ariete fueron los siguientes:

Tabla 4.1: Requisitos hidráulicos de instalación

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE		
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
Requisitos hidráulicos	Símbolo	Dimensión
Altura de impulsión	H	2 metros
Longitud de la tubería de impulsión	L	8 metros
Caudal de alimentación	Q	70 litros/min
Diámetro de la tubería de impulsión	D	2 pulg
Material de la tubería de impulsión	-	Acero galvanizado
Diámetro de la cámara de aire	dc	5,5 pulg
Longitud de la cámara de aire	Lc	0,5 metros
Diámetro de la tubería de descarga	d	$\frac{3}{4}$ pulg
Ángulo de caída de agua	θ	11 grados

Elaborado por: Fernando Galarza

Para realizar el análisis de resultados, se tomaron en cuenta las diferentes configuraciones que puede adoptar el ariete con la finalidad de buscar una eficiencia óptima de operación del sistema de bombeo; es decir, se procedió a analizar el funcionamiento de la bomba de ariete con distintos pesos y carreras de la válvula de impulsión; luego se verificó el comportamiento de la bomba variando el número de válvulas de impulsión, y los diferentes factores hidráulicos que influyen de manera directa sobre la eficiencia.

Tabla 4.2: Especificaciones hidráulicas

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE			
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO			
PRUEBA	N° DE VÁLVULAS	CARRERA(mm)	PESO(kg)
1	1 válvula	Carrera min	VARIABLE
2		Carrera media	
3		Carrera máx.	
4	2 válvulas	Carrera min	VARIABLE
5		Carrera media	
6		Carrera máx.	
7	3 válvulas	Carrera min	VARIABLE
8		Carrera media	
9		Carrera máx.	
10	4 válvulas	Carrera min	VARIABLE
11		Carrera media	
12		Carrera máx.	
13	5 válvulas	Carrera min	VARIABLE
14		Carrera media	
15		Carrera máx.	
16	6 válvulas	Carrera min	VARIABLE
17		Carrera media	
18		Carrera máx.	
19	7 válvulas	Carrera min	VARIABLE
20		Carrera media	
21		Carrera máx.	

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.1 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para una válvula de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4.3; este análisis se realizó aplicando una válvula de impulsión.

Tabla 4.3: Especificaciones hidráulicas del ariete de 1 válvula de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
1	1	2	1,76	11,19	24,88
2		3	0,76	10,84	24,1
3		5	0,24	11,02	24,5

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.2 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para dos válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4.4; este análisis se realizó aplicando dos válvulas de impulsión.

Tabla 4.4: Especificaciones hidráulicas del ariete de 2 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
4	2	2	1,76	12,33	27,41
5		3	0,76	12,2	27,1
6		5	0,24	12,51	27,8

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.3 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para tres válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4.5; este análisis se realizó aplicando tres válvulas de impulsión.

Tabla 4.5: Especificaciones hidráulicas del ariete de 3 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
7	3	2	1,76	13,57	30,15
8		3	0,76	13,54	30,1
9		5	0,24	13,64	30,3

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.4 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para cuatro válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4.6; este análisis se realizó aplicando cuatro válvulas de impulsión.

Tabla 4.6: Especificaciones hidráulicas del ariete de 4 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
10	4	2	1,76	14,04	31,2
11		3	0,76	14	31,1
12		5	0,24	14,13	31,4

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.5 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para cinco válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4-3; este análisis se realizó aplicando cinco válvulas de impulsión.

Tabla 4.7: Especificaciones hidráulicas del ariete de 5 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
13	5	2	1,76	14,35	31,9
14		3	0,76	14,4	32
15		5	0,24	14,27	31,7

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.6 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para seis válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4-3; este análisis se realizó aplicando seis válvulas de impulsión.

Tabla 4.8: Especificaciones hidráulicas del ariete de 6 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	Nº de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
16	6	2	1,76	14,44	32,1
17		3	0,76	14,4	32
18		5	0,24	14,31	31,8

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.7 Análisis de variación de la eficiencia en la bomba de ariete para siete válvulas de impulsión.

Para esta configuración de la bomba de ariete se analizó el efecto que tiene la carrera para diferentes pesos de la válvula de impulsión, los resultados se ilustran en la tabla 4-3; este análisis se realizó aplicando siete válvulas de impulsión.

Tabla 4.9: Especificaciones hidráulicas del ariete de 7 válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE					
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
	VALORES INGRESADOS			VALORES CALCULADOS	
PRUEBA	N° de válvulas de impulsión	Carrera(mm)	Peso(kg)	Caudal de descarga(litros/min)	EFICIENCIA (%)
19	7	2	1,76	14,53	32,3
20		3	0,76	14,44	32,1
21		5	0,24	14,4	32

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.8 Análisis de la comparación de la eficiencia de los diferentes números de válvulas de impulsión.

En esta tabla se tabularon los diferentes valores de caudal de descarga y eficiencia, variando el número de válvulas de impulsión.

Tabla 4.10: Eficiencia para diferente número de válvulas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE		
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
N° DE VÁLVULAS DE IMPULSIÓN	Caudal de descarga (litros/min)	EFICIENCIA (%)
1	11	24,5
2	12,2	27,44
3	13,54	30,18
4	14	31,23
5	14,27	31,86
6	14,3	32
7	14,4	32,1

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.9 Análisis de variación de la eficiencia para diferentes alturas de impulsión.

Los criterios para la valoración de longitud de la tubería de impulsión fueron evaluados de acuerdo a la tabla 4.11; los resultados obtenidos arrojaron los siguientes valores. Cuando la altura de impulsión es menor a 4,5 metros, la longitud de la tubería de impulsión se evalúa con la siguiente fórmula:

$$H < 4,5\text{metros} \rightarrow L = 5H$$

Tabla 4.11: Eficiencia para diferentes alturas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE		
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
Altura de impulsión (H)	Longitud de la tubería de impulsión (L)	Eficiencia (%)
1	5	34,4
2	10	31,28
2,5	12,5	29,93
3,5	17,5	27,54
4,5	22,5	25,7

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.10 Análisis del ángulo de caída de la tubería de impulsión para diferentes valores de altura-longitud de tubería de impulsión.

Para este análisis se tomaron diferentes valores que puede tener la longitud de la tubería en función de la altura de impulsión, para obtener así los correspondientes valores del ángulo de caída de la tubería.

Tabla 4.12: Eficiencia para diferentes alturas de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE		
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
Altura de impulsión (metros)	Longitud de la tubería de impulsión (metros)	Ángulo de caída de tubería (grados)
1	5	11
2,5	12,5	11
3,5	17,5	11
4,5	22,5	11

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.11 Análisis de la eficiencia en función del material utilizado en la tubería de impulsión.

Este análisis se realizó usando acero y pvc, ya que estos son los materiales más comunes utilizados en la instalación de bombas de ariete, en los dos casos se obtuvieron valores tanto de la aceleración del agua como de la eficiencia del sistema diferentes.

Tabla 4.13: Eficiencia para diferentes materiales de tubería de impulsión

HOJA DE ESTUDIO DE LA BOMBA DE ARIETE		
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO		
Material	Aceleración del agua(m/seg ²)	Eficiencia (%)
Acero Comercial	1347	34
PVC	445	28,2

Elaborado por: Fernando Galarza

4.1.12 Gráfico de ciclo teórico del ariete multimpulsor

Para la simulación se consideró el ciclo teórico de operación de la bomba de ariete hidráulico, ya que si el sistema logra cumplir con todas las condiciones que se establecen en el ciclo teórico de operación se podrá llegar a la conclusión de que el sistema es viable. Para esto se realizó un programa, en el mismo que se deberá ingresar los factores hidráulicos y automáticamente se obtendrá las curvas del ciclo de operación del ariete que se requiera.

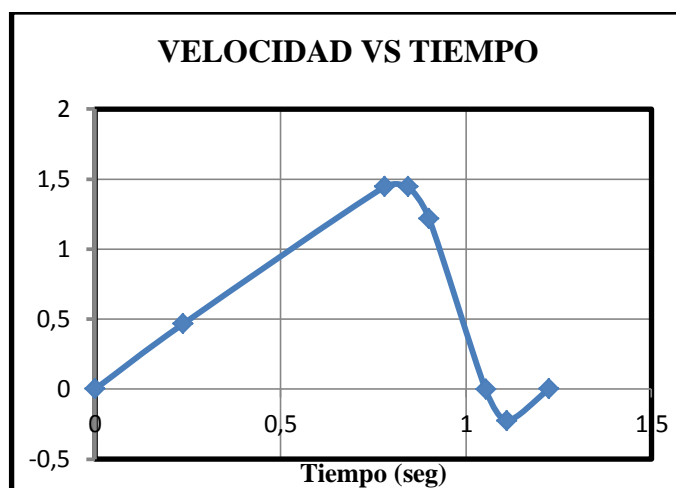


Figura 4-1: Ciclo teórico del ariete hidráulico

Elaborado por: Fernando Galarza

4.2. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A partir de los datos tabulados en el programa, se realizó gráficas de dispersión, en las cuales se analizó las curvas de operación del ariete en función de los diferentes factores hidráulicos que se pueden ir modificando en la investigación.

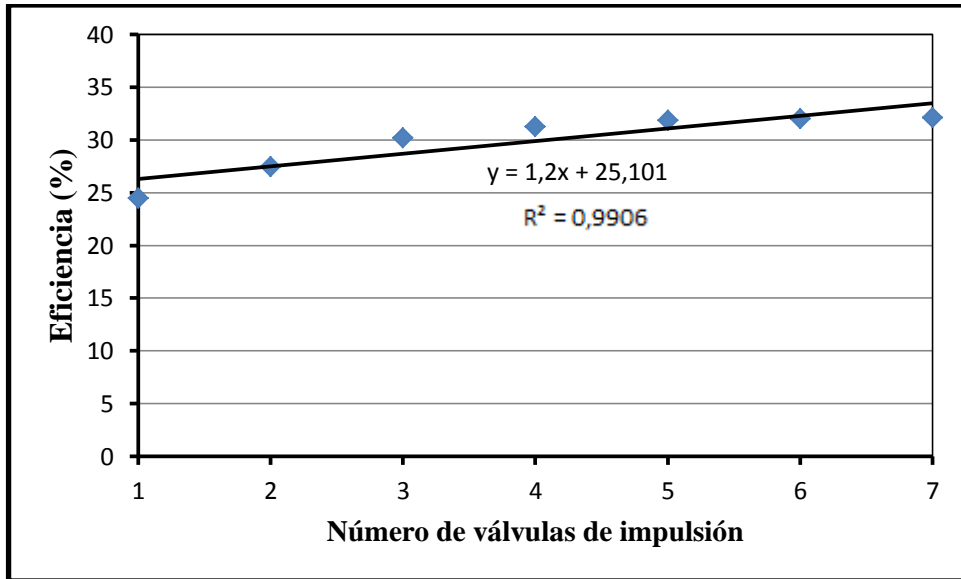


Figura 4-2: Eficiencia vs número de válvulas de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

Esta figura permite interpretar la eficiencia en función del número de válvulas de impulsión; la diferencia de eficiencias entre 1 y 2 válvulas de impulsión es de 2,53%, y la diferencia entre 1 y 3 válvulas es de 5,27% ,por lo que se observa notoriamente el cambio de este valor en contraste de las otras modificaciones de las válvulas, ya que este valor se va ajustando cada vez más debido a que el ariete ya no puede entregar más caudal aunque que se le adicione más válvulas de impulsión; es decir, la energía remanente que generalmente se aprovecha al implementar un ariete multimpulsor hasta cierto número de válvulas es efectivo, más allá de ese valor, el ariete sale de los rangos de operación normal y su funcionamiento no es óptimo. Al interpretar los resultados de esta gráfica, se observa que la selección correcta del número de válvulas de impulsión tiene que ir tanto en términos de operación, viabilidad y confiabilidad.

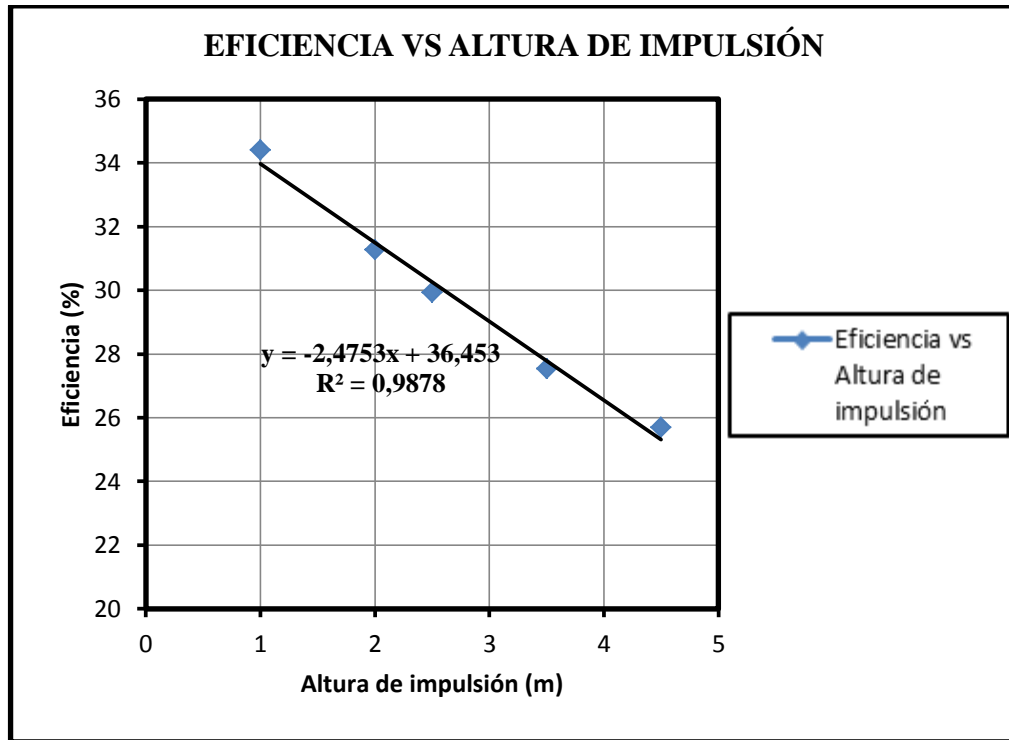


Figura 4-2: Eficiencia vs Altura de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

En esta se figura se observa la relación inversamente proporcional que existe entre la eficiencia y la altura de impulsión, es decir, si se aumenta la altura de impulsión, de la misma manera se aumentará la longitud de la tubería de impulsión; por lo tanto, las pérdidas por fricción aumentan en la tubería disminuyendo la capacidad de bombeo y reduciendo la eficiencia del sistema. De la misma forma, si se selecciona una tubería de impulsión demasiado larga se dañaría los elementos de la bomba de ariete, de ahí que nace la imperiosa necesidad de dimensionar correctamente la tubería para no afectar el rango de operación normal del ariete.

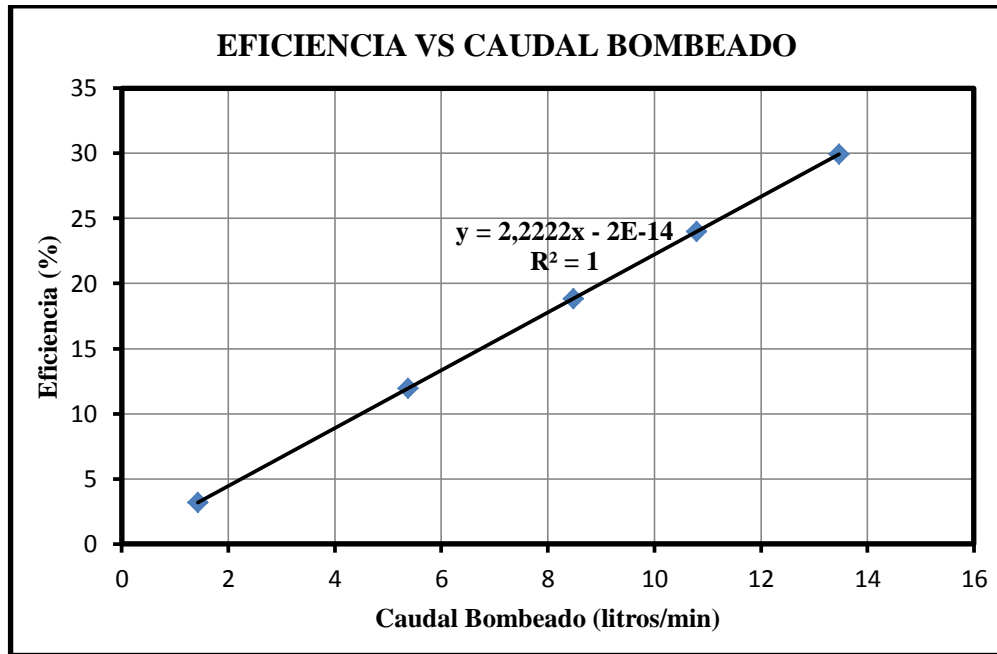


Figura 4-3: Eficiencia vs Caudal Bombeado

Elaborado por: Fernando Galarza

En la figura 4-3 se observa la relación que existe entre la eficiencia y el caudal bombeado; esta relación es directamente proporcional, es decir, al aumentar el caudal bombeado la eficiencia también aumenta. Se observó que a una carrera promedio el caudal bombeado es mayor, siempre y cuando la configuración carrera-peso este dentro del rango de operación normal.

Para las carreras de 2, 3 y 5mm se obtuvo caudales de descarga de 11,19 ; 10,84 y 11,02 litros/min respectivamente, esto da a entender que el caudal de bombeo está relacionado directamente con la configuración carrera-peso y por ende, afecta también a la eficiencia.

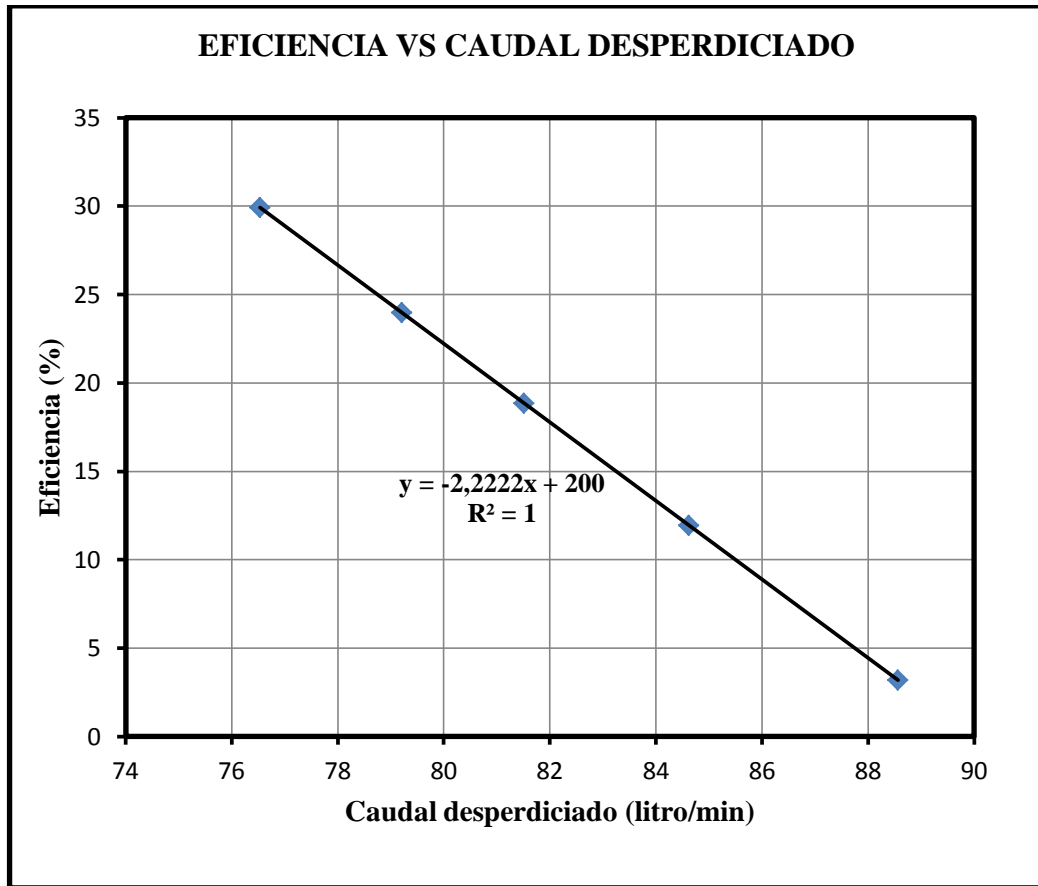


Figura 4-4: Eficiencia vs Caudal desperdiciado

Elaborado por: Fernando Galarza

En la figura 4-4 se observa la relación que existe entre la eficiencia y el caudal desperdiciado; esta relación es inversamente proporcional, es decir, cuando aumenta el caudal desperdiciado la eficiencia es menor. De ahí que es importante la selección y diseño correcto de la válvula de impulsión, para así tratar de aprovechar de la mejor manera el caudal de alimentación.

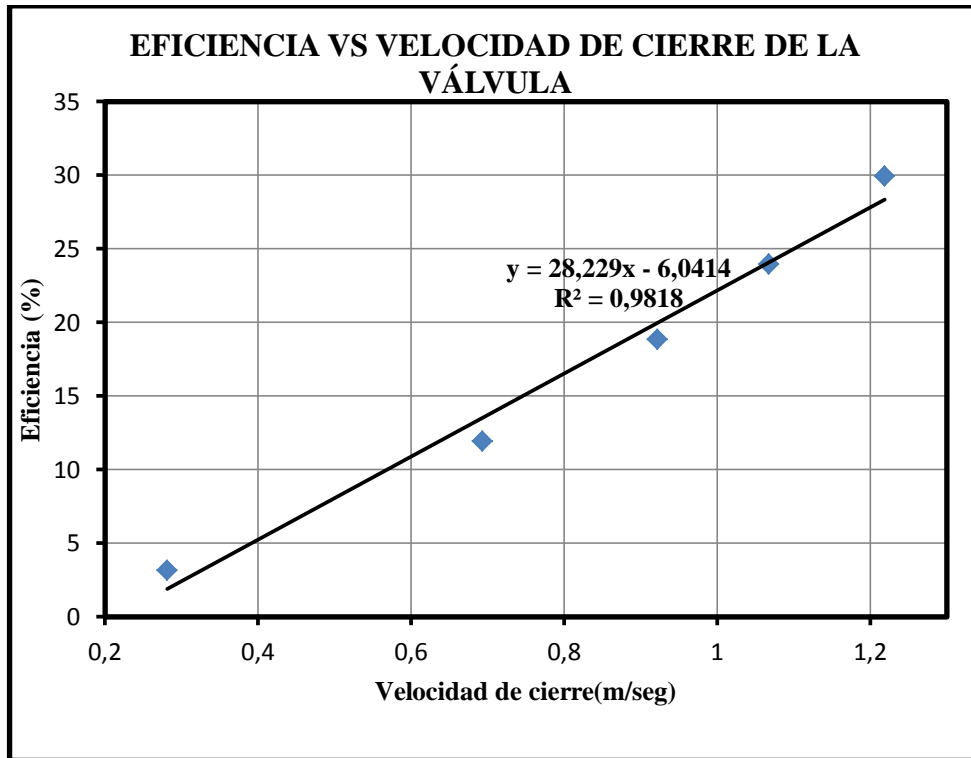


Figura 4-5: Eficiencia vs Velocidad de cierre de la válvula de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

En la figura 4-5 se observa la relación que existe entre la eficiencia y la velocidad de cierre de la válvula de impulsión; por medio de esta , se interpreta la relación directamente proporcional que existe entre la eficiencia y la velocidad de cierre, es decir, si se tiene mayor velocidad de cierre el caudal desperdiciado va a ser menor por tanto la eficiencia va a aumentar; a diferencia que si se tuviera una menor velocidad de cierre, el caudal desperdiciado va a ser mayor y por ende la eficiencia del sistema tiende a disminuir.

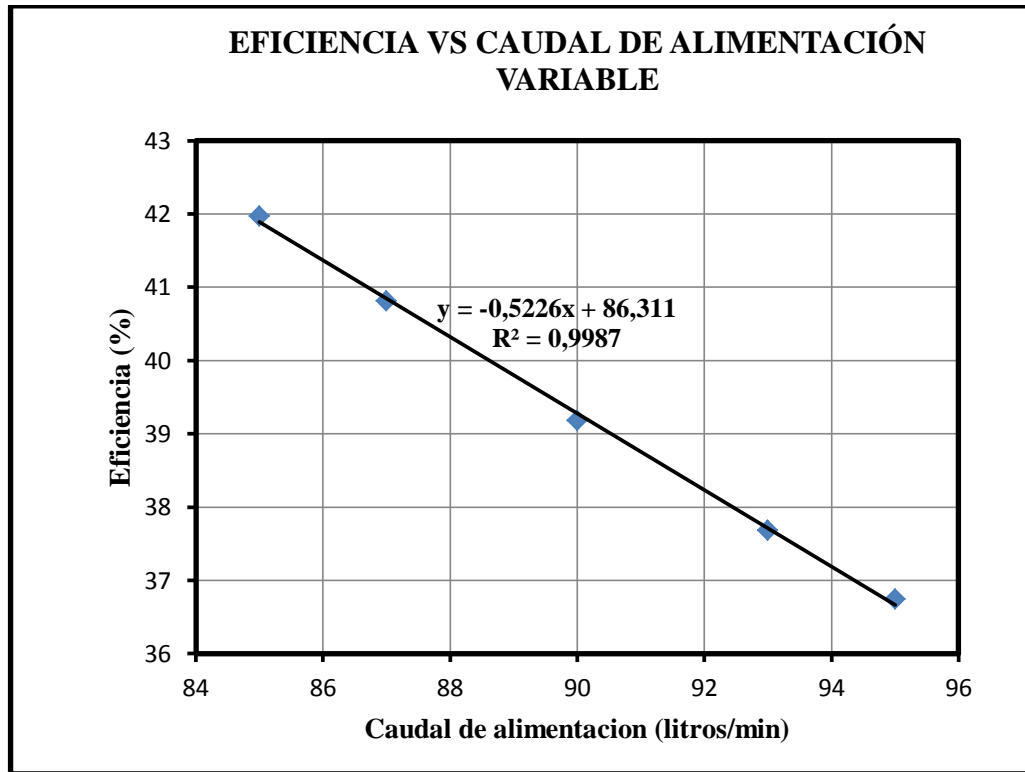


Figura 4-6: Eficiencia vs Caudal de alimentación variable

Elaborado por: Fernando Galarza

En la figura 4-6 se observa la eficiencia en función del caudal variable; ésta figurada da a entender que, a mayor caudal de alimentación la eficiencia es menor debido a que se tiene mayor caudal desperdiciado, pero hasta cierto punto, debido a que si se aumenta bruscamente el caudal de alimentación se debe variar también el diámetro de la tubería de impulsión pues estos dos factores van de la mano. Al contrario, si se tiene menor caudal de alimentación la eficiencia comienza a aumentar debido a que se obtiene un menor caudal desperdiciado haciendo el sistema más eficiente; por lo tanto, es importante el correcto dimensionamiento del diámetro de la tubería de impulsión para con esto garantizar el caudal de alimentación necesario para el normal funcionamiento del sistema.

4.2 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS.

Hipótesis: La correcta evaluación de los factores hidráulicos en una bomba de ariete permitirá mejorar la eficiencia.

Comprobación:

Por medio del estudio realizado al ciclo teórico de funcionamiento de la bomba de ariete, se pudo determinar los factores hidráulicos que influyen en su eficiencia, dependiendo de las variaciones de carrera y peso, así como también del número de válvulas de impulsión para las condiciones de instalación establecidas.

Efecto de la altura de impulsión (H) sobre la eficiencia

Para evaluar el efecto de esta sobre la eficiencia del sistema, se va a modificar la altura de impulsión (H) mientras se mantiene constante la altura de descarga. Se realizó cinco pruebas, para alturas de impulsión desde 1 metro hasta dos metros, realizando variaciones de 25cm en la misma; los resultados obtenidos son los siguientes:

H(m)	h(m)	L(m)	q(litros/min)	Eficiencia
1	5	8	5,52	29,5 %
1,25	5	8	6,76	30 %
1,5	5	8	7,95	29,45 %
1,75	5	8	9,1	28,89 %
2	5	8	8,5	28,33 %

Con los resultados anteriores verificamos que a medida que variamos la altura de impulsión la eficiencia empieza a cambiar, cuando la altura de impulsión empieza a aumentar el tiempo de ciclo disminuye, debido a que el fluido se acelera mucho más rápido al haber más presión de alimentación, alcanzando más rápidamente la velocidad necesaria para cerrar la válvula de impulsión y comenzar un nuevo ciclo.

Además, el caudal de descarga aumenta linealmente en función de la altura de impulsión hasta cierto valor para luego decrecer, consiguiendo elevar cada vez una mayor cantidad de agua. Sin embargo a partir de una altura de impulsión menor de 1 metro es cada vez menos eficiente energéticamente, debido a que la instalación del ariete se sale de la relación de instalación normal que es $1\text{ m} \leq H \leq 30\text{ m}$. Se observa que la eficiencia parece llegar a un valor máximo de 30,72 % correspondiente a una altura de impulsión de 1,25 metros.

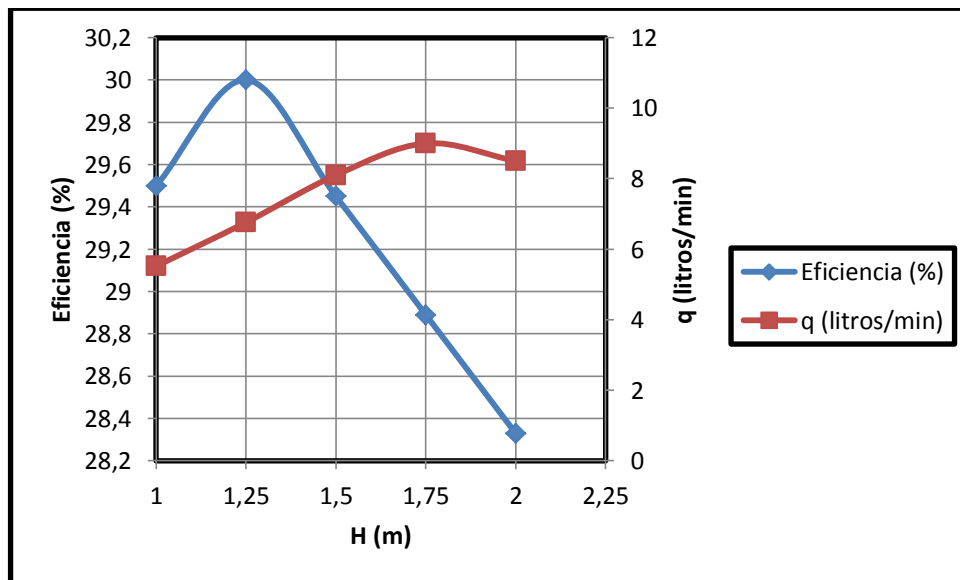


Figura 4-7: Verificación de hipótesis (Altura de impulsión)

Elaborado por: Fernando Galarza

🚦 Efecto de altura de descarga (h) sobre la eficiencia

Para tener una idea de la incidencia que tiene la altura de descarga (h) sobre la eficiencia del sistema de bombeo, se realizó diferentes pruebas variando esta altura manteniendo la altura de impulsión constante (2 metros). Las alturas de descarga que se probaron fueron de 3, 10, 20 y 25 metros.

Para alturas de descarga menores a 3 metros no es posible la toma de medidas, debido que esta configuración no permite una operación normal de la bomba de ariete.

h(m)	H(m)	L(m)	q(litros/min)	Eficiencia
3	2	8	9,14	19,59 %

h(m)	H(m)	L(m)	q(litros/min)	Eficiencia
10	2	8	5,25	37,53 %

h(m)	H(m)	L(m)	q(litros/min)	Eficiencia
20	2	8	3,2	44,28 %

h(m)	H(m)	L(m)	q(litros/min)	Eficiencia
25	2	8	2,1	39,6 %

Con los resultados anteriores verificamos que la altura de descarga varía la eficiencia del sistema. Otro parámetro que cambia, como es de esperar, es el caudal de descarga (q), que disminuye a medida que la altura de elevación es mayor. Sin embargo, la eficiencia es mayor cuanto mayor sea la altura de descarga, siempre y cuando este en los rangos de operación normal del ariete.

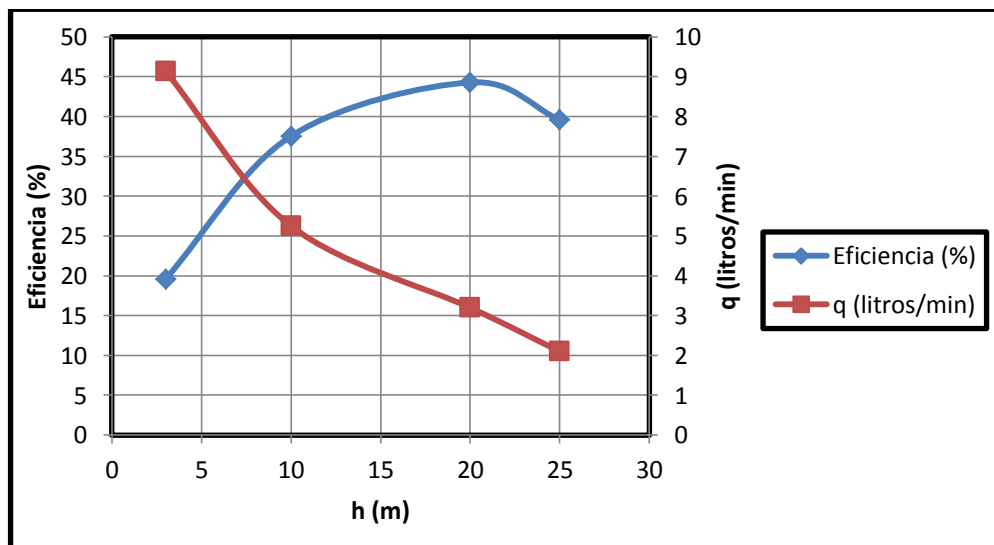


Figura 4.8: Verificación de hipótesis (Altura descarga)

Elaborado por: Fernando Galarza

✚ Efecto del material de la tubería de impulsión sobre la eficiencia

Para evaluar el efecto del material de la tubería de impulsión se utilizó acero y pvc, en los dos casos se obtuvieron valores tanto de la aceleración del agua como de la eficiencia. Para la tubería de acero se obtuvo los máximos valores de eficiencia y aceleración que son respectivamente 28,33% y 1347m/seg².

✓ Valores para la tubería de acero.

h(m)	H(m)	Aceleración (m/seg ²)	q(litros/min)	Eficiencia
5	2	1347	10,1	28,33 %

✓ Valores para la tubería de pvc.

h(m)	H(m)	Aceleración (m/seg ²)	q(litros/min)	Eficiencia
5	2	445	6,51	23,2 %

✚ Efecto del número de válvulas de impulsión sobre la eficiencia.

En la siguiente tabla se muestra la variación de porcentajes de eficiencia, con respecto a los diferentes factores hidráulicos que se pueden modificar en la bomba de ariete.

Tabla 4.14: Valores de eficiencia para diferentes configuraciones de la bomba

N° válvulas de impulsión	s (mm)	W (kg)	q (litros/min)	Q (litros/min)	H (metros)	h (metros)	n (%)
1	5	0,76	11,19	90	2	5	24,88
2	5	0,76	12,33	90	2	5	27,41
3	5	0,76	13,5	90	2	5	30,15
4	5	0,76	14,04	90	2	5	31,2
5	5	0,76	14,35	90	2	5	31,9
6	5	0,76	14,45	90	2	5	32,1
7	5	0,76	14,54	90	2	5	32,3

Elaborado por: Fernando Galarza

Como se puede observar en la tabla 4-14, las diferentes configuraciones que puede adoptar el ariete nos permite obtener mejores eficiencias. Por ejemplo para 1, 2 ,3 válvulas de impulsión obtenemos caudales de descarga de 11,19, 12,33 y 13,5 litros/min respectivamente, por lo tanto para el ariete multimpulsor obtenemos la máxima eficiencia que es de 30,15%, a diferencia del ariete convencional que es de 24,88 %.

Se puede decir que, evaluando los diferentes factores hidráulicos de la bomba de ariete se obtiene valores de eficiencia distintos, especialmente en un ariete multimpulsor, calificando de esta manera la hipótesis como positiva, dado que la correcta evaluación de los factores hidráulicos en la bomba de ariete nos permitió mejorar la eficiencia de la máquina.

Además en el análisis e interpretación de los resultados, se pudo observar que, la figura obtenida es idéntica a la que nos proporciona el ciclo teórico de funcionamiento de la bomba de ariete, garantizando así que el sistema cumpla con todas las condiciones para el normal desempeño la máquina hidráulica.

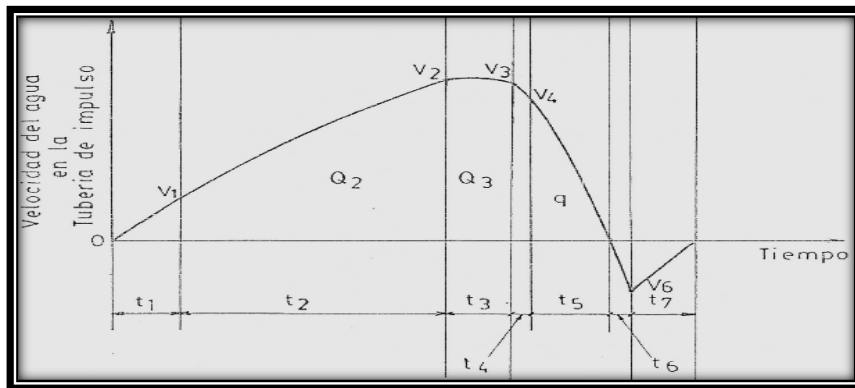


Figura 4.9: Ciclo teórico de operación del ariete hidráulico

Fuente: Krol the Automatic Hidraulic Ram

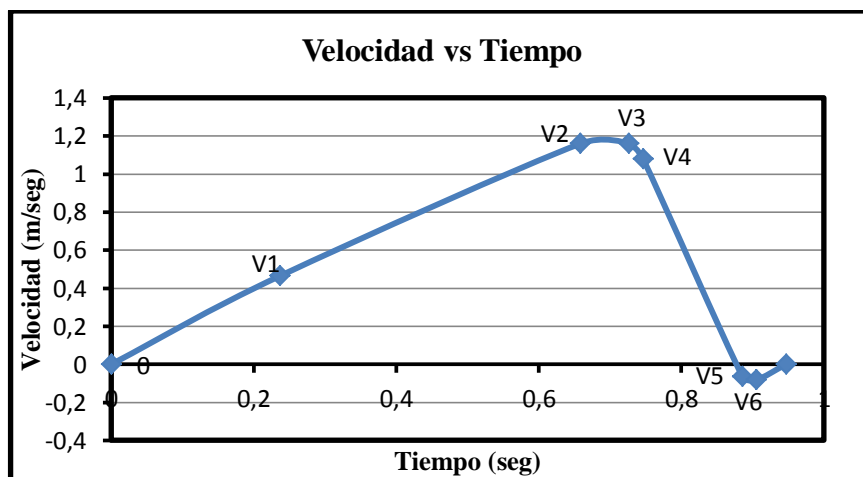


Figura 4.10: Ciclo teórico de operación del ariete hidráulico

Elaborado por: Fernando Galarza

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones se basan en los resultados obtenidos en forma teórica y del análisis e interpretación de los mismos, así como en el marco teórico en el cual se fundamenta dicha experimentación. De igual manera, de los estudios realizados se puede concluir que la eficiencia de la bomba de ariete depende de:

- ✓ La variación de los factores que influyen en la bomba de ariete se la realizó en base al ciclo teórico, cumpliendo con todas las condiciones que establece el ciclo.
- ✓ Mediante el estudio de diferentes modelos matemáticos, se adaptó los principios concernientes a las condiciones del medio de operación para el diseño hidráulico de la bomba de ariete; para que, mediante las modificaciones de cada uno de los factores que influyen en el modelo de la eficiencia poder evaluar esta con las mejores alternativas propuestas.
- ✓ La selección correcta del material de la tubería de impulsión es de vital importancia para la operación óptima del sistema, por lo tanto la tubería de acero es la que nos ofrece mayor valor de celeridad.
- ✓ El ángulo de inclinación de la tubería de impulsión debe ser lo más cercano a 10° , ya que este valor nos va a proporcionar el funcionamiento óptimo del sistema.

- ✓ La longitud de la tubería de 8 m correspondiente a una altura de impulsión de 2 m, es la que nos permite obtener la correcta operación del sistema para los requerimientos establecidos.
- ✓ La máxima relación entre la altura de impulsión y la de descarga debe ser 1:10 para obtener una eficiencia óptima.
- ✓ La variación del peso de la válvula de impulsión en función de su carrera son factores que afectan directamente a la eficiencia; para un peso de 0,76 kg, carrera de 5 mm y 3 válvulas se obtiene una eficiencia máxima del 30,15%.
- ✓ El peso de la válvula de impulsión es inversamente proporcional a la carrera de la misma, para un peso de 0,24 kg la carrera es de 5mm a diferencia que con un peso de 1,76 kg la carrera decrece a 2mm.
- ✓ El coeficiente de arrastre θ_s , de la válvula de impulsión es importante para predecir el funcionamiento del ariete hidráulico. Cuando se varía el coeficiente de arrastre, implícitamente se cambia la geometría de la válvula que guarda una relación proporcional con el peso de la válvula; es decir, la optimización del ariete para cada condición se reduce a una sintonización de peso y carrera en el sitio de instalación para contribuir a la eficiencia del sistema.
- ✓ En la ecuación de eficiencia se tiene dos consideraciones; la primera en función de la relación de alturas, esta configuración se aplicaría cuando lo importante es la altura de descarga y el caudal no es lo primordial; en cambio la segunda configuración en función de los caudales, de la misma forma, esta se realizará cuando el caudal de descarga sea lo primordial y la altura de descarga pase a segundo plano.
- ✓ La válvula de impulsión es la parte vital del ariete. Un peso fuerte y un golpe largo hacen posibles altas tasas de flujo a través de la válvula de impulsión provocando un golpe fuerte necesario para bombear grandes caudales. Un peso

pequeño y un golpe corto, golpearán más rápidamente y descargarán mayores volúmenes a caudales más pequeños.

✓ La cámara de aire permite comprimir y amortiguar el golpe de ariete, hace que la corriente sea más constante a través de la tubería de descarga y con menos pérdida por fricción.

✓ De todo el estudio realizado se concluye que la configuración para 3 válvulas de impulsión colocadas en serie, es la que nos permite obtener una eficiencia del 30,15 % valorada tanto en términos de factibilidad y operación.

5.2 RECOMENDACIONES

Por los estudios realizados se puede formular las siguientes recomendaciones:

- ✓ Mantener el caudal de alimentación constante para el normal funcionamiento del sistema.
- ✓ Las pérdidas, tanto por fricción como por accesorios en la tubería de impulsión deben ser reducidas al máximo; es por eso que se recomienda diseñar el sistema sin excesivas reducciones ni demasiados accesorios que provoquen pérdidas de carga por rozamiento.
- ✓ Las pérdidas en la tubería de descarga deben ser reducidas al máximo, debido que de esto va depender el caudal de descarga y por ende la eficiencia; esto se logra haciendo un tendido rectilíneo de la tubería en relación a la altura de descarga, es decir, en la instalación se debe tratar en lo posible que la longitud de la tubería se iguale al valor de la altura de descarga.
- ✓ Es necesario que, tanto el cuerpo del ariete como la tubería de impulsión sean lo más rígido posible y capaz de garantizar una buena expansión de la onda de sobrepresión para aprovechar de una manera eficiente más el golpe de ariete.
- ✓ La tubería de impulsión y la horizontal de emplazamiento del ariete debe tener un ángulo de caída de la tubería lo más cercano a 10° ; debe estar recta, sus uniones deben ser herméticas para evitar la formación de burbujas de aire, y en lo posible de acero ya que permite bombear más agua y a mayores alturas.
- ✓ Se debe fijar correctamente la bomba de ariete en una posición horizontal; bien anclada para evitar deslizamiento por vibración.
- ✓ De acuerdo al planteamiento de la tesis se recomienda sustituir el ariete convencional por un multimpulsor.

CAPÍTULO VI

6. PROPUESTA

“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE MULTIMPULSOR PARA EL ESTUDIO DE LOS FACTORES HIDRÁULICOS Y SU EFECTO SOBRE LA EFICIENCIA”

6.1 DATOS INFORMATIVOS

Una vez realizado el estudio teórico de los factores hidráulicos en una bomba de ariete y su efecto sobre la eficiencia, se ha determinado que la correcta evaluación de estos, influyen de manera directa en el mejoramiento de la eficiencia del sistema. Uno de los factores más importantes dentro del funcionamiento de la bomba de ariete, es el número de válvulas de impulsión, es decir, el modelo teórico nos permitió predecir el número correcto de impulsores en términos de viabilidad, confiabilidad y operación.

Constituye un aporte importante para el área de energía y específicamente para los sistemas por arietes hidráulicos el presente estudio realizado, debido a que se ha determinado la influencia que tiene cada uno de los factores hidráulicos sobre la eficiencia, constituyéndose además en una base para realizar estudios posteriores para otras modificaciones de los diferentes elementos de la máquina, con el claro objetivo de seguir develando y repotenciando este tipo de sistemas de bombeo no convencional.

Basándose en los distintos ensayos realizados y en el análisis de resultados, se ha determinado que el ariete multimpulsor es más adecuado que el ariete

convencional cuando se habla de eficiencia, por lo tanto, se propone el diseño y construcción de una bomba de ariete multimpulsor de 3 válvulas teniendo en cuenta aplicar las correctas consideraciones para su instalación y operación estudiadas anteriormente, con la finalidad de obtener las curvas de funcionamiento y los parámetros técnicos de la maquina hidráulica. La bomba de ariete consta de instrumentos de medida tanto de presión como de caudal para la visualización de los factores que afectan directamente a la eficiencia del sistema, además, se puede modificar la configuración de la válvula de impulsión, es decir, se clausura el número de válvulas que no se utilice durante el ensayo.

6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

Las bombas de ariete a través del tiempo han ido sufriendo modificaciones tanto en su diseño como en su construcción para mejorar su eficiencia. Con la tecnología actual es factible fabricar arietes multimpulsores que van a satisfacer la demanda de sus usuarios, ya que, al no utilizar ningún tipo de energía convencional se la puede instalar en cualquier sitio.

De ahí parte la imperiosa necesidad de proponer el diseño de un ariete multimpulsor para contrarrestar el principal problema que tienen los arietes convencionales que es su bajo rendimiento; por lo tanto, fue necesario estudiar todos los factores hidráulicos que afectan a la eficiencia del sistema para poder así diseñar una bomba que cumpla con la mayoría de requerimientos, parámetros y especificaciones con el claro objetivo de buscar el rendimiento óptimo de la bomba de ariete y del sistema en su totalidad.

En países desarrollados industrialmente se han realizado muchos estudios de la configuración óptima tanto en el número como en el diseño de las válvulas de impulsión para mejorar su eficiencia.

6.3 JUSTIFICACIÓN

La innovación en bombas de ariete crecen en función que avanza el tiempo, ya que se aplican nuevos procesos de diseño, ingeniería y fabricación en busca su máximo rendimiento.

En la actualidad, la búsqueda de energías verdes en cuanto a energías alternativas cada día es más evidente, por lo tanto, es importante repotenciar los sistemas de bombeo de arietes convencionales; es importante

Con este proyecto se busca mejorar la eficiencia de la bomba de ariete convencional, diseñando y construyendo un ariete multimpulsor para poder aprovechar de mejor manera la energía hidráulica que normalmente se desperdicia en los sistemas de bombeo de 1 válvula de impulsión (convencionales). El diseño de una bomba de ariete multimpulsor tiene como finalidad aportar en el desarrollo y avance de estas máquinas. Es muy importante la innovación tecnológica que nos permite la investigación en energías alternativas.





6.4 OBJETIVOS

Los objetivos propuestos en la siguiente tesis son:

6.4.1 Objetivo General

Diseñar, construir e instalar una bomba de ariete multimpulsor de 3 válvulas.

6.4.2 Objetivos Específicos

-  Determinar los parámetros necesarios para el diseño de la bomba de ariete.
-  Diseñar cada uno de los componentes de la bomba de ariete.
-  Calcular la eficiencia de la bomba con la variación de caudal y de altura.
-  Realizar las curvas características de funcionamiento de la bomba de ariete.

6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD

6.5.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

En lo que concierne al estudio de factibilidad desde el punto de vista técnico, se puede decir que es fundamental tener los conocimientos básicos de metalmecánica así como contar con un taller metal mecánico adecuado, que conste con las siguientes herramientas y equipos: taladro, torno, cortadora de plasma, soldadora eléctrica, entenallas, así como herramientas manuales básicas como: instrumentos de medición, tarrajas, llaves, limas, arco de sierra, es necesario alquilar estos equipos y maquinarias ya que los talleres de la facultad no cuentan con todos estos equipos mecánicos.

Para el diseño de la bomba de ariete es fundamental la aplicación de conocimientos de: mecánica de fluidos, diseño de elementos mecánicos, procesos de manufactura.

6.5.2 ANÁLISIS DE COSTOS

Para proceder a la construcción de la bomba de ariete multimpulsor se presentará toda la información de los costos de: maquinaria, mano de obra y materiales.

6.5.2.1 Costos Directos (CD)

Costos de Materiales(CTM)

Los costos de los materiales a utilizar en la construcción e instalación de la bomba de ariete multimpulsor se los detalla en la siguiente tabla:

Tabla 6:1: Costo de materiales mecánicos

COSTO DE MATERIALES MECÁNICOS (CM)				
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	UNIDADES	PRECIO UNITARIO(\$)	TOTAL(\$)
1	Tubo(Galvanizado)	2 pulg*3mm	15	15
1	Tubo(Galvanizado)	4,5pulg*4mm	25	25
1	Tubo C	1m*2 mm	3	3
1	Plancha	1m*1m*2mm	75	75
1	Eje de transmisión	4 pulg *150mm	25	25
1	Eje de transmisión	2pul*200mm	3,12	3,12
1	Eje de transmisión	1 pulg* 500mm	2,10	2,10
1	Eje de nylon	2pulg*200mm	3,40	3,40
1	Neplo	3/4pulg*1 pulg	0,90	0,90
2	Neplo	2pulg *3 pulg	3,40	6,80
1	Tapón	3/4 pulg	0,50	0,50
1	Bushing	1/2 pulg	0,35	0,35
3	Electrodos 6011	5 libras	3	15
1	Perno	1/2 pulg*4 pulg	0,85	0,85
12	Pernos	1/4pulg *1 pulg	0,20	2,40
8	Pernos	1/4pulg*1/2pulg	0,20	1,60
6	Tuercas	1/2 pulg	0,25	1,50
1	Pintura	2 litros	25	25
1	Fibra de zapatos	1m*1,5m	5	5
½	Plancha(galvanizado)	3m*3mm	27	27
1	Ángulo	1,5pulg* 3mm*6m	19	19
TOTAL (\$)				251,52

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.2: Costo de materiales para la instalación hidráulica

COSTOS DE MATERIALES PARA LA INSTALACIÓN HIDRÁULICA (CMI)			
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
1	Rotámetro	120	150
2	Manómetro	12	24
1	Bomba de agua	32	32
2	Universal(2pulg)	6	12
2	Válvula de bola	12	24
2	Universal (3/4pulg)	2,20	4,40
1	Válvula de globo	25	25
1	Tanque	50	50
1	Acrílico	70	70
TOTAL (\$)			391,40

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.3: Costo de materiales varios

COSTOS DE MATERIALES VARIOS (CMV)			
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	COSTO UNITARIO (\$)	TOTAL (\$)
10	Manguera	1,10	11
2	Siliconas	2,70	5,40
4	Pliego de lija	0,90	3,60
1	Masilla	2,50	2,50
TOTAL (\$)			22,50

Elaborado por: Fernando Galarza

Para la obtención de los costos directos sumamos los subtotales:

$$CD = CM + CMI + CMV$$

Tabla 6.4: Costo Directos

COSTOS DIRECTOS	
DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
CM	251,52
CMI	391,40
CMV	22,50
TOTAL (\$)	665,42

Elaborado por: Fernando Galarza

6.5.2.2 Costos Indirectos (CI)

✚ Costo de maquinaria utilizada (CMU)

Los costos que giran por la utilización de máquinas y herramientas se la detalla en la siguiente tabla, estos valores están basados por la hora de ocupación de cada una de ellas.

Tabla 6.5: Costo de maquinaria utilizada

COSTO DE MAQUINARIA UTILIZADA (CMU)			
MÁQUINA	TIEMPO DE UTILIZACIÓN(h)	COSTO/HORA (\$)	COSTO TOTAL (\$)
Suelda Eléctrica	20	4	80
Torno	10	7	70
Taladro	3	3	9
Esmeril	1	3	3
Compresor	2	4	8
Herramientas	8	5	40
TOTAL (\$)			210

Elaborado por: Fernando Galarza

✚ Costo de mano de obra (CMO)

Para la construcción e instalación para bombas centrífugas es necesaria la ayuda de un Técnico y un maestro, los cuales laboran 5 días a la semana durante 8 horas diarias.

El tiempo en el cual se estima que la culminación e instalación de la bomba de ariete es de 18 días.

Tabla 6.6: Costo de mano de Obra

COSTO DE MANO DE OBRA (CMO)				
DESCRIPCIÓN	COSTO HORA (\$)	COSTO DIARIO (\$)	Tiempo de construcción(días)	SALARIO OBRA
Técnico	2	16	18	288
Maestro	1,5	12	12	144
TOTAL (\$)				432

Elaborado por: Fernando Galarza

Para obtener el valor de los costos indirectos sumamos los subtotales.

$$CI = CMU + CMO$$

Tabla 6.7: Costo Indirectos

COSTOS INDIRECTOS	
DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
CMU	210
CMO	432
TOTAL (\$)	642

Elaborado por: Fernando Galarza

6.5.2.3 Costo total (CT) para la construcción e instalación de la bomba de ariete

Para obtener el valor total sumamos los costos directos y los indirectos obtenidos anteriormente:

$$CT = CD + CI$$

Tabla 6.8: Costo Total para la construcción e instalación

COSTOS TOTAL	
DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
CD	665,42
CI	642
TOTAL (\$)	1307,42

Elaborado por: Fernando Galarza

Previo al valor obtenido le aumentamos el 10% del valor total para imprevistos que pueden ocurrir mediante la elaboración.

Tabla 6.9: Costo Total para la construcción e instalación

COSTOS TOTAL	
DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
TOTAL	1307,42
10%	130,74
TOTAL (\$)	1438,16

Elaborado por: Fernando Galarza

6.5.3 ANÁLISIS TECNOLÓGICO

Revisados los medios técnicos necesarios para el diseño y construcción de una bomba ariete multimpulsor, se estableció la factibilidad de ejecutarlo. Para un buen desarrollo de la máquina, se utilizarán los procedimientos descritos en normas establecidas como son: la DTU S1 Bombas, Instrucciones para el usuario acerca de bombas de ariete (Anexo 1), Technical Release 13(Novedades en desarrollo de bombas de ariete hidráulico), a más de tener en cuenta ciertos factores y parámetros, sobre todo en la instalación del sistema analizados en el estudio realizado.

6.5.4 ANÁLISIS AMBIENTAL

Las bombas de ariete pueden competir con bombas que utilizan energía no renovable, que si bien no son automáticas, requieren electricidad para funcionar. Si hay un arroyo cercano con pendiente y se necesita bombear agua permanentemente, convendría el uso de una bomba de ariete, ya que su impacto ambiental es prácticamente cero, y el caudal desperdiciado se dirige nuevamente al arroyo o río; por lo tanto, es un máquina muy amigable con el ambiente ya que al no utilizar combustibles fósiles no causa contaminación.

El uso de las bombas de ariete puede permitir un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos de los que disponen muchos sectores de la población. Por medio

de este dispositivo se pueden regar cultivos, suministrar agua a los animales de la granja y proveer agua de uso doméstico.

6.6 FUNDAMENTACIÓN

Con la investigación realizada anteriormente y mediante los resultados obtenidos, se determina que para aumentar la eficiencia del sistema de bombeo se debe diseñar un ariete multimpulsor de 3 válvulas, teniendo en cuenta de aplicar la mayoría de los factores hidráulicos analizados en la presente tesis, ya que estos afectan directamente a la rendimiento del sistema en su totalidad.

6.6.1 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES HIDRÁULICOS PARA EL DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE LA BOMBA DE ARIETE MULTIMPULSOR

Altura de impulsión.- La altura de impulsión en el lugar a instalarse es de 2 metros, la misma que se encuentra entre los rangos recomendados para su funcionamiento.

Caudal de impulsión.- El caudal de impulsión que se tiene para este sistema es de 70 litros/min, teniendo en cuenta que este caudal debe permanecer constante de acuerdo al estudio antes realizado.

Luego de revisados los parámetros técnicos que se requieren para el funcionamiento del ariete hidráulico, se diseñó los elementos que constituyen el ariete multimpulsor, como son: la tubería de impulsión y descarga, las válvulas de impulsión y descarga y la cámara de aire, tanto en el diseño hidráulico como en el mecánico, con lo cual se determinó las dimensiones, que posteriormente se reflejará en los planos.

Carrera de la válvula de impulsión.- La carrera promedio para la válvula de impulsión es de 3mm.

Peso de la válvula de impulsión.- El peso promedio para la válvula de impulsión es de 0,76 kg.

6.6.2 DISEÑO HIDRÁULICO DE ARIETE MULTIMPULSOR

6.6.2.1 DIMENSIONAMIENTO DEL TANQUE DE ALIMENTACIÓN

Los tanques de captación varían con el sitio, y se los puede usar o no, dependiendo del tipo de fuente que se tenga o el uso que el agua requiera, prestando especial atención si es para consumo humano, en donde se debe evitar la contaminación. En donde se utilizará un desarenador, filtros de malla gruesa y otro de malla fina.

En nuestro caso se va a usar un tanque, se tendrá un tubo de entrada de caudal además es necesario colocar la toma del tubo de impulsión, lo más arriba del fondo del tanque para evitar la entrada de sedimentos en el tubo; sobre la toma se recomienda por lo menos 30 cm. de agua para que el tubo no absorba aire.

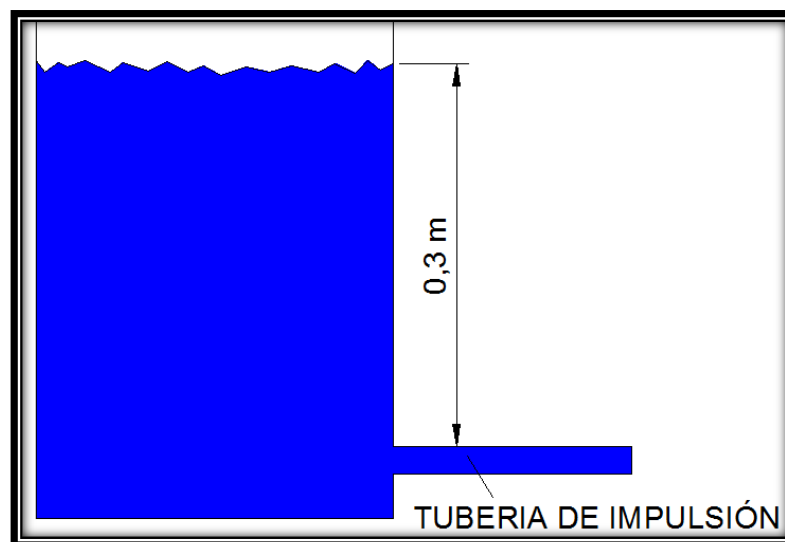


Figura 6.1: Tanque de alimentación

Elaborado por: Fernando Galarza

6.6.2.2 DIMENSIONAMIENTO DE LAS TUBERÍAS

Dentro del diseño hidráulico se debe buscar que los materiales para las tuberías de impulsión como también para la descarga, sean lo más lisas posibles para evitar pérdidas de carga.

➤ **Tubería de Impulsión**

a. Material de la tubería de impulsión

Después de realizado los estudios, la tubería que nos brinda mayor valor de eficiencia es la de acero; por lo tanto, este material es seleccionado para el diseño de la tubería de impulsión.

a. Longitud de la tubería de impulsión

De acuerdo a la tabla 2.3, para una altura de impulsión de $H= 2$ m, la longitud de la tubería de impulsión es:

$$L=5 H$$

$$L=5(2) \rightarrow L=10\text{m}$$

Además se puede determinar la longitud de la tubería de impulsión de una forma más precisa tanto en términos de operación, costo y requerimientos de resistencia mediante la fórmula de la tabla 2.2.

$$L_{\text{optima}} = 150 * D = 150 * 0,0508$$

$$L_{\text{optima}} = 7,62 \text{ m}$$

Es preferible tener el valor anterior estandarizado, por lo tanto: $L_{\text{optima}} = 8\text{m}$

b. Diámetro de la tubería de impulsión

De acuerdo a la tabla 2.5, para un caudal de impulsión que este en el rango de 57 a 95 litros/min, el diámetro de la tubería de impulsión debe ser de $\rightarrow \mathbf{D=2 \text{ pulg}}$

Para la comprobación de la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería de impulsión se utiliza la ecuación 2.13:

$$150 \leq \frac{L}{D} \leq 1000$$

$$150 \leq \frac{8}{0,0508} \leq 1000$$

Debido a que la relación entre la longitud y el diámetro de la tubería de impulsión está dentro del rango establecido por la ecuación anterior, el sistema está bien dimensionado.

➤ **Tubería de descarga**

a. Material de la tubería de descarga

Este deberá ser rígido, con paredes lo más lisas posible, las uniones deben ser herméticas, se debe evitar el uso de accesorios para no causar turbulencia en la descarga y mantener un caudal continuo; por lo tanto la tubería que nos ofrece estas características es la de pvc.

b. Diámetro de la tubería de descarga

La tubería de descarga de acuerdo a investigaciones y al estudio realizado, debe ser mínimo la mitad del diámetro del tubo de impulsión; por lo tanto el diámetro de la tubería de descarga es de:

$$d = \frac{3}{8}D = \frac{3}{8} * 2 = 0,75$$

$$d = 3/4 \text{ pulg}$$

6.6.2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS DE IMPULSIÓN Y DESCARGA

➤ **Válvula de impulsión**

La válvula de impulsión tiene movimiento axial, su asiento es plano y tiene forma de platillo, se cierra automáticamente por efecto de la presión del líquido, y se abre también de un modo automático al disminuir la presión a causa de su propio peso. El dimensionamiento de esta válvula está en función del diámetro de la tubería de impulsión (ANEXO A7).

a. Diámetro de la válvula de impulsión

El diámetro del orificio de la válvula es de $d_o = 0,035$ m, para la configuración óptima del sistema.

Para calcular el diámetro de la válvula de impulsión se aplica la siguiente ecuación:

$$d_i = 1,25 * d_o$$

$$d_i = 1,25 * 0,35 = 0,42\text{m}$$

b. Área de la válvula de impulsión.

$$A = \frac{\pi * d_i^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi * (0,042)^2}{4} = 1,39 * 10^{-3}\text{m}^2$$

c. Carrera de la válvula de impulsión

De acuerdo a experimentaciones realizadas en bombas de ariete la abertura de la carrera de la válvula está entre “6% D” y “20 % D”; para la tubería de impulsión de diámetro 2 pulg se tiene las siguientes configuraciones de la carrera.

$$s_{\min} = 0,06 D = 0,06(2 * 25,4) \rightarrow s_{\min} \cong 3\text{mm}$$

$$s_{\max} = 0,10 D = 0,10(2 * 25,4) \rightarrow s_{\max} \cong 10 \text{ mm}$$

$$s_{\text{prom}} = \frac{s_{\min} + s_{\max}}{2} = \frac{3 + 10}{2} \rightarrow s_{\text{prom}} \cong 6\text{mm}$$

➤ **Válvula de descarga**

De la misma forma que la válvula de impulsión, la de descarga depende también del diámetro de la tubería de impulsión. (ANEXO A9).

6.6.3 CÁLCULO DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL ARIETE

6.6.3.1 Esquema de instalación de la bomba de ariete

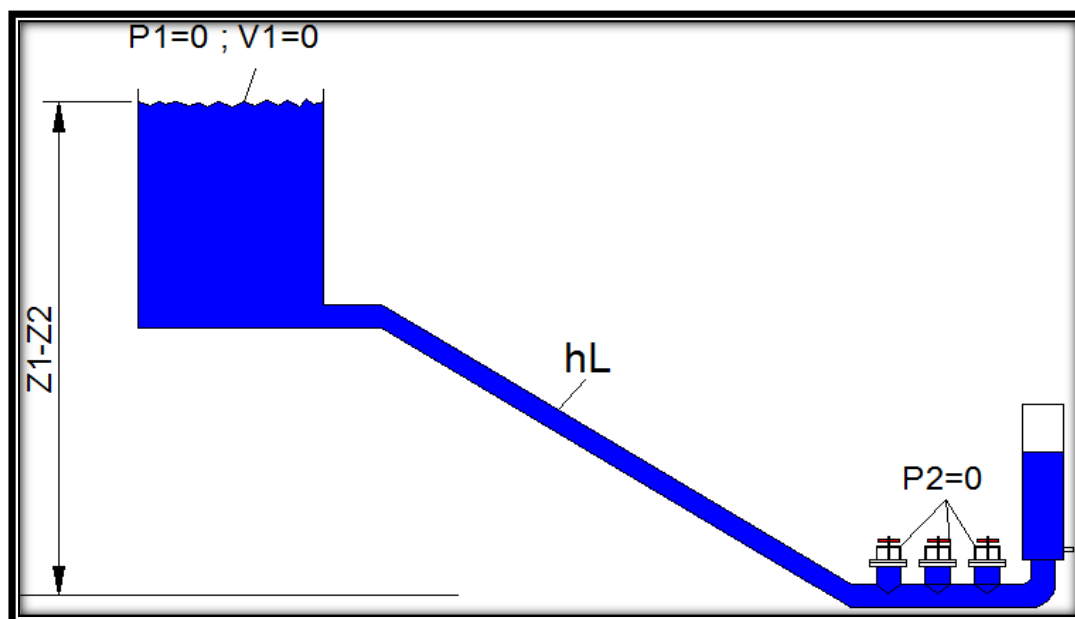


Figura 6.2: Instalación de la bomba de ariete

Elaborado por: Fernando Galarza

6.6.3.2 Velocidad del flujo en la tubería de impulsión

Ésta se determina aplicando la ecuación de la energía o Bernoulli, entre el tanque de suministro y el asiento de las válvulas de impulsión.

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Tabla 6.10: Condiciones de borde para el sistema de bombeo

Condiciones de borde	
Presión en el tanque de alimentación	$P_1 = 0$
Presión en las válvulas de impulsión	$P_2 = 0$
Velocidad en el tanque de alimentación	$V_1 = 0$

Elaborado por: Fernando Galarza

De acuerdo a la figura 6.2 la P_1 y P_2 son iguales a la presión atmosférica; por lo tanto son igual a cero. Además la velocidad en el tanque de alimentación también es igual a cero.

Aplicando las condiciones de borde a la ecuación anterior, se tiene que:

$$\frac{V_2^2}{2g} = (z_1 - z_2) - h_L$$

Donde: $(z_1 - z_2) = H = 2,5 \text{ m}$, y asumiendo un factor de fricción de $(f=0,025)$.

$$\frac{V_2^2}{2g} + h_L = (z_1 - z_2)$$

$$\frac{V_2^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{V_2^2}{2g} = 2,5$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2,5}{\frac{1}{2g} + \frac{fL}{2Dg}}} = \sqrt{\frac{2,5}{\frac{1}{2(9,81)} + \frac{(0,025)(8)}{2(0,0508)(9,81)}}$$

$$V_2 = 2,8 \text{ m/seg}$$

6.6.3.3 Determinación del tipo de flujo en la tubería de impulsión

Mediante este cálculo se va a determinar del tipo de régimen, ya que las pérdidas de energía dependen si el flujo es laminar o turbulento.

De acuerdo al Anexo A2 para temperatura ambiente tenemos un viscosidad cinemática del agua de $\rightarrow \nu = 1,13 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$

$$N_R = \frac{V_2 D}{\nu} = \frac{(2,8)(0,0508)}{1,13 * 10^{-6}}$$

$$N_R = 116884$$

De acuerdo al número de Reynolds obtenido anteriormente se define al flujo como turbulento.

6.6.4 CÁLCULO DEL COEFICIENTE TOTAL DE PÉRDIDAS EN TUBERÍA DE IMPULSO.

Se debe tener en cuenta que el agua que se acelera en el tubo de alimentación, es la que provoca el “golpe de ariete”, por lo que éste ha de tener una longitud, inclinación y diámetro adecuados, sin curvas ni estrechamientos que provoquen pérdidas de carga por rozamiento.

Para el correcto diseño del sistema de bombeo de acuerdo al estudio antes realizado, la longitud de tubería de 8 m es la que nos permite obtener las menores pérdidas por fricción; por lo tanto se calcula las pérdidas para este valor.

6.6.4.1 Determinación del factor de fricción para la tubería de impulsión

Para una tubería de acero galvanizado según el Anexo A4 se tiene una rugosidad de $\varepsilon = (0,15 - 0,20)$ mm; por lo tanto se va a escoger un valor promedio:

$$\varepsilon = 0,175\text{mm} = 1,75 * 10^{-4}\text{m}$$

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7 \left(\frac{0,0508}{1,75 * 10^{-4}} \right)} + \frac{5,74}{116884^{0,9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0,028$$

6.6.4.2 Cálculos de pérdidas por fricción en la tubería de impulsión

Para la determinación de las pérdidas de fricción en la tubería de impulsión de acuerdo a los valores antes calculados se tiene:

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} = 0,028 \frac{8}{0,0508} \frac{2,8^2}{2(9,81)}$$

$$h_f = 1,76 \text{ m}$$

En donde:

h_f =Pérdida de energía debido a la fricción (m).

D= Diámetro de la tubería de impulsión (m).

V= Velocidad en la tubería de impulsión (m/seg).

f= Factor de fricción (adimensional).

6.6.4.3 Cálculo de coeficientes de resistencias

Para el sistema que se está diseñando es importante minimizar las pérdidas tanto en curvas como también en estrechamientos, para lo cual el correcto diseño e instalación del sistema nos permitirá lograr este objetivo.

Durante el análisis se identifica cuatro lugares donde se observa pérdidas hidráulicas, estas se encuentran localizadas en las dos válvulas de bola, en la boquilla del tanque de alimentación hacia la tubería de impulsión y en las válvulas de impulsión de la bomba de ariete.

Tabla 6.11: Cálculo de pérdidas de carga en la impulsión del sistema

Cálculo de pérdidas por fricción y accesorios en la tubería de impulsión							
Accesorios	# de accesorios	Le/D	L/D	F	K	$V^2/2g$	$h_L = K \frac{V^2}{2g}$
V. de bola	2	340		0,028	9,52	0,4	7,6
Boquilla	1				0,5	0,4	0,2
Tubería			157,48	0,028	4,41	0,4	1,76

Elaborado por: Fernando Galarza

6.6.4.4 Cálculo del Coeficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso

La ecuación 2,16 que permite el cálculo del coeficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso $R_{(s)}$, para diferentes posiciones de la válvula, para la carrera promedio de 3mm (0,12 pulg) determinada anteriormente se tiene:

$$R_{(s)} = \frac{2,43 - 1,06S + 10^{(0,95-13,3S)}}{S} = \frac{2,43 - 1,06(0,12) + 10^{(0,95-13,3(0,12))}}{0,12}$$

$$R_{(s)} = 2,11 = K_3$$

6.6.4.5 Cálculo de la velocidad de flujo en las válvulas de impulsión

$$V_v = \sqrt{\frac{2 g H}{1 + f \frac{L}{D} + \Sigma h}}$$

$$V_v = \sqrt{\frac{2 g H}{1 + f \frac{L}{D} + K_1 + K_2 + K_3}}$$

$$V_v = \sqrt{\frac{2 (9,81) (2,5)}{1 + (0,028) \frac{8}{(0,0508)} + 7,6 + 0,2 + 2,11}}$$

$$V_v = 1,7 \text{ m/seg}$$

6.6.4.6 Cálculo de pérdida de carga durante el periodo de bombeo

La pérdida durante el periodo de bombeo se puede calcular aplicando la ecuación 2-19 del modelo teórico de Krol.

$$h_{\max} = \frac{aV_3}{g} = \frac{(1259,55)(1,22)}{(9,81)} = 156,64 \text{ m}$$

$$h_r = 5,64 \left(1 - \frac{h}{h_{\max}}\right) = 5,64 \left(1 - \frac{5}{156,64}\right) = 5,45$$

6.6.5 DISEÑO MECÁNICO DE ARIETE MULTIMPULSOR

6.6.5.1 DISEÑO MECÁNICO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN

Características del material para la tubería de impulsión

Las características de la Tubería ISO R65 Serie Liviana I, de acero galvanizado seleccionado para la impulsión son las siguientes:

Tabla 6.12: Características de la tubería de impulsión

Características de la tubería de impulsión	
Diámetro exterior	$D_{\text{ext}} = 60,15\text{mm}$
Diámetro interior	$D_{\text{int}} = 53,75\text{mm}$
Espesor	$e = 3,2\text{ mm}$

Elaborado por: Fernando Galarza

Las especificaciones mecánicas para tubería galvanizada son las siguientes:

Tabla 6.13: Especificaciones mecánicas de la tubería galvanizada

Especificaciones mecánicas de la tubería galvanizada	
Resistencia a la tracción	$S_u = 273\text{ MPa}$
Resistencia a la fluencia	$S_y = 80\text{ MPa}$

Elaborado por: Fernando Galarza

Análisis de esfuerzos en la tubería de impulsión

Utilizando la ecuación de la velocidad de propagación de la onda de presión se tiene:

$$a = \frac{1345}{\sqrt{1 + \frac{D K}{\delta E}}} = \frac{1345}{\sqrt{1 + \frac{52,5 * 21000}{3,91 * 2.01 * 10^6}}}$$

$$a = 1259,55\text{ m/seg}$$

La sobrepresión máxima es calculada con la siguiente expresión:

$$p = \frac{a V}{g} = \frac{(1259,55) (1,28)}{9,81}$$

$$p = 164,34 \text{ m.c.a} = 164340 \text{ kgf/m}^2 = 1,612 \text{ MPa}$$

Mediante el valor de sobrepresión obtenido, se verificó si la tubería seleccionada resiste a los esfuerzos a los que está sometida, la sobrepresión es la presión máxima.

$$P_{\max T} = p = 1,612 \text{ MPa}$$

$$P_{\min T} = 0,092 \text{ MPa}$$

Los esfuerzos causados por la variación de presión se los calculó como un cilindro de pared delgada en donde se toma en cuenta el espesor del mismo, figura 6.3:

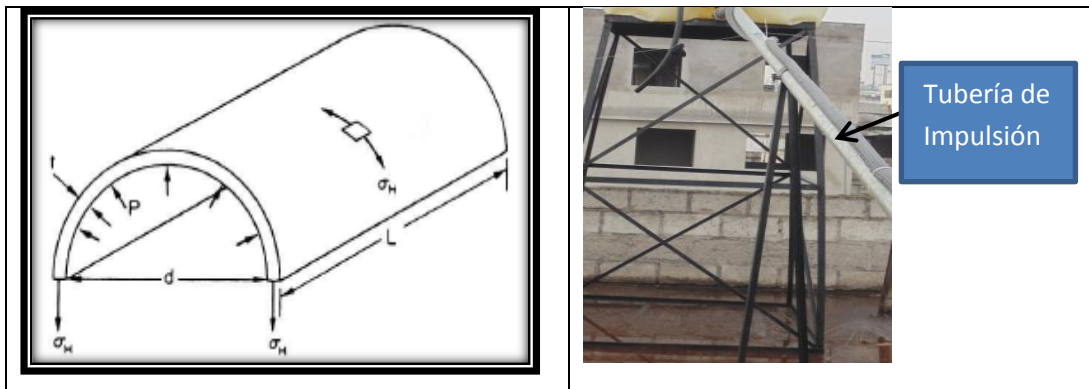


Figura 6.3. Mitad de la tubería sometida a presión interna

Elaborado por: Fernando Galarza

$$\sigma_t = \frac{p D}{2 e} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Mediante la aplicación de la fórmula 6.3 se obtuvo el esfuerzo máximo y mínimo que soporta la tubería:

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} D}{2 e} \quad \text{Ecuación 6.4}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{1,612 * 53,75}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\max} = 13,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{P_{\min} D}{2 e} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{0,092 * 53,75}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\min} = 0,77 \text{ MPa}$$

Diseño estático de la tubería de impulsión

Para el diseño estático de la tubería de impulsión se aplica la fórmula de la teoría de la energía de la distorsión:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B - \sigma_B^2}$$

$$\sigma' = \sqrt{(13,5)^2 - (13,5)(0,77) - (0,77)^2}$$

$$\sigma' = 12,77 \text{ MPa}$$

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$n_s = \frac{80}{12,77} = 6,2$$

Diseño a fatiga de la tubería de impulsión

Debido a que la tubería de impulsión está sometida a cargas cíclicas o fatiga, se debe verificar que no falle; por lo tanto se debe calcular el factor de seguridad dinámica:

La resistencia a la fatiga de la tubería es:

$$S_u \leq 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_e' = 0,5 * S_u$$

$$S_e' = 0,5 * 273$$

$$S_e' = 136,5 \text{ MPa}$$

La resistencia a la fatiga se reduce por los coeficientes modificadores los cuales tienen por valores:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

$$S_e = 0,83 * 0,76 * 0,85 * 1 * 1 * 1 * 136,5$$

$$S_e = 73,18 \text{ MPa}$$

A continuación se calcula el esfuerzo medio y la amplitud del esfuerzo:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{13,5 - 0,77}{2} \rightarrow \sigma_m = 6,36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{13,5 + 0,77}{2} \rightarrow \sigma_a = 7,13 \text{ MPa}$$

Para calcular el límite de resistencia a la fatiga se usa el diagrama modificado de Goodman:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{7,13}{73,18} + \frac{6,36}{80} = \frac{1}{n} \rightarrow n = 5,65$$

Los factores estático y a fatiga nos garantizan que la tubería no fallará al estar sometida a las fluctuaciones de presión ocasionadas por el golpe de ariete, además se debe tomar en cuenta que estos factores tienen valores elevados debido a la calidad de la tubería seleccionada, que está disponible en el mercado.

6.6.5.2 DISEÑO MECÁNICO DEL CUERPO DEL ARIETE

Características del material para el cuerpo del ariete

Las características del material del cuerpo del ariete son exactamente las mismas que las de la tubería de impulsión.

Cálculo de carga total y mínima

Para calcular la presión máxima y mínima en el cuerpo del ariete primero se debe obtener la carga total máxima y luego la mínima:

$$H_{\max} = H + p$$

$$H_{\max} = 2,5 + 164,34 \rightarrow H_{\max} = 166,38 \text{ m}$$

$$H_{\min} = p - H$$

$$H_{\min} = 164,34 - 2,5 \rightarrow H_{\min} = 161,38 \text{ m}$$

Presión máxima y mínima en el cuerpo del ariete

$$P_{\max} = \gamma * H_{\max}$$

$$P_{\max} = 9800 * 166,38 \rightarrow P_{\max} = 1,63 \text{ MPa}$$

$$P_{\min} = \gamma * H_{\min}$$

$$P_{\min} = 9800 * 161,38 \rightarrow P_{\min} = 1,57 \text{ MPa}$$

Análisis de esfuerzos en el cuerpo del ariete

$$\sigma_{\max} = \frac{1,63 * 53,75}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\max} = 13,69 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{1,57 * 53,75}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\min} = 13,19 \text{ MPa}$$

Diseño estático del cuerpo del ariete

Para el diseño estático de la tubería de impulsión se aplica la fórmula de la teoría de la energía de la distorsión:

$$\sigma' = \sqrt{(13,69)^2 - (13,5)(13,19) - (13,19)^2}$$

$$\sigma' = 12,77 \text{ MPa}$$

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma'}$$

$$n_s = \frac{80}{12,77} = 6,2$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_{\max} D}{2 * e}$$

$$\sigma_{\max} = \frac{1,63 * 53,75}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\max} = 13,8 \text{ MPa}$$

$$n_s = \frac{80}{13,8} = 5,7$$

6.6.5.3 DISEÑO MECÁNICO DE LA CÁMARA DE AIRE

Es importante recalcar que la cámara es un depósito cerrado con aire y agua. El aire dentro de la cámara se comporta como un elemento elástico, que al comprimirse (fase de sobrepresión), la cámara recibe una cantidad de agua y reduce en parte la tendencia a sobrepresiones altas; mientras que cuando se expande (fase de depresión) sede cierta cantidad de agua de la almacenada en la fase anterior a la tubería de descarga, dando así un flujo continuo a través de la misma.

El efecto de la cámara de aire o tanque de presión de la bomba de ariete no es tomado en cuenta en el modelo matemático de Krol; por lo tanto se determinó una forma de cálculo para el dimensionamiento de esta. Con referencia a la figura 6.4, se tiene los siguientes parámetros:

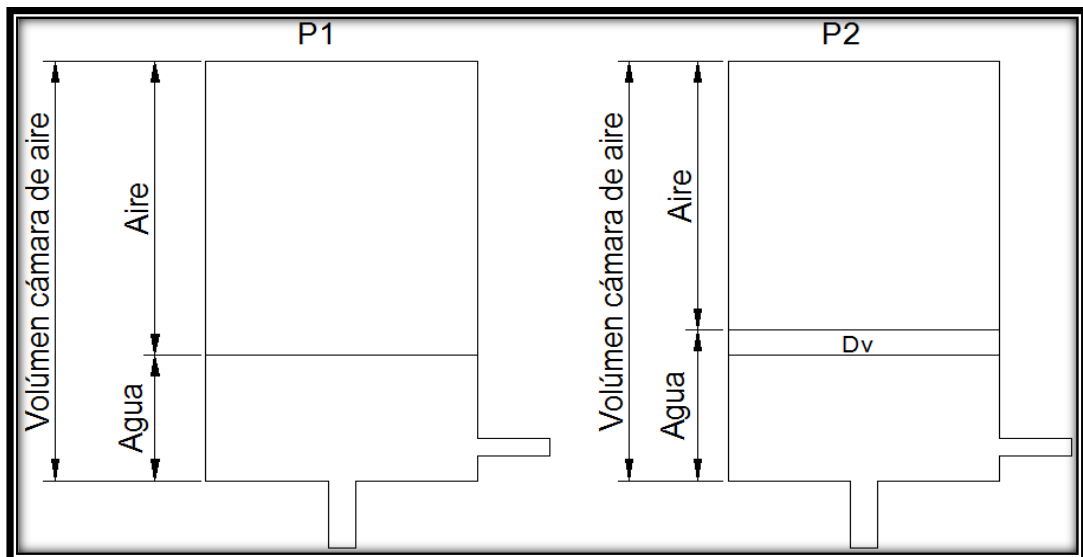


Figura 6.4. Cámara de aire sometida a presión interna

Elaborado por: Fernando Galarza

En donde:

Dv= Volumen bombeado en cada ciclo del ariete

Presión en la cámara de aire

La presión que está ejerciendo el aire que se encuentra en la cámara de aire es de absoluta importancia ya que con esta se define la presión con la que el agua fluirá por la tubería de entrega, a continuación se calcularán las presiones tanto en la cámara de aire, como la del aire que se encuentra en ella.

Presión en la cámara de aire antes del choque hidráulico

Para calcular esta presión nos basamos en la fórmula de hidrostática:

$$P_1 = P_0 + \gamma p$$

Donde:

P_0 =Presión atmosférica en pascales.

p = Sobrepresión causada por el ariete (metros)

$$P_1 = 101325 + 9800 * 164,34 \rightarrow P_1 = 1,71 \text{ MPa}$$

Volumen total en la cámara de aire

El volumen total en la cámara de aire se calcula con la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{\pi D_c^2}{4} L_c$$

Donde:

V_c = Volumen total de la cámara de aire (m^3)

D_c = Diámetro de la cámara de aire (m)

L_c = Longitud de la cámara de aire (m)

$$V_c = \frac{\pi (0,1143)^2}{4} (0,5) \rightarrow V_c = 5,13 * 10^{-3} m^3$$

Volumen inicial de aire en la cámara

$$V_1 = V_c - V_{H_2O}$$

En donde:

V_{H_2O} = Volumen que se encuentra antes que se produzca el golpe de ariete (m^3)

$$V_1 = 5,13 * 10^{-3} - 2,052 * 10^{-3} \rightarrow V_1 = 3,1 * 10^{-3} m^3$$

Volumen final de aire en la cámara

$$V_2 = V_1 - D_v$$

$$V_2 = 3,1 * 10^{-3} - 1,7 * 10^{-4} \rightarrow V_2 = 2,93 * 10^{-3} m^3$$

Presión en la cámara de aire después del choque hidráulico

Para el cálculo de la presión después del choque hidráulico se aplica la ecuación de los gases ideales, es decir la compresión y expansión del aire en la cámara obedece a la Ley de Boyle:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{1,71 * 3,1 * 10^{-3}}{2,93 * 10^{-3}} \rightarrow P_2 = 1,81 \text{ MPa}$$

Análisis de esfuerzos en el cuerpo del ariete

$$\sigma_{\max} = \frac{1,81 * 114,3}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\max} = 32,3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\min} = \frac{1,71 * 114,3}{2 * 3,2} \rightarrow \sigma_{\min} = 30,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = \frac{32,3 + 30,5}{2} \rightarrow \sigma_m = 31,4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_a = \frac{32,3 - 30,5}{2} \rightarrow \sigma_a = 0,9 \text{ MPa}$$

Diseño de estático de la cámara de aire

$$n_s = \frac{80}{32,3} = 2,47$$

Diseño a fatiga de la cámara de aire

$$S_u \leq 1400 \text{ MPa} \rightarrow S_e' = 0,5 * S_u$$

$$S_e = 0,83 * 0,76 * 0,85 * 1 * 1 * 1 * 136,5$$

$$S_e = 73,18 \text{ MPa}$$

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{0,9}{73,18} + \frac{31,4}{80} = \frac{1}{n} \rightarrow n = 2,47$$

6.6.5.4 DISEÑO MECÁNICO DE LA VÁLVULA DE IMPULSIÓN

Respetando el dimensionamiento realizado anteriormente, se va a proceder a verificar las diferentes medidas mediante el diseño mecánico de las diferentes partes de la válvula:

Coefficiente de arrastre de la válvula de impulsión

Para calcular el coeficiente de arrastre de la válvula de impulsión se lo realiza con la siguiente ecuación y para un valor de la carrera de la válvula:

$$C_d = \frac{0,282 - 8,854 S + 0,8 * 10^{(0,52-270 S)}}{S}$$

En donde:

S= Carrera de la válvula de impulsión (m).

$$C_d = \frac{0,282 - 8,854 (0,007) + 0,8 * 10^{(0,52-270 (0,007))}}{0,007}$$

$$C_d = 36,3$$

Fuerza hidráulica que actúa sobre la válvula de impulsión

La fuerza hidráulica que se da en la válvula de impulsión por influencia de la fricción, se calcula con la siguiente fórmula:

$$F_d = C_d \left(\frac{\delta V_v}{2} \right) A$$

En donde:

V_v =Velocidad en la válvula de impulsión (m/seg)

A =Área de la válvula de impulsión (m²)

$$F_d = 36,3 * \left(\frac{1000 * 1,5}{2} \right) 1,39 * 10^{-3}$$

$$F_d = 37,8 \text{ N} = 3,86 \text{ kg}$$

Por lo que el peso para cada válvula de impulsión debe ser:

$$W_v = \frac{F_d}{3}$$

Donde:

W_v =Peso máximo de cada válvula de impulsión(kg)

$$W_v = \frac{3,86}{3} \rightarrow W_v = 1,3 \text{ Kg}$$

Base de la válvula de impulsión

El cierre de la válvula es hermético, debido al desgaste por el golpeteo y la corrosión su asiento debe ser resistente; por lo tanto el material elegido para la base de la válvula es el nylon, debido a que éste tipo de polímero tiene buena resistencia a la corrosión y es un buen disipador del ruido.

Vástago de la válvula de impulsión

Por el cierre continuo de la válvula se la diseñó al impacto, utilizando la teoría de la energía de deformación para sus distintos elementos, considerando también carga a fatiga. En el instante en que la válvula se cierra, choca contra su base, con una

determinada energía cinética, producto de la aceleración generada por la fuerza de arrastre del agua al escapar por la abertura de la válvula.

6.6.5.6 DISEÑO MECÁNICO DE LA VÁLVULA DE DESCARGA

La válvula de descarga, es una válvula simple de no retorno, está constituida por un pie de válvula con varios orificios que permitan el paso del agua hacia la cámara de aire, un empaque de caucho rígido que se levantará bajo la acción de la presión del flujo y se cerrará debido al retroceso y peso del agua cuando se ha consumido la energía cinética, su fijación se realizará por medio de las bridas porta válvulas que une el cuerpo del ariete y la cámara de aire.

Área de paso de la válvula de descarga

Para el diseño correcto el área de paso de la válvula de descarga se ha calculado en base a la siguiente consideración:

✚ El caudal de descarga que atraviesa la válvula debe ser el mayor posible; por lo tanto se aumentó el diámetro y el número de los orificios que componen la válvula de descarga. En la siguiente figura se ilustra lo que las normas DTU especifican para la válvula de descarga, modificada específicamente en el tamaño de los diámetros con la finalidad de aumentar el caudal.

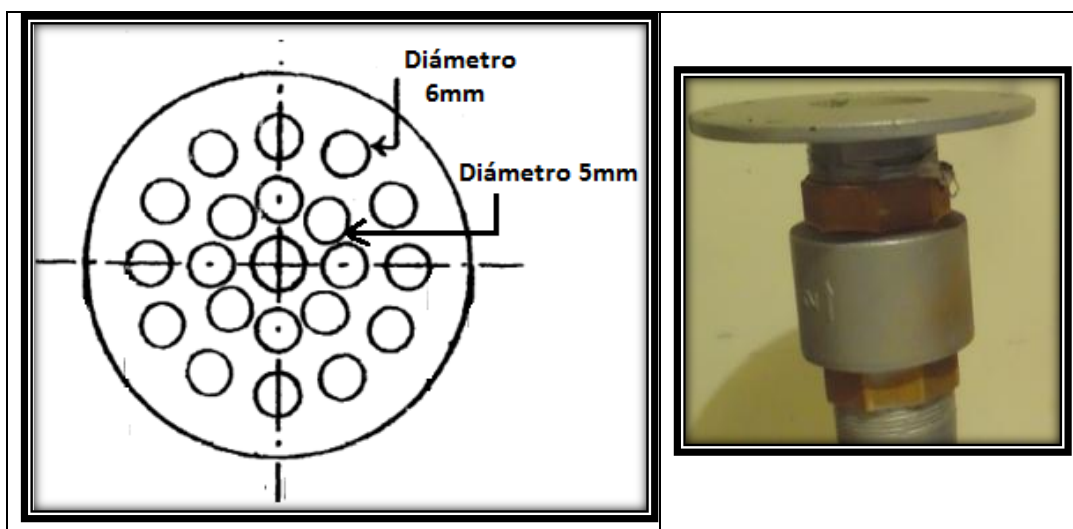


Figura 6.5: Válvula de descarga

Elaborado por: Fernando Galarza

6.6.5.7 CICLO DE OPERACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO

Cálculos previos para el ciclo: Ecuación 2-20 y Ecuación 2-19

$$h_{\max} = \frac{aV_3}{g} = \frac{(1259,55)(1,22)}{(9,81)} = 156,64 \text{ m}$$

$$y = \frac{(h + h_r)^2 L g}{2 H a^2} = \frac{(5 + 5,46)^2 (12,5) (9,81)}{2 (2,5) (1259,55)^2} = 0,06$$

$$h_r = 5,64 \left(1 - \frac{5}{156,64} \right) = 5,46$$

Periodo 1: Ecuación 2-6 y Ecuación 2-7

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}} = \sqrt{\frac{2(9,81)(2,5)(0,06)}{(12,5)}} \rightarrow V_1 = 0,464 \text{ m/seg}$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}} = \sqrt{\frac{2(12,5)(0,06)}{(9,81)(2,5)}} \rightarrow t_1 = 0,237 \text{ seg}$$

Periodo 2: Ecuación 2-8, Ecuación 2-9, Ecuación 2-11

$$V_2 = \sqrt{\frac{Wg}{\Phi_{(s)}A\gamma}} = \sqrt{\frac{(7,46)(9,81)}{(6,8)(7,92 * 10^{-4})(9810)}} = 1,18 \text{ m/seg}$$

$$\Phi_{(s)} = \frac{0,345 - 0,275S + 10^{(0,52-6,85S)}}{S} = \frac{0,345 - 0,275(0,12) + 10^{(0,52-6,85(0,12))}}{0,12}$$

$$\Phi_{(s)} = 6,8$$

$$V_2 = 0,4 \sqrt{\frac{2gH}{Z}} = 0,4 \sqrt{\frac{2(9,81)(2,5)}{5,25}} = 1,22 \text{ m/seg}$$

$$k_o = \frac{mg}{A\delta V^2} = \frac{(0,76)(9,81)}{(7,92 * 10^{-4})(1000)(1,22)^2} = 6,32$$

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_o}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_o}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)}$$

$$t_2 = \frac{12,5}{\sqrt{2(9,81)(2,5)(5,25)}} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{(7,46)(5,25)}{2(7,92 * 10^{-4})(2,5)(9810)(6,32)}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{(0,055)(5,25)}{12,5}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{(7,46)(5,25)}{2(7,92 * 10^{-4})(2,5)(9810)(6,32)}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{(0,055)(5,25)}{12,5}}\right)}$$

$$t_2 = 0,42 \text{ seg}$$

En donde:

k_o = Coeficiente de resistencia de cierre de la válvula de impulso.

Periodo 3: Ecuación 2-12, Ecuación 2-13

La velocidad del agua es ahora tal que, la acción de la fuerza en la superficie interior de la válvula de impulso es superior que el peso de la misma. La válvula de impulso comienza a cerrarse y es completado su cierre al final del periodo.

$$V_3 = V_2 = 1,18 \text{ m/seg}$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3LSV_2}{2g^2H \left(1 - \frac{WM}{Z_1^2}\right)}} = \sqrt[3]{\frac{3(12,5)(0,003)(1,18)}{2(9,81)^2(2,5) \left(1 - \frac{(7,46)(5,25)}{(16,25)^2}\right)}} = 0,068 \text{ seg}$$

$$Z_1 = \sqrt{2\Phi_{(s)}AH\gamma} = \sqrt{2(6,8)(7,92 * 10^{-4})(2,5)(9810)} = 16,25$$

$$M = 1 + \sum j + 4f\left(\frac{L}{D}\right) + R_{(s)}$$

$$R_{(s)} = \frac{2,43 - 1,06S + 10^{(0,95-13,3S)}}{S}$$

En donde:

Z_1 = Coeficiente de corrección.

M= Coeficiente de pérdidas agrupado.

$R_{(s)}$ =Coeficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso (adimensional).

Periodo 4: Ecuación 2-17, Ecuación 2-18

$$t_4 = \frac{2L}{a} = \frac{2(12,5)}{1259,55} = 0,02 \text{ seg}$$

$$V_4 = V_3 - (h + h_r) \frac{g}{a} = 1,18 - (5 + 5,46) \frac{9,81}{1259,55} = 1,09 \text{ m/s}$$

Periodo 5: Ecuación 2-21, Ecuación 2-22

$$V_5 = 0$$

$$t_5 = \frac{L}{(h + h_r)g} \left(\sqrt{\frac{mg}{A\delta k_o}} - \frac{(h + h_r)g}{a} \right)$$

$$t_5 = \frac{12,5}{(5 + 5,46)(9,81)} \left(\sqrt{\frac{(0,76)(9,81)}{(7,92 * 10^{-4})(1000)(6,32)}} - \frac{(5 + 5,46)(9,81)}{1259,55} \right)$$

$$t_5 = 0,138 \text{ m/seg}$$

Periodo 6: Ecuación 2-23, Ecuación 2-24

$$t_6 = \frac{2L}{a} = \frac{2(12,5)}{1259,55} = 0,02 \text{ seg}$$

$$V_6 = -\frac{(h + h_r)g}{a} = -\frac{(5 + 5,46)(9,81)}{1259,55} = -0,081 \text{ m/seg}$$

Periodo 7: Ecuación 2-25, Ecuación 2-26

$$V_7 = 0$$

$$t_7 = \frac{L(h + h_r)}{H a} = \frac{12,5(5 + 5,46)}{(2,5)(1259,55)} = 0,041 \text{ seg}$$

• **Caudal bombeado por ciclo:** Ecuación 2-28

$$q' = \frac{\frac{L}{2g} * \frac{mg}{0,345 - 0,275S + 10^{(0,52-6,85S)}} - \frac{\gamma A_t L g (h + h_r)^2}{2a^2}}{S (h + h_r)}$$

$$q' = 0,2337 \text{ m} - 0,0009 = 0,2337 (0,76) - 0,0009$$

$$q' = 0,17 \text{ Kg/ciclo}$$

Para transformar el caudal bombeado a litros/min, se aplica la siguiente ecuación:

$$q = \frac{60 * q'}{T} = \frac{60 * 0,17}{0,947}$$

$$q = 10,77 \text{ litros/min}$$

• **Eficiencia del sistema de bomba de ariete:** Ecuación 2-30

$$n = \frac{h}{QH} * \frac{\frac{L}{2g} * \frac{mg}{0,345 - 0,275S + 10^{(0,52-6,85S)}} - \frac{\gamma A_t L g (h + h_r)^2}{2a^2}}{(h + h_r)}$$

$$n = (0,329 \text{ m} - 0,0012) * 100$$

$$n = 24,88\%$$

Tabla de valores del ciclo teórico de operación de la bomba de ariete

Tabla 6.14: Ciclo teórico de operación de la bomba de ariete

	Tiempo(seg)	Velocidad(m/seg)
Ciclo 1	0,237	0,464
Ciclo 2	0,42	1,18
Ciclo 3	0,068	1,18
Ciclo 4	0,02	0,02
Ciclo 5	0,1238	0,138
Ciclo 6	0,02	0,02
Ciclo 7	0,041	0,041
Tiempo de ciclo	0,947	

Elaborado por: Fernando Galarza

Gráfico del ciclo teórico de operación:

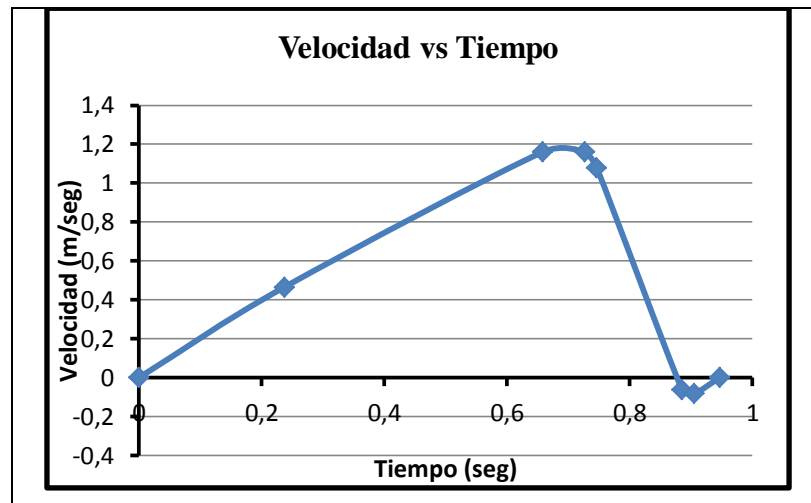


Figura 6.6: Gráfico del ciclo de operación de la bomba de ariete

Elaborado por: Fernando Galarza

6.6.5.8 Análisis mediante el modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Para el análisis de las propiedades físicas como velocidad, presión, presión dinámica, que intervienen en el desarrollo del fenómeno del ariete hidráulico se utilizó a más de un modelo en 3D, un programa especializado en análisis de fluidos, para de esta manera ir modificando la geometría de los diferentes componentes hasta obtener su diseño más óptimo y adecuado.

Con la aplicación del modelo CFD se procedió a establecer la geometría de la bomba de ariete y la metodología de dicho modelo, para así poder obtener los resultados requeridos.

Mediante la comparación se pudo corregir y mejorar los diferentes parámetros hidráulicos antes de su fabricación, facilitándonos de esta manera la construcción en sí del prototipo así como también el de sus cambios.

Etapas de pre-procesamiento CFD para la bomba de ariete

La geometría de la bomba de ariete se presenta en la fig. 6.7 mediante un modelado geométrico en tres dimensiones, en la que se detalla sus distintas partes funcionales:

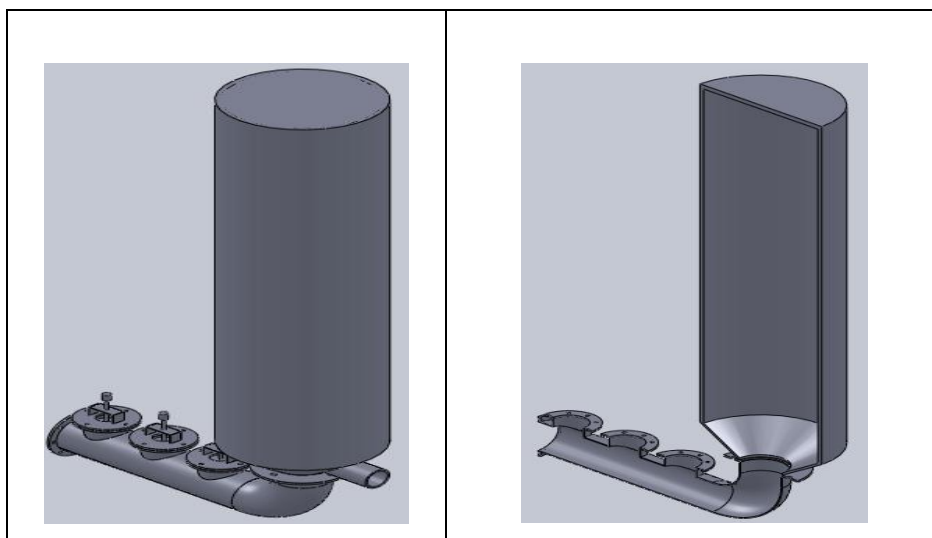
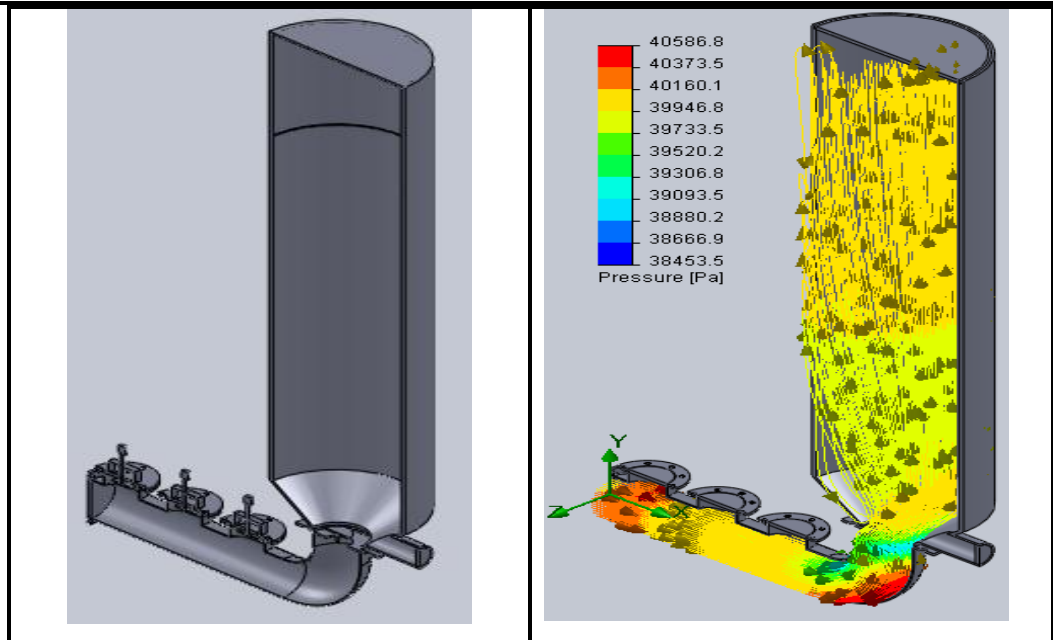


Figura 6.7: Modelo geométrico de la bomba de ariete

Elaborado por: Fernando Galarza

ANÁLISIS MEDIANTE MODELADO CFD

Título: Análisis de presiones en la cámara de aire.



INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los primeros resultados de las presiones se obtuvieron cuando el ariete se inunda completamente por el fluido, esto es, justo antes de que se produzca el fenómeno del golpe de ariete en el sistema.

MEJORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE

Tomando como base el diseño de la válvula de impulsión, se ha obtenido presiones sumamente altas en el ingreso a la válvula de descarga.

Se ha construido una válvula invertida la que normalmente está cerrada por la acción de su peso y se abre por la presión generada por el golpe de ariete. Además, la carrera se puede regular mediante la acción vástago.

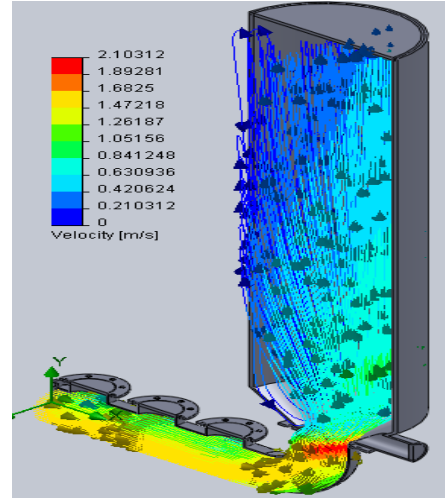
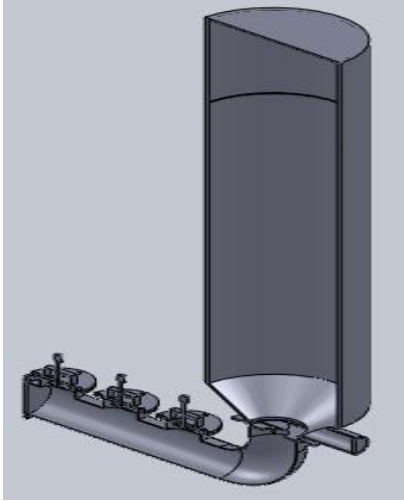


Válvula de
descarga

Válvulas de
impulsión

ANÁLISIS MEDIANTE MODELADO CFD

Título: Análisis de las velocidades del fluido en el cuerpo del ariete



INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En este análisis del fluido en el cuerpo del ariete, se observa que las velocidades más bajas se encuentran dentro de la cámara de aire, y las más altas en el cuerpo del mismo.

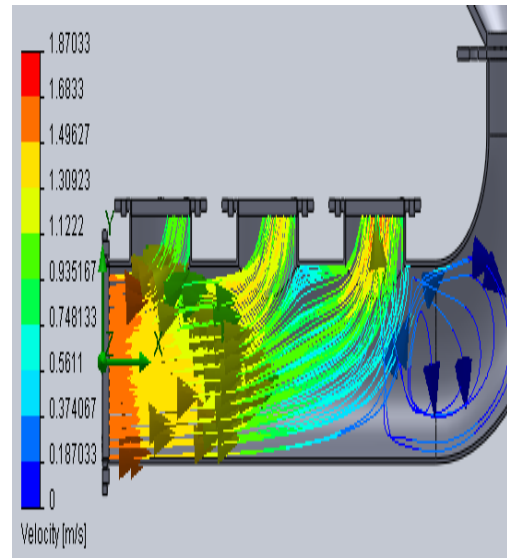
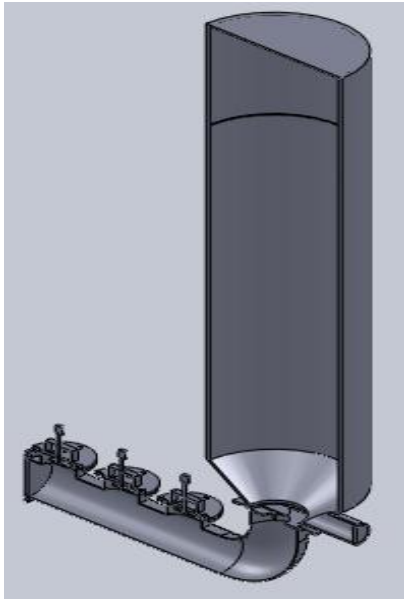
MEJORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE

Las bombas de ariete convencionales se suelen construir con elementos simples, hay que tener en cuenta que estos elementos no están diseñados para la sobrepresión que genera la bomba de ariete. Por lo tanto, para mejorar las prestaciones de la bomba se ha diseñado un soporte de acero para la válvula de impulsión, con lo cual la válvula se desplaza sobre éste permitiendo un cierre hermético y un desplazamiento uniforme para evitar fugas de presión.



ANÁLISIS MEDIANTE MODELADO CFD

Título: Análisis de las velocidades del fluido a la entrada de las válvulas.

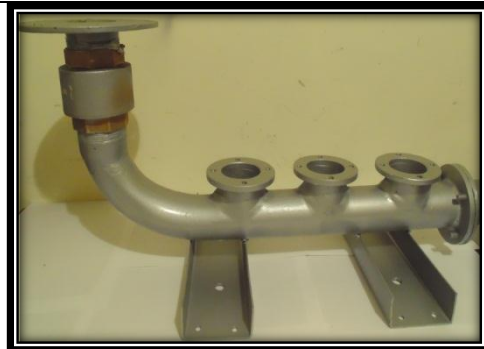


INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

En el análisis de las velocidades del fluido construido con varias T a la entrada de las válvulas de impulsión, se observa que existen pérdidas hidráulicas lo que disminuye la velocidad.

MEJORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE

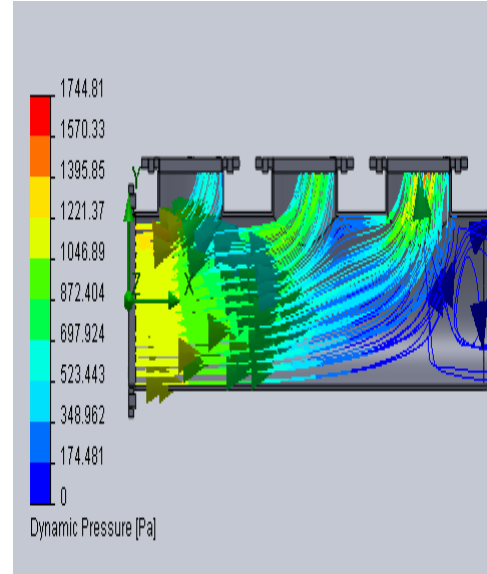
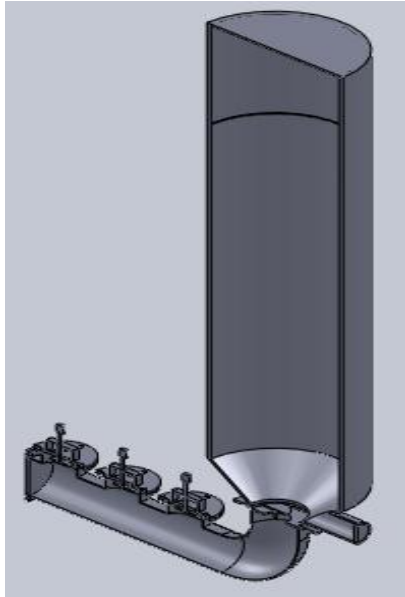
La implementación de un tubo continuo permite que la bomba de ariete multimpulsor funcione con un mejor rendimiento debido a que las pérdidas hidráulicas son mucho menores que si el cuerpo del ariete estuviera construido con varias "T".



Al hacer una sola pieza el cuerpo del ariete se disminuye las pérdidas por fricción y cambios de sección.

ANÁLISIS MEDIANTE MODELADO CFD

Título: Análisis de la presión dinámica en las válvulas de impulsión



INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

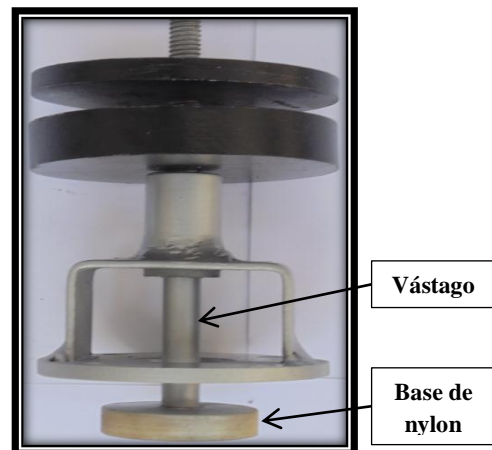
En el análisis de la presión dinámica en las válvulas de impulsión se observa que la presión no es suficiente para levantar el peso de las válvulas de impulsión; de ahí lo importante de calcular correctamente este valor.

MEJORAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA BOMBA DE ARIETE

Para mejorar el rendimiento de la bomba de ariete, se ha diseñado una válvula de impulsión que consta de dos partes:

1°.- Un vástago de acero que hace que su resistencia sea más elevada para los golpes que se generan.

2°.- Una base de nylon para mejorar la resistencia a la corrosión y disminuir el ruido de la válvula.



6.7 METODOLOGÍA


En base al estudio teórico, selección de materiales, diseño hidráulico, diseño mecánico y los cálculos realizados para la instalación, se procedió a construir la bomba de ariete multimpulsor. Aquí se describen los elementos tanto para la instalación como también para la medición que conforman el mismo.

6.7.1. Instalación hidráulica

Tanque de alimentación

El tanque de alimentación es la parte del sistema hidráulico que nos va a permitir simular la fuente de agua en una instalación real.

Tabla 6.15: Características del tanque de alimentación


Tanque de alimentación		
Gráfico	Datos técnicos	
	Cantidad	1
	Volumen	1 m ³
	Material	Plástico

Elaborado por: Fernando Galarza

Tubería de impulsión

La tubería de impulsión es uno de los factores que influye de gran manera en el valor de eficiencia de la bomba de ariete, las características de ésta se describen en la tabla 6.16.

Tabla 6.16: Características de la tubería de impulsión


Tubería de impulsión		
Gráfico	Datos técnicos	
	Material	Acero
	Diámetro	2 pulg
	Longitud	7 metros
	Espesor	3mm
	Nomenclatura	ASTM

Elaborado por: Fernando Galarza

Tubería de descarga

A diferencia de la tubería impulsión la de descarga o entrega puede ser de cualquier material; que sea capaz de soportar una pequeña presión de agua ascendiendo al tanque de descarga, las características de ésta se describen en la tabla 6.17.

Tabla 6.17: Características de la tubería de descarga


Tubería de descarga		
Gráfico	Datos técnicos	
	Material	Plástico
	Diámetro	¾ pulg
	Longitud	8 m
	Espesor	2 mm

Elaborado por: Fernando Galarza

Tanque de caudal de desperdicio

El tanque para el caudal de desperdicio, es la parte del sistema hidráulico que nos va a permitir cerrar el circuito, ya que de no hacer esto el desperdicio de agua sería demasiado elevado.

Tabla 6.18: Características para el tanque de caudal desperdiciado

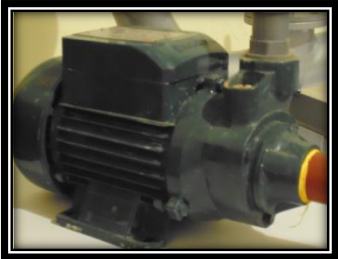
Tanque de caudal desperdiciado		
Gráfico	Datos técnicos	
	Cantidad	1
	Volumen	0,2 m ³
	Material	Plástico

Elaborado por: Fernando Galarza

Bomba centrífuga

La bomba centrífuga es la parte del sistema que nos permite ingresar el caudal desperdiciado por la bomba de ariete hacia el tanque de alimentación.

Tabla 6.19: Características para la bomba centrífuga

Bomba centrífuga		
Gráfico	Datos técnicos	
	Potencia	0,5 hp
	Caudal	40 litros/min
	Marca	MILANO
	Frecuencia	60 Hz
	Altura máxima	40 m


Elaborado por: Fernando Galarza

6.7.2 Instalación eléctrica

Pulsador on/off

Permite el paso y cierre de la energía mediante un pulsador, está colocado para accionar la bomba para accionar la bomba.

Tabla 6.20: Características del Pulsador on/off

Pulsador on/off		
Gráfico	Datos técnicos	
	Potencia	55 W
	Voltaje	110v
	Amperaje	0,5 Amp
	Marca	Electric


Elaborado por: Fernando Galarza

6.7.3 Instrumentos de medida

Rotámetro

El rotámetro es un instrumento de medida de caudal, que mediante una escala graduada nos permite leer el flujo volumétrico que pasa por una tubería.

Tabla 6.21: Características del Rotámetro


Rotámetro		
Gráfico	Datos técnicos	
	Temperatura máx.	40° C
	Longitud	25 mm
	Flujo	Agua
	Caudal máx.	17 litros/min
	Material	Polipropileno

Elaborado por: Fernando Galarza

Manómetro de presión glicerina

Están colocados en la tubería de descarga nos indica la presión con la que el fluido se transporta.

Tabla 6.22: Características del Manómetro

Manómetro		
Gráfico	Datos técnicos	
	Presión(psi)	203psi
	Presión (bar)	14 bar
	Material	Acero Inoxidable
	Fluido interno	Glicerina
	DIAL	7 cm

Elaborado por: Fernando Galarza

6.7.4 Estructura

La estructura está construida de tubo cuadrado de ancho de 2.5 * 1,5 mm de espesor y platina de 38 mm * 4 mm de espesor, la cual soporta el tanque que almacena el agua.

6.8. Administración

Con la finalidad de conservar en óptimas condiciones el funcionamiento del dispositivo experimental y evitar el deterioro del mismo es fundamental presentar un plan de mantenimiento.

6.8.1. Planeación

6.8.1.1. Manual de revisión para bomba de ariete multimpulsor:

Con el objetivo de mantener en óptimas condiciones y una vida útil prolongada de la bomba de ariete se debe realizar las siguientes instrucciones.

Se deberá realizar un mantenimiento continuo, esto quiere decir que después de cada práctica, se procederá a realizar los siguientes pasos para el mantenimiento.

- 1.- Retirar el agua del tanque de alimentación y descarga, esto se lo debe realizar ya que con el pasar del tiempo en el interior de los tanques se forman impurezas que pueden ocasionar obstáculos en las tuberías, accesorios y bombas.
- 2.- Verificar que no quede agua en el interior de las bombas, puesto que puede acelerar el proceso de corrosión en el interior de las mismas.
- 3.- Observar que en las redes de tuberías no existan fisuras o averías por donde pueda escapar el fluido.
- 4.- Comprobar que los cables de las conexiones eléctricas no presenten desprendimiento del material aislante, ya que puede ocasionar un corto circuito el cual puede causar accidentes.

5.- Limpiar adecuadamente después de cada ensayo para prolongar la vida útil de la máquina hidráulica.

6.- Cada 2 meses se debe lubricar el vástago de interno de la válvula de impulsión.

7.- Verificar que no existan objetos extraños que pudieran obstruir el correcto funcionamiento de los impulsores de las válvulas.

Mantenimiento. Si el ariete está bien diseñado, construido e instalado el mantenimiento necesario será mínimo, dentro del cual se deben considerar algunos puntos como son:

- ✓ La limpieza de la rejilla del tanque de abastecimiento. Entrada del agua.
- ✓ Limpieza del tanque de alimentación.
- ✓ Revisión de válvulas.
- ✓ Desmontaje del ariete (válvula de impulsión) para remover suciedades.
- ✓ Regulación pernos de anclaje.
- ✓ Revisión de la cantidad de aire en la cámara de aire. Vaciado de la misma para llenar el volumen de la cámara de aire.
- ✓ Pintura del ariete hidráulico.

Fases de revisión. El ariete hidráulico es una bomba que no necesita mayor lubricación de sus partes ya que las válvulas siempre están inundadas; sin embargo, se recomienda lubricar sus partes móviles en caso de que no esté funcionando para disminuir el efecto de la oxidación.

Tabla 6.23: Fases de Revisión

Actividad	Periodo de mantenimiento
Revisión de válvulas	Semanalmente
Desmontaje del ariete	Semestralmente
Regulación pernos de anclaje	Mensualmente

Vaciado de la cámara de aire	Quincenalmente
Pintar el ariete	Semestralmente
Limpieza de la rejilla Limpieza del tanque de abastecimiento	Mensualmente

Elaborado por: Fernando Galarza

6.8.2. Organización

Para obtener resultados óptimos en las prácticas a realizar, se debe estar atento en lo que se refiere a la toma de parámetros físicos y verificar que todos los instrumentos necesarios se encuentren en perfecto funcionamiento.

6.8.3 Dirección

Cada ensayo que se utilice la instalación de bomba de ariete, deberá ser dirigido y supervisado por una persona que conozca el funcionamiento del mismo, que para este caso puede ser el técnico responsable del proyecto.

6.8.4. Control

Durante el desarrollo de la práctica se necesita controlar el funcionamiento de todo el sistema, en caso de presentarse algún inconveniente el ayudante de laboratorio deberá informar al profesor que dirigió la práctica.

6.9 Previsión de la evaluación

Con la finalidad de seguir repotenciando la bomba de ariete, existen algunas alternativas para el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas de bombeo no convencional por arietes hidráulicos, dentro de éstas se puede mencionar las siguientes:

Instalación de arietes en paralelo y serie

En el caso de que la fuente de agua sea abundante y la demanda de agua sea alta, un set de ariete hidráulico podría no elevar la suficiente cantidad de agua para

abastecer la demanda, por lo que es recomendable la instalación de algunos sets de arietes hidráulicos en paralelo (figura 6.8).

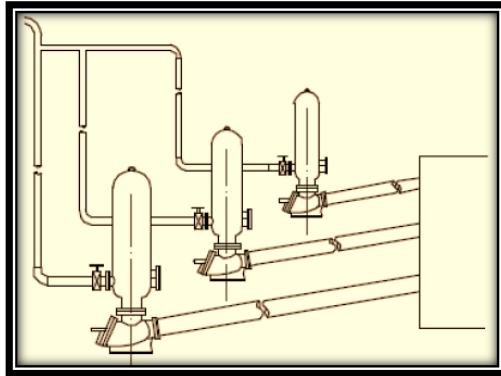


Figura. 6.8: Sistema de Arietes hidráulicos en paralelo.

Fuente: Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

Para la instalación en serie de estos sistemas (figura 6,9), se tiene en cuenta la altura a la que se quiere llegar, porque si la altura es muy elevada un solo ariete tendría que ser muy grande, por lo que se coloca varios arietes hasta alcanzar la altura deseada, los arietes a medida que se los coloca a diferentes alturas, son de menor tamaño.

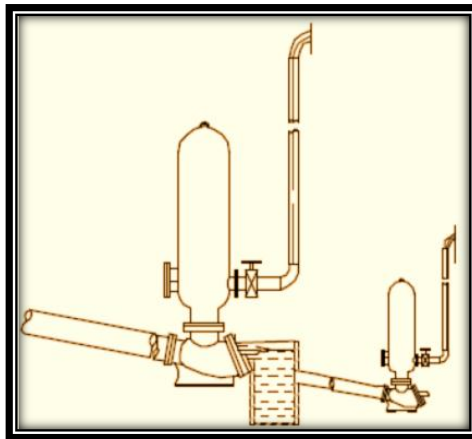


Figura. 6.9: Sistema de Arietes hidráulicos en serie.

Fuente: Hydraulic Ram Handbook, Zhejiang University of Technology

Estudio de la optimización del peso de la bomba de ariete

Uno de los problemas más importantes que tiene la bomba de ariete es su excesivo peso; por lo tanto, para futuras investigaciones es necesario aplicar un estudio de optimización del peso tanto del material como en la forma de la máquina. Para esta investigación se utilizó los materiales más comunes que se encuentran en el mercado como son el acero y pvc.

Análisis hidrodinámico de la válvula de impulsión

En la actualidad, con las herramientas de CAD-CAE se puede realizar un estudio profundo de la válvula de impulsión. Éste se lo realizaría para optimizar las propiedades hidrodinámicas de dicho elemento, que podría tener mejoras significativas en la eficiencia del sistema.

Dimensiones de la cámara de aire

Un avance importante que se puede realizar para el mejoramiento de la bomba de ariete, es el estudio de la variación de dimensiones de la cámara de aire, debido a que hasta el momento se basa en rangos establecidos para el dimensionamiento de la misma.

Estudio de la configuración en paralelo para las válvulas de impulsión

Un estudio importante que se puede llevar a cabo con miras de mejorar la eficiencia de las bombas de ariete es la colocación de dos válvulas de impulsión en paralelo (fig. 6-10); éstas deben estar sincronizadas y ser de iguales dimensiones para generar ondas por separado, que al encontrarse posteriormente en un mismo conducto se convierte en una sola que genera la presión equivalente a dos ondas, duplicando la presión. Cabe destacar que solo se realizaron estudios de esta nueva tecnología y mas no se ha probado algún prototipo o máquina que utilice este principio de funcionamiento.

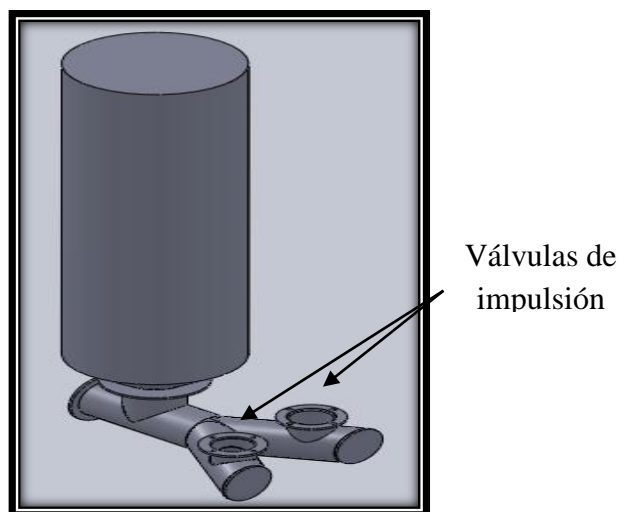


Figura. 6.10: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

Implementación de resortes o muelles en la válvula de impulsión

Una buena opción para sustituir las contrapesas es la implementación de resortes en la válvula de impulsión (fig. 6.11), con esto evitamos el principal inconveniente de desmontar y montar el sistema de pesas en cada ocasión que se requiera regular la carrera en las válvulas.

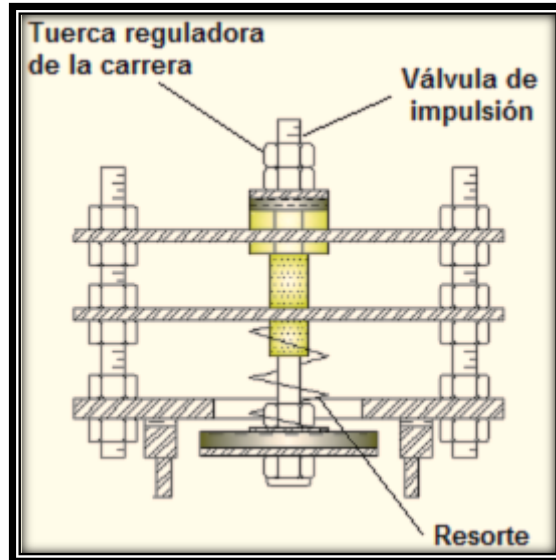


Figura. 6.11: Implementación de resorte para la válvula de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

De la misma forma que en el sistema implementado (por pesas), en este también existirían dos posiciones de la válvula de impulsión (fig. 6.12), en la primera sin presión de agua y la otra con presión. Para este sistema para la regulación de la carrera y la fuerza determina en el resorte, únicamente basta ajustar o aflojar las tuercas reguladoras ubicadas en las válvulas.

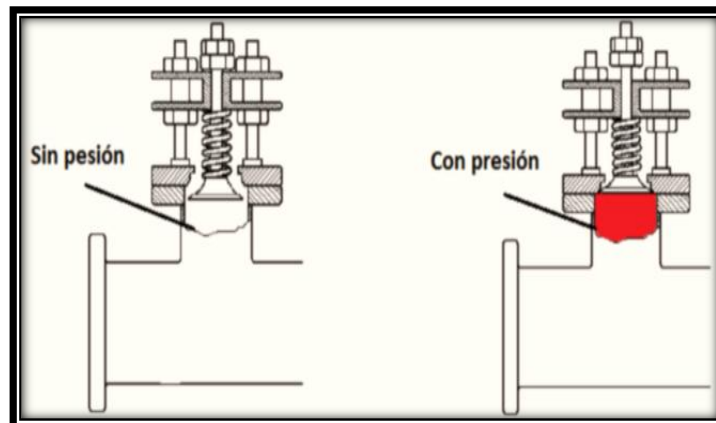


Figura. 6.12: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza

Implementación de un tubo de látex en la cámara de aire

Una alternativa para la válvula de aire, es la sustitución de esta por un tubo de látex dentro de la cámara de aire (fig. 6.13); con esto se consigue eliminar uno de los principales problemas del ariete cuando está en operación, la ausencia de aire dentro de la cámara.

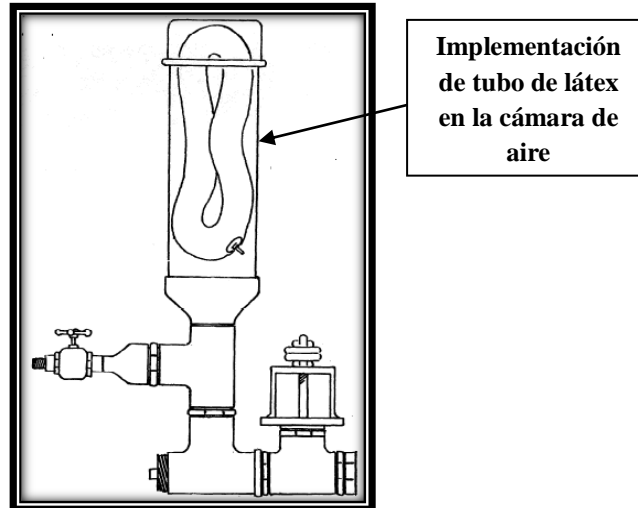


Figura. 6.13: Configuración en paralelo para las válvulas de impulsión

Elaborado por: Fernando Galarza


Automatización de la adquisición de datos de la bomba de ariete

La automatización de la bomba de ariete se lo puede hacer mediante un sistema de adquisición de datos, es decir, medir un fenómeno eléctrico y físico como voltaje, corriente, temperatura, presión. La adquisición de datos basada en PC utiliza una combinación de hardware modular, software de aplicación y una PC para realizar medidas.

6.9.1. Metodología utilizada para la toma de datos experimentales

Para cada ensayo se tomaron cinco mediciones del caudal de desperdicio y de la presión en la cámara de aire, manteniendo constante el caudal de alimentación y la altura de impulsión, para luego calcular los otros requisitos del sistema con las diferentes configuraciones que puede adoptar la bomba de ariete tanto en peso, carrera y número de válvulas de impulsión.

Tabla 6.24: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete

HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE			
UNIVERSIDAD		TÉCNICA DE AMBATO	
ENSAYO	Nº DE VÁLVULAS	CARRERA(mm)	PESO(kg)
1	 1 válvula	3	0,6
2		5	
3		10	
4		3	1
5		5	
6		10	

6.9.2. Resultado de las pruebas

🚦 Comparación de pruebas teóricas vs. experimentales.

Después de obtener los datos teóricos en el capítulo anterior, es necesario analizar los mismos y compararlos con la información proporcionada por la instalación de la bomba de ariete. Con esto se comprobará la validez del modelo teórico que se está utilizando (Krol), a la vez que se comprueba con certeza cuál es el porcentaje de error entre el modelo teórico y real. Es importante recordar que el modelo de Krol presenta una desviación máxima del 15% entre lo teórico y lo experimental.

Utilizando la instalación de la bomba de ariete como herramienta para modificar los diferentes factores hidráulicos que afectan a la eficiencia del sistema, se pudo obtener las curvas características del funcionamiento de la bomba. Las principales gráficas que se obtuvieron son las siguientes:

Tabla 6.25: Ensayo de funcionamiento del ariete multimpulsor

Ensayo de funcionamiento para 3 válvula de impulsión
Curva Eficiencia vs Altura de descarga (n-h).
Curva Eficiencia vs Caudal de descarga (n-q).
Curva Altura vs Caudal de descarga (h-q)
Curva de Eficiencia vs Relación de alturas (h/H-n)

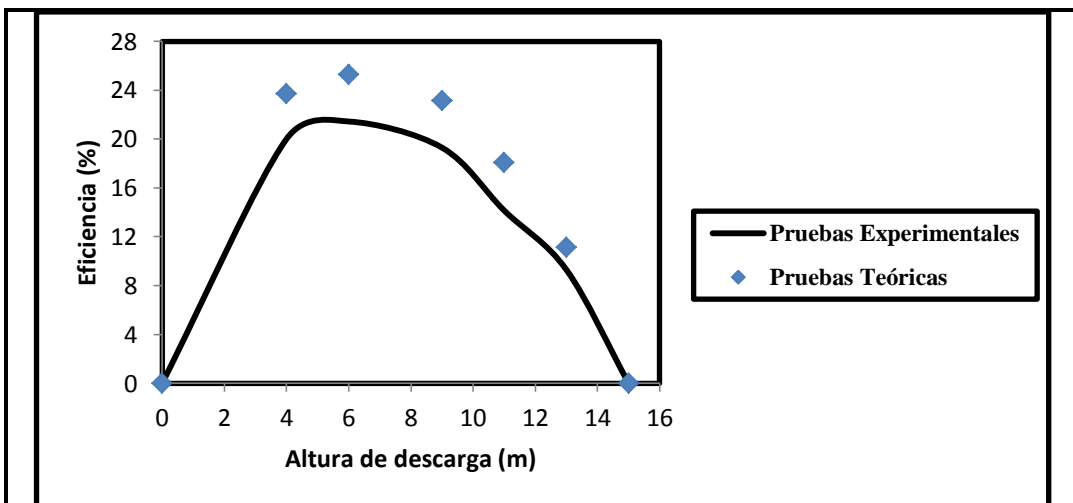
Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.26: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete

COMPARACIÓN DE PRUEBAS TEÓRICAS Y EXPERIMENTALES								
Pruebas Teóricas				Pruebas Experimentales				
# de prueba	Altura de descarga	Caudal de descarga	Eficiencia	# de prueba	Altura de descarga	Caudal de descarga	Eficiencia	% de error
1	15	0	0	1	15	0	0	0
2	13	1,2	11,14	2	13	1	9,29	16,62
3	11	2,3	18,07	3	11	1,8	14,14	17,75
4	9	3,6	23,14	4	9	3	19,29	16,64
5	6	6,5	25,3	5	6	5	21,43	15,2
6	4	8,3	23,71	6	4	7	20	15,6
7	0	11,5	0	7	0	9	0	0

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.27: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas vs. Experimentales)

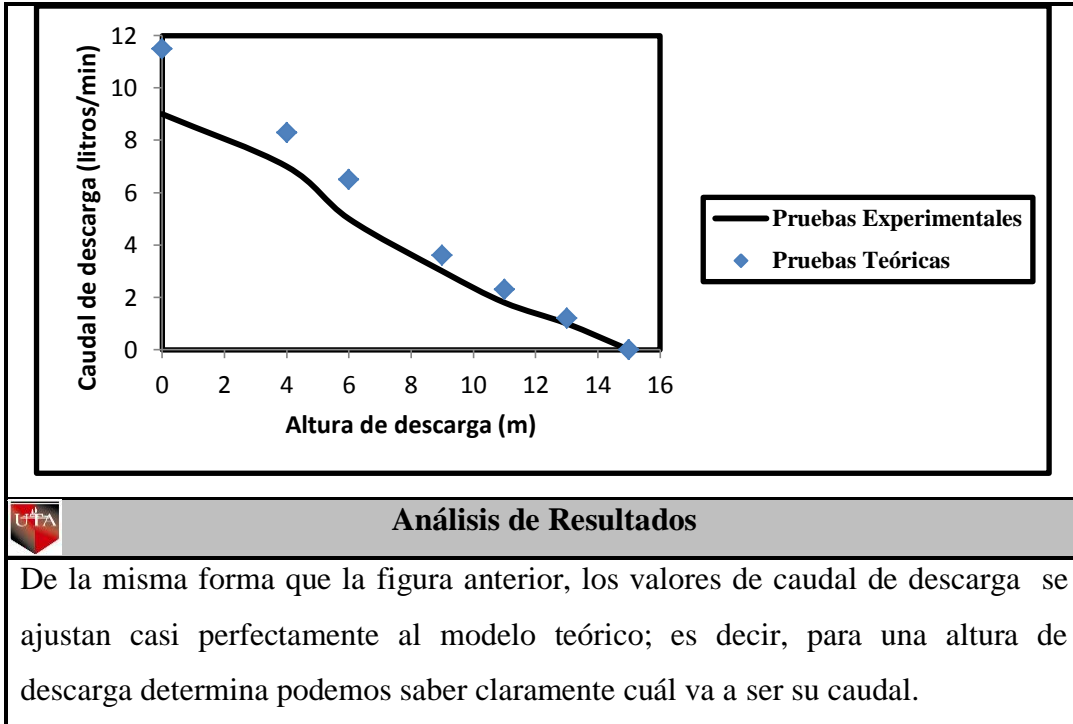


Análisis de Resultados

Observando la figura el modelo experimental se comporta de manera muy similar al teórico en lo que tiene que ver a la eficiencia, cabe destacar que el porcentaje de error entre estos dos modelos se ajusta casi perfectamente al 15% de desviación que presenta el uno respecto del otro. Con esto se verifica que el modelo teórico se lo puede utilizar sin ninguna restricción para tener una idea clara del comportamiento de la bomba de ariete antes de su construcción.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.28: Análisis de la Curva (Pruebas Teóricas vs. Experimentales)



Análisis de Resultados

De la misma forma que la figura anterior, los valores de caudal de descarga se ajustan casi perfectamente al modelo teórico; es decir, para una altura de descarga determinada podemos saber claramente cuál va a ser su caudal.

Elaborado por: Fernando Galarza

Comparación entre contrapeso y resorte colocado en la válvula de impulsión y su efecto sobre la eficiencia.

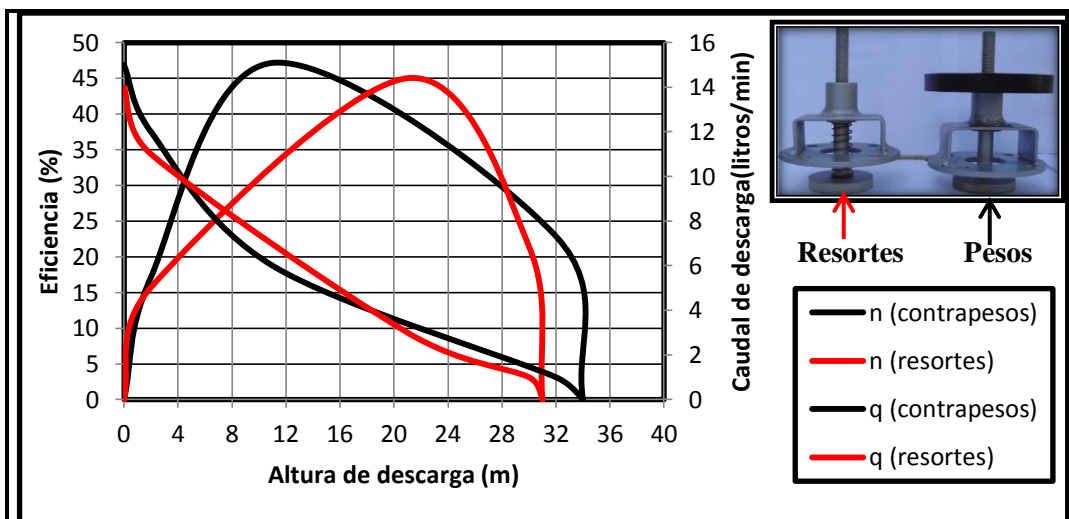
Para poder seguir develando las diferentes configuraciones y alternativas que puede adoptar la bomba de ariete en sus válvulas, se presenta la siguiente tabla, en la cual se realiza un análisis comparativo de las dos opciones de la válvula de impulsión, estas son: con resortes y con contrapesos. Además, este análisis permite identificar por separado la influencia de cada una de estas configuraciones sobre los diferentes factores hidráulicos del sistema de bombeo.

Tabla 6.29: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete

COMPARACIÓN ENTRE CONTRAPESO Y RESORTE							
Pruebas con contrapesos				Pruebas con resorte			
# de prueba	Altura de descarga	Caudal de descarga	Eficiencia	# de prueba	Altura de descarga	Caudal de descarga	Eficiencia
1	34	0	0	1	31	0	0
2	32	1	22,9	2	30	1	21,43
3	11	6	47,1	3	21	3	45
4	2	12	17,1	4	2	11	15,71
5	0	15	0	5	0	14	0

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.30: Análisis de la Curva (Pruebas Contrapesos vs Resortes)



Análisis de Resultados

En esta parte del estudio se presenta un análisis puntual de la comparación del sistema de contrapesos vs los resortes. Es importante destacar que los dos sistemas se ajustan perfectamente al ciclo de funcionamiento de la bomba de ariete; por lo tanto, son sistemas técnicamente factibles para realizar. En el caso de los contrapesos se consigue un máxima altura de descarga de 34m y un caudal máximo de 15 litros/min, a diferencia de los resortes que tienen una altura de 31 m y un caudal de 14 litros/min. Comparando los valores de las configuraciones de contrapesos y resortes tienen un funcionamiento muy similar, pero lo que se pudo observar en la experimentación y un punto que marca la diferencia entre los dos, es que en el primero el caudal desperdiciado es mucho menor, ya que esto depende de la configuración carrera-peso. Sin embargo por todas las facilidades que ofrece el sistema de resortes tanto en términos económicos y de operación se presenta como una buena opción dentro del funcionamiento de la bomba de ariete para reemplazar los contrapesos.

Elaborado por: Fernando Galarza

✚ Comparación entre la variación del diámetro de la válvula de impulsión y su efecto sobre la eficiencia.

Los siguientes datos fueron obtenidos meramente de la experimentación mediante la instalación de la bomba de ariete, debido a que el modelo matemático teórico

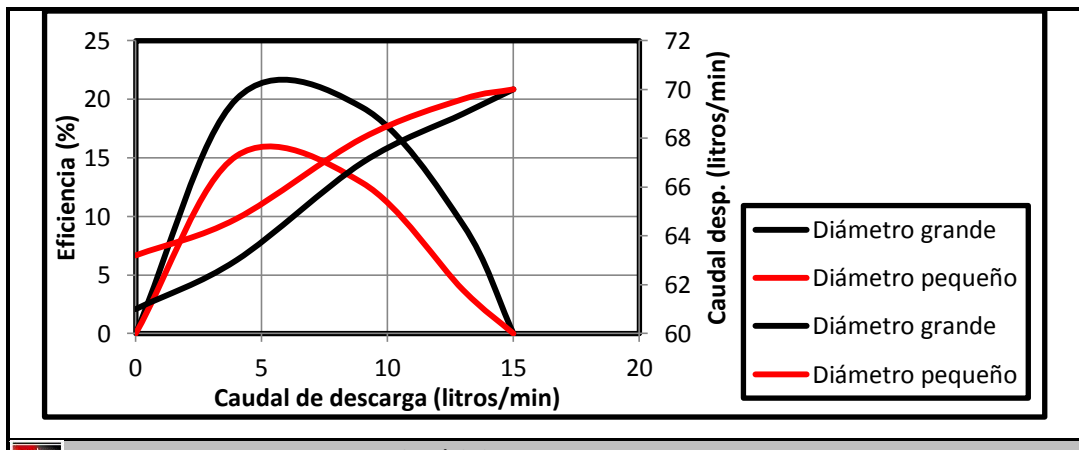
no nos permite realizar esta consideración. Para lo cual se trabajó únicamente con una válvula de impulsión, para poder tener una idea clara de cuál de las dos configuraciones nos permite mayor eficiencia y menor caudal de desperdicio.

Tabla 6.31: Hoja de Ensayos de la Bomba de ariete

COMPARACIÓN ENTRE DIFERENTES DIÁMETROS DE VÁLVULA DE IMPULSIÓN							
Pruebas con contrapesos				Pruebas con resorte			
# de prueba	Altura de descarga	Caudal de desperdicio	Eficiencia	# de prueba	Altura de descarga	Caudal de desperdicio	Eficiencia
1	15	70	0	1	15	70	0
2	13	69	9,29	2	13	69,6	3,71
3	9	67	19,29	3	9	68	12,86
4	4	63	20	4	4	64,7	15,14
5	0	61	0	5	0	63,2	0

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.32: Análisis de la Curva (Variación de diámetro de la válvula de impulsión)



Análisis de Resultados

Como se explicó anteriormente, en lo que tiene que ver a la obtención de estos datos se obtuvieron experimentalmente. En los cuales la válvula que tiene el mayor diámetro presenta la máxima eficiencia de 19,29% debido a que su caudal desperdiciado es de 67 litros/min, a diferencia de la diámetro más pequeño que tiene una eficiencia de 12,86% debido que su caudal desperdiciado es de 68 litros/min. Esta parte de la experimentación permitió realizar un mejor diseño del diámetro de la válvula de impulsión mediante la variación del mismo, con el claro objetivo de disminuir el caudal desperdiciado y por ende mejorar la eficiencia.

Elaborado por: Fernando Galarza

Dentro del estudio realizado, fue de mucha importancia el ajuste de las curvas que rigen el funcionamiento de la bomba de ariete, ya que mediante esto se pudo determinar valores intermedios a partir de los datos tabulados. El análisis de tendencia se utilizó para pronosticar los valores de la variable dependiente (eficiencia), ya que mediante este ajuste de curvas se va obtener los modelos o ecuaciones que rigen la operación del ariete para diferentes configuraciones del sistema de bombeo. Todas las curvas se obtuvieron variando los factores hidráulicos que se pueden modificar una vez que está instalado el sistema de bombeo, estos son:

- ✚ Peso de la válvula de impulsión.
- ✚ Carrera de la válvula de impulsión.
- ✚ Número de válvulas de impulsión.

Los valores medidos y calculados que se ingresaron en las tablas son los siguientes:

Valores medidos

- ✚ Altura de impulsión.
- ✚ Caudal de descarga.
- ✚ Presión de la cámara de aire.

Valores Calculados

- ✚ Caudal de descarga.
- ✚ Altura de descarga.
- ✚ Relación de Alturas.
- ✚ Potencia de entrada.
- ✚ Potencia de salida.
- ✚ Eficiencia.



Ensayo del Funcionamiento de la Bomba de Ariete para 3 válvulas de impulsión

Para realizar este ensayo se debe seguir los siguientes pasos:

- ✚ Verificar que el tanque de alimentación este lleno, caso contrario encender la bomba para la recirculación del agua.
- ✚ Las válvulas que no se vaya a utilizar deben ser cerradas con la tuerca reguladora de la carrera; es decir deben ser clausuradas, para esta prueba no se debe cerrar ninguna de las válvulas de impulsión.
- ✚ Establecer la configuración del ensayo a realizar, es decir, peso, carrera.
- ✚ Configurar la carrera de válvula de impulsión para el ensayo establecido.
- ✚ Colocar el peso en la válvula de impulsión de acuerdo a la configuración que está establecida.
- ✚ Cerrar completamente la válvula de compuerta en la descarga de la bomba de ariete.
- ✚ Abrir la llave del caudal de alimentación.
- ✚ Abrir y cerrar la válvula de impulsión manualmente para inducir el golpe de ariete en caso que no se produzca.
- ✚ Tomar los datos del manómetro y rotámetros a partir de la máxima presión que produce el sistema.
- ✚ Por último, modificar la apertura de la válvula de globo para obtener diferentes valores de altura y caudal de descarga.



Los resultados obtenidos en los ensayos realizados la bomba de ariete se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 6.33: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

 HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE 										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:1		Válvulas: 3			Peso:0,6 kg			Carrera: 3mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa aumento del número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	2	120	70	20	10	22,87	0	0
2	2	1	1,2	120	70	12	6	22,87	1,96	8,57
3	2	4	0,7	120	70	7	3,5	22,87	4,57	20
4	2	8	0,4	120	70	4	2	22,87	5,23	22,86
5	2	10	0	120	70	0	0	22,87	0	0



Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.34: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO </div>  </div>										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:2		Válvulas: 3			Peso:0,6 kg			Carrera:5mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa disminución del número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	2,5	100	70	25	12,5	22,87	0	0
2	2	1	2,2	100	70	22	11	22,87	3,59	15,71
3	2	5	1	100	70	10	5	22,87	8,17	35,71
4	2	8	0,5	100	70	5	2,5	22,87	6,53	28,57
5	2	11	0	100	70	0	0	22,87	0	0

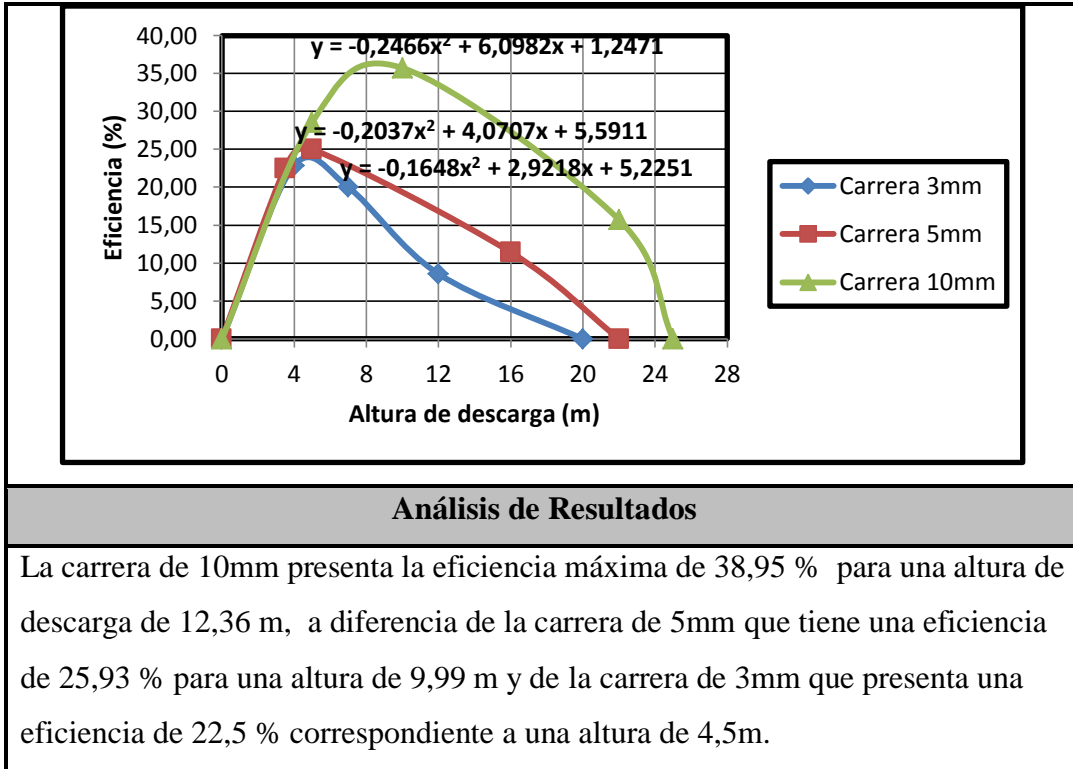
Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.35: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO </div>  </div>										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:3		Válvulas: 3			Peso:0,6 kg			Carrera:10mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa del número de golpes por minuto de la válvula de impulsión se mantiene.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	2,5	100	70	25	12,5	22,87	0	0
2	2	1	2,2	100	70	11	5,5	22,87	3,59	15,71
3	2	5	1	100	70	5	2,5	22,87	8,17	35,71
4	2	8	0,5	100	70	2,5	1,25	22,87	6,53	28,57
5	2	11	0	100	70	0	0	22,87	0	0

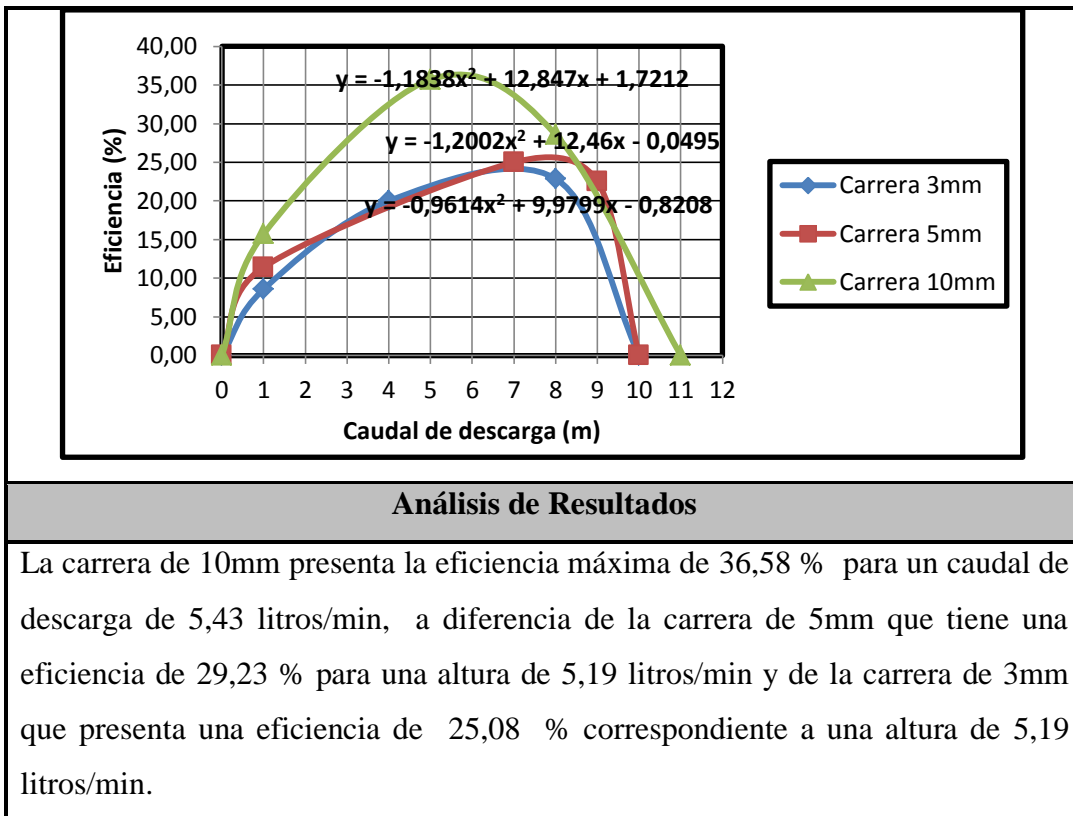
Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.36: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Altura de descarga)



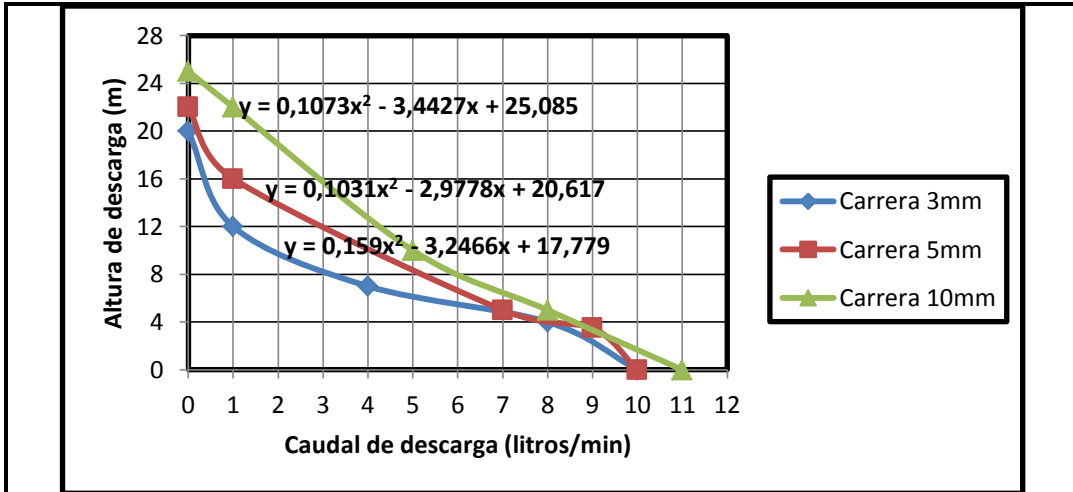
Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.37: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Caudal de descarga)



Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.38: Análisis de la Curva (Altura vs Caudal de descarga)

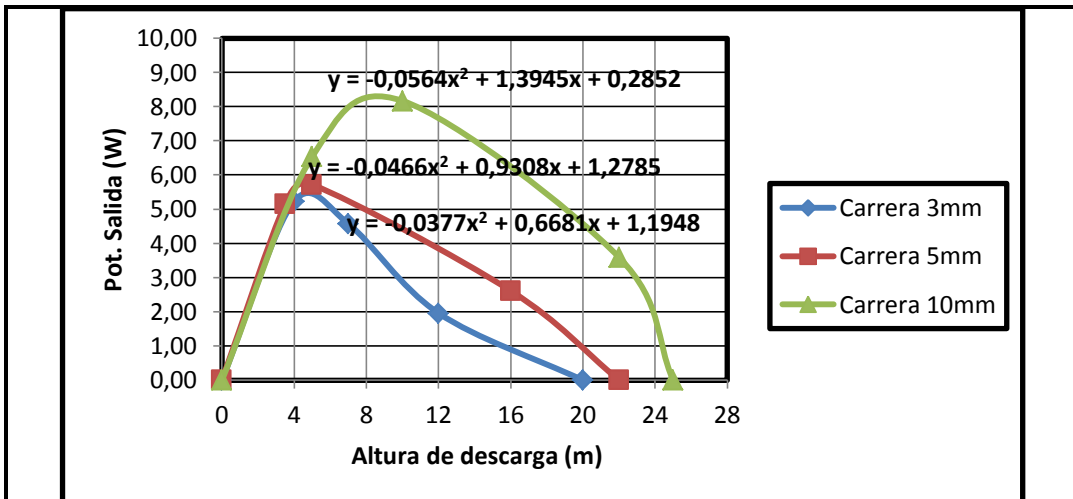


Análisis de Resultados

La curva altura vs caudal de descarga presenta un orden decreciente, la carrera de 10mm tiene una altura de descarga máxima de 25m a diferencia de la de 5mm y 3mm que tienen una de 22 y 20m respectivamente.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.39: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Relación de alturas)





Análisis de Resultados

La carrera de 10mm presenta la potencia máxima de 8,9 W para una altura de descarga de 12,36 m, a diferencia de la carrera de 5mm que tiene una de 5,92 W para una altura de 9,99 m y de la carrera de 3mm que presenta una potencia de 4,15 W correspondiente a una altura de 8,86 m.



Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.40: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO </div>  </div>										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:4		Válvulas: 3			Peso:1,6 kg			Carrera: 3mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa disminución del número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	2,6	100	70	26	13	22,87	0	0
2	2	1	2,3	100	70	23	11,5	22,87	3,76	16,43
3	2	6	0,9	100	70	9	4,5	22,87	8,82	38,57
4	2	13	0,2	100	70	2	1	22,87	4,25	18,57
5	2	15	0	100	70	0	0	22,87	0	0



Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.41: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;">  <div style="text-align: center;"> HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO </div>  </div>										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:5		Válvulas: 3			Peso:1,6 kg			Carrera:5 mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa disminución del número de golpes por minuto de la válvula de impulsión.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	2,9	80	70	29	14,5	22,87	0	0
2	2	1	2,5	80	70	25	12,5	22,87	4,08	17,86
3	2	6	1	80	70	10	5	22,87	9,80	42,86
4	2	14	0,2	80	70	2	1	22,87	4,57	20
5	2	15	0	80	70	0	0	22,87	0	0

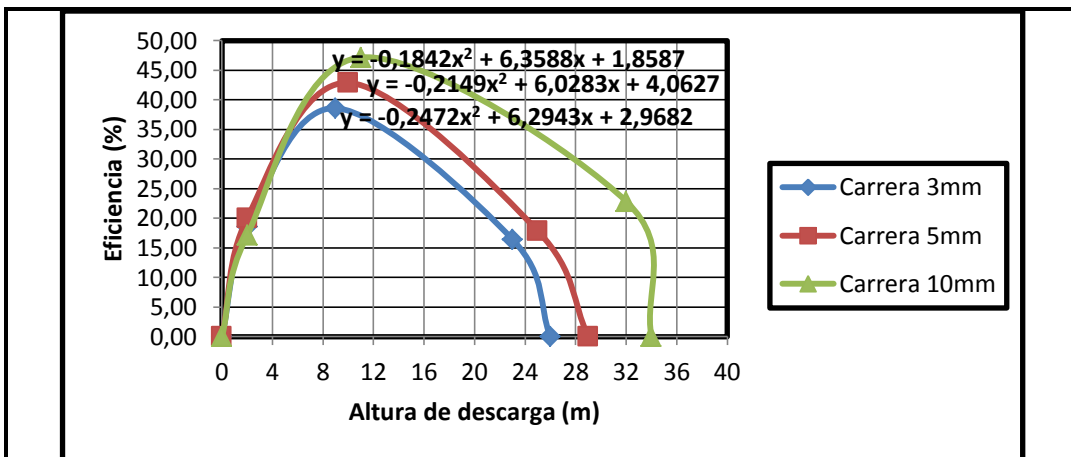
Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.42: Hoja de resultados del ensayo de la Bomba de Ariete para tres válvulas de impulsión

 HOJA DE ENSAYO DE LA BOMBA DE ARIETE 										
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA					
ENSAYO:6		Válvulas:3			Peso:1,6 kg			Carrera:10 mm		
Observaciones del ensayo: Todos los valores fueron medidos sin ninguna novedad. Se observa que el número de golpes por minuto de la válvula de impulsión se mantiene.										
FACTORES HIDRÁULICOS DE LA BOMBA DE ARIETE										
VALORES MEDIDOS					VALORES CALCULADOS					
Mediciones	Altura de impulsión (m)	Caudal de descarga (litros/min)	Presión (bar)	Número de golpes por minuto	Caudal de alimentación (litros/min)	Altura de descarga (m)	Relación de alturas	Pot. Entrada (W)	Pot. Salida (W)	Eficiencia (%)
1	2	0	3,4	80	70	34	17	22,87	0	0
2	2	1	3,2	80	70	32	16	22,87	5,23	22,86
3	2	6	1,1	80	70	11	5,5	22,87	10,78	47,14
4	2	12	0,2	80	70	2	1	22,87	3,92	17,14
5	2	15	0	80	70	0	0	22,87	0	0

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.43: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Altura de descarga)

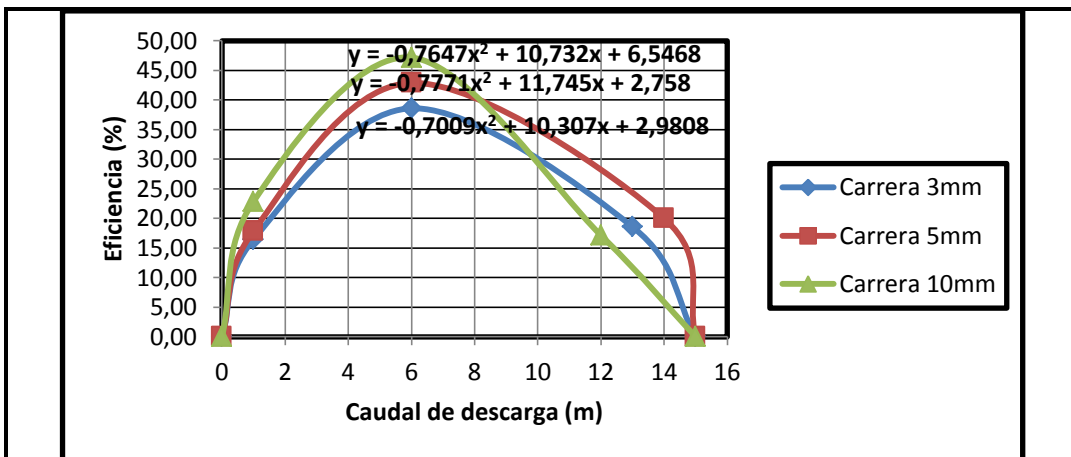


Análisis de Resultados

La carrera de 10mm presenta la eficiencia máxima de 51,73 % para una altura de descarga de 8,86 m, a diferencia de la carrera de 5mm que tiene una eficiencia de 43,33 % para una altura de 14,02 m y de la carrera de 3mm que presenta una eficiencia de 39,03 % correspondiente a una altura de 12,73m.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.44: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Caudal de descarga)

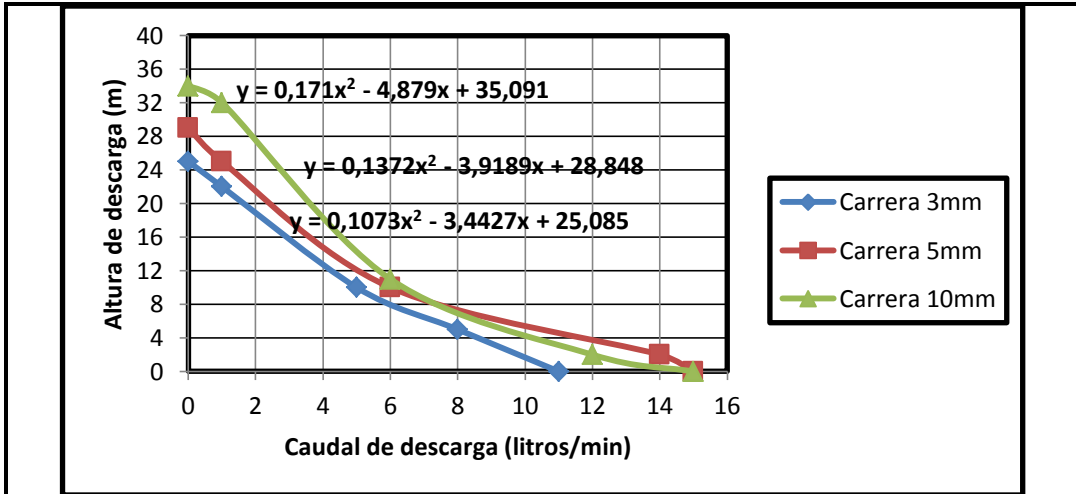


Análisis de Resultados

La carrera de 10mm presenta la eficiencia máxima de 44,2 % para un caudal de descarga de 7,02 litros/min, a diferencia de la carrera de 5mm que tiene una eficiencia de 43,13 % para una altura de 7,56 litros/min y de la carrera de 3mm que presenta una eficiencia de 38,87 % correspondiente a una altura de 7,35 litros/min.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.45: Análisis de la Curva (Altura vs Caudal de descarga)

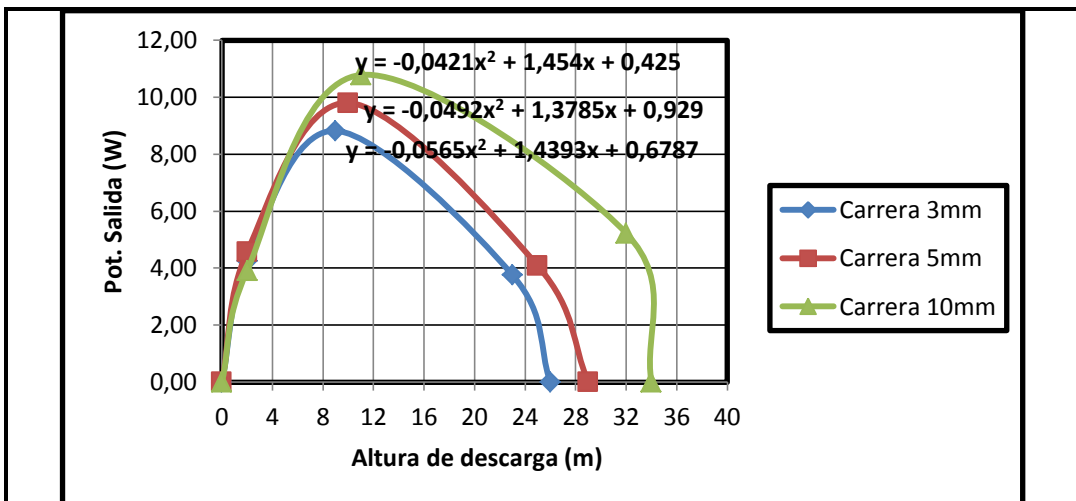


Análisis de Resultados

La curva altura vs caudal de descarga presenta un orden decreciente, la carrera de 10mm tiene una altura de descarga máxima de 33m a diferencia de la de 5mm y 3mm que tienen una de 28 y 25m respectivamente.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.46: Análisis de la Curva (Eficiencia vs Relación de alturas)



Análisis de Resultados

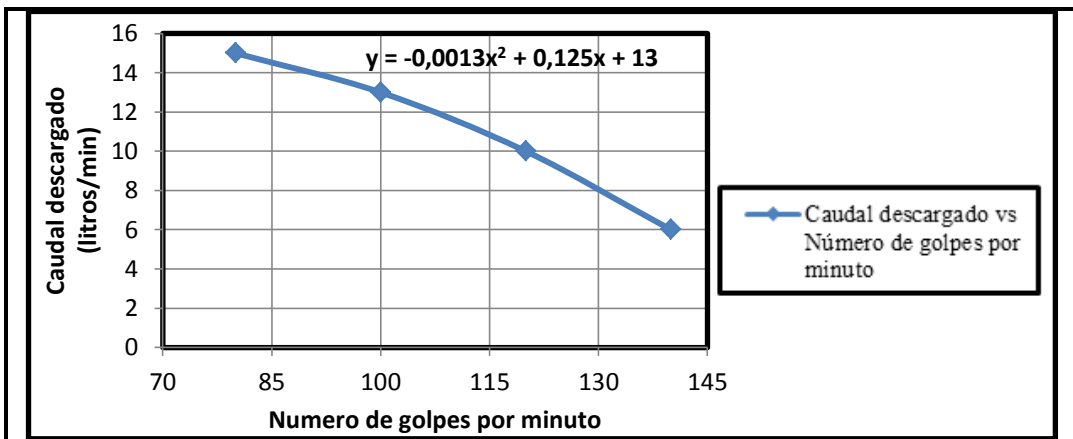
La carrera de 10mm presenta la potencia máxima de 11,97 W para una altura de descarga de 16,96 m, a diferencia de la carrera de 5mm que tiene una de 9,58 W para una altura de 14 m y de la carrera de 3mm que presenta una potencia de 9,3 W correspondiente a una altura de 11,7 m.

Elaborado por: Fernando Galarza

✚ Efecto del peso, carrera y número de golpes por minuto la válvula de impulsión y su efecto sobre los parámetros hidráulicos.

El comportamiento del ariete hidráulico para diferentes condiciones de operación se refleja por su eficiencia. Las pruebas experimentales se las realizó configurando la carrera o apertura de la válvula de impulsión variando el peso sobre esta, con lo que se consiguió regular el número de golpes por minuto de la válvula; por lo tanto, el caudal desperdiciado y el descargado también varían.

Tabla 6.47: Análisis de la Curva (Caudal de descarga vs Número de golpes por minuto)

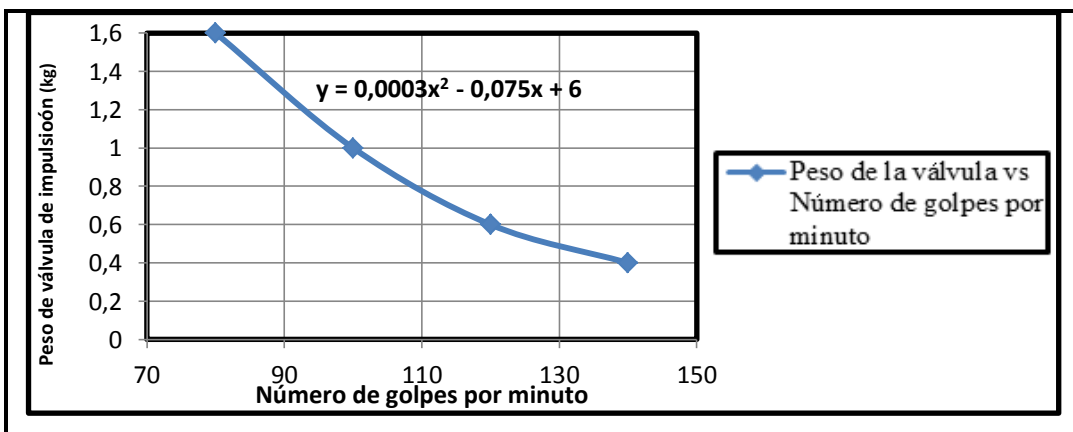


Análisis de Resultados

Esta figura permite interpretar la relación entre el caudal descargado y el número de golpes por minuto de válvula de impulsión, a un número menor de golpes por minuto se tiene el máximo caudal descargado, debido a que el peso colocado en la válvula es máximo, a diferencia cuando se tiene un mayor número de golpes por minuto se obtiene menor caudal de descarga.

Elaborado por: Fernando Galarza

Tabla 6.48: Análisis de la Curva (Peso de la válvula vs Número de golpes por minuto)



Análisis de Resultados

La figura anterior permite interpretar la relación entre el peso de la válvula de impulsión y el número de golpes por minuto, a mayor peso de la válvula se tiene menor número golpes por minuto, es decir, se tiene una relación inversamente proporcional, a diferencia que cuando el peso es menor el número de golpes aumenta. Para el peso de 1,6 kg se tuvo la eficiencia y caudal descargados máximos, es decir, el número de golpes por minuto de válvula fue de 80 que está dentro del rango establecido para las válvulas de impulsión.

Elaborado por: Fernando Galarza

Análisis final de resultados

Realizado un análisis final de todos los datos recopilados en los diferentes ensayos, se observa que existe dos factores principales: caudal y altura de descarga, teniendo en cuenta que estos dos parámetros son inversamente proporcionales.

Además, se ratifica experimentalmente que la bomba de ariete multimpulsor o multietapa, permite obtener valores de eficiencia mayores a diferencia de una convencional. La siguiente grafica ilustra la curva característica (eficiencia vs caudal de descarga) para cada configuración, es decir de: 1, 2 y 3 válvulas de impulsión.

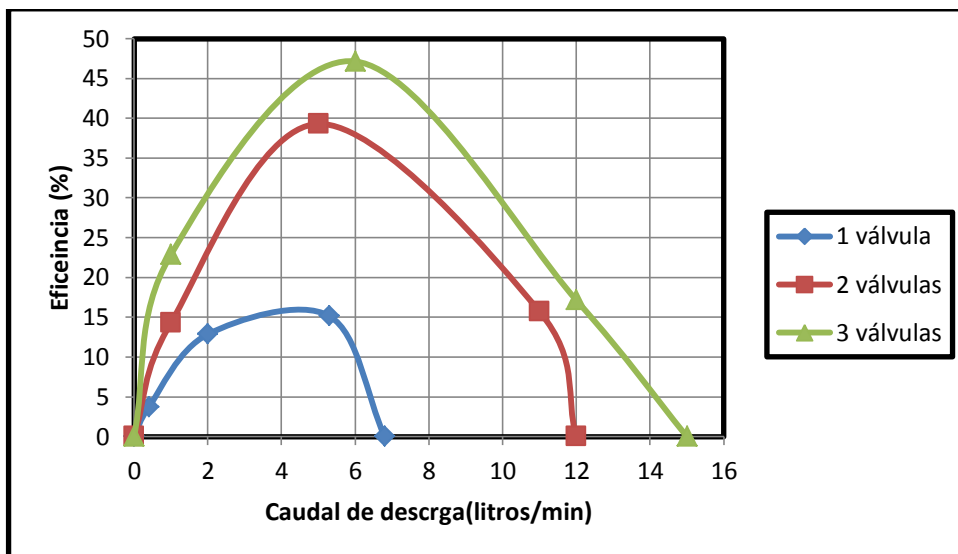


Figura 6-14: Eficiencia vs Caudal de descarga

Elaborado por: Fernando Galarza

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos para la configuración de la bomba de ariete de tres impulsores que proporciona los valores de eficiencia más altos, tanto en número, peso y carrera de la válvula de impulsión.

Tabla 6.49: Análisis de la Curva de operación de un ariete multimpulsor

# de Válvulas	Pot. Salida (W)	Caudal de Descarga (litros/min)	Altura de descarga (m)	Eficiencia (%)
3	0	0	34	0
3	5,23	1	32	22,86
3	10,78	6	11	47,14
3	3,92	12	2	17,14
3	0	15	0	0

Elaborado por: Fernando Galarza

Se realizaron las curvas de funcionamiento para un ariete multimpulsor de tres válvulas, ya que es el que ofrece los valores más altos de eficiencia del sistema.

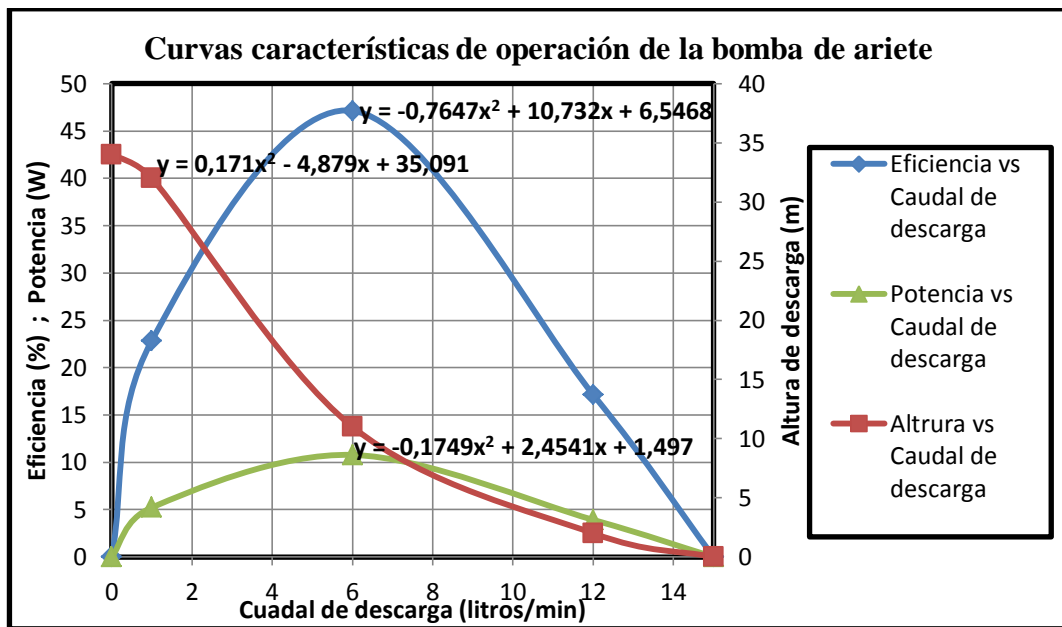


Figura 6-15: Curvas características de operación de la bomba de ariete

Elaborado por: Fernando Galarza

4.3. BIBLIOGRAFÍA

4.3.1 Fuentes Bibliográficas

Libros:

- BLANES, Senabre.Valero, Carolina. VELASCO, Sergio. 2011.”Diseño Mecánico con: Autodesk Inventor paso a paso”.ECU.Pag.5.Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10467054&p00=inventor>
- CISILINO, Adrian Pablo, 2010.”Mecánica Computacional: fusión de arte, ciencia y técnica”. ANÍ, Academia Nacional de Ingeniería.Pag.128. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10431165&p00=mecanica%20fluidos%20computacional>
- DTU, Unidad de desarrollo de tecnología, Ram Pump Programme.
- FRANCISO, Sacristán Romero, 2005.”La tecnología al servicio del medio ambiente”. El Cid Editor.Pag.12. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10088659&p00=medio%20ambiente>
- GARCIA, Gregorio, 2008.”Energías del siglo XXI: de las energías fósiles a las alternativas”. Mundi Prensa.Pag.25. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10268752&p00=recursos%20energeticos>.
- GILES, Ranalt V, Mecánica de los Fluidos e Hidráulica.
- GOMEZ GONZALES, Sergio.2008.”Solidworks”.MArcombo.Pag.17.Web site:<http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10212354&p00=solidworks%20flow%20simulation>
- MATAIX, Claudio. (1986).Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. Ediciones del Castillo S.A. España. Madrid.
- MENDEZ, Manuel Vicente. 1994. “Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua”. Caracas.
- MOTT, Robert L. 4^{ta} edición. Mecánica de fluidos aplicada. Pearson Prentice Hall.

- RODRIGUEZ NUÑEZ, Yoissell, 2009.”Ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos”. El Cid Editorial.Pag.3. Web site: <http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10337840&p00=mecanica%20fluidos>
- STREETER, Víctor L, WYLIE, E Benjamín. 8^{ta} edición. Mecánica de los fluidos. McGraw-Hill.
- VARGAS, Watson. RIAÑO, Carlos. PINEDA, Lida.2010.”Ambientes virtuales para la enseñanza de la mecánica de fluidos: algunos ejemplos simplificados aplicando ANSYS”.Universidad Militar Nueva Granada.Pag.96. Website:<http://site.ebrary.com/lib/utasp/docDetail.action?docID=10345358&p00=elementos%20finitos>.

4.3.2 Internet

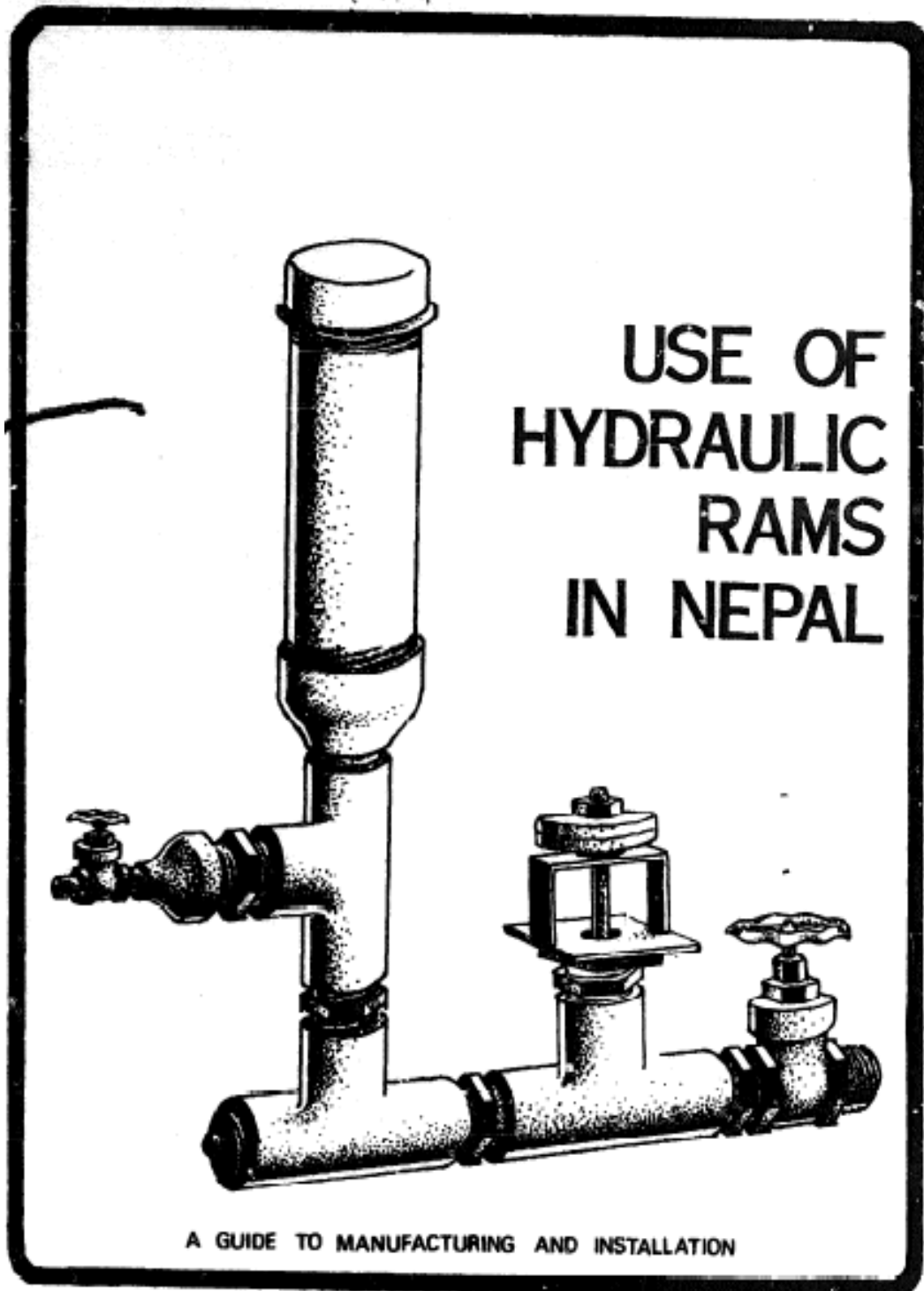
- KROL, J., Automatic Hydraulic Pump, 1951. Web site: [http://www.cepeige.org/Documentos/2003\(78-98\).pdf](http://www.cepeige.org/Documentos/2003(78-98).pdf)
- Peace Corps. “A Training Manual in Conducting a Workshop in the Design, Construction, Operation, Maintenance and Repair of Hydram”. 1981.
- IZQUIERDO, Raúl, Instalación de Arietes Hidráulicos de Alta Eficiencia, ISMM, 1992.
- ORRERO, Santiago, 2009,”Simulación de fluidos utilizando computadora”, Universidad EAFIT, Colombia, Medellín, Web site: http://mecanica.eafit.edu.co/~sorrego/IntroCFD_Mecapl.pdf

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO A1

✚ Norma DTU (Uso e instalación de bombas de ariete)



USE OF HYDRAULIC RAMS

A GUIDE TO MANUFACTURING AND INSTALLATION

By

MITCHELL SILVER



UNICEF (United Nations Children's Fund)

Box 1187, Kathmandu, Nepal

INTRODUCTION

The hydraulic ram pump can be used with great effectiveness in mountain villages which are located at a higher elevation than their source of water. The hydram pump uses the power of falling water to pump a small portion of that water uphill. It requires absolutely no fuel or electricity, only water pressure. The pump was developed about 200 years ago, and the beauty of the hydram lies in its simplicity. There are only two moving parts which are lubricated by the water itself. This manual hopes to show that anyone with a minimal amount of mechanical aptitude can survey, design and build a hydraulic ram from locally available parts, and do any necessary maintenance.

Whether for domestic purposes or irrigation, a hydram can be used to great advantage in many diverse situations. The source of water could be a stream, a spring, an irrigation canal, an artesian well, or even an existing gravity flow water system. In the mountainous regions of Nepal, and other areas of similar topography, there are many thousands of places where, if a hydram were installed, much time spent hauling water could be used for other purposes. Formerly unproductive or unused land could be made suitable for gardens and orchards, and field crops could give increased yields. Widescale usage would benefit many thousands of people.

Because this simple pump works 24 hours per day, for many years (many working installations are over 50 years old) and requires little attention, it is suitable for areas

where people have little technical expertise. Because hydraulic ram installations are inexpensive and quickly installed, they are well suited for remote areas where there are extreme transportation difficulties, as well as for sparsely populated villages which often make gravity flow water supply system financially unfeasible. The ability to incorporate a hydram in an existing gravity flow water supply system has also proved very useful.

It is hoped that this short manual provides the necessary information to stimulate interest in hydraulic rams so that some of the many thousands of people that stand to gain will be benefited, by having their drudgery eased and their economic situation improved.

Anexo A2

Propiedades del agua.

Temperatura °C	Peso Específico kN/m ³	Densidad kg/m ³	Visc. dinámica (Pa*s) o (N*s/m ²)	Visc. Estática m ² /seg
0	9,81	1000	1,75 x 10 ⁻³	1,75 x 10 ⁻⁶
5	9,81	1000	1,52 x 10 ⁻³	1,52 x 10 ⁻⁶
10	9,81	10000	1,30 x 10 ⁻³	1,30 x 10 ⁻⁶
15	9,81	10000	1,15 x 10 ⁻³	1,15 x 10 ⁻⁶
20	9,79	998	1,02 x 10 ⁻³	1,02 x 10 ⁻⁶
25	9,78	997	8,91 x 10 ⁻⁴	8,94 x 10 ⁻⁷
30	9,77	996	8,00 x 10 ⁻⁴	8,03 x 10 ⁻⁷
35	9,75	994	7,18 x 10 ⁻⁴	7,22 x 10 ⁻⁷
40	9,73	992	6,51 x 10 ⁻⁴	6,56 x 10 ⁻⁷
45	9,71	990	5,94 x 10 ⁻⁴	6,00 x 10 ⁻⁷
50	9,69	988	5,41 x 10 ⁻⁴	5,48 x 10 ⁻⁷
55	9,67	986	4,98 x 10 ⁻⁴	5,05 x 10 ⁻⁷
60	9,65	984	4,60 x 10 ⁻⁴	4,67 x 10 ⁻⁷
65	9,62	981	4,31 x 10 ⁻⁴	4,39 x 10 ⁻⁷
70	9,59	978	4,02 x 10 ⁻⁴	4,11 x 10 ⁻⁷
75	9,56	975	3,73 x 10 ⁻⁴	3,83 x 10 ⁻⁷
80	9,53	971	3,50 x 10 ⁻⁴	3,60 x 10 ⁻⁷
85	9,50	968	3,30 x 10 ⁻⁴	3,41 x 10 ⁻⁷
90	9,47	965	3,11 x 10 ⁻⁴	3,22 x 10 ⁻⁷
95	9,44	962	2,92 x 10 ⁻⁴	3,04 x 10 ⁻⁷
100	9,40	958	2,82 x 10 ⁻⁴	2,94 x 10 ⁻⁷

Anexo A3

Coefficiente de pérdidas en accesorios

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS POR ACCESORIOS		
Válvula esférica (totalmente abierta)	K	L/D
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	10	350
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	5	175
Válvula de retención (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	5,6	160
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	24	900
T por salida lateral	-	40
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

Anexo A4

Valores de rugosidad de algunos materiales

Tipo de Tubería	Rugosidad (mm)
Vidrio, cobre o latón estirado	0,001 o lisas
Latón industrial	0,025
Acero laminado nuevo	0,05
Acero laminado oxidado	0,15 a 0,25
Acero con incrustaciones	1,5 a 3
Acero asfaltado	0,01
Acero soldado nuevo	0,03 a 0,1
Acero soldado oxidado	0,4
Hierro galvanizado	0,15 a 0,20
Fundición corriente nueva	0,25
Fundición asfaltada	0,1
Cementado Alisado	0,3 a 0,8
Cemento bruto	Hasta 3

Anexo A5

Manual de Operación y Mantenimiento del Ariete Hidráulico

Este manual va dirigido a cualquier persona que vaya a utilizar y manipular los parámetros de instalación de una bomba ariete, ya que es una máquina sencilla, tanto para su operación como en su reducido mantenimiento.

Operación

Una vez instalada la bomba de ariete multimpulsor se procede a hacerla operar, teniendo en cuenta de tomar las mediciones directamente de los manómetros y rotámetros para lo cual se sigue los siguientes pasos:

1. Verificar que el tanque de alimentación este lleno, caso contrario encender la bomba para la recirculación del agua.
2. Establecer la configuración del ensayo a realizar, es decir, peso, carrera y número de válvulas de impulsión.
3. Configurar la carrera de válvula de impulsión para el ensayo establecido.
4. Colocar el peso en la válvula de impulsión de acuerdo a la configuración que está establecida.
5. Las válvulas que no se vaya a utilizar deben ser cerradas con la tuerca reguladora de la carrera; es decir deben ser clausuradas.
6. Cerrar completamente la válvula de globo en la descarga de la bomba de ariete.
7. Abrir la llave del caudal de alimentación.
8. Abrir y cerrar la válvula de impulsión manualmente para inducir el golpe de ariete en caso que no se produzca.
9. Tomar los datos de los manómetros y rotámetros a partir de la máxima presión que produce el sistema.
10. Por último, modificar la apertura de la válvula globo para obtener diferentes valores de altura y caudal de descarga.

Mantenimiento

Si el ariete está bien diseñado, construido e instalado el mantenimiento necesario será mínimo, dentro del cual se deben considerar algunos puntos como son:

- ✓ La limpieza de la rejilla del tanque de abastecimiento. Entrada del agua.
- ✓ Limpieza del tanque de alimentación.
- ✓ Revisión de válvulas.
- ✓ Desmontaje del ariete (válvula de impulsión) para remover suciedades.
- ✓ Regulación pernos de anclaje.
- ✓ Revisión de la cantidad de aire en la cámara de aire. Vaciado de la misma para llenar el volumen de la cámara de aire.
- ✓ Pintura del ariete hidráulico.

Fases de revisión. El ariete hidráulico es una bomba que no necesita mayor lubricación de sus partes ya que las válvulas siempre están inundadas; sin embargo, se recomienda lubricar sus partes móviles en caso de que no esté funcionando para disminuir el efecto de la oxidación.

Actividad	Periodo de mantenimiento
Revisión de válvulas	Semanalmente
Desmontaje del ariete	Semestralmente
Regulación pernos de anclaje	Mensualmente
Vaciado cámara de aire	Quincenalmente
Pintar ariete	Semestralmente
Limpieza de rejilla Limpieza tanque de abastecimiento	Mensualmente

A continuación se presenta varias tablas con las averías más frecuente y su posible solución.

Averías y soluciones en la bomba de ariete

Problema	Causa	Razón	Solución
La válvula de impulsión se detiene en la posición abierta	No hay suficiente velocidad cerca de la válvula de impulsión	Falta de agua en el tubo de impulsión	Averigüe si hay fugas u obstáculos en el sistema de abastecimiento; si toda el agua disponible va al ariete, reajuste la válvula de impulsión para esta velocidad de flujo.
		Demasiado peso o golpe en la válvula de impulsión	Disminuya el peso o el golpe.
Reducción de agua bombeada y burbujas de aire en tubo de descarga	Demasiado aire en la cámara de aire	La válvula de aire está demasiado abierta	Cierre la válvula de aire un poco
		Fuga en el cuerpo del ariete entre las válvulas de impulsión y check.	Arregle la fuga
Sonidos altos y metálicos, mucha vibración en el tubo de impulsión	La cámara de aire está llena con agua	Válvula de aire obstruida.	Limpie la válvula de aire
			Remueva la cámara de aire y vacié el agua

Averías y soluciones en la bomba de ariete (continuación)

Problema	Causa	Razón	Solución
El ariete funciona, pero la cantidad de agua bombeada es menor que la deseada	Fuga en el tubo de descarga	Ensamblaje flojo o hueco en el tubo	Ajuste la parte floja y/o arregle los huecos
	Baja eficiencia del ariete	Válvula de impulsión gastada, rota, sucia, o mal alineada	Limpie, arregle o reemplace la válvula de impulsión
		Válvula check gastada, rota, sucia o mal alineada	Limpie, arregle o reemplace la válvula check
		Obstáculo en el tubo de impulsión	Limpie el tubo de impulsión
		Golpe excesivo de la válvula check	Ajuste o remplace el límite de apertura de la válvula check
	Ariete mal instalado	Mala relación entre el largo y el diámetro del tubo	Cambie el diámetro o la longitud del tubo de impulsión
		Mala relación entre el largo y la altura de impulsión del tubo	Cambie la longitud del tubo de impulsión o la altura de caída
Frecuencia muy irregular o se bombea poco tiempo y luego se detiene	Aire dentro del tubo de impulsión.	Hueco en el cuerpo del ariete, o conexión floja entre el tubo de impulsión y el ariete	Arregle todos los huecos y/o ajuste las conexiones flojas.

Averías y soluciones en la bomba de ariete (continuación)

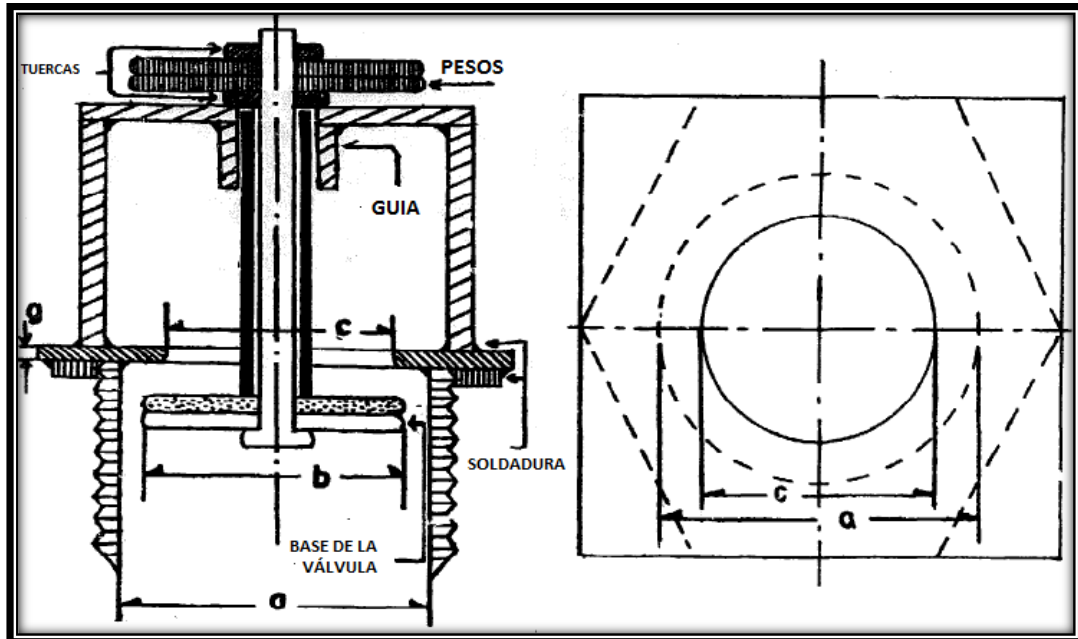
Problema	Causa	Razón	Solución
El ariete no empieza a funcionar	No hay suficiente presión	Válvula check no tiene buen asiento	Limpie, arregle o remplace la válvula check
		Válvula de aire demasiado abierta	Cierre la válvula de aire hasta que empiece a funcionar el ariete
		No hay suficiente agua en el tubo de descarga	Continué el ciclo de ariete manualmente hasta que haya suficiente altura de descarga
	Falta de agua en el tubo de impulsión	No existe suficiente abastecimiento para el ariete	Re-evalué la instalación, posiblemente instale otro ariete más pequeño y/o tubo de impulsión
	Mal asiento de la válvula de impulsión.	Válvula gastada, rota, sucia, o mal alineada No está bien ajustada.	Limpie, arregle, remplace o alinee la válvula de impulsión
	Peso o ajuste de golpe en la válvula de impulsión no es correcto	No está bien ajustada.	Cambie el peso o el ajuste

Averías y soluciones en la bomba de ariete (continuación)

Problema	Causa	Razón	Solución
La válvula de impulsión se para en posición cerrada	El rebote no es suficiente	La válvula check está gastada, rota o sucia	Arregle, limpie o reemplace la válvula check
		La válvula de impulsión no tiene suficiente peso o golpe	Aumente el peso o golpe de la válvula de impulsión
		No hay suficiente flujo de agua en el tubo de impulsión	Averigüe si hay fugas u obstáculos en el sistema de abastecimiento. Si toda el agua disponible va al ariete, hay que reajustar el ariete para este flujo
La válvula de impulsión está golpeando, pero el ariete no bombea	Obstáculo en el tubo de descarga	Válvula check cerrada	Abra la válvula
	La presión del martillo de agua esta absorbida antes de la válvula check	Obstáculo en el tubo de descarga	Limpie el tubo
Flujo pulsante en el tubo de descarga	Falta de aire en la cámara de aire	Fuga en la cámara de aire	Arregle la fuga
		Válvula de aire no está abierta lo suficiente	Abra más la válvula de aire

ANEXO A7

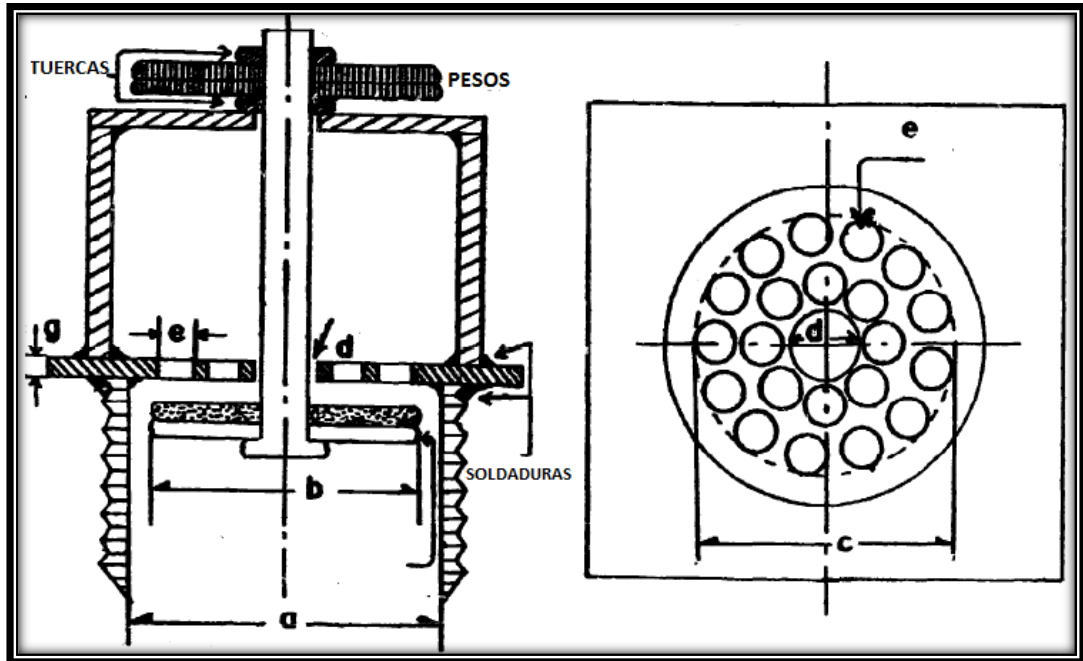
Detalle de las dimensiones de la Válvula de impulsión tipo A



TIPO	1.5*38		2"*51		2.5"*63		3"*76		4"*102	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
a	37	37	42	42	55	55	78	78	106	106
b	30	37	35	36	42	49	61	67	85	88
c	22	30	25	30	35	42	48	60	66	80
d	-	9	-	12	-	12	-	12	-	20
e	-	4	-	4	-	5	-	9	-	9
f	-	28	-	28	-	24	-	20	-	44
g	3	3	3	3	5	5	6	6	8	8
h	150	150	150	150	165	165	175	175	190	190

ANEXO A8

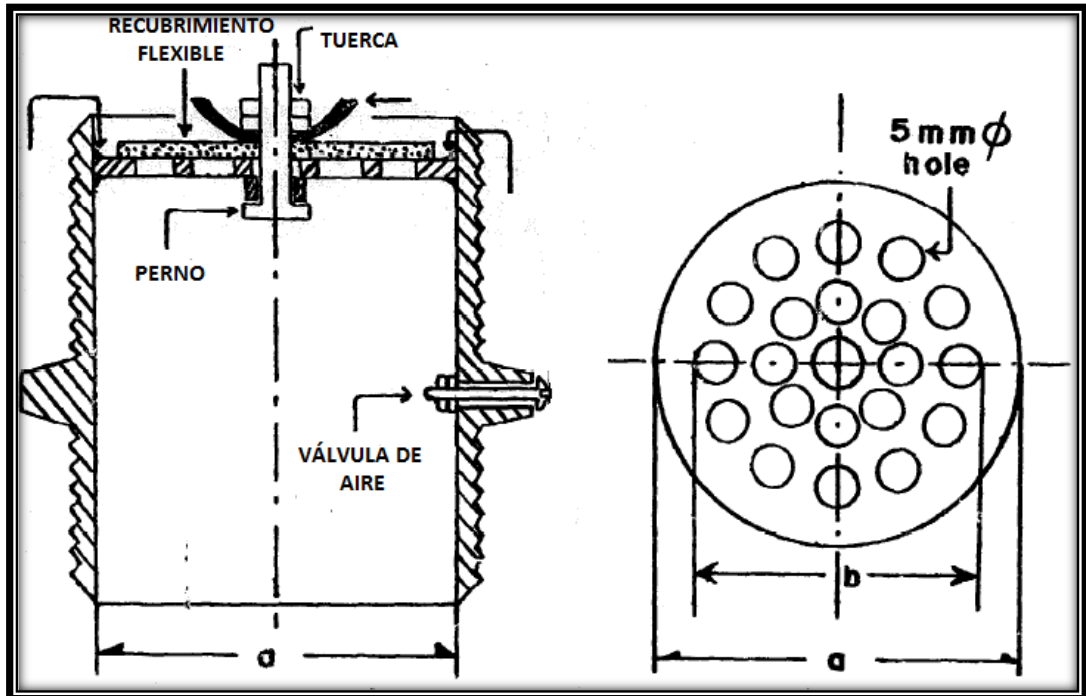
Detalle de las dimensiones de la Válvula de impulsión tipo B



TIPO	1.5"38		2"51		2.5"63		3"76		4"102	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
a	37	37	42	42	55	55	78	78	106	106
b	30	37	35	36	42	49	61	67	85	88
c	22	30	25	30	35	42	48	60	66	80
d	-	9	-	12	-	12	-	12	-	20
e	-	4	-	4	-	5	-	9	-	9
f	-	28	-	28	-	24	-	20	-	44
g	3	3	3	3	5	5	6	6	8	8
h	150	150	150	150	165	165	175	175	190	190

ANEXO A9

✚ Detalle de las dimensiones de la Válvula de descarga



ANEXO A10

✚ **Resumen del Modelo matemático de Krol que describe el ciclo de funcionamiento de la bomba de ariete**

Periodo	Velocidad	Tiempo de Ciclo
1	$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}}$	$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}}$
2	$V_2 = \sqrt{\frac{Wg}{\Phi_{(s)}Ay}}$	$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2gHZ}} \ln \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_0}}\right) \left(1 - \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{WZ}{2AH\gamma k_0}}\right) \left(1 + \sqrt{\frac{yZ}{L}}\right)}$
3	$V_3 = V_2$	$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3LSV_2}{2g^2H \left(1 - \frac{WM}{Z_1^2}\right)}}$
4	$V_4 = V_3 - (h + h_r) \frac{g}{a}$	$t_4 = \frac{2L}{a}$
5	$V_5 = 0$	$t_5 = \frac{L}{(h + h_r)g} \left(\sqrt{\frac{Wg}{Ay k_0}} - \frac{(h + h_r)g}{a} \right)$
6	$V_6 = -\frac{(h + h_r)g}{a}$	$t_6 = \frac{2L}{a}$
7	$V_7 = 0$	$t_7 = \frac{L(h+h_r)}{H a}$

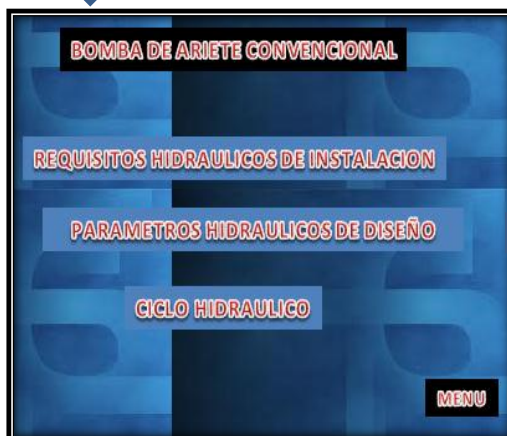
ANEXO A11

- ✚ Interfaz del código informático utilizado para el cálculo de la eficiencia en función de los diferentes factores hidráulicos.

Menú Principal



Menú Secundario









Factores hidráulicos

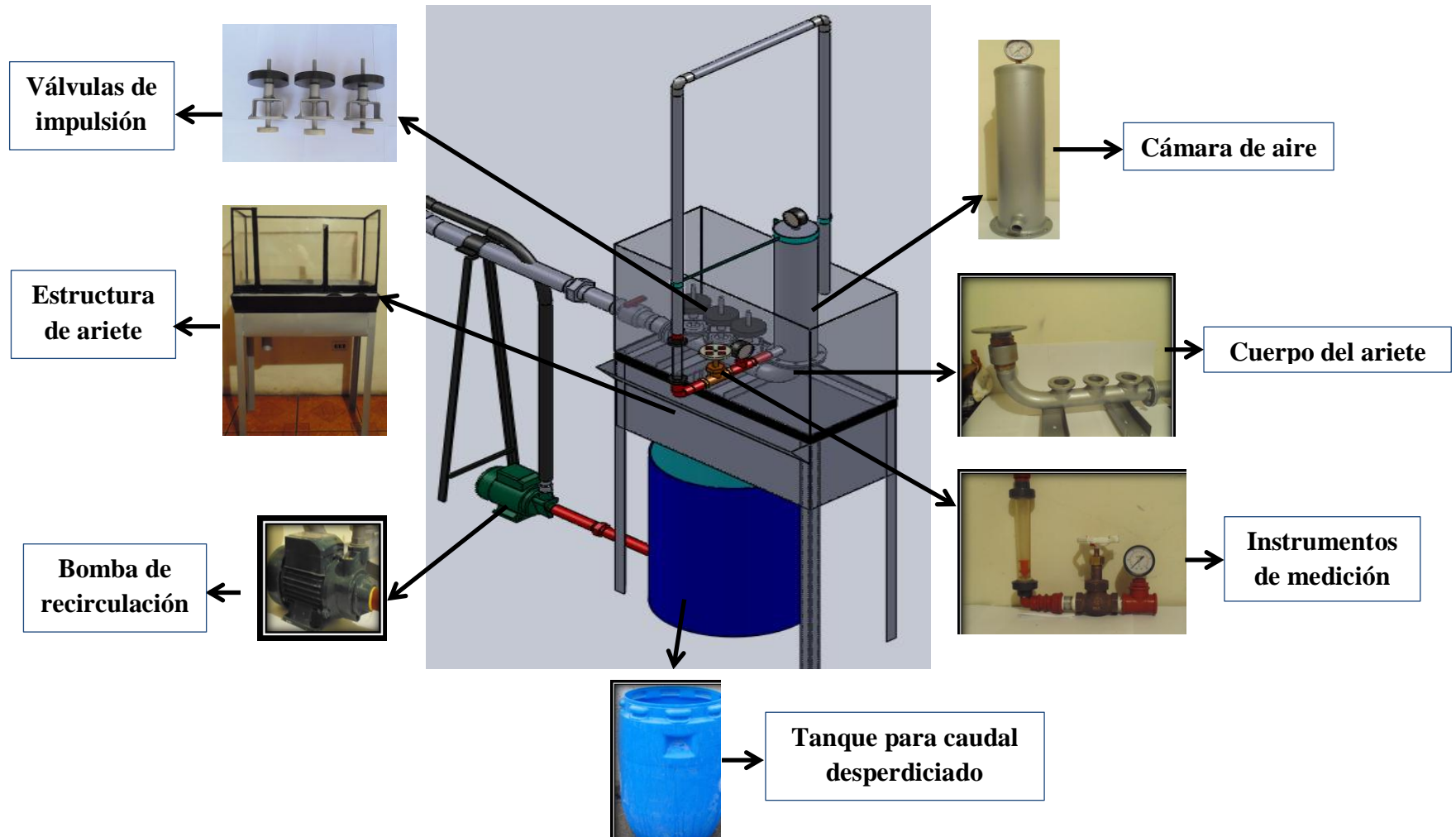


ANEXO B

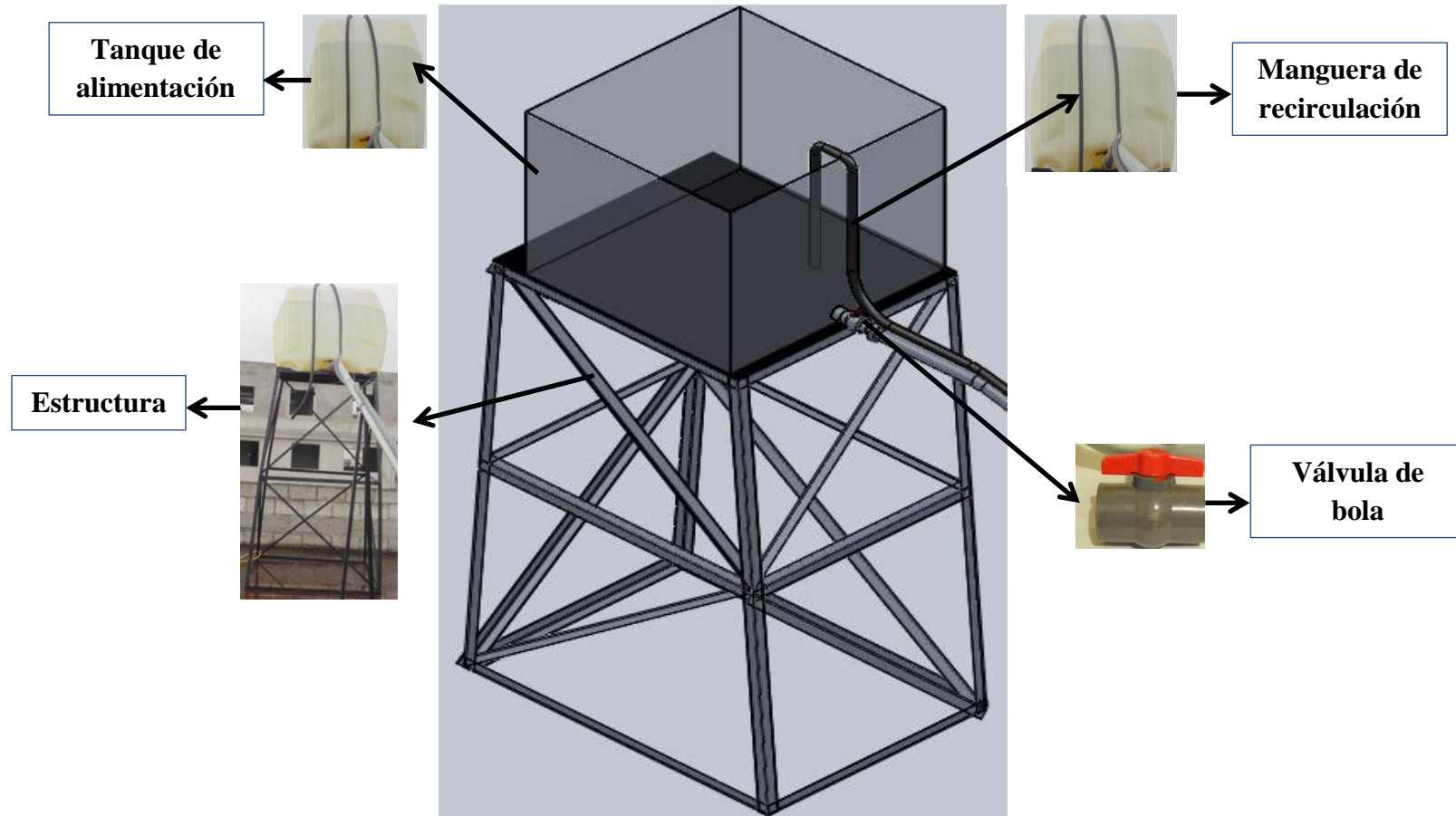
Anexo B1: Partes de la Bomba de Ariete

<p>✚ Cuerpo del ariete</p>	<p>✚ Soporte de válvula</p>
 <p>A photograph of the ariete body, a complex metal casting with a curved inlet pipe and several outlet ports, mounted on a base.</p>	 <p>A photograph of a valve support component, a metal casting with a central vertical pipe and a base with four mounting holes.</p>
<p>✚ Válvulas de impulsión</p>	<p>✚ Válvulas de impulsión</p>
 <p>A photograph showing two impulse valves side-by-side. Each valve has a vertical stem with a threaded top and a circular base with a spring mechanism.</p>	 <p>A photograph showing three impulse valves arranged in a row, viewed from a different angle than the previous image.</p>
<p>✚ Válvula de impulsión</p>	<p>✚ Soporte de la válvula</p>
 <p>A photograph of a single impulse valve stem, showing the threaded top and the circular base.</p>	 <p>A photograph of a valve support component, similar to the one in the top row but with a different internal structure.</p>

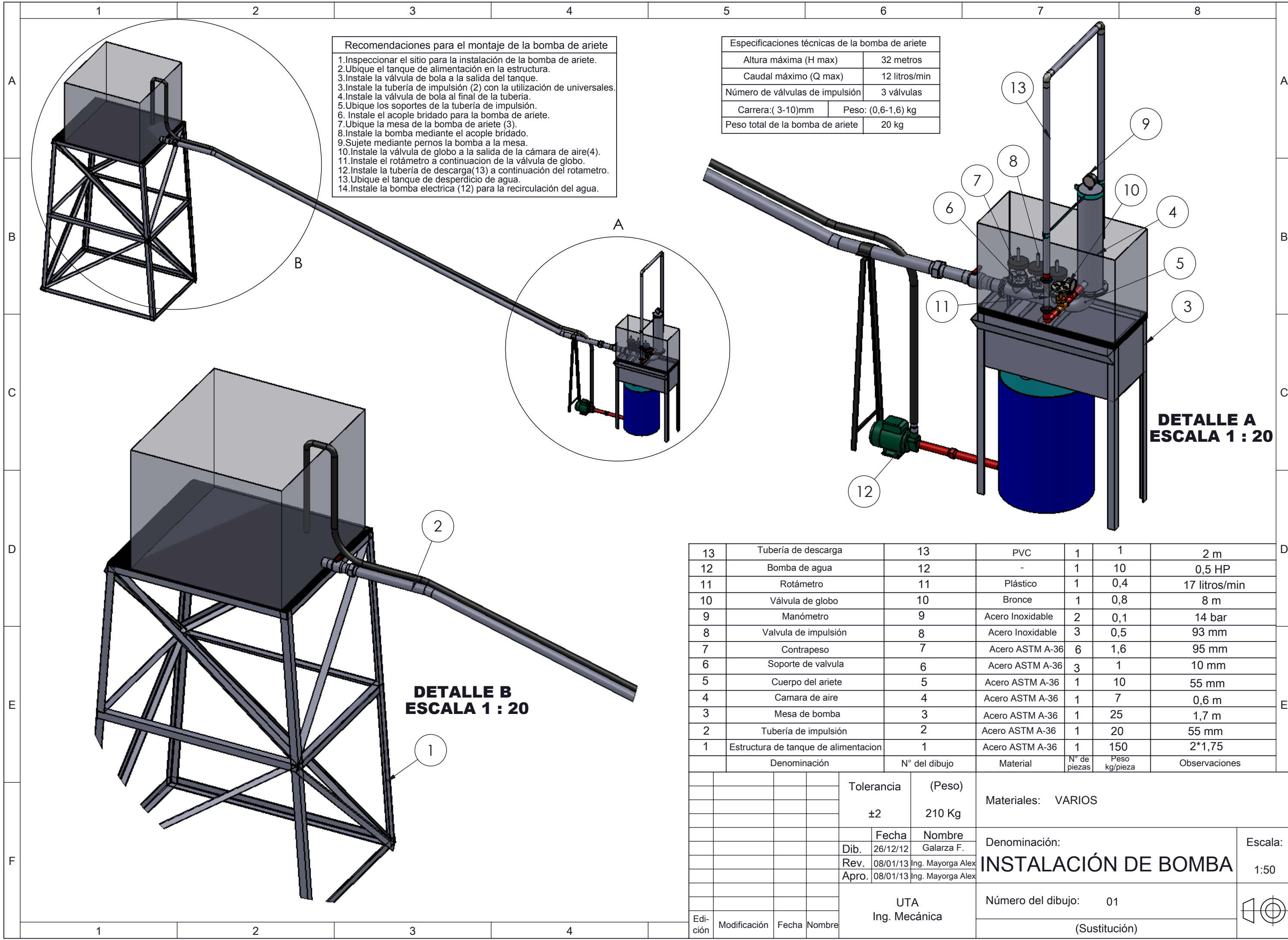
Anexo B2: Detalle de las partes e instrumentos en la descarga del sistema de bombeo.



Anexo B3: Detalle de las partes e instrumentos en la impulsión del sistema de bombeo.



PLANOS



- Recomendaciones para el montaje de la bomba de ariete**
1. Inspeccionar el sitio para la instalación de la bomba de ariete.
 2. Ubique el tanque de alimentación en la estructura.
 3. Instale la tubería de impulsión (2) con la utilización de universales.
 4. Instale la válvula de bola al final de la tubería.
 5. Ubique los soportes de la tubería de impulsión.
 6. Instale el acople bridado para la bomba de ariete.
 7. Ubique la mesa de la bomba de ariete (3).
 8. Instale la bomba mediante el acople bridado.
 9. Sujete mediante pernos la bomba a la mesa.
 10. Instale la válvula de globo a la salida de la cámara de aire (4).
 11. Instale el rotámetro a continuación de la válvula de globo.
 12. Instale la tubería de descarga (13) a continuación del rotámetro.
 13. Ubique el tanque de desperdicio de agua.
 14. Instale la bomba eléctrica (12) para la recirculación del agua.

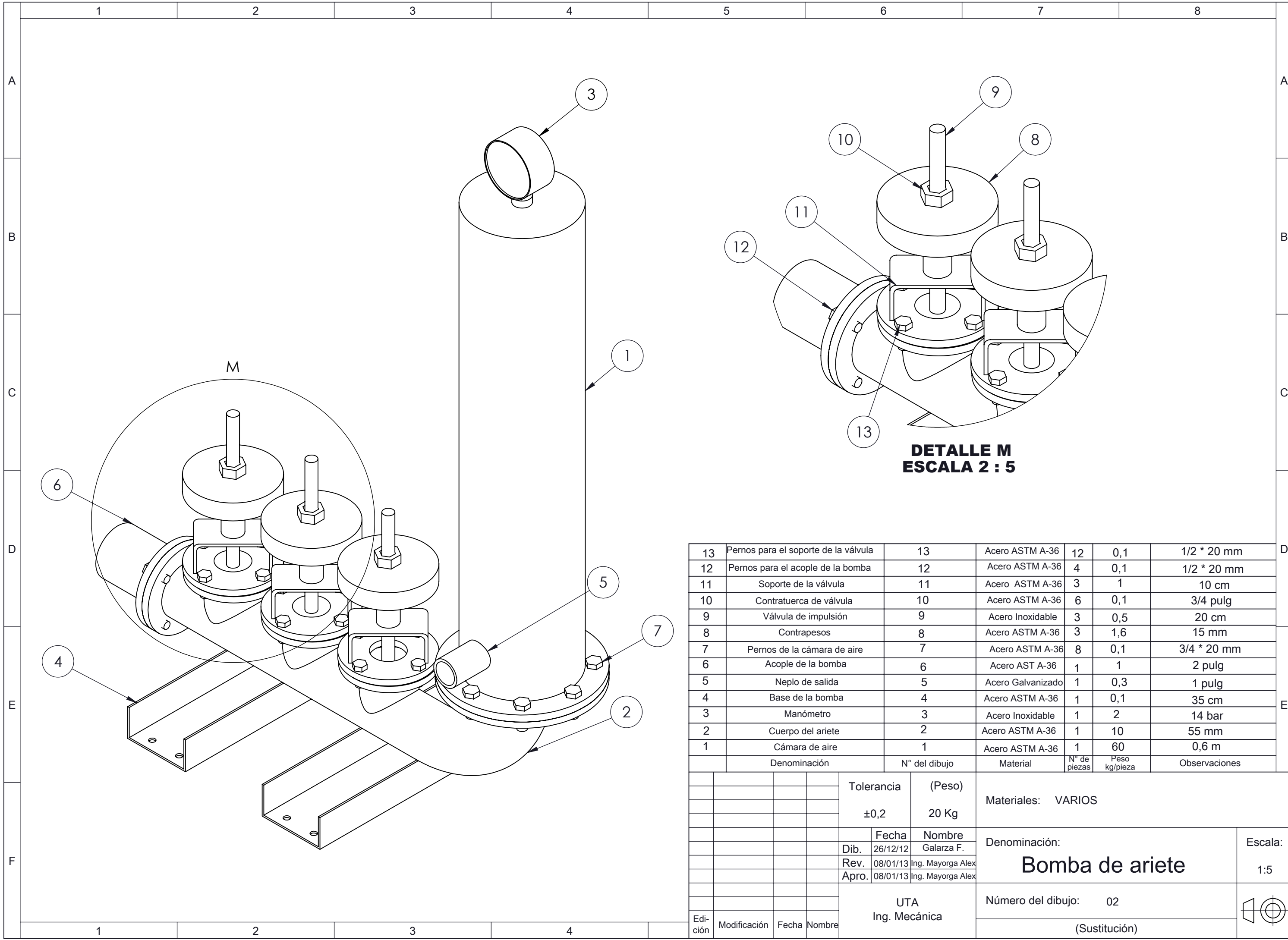
Especificaciones técnicas de la bomba de ariete	
Altura máxima (H max)	32 metros
Caudal máximo (Q max)	12 litros/min
Número de válvulas de impulsión	3 válvulas
Carrera: (3-10)mm	Peso: (0,6-1,6) kg
Peso total de la bomba de ariete	20 kg

**DETALLE A
ESCALA 1 : 20**

**DETALLE B
ESCALA 1 : 20**

Nº	Denominación	Nº del dibujo	Material	Nº de piezas	Peso kg/pieza	Observaciones
13	Tubería de descarga	13	PVC	1	2 m	
12	Bomba de agua	12	-	1	0,5 HP	
11	Rotámetro	11	Plástico	1	0,4	17 litros/min
10	Válvula de globo	10	Bronce	1	0,8	8 m
9	Manómetro	9	Acero Inoxidable	2	0,1	14 bar
8	Valvula de impulsión	8	Acero Inoxidable	3	0,5	93 mm
7	Contrapeso	7	Acero ASTM A-36	6	1,6	95 mm
6	Soporte de valvula	6	Acero ASTM A-36	3	1	10 mm
5	Cuerpo del ariete	5	Acero ASTM A-36	1	10	55 mm
4	Camara de aire	4	Acero ASTM A-36	1	7	0,6 m
3	Mesa de bomba	3	Acero ASTM A-36	1	25	1,7 m
2	Tubería de impulsión	2	Acero ASTM A-36	1	20	55 mm
1	Estructura de tanque de alimentacion	1	Acero ASTM A-36	1	150	2*1,75

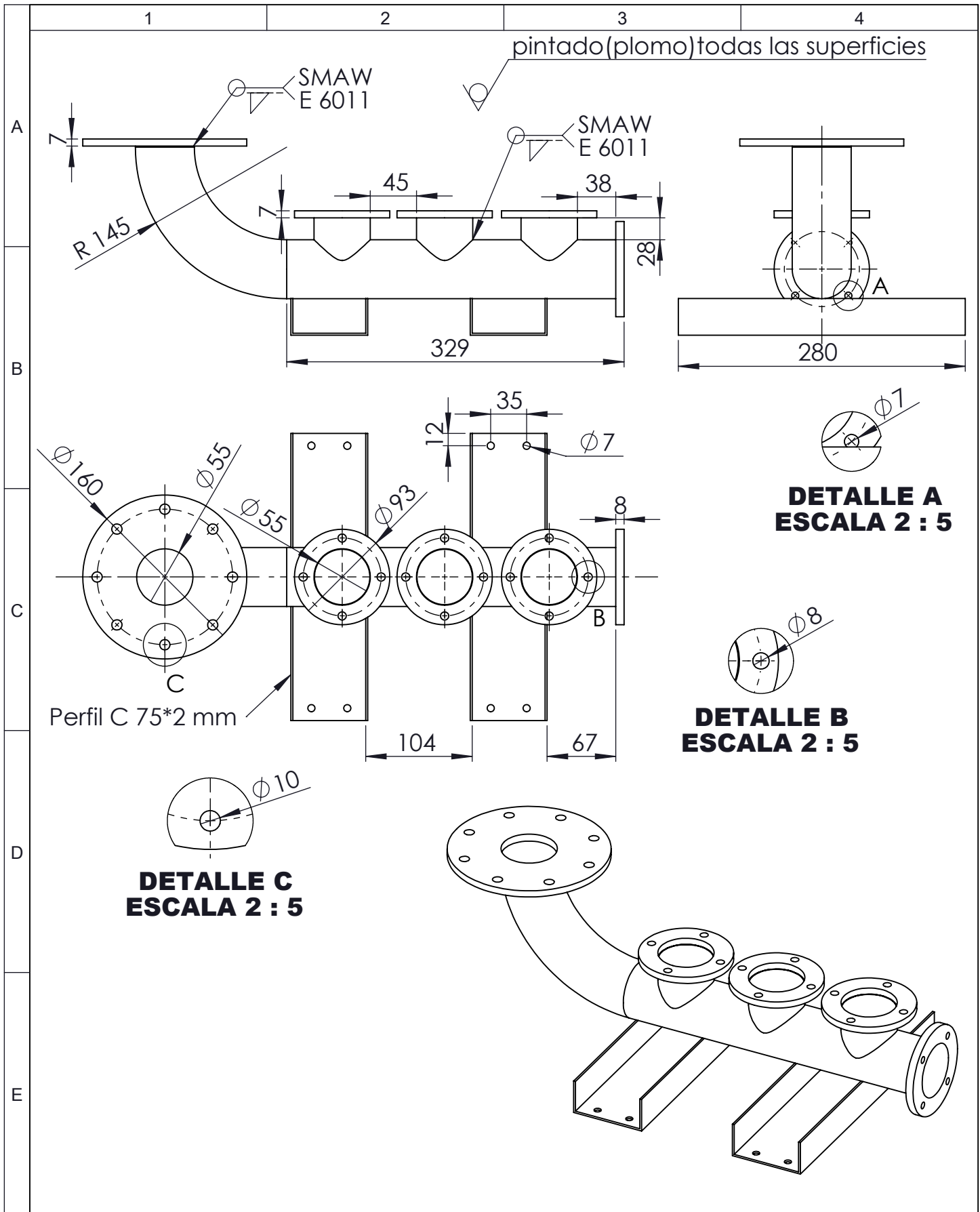
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Tolerancia	(Peso)	Materiales: VARIOS	Denominación: INSTALACIÓN DE BOMBA	Escala: 1:50
				±2	210 Kg			
				Fecha	Nombre	Número del dibujo: 01		
				Dib. 26/12/12	Galarza F.			
				Rev. 08/01/13	Ing. Mayorga Alex			
				Apro. 08/01/13	Ing. Mayorga Alex	(Sustitución)		
				UTA Ing. Mecánica				



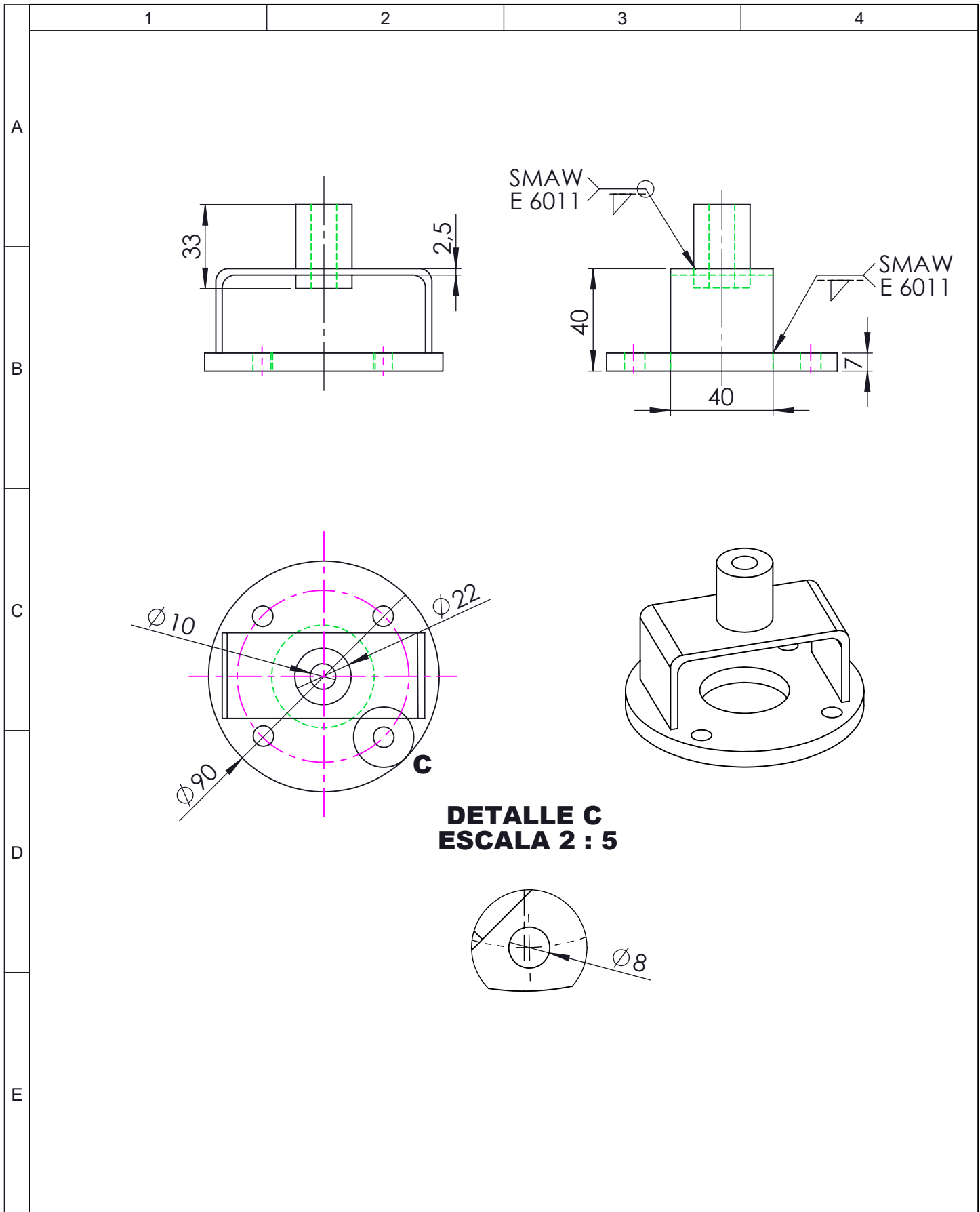
**DETALLE M
ESCALA 2 : 5**

13	Pernos para el soporte de la válvula	13	Acero ASTM A-36	12	0,1	1/2 * 20 mm
12	Pernos para el acople de la bomba	12	Acero ASTM A-36	4	0,1	1/2 * 20 mm
11	Soporte de la válvula	11	Acero ASTM A-36	3	1	10 cm
10	Contratuercas de válvula	10	Acero ASTM A-36	6	0,1	3/4 pulg
9	Válvula de impulsión	9	Acero Inoxidable	3	0,5	20 cm
8	Contrapesos	8	Acero ASTM A-36	3	1,6	15 mm
7	Pernos de la cámara de aire	7	Acero ASTM A-36	8	0,1	3/4 * 20 mm
6	Acople de la bomba	6	Acero AST A-36	1	1	2 pulg
5	Neplo de salida	5	Acero Galvanizado	1	0,3	1 pulg
4	Base de la bomba	4	Acero ASTM A-36	1	0,1	35 cm
3	Manómetro	3	Acero Inoxidable	1	2	14 bar
2	Cuerpo del ariete	2	Acero ASTM A-36	1	10	55 mm
1	Cámara de aire	1	Acero ASTM A-36	1	60	0,6 m
	Denominación	N° del dibujo	Material	N° de piezas	Peso kg/pieza	Observaciones

Tolerancia		(Peso)		Materiales: VARIOS		
±0,2		20 Kg				
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	Denominación: Bomba de ariete		
		Dib. 26/12/12	Galarza F.			Escala: 1:5
		Rev. 08/01/13	Ing. Mayorga Alex			
		Apro. 08/01/13	Ing. Mayorga Alex	Número del dibujo: 02		
UTA Ing. Mecánica				(Sustitución)		



				Tolerancia	(Peso)	Materiales: ACERO ASTM A-36	
				±1	10 Kg		
				Fecha	Nombre	Denominación: CUERPO DEL ARIETE	Escala: 1:5
			Dib.	26/12/12	Galarza F.		
			Rev.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
			Apro.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 03	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



**DETALLE C
ESCALA 2 : 5**

				Tolerancia	(Peso)	Materiales: ACERO ASTM A-36	
				±1	1 Kg		
				Fecha	Nombre	Denominación: SOPORTE VÁLVULA	Escala: 1:2
			Dib.	26/12/12	Galarza F.		
			Rev.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
			Apro.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 05	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	

1

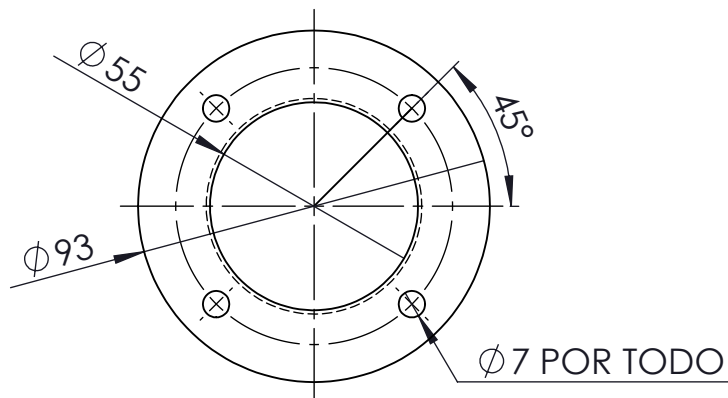
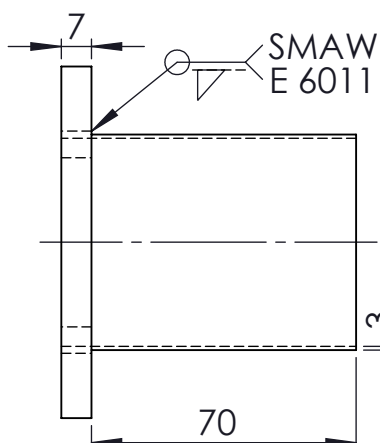
2

3

4

A

Pintado(plomo) todas las superficies

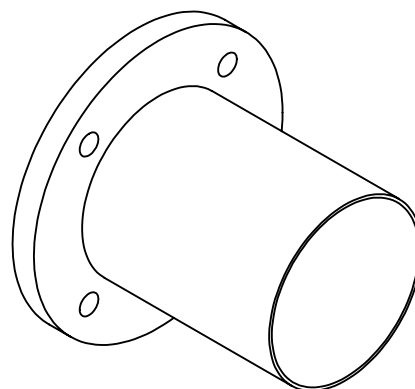
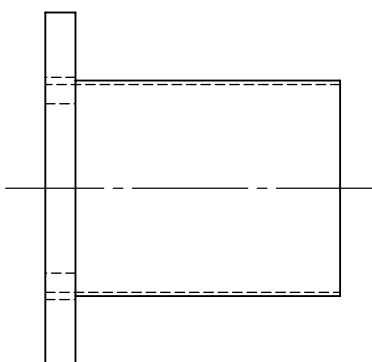


B

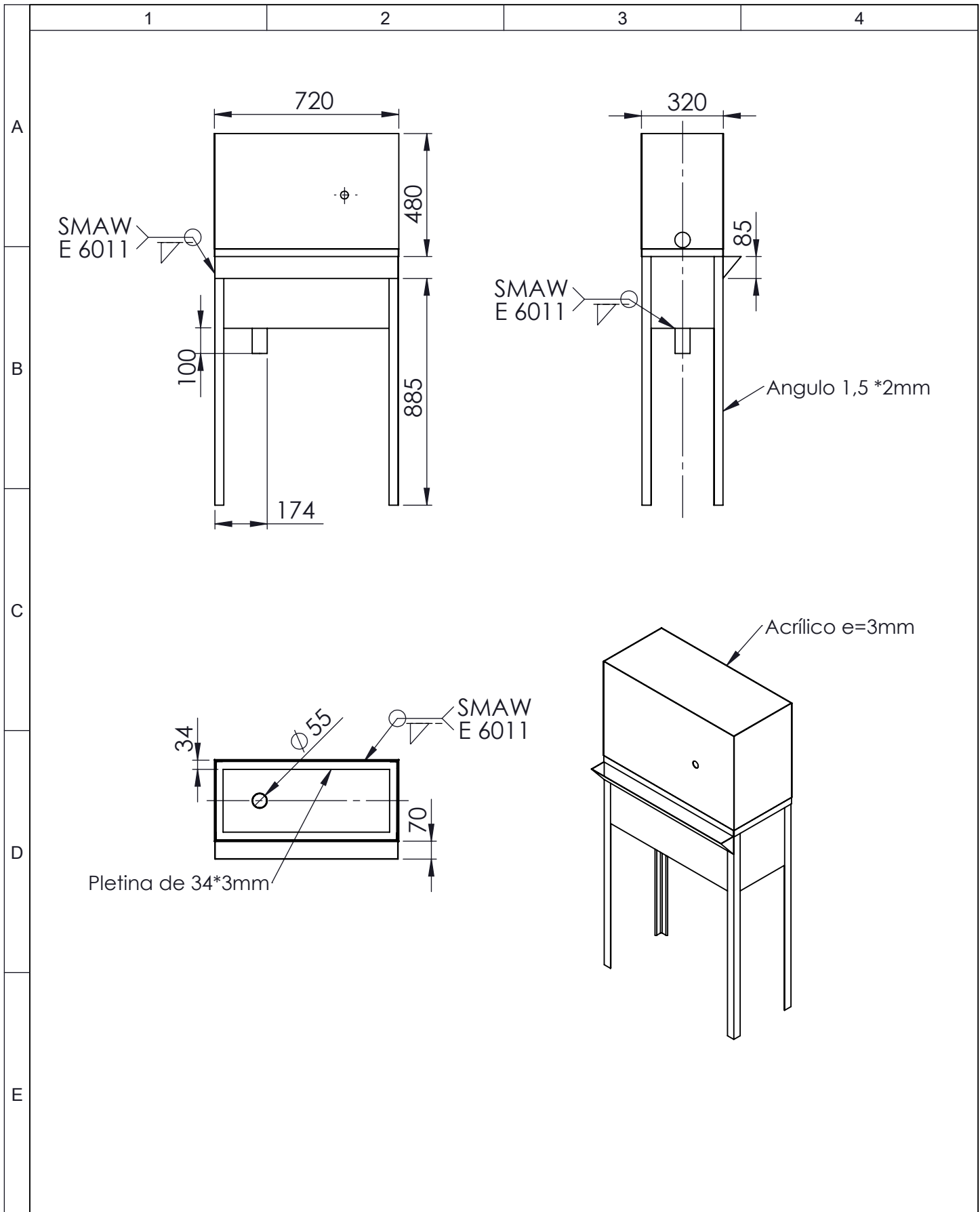
C

D

E



				Tolerancia	(Peso)	Materiales: ACERO ASTM A-36	
				± 1	1 Kg		
				Fecha	Nombre	Denominación: BRIDA DE ACOPLA	Escala: 1:2,5
			Dib.	26/12/12	Galarza F.		
			Rev.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
				Apro.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex	
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 06	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	



				Tolerancia	(Peso)	Materiales: ACERO ASTM A36 ACRILICO	
				±1	25 Kg		
				Fecha	Nombre	Denominación: MESA DE BOMBA	Escala: 1:20
			Dib.	26/12/12	Galarza F.		
			Rev.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
			Apro.	08/01/13	Ing.Mayorga Alex		
				UTA Ing. Mecánica		Número del dibujo: 07	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			(Sustitución)	