

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

TEMA:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO
CON EL DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA SU
DIMENSIONAMIENTO**

AUTORES:

SANTIAGO XAVIER RIVADENEIRA CARLOSAMA

LUIS FERNANDO SILVA ESPINOSA

DIRECTOR:

ING. ORLANDO PINEDA

Quito, Noviembre del 2013

DECLARACIÓN

Nosotros Santiago Xavier Rivadeneira Carlosama y Luis Fernando Silva Espinosa, declaramos por juramentación que el presente trabajo fue desarrollado bajo nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado y que se ha investigado mediante fuentes bibliográficas para la ejecución del mismo.

Por medio de la presente declaratoria de responsabilidad otorgamos el derecho de propiedad intelectual correspondiente de este trabajo a la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana según lo establecido por la ley de propiedad intelectual y normativa vigente establecida por las leyes actuales.

Santiago Rivadeneira

Luis Silva

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado por SANTIAGO RIVADENEIRA y LUIS SILVA, bajo mi supervisión.

Ing. Orlando Pineda

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIAS

Dedico este proyecto a Dios por brindarme la vida, salud y sabiduría necesaria para cumplir mis metas, a mis padres, José Miguel Carlosama e Isaura Rosero, quienes han contribuido a mi formación primero como persona y luego como profesional. Al Ing. Julio Sánchez, Ing. Wladimir de la Cadena grandes amigos que han sido un apoyo constante en mi vida y a mi familia que es la razón que me inspira día a día para ser mejor.

Santiago Xavier Rivadeneira Carlosama

A Dios por haberme permitido llegar hasta este punto, por darme salud y siempre guiarme por el camino del bien.

Dedico este trabajo a mis progenitores Luis Eduardo y María Rosario ya que con su amor, trabajo y sacrificio me han brindado un apoyo incondicional durante toda mi vida y en especial en mi estancia universitaria.

A mí querida hermana Cristina que siempre me dio ánimo para seguir adelante y nunca bajar los brazos.

Luis Fernando Silva Espinosa

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad, a los docentes ya que nos brindaron conocimientos que se plasman en el desarrollo y elaboración de este proyecto.

A todas nuestras respectivas familias que en cada momento nos ofrecieron afecto y respaldo para luchar por conseguir nuestras metas.

Al Ingeniero Orlando Pineda por su colaboración constante y buena predisposición a la hora de guiarnos en el desarrollo de esta tesis.

A todos nuestros compañeros con los cuales compartimos buenos momentos a lo largo de nuestra carrera universitaria.

RESUMEN DOCUMENTAL

El objetivo fundamental es analizar los fenómenos dados en las bombas de ariete con el fin de desarrollar un instructivo que ayudado por un software de dimensionamiento facilite la implementación de este sistema, que por utilizar energía alternativa beneficia al ecosistema de nuestra patria.

Para el estudio de la misma se ha dividido en cinco capítulos, en los cuales se detallan los temas necesarios para su consecuente desarrollo.

- En el capítulo I se desarrolla el marco teórico necesario para abordar los siguientes capítulos correspondientes al diseño, construcción, instructivo y software.
- El capítulo II corresponde al diseño hidráulico y mecánico, en él se detalla todo el desarrollo matemático e ingenieril para el dimensionamiento de componentes internos, cuerpo de la bomba, válvulas, bridas, etc.
- El capítulo III describe todos los procesos constructivos a utilizarse en la fabricación de la Bomba de ariete, también incluye tareas de mantenimiento, de resolución de problemas y búsqueda de fallas que se podrían presentar en la puesta en marcha de la máquina.
- En el capítulo IV se realiza el desarrollo del software ayudados por la plataforma LabVIEW, la misma que se basa en programación gráfica y también se implementa el instructivo de funcionamiento.
- El capítulo V analiza todos los datos recolectados que serán obtenidos mediante pruebas de funcionamiento realizadas a condiciones reales de operación.

ABSTRACT

The main objective is to analyze the phenomena given in ram pumps in order to develop an instructive; the same was helped by sizing software to facilitate the implementation of a system that uses alternative energy incurring in benefits for the ecosystem of our country.

For this study it has been divided into five chapters, which detail the issues necessary for their subsequent development.

- Chapter I develops the theoretical framework necessary to address the following chapters on the design, construction, and software instructions.
- Chapter II corresponds to hydraulic and mechanical design , it is detailed all mathematical equations and engineering for sizing internal components of the pump body , valves , flanges, etc. .
- Chapter III describes all construction processes used in the manufacture of the ram pump also includes maintenance, troubleshooting and fault finding that could arise in the implementation of the machine.
- In Chapter IV is performed software development platform helped by LabVIEW, the same which is based on graphical programming and also describes the Software's operating instructions.
- Chapter V analyzes all data collected which is obtained through performance tests carried out under real operating conditions.

INTRODUCCIÓN

“Basta que el reto sea útil para que el ingenio aflore”¹.

Desde hace muchos años el ser humano ha sentido la necesidad de transportar líquido vital a diferentes locaciones para diversos usos, dentro de los cuales se encuentra el consumo humano, riego, agricultura, ganadería, etc. La inventiva del ser humano ha desarrollado muchos métodos para lograr estos propósitos, desde el transporte con recipientes simples como cubetas, baldes cargados por ellos mismos o animales, hasta dispositivos cada vez más sofisticados comenzando por diversos tipos de bombas manuales, mecánicas, eléctricas, etc.

Este proyecto de titulación se enfoca en el transporte de líquido vital utilizando una técnica que aprovecha un fenómeno físico, perjudicial en el transporte de fluidos por tubería llamado golpe de ariete, pero que fue encaminado en un dispositivo llamado bomba de ariete, cambiando así el sentido del mismo. La bomba de ariete hidráulico funciona bombeando una pequeña cantidad del agua que circula a través de ella, procedente de una fuente de abastecimiento, y elevándola a un nivel mucho mayor que la misma fuente, este elemento de ingeniería se desarrolló en los años de 1796 por el inventor francés Joseph Michel Montgolfier. Las bombas de ariete no son nada nuevo, estas han sido utilizadas desde 1796, pero contribuyen de manera muy eficiente para elevar fluido, es por esta razón que su aplicación está aflorando de nuevo en varios países y varias locaciones donde el acceso a otro tipo de bombas ya sea que utilicen energía eléctrica o combustibles fósiles, es muy limitado por razones económicas, accesibilidad y contaminación. En la actualidad nuestro planeta ha resultado afectado por la contaminación ambiental la sed del ser humano de obtener más energía cada vez es más grande, sin embargo una conciencia global se está desarrollando en torno a este gravísimo problema, día a día se realizan varios proyectos que benefician al planeta disminuyendo las emisiones contaminantes que perjudican al mismo.

¹ Alejandro Montecinos Larrosa

ANTECEDENTES

En la actualidad, las fuentes de energía no renovables como el petróleo, carbón y gas natural tienden a agotarse, entonces, se trata de remplazar su utilización y una manera de lograr este propósito es desarrollando otras fuentes de energía renovable, como la hidráulica, eólica y solar, fuentes que inclusive sirven de apoyo para mantener el ecosistema del planeta, en proyectos que benefician al hombre.

PROPÓSITO

El propósito del presente proyecto es el estudio de los fenómenos físicos involucrados en las bombas de ariete hidráulico con el fin de contar con herramientas matemáticas y técnicas para el análisis del funcionamiento, las mismas se obtienen a partir del diseño, construcción y un software de dimensionamiento.

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y construir una bomba de ariete hidráulico y desarrollar un software de dimensionamiento.

Objetivos Específicos

- Diseñar una bomba de ariete hidráulico bajo condiciones específicas a partir de los principios básicos, conceptos y definiciones establecidos.
- Construir una bomba de ariete hidráulico con fines demostrativos que permita comprender el funcionamiento del fenómeno físico.
- Desarrollar una aplicación en software, que permita el dimensionamiento de bombas de ariete hidráulico para cualquier capacidad.
- Realizar pruebas de funcionamiento y analizar los resultados obtenidos.
- Elaborar planos de la bomba de ariete.

ALCANCE

Se propone partir del estudio del fenómeno de golpe de ariete y de todos los principios físicos que determinan sus parámetros, para diseñar una bomba de ariete de carácter demostrativo que será donada al laboratorio de Mecánica de fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana. El proyecto incluye cálculos, consideraciones técnicas, planos de las partes, diseño mecánico e hidráulico y construcción.

Para construir este equipo se tomará en cuenta el diseño y elaboración de la bomba de ariete como tal, todas las tuberías de carga y descarga, válvulas y accesorios necesarios para la puesta en marcha de la misma. A partir de los procesos de diseño y construcción, se desarrollará una aplicación en software que permita utilizar los procesos empleados para dimensionar y calcular bombas de ariete de diversas capacidades de funcionamiento. La misma contará con una interfaz gráfica, de tal manera que el diseño y cálculos se puedan realizar de forma sencilla. Se realizará un instructivo para la aplicación en software, que contará con los parámetros necesarios e indispensables para su correcta utilización.

Además se analizará los resultados del funcionamiento de la bomba para transmitir el conocimiento de esta aplicación y corroborar con los datos obtenidos en el diseño.

HIPÓTESIS

El diseño de la bomba cumple las condiciones inicialmente establecidas.

La bomba de ariete construida en este proyecto, es útil y aplicable para lugares en los cuales el acceso a otras fuentes de energía es limitado, ya sea por factores económicos o de disponibilidad.

El software desarrollado es útil para el diseño y dimensionamiento de bombas de ariete tanto para fines demostrativos como prácticos.

La bomba puede ser utilizada para suministrar líquido a mayores alturas.

JUSTIFICACIÓN

La utilización indiscriminada de combustibles fósiles ha provocado que anualmente aumenten las emisiones de CO₂ trayendo consigo un gran daño al medio ambiente y a sus ecosistemas. En dicho contexto es indispensable y urgente que se promueva la utilización de fuentes de energías limpias e innovadoras con usos prácticos y reales.

Este proyecto presenta una alternativa que reduce la utilización de fuentes de energía convencionales, desarrollando un software para el diseño y construcción de bombas de ariete de distinta capacidad, que permitan transportar y elevar fluidos en condiciones geográficas adversas sin producir impacto nocivo al medio ambiente. Además de su aplicación en lugares donde no se dispone de energía eléctrica, como zonas rurales, se hace indispensable disponer de energía alternativa como esta.

ÍNDICE GENERAL	
INTRODUCCIÓN	viii
ANTECEDENTES.....	ix
OBJETIVOS	x
Objetivo General	x
Objetivos Específicos	x
ALCANCE.....	xi
HIPÓTESIS.....	xii
JUSTIFICACIÓN	xiii
CAPITULO I.....	10
1. MARCO TEORICO.....	10
1.1 Hidráulica	10
1.2 Energía Hidráulica.....	10
1.3 Energía Cinética	10
1.4 Energía Potencial.....	10
1.5 Bomba Hidráulica.....	11
1.6 Golpe de Ariete	11
1.6.1 Principio básico del golpe de Ariete	11
1.6.2 Descripción del fenómeno físico golpe de Ariete.....	12
1.6.2.1 Golpe de Ariete el fenómeno físico	12
1.6.2.2 Explicación del fenómeno.....	13
1.7 Celeridad o rapidez de propagación de onda.....	18
1.8 Sobrepresión debido al cierre de una válvula.....	18
1.9 Bomba de Ariete.....	19
1.9.1 Historia de las bombas de ariete	20
1.9.2 Principio de funcionamiento de las bombas de ariete.....	22
1.10 Elementos y componentes del ariete hidráulico	23
1.10.1 Cuerpo del ariete hidráulico.....	23
1.10.2 Válvula de impulso	23
1.10.2.1 Tipos de válvulas de impulso.....	23

1.10.2.1.1	Válvula con resorte de pletina	23
1.10.2.1.2	Válvula con plato perforado	24
1.10.2.1.3	Válvula regulada con resorte	24
1.10.2.1.4	Válvula con pesas encima	25
1.10.2.1.5	Válvula con pesas a debajo	26
1.10.3	Válvula de entrega	26
1.10.3.1	Tipos de válvulas de entrega	26
1.10.3.1.1	Válvula de solapa	26
1.10.3.1.2	Válvula tipo cabezal	27
1.10.3.1.3	Válvula de bisagra	28
1.10.3.1.4	Válvula de disco suelto.....	28
1.10.3.1.5	Válvula de tapón.....	29
1.10.4	Cámara de aire o campana	29
1.10.5	Válvula de aire	30
1.11	Parámetros de diseño para bombas de ariete	30
1.11.1	Locación de la bomba	30
1.11.2	Altura de Entrega	30
1.11.3	Altura de Suministro	31
1.11.4	Tubería de suministro	31
1.11.5	Tubería de entrega	32
1.11.6	Caudal de entrega.....	32
1.11.6.1	Velocidad de cierre de la válvula de impulso	33
1.11.6.2	Coefficiente de descarga.....	34
1.11.6.2.1	Caudal libre	34
1.11.6.2.2	Pérdidas mayores	35
1.11.6.2.3	Pérdidas menores	36
1.11.6.2.4	Número de Reynolds.....	37
1.11.6.2.5	Rugosidad Relativa	37
1.11.7	Caudal de suministro	38
1.11.8	Caudal desechado	39
1.11.9	Rendimiento Volumétrico.....	39

1.11.10 Potencia de la bomba de ariete	40
1.11.11 Fuerza de arrastre para la válvula de impulso.....	40
1.11.12 Peso máximo para la válvula de impulso.....	41
CAPITULO II	42
2. DISEÑO DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO	42
2.1 Introducción.....	42
2.2 Consideraciones preliminares.....	42
2.2.1 Locación de la Bomba	42
2.2.2 Altura de entrega.....	43
2.2.3 Cálculo de la altura de suministro.....	43
2.2.4 Elección de la tubería de suministro	43
2.2.5 Elección de la tubería de entrega	44
2.3 Selección y diseño de componentes de la bomba.....	44
2.3.1 Cuerpo del ariete.....	44
2.3.2 Válvula de impulso	45
2.3.2.1 Diseño de la válvula de impulso	46
2.3.2.1.1 Diámetro del pie de la válvula de impulso	46
2.3.2.1.2 Cálculo del orificio del asiento de la válvula	46
2.3.2.1.3 Espesor del pie de la válvula	47
2.3.2.1.4 Diámetro del vástago de la válvula de impulso.....	47
2.3.2.1.5 Longitud del vástago	47
2.4. Cálculo del caudal de entrega.....	49
2.4.1 Cálculo de la velocidad de cierre de la válvula de impulso.....	49
2.4.2 Cálculo del coeficiente de descarga.....	49
2.4.3 Cálculo del caudal libre con la Ecuación General de la Energía	50
2.4.3.1 Cálculo de pérdidas mayores	51
2.4.3.2 Cálculo de pérdidas menores	51
2.4.3.3 Cálculo del caudal libre.....	53
2.4.3.4 Cálculo del número de Reynolds	55
2.4.3.5 Cálculo de la rugosidad relativa.....	55
2.4.3.6 Cálculo del factor de fricción.....	55

2.5 Cálculo del caudal de suministro.....	56
2.6 Cálculo del caudal desechado.....	57
2.7 Cálculo de la Potencia de la Bomba.....	57
2.8 Cálculo del rendimiento volumétrico.....	57
2.9 Cálculo de fenómenos físicos involucrados en la bomba de ariete.....	58
2.9.1 Cálculo de la celeridad.....	58
2.9.2 Cálculo de la sobrepresión existente dentro del ariete.....	59
2.9.3 Fuerzas que actúan sobre el cuerpo del ariete.....	59
2.9.3.1 Cálculo de la fuerza de arrastre para la válvula de impulso.....	61
2.9.3.2 Cálculo del peso para la válvula de impulso.....	61
2.10 Diseño de la válvula de aire (Respiradero).....	64
2.11 Diseño de la cámara de aire.....	65
2.11.1 Capacidad de la cámara de aire.....	65
2.11.2 Cálculo de la presión mínima y máxima en la cámara de aire.....	67
CAPITULO III.....	72
3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	72
3.1 Consideraciones generales.....	72
3.1.1 Construcción del cuerpo.....	75
3.1.2 Construcción de la cámara de aire.....	76
3.1.3 Construcción de la válvula de impulso.....	78
3.1.4 Construcción de la válvula de entrega.....	79
3.2 Costo del proyecto.....	81
3.2.1 Costo de elementos en la sección de suministro.....	81
3.2.2 Costo de la Bomba de ariete.....	82
3.2.2.1 Costo Accesorios y materia prima empleados.....	82
3.2.2.2 Costo de fabricación.....	83
3.2.2.3 Costo total de la bomba de ariete.....	84
3.2.3 Costos de elementos en la sección de entrega.....	84
3.2.4 Costo total del proyecto.....	85
3.3 Diagnóstico y solución de fallas.....	86
3.3.1 Resolución de problemas y la búsqueda de fallas.....	86

3.3.2 Como afinar la bomba de ariete hidráulico.....	88
3.3.3 Tareas de mantenimiento	89
3.3.4 Cuidados ante grandes caídas de agua	89
CAPITULO IV	90
4. SOFTWARE E INSTRUCTIVO PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOMBAS DE ARIETE	90
4.1 Desarrollo del software “Ram Pump Soft V1.1.0”	90
4.1.1 Introducción y metodología de programación en LabVIEW.....	90
4.1.2 Desarrollo de la aplicación	93
4.1.3 Ejecución de tareas dependientes e independientes.....	96
4.1.4 Relación de programación diagrama de bloques – panel frontal.....	98
4.1.5 Diseño y desarrollo del panel frontal.....	99
4.1.6 Agrupación de VI’s concatenación de tareas.....	100
4.1.7 Ejecución, depuración y puesta en marcha del programa ejecutable	101
4.1.8 Descripción global de la aplicación funcional para el diseño de bombas de ariete.....	102
4.2 Instructivo de procedimiento para realizar un ariete hidráulico	103
4.2.1 Introducción	103
4.2.2 Características principales	103
4.2.3 Instructivo del software “Ram Pump Soft v1.1.0”	104
4.2.4 Descripción del software “Ram Pump Soft v1.1.0”	104
4.2.5 Requisitos.....	105
4.2.6 Funcionamiento	105
4.2.7 Ventana inicial	105
CAPITULO V	112
5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	112
5.1 Introducción.....	112
5.2 Resultados e interpretación de las pruebas y gráficas de funcionamiento.	112
5.3 Pruebas de funcionamiento	114
5.2.1 Gráficas del comportamiento de la bomba a diferentes alturas de entrega	116
5.2.2 Gráficas del funcionamiento con altura de entrega de diseño 6.6 metros.	120

5.3 Análisis Costo-Beneficio.....	123
CONCLUSIONES	126
RECOMENDACIONES	128
BIBLIOGRAFÍA	130
ANEXOS	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ariete Hidráulico.	12
Figura 1.2. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula: c es la velocidad de propagación de la onda y V la velocidad del fluido.	13
Figura 1.3. Tubería sin perturbaciones.....	14
Figura 1.4. Cierre instantáneo de la válvula.....	14
Figura 1.5. Propagación de la onda de presión.	15
Figura 1.6. Llegada de la sobrepresión al embalse.	15
Figura 1.7. Tubería con la parte izquierda contraída.	15
Figura 1.8. Diámetro de la tubería normal.	16
Figura 1.9. Depresión en la mitad de la tubería.	16
Figura 1.10. Depresión en toda la tubería.	16
Figura 1.11. Tubería con la parte izquierda en movimiento.	17
Figura 1.12. Diámetro de la tubería normal.	17
Figura 1.13. Bomba ariete hidráulico.....	20
Figura 1.14. Bomba de ariete hidráulico palacio Taj Mahal.....	21
Figura 1.15. Componentes de la bomba de ariete.	22
Figura 1.16. Válvula con resorte de pletina.	24
Figura 1.17. Válvula con plato perforado.	24
Figura 1.18. Válvula con resorte.	25
Figura 1.19. Válvula con pesas encima.....	25
Figura 1.20. Válvula con pesas abajo.....	26
Figura 1.21. Válvula de solapa.....	27
Figura 1.22. Válvula de solapa.....	27

Figura 1.23. Válvula de bisagra.	28
Figura 1.24. Válvula de disco suelto.	28
Figura 1.25. Válvula de tapón.	29
Figura 2.1. Juntas por medio de bridas.	44
Figura 2.2. Válvula de solapa.	48
Figura 2.3. Descripción del tanque y tubería de suministro con pérdidas.	50
Figura 2.4. Coeficientes de resistencia al flujo a la salida del tanque de suministro.	52
Figura 2.5. Coeficientes de resistencia al flujo en el cuerpo del ariete.	52
Figura 2.6. Fuerzas aplicadas al codo.	60
Figura 2.7. Dimensiones del pie de la válvula de impulso.	62
Figura 2.8. Dimensiones de la pesa.	63
Figura 2.9. Válvula simple con horquilla.	65
Figura 2.10. Cámara de aire.	66
Figura 2.11. Presión mínima, válvula de entrega cerrada.	68
Figura 2.12. Presión máxima, válvula de entrega abierta.	71
Figura 3.1. Soldadura MIG.	72
Figura 3.2. Elementos a construir para la bomba de ariete.	73
Figura 3.3. Construcción cuerpo de la bomba.	76
Figura 3.4. Construcción cuerpo de la cámara de aire.	77
Figura 3.5. Construcción válvula de impulso.	79
Figura 3.6. Construcción válvula de entrega.	80
Figura 4.1. Panel frontal y diagrama de bloques.	91
Figura 4.2. Controles e indicadores.	92
Figura 4.3. Controles en el panel frontal.	92
Figura 4.4. Controles en el panel frontal.	94
Figura 4.5. Diagrama de bloques (Celeridad).	95
Figura 4.6. Diagrama de bloques (OPER CELER).	95

Figura 4.7. Diagrama de bloques (SPEED).	97
Figura 4.8. Parte del Diagrama de bloques.	97
Figura 4.9. Correspondencia de controles e indicadores.....	98
Figura 4.10. Agrupación de VI's concatenación de tareas.....	100
Figura 4.11. Esquema de la aplicación funcional.	102
Figura 4.12. Ventana Inicial.....	106
Figura 4.13. Pestaña de Diseño.	108
Figura 4.14. Pestaña de Dimensionamiento de componentes.	110
Figura 5.1. Altura de entrega vs caudal de entrega.	116
Figura 5.2. Altura de entrega vs caudal desechado.	117
Figura 5.3. Altura de entrega vs rendimiento.....	117
Figura 5.4. Presiones en la cámara de aire vs altura de entrega.....	118
Figura 5.5. Presiones en la cámara de aire vs altura de entrega.....	119
Figura 5.6. Rendimiento volumétrico vs altura de entrega.	119
Figura 5.7. Caudal de entrega vs carrera.	120
Figura 5.8. Rendimiento vs carrera.	121
Figura 5.9. Caudal desperdiciado vs carrera.	122
Figura 5.10. Ciclos vs carrera.	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Descripción de procesos para la construcción.	74
Tabla 3.2. Elementos utilizados para la construcción del cuerpo de la bomba.....	75
Tabla 3.3. Descripción de procesos para la construcción del cuerpo de la bomba.	75
Tabla 3.4. Elementos utilizados para la construcción de la cámara de aire.	76
Tabla 3.5. Descripción de procesos para la construcción de la cámara de aire.	77
Tabla 3.6. Elementos utilizados para la construcción de la válvula de impulso.	78
Tabla 3.7. Descripción de procesos para la construcción de la válvula de impulso.	78
Tabla 3.8. Elementos utilizados para la construcción de la válvula de entrega.	79
Tabla 3.9. Descripción de procesos para la construcción de la válvula de entrega.	80

Tabla 3.10. Descripción del costo en la sección de suministro de líquido.....	81
Tabla 3.11. Descripción de costos: accesorios y materia prima para la bomba.....	83
Tabla 3.12. Descripción del costo de fabricación para la bomba de ariete.....	83
Tabla 3.13. Descripción del costo total de la bomba de ariete.....	84
Tabla 3.14. Descripción del costo de elementos en la sección de entrega de líquido.....	84
Tabla 3.15. Descripción del costo total del proyecto.....	85
Tabla 3.16. Resolución de problemas y búsqueda de fallas.....	88
Tabla 4. 1 Requisitos de instalación para “Ram Pump Soft v1.1.0”.....	105
Tabla 5.1. Valores obtenidos con relación a valores calculados.....	113
Tabla 5.2. Valores obtenidos con altura de entrega de 6.6 metros.	114
Tabla 5.3. Valores obtenidos con altura de entrega de 8 metros.	114
Tabla 5.4. Valores obtenidos con altura de entrega de 10 metros.	115
Tabla 5.5. Valores obtenidos con altura de entrega de 12 metros.	115

CAPITULO I

1. MARCO TEORICO

Para el presente proyecto es necesario abarcar algunos conceptos y fundamentos teóricos, por lo tanto en esta sección se presentan varios temas que sirven como sustento teórico para el desarrollo del diseño de la bomba de ariete.

1.1 Hidráulica

Se define como la ciencia que trata sobre las leyes del equilibrio y movimiento de los líquidos, y la aplicación de dichas leyes a la solución de problemas prácticos.

1.2 Energía Hidráulica

Energía hidráulica es aquella que se obtiene del aprovechamiento de las energías cinéticas y potenciales de la corriente del agua, saltos de agua o mareas.

1.3 Energía Cinética

Dentro de la hidráulica, esta energía se define como el trabajo necesario para acelerar un fluido de una masa determinada desde el reposo hasta una determinada velocidad.

1.4 Energía Potencial

La Energía potencial es la energía que tiene un cuerpo situado a una determinada altura sobre el suelo.

1.5 Bomba Hidráulica

La bomba es una máquina hidráulica que realiza el traslado del líquido mediante la impulsión y la aspiración. Transforma la energía mecánica de un motor u otra clase de dispositivo en energía para el líquido, es decir la bomba comunica potencia al líquido que fluye a través de esta. En general, una bomba se utiliza para incrementar la presión de un líquido añadiendo energía al sistema hidráulico, para mover el fluido de una zona de menor presión o altitud a otra de mayor presión o altitud².

1.6 Golpe de Ariete

1.6.1 Principio básico del golpe de Ariete

En la mayoría de los casos la existencia del fenómeno de golpe de ariete significa un problema no deseado en muchos de los sistemas de transporte de fluido, el mismo que puede causar sobre presiones y hasta roturas en los sistemas. El golpe de ariete se refiere a las fluctuaciones causadas por un repentino incremento o disminución de la velocidad del flujo. Estas fluctuaciones de presión pueden ser lo suficientemente severas como para romper la tubería de agua. Los problemas potenciales del golpe de ariete pueden ser considerados al evaluarse el diseño de las tuberías y cuando se realiza un análisis detallado de las oscilaciones de presión, en muchos casos para evitar malos funcionamientos y reparaciones en el sistema de distribución.

Sin embargo este principio se utilizará en el presente proyecto. Es decir se pueden obtener valiosas ventajas al almacenar cierta presión en sistemas de tuberías que, dependiendo del enfoque técnico, pueden resultar en una magnífica alternativa para el transporte de fluidos.

La figura 1.1 muestra a manera de ejemplo didáctico el fenómeno del golpe de ariete, aquí se observa que el agua contenida en un recipiente sale de éste por una manguera, corriendo verticalmente hacia abajo y luego horizontalmente. En el otro extremo del

² “Hidraulica” B. Nekrasov, Editorial Mir Moscu 1968.

conducto está instalado un grifo y a cierta distancia del extremo, un tubo con un orificio pequeño que da hacia arriba. Mientras el grifo permanece cerrado, el agua brota del conducto corto sin superar el nivel de líquido contenido en el recipiente antes preparado. Mas, si la llave se abre y acto seguido se cierra bruscamente, en un primer instante el agua brotará por encima de la altura del nivel de líquido del recipiente, probando evidentemente que la presión creada en el tubo supera la hidrostática. El principio del golpe de ariete se aprovecha en una máquina simple para elevar agua, llamada bomba de ariete hidráulico.

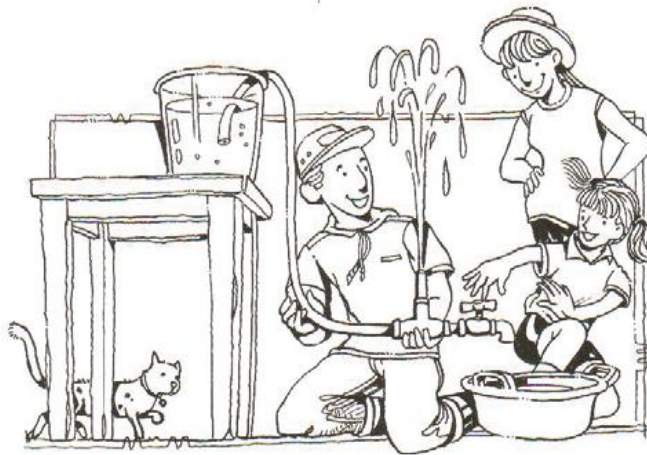


Figura 1.1. Ariete Hidráulico.

Fuente: Breurram. www.wot.utwente.nl

1.6.2 Descripción del fenómeno físico golpe de Ariete

1.6.2.1 Golpe de Ariete el fenómeno físico

Para el estudio del fenómeno del golpe de ariete hay que abandonar dos hipótesis normalmente utilizadas que son: fluido incompresible y régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por ende de régimen variable, donde la tubería ya no es rígida y además el líquido es compresible.

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

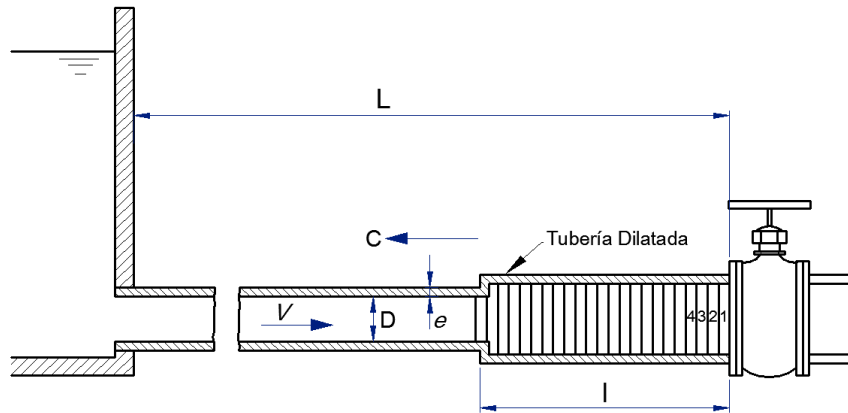


Figura 1.2. Onda de presión en el cierre instantáneo de una válvula: c es la velocidad de propagación de la onda y V la velocidad del fluido.

Fuente: Claudio Mataix

En la Figura 1.2 se detalla una tubería de longitud (L), espesor (e) y diámetro interior (D) por la que circula agua proveniente de un embalse y que en su extremo derecho termina en un obturador. Si este se cierra rápidamente, se producirá una sobrepresión o golpe de ariete, este fenómeno tiene que ver con el principio de conservación de la energía, ya que al detener el líquido disminuye su energía cinética, la cual se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería y dilata la misma.

1.6.2.2 Explicación del fenómeno

A pesar de que no se puede cerrar una válvula instantáneamente, es necesario utilizar esa consideración para realizar el estudio en casos reales.

Al cerrarse por completo instantáneamente la válvula de la Figura 1.2, si dividimos imaginariamente todo el fluido que llena la tubería en rodajas, como 1, 2, 3 y 4, se quedará primero en reposo la rodaja 1 y a continuación la 2, 3, 4, etc; necesitando un cierto tiempo. 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 bien 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 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 $t_o = \frac{L}{C}$ ³.

Si Consideramos una serie de acontecimientos en la tubería se tiene lo siguiente:

1. No hay perturbación. Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad V del embalse a la válvula, ver figura 1.3.

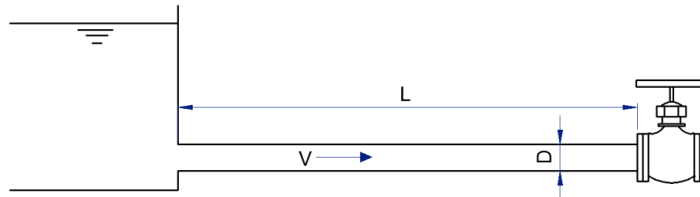


Figura 1.3. Tubería sin perturbaciones.

Fuente: Claudio Mataix

2. Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, ver figura 1.4.

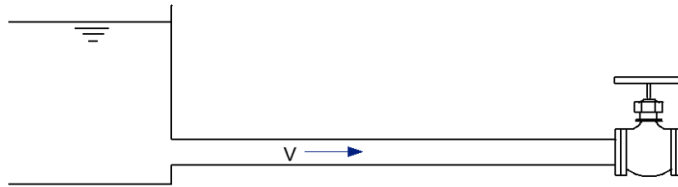


Figura 1.4. Cierre instantáneo de la válvula.

Fuente: Claudio Mataix

3. Tiempo $\frac{t_o}{2} = \frac{1}{2} \frac{L}{C}$. La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad C , la tubería se dilata por la sobrepresión, ver figura 1.5.

³ Claudio Mataix “Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas”. Segunda Edición. Alfaomega. México 1986.

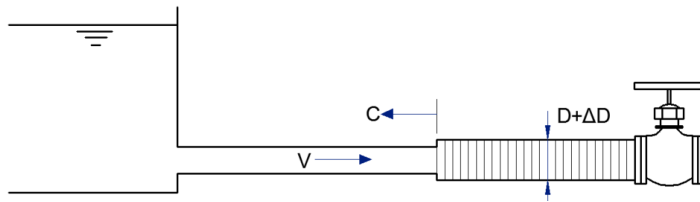


Figura 1.5. Propagación de la onda de presión.

Fuente: Claudio Mataix

4. Tiempo $t_o = \frac{L}{c}$. Toda la tubería está dilatada, ver figura 1.6.

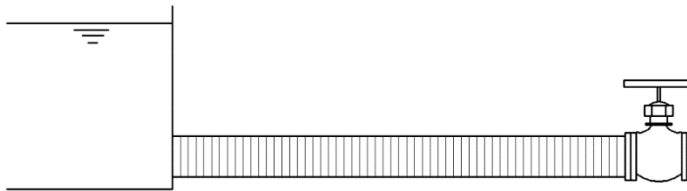


Figura 1.6. Llegada de la sobrepresión al embalse.

Fuente: Claudio Mataix

5. Tiempo $\frac{3}{2}t_o = \frac{3L}{2c}$. La parte 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 , ver figura 1.7.

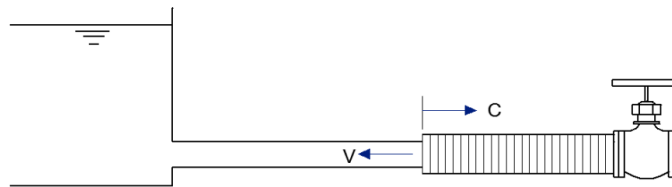


Figura 1.7. Tubería con la parte izquierda contraída.

Fuente: Claudio Mataix

6. Tiempo $2t_o = \frac{2L}{c}$. 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 ira disminuyendo por debajo de su diámetro normal, ver figura 1.8.

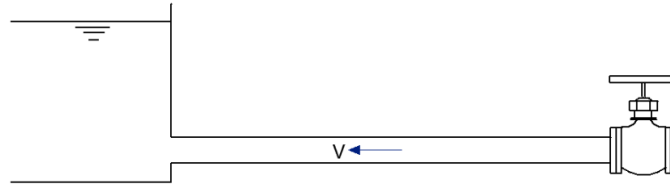


Figura 1.8. Diámetro de la tubería normal.

Fuente: Claudio Mataix

7. Tiempo $\frac{5}{2}t_o = \frac{5L}{2C}$. 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, ver figura 1.9.

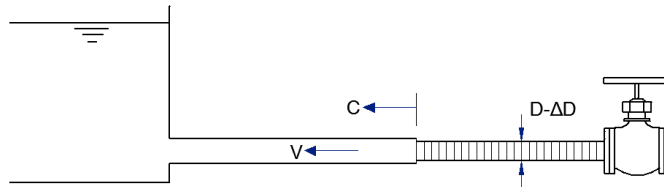


Figura 1.9. Depresión en la mitad de la tubería.

Fuente: Claudio Mataix

8. Tiempo $3t_o = 3\frac{L}{C}$. El agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad V , dirigida hacia la derecha. La depresión está presente en toda la tubería, el diámetro de la tubería es inferior al normal, ver figura 1.10.



Figura 1.10. Depresión en toda la tubería.

Fuente: Claudio Mataix

9. Tiempo $\frac{7}{2}t_o = \frac{7L}{2C}$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad V hacia la válvula, la mitad derecha el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El diámetro de la mitad derecha es menor que el normal; C y V tienen el mismo sentido, ver figura 1.11.

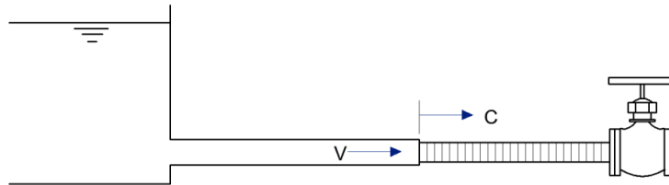


Figura 1.11. Tubería con la parte izquierda en movimiento.

Fuente: Claudio Mataix

10. Tiempo $4t_o = 4\frac{L}{C}$. El diámetro de la tubería vuelve a la normalidad, todo el fluido se encuentra en movimiento con velocidad V hacia la válvula, ver figura 1.12.

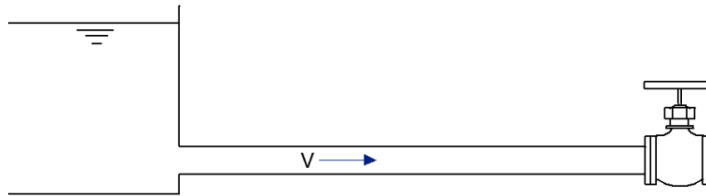


Figura 1.12. Diámetro de la tubería normal.

Fuente: Claudio Mataix

Prácticamente la deformación de la tubería y la viscosidad del líquido disipa energía y las oscilaciones se amortiguan⁴.

⁴ Claudio Mataix “Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas”. Segunda Edición. Alfaomega. México 1986.

1.7 Celeridad o rapidez de propagación de onda

Los cambios localizados que se producen en la presión y velocidad del flujo se propagan a lo largo de la tubería con una velocidad cercana a la velocidad del sonido, pero afectada por la elasticidad de la tubería. La velocidad de propagación C de la onda elástica en tuberías que transportan líquidos, está determinada por las propiedades del fluido, por la geometría y las propiedades elásticas de la tubería.

La celeridad de propagación de la onda de sobrepresión se puede calcular por medio de la fórmula de Allievi (1903, investigador francés) basada en la teoría elástica:

$$C = \sqrt{\frac{\frac{Ev}{\rho}}{1 + \left(\frac{Ev}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}} \quad (\text{Ec.1.1})$$

Dónde:

C = Celeridad o velocidad de propagación de la onda de sobrepresión (m/s).

Ev = Módulo de elasticidad volumétrico del agua (MPa).

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3).

E = Módulo de elasticidad de Young de la tubería (GPa).

D = Diámetro interno del tubo (m).

e = Espesor de la pared del tubo (m).

1.8 Sobrepresión debido al cierre de una válvula

Como es de conocimiento general la presión es la magnitud que relaciona la fuerza con la superficie sobre la que actúa, es decir, equivale a la fuerza que actúa sobre la unidad de superficie.

En el caso de tuberías, la presión o la sobrepresión que se ejerce viene originado por un fenómeno particular denominado golpe de ariete, que se origina debido a que el fluido es ligeramente elástico (aunque en diversas situaciones se puede considerar como un fluido no compresible). En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula o un grifo instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de fluido que se

han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido. Esta sobrepresión tiene dos efectos: comprime ligeramente el fluido, reduciendo su volumen, y dilata ligeramente la tubería. Cuando todo el fluido que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y por tanto, ésta tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal.

La sobrepresión debida al golpe de ariete es instantánea y está relacionada directamente con la velocidad del líquido, con la elasticidad del material de la tubería y con el tiempo en que se produce el paso de circulación del líquido.

Las ondas de presión pueden ser positivas (sobrepresiones) o negativas (depresiones). Las sobrepresiones originadas pueden aumentar la presión total interna hasta llegar a superar la presión máxima admisible, lo que puede ocasionar daños mecánicos graves a las tuberías y accesorios. Las ondas negativas pueden disminuir la presión total hasta generar cavitación, separación de la columna de líquido o el colapso de la tubería por efecto de la presión externa.

La fórmula expresada por Joukowski para calcular la sobrepresión es.

$$p = \rho * C * V \quad (\text{Ec.1.2})$$

Dónde:

p = Sobrepresión máxima (MPa).

C = Celeridad de propagación de onda (m/s).

V = Velocidad del fluido (m/s).

ρ = Densidad del agua (kg/m^3).

1.9 Bomba de Ariete

En la siguiente sección se describe la historia de las bombas de ariete, el principio de funcionamiento y los elementos que componen el ariete hidráulico. La figura 1.13

muestra como la bomba de ariete ofrece ciertas bondades útiles, convenientes y ahorrrativas para dar solución al problema ya abordado.



Figura 1.13. Bomba ariete hidráulico.

Fuente: Javier Vargas Rodríguez. www.intikallpa.org

1.9.1 Historia de las bombas de ariete

La bomba de ariete aprovecha la energía hidráulica almacenada como energía potencial, la misma que se transforma en energía cinética gracias a la caída en la tubería, creada por el flujo gravitatorio del agua y la parada inmediata a través de una válvula. El término "RAM", que significa golpe en idioma inglés es el que dio a las bombas de ariete su nombre de "Ram Pumps".

La potencia desarrollada se utiliza para levantar una fracción del total del agua, que es necesaria para alimentar la bomba, por encima de su origen mismo. Es comúnmente usado en áreas remotas con acceso a los diferenciales del nivel del agua, ya que no requiere fuente externa de energía, distinta de la energía gravitacional del agua que cae. La bomba de ariete fue inventado en 1796 por el francés Joseph Michel Montgolfier con el propósito de elevar el agua a su molino de papel en la ciudad de Voiron. Su amigo

Matthew Boulton sacó una patente británica en su nombre en 1797. Los hijos de Montgolfier obtuvieron una patente Inglesa de una versión mejorada en 1816.

Un simple salto en el curso de un río y una bomba de ariete hidráulico, permiten elevar el agua, a una altura varias veces superior al desnivel del cauce, sin recurrir a fuentes energéticas fósiles, eléctricas o nucleares.

El ariete hidráulico irrumpe en la historia al principio de la era de los grandes inventos y alcanzó la adultez paralelamente a las máquinas de vapor y el motor de combustión interna.

Un ejemplo: Las bombas de ariete instaladas en la famosa fuente frente al Palacio de Taj Mahal, en India. Tal como lo muestra la figura 1.14.

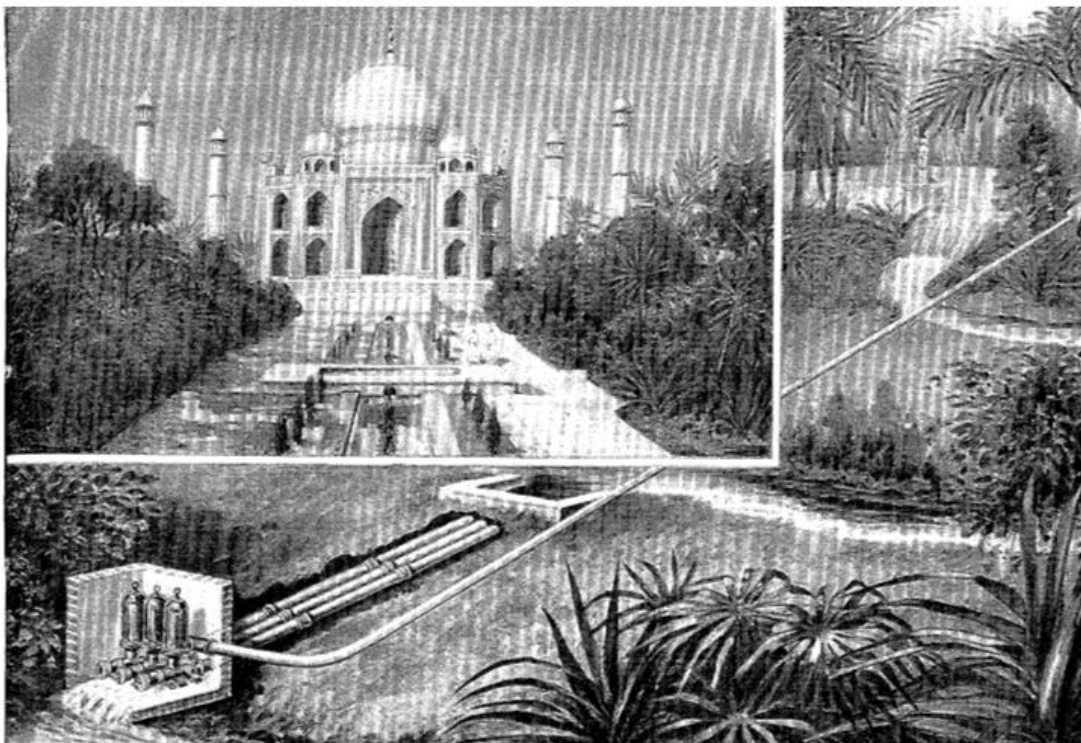


Figura 1.14. Bomba de ariete hidráulico palacio Taj Mahal.

Fuente: John Blake Publications.

1.9.2 Principio de funcionamiento de las bombas de ariete

El principio de funcionamiento de la bomba de ariete está ilustrado en la figura 1.15. La operación se basa en la conversión de la energía de velocidad del agua que fluye en energía de elevación. El agua fluye desde la fuente a través del tubo de accionamiento (A) y escapa a través de la válvula de desagüe (B) hasta que se acumula la presión suficiente para cerrar la válvula de desagüe. Después, el agua surge a través de la válvula de descarga interior (C) en la cámara de aire (D), comprimiendo el aire atrapado en la cámara. Cuando el agua a presión alcanza el equilibrio con el aire atrapado, rebota, haciendo que la válvula de descarga (C) cierre. El agua a presión entonces se escapa de la cámara de aire a través de una válvula de retención y el tubo de descarga (E) a su destino. El cierre de la válvula de descarga (C) causa un ligero vacío, permitiendo que la válvula de desagüe (B) se abra iniciando así un nuevo ciclo.

El ciclo se repite entre 20 y 100 veces por minuto, dependiendo de la velocidad de flujo. Si se instala correctamente, un ariete hidráulico operará en forma continua con un mínimo de atención, siempre que el suministro de agua que fluye sea continuo y el exceso de agua se derrame fuera de la bomba.

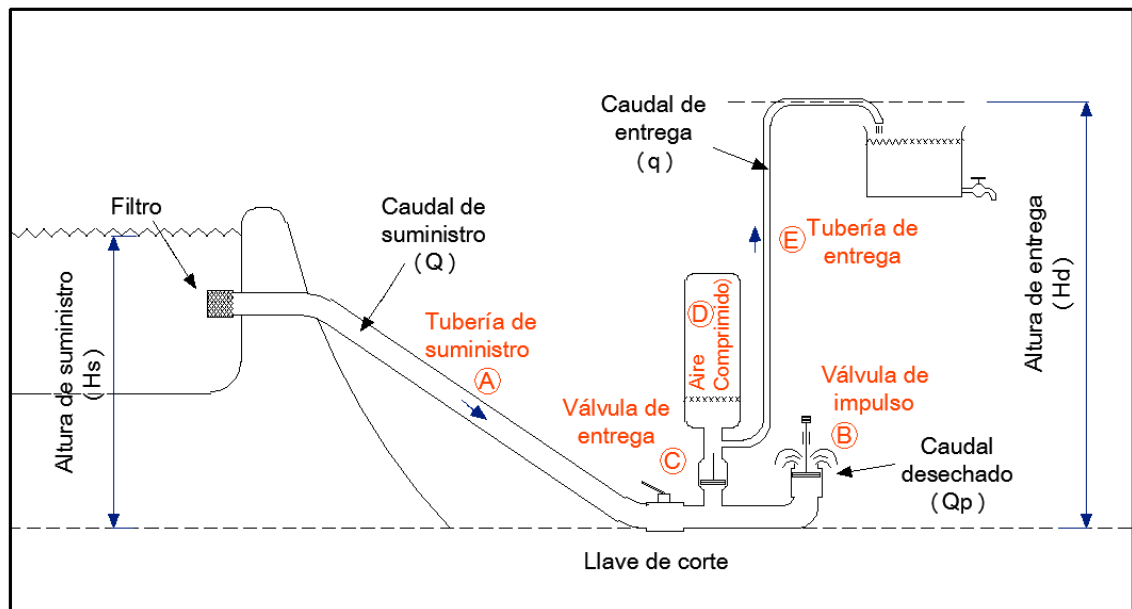


Figura 1.15. Componentes de la bomba de ariete.

Fuente: Propia

1.10 Elementos y componentes del ariete hidráulico

1.10.1 Cuerpo del ariete hidráulico

El cuerpo del Ariete es estructuralmente simple, constituido por una caja de válvulas la cual puede estar formada por una té y un codo, una unidad ensamblada cuyos elementos pueden estar unidos por pernos, tornillos, elementos roscados o mediante soldadura según los recursos, tecnificación y complejidad para la misma. Es la parte donde se produce la propagación de la onda de presión, donde se ubican la válvula de impulso y la válvula de entrega.

1.10.2 Válvula de impulso

Esta válvula es una de las partes más sensibles e importantes de la bomba de ariete, la correcta selección y buen diseño de esta, garantizará la máxima eficiencia en el funcionamiento del dispositivo.

Constituye la parte móvil más importante y determinante en el funcionamiento del equipo. Es la encargada de producir el golpe de ariete debido al cierre brusco que se produce por el efecto del incremento de la velocidad del agua. Esta válvula permite regular la cantidad de agua que penetra en la cámara de aire, esto se logra al variar el número de golpes por minutos.

1.10.2.1 Tipos de válvulas de impulso

1.10.2.1.1 Válvula con resorte de pletina

La válvula de pletina es netamente artesanal consta de materiales de fácil adquisición como son tubos, planchas, pletinas y pernos. Es de fácil construcción y se la puede fabricar en cualquier taller mecánico con un mínimo de herramientas, ver figura 1.16.

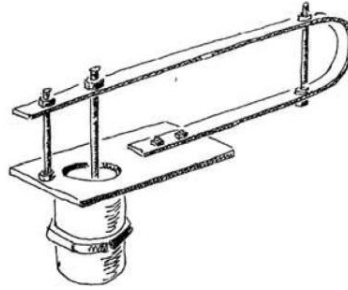


Figura 1.16. Válvula con resorte de pletina.

Fuente: S.B Watt.

1.10.2.1.2 Válvula con plato perforado

Esta válvula posee un plato perforado de geometría variable y compleja junto a un material que tiene una gran flexibilidad, resistencia al desgaste y alta tolerancia a la fatiga. Material con estas características es a la vez costoso y poco accesible en los países en desarrollo, su construcción es complicada y su vida útil es muy corta, ver figura 1.17.

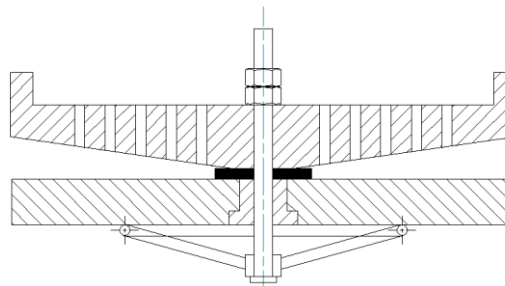


Figura 1.17. Válvula con plato perforado.

Fuente: International Development Research Centre (IDRC).

1.10.2.1.3 Válvula regulada con resorte

Este diseño implica cálculos previos muy precisos y construcción de elementos exactos. El desplazamiento de la carrera de la válvula lo gobierna un resorte, la válvula puede estar dispuesta en forma vertical u horizontal, ver figura 1.18.

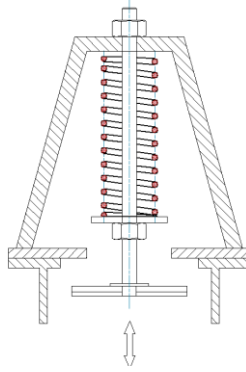


Figura 1.18. Válvula con resorte.

Fuente: Propia

1.10.2.1.4 Válvula con pesas encima

Este diseño tiene la ventaja de poder ajustar su carrera y su velocidad de cierre con la modificación de su conjunto de pesas, su construcción es robusta lo que garantiza una gran durabilidad para un ciclo de vida elevado. Como desventaja se tiene que este tipo de válvulas solo pueden trabajar en forma vertical para que las pesas actúen por la gravedad, ver figura 1.19.

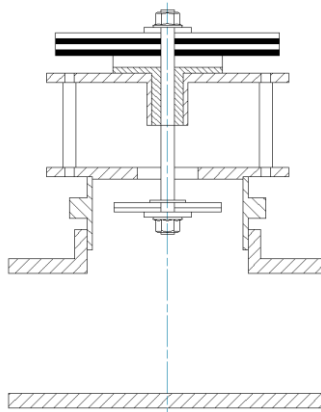


Figura 1.19. Válvula con pesas encima.

Fuente: International Development Research Centre (IDRC).

1.10.2.1.5 Válvula con pesas a debajo

Básicamente cumple el mismo principio de la válvula de pesas arriba, posee un diseño robusto, su configuración es sólida, las pesas se ubican en la parte inferior de la tapa de la válvula, tiene la capacidad de variar su carrera y velocidad, con la modificación de su conjunto de pesas. De igual manera debe ser posicionada en forma vertical, ver figura 1.20.

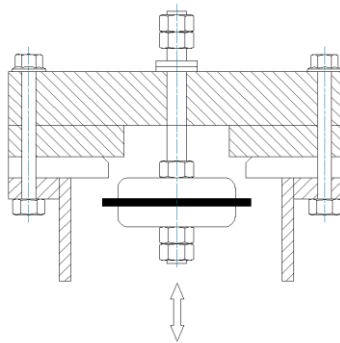


Figura 1.20. Válvula con pesas abajo.

Fuente: Volunteers in Technical Assistance (VITA).

1.10.3 Válvula de entrega

Es la que permite el paso del agua, desde la caja de válvulas hasta la cámara de aire, no permitiendo su retroceso al cerrarse por los efectos del rebote que se produce con el aire comprimido dentro de la cámara, lo que hace que el agua sea impulsada hasta un nivel superior al de captación. Debe estar construida de forma tal que se logre una buena hermeticidad, lo que evita pérdidas en la eficiencia y el rendimiento.

1.10.3.1 Tipos de válvulas de entrega

1.10.3.1.1 Válvula de solapa

Compuesta de una tapa de goma sencilla fijada en el centro contra una placa plana perforada. El movimiento está restringido por el tipo y espesor del caucho utilizado. La cantidad de flujo que atraviesa el agujero en la placa de entrega está limitada por la

resistencia del caucho y la presión de entrega. Su baja inercia brinda una respuesta más rápida que otros tipos de válvulas, ver figura 1.21.

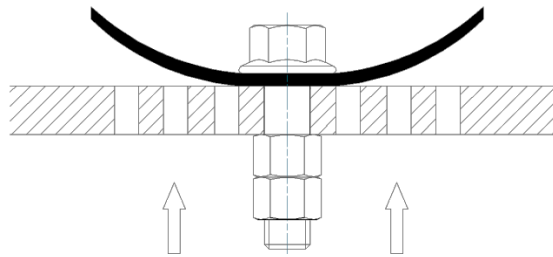


Figura 1.21. Válvula de solapa.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems.

1.10.3.1.2 Válvula tipo cabezal

El obturador utiliza caucho muy rígido tal como el material de la suela del zapato subiendo y bajando con un eje central, ver figura 1.22. Esta es una buena opción para bombas de cabeza alta, aunque puede tener problemas de sellado en las bombas de cabeza baja. Tiene la ventaja de permitir agujeros de gran diámetro en la placa de entrega. La carrera de la válvula debe ser regulada para que realice desplazamientos muy breves (menos de 5 mm) para ayudar a prevenir el reflujo. El agujero en la placa de la entrega y el perno necesitan cuidado en el dimensionamiento para asegurar la facilidad del movimiento. Este tipo de válvulas están sujetas a desgaste muy breve lo que puede ser un problema.

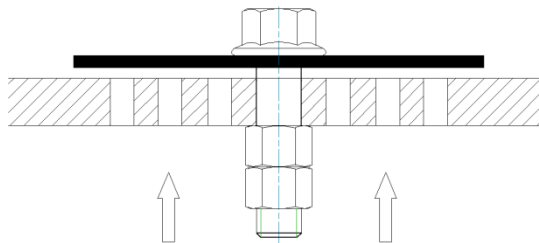


Figura 1.22. Válvula de solapa.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems.

1.10.3.1.3 Válvula de bisagra

La válvula de bisagra permite un agujero grande en la placa de entrega, minimizando la resistencia al flujo, ver figura 1.23. Los materiales utilizados para la bisagra y el método de fijación son cruciales y con frecuencia causan problemas. La posibilidad de reflujos debido al cierre lento puede ser un problema.

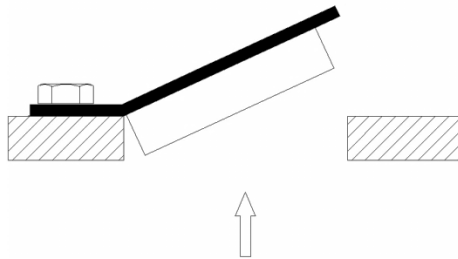


Figura 1.23. Válvula de bisagra.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems.

1.10.3.1.4 Válvula de disco suelto

La válvula de disco suelto utiliza material similar a la válvula de tipo cabezal ya que está restringido por una jaula unida a la placa de suministro, ver figura 1.24. Es más difícil de fabricar, pero tiene las mismas características que la válvula de tipo cabezal.

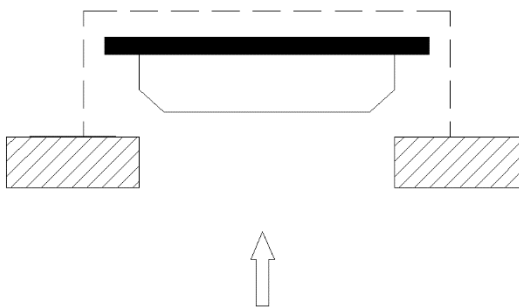


Figura 1.24. Válvula de disco suelto.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems.

1.10.3.1.5 Válvula de tapón

Esta es una válvula de impulsos efectivamente invertida con la presión diferencial que tiene que superar el peso de la válvula con el fin de levantarla, ver figura 1.25. El área de flujo grande de la placa de entrega puede ser una ventaja, pero también puede conducir a un flujo de retorno grande, mientras que la válvula se cierra. Un resorte puede ser añadido para facilitar un cierre rápido, pero esto se suma a la presión diferencial requerida para abrirlo.

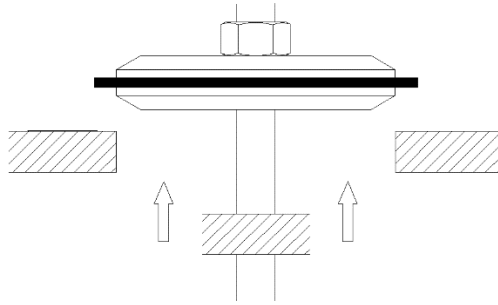


Figura 1.25. Válvula de tapón.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems.

1.10.4 Cámara de aire o campana

Es el dispositivo que regula el flujo de agua hacia la tubería de descarga, absorbe la sobrepresión (funciona como amortiguador de los golpes de ariete) e impulsa el agua por la tubería, dando de esta forma un flujo casi continuo, logrando un nivel superior al de captación y va montada sobre su propia base en la caja de válvulas mediante tornillos.

En el interior de la cámara de aire se producen dos presiones producto de sus condiciones de funcionamiento, una presión mínima cuando una cantidad de aire soporta la columna de agua presente en la tubería de entrega y otra presión máxima cuando el fluido ingresa y el aire de la cámara se comprime. Para el cálculo de estas presiones se utiliza la Ley de Boyle que relaciona el volumen y la presión de una cierta cantidad de gas mantenida a una temperatura constante.

$$P_1 * V1_{aire} = P_2 * V2_{aire} \quad (\text{Ec. 1.3})^5$$

⁵ Ley de Boyle

Dónde:

P_1 = Presión mínima (Pa).

$V_{1\text{aire}}$ = Volumen inicial de aire en la cámara (m^3).

P_2 = Presión máxima (Pa).

$V_{2\text{aire}}$ = Volumen dos de aire en la cámara (m^3).

1.10.5 Válvula de aire

Sirve para regular y renovar el aire absorbido por el agua que se pierde de la cámara. Está ubicada por debajo de la válvula de descarga y permite el ingreso permanente de aire de acuerdo al requerimiento de la cámara.

1.11 Parámetros de diseño para bombas de ariete

1.11.1 Locación de la bomba

Determinar el lugar donde se va a utilizar la bomba es la etapa primordial que marcará factores determinantes para el diseño de la misma, debido a las necesidades en el caso específico para su funcionamiento.

1.11.2 Altura de Entrega

La altura de entrega viene dada por el requerimiento de elevar el fluido a un nivel determinado, para orientar la utilización del líquido hacia una función específica entre las cuales se pueden mencionar; riego, almacenamiento de agua, distribución, potabilización del agua, entre otros.

1.11.3 Altura de Suministro

Para establecer la altura con la cual se debe contar para llegar al nivel de descarga requerido se hace uso de relaciones matemáticas realizadas por fabricantes y estudiosos del tema como Wáter S.B Watt que en su publicación expresa que la altura de suministro se determina por medio de la siguiente formula y debe estar entre 1 y 12 m como rangos recomendados.

$$H_s = \frac{1}{3} H_d \quad (\text{Ec.1.4})^6$$

Dónde:

H_s = Altura de suministro (m).

H_d = Altura de entrega (m).

1.11.4 Tubería de suministro

La tubería de suministro tiene dos objetivos primordiales que son:

- Permitir la entrada de agua al cuerpo de la bomba desde el tanque de suministro con la ganancia adicional de velocidad.
- Resistir el efecto de martillo del impacto producidos por el golpe de ariete.

Las dimensiones, tanto del diámetro como la longitud de la tubería de suministro son factores determinantes para garantizar el buen funcionamiento de la bomba de ariete, ya que conduce el agua desde la fuente a la bomba y retiene la onda de presión producida por el golpe de ariete. Estas deben cumplir con ciertas relaciones desarrolladas de manera experimental y obviamente de acuerdo al espacio físico disponible.

La longitud de la tubería de suministro es única para cada bomba. La misma no puede ser de material plástico ni PVC porque la sobrepresión efectuada por el golpe de ariete es muy fuerte para este tipo de tubos, es muy recomendable utilizar acero galvanizado de

⁶ Hydraulic Ram for Pumping Water S.B Watt

primera calidad o tuberías de hierro. El uso de otros materiales no apropiados conllevará a rutinas de mantenimiento seguidas y posibles fugas en la tubería de suministro.

Los estudiosos del tema y los expertos fabricantes mencionan que, tanto el diámetro como la longitud de la tubería de caída son muy importantes, existen relaciones matemáticas desarrolladas experimentalmente que garantizan el buen funcionamiento del ariete. Normalmente, la longitud del tren de tubos debe ser alrededor de tres a siete veces la altura de suministro. Idealmente, el tren de tubos debe tener una longitud de al menos 100 veces su propio diámetro. Según S.B Watt en su publicación que menciona la siguiente relación como la más recomendada.

La bomba funcionará bien si la relación entre la longitud (L) y el diámetro interno (D) se encuentra dentro de los límites.

$$\frac{L}{D} = 150 \text{ a } 500. \quad (\text{Ec.1.5})^7$$

1.11.5 Tubería de entrega

El objetivo principal de la tubería de entrega es conducir al fluido hasta su descarga, puede componerse de elementos de acople como uniones, codos, neplos, etc. Los que sean necesarios para armar el tren de tubos que cumpla con la distancia establecida.

El diámetro de la tubería de entrega normalmente se calcula como la mitad del diámetro de la tubería de suministro.

1.11.6 Caudal de entrega

Es el caudal que la bomba de ariete entrega una vez puesta en marcha, se utiliza la siguiente fórmula para su cálculo.

⁷ Hydraulic Ram for Pumping Water S.B Watt

$$\frac{q * H_d}{H_s * D^2 * u_c} = \frac{\pi * C_d}{10} \quad (\text{Ec.1.6})^8$$

Dónde:

q = Caudal de entrega (m^3/s).

H_s = Altura de suministro (m).

H_d = Altura de entrega (m).

D = Diámetro interno de la tubería de suministro (m).

u_c = Velocidad de cierre de la válvula de impulso (m/s).

C_d = Coeficiente de descarga.

De donde el caudal de entrega queda:

$$q = \frac{H_s * D^2 * u_c * \pi * C_d}{H_d * 10} \quad (\text{Ec.1.7})$$

1.11.6.1 Velocidad de cierre de la válvula de impulso

Para determinar la velocidad de cierre de la válvula de impulso se utiliza la siguiente relación matemática.

$$u_c = 0.135 * C_{vi} \quad (\text{Ec.1.8})^9$$

Dónde:

u_c = Velocidad de cierre de la válvula de impulso (m/s).

C_{vi} = Carrera de la válvula de impulso (mm).

⁸ Simplified analysis and design of the hydraulic ram pump

⁹ Simplified analysis and design of the hydraulic ram pump

1.11.6.2 Coeficiente de descarga

El coeficiente de descarga es un factor adimensional el cual relaciona el caudal con el cual el fluido se desplaza libremente por una tubería, junto al nivel del fluido en el embalse (Δh),

$$Q_l = C_d(\sqrt{2 * g * \Delta h})A \quad (\text{Ec.1.9})^{10}$$

El coeficiente de descarga es igual a:

$$C_d = \frac{Q_l}{(\sqrt{2 * g * \Delta h})A} \quad (\text{Ec.1.10})$$

Dónde:

Q_l = Caudal libre (m^3/s).

C_d = Coeficiente de descarga.

g = Gravedad (m/s^2).

Δh = Diferencia de alturas (m).

A = Área a la salida del fluido (m^2).

1.11.2.1 Caudal libre

El caudal libre es obtenido con la consideración de que la válvula de impulso se mantenga inmóvil permitiendo que el agua fluya hacia la atmosfera sin ninguna interrupción.

Por medio de la Ecuación General de la Energía que es una expansión de la Ecuación de Bernoulli, se hace posible resolver problemas con presencia de pérdidas, las cuales aparecen a medida que un flujo fluye por un conducto debido a la fricción interna en el fluido, permite saber cuál será la velocidad del fluido en el interior de la tubería.

Ecuación General de la Energía:

¹⁰ www.valvias.com/coeficiente-de-descarga.php

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ec.1.11})$$

Dónde:

P_1 = Presión en el punto uno (Pa).

P_2 = Presión en el punto dos (Pa).

γ = Peso específico del agua (N/m^3).

Z_1 = Altura del punto uno sobre nivel de referencia (m).

Z_2 = Altura del punto dos sobre nivel de referencia (m).

V_1 = Velocidad en el punto uno (m/s).

V_2 = Velocidad en el punto dos (m/s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2).

h_A = Energía añadida o agregada al fluido mediante un dispositivo mecánico (m).

h_R = Energía removida o retirada del fluido mediante un dispositivo mecánico (m).

h_L = Pérdidas de energía (pérdidas mayores y menores) por parte del sistema (m).

1.11.2.2 Pérdidas mayores

Las pérdidas mayores son producto de la fricción del fluido con el conducto.

Se expresa por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ec.1.12})^{11}$$

Dónde:

h_L = Pérdida mayor (m).

¹¹ ROBERT L MOOT. Mecánica de Fluidos Aplicada

L = Longitud de la corriente de flujo (m).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

V_2 = Velocidad en el punto dos (m/s).

f = Factor de fricción.

1.11.2.3 Pérdidas menores

Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio u obstrucción de la trayectoria del flujo, debido a la presencia de conectores, válvulas o accesorios.

$$h_{Lm} = k * \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{Ec.1.13})^{12}$$

Dónde:

h_{Lm} = Pérdida menor (m).

k = Coeficiente de resistencia al flujo.

V_2 = Velocidad en el punto dos (m/s).

g = Gravedad (m/s^2)

Factor de Fricción

Para el cálculo del factor de fricción, la siguiente ecuación desarrollada por P. K. Swamee y A. K. Jain permite el cálculo directo del factor:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_{RE}^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Ec.1.14})$$

¹² ROBERT L MOOT. Mecánica de Fluidos Aplicada

Dónde:

f = Factor de fricción.

D = Diámetro interno de la tubería (m).

ϵ = Rugosidad (m).

N_{RE} = Numero de Reynolds.

1.11.2.4 Número de Reynolds

Para calcular la pérdida de energía debido a la fricción en un sistema de fluido, es necesario caracterizar la naturaleza del flujo. Un flujo lento y uniforme se conoce como fluido laminar, mientras que un flujo rápido y caótico se conoce como flujo turbulento¹³.

$N_{RE} < 2000$ Flujo Laminar

$N_{RE} > 4000$ Flujo Turbulento

$2000 < N_{RE} < 4000$ Flujo Impredecible

El tipo de flujo puede predecirse mediante el cálculo del Número de Reynolds:

$$N_{RE} = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (\text{Ec.1.15})$$

Dónde:

V = Velocidad del flujo (m/s).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

ν = Viscosidad cinética (m^2/s).

1.11.2.5 Rugosidad Relativa

Es la relación del diámetro de la tubería y la rugosidad promedio de su pared

$$R_r = \frac{D}{\epsilon} \quad (\text{Ec.1.16})$$

¹³ ROBERT L MOOT. Mecánica de Fluidos Aplicada

Dónde:

R_r : Rugosidad relativa.

D: Diámetro interno de la tubería (m).

ϵ : Rugosidad (m).

1.11.7 Caudal de suministro

En un sistema ideal habrá una buena transferencia de flujo de donde se tiene:

$$q * Hd = Q * Hs \quad (\text{Ec.1.17})^{14}$$

Dónde:

q = Caudal de entrega (m^3/s).

Hd = Altura de descarga (m).

Q = Caudal de suministro (m^3/s).

Hs = Altura de suministro (m).

Desafortunadamente, esto no sucede en un sistema real. Existen varias pérdidas producidas por fricción entre el fluido y los elementos que se utilizan para la configuración de la red de tubería con la finalidad de transportar el líquido.

El ariete no utiliza toda el agua proveniente de la tubería de entrada. Su eficiencia puede ir desde 20 hasta 90 % en algunos casos y depende de la relación entre la cota de la toma y la cota de suministro, con el nivel de referencia en el aparato. La eficiencia es directamente proporcional al valor de esta relación, es decir inversamente proporcional a la altura a la que se va a suministrar el agua. Con el fin de calcular el caudal de suministro, si la eficiencia es desconocida se puede utilizar un valor asumido de 50 %.

$$\eta = \frac{q * Hd}{Q * Hs} \quad (\text{Ec.1.18})$$

$$Q = \frac{q * Hd}{\eta * Hs} \quad (\text{Ec.1.19})$$

¹⁴ T.D. Jeffery; Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems. ITDG Publishing. London 1992.

1.11.8 Caudal desechado

Es la cantidad de agua que la bomba de ariete expulsa hacia la atmósfera cuando está en marcha, ver figura 1.26.

$$Q = q + Q_p \quad (\text{Ec.1.20})$$

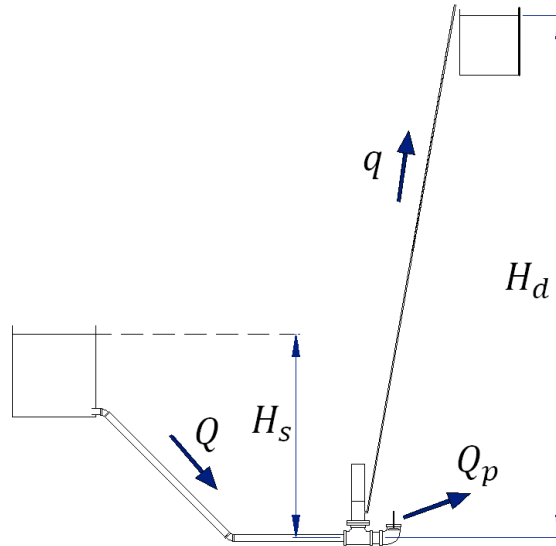


Figura 1.26. Esquema de funcionamiento respecto a diferentes caudales.

Fuente: Propia

Dónde:

Q = Caudal de suministro (m^3/s).

Q_p = Caudal desechado (m^3/s).

q = Caudal de entrega (m^3/s).

1.11.9 Rendimiento Volumétrico

El rendimiento volumétrico es la relación existente entre el caudal de entrega y el caudal de suministro de una bomba hidráulica.

$$n_v = \frac{q}{Q} * 100 \quad (\text{Ec.1.21})$$

Dónde:

n_v = Rendimiento volumétrico (%).

q = Caudal de entrega (m^3/s).

Q = Caudal de suministro (m^3/s).

1.11.10 Potencia de la bomba de ariete

La potencia requerida para elevar el fluido es proporcional a la tasa de flujo de agua multiplicado por la altura de descarga de la bomba de ariete y el peso específico del agua.

$$P = \gamma * q * Hd \quad (\text{Ec.1.22})^{15}$$

Dónde:

P = Potencia (W).

γ = Peso específico del agua (N/m^3).

q = Caudal de entrega (m^3/s).

Hd = Altura de entrega (m).

1.11.11 Fuerza de arrastre para la válvula de impulso

Cuando el fluido acelera lo suficiente para cerrar la válvula de impulso se produce una fuerza de arrastre que genera este cierre según E. J. Schiller en su publicación la describe por la fórmula:

$$F_a = C_a * A_v * \rho * \frac{v^2}{g} \quad (\text{Ec.1.23})^{16}$$

¹⁵ T.D. Jeffery; Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems. ITDG Publishing. London 1992.

¹⁶ The Hydraulic Ram Pump, Operating Characteristics

Dónde:

F_a = Fuerza de arrastre sobre la válvula de impulso (Kgf).

C_a = Coeficiente de arrastre.

A_v = Área de sección transversal de la válvula de impulso (m^2).

ρ = Densidad del agua (kg/m^3).

V = Velocidad del fluido en el cuerpo del ariete (m/s).

g = Gravedad (m/s^2).

1.11.12 Peso máximo para la válvula de impulso

Para determinar el peso de la válvula de impulso se utiliza la siguiente relación:

$$0 < Wv < \frac{Ca \cdot Av \cdot \rho \cdot Hs}{M} \quad (\text{Ec.1.24})^{17}$$

Dónde:

Wv = Peso (kg).

Ca = Coeficiente de arrastre para la válvula de impulso.

Av = Área de sección transversal de la válvula (m^2).

Hs = Altura de suministro (m).

M = Sumatorio de pérdidas totales (m).

ρ = Densidad de agua a 20 grados Celsius (kg/m^3).

¹⁷ International Development Research Centre (IDRC).

CAPITULO II

2. DISEÑO DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

2.1 Introducción

Diseñar es formular un plan para satisfacer una necesidad específica o resolver un problema. Si el plan resulta en la creación de algo físicamente real, entonces el producto debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse¹⁸.

El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones las cuales se determinan en función de la necesidad, disponibilidad mercantil y otro factor muy importante el costo.

Este capítulo detalla las consideraciones técnicas, cálculos, selección de material, diseño mecánico e hidráulico, con la finalidad de determinar un método para la construcción de la bomba de ariete, mediante la cuantificación de las variables que actúan en los distintos períodos del ciclo teórico de funcionamiento.

Se garantiza el funcionamiento y la perdurabilidad de la bomba de ariete, en base a la selección adecuada de materiales que cumplan con los cálculos obtenidos.

2.2 Consideraciones preliminares

2.2.1 Locación de la Bomba

La bomba de ariete que a continuación se diseñará y construirá, será donada al laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Universidad Politécnica Salesiana Quito campus Kennedy. Los principios y naturaleza de la bomba impiden que su funcionamiento se ejecute en un espacio cerrado como es el laboratorio, por lo que se

¹⁸ SHIGLEY. Diseño Ingeniería Mecánica

busca un lugar abierto para su puesta en marcha, en los patios de la Universidad aprovechando el diferencial de alturas de sus instalaciones.

2.2.2 Altura de entrega

Para determinar este parámetro se pretende demostrar y llegar a una altura de entrega de mínimo 6.6 m, de acuerdo a disponibilidad de la locación seleccionada.

2.2.3 Cálculo de la altura de suministro

Para calcular la altura de suministro utilizamos la ecuación. 1.4.

$$Hs = \frac{1}{3} Hd$$

$$Hs = \frac{1}{3} * 6.6 m$$

$$Hs = 2.2 m$$

Según la relación, la altura mínima que garantizará el buen funcionamiento del ariete es de 2.2 m.

2.2.4 Elección de la tubería de suministro

Considerando que la altura de suministro es de 2.2 m, se seleccionó una longitud de tubería de 6 m que cumple las recomendaciones indicadas en la ecuación 1.5, por tanto se obtiene:

$$D = \frac{L}{150}$$

$$D = \frac{6 m}{150}$$

$$D = 0.04 m$$

Según las consideraciones de espacio tanto vertical como horizontal del presente proyecto y las relaciones matemáticas recomendadas por los expertos del tema, se ha determinado utilizar tubería de acero galvanizado de \varnothing 1 1/2 pulg , (0.041 m de diámetro interno), que cumple con la relación anterior.

2.2.5 Elección de la tubería de entrega

Se determinó utilizar una tubería de diámetro 1/2 pulg, según la relación mencionada en el capítulo 1. (1.10.5. Tubería de entrega).

2.3 Selección y diseño de componentes de la bomba

2.3.1 Cuerpo del ariete

En el cuerpo del ariete se alojarán los componentes internos como son las válvulas de impulso, descarga y cámara de aire, el cuerpo debe ser capaz de soportar las presiones internas que se produzcan.

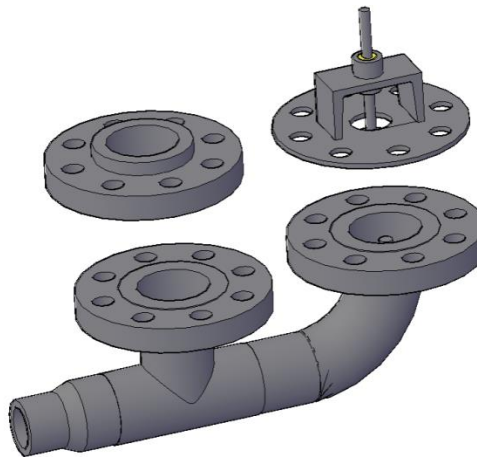


Figura 2.1. Juntas por medio de bridas.

Fuente: Propia

La siguiente configuración busca reducir los cambios de sección con la utilización de bridas y elementos normalizados que se pueden seleccionar en base a los diámetros y

presiones a los que serán sometidos, dichos elementos aumentan la robustez, disminuyen las pérdidas de velocidad y de presión por su buen diseño hidrodinámico, ver figura 2.1.

La fabricación de este tipo de bombas no es compleja, por lo que se puede realizar en un taller mecánico convencional.

2.3.2 Válvula de impulso

Criterios para la selección y diseño de la válvula de impulso:

- El sellado de la válvula debe ser hermético.
- La válvula debe resistir de manera adecuada la fatiga a la que va a estar expuesta.
- El sistema de la válvula de impulso debe permitir la libre apertura y cierre de la misma rápidamente.
- La válvula debe tener capacidad de regulación para garantizar el máxima rendimiento de la bomba.

Por su versatilidad para su calibración, fácil construcción y montaje la válvula de impulso que se utilizara en el presente proyecto es la válvula con pesas encima, la cual se coloca sobre el codo del cuerpo de la bomba.

Sus componentes son:

- Placa
- Tapón
- El perno de bloqueo.

La válvula de impulso es la parte que permite que el agua genere continuos efectos de martillo. El tapón tiene que ser lo suficientemente amplio como para que el agua lo empuje hacia arriba. El cierre tiene que ser rápido y limpio. Esto es de vital importancia para orientar el tapón verticalmente. Además, se recomienda que las superficies de

contacto entre la placa y el tapón tengan buen acabado superficial con el fin de lograr hermeticidad. La tuerca de bloqueo se utiliza para detener la caída libre del tapón por efecto de la gravedad. El vástago donde se alojan las pesas es regulable ya que cuenta con tuercas que permiten la modificación de la carrera.

2.3.2.1 Diseño de la válvula de impulso

2.3.2.1.1 Diámetro del pie de la válvula de impulso

Considerando el espacio físico que se tiene dentro del cuerpo de la bomba igual a un diámetro de 50 mm, se determina que el diámetro del pie para la válvula de impulso será de 42 mm, para contar con la holgura necesaria para el movimiento longitudinal de la misma.

2.3.2.1.2 Cálculo del orificio del asiento de la válvula

El diámetro del orificio de asiento de la válvula viene determinado por la siguiente relación.

$$dv = 1.15do^{19}$$

Dónde:

dv = Diámetro del pie de la válvula (m).

do = Diámetro del orificio del asiento de la válvula (m).

Si:

$dv = 0.042 m$.

Por lo tanto:

$$do = \frac{0.042 m}{1.15}$$

¹⁹ NEKRASOV, B. Hidráulica

$$d_o = 0.036 \text{ m}$$

2.3.2.1.3 Espesor del pie de la válvula

Según NEKRASOV, B en su libro Hidráulica el espesor de las válvulas de asiento se calcula con la siguiente fórmula.

$$e_{vi} = 0.14 * d_o^{20}$$

Dónde:

e_{vi} = Espesor del pie de la válvula de impulso (m).

d_o = Diámetro del orificio de asiento (m).

$$e_{vi} = 0.14 * 0.036 \text{ m}$$

$$e_{vi} = 0.0056 \text{ m}$$

2.3.2.1.4 Diámetro del vástago de la válvula de impulso

El diámetro del vástago que se selecciona es de 8 mm en base a consideraciones físicas requeridas y suficientes para su resistencia.

2.3.2.1.5 Longitud del vástago

La longitud del vástago será de 130 mm, con el fin de tener una geometría suficiente que permita alojar las pesas, tuerca, contratuerca y posibilitar la variación de la carrera.

2.3.3 Diseño de la válvula de entrega

Criterio para la selección y diseño de la válvula de entrega.

- Presentar baja resistencia al flujo de suministro que pasa a través de esta.

²⁰ NEKRASOV, B. Hidráulica

- Responder muy rápidamente a cambios en la presión a través de esta, de modo que tenga la capacidad de cerrarse y abrirse instantáneamente.
- Resistir los grandes y repetitivos cambios en la presión.
- Sellar completamente cuando se cierra.
- Operar durante prolongados períodos de tiempo.

Por sus buenas características de funcionamiento, fácil construcción y bajo costo se ha considerado utilizar la válvula de no retorno tipo solapa, la cual está situada por encima de la Tee del cuerpo de la bomba, ver figura 2.2. Su función es permitir que el agua fluya desde el cuerpo de la bomba a la cámara de aire, y prohíbe que el agua fluya en dirección opuesta. Cuando la presión dentro del cuerpo de la bomba es mayor que la presión almacenada en la cámara de aire, la válvula se abre y deja circular el agua hacia el recipiente que aloja el aire, luego la válvula se cierra actuando como no retorno. Su fijación se realizará por medio de bridas porta válvulas que une el cuerpo del ariete con la cámara de aire.

La válvula de entrega tipo solapa está hecha de tres componentes:

- La placa de la entrega con orificios;
- Empaque de caucho rígido y
- Perno.

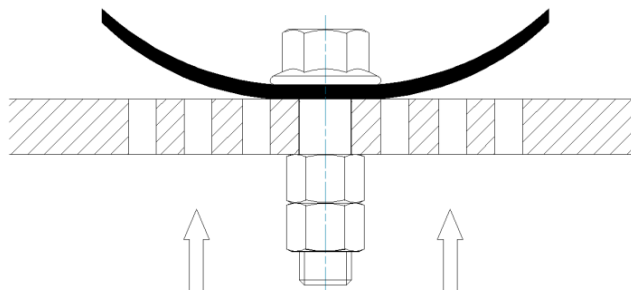


Figura 2.2. Válvula de solapa.

Fuente: A guide to ram pump water supply systems

2.4. Cálculo del caudal de entrega

Por medio de la ecuación 1.7. Se determina que el caudal bombeado será:

$$q = \frac{Hd * D^2 * u_c * \pi * C_d}{Hs * 10}$$

Antes de aplicar esta ecuación se debe calcular la velocidad de cierre de la válvula de impulso y el coeficiente de descarga.

2.4.1 Cálculo de la velocidad de cierre de la válvula de impulso

Para calcular la velocidad de cierre de la válvula de impulso se aplica la ecuación 1.8; se tendrá que asumir un valor para la carrera de la válvula de impulso.

Carrera de a válvula de impulso = 14 mm.

$$u_c = 0.135 * C_{vi}$$

$$u_c = 0.135 * 14 \text{ mm}$$

$$u_c = 1.89 \frac{m}{s}$$

La velocidad de cierre para la válvula de impulso será de 1.89 m/s.

2.4.2 Cálculo del coeficiente de descarga

Para aplicar la ecuación 1.10; es necesario calcular el caudal que se desplaza desde el embalse hasta la salida del sistema con la válvula de impulso inmóvil, que se llamará caudal libre.

$$C_d = \frac{Q_l}{(\sqrt{2 * g * \Delta h})A}$$

2.4.3 Cálculo del caudal libre con la Ecuación General de la Energía

La figura 2.3 muestra como se desplazara el liquido hasta llegar al cuerpo del ariete, considerando que la válvula de impulso se mantiene inmóvil, permitiendo que el fluido salga sin ninguna interrupción por el punto dos.

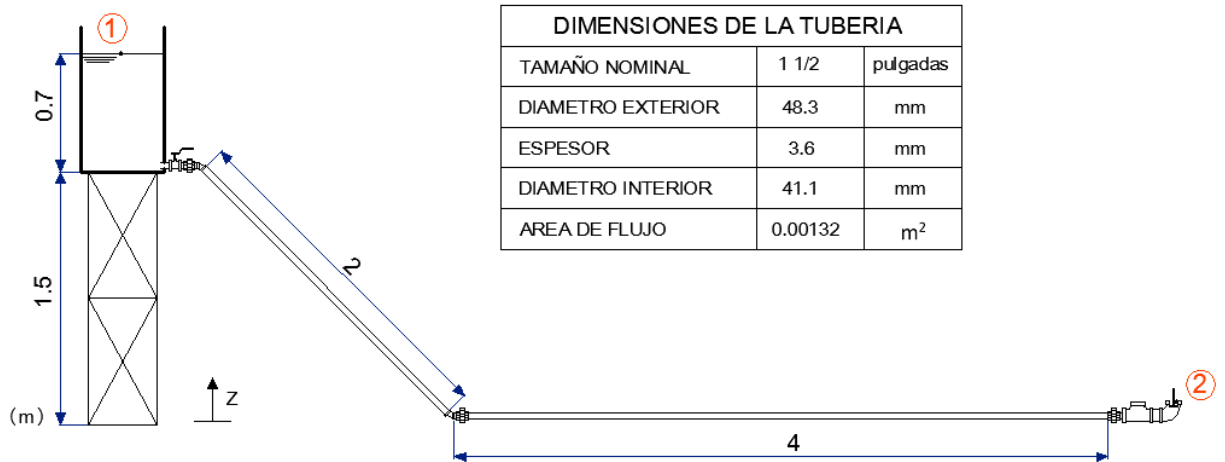


Figura 2.3. Descripción del tanque y tubería de suministro con pérdidas.

Fuente: Propia

Ecuación General de la Energía:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Como en este caso no se tiene dispositivos mecánicos entre las secciones de interés los términos h_A y h_R son cero, la ecuación queda:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

La presión en los puntos uno y dos se anulan ya que se encuentran a la atmósfera, además se considera que la velocidad en el punto uno es cero y el valor para Z_2 es cero ya que está ubicada al nivel de referencia.

Entonces la ecuación de energía se resume en:

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + h_L$$

Dónde h_L es la suma entre las pérdidas mayores y las pérdidas menores.

2.4.3.1 Cálculo de pérdidas mayores

Las pérdidas mayores se las calcula con la ecuación 1.12.

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_L = f * \frac{6 \text{ m}}{0.041 \text{ m}} * \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_L = f * 146.3 \frac{V_2^2}{2g}$$

Se asume un valor para el factor de fricción de 0.02, aplicando el proceso iterativo:

$$h_L = 2.92 \frac{V_2^2}{2g}$$

2.4.3.2 Cálculo de pérdidas menores

Las pérdidas menores se calculan con la ecuación 1.13.

$$h_{Lm} = k \frac{V_2^2}{2g}$$

Los Coeficientes de resistencia presentes a lo largo del sistema de suministro se visualizan en la figura 2.4 y figura 2.5.

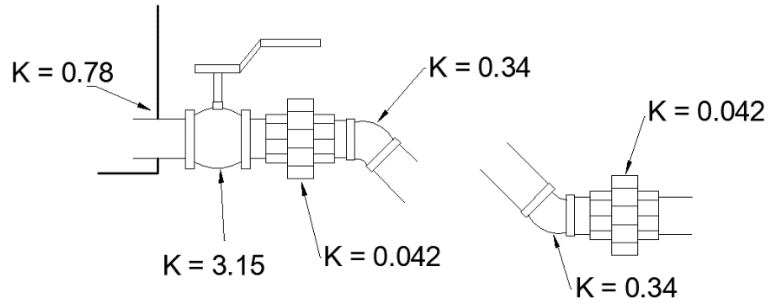


Figura 2.4. Coeficientes de resistencia al flujo a la salida del tanque de suministro.

Fuente: Propia

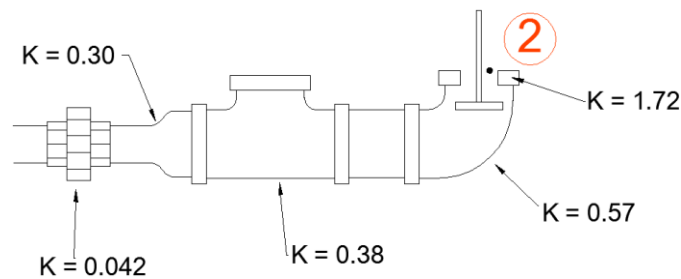


Figura 2.5. Coeficientes de resistencia al flujo en el cuerpo del ariete.

Fuente: Propia

Mediante la sumatoria de coeficientes se tiene:

$$h_{Lm} = \sum k \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_{Lm} = (0.78 + 3.15 + 3 \times 0.042 + 2 \times 0.34 + 0.30 + 0.38 + 0.57 + 1.72) \frac{V_2^2}{2g}$$

$$h_{Lm} = 7.7 \frac{V_2^2}{2g}$$

Con los datos calculados, aplicando la Ecuación de la Conservación de la Energía, se encuentra el valor para la velocidad en el punto dos:

$$Z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + 2.92 \frac{V_2^2}{2g} + 7.7 \frac{V_2^2}{2g}$$

$$Z_1 = 11.62 \frac{V_2^2}{2g}$$

$$V_2 = 1.92 \text{ m/s}$$

Con esta velocidad se procede a encontrar el caudal que circula por el sistema con las consideraciones antes mencionadas y se lo denomina caudal libre.

2.4.3.3 Cálculo del caudal libre

Este caudal se lo obtiene con la velocidad a la que sale el fluido por una determinada área de acuerdo a la forma geométrica de la válvula de impulso que se diseñó anteriormente.

$$Q_l = V_2 * A_2$$

Dónde:

Q_l = Caudal libre (m^3/s).

V_2 = Velocidad en el punto dos (m/s) (Figura 2.2).

A_2 = Área en el punto dos, área de asiento de la válvula menos área del vástago (m^2).

$$A_2 = A_{av} - A_{vi}$$

Dónde:

A_{av} = Área de asiento de la válvula (m^2).

A_{vi} = Área del vástago de la válvula (m^2).

El caudal libre es igual:

$$Q_l = 1.92 \frac{m}{s} * (1.02 \times 10^{-3} - 5.03 \times 10^{-5}) m^2$$

$$Q_l = 1.86 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} = 111.6 \frac{l}{min}$$

Cálculo de la velocidad que fluye por el interior de la tubería de suministro:

$$V_t = \frac{Q_l}{A_t}$$

Dónde:

V_t = Velocidad del fluido en el interior de la tubería de suministro (m/s).

Q_l = Caudal libre (m^3/s).

A_t = Área de la tubería de suministro (m^2).

$$V_t = \frac{1.85 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{0.00132 m^2}$$

$$V_t = 1.4 \frac{m}{s}$$

Cálculo de la velocidad que fluye por el interior del cuerpo del ariete, si tenemos un diámetro interno de 50 mm.

$$V_c = \frac{Q_l}{A_c}$$

Dónde:

V_c = Velocidad del fluido en el cuerpo del ariete (m/s).

Q_l = Caudal de libre (m^3/s).

A_c = Área del cuerpo del ariete (m^2).

$$V_c = \frac{1.85 * 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi(0.05 m)^2}{4}}$$

$$V_c = 0.94 \frac{m}{s}$$

Para comprobar si la consideración realizada de $f = 0.02$ se tendrá que calcular el factor de fricción mediante la ecuación 1.14; para ello se debe calcular el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

2.4.3.4 Cálculo del número de Reynolds

Se calcula en número de Reynolds mediante la ecuación 1.15:

$$N_{RE} = \frac{V_t * D}{\nu}$$

$$N_{RE} = \frac{1.4 \frac{m}{s} * 0.041m}{1.02 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$N_{RE} = \mathbf{56274.5}$$

2.4.3.5 Cálculo de la rugosidad relativa

Cálculo de la rugosidad relativa mediante la ecuación 1.16.

$$R_r = \frac{D}{\epsilon}$$

$$R_r = \frac{0.041 m}{4.6 \times 10^{-5} m} = \mathbf{891.3}$$

2.4.3.6 Cálculo del factor de fricción

La ecuación 1.14; permite en cálculo directo del factor de fricción:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7 \left(\frac{D}{\epsilon} \right)} + \frac{5.74}{N_{RE}^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = \frac{0.25}{\left[\log \left(\frac{1}{3.7(891.3)} + \frac{5.74}{56274.5^{0.9}} \right) \right]^2}$$

$$f = 0.024$$

El factor asumido fue 0.02, el factor calculado es 0.024, por consiguiente la consideración es aceptable y se procede a calcular el coeficiente de descarga por medio de la ecuación 1.10.

$$C_d = \frac{Q_l}{(\sqrt{2 * g * \Delta h})A}$$

$$C_d = \frac{1.86 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\left(\sqrt{2 * 9.81 \frac{m}{s^2} * 2.2m} \right) 9.7 \times 10^{-4} m^2}$$

$$C_d = 0.29$$

Una vez calculado el factor de descarga junto a la velocidad de cierre de la válvula de impulso se puede aplicar la ecuación 1.17; para encontrar el caudal que la bomba entrega.

$$q = \frac{Hs * D^2 * u_c * \pi * C_d}{Hd * 10}$$

$$q = \frac{2.2 m (0.041 m)^2 * 1.89 \frac{m}{s} * 3.1416 * 0.29}{6.6 m * 10}$$

$$q = 9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} = 5.79 \frac{l}{min}$$

2.5 Cálculo del caudal de suministro

Para encontrar el caudal de suministro se asume una eficiencia del 50 % y se calcula mediante la ecuación 1.19.

$$Q = \frac{q * Hd}{\eta * Hs}$$

$$Q = \frac{9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} * 6.6 m}{0.5 * 2.2 m}$$

$$Q = 5.78 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 34.44 \frac{l}{min}$$

2.6 Cálculo del caudal desechado

El caudal desechado se lo calcula mediante la ecuación 1.20.

$$Q_p = Q - q$$

$$Q_p = 5.78 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} - 9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

$$Q_p = 4.82 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s} = 28.9 \frac{l}{min}$$

2.7 Cálculo de la Potencia de la Bomba

La potencia de la bomba de ariete hidráulico se calcula mediante la ecuación 1.22.

$$P = \gamma * q * Hd$$

$$P = 9800 \frac{N}{m^3} * 9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} * 6.6 m$$

$$P = 6.2 W$$

2.8 Cálculo del rendimiento volumétrico

Para obtener el rendimiento volumétrico de la bomba de ariete hidráulico se realiza mediante la ecuación 1.21.

$$n_v = \frac{q}{Q} * 100$$

$$n_v = \frac{9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{5.78 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}} * 100$$

$$n_v = 16.6 \%$$

2.9 Cálculo de fenómenos físicos involucrados en la bomba de ariete

2.9.1 Cálculo de la celeridad

La celeridad o velocidad de propagación de la onda se calcula mediante la ecuación 1.1.

$$C = \sqrt{\frac{\frac{Ev}{\rho}}{1 + \left(\frac{Ev}{E}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}}$$

Datos de la tubería y el fluido seleccionados:

Tubería cédula 40, \varnothing 1 1/2 plg.

$$D_{int} = 0.041 \text{ m.}$$

$$e = 0.0036 \text{ m.}$$

$$E = 206.01 \text{ GPa.}$$

$$Ev = 2197.44 \text{ MPa (Agua a } 20 \text{ }^\circ\text{C)}$$

$$C = \sqrt{\frac{\frac{2197.44 \text{ MPa}}{998.58 \frac{Kg}{m^3}}}{\left[1 + \left(\frac{2197.44 \text{ MPa}}{206.01 \text{ GPa}}\right)\left(\frac{0.041 \text{ m}}{0.0036 \text{ m}}\right)\right]}}$$

$$C = 1400.78 \frac{m}{s}$$

2.9.2 Cálculo de la sobrepresión existente dentro del ariete

La sobrepresión que se produce dentro del cuerpo del ariete se la calcula mediante la ecuación 1.2.

$$p = \rho * C * V_c$$
$$p = 998.58 \frac{kg}{m^3} * 1400.78 \frac{m}{s} * 0.94 \frac{m}{s}$$
$$p = 1314863.44 \frac{Kg}{ms^2}$$
$$p = 1.31 MPa = 190 PSI$$

De manera específica se diseñará el cuerpo de la bomba en base a la sobre presión calculada de 1.3 MPa y a los diámetros de los elementos correspondientes de 2 pulg, por lo que se selecciona bridas Ansi clase 300 y componentes capaces de resistir presiones mayores o iguales a 190 Psi.

2.9.3 Fuerzas que actúan sobre el cuerpo del ariete

Fuerza localizada en el codo del ariete hidráulico

Cuando las corrientes libres de fluido son obstruidas por objetos estacionarios, se deben ejercer fuerzas externas para mantener el objeto en equilibrio²¹, esto ocurre en el codo donde está localizada la válvula de impulso ya que el fluido es obligado a cambiar de dirección, para determinar estas fuerzas se utiliza la ecuación del cambio en la cantidad de movimiento:

$$F_c = \rho * Q * \Delta \vec{V}$$

Dónde:

F_c = Fuerza aplicada en el codo (N).

²¹ Robert L. Moot; “Mecánica de Fluidos Aplicada”. Cuarta Edición. Pearson Educación. México 1996.

ρ = Densidad del fluido (Kg/m^3).

Q_l = Caudal libre (m^3/s).

$\Delta\vec{V}$ = Velocidad final menos velocidad inicial (m/s).

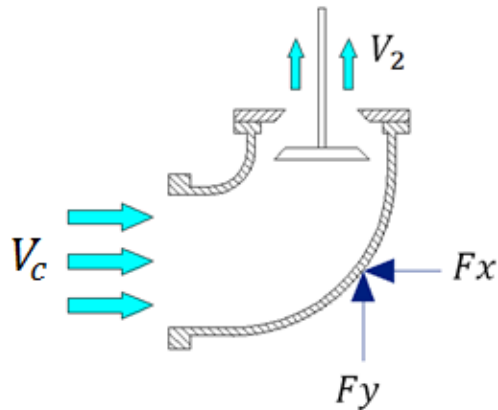


Figura 2.6. Fuerzas aplicadas al codo.

Fuente: Propia

Sumatoria de fuerzas en el eje x:

$$\sum F_c x = \rho * Q_l * \Delta\vec{V} x$$

Entonces se tiene:

$$-F_c x = \rho * Q_l (0 - V_c)$$

$$-F_c x = 998.58 \frac{Kg}{m^3} * 1.85 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} (0 - 0.94) \frac{m}{s}$$

$$F_x = 1.73 N$$

Sumatoria de fuerzas en el eje y:

$$\sum F_y = \rho * Q_l * \Delta\vec{V} y$$

$$-F_c y = \rho * Q_l (V_2 - 0)$$

$$Fy = 998.58 \frac{kg}{m^3} * 1.85 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} * (1.92 - 0) \frac{m}{s}$$

$$Fy = 3.54 N$$

2.9.3.1 Cálculo de la fuerza de arrastre para la válvula de impulso

Para determinar la fuerza de arrastre que eleva a la válvula de impulso se aplica la ecuación 1.23:

$$F_a = C_a * A_v * \rho * \frac{V_t^2}{g}$$

$$F_a = 1.17 * 0.0014 m^2 * 998.58 \frac{kg}{m^3} * \frac{1.4^2 \left(\frac{m}{s}\right)^2}{9.81 \frac{m}{s^2}}$$

$$F_a = 0.33 Kgf = 3.24 N$$

Esta es la fuerza que golpea a la válvula de impulso cuando se produce el cierre.

2.9.3.2 Cálculo del peso para la válvula de impulso

Para el cálculo del peso de la válvula de impulso se aplica la ecuación 1.24:

$$0 < Wv < \frac{Ca * Av * \rho * Hs}{M}$$

El peso máximo para la válvula de impulso será:

$$Wmax = \frac{Ca * Av * \rho * Hs}{M}$$

$$Wmax = \frac{1.17 * 0.0014 m^2 * 998.58 \frac{Kg}{m^3} * 2.2 m}{10.62}$$

$$Wmax = 0.34 Kg$$

Si se diseña la válvula con su peso máximo probablemente no cerrará, por lo tanto el ariete no funcionará correctamente, razón por la cual el peso de la válvula debe estar dentro del siguiente intervalo.

$$0 < W_v < W_{max}$$

Cálculo del peso para la válvula de impulso

Para la construcción de la válvula de impulso se utilizara Acero A-36 densidad 7860 Kg/m^3 , a continuación se detalla el peso de cada compoene de la válvula de impulso.

- Peso del pie de la válvula W_{pv} , ver figura 2.7.

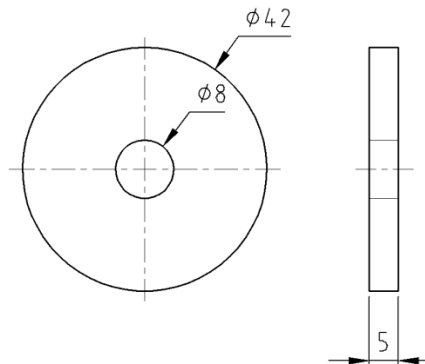


Figura 2.7. Dimensiones del pie de la válvula de impulso.

Fuente: Propia

$$W_{pv} = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_{pv} = \pi(R^2 - r^2) * e * \rho_{A-36}$$

$$W_{pv} = \pi(0.021^2 m^2 - 0.004^2 m^2) * 0.005 m * 7860 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W_{pv} = 0.052 \text{ Kg}$$

- Peso del vástago W_v

D = Diámetro del vástago (0.008 m).

l_v = Longitud del vástago (0.13 m).

$$W_v = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_v = \frac{\pi \times D^2}{4} * l_v * \rho_{A-36}$$

$$W_v = \frac{\pi \times (0.008^2 m^2)}{4} * 0.13 m * 7860 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W_v = 0.05 Kg$$

- Peso de las pesas W_p , ver figura 2.8.

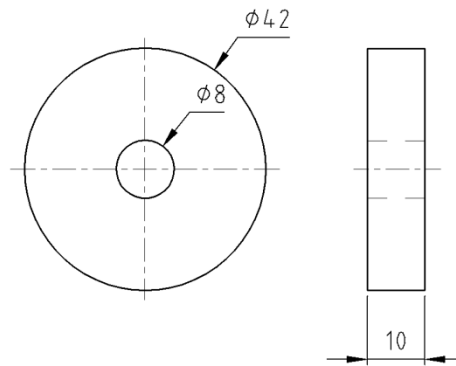


Figura 2.8. Dimensiones de la pesa.

Fuente: Propia

$$W_p = \text{Volumen} * \text{Densidad}$$

$$W_p = \pi(R^2 - r^2) * e * \rho_{A-36}$$

$$W_p = \pi(0.021^2 m^2 - 0.004^2 m^2) * 0.01 m * 7860 \frac{Kg}{m^3}$$

$$W_p = 0.10 Kg$$

Peso total de la válvula de impulso $WT_{válvula}$ con dos pesas en su vástago:

$$WT_{válvula} = W_{pv} + W_v + 2 * W_p$$

$$WT_{válvula} = 0.05 Kg + 0.05 Kg + 2 * 0.10 Kg$$

$$WT_{válvula} = 0.30 Kg$$

El peso de la válvula está dentro del rango:

$$0 < 0.30 Kg < 0.33Kg$$

2.10 Diseño de la válvula de aire (Respiradero)

El respiradero permite mantener la correcta cantidad de aire en la cámara. El aire acumulado en la cámara es absorbido lentamente por la turbulencia del agua que entra a través de la válvula de paso o bien se pierde en la tubería de descarga. Este aire debe restituirse mediante el respiradero, el mismo que debe ser calibrado de manera tal que descargue un pequeño chorro de agua con cada golpe de compresión. Si el agujero es demasiado grande, la cámara se llenara de aire y, entonces, el ariete solo bombeará aire. Si el agujero no es lo suficiente amplio y no circula suficiente aire, el ariete puede llegar a someter las válvulas a esfuerzos muy fuertes corriendo el riesgo de su rotura.

El respiradero simplemente es un agujero que se lo puede realizar con un taladro, este agujero es parcialmente obstruido por un fino pasador el cual se mueve gracias a los cambios de presión generados en la bomba. Se ubica por debajo de la válvula de suministro en el cuerpo del ariete.

Expertos recomiendan que la válvula de aire debe tener un agujero entre uno a dos milímetros ver figura 2.9.

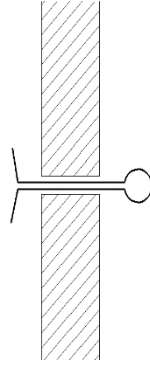


Figura 2.9. Válvula simple con horquilla.

Fuente: Propia

2.11 Diseño de la cámara de aire

La cámara de aire está situada por encima de la válvula de entrega, su función es de vital importancia para la bomba de ariete ya que es la encargada de comprimir y amortiguar el golpe de presión, permitiendo una corriente más constante a través de la tubería de entrega. 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 entrega, garantizando un flujo de agua continuo a través de la misma.

2.11.1 Capacidad de la cámara de aire

Para conocer las dimensiones de la cámara de aire se tiene que partir de la relación que dice, el volumen de agua contenida en la tubería de entrega debe ser igual al volumen de la cámara²², ver figura 2.10.

²² T.D. Jeffery; Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems. ITDG Publishing. London 1992.

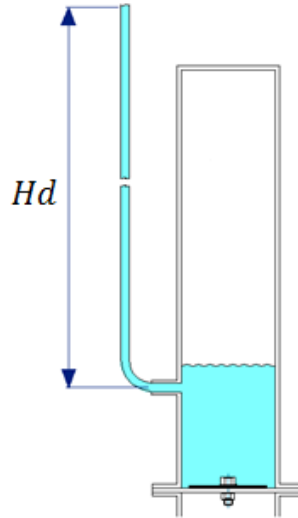


Figura 2.10. Cámara de aire.

Fuente: Propia

Cálculo del volumen de agua contenida en la tubería de entrega:

$$V_{te} = \frac{\pi * d^2}{4} * Hd$$

Dónde:

V_{te} = Volumen de agua contenida en la tubería de entrega (m^3).

d = Diámetro interno de la tubería de entrega (m).

Hd = Altura de entrega (m).

$$V_{te} = \frac{\pi * (0.016 m)^2}{4} * 6.6. m$$

$$V_{te} = 0.0013 m^3$$

Como el volumen total de la cámara de aire debe ser igual al volumen de la tubería de entrega se tiene:

$$V_{te} = V_{ca}$$

Dónde:

V_{ca} = Volumen total de la cámara de aire (m^3).

$$V_{ca} = 0.0013 m^3$$

Para la cámara de aire se utiliza una tubería de \varnothing 2 pulg, y se procede a calcular las dimensiones para de la cámara:

$$V_{ca} = \frac{\pi * (D_c)^2}{4} * h_{ca}$$

Dónde:

V_{ca} = Volumen total de la cámara de aire (m^3).

D_c = Diámetro interno de la cámara de aire (m).

h_{ca} = Altura de la cámara de aire (m).

Para el cálculo de la altura de la cámara de aire se tiene:

$$h_{ca} = \frac{V_{ca} * 4}{\pi * (D_c)^2}$$

$$h_{ca} = \frac{0.0013 m^3 * 4}{\pi * (0.053)^2}$$

$$h_{ca} = 0.59 m$$

2.11.2 Cálculo de la presión mínima y máxima en la cámara de aire

La Presión mínima en la cámara de aire se obtiene en el instante que la válvula de entrega está cerrada, el aire soporta la presión ejercida por el agua contenida en la tubería de descarga, ver figura 2.11.

$$P_1 = Hd * \gamma$$

Dónde:

P_1 = Presión mínima (Pa).

Hd = Altura de entrega (m).

γ = Peso específico del Agua (N/m^3).

$$P_1 = 6.6 \text{ m} * 9800 \frac{N}{m^3}$$

$$P_1 = 64.68 \text{ KPa} = 9.38 \text{ PSI}$$

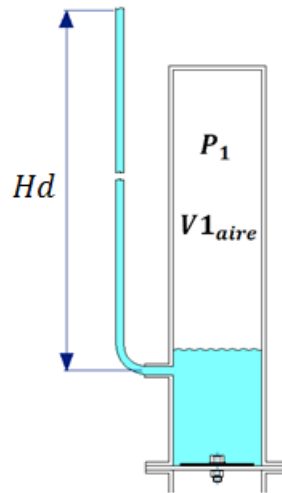


Figura 2.11. Presión mínima, válvula de entrega cerrada.

Fuente: Propia

Para el volumen inicial de agua se considera que el 30 % de la capacidad del tanque se encontrara con líquido.

El volumen total es: 0.0013 m^3

Con la consideración se tiene que el volumen inicial de agua es:

$$V_{\text{agua}} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ m}^3 * 0.3$$

$$V_{agua} = 3.9 \times 10^{-4} m^3$$

Por lo tanto el volumen de aire es:

$$V1_{aire} = V_{ca} - V_{agua}$$

Dónde:

$V1_{aire}$ = Volumen inicial de aire en la cámara (m^3).

V_{ca} = Volumen total de la cámara de aire (m^3).

V_{agua} = Volumen inicial de agua (m^3).

$$V1_{aire} = 1.3 \times 10^{-3} m^3 - 3.9 \times 10^{-4} m^3$$

$$V1_{aire} = 9.1 \times 10^{-4} m^3$$

Para determinar el volumen de aire, se tendrá que determinar la cantidad de agua que ingresa en cada golpe del ariete para ello se tiene:

- El caudal que el ariete entrega es $9.64 \times 10^{-5} m^3/s$.
- Se asume que el ariete cumple $75 \text{ ciclos}/\text{min}$

Entonces el volumen de fluido por ciclo será:

$$V_{ciclo} = \frac{q}{f}$$

Dónde:

V_{ciclo} = Volumen de agua que la bomba entrega por ciclo (m^3).

q = Caudal de entrega (m^3/s).

f = golpes por minuto del ariete (ciclos/min).

$$V_{ciclo} = \frac{9.64 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}}{75 \frac{ciclos}{min}}$$

$$V_{ciclo} = 7.712 \times 10^{-5} \frac{m^3}{ciclo}$$

El volumen de agua entregado por ciclo es $7.712 \times 10^{-5} m^3/ciclo$.

Para calcular el volumen dos en la cámara de aire se resta el volumen que ingresa por ciclo al volumen inicial de aire ver figura 2.12, ya que este volumen se comprime en cada golpe:

$$V2_{aire} = V1_{aire} - V_{ciclo}$$

Dónde:

$V2_{aire}$ = Volumen dos de aire en la cámara (m^3).

$V1_{aire}$ = Volumen inicial de aire en la cámara (m^3).

V_{ciclo} = Volumen de agua que la bomba entrega por ciclo (m^3).

$$V2_{aire} = 9.1 \times 10^{-4} m^3 - 7.71 \times 10^{-5} m^3$$

$$V2_{aire} = 8.33 \times 10^{-4} m^3$$

Para calcular la presión máxima se utiliza la ecuación 1.3;

$$P_1 * V1_{aire} = P_2 * V2_{aire}$$

$$P_2 = \frac{P_1 * V1_{aire}}{V2_{aire}}$$

$$P_2 = \frac{64.68 \text{ KPa} * 9.1 \times 10^{-4} \text{ m}^3}{8.33 \times 10^{-4} \text{ m}^3}$$

$$P_2 = 70.66 \text{ KPa} = 10.2 \text{ PSI}$$

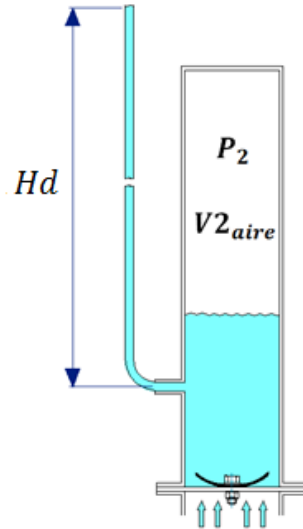


Figura 2.12. Presión máxima, válvula de entrega abierta.

Fuente: Propia

Han sido considerados todos los parámetros y cálculos matemáticos, se pretende demostrar la veracidad y calidad del capítulo de diseño con la bomba en funcionamiento.

CAPITULO III

3. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

3.1 Consideraciones generales

Para la construcción de los componentes de la bomba, se han considerado utilizar accesorios de tubería normalizados, en función a la sobrepresión existente dentro del cuerpo del ariete con el fin de garantizar la perdurabilidad y buen funcionamiento de la misma, para ello se incurre en la búsqueda de materiales adecuados y duraderos. Es muy importante que se realice la inspección detallada de los respectivos planos de construcción, revisión y preparación del material adquirido para cada etapa de construcción, de esta manera se considera fiable el seguimiento del capítulo de diseño.

El principal material del cual está constituido el cuerpo de la bomba es acero negro, accesorios de tubería que son utilizados en la industria y son capaces de soportar grandes presiones, trabajo continuo a altas temperaturas, resistentes a la corrosión de los fluidos que transportan y fáciles de soldar. Todos los elementos han sido soldados con soldadura MIG, ver figura 3.1.



Figura 3.1. Soldadura MIG.

Fuente: Propia

Los elementos a construir se detallan a continuación, ver figura 3.2.

- Cuerpo
- Cámara de aire
- Válvula de impulso
- Válvula de entrega

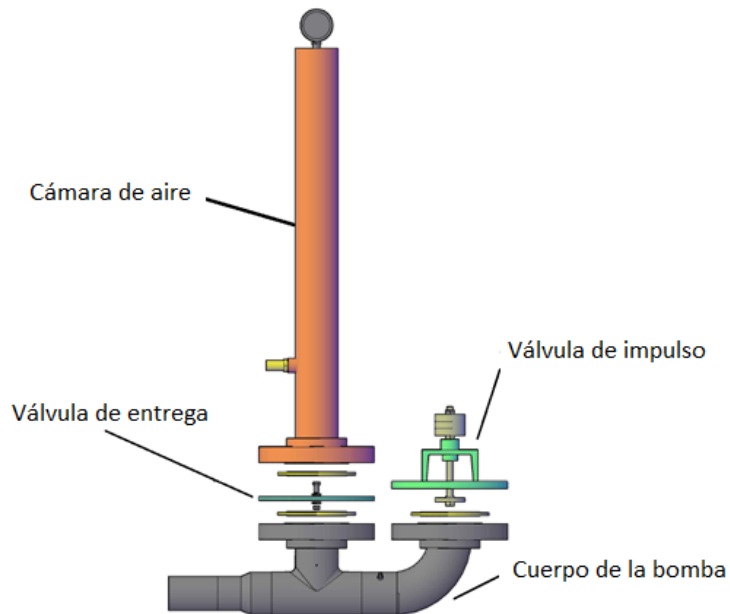


Figura 3.2. Elementos a construir para la bomba de ariete.

Fuente: Propia

A continuación se describe brevemente el proceso de construcción. Todos los planos relacionados a este procedimiento se encuentran en el Anexo G.

Los procesos a utilizarse para la construcción se detallan en la tabla 3.1:

Número	Operación	Símbolo
1	Inspección de planos	1
2	Inspección del material	2














3	Limpieza del material	
4	Corte de Material	
5	Biselado	
6	Verificar Linealidad, escuadra, y perpendicularidad	
7	Punteado	
8	Soldeo	
9	Amolado y/o esmerilado	
10	Taladrado	
11	Roscado	
12	Torneado	
13	Fresado	
14	Ensamble	
15	Recubrimiento	

Tabla 3.1. Descripción de procesos para la construcción.

Fuente: Propia

3.1.1 Construcción del cuerpo

El cuerpo del ariete es el encargado de soportar la sobrepresión por el cierre brusco de la válvula de impulso, por ello, el material debe ser resistente e indeformable con el fin de evitar pérdida de energía debido al ensanchamiento de las paredes, aprovechando dicha energía en el mayor levantamiento de cabeza bajo las mismas condiciones de operación de la bomba. Los accesorios que se utilizan serán de acero negro cedula 80 ya que dicho material cumple con las características de diseño y además el material es soldable.

El cuerpo del ariete consta de los siguientes elementos, ver tabla 3.2:

Elemento	Descripción
Reducción	De Ø 2" a Ø 1 1/2 " Cedula 80
Te	Ø 2 " Cedula 80
Codo 90°	Ø 2 " Ceduda 80
2 Bridas	Ø 2 " Clase 300
Neplo	Ø 2" long. 2 " Cedula 80
Neplo	Ø 1 1/2" long. 70 mm Cedula 80

Tabla 3.2. Elementos utilizados para la construcción del cuerpo de la bomba.

Proceso de construcción:

Una vez inspeccionado el material se procede a limpiar las esquinas que serán unidas mediante soldadura, los neplos, reducción, te y codo serán necesarios biselar las esquinas para tener una junta en condiciones óptimas, seguido de un punteado de los accesorios con el cuidado de tener todo a escuadra y centrado, se procede a soldar y finalmente a esmerilar para darle un acabado final, ver figura 3.3.

Guía de los procesos de construcción, ver tabla 3.3.

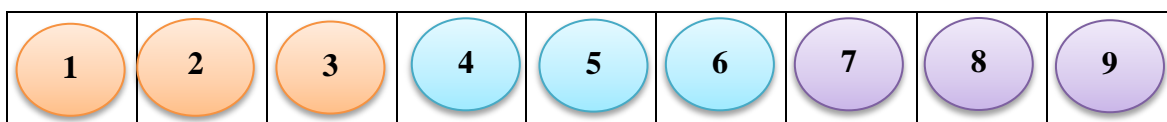


Tabla 3.3. Descripción de procesos para la construcción del cuerpo de la bomba.



Figura 3.3. Construcción cuerpo de la bomba.

3.1.2 Construcción de la cámara de aire

Básicamente la cámara de aire funciona como un tanque hidroneumático, en su interior aloja una cierta cantidad de aire y otra de agua, el aire se comprime en cada golpe para desplazar el fluido a la tubería de descarga, por ello es vital que su construcción garantice hermeticidad y resista la presión suscitada en su interior.

La cámara de aire consta de los siguientes elementos, ver tabla 3.4:

Elemento	Descripción
Tubo	Ø 2" a Cedula 80 Acero al Carbón
Brida	Ø 2 " Clase 300 Acero al Carbón
Unión	Ø 3/8" NPT

Tabla 3.4. Elementos utilizados para la construcción de la cámara de aire.

Descripción de la construcción:

El tubo será preparado mediante un biselado donde deberá unirse con la brida mediante soldadura, una vez hecha la unión se procede a soldar la tapa en la parte superior y así tener la cámara de aire sellada, además se realiza una perforación para conectar un

manómetro, para esto se tiene que perforar con una broca de \varnothing 1/4" y proceder a realizar el roscado con su respectivo machuelo.

Finalmente se realiza una perforación a la cámara de aire para soldar la unión 3/8" en concordancia a las especificaciones de los planos donde se indica la longitud y posición, donde se encontrara la unión para conectar la tubería de suministro, ver figura 3.4.

Guía de los procesos de construcción, ver tabla 3.5.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11							

Tabla 3.5. Descripción de procesos para la construcción de la cámara de aire.



Figura 3.4. Construcción cuerpo de la cámara de aire.

3.1.3 Construcción de la válvula de impulso

La válvula de impulso será la encargada de producir un cierre brusco, deteniendo el movimiento del fluido y regresar a su posición inicial ya que para ello cuenta con unas pesas que fueron analizadas en el capítulo de diseño, el asiento para esta válvula se compone por una placa con la geometría limitada por la brida, además la guía donde se desplazara el eje de la válvula, consta de una sección de perfil UPN donde se ubica un bocín, que permite que el movimiento del vástago sea estable.

La válvula de impulso consta de los siguientes elementos, ver tabla 3.6.

Elemento	Descripción
Placa	Acero A-36 160 x 160 x 10 mm
Sección de perfil	UPN 80
Bocín	Ø 3/8" NPT Bronce
Vástago	Eje Ø 1/2" long. 150 mm A-36
4 Pesas	Eje Ø 42 mm Espesor 10 mm A-36

Tabla 3.6. Elementos utilizados para la construcción de la válvula de impulso.

Descripción de la construcción:

El plato se tendrá que mecanizar en función del diámetro externo de la brida y las posiciones de los pernos, se realizara una perforación en el centro de \varnothing 38 mm para que se asiente la válvula, la sección de perfil será perforada en su centro para soldar el eje que se encuentra unido a presión con un bocín, una vez centrada la sección de perfil se soldara en la parte superior del plato, ver figura 3.5.

Guía de los procesos de construcción, ver tabla 3.7.

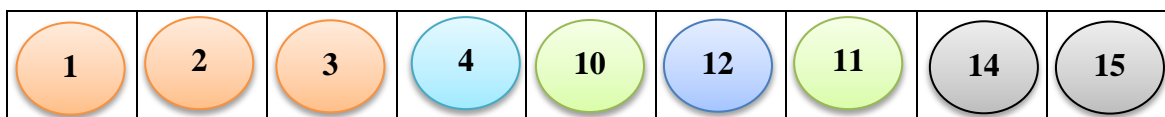


Tabla 3.7. Descripción de procesos para la construcción de la válvula de impulso.



Figura 3.5. Construcción válvula de impulso.

3.1.4 Construcción de la válvula de entrega

La válvula de entrega tendrá una geometría limitada por las dimensiones de las bridas, ya que se ubica entre el cuerpo del ariete y la cámara de aire, en definitiva las medidas a tomar en cuenta son el diámetro exterior y la ubicación de los pernos para su sujeción con el cuerpo de la bomba.

Esta válvula consta de orificios en su parte central los cuales permiten el paso del fluido y un caucho que retiene el fluido cuando se comprime el aire en la cámara.

Para la construcción de la válvula de entrega serán necesarios los siguientes elementos, ver tabla 3.8:

Elemento	Descripción
Placa	Acero A36 160 x 160 x 5 mm
Solapa	Ø 50 mm, espesor 2 mm Caucho
Perno	M6 x 1"
2 Rodelas	M6
Tuerca	M6

Tabla 3.8. Elementos utilizados para la construcción de la válvula de entrega.

Descripción de la construcción:

La placa de acero una vez marcado el diámetro exterior se procede a cortar con oxicorte, se marca las posiciones para los agujeros de $\varnothing 3/4"$ donde pasan los pernos y se corresponde a perforar, para las posiciones de los 20 agujeros de $\varnothing 6$ mm, será necesaria la ayuda de una hoja en la cual conste el dibujo de la placa a escala 1 a 1 y una vez centrada la hoja se procede a marcar para mecanizar en un taladro radial, ya que se necesita la máxima precisión debido a que las perforaciones se encuentran muy juntas, finalmente se eliminan las rebabas producto del mecanizado con una broca de $\varnothing 1/2"$. Para culminar con la válvula de impulso se colocara el caucho con el perno M6 y la válvula está lista para funcionar, ver figura 3.6.

Guía de los procesos de construcción, ver tabla 3.9.

1	2	3	4	10	9	15	14
---	---	---	---	----	---	----	----

Tabla 3.9. Descripción de procesos para la construcción de la válvula de entrega.



Figura 3.6. Construcción válvula de entrega.

3.2 Costo del proyecto

A continuación se detallan los costos involucrados en el proyecto:

- Costo de elementos en la sección de suministro
- Costo total de la bomba de ariete
- Costo en la sección de entrega
- Costo total del proyecto

3.2.1 Costo de elementos en la sección de suministro

Estos costos tienen que ver con los materiales empleados en el suministro de líquido hacia la bomba de ariete y estas detallados en la tabla 3.10.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Tanque plástico 55 Galones	1	38.19	38.19
Adaptador plástico para tanque 1 1/2"	1	7.29	7.29
Válvula de bola 1 1/2"	1	26.20	26.20
Neplo acero galvanizado \varnothing 1 1/2" x 2"	3	2.10	6.30
Universal acero galvanizado 1 1/2"	2	12.27	36.81
Codo 45° acero galvanizado 1 1/2"	2	4.14	8.21
Tubo acero galvanizado \varnothing 1 1/2" x 6 m	1	60.00	60.00
Teflón industrial	4	3.00	12.00
		Total	\$ 195.00

Tabla 3.10. Descripción del costo en la sección de suministro de líquido.

3.2.2 Costo de la Bomba de ariete

A continuación se detallan los costos involucrados en la construcción de la bomba de ariete.

- Costo Accesorios y materia prima empleados
- Costo de fabricación

3.2.2.1 Costo Accesorios y materia prima empleados

Estos costos tienen que ver con la materia prima y los elementos normalizados empleados para la construcción de la bomba de ariete y estas detallados en la tabla 3.11.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Brida 2" clase 300 Acero al Carbón	3	10.64	31.92
Codo 90° 2" Cedula 80 Acero al Carbón	1	3.24	3.24
Te 2" Cedula 80 Acero al Carbón	1	8.06	8.06
Reducción 2" a 1 1/2" Cedula 80 Acero al Carbón	1	3.13	3.13
Neplo Ø 2" x 6" Cedula 80 Acero al Carbón	1	12.32	12.32
Neplo Ø 1 1/2" x 6" Cedula 80 Acero al Carbón	1	9.40	9.40
Junta Espirometálica Ø 2" Clase 300	3	2.01	6.02
Unión NPT Ø 3/8" Acero al Carbón	1	0.47	0.47
Sección de perfil UPN 80 x 50 mm	1	2.50	2.50
Perno Ø 5/8" x 3" Acero	16	0.70	5.60
Tuerca Ø 5/8" Acero	16	0.33	11.20
Arandela Plana Ø 5/8" Acero	32	0.06	1.96
Arandela de presión 5/8" Acero	16	0.10	1.60
Perno Ø 3/8" x 1 1/2" Acero	8	0.55	8.80
Tuerca Ø 3/8" Acero	16	0.30	4.80
Arandela plana Ø 3/8" Acero	32	0.05	1.60

Arandela de presión Ø 3/8" Acero	16	0.09	1.44
Eje bronce fosfórico Ø 5/8" x 40 mm	1	2.60	2.60
Eje Acero transmisión Ø 1 3/4" x 10 mm	5	0.50	2.50
Tubo Ø 2" x 0.6 m cedula 80 Acero al Carbón	1	7.00	7.00
Placa de acero 170 x 170 x 5 mm espesor	1	7.00	7.00
Placa de acero 170 x 170 x 10 mm espesor	1	14.00	14.00
Teflón 1/2" x 12 m	1	0.47	0.45
Tapón NPT 1/4"	2	0.35	0.35
Angulo L 50 x 50 x 4 mm espesor A-36 1.5 m	1	4.00	4.00
Platina 3 mm x 0.5 m	1	5.00	5.00
Manómetro presión máxima 100 psi	1	6.05	6.05
Total			\$ 163.00

Tabla 3.11. Descripción de costos: accesorios y materia prima para la bomba.

3.2.2.2 Costo de fabricación

Este costo, tiene que ver con la mano de obra e insumos para el acabado superficial de la bomba, se detallan en la tabla 3.12.

Denominación	Costo (USD)
Mano de Obra (mecanizado de piezas y montaje)	200.00
Acabado Superficial (Pintura)	25.00
Total	\$ 225.00

Tabla 3.12. Descripción del costo de fabricación para la bomba de ariete.

3.2.2.3 Costo total de la bomba de ariete

Este costo es la suma de accesorios, materia prima y costo de fabricación de la bomba de ariete, esta detallado en la tabla 3.13.

Denominación	Costo Total (USD)
Accesorios y materia prima	163.00
Fabricación	220.00
Total	\$ 384.00

Tabla 3.13. Descripción del costo total de la bomba de ariete.

3.2.3 Costos de elementos en la sección de entrega

Estos costos tienen que ver con los materiales empleados en la entrega del líquido proveniente de la bomba de ariete y están detallados en la tabla 3.14.

Denominación	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo Total (USD)
Neplo para manguera 1/2" x 3/8" Bronce	1	4.00	4.00
Manguera plástica 1/2" x 15 m	1	14.84	14.84
Manguera plástica 1/2" x 8 m	1	7.50	7.50
Abrazadera acero inoxidable	1	0.43	0.43
Tanque plástico graduado 10 litros	1	3.00	3.00
		Total	\$ 29.77

Tabla 3.14. Descripción del costo de elementos en la sección de entrega de líquido.

3.2.4 Costo total del proyecto

El costo total para el presente proyecto se detalla a continuación en la tabla 3.15.

Denominación	Costo (USD)
Elementos sección de suministro de líquido	\$195.00
Bomba de Ariete	\$ 384.00
Elementos sección de entrega de líquido	\$ 29.77
Subtotal	\$ 608.77
Costo ingeniería 30 %	\$ 182.63
Total	\$ 791.40

Tabla 3.15. Descripción del costo total del proyecto.

Se considera el 30% del costo total de la bomba con el fin de reconocer los valores de la ingeniería utilizada.

3.3 Diagnóstico y solución de fallas

3.3.1 Resolución de problemas y la búsqueda de fallas

A continuación se presenta la tabla 3.16. que facilita la solución de los problemas y las causas producidas por el ariete.

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN
La bomba no arranca cuando se abre la válvula de impulso.	No hay suficiente agua en la tubería de suministro para dar una adecuada presión a la bomba y así cerrar la válvula de impulso	Efectuar manualmente el movimiento hasta que comience a abrir de nuevo automáticamente.
	Fuga en la tubería de suministro o en el cuerpo de la bomba evitando la acumulación de presión de suministro.	Reparar la tubería de suministro y el cuerpo de la bomba.
	Válvula de impulso no obstruye el fluido, y así evita la acumulación de presión en la cámara de aire.	Reparar válvula de impulso.
La bomba arranca hace un par de golpes rápidos y se detiene	Configuración de la válvula de impulso incorrecta.	Probar con distintas longitudes de carrera para la válvula de impulso.
	La presión de suministro insuficiente para mantener la operación.	Accionar manualmente la bomba hasta que comience a funcionar automática.

La bomba funciona de forma desigual, poco a poco y finalmente se detiene.	Cantidad de aire en la tubería de entrega.	Eliminar el aire en la tubería de entrega, accionando manualmente la válvula de impulso.
	Fugas en la tubería de entrega	Reparar la tubería de entrega.
La bomba funciona normalmente, pero se detiene después.	Si bien la tubería de entrega se llena, puede haber momentos en los que no hay retroceso de la válvula de impulso, por lo que la válvula no se vuelva a abrir.	Accione manualmente la bomba hasta que se abra de forma automática.
	Poca cantidad de fluido en el tanque de suministro, genera una velocidad insuficiente del fluido, ocasiona que la bomba se detenga	Reducir la carrera de la válvula de impulso de modo que la bomba utiliza menos agua. Compruebe que el tanque este con fluido.
La bomba funciona normalmente, pero ofrece poca o ninguna cantidad de fluido.	Válvula de entrega dañada.	Revisar el caucho, en caso de daño cambiarlo, inspeccionar que la placa de la válvula de entrega este sin obstrucciones.
	Bloqueo de Aire en el sistema de entrega.	Eliminar el aire que se encuentra en la tubería de entrega accionando manualmente la válvula de impulso

	Fugas en la tubería de entrega.	Busque las fugas y repare la tubería de entrega.
La bomba funciona normalmente, pero ofrece poca o ninguna cantidad de fluido	Fugas en la tubería de suministro o en el cuerpo de la bomba evitan el aumento de presión suficiente para abrir la válvula de entrega.	Reparar la tubería de suministro o el cuerpo de la bomba.
	No hay aire en el cámara (habrá un fuerte golpe en el cierre de la válvula de impulso).	Revisar la válvula de aire, inspeccionar que no existan fugas en la cámara de aire.

Tabla 3.16. Resolución de problemas y búsqueda de fallas.

Fuente: T.D. Jeffery; Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems. ITDG Publishing. London 1992.

3.3.2 Como afinar la bomba de ariete hidráulico

La bomba de ariete se debe afinar para bombear la máxima cantidad de agua al tanque de entrega, este procedimiento es sencillo, al poner en marcha la bomba se visualizara que el ariete bombea algo de agua cualquiera sea la fijacion de la valvula de impulso.

Para obtener la mayor cantidad agua entregada por la bomba, sera necesario ajustar el ritmo de los golpes del ariete, esto se logra variando el número de pesas y regulando la carrera de la válvula de impulso, sera obligatorio realizar diferentes mediciones de caudal de entrega y comparan los resultados obtenidos, con el objetivo de encontrar la configuración mas optima que permita bombear la máxima cantidad de líquido y asi tener un buen funcionamiento para la bomba de ariete.

3.3.3 Tareas de mantenimiento

El primordial mantenimiento en la bomba, conlleva en mantener el fluido que alimenta al ariete libre de impurezas ya que estas pueden obstruir el libre funcionamiento de las válvulas de impulso y entrega.

Las principales labores de mantenimiento son:

- Desarmar el ariete para extraer impurezas.
- Ajustar las tuercas de la valvula de impulso que se hayan aflojado.
- Cambiar el caucho de la válvula de entrega cuando este se deteriore.
- Conservar el fluido de la tubería de descarga libre de obstrucciones.

3.3.4 Cuidados ante grandes caídas de agua

Cuando una bomba trabaja con alturas de suministro mayores a 6 metros se producen fuertes vibraciones en el ariete y tubería de suministro, que pueden dañar el sistema.

Consideraciones para evitar posibles daños:

- La tubería de alimentación debe estar bien firme.
- La bomba tendra su base en un fundamento sólido.
- Si se tiene vibraciones en el cuerpo de la bomba estas seran transmitidas a la tubería de suministro y tubería de entrega, es por ello que tambien debe estar firmes.

CAPITULO IV

4. SOFTWARE E INSTRUCTIVO PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE BOMBAS DE ARIETE

Este capítulo se compone de dos partes esenciales que fueron escritas con el fin de explicar al usuario, como se desarrolló el software bajo la plataforma LabVIEW y cómo debe usarlo para optimizar tiempo y recursos.

4.1 Desarrollo del software “Ram Pump Soft V1.1.0”

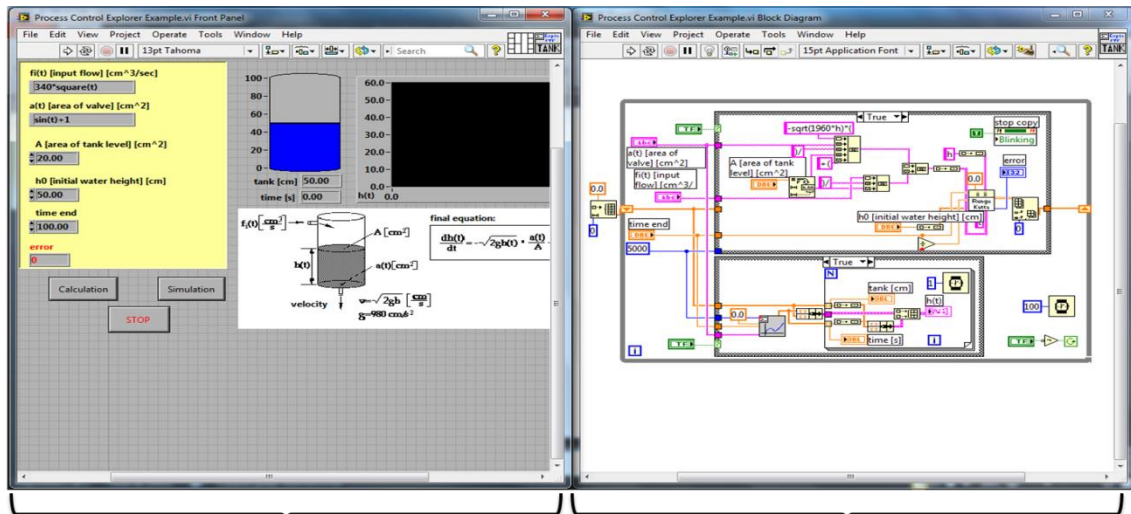
A continuación se describe el desarrollo del Software “Ram Pump Soft V1.1.0” bajo el entorno LabVIEW.

4.1.1 Introducción y metodología de programación en LabVIEW

Básicamente el ambiente de programación LabVIEW fue diseñado para facilitar y agilizar la programación de aplicaciones complejas, encontrando como solución el dibujo de los flujos de programación, facilitando su comprensión y optimizando tiempo de desarrollo. LabVIEW tiene ya pre-diseñados una gran cantidad de bloques básicos de programación que simplifica al usuario la creación de uno o varios proyectos.

LabVIEW trabaja en base a VI's, o (Virtual Instruments), que representan todo el desarrollo que se realiza.

Cada VI consta de dos partes diferenciadas: El panel frontal y el diagrama de bloques (ver Figura 4.1).



Panel frontal.- Representa la interfaz donde el usuario ingresa parámetros y observa sus resultados

Diagrama de bloques.- Contiene el código y procesamiento de los datos. Aquí se encuentran las operaciones y estructuras de programación

Figura 4.1. Panel frontal y diagrama de bloques.

Fuente: Propia

- **Panel Frontal:** El Panel Frontal es la interfaz que se utiliza para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los mismos que podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real (como van fluyendo los datos). Aquí se definen los controles e indicadores.
- **Diagrama de Bloques:** es el código propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan (el código que controla el programa).
- **Controles e Indicadores:** Son los elementos que en su mayoría conforman el panel frontal, representan las entradas (controles) y las salidas (indicadores) que el usuario tiene para ingresar datos y/o para visualizar resultados. La figura 4.2 contiene algunos de los controles e indicadores más utilizados.

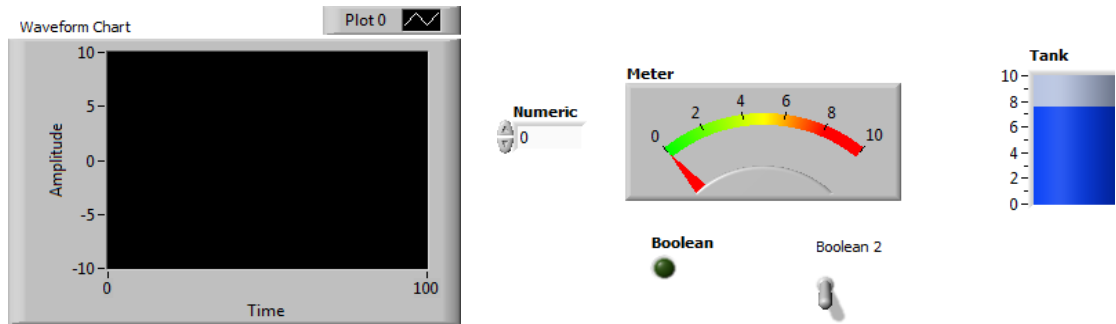


Figura 4.2. Controles e indicadores.

Fuente: Propia

De acuerdo al tipo de datos mostrados o ingresados, se puede contar con indicadores, booleanos, gráficos en el tiempo, tipo perilla, ingreso numérico, etc.

En la Figura 4.3 se muestran los controles en el panel frontal, en este el usuario puede apreciar y modificar los datos que requiera, En el diagrama de bloques se realiza el algoritmo con la información que el usuario provea, los elementos seleccionados aparecen en el diagrama de bloques para ser programados con las herramientas de operaciones y funciones. (Ver figura 4.3)

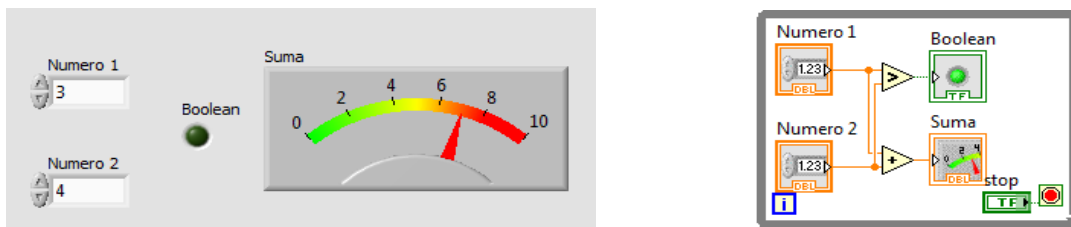


Figura 4.3. Controles en el panel frontal.

Fuente: Propia

En la figura 4.3 se aprecia un programa básico donde el panel frontal posee 2 controles y 2 indicadores, el diagrama de bloques posee las operaciones que se desea realizar con

dichos datos. En este caso, se realiza la suma de los Números 1 y 2 y por otro lado se muestra un indicador booleano para determinar el momento cuando el número 1 es mayor al número 2.

4.1.2 Desarrollo de la aplicación

La aplicación está desarrollada bajo LabVIEW 2012, la cual calcula todos los parámetros necesarios para el diseño y análisis de bombas de ariete. Para elaborar la aplicación se realiza el desarrollo de manera continua de panel frontal y del diagrama de bloques. El panel frontal corresponde a la interfaz gráfica que se muestra al usuario es decir donde se ingresan los datos y se muestran gráficas y resultados. En el diagrama de bloques se programa con los datos ingresados en el panel frontal, los cálculos y análisis necesarios para desplegar los resultados y gráficas requeridos.

- **Desarrollo del panel frontal**

Para la aplicación se ha colocado en el panel frontal un Tab container que permite dividir en cuatro pestañas a los controles e indicadores que interactúan con el usuario. LabVIEW permite arrastrar y ubicar de manera sencilla estos controles e indicadores, es por ello que para el diseño del panel frontal se eligieron los más adecuados para recibir datos y desplegar resultados.

Todos los elementos del panel frontal generan en el diagrama de bloques los indicadores y controles necesarios para realizar los cálculos y procesos requeridos según el capítulo dos.

El programa está desarrollado de manera modular, es decir cada proceso de cálculo y diseño independiente es llevado a cabo por una subrutina (SUBVI) el cual contiene código con operaciones matemáticas y funciones que determinen cada acción que el programa realiza.

Los cálculos que realiza el código fuente de la aplicación son:

- Cálculo de la altura de suministro
- Cálculo de la relación L/D
- Cálculo de la sobrepresión.
- El cálculo de la celeridad,
- Código para seleccionar el tipo de brida.
- Criterios para la selección de los componentes de la válvula de impulso y entrega.
- Cálculo de la velocidad.
- Cálculo del caudal.

El código realiza las operaciones no dependientes de manera paralela, representándose por un bloque, y las funciones y operaciones consecutivas relacionadas con un cable que lleva los datos.

Es decir, el bloque “cálculo de celeridad” contiene todas las operaciones matemáticas, utilizando las entradas necesarias para ello, y entrega los resultados para cálculos y análisis posteriores.

A continuación se presenta el diagrama de bloques general de la aplicación.

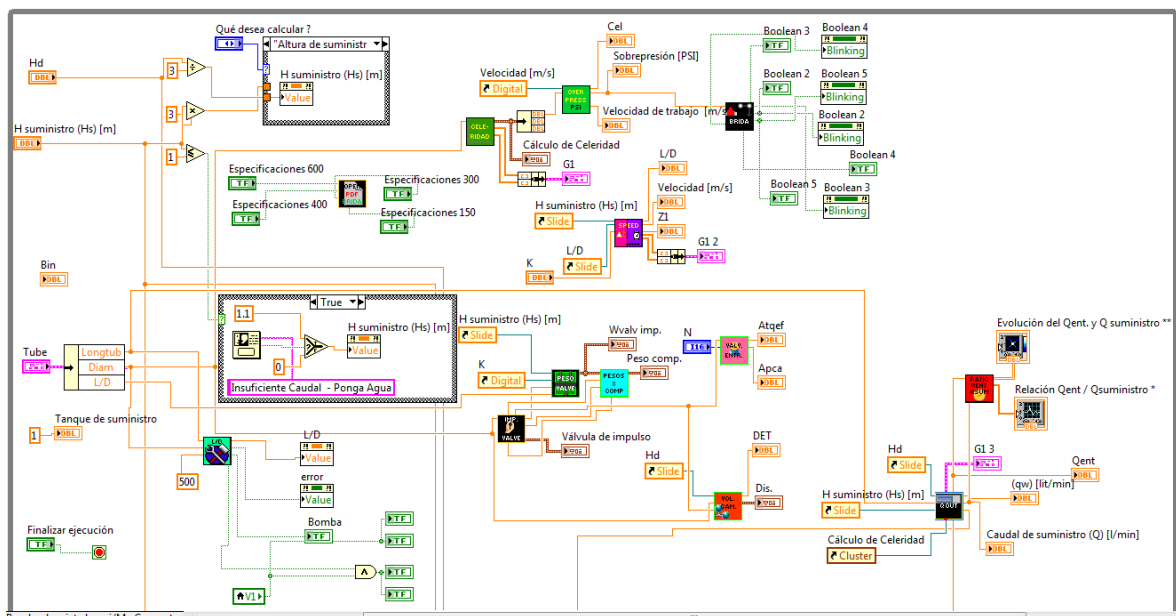


Figura 4.4. Controles en el panel frontal.

Cada bloque representa el cálculo de una etapa del diseño de la bomba de ariete. Por ejemplo el bloque llamado “CELERIDAD” contiene el siguiente código:

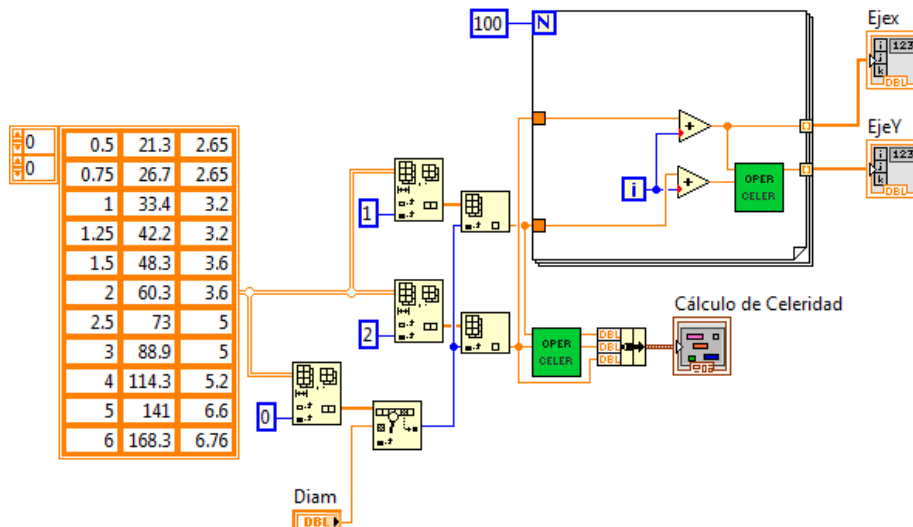


Figura 4.5. Diagrama de bloques (Celeridad).

Fuente: Propia

En este código se toman los datos constantes para cada valor de tubería correspondiente y se aplica el código que contiene el bloque “OPER CELER” el cual contiene lo que se muestra en el grafico 4.6.

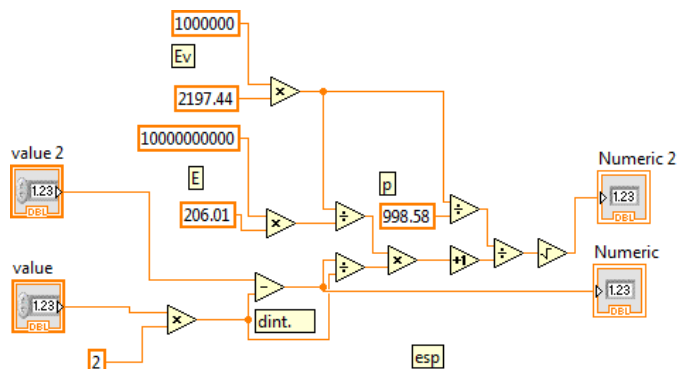


Figura 4.6. Diagrama de bloques (OPER CELER).

Fuente: Propia

En este caso se realizan las operaciones matemáticas correspondientes a la siguiente fórmula:

$$C = \sqrt{\frac{\frac{E \cdot v}{\rho}}{1 + \left(\frac{E \cdot v}{E}\right) \left(\frac{D}{v}\right)}}$$

Tomando los datos ingresados por el usuario en los controles respectivos, y determinando el correspondiente valor de celeridad.

Este proceso es típico en la programación y se realiza para el cálculo de cada parámetro de la bomba, es decir se crea un bloque que contiene la rutina de operaciones matemáticas correspondientes para cada proceso. Normalmente este conjunto de operaciones son básicas en las matemáticas; solo en el caso de gráficas y proyecciones es necesario añadir funciones de estadística y de estimación que LabVIEW provee para este tipo de análisis.

Existen otras operaciones, que no se realizan dentro de bloques especiales, esto es debido a que son operaciones cortas sin mayor complejidad. En el código se observa el cálculo de la altura de suministro y entrega, los cuales se hacen dentro del diagrama de bloques principal.

4.1.3 Ejecución de tareas dependientes e independientes

Existen procesos, que se realizan de manera independiente en el programa, por ejemplo la siguiente porción de código, ver figura 4.7:

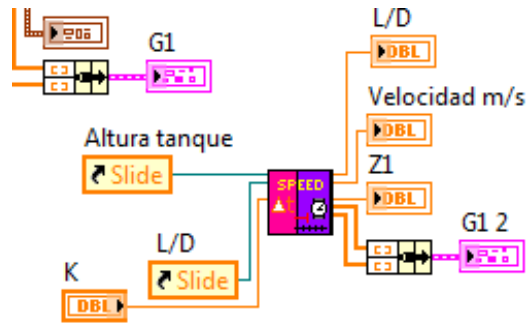


Figura 4.7. Diagrama de bloques (SPEED).

Fuente: Propia

En este caso el proceso se realiza de manera paralela e independiente, tomando entradas ya conocidas y resultando en indicadores numéricos y tipo clúster para gráficos de diversos tipos.

Sin embargo al observar el código en su conjunto vemos la interdependencia que existe entre los bloques y entre ciertas operaciones; tal como se muestra en la figura 4.8:

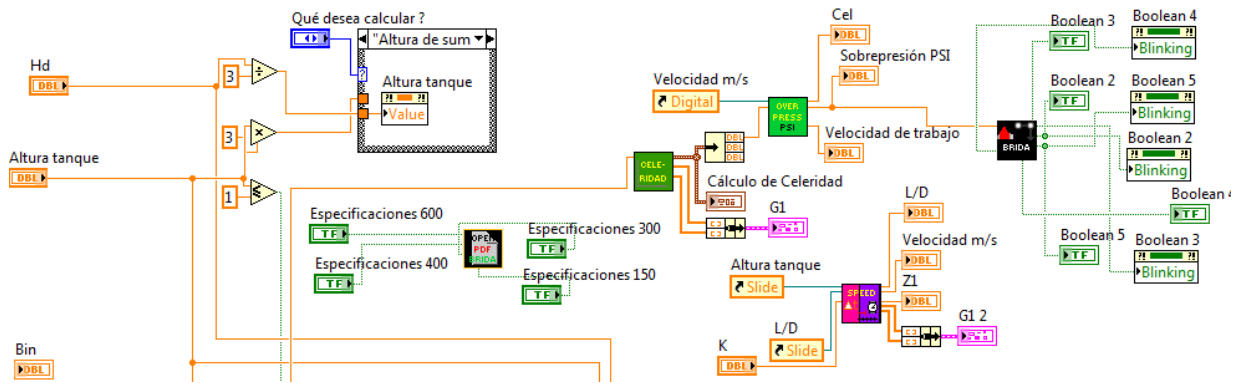


Figura 4.8. Parte del Diagrama de bloques.

Fuente: Propia

Se Observa claramente como en algunos bloques se trabaja con los datos provenientes de SUBVIS anteriores y en otros casos trabajan de manera aislada tal como el “OPEN

PDF” que toma los datos de los controles de especificaciones y despliega el archivo pdf de especificaciones.

4.1.4 Relación de programación diagrama de bloques – panel frontal

Como se explica al inicio de esta sección, para programar bajo este ambiente se diseña un código para el proceso de los parámetros y un panel frontal que contiene la representación de los valores de ingreso y salida mediante interfaz de usuario.

En el panel frontal se ubican: perillas, cuadros de diálogo, cuadros de texto, indicadores numéricos, gráficos xy, gráficos 3D, entre otros.

La correspondencia entre panel frontal y diagrama de bloques se da para todos los elementos y permite la comunicación interna para que el procesamiento sea desplegable y exista la conexión de los datos ingresados por el usuario y la aplicación.

A pesar de que el panel frontal es único y está dividido en pestañas mediante un “Tab container”, el diagrama de bloques sí es múltiple, dado que algunos bloques contienen dentro de sí a las operaciones que realizan.

La correspondencia de controles e indicadores se ilustra en la Figura 4.9:

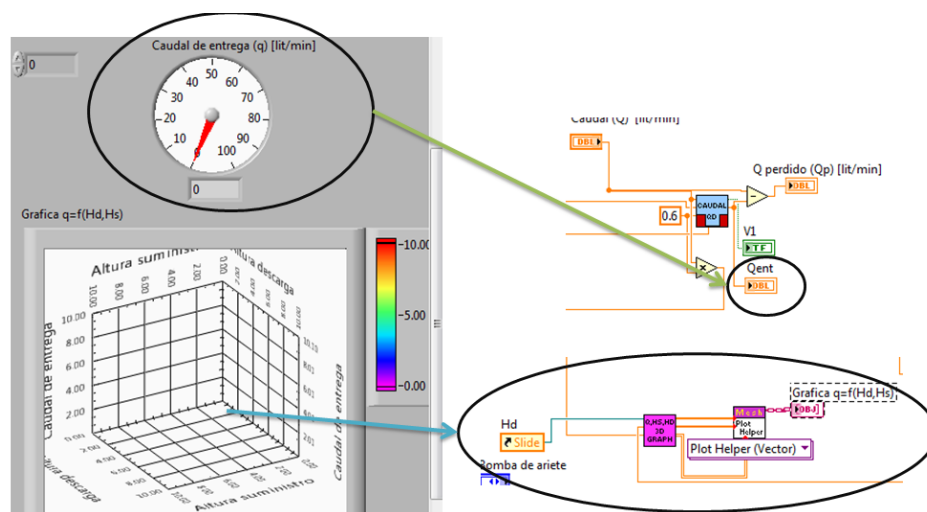


Figura 4.9. Correspondencia de controles e indicadores.

En la figura 4.10, se exponen dos de los casos donde los indicadores están representados en el diagrama de bloques por sus respectivos íconos que en este caso es de salida. Y por lo tanto a estos controles se les asigna valor.

4.1.5 Diseño y desarrollo del panel frontal

El panel frontal está diseñado de manera que el usuario tenga una experiencia amigable de uso y pueda percibir e introducir los datos de manera cómoda y eficiente. Dado que para este caso de la bomba de ariete existen más de 20 parámetros a evaluar conviene usar herramientas organizadas y estructuradas de programación para ubicar todos los tipos de controles e indicadores que LabVIEW ofrece.

EL diseño e implementación del panel frontal, se basó en una primera estructuración de las tareas a realizar, donde se introdujo una herramienta para dividir en varias pestañas a las siguientes funciones:

- Condiciones generales: en esta pestaña se han ubicado controles bastante gráficos para que el diseñador comprenda fácilmente los parámetros que debe ingresar y de manera preliminar evalué las condiciones mecánicas para el funcionamiento de la bomba. En esta pestaña se ha ubicado un gráfico 3D que representa los principales parámetros de la bomba así como los valores más importantes que se deben elegir para el diseño.
- Diseño: en esta parte del panel frontal se ubicó indicadores numéricos para los parámetros de diseño y un par de gráficas XY para estimar y proyectar los valores de la bomba en valores futuros simulados.
- Pestañas de resultados y gráficas: Las subsiguientes pestañas, contienen el resultado de los cálculos y análisis realizados previamente. En estos se utiliza de manera especial los cuadros numéricos y los “clusters” para agrupar los resultados según a que parte del diseño correspondan. Existe también en estas pestañas la posibilidad de interactuar con otros archivos, tal es el caso de las especificaciones de las bridas de acuerdo a los cálculos de celeridad. Aquí el

usuario tendrá acceso a varios archivos PDF con las especificaciones técnicas correspondientes.

4.1.6 Agrupación de VI's concatenación de tareas

En secciones anteriores se menciona como se han dividido los cálculos y análisis de manera que las tareas se vayan cumpliendo en diferentes Instrumentos Virtuales (VI's) y ellos entreguen o reciban datos entre sí para los resultados finales.

Dentro de la programación además de VI's se crearon controles y librerías propias del software que permiten agrupar aquellos elementos que sirven de base para el funcionamiento de cada VI o subrutina del programa.

La forma como el total de los elementos se agrupa es mediante la creación de un proyecto de LabVIEW y se usa normalmente cuando se programan 2 o más VI's. A continuación se muestra la ventana del presente proyecto y todos los elementos que sobre este se han creado. Ver figura 4.10.

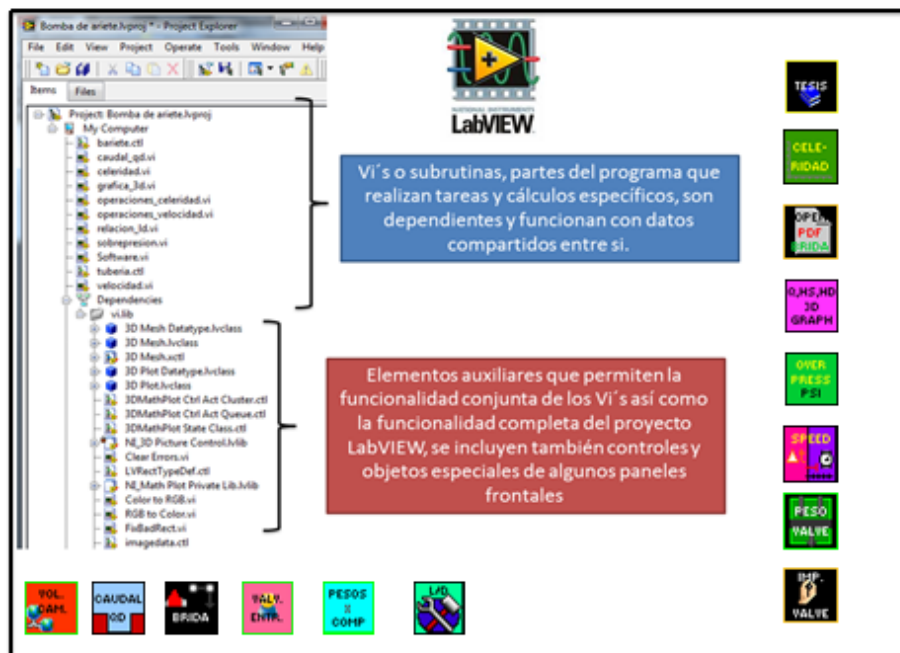


Figura 4.10. Agrupación de VI's concatenación de tareas.

Fuente: Propia

4.1.7 Ejecución, depuración y puesta en marcha del programa ejecutable

Una vez abordados los temas de la metodología y la estructura de programación utilizada en el presente software, corresponde analizar los procedimientos posteriores para que el programa quede completamente funcional, para llegar a este objetivo se definen las siguientes etapas.

1. Descripción del algoritmo de solución del problema.
2. Programación gráfica de las operaciones del algoritmo.
3. Ejecución en el compilador.
4. Depuración de lógica y de sintaxis de programación
5. Ensamblado y generación del ejecutable.
6. Puesta en marcha del software “Ram Pump soft v1.1.0”

Los pasos del 1 al 3 son abordados repetidamente durante el desarrollo mismo de la aplicación, el cual ya se explicó en las secciones anteriores. Los pasos 4, 5 y 6 se explican a continuación.

Depuración de lógica y sintaxis: Comprende añadir y corregir funcionalidades cuyo desempeño ha sido comprobado durante el desarrollo de la aplicación. En esta etapa no se deben agregar pasos al algoritmo, porque significaría regresar al inicio del proceso de desarrollo. En este caso caben operaciones tales como: aumentar tamaños de gráficas, cambiar precisión en valores dobles, incrementar gráficas con valores y resultados ya disponibles, etc.

Ensamblado y generación del ejecutable: Una vez que se ha decidido marcar al programa como “final”, es hora de que el proyecto (VI’s y elementos adicionales) se encapsule en un programa que se pueda instalar en cualquier computador con ambiente Windows. En esta etapa corresponde decidir y definir: ícono de inicio, ocultar o mostrar funcionalidades de “Run time” de LabVIEW, etc.

Puesta en marcha: Corresponde a la instalación y funcionamiento mismo del programa, de preferencia en una nueva computadora de manera que se comprueba que el programa

es funcional y sus resultados son exitosos para el usuario. En esta etapa se considera lo siguiente: compatibilidad de uso de la aplicación por cualquier usuario (leer el instructivo del usuario), que todas las funciones y cálculos estén disponibles y que todos los análisis y resultados correspondan a los ya comprobados en los pasos 1 al 5.

4.1.8 Descripción global de la aplicación funcional para el diseño de bombas de ariete

En esta sección se analizará como convergen los siguientes elementos.

- Instructivo
- Descripción del código fuente
- Procedimiento de consolidación de la aplicación

A continuación se muestra el esquema donde se observa cómo se relacionan los elementos que consolidan la aplicación funcional ver figura 4.11.

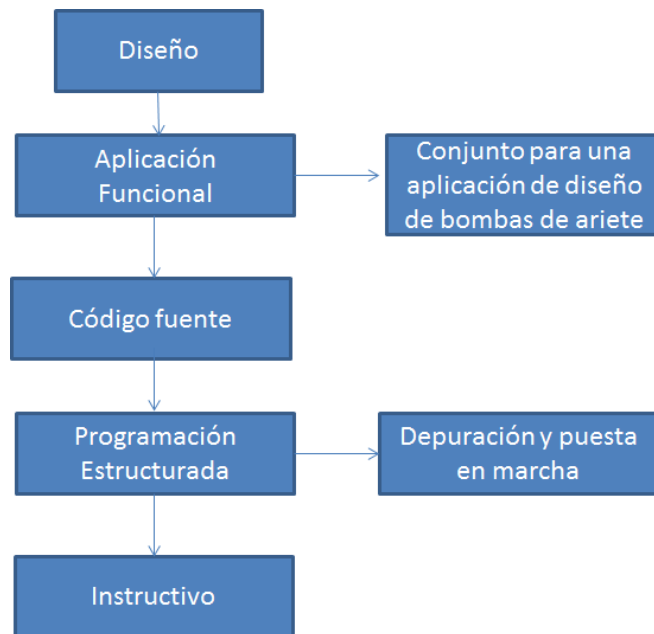


Figura 4.11. Esquema de la aplicación funcional.

Fuente: Propia

El objetivo fundamental es que el software sea una herramienta de diseño, por lo tanto fue necesario concatenar varios elementos para llegar a generar una aplicación realmente funcional que sirva para el diseño y construcción de bombas de ariete.

Esta aplicación funcional se compone de los elementos representados en el esquema de la figura 4.11. El código fuente representa el algoritmo implementado en el software, y la programación estructurada corresponde a la consolidación de todos los elementos anteriormente mencionados para trasladarse desde el diseño matemático hasta el software desarrollado. El instructivo corresponde a la información que necesita el operador del programa para el diseño de la bomba.

4.2 Instructivo de procedimiento para realizar un ariete hidráulico

4.2.1 Introducción

Los textos instructivos tienen el propósito de orientar los procedimientos en forma detallada, clara y precisa para realizar alguna actividad ya sea simple o compleja. En algunas ocasiones indican, además, los materiales que se requieren para lograr algún determinado objetivo que se desee o se necesite hacer.

Dichos textos guían sobre cómo accionar algún aparato o sistema como por ejemplo: manuales de uso de tecnologías, guías de reparación de artefactos, instructivos de puesta en marcha de máquinas, etc. Algunos explican cómo elaborar algo a partir del seguimiento de instrucciones utilizando ciertos elementos, dividiéndose el texto en la lista de materiales requeridos y el procedimiento en sí.

4.2.2 Características principales

- Requiere de un formato especial y característico.
- Desarrollo de procedimientos compuestos por pasos detallados que deben cumplirse para conseguir un resultado. (por lo general son secuencias fijas pero, a veces, es posible hacer variaciones).

- Lenguaje claro, directo y lineal.
- Utiliza marcas gráficas como números, asteriscos o guiones para diferenciar o secuenciar la serie de pasos.
- Puede acompañarse con gráficos, ilustraciones y/o dibujos, según el tipo de texto instructivo a desarrollar.

4.2.3 Instructivo del software “Ram Pump Soft v1.1.0”

El presente instructivo describe el manejo del software “Ram Pump Soft v1.1.0”, detalla las funciones que este ofrece y presenta una guía paso a paso de las acciones que puede realizar el usuario. El software está destinado a establecer procedimientos operativos definidos, introducir variables controladas para facilitar el diseño y construcción de una bomba de ariete, garantizando de esta manera la viabilidad del proyecto.

4.2.4 Descripción del software “Ram Pump Soft v1.1.0”

Este software es una herramienta de fácil manejo, con una interfaz gráfica que permite diseñar bombas de ariete de diversa capacidad con elementos normalizados y de fácil adquisición. Esta aplicación fue diseñada para trabajar con variables principales determinadas y parámetros de limitaciones.

El software fue creado con la plataforma LabVIEW, que tiene la ventaja de brindar al usuario un ambiente de programación gráfica, además cuenta con todas las herramientas necesarias de avanzada que permiten crear graficas 2D y 3D las cuales ayudan a interpretar de mejor manera los fenómenos físicos involucrados, brinda la capacidad al usuario de percibir el funcionamiento estimado de la bomba y permite conocer los parámetros internos para orientar la construcción mecánica.

Esta aplicación está dirigida a personal técnico con conocimientos de mecánica de fluidos, sin embargo no es necesario dominar herramientas de programación ni software avanzado.

4.2.5 Requisitos

Esta aplicación es un programa desarrollado en LabVIEW, pero compactado en un ejecutable que es capaz de funcionar en cualquier ordenador sin necesidad de instalar LabVIEW. Por lo que sus requisitos mínimos de instalación son los que se detallan en la tabla 4.1.

Tipo	Requisitos
Sistema Operativo	Windows Server 2003, Windows Server 2008, Windows XP, Windows Vista, Windows 7
Procesador	Mínimo: Pentium a 400 MHz o equivalente Recomendado: Pentium a 1 GHz o superior
Memoria RAM	Mínimo: 96 MB Recomendado: 256 MB o superior
Espacio en Disco	Mínimo: 100 MB
Pantalla	Mínimo: 800 x 600, 256 colores Recomendado: color de alta densidad de 1024 x 768, 32 bits

Tabla 4. 1 Requisitos de instalación para “Ram Pump Soft v1.1.0”

Fuente: Propia

4.2.6 Funcionamiento

4.2.7 Ventana inicial

Al ejecutar el programa lo primero que se observa es la ventana inicial de la aplicación cuyos elementos se describen en la figura 1.12.

El programa se compone de cuatro pestañas, las cuales despliegan opciones consecutivas para la selección de elementos, cálculo de componentes internos de la bomba, y una ventana que despliega graficas cuya función es brindar al usuario una perspectiva más directa de cómo se relacionan las variables consideradas.

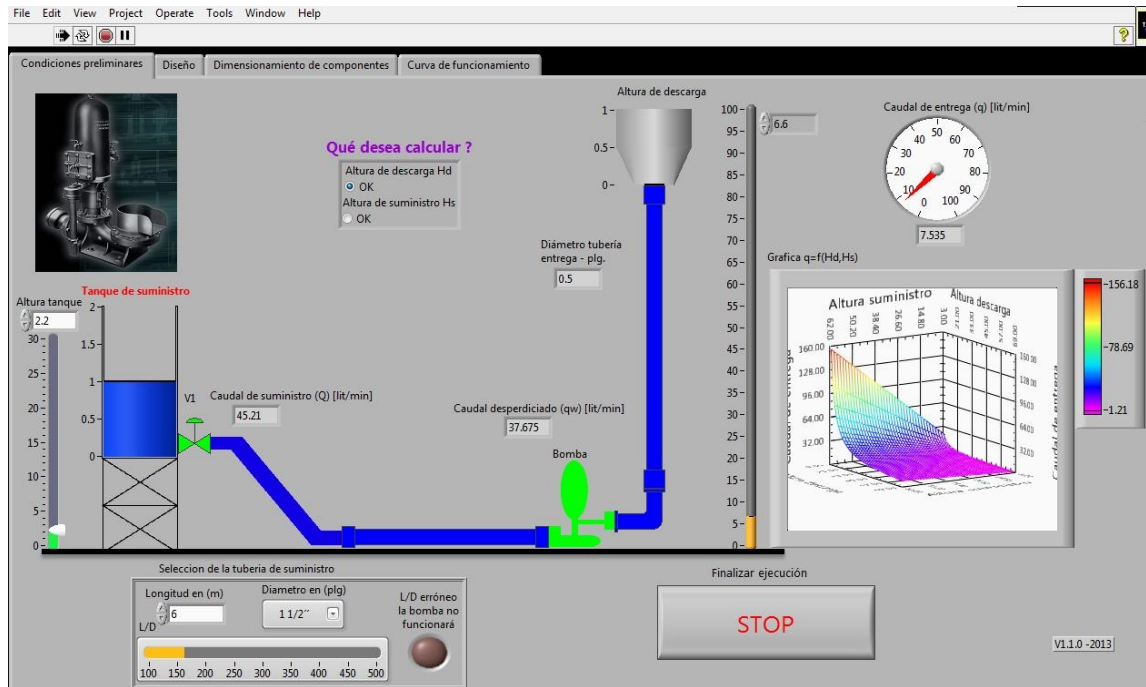


Figura 4.12. Ventana Inicial.

Fuente: Propia

1.- Barra de herramientas: presenta el nombre de la aplicación “Ram Pump Soft, su versión (1.0)” y permite realizar operaciones generales sobre los cálculos y simulaciones realizadas por el programa.

2.- Pestaña inicial “Condiciones preliminares”

La aplicación realiza la pregunta ¿Qué desea calcular? al usuario, el mismo que debe elegir entre dos opciones, Altura de descarga Hd y Altura de suministro Hs.

- **Si el usuario decide calcular Hd (m)**, deberá manipular el control ubicado en la parte izquierda de la ventana llamado Altura tanque.

- **Si el usuario decide calcular Hs (m)**, deberá manipular el control ubicado en la parte derecha de la ventana con el nombre de altura de descarga.

En ambos casos el programa calcula Hd ó Hs, respectivamente cambiando el valor de los indicadores numéricos.

A continuación los siguientes campos deben ser llenados:

- **Selección de la tubería de suministro:** En el “clúster” se encuentran los siguientes campos numéricos:
 - Longitud en metros (m). Este campo será llenado de acuerdo al espacio físico que se disponga.
 - Diámetro en pulgadas (pulg). Menú desplegable que contiene diámetros estandarizados de tuberías comerciales.

Una vez llenado estos campos, el programa calcula la relación L/D reflejada en el indicador tipo barra horizontal (observar que se cumpla la condición técnica: $150 \leq L/D \leq 500$).

Ya que se han llenado todos los datos el programa calcula internamente los siguientes parámetros.

- Caudal de suministro (Q) (l/min): Expresa el caudal que se tendrá en la tubería de suministro en base a sus dimensiones y a la altura de suministro.
- Diámetro tubería de entrega en pulgadas (pulg): Indica el diámetro aconsejado de acuerdo a la tubería de suministro seleccionada.

- Caudal desperdiciado (Qp) en litros sobre minuto (l/min): Expresa el caudal perdido por la bomba de ariete.
- Caudal de entrega (q) en litros sobre minuto (l/min) Aquí se observa la cantidad de líquido que va a llegar en el tanque de entrega.
- Grafica Caudal de suministro en función de la altura de descarga y la altura de suministro $q = f(H_d, H_s)$: Es una gráfica tres dimensiones que permite observar los parámetros en un cuadro de malla.

3.- Pestaña “Diseño”

En esta pestaña se encuentran los factores importantes para el dimensionamiento de los componentes que son: celeridad, velocidad y sobrepresión. El detalle de cada uno se muestra a continuación, ver figura 4.13.

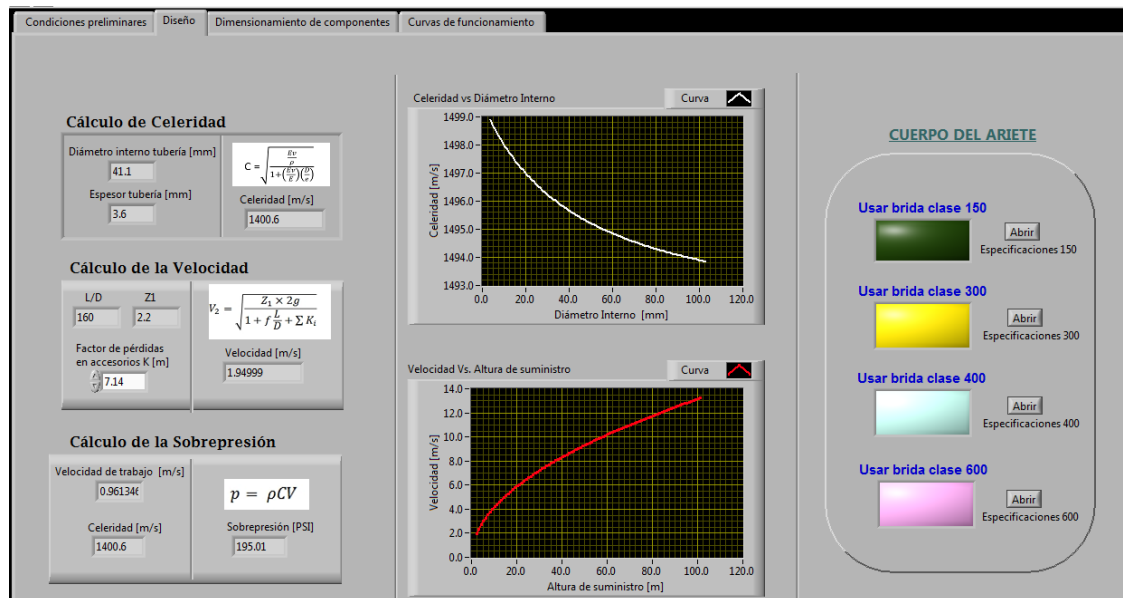


Figura 4.13. Pestaña de Diseño.

Fuente: Propia

- **Cálculo de la celeridad.-** Todos los datos ingresados al software se concatenan y actualizan con sus respectivas variables, por lo que los valores necesarios para calcular la celeridad dependen directamente de los datos iniciales que fueron ingresados. El programa calcula internamente los datos dando como resultado la velocidad de propagación de onda (celeridad). Para este cálculo no se deben ingresar datos adicionales.
- **Cálculo de la velocidad.-** Para el cálculo de la velocidad se debe ingresar el parámetro k, el mismo que depende de la cantidad de accesorios de tubería que tenga el usuario en la parte de suministro.
- **Cálculo de la sobrepresión.-** Este indicador expresa la sobrepresión existente dentro del ariete. Nótese, que esta presión es de diseño por lo tanto no podrá ser medida ni verificada en la práctica ya que toda la presión acumulada se desfoga de manera instantánea al atravesar las válvulas, y la cámara de aire que funciona como un mitigador del golpe de ariete producido.
- **Gráfica Celeridad vs Diámetro Interno.-** En este gráfico se expresa la variación de la celeridad en función del diámetro interno de la tubería. Para los valores de celeridad el programa parte del valor calculado en el indicador correspondiente y proyecta valores mayores para observar el comportamiento del diámetro en valores hipotéticos.
- **Gráfica Velocidad Vs. Altura de suministro.-** En este gráfico se expresa la variación de la velocidad del fluido en función de la altura de suministro, como dato inicial el programa toma la velocidad calculada y proyecta valores mayores para ilustrar de mejor manera la gráfica.
- **Indicadores de elección de bridas.-** Los indicadores se encienden y apagan mostrando al usuario las bridas que debe adquirir para la posterior construcción de la bomba. Al dar clic en el botón abrir junto al indicador correspondiente, se despliega las especificaciones técnicas respectivas de la clase de brida a utilizar.

4.- Pestaña de Dimensionamiento de componentes

La pestaña de Dimensionamiento de componentes detalla las medidas de los elementos internos de la bomba de ariete, orientando de forma precisa la construcción de la misma. Los elementos internos son los siguientes y se detallan a continuación: Válvula de impulso con todas sus partes, válvula de entrega, y cámara de aire, ver figura 4.14.

The screenshot displays the 'Dimensionamiento de componentes' (Component Sizing) tab. It is divided into several sections:

- Válvula de impulso (Impulse Valve):** Contains input fields for:
 - Diámetro del cuerpo del Ariete [plg]: 2
 - Diámetro de la válvula de impulso [plg]: 1.65
 - Diámetro del orificio del asiento de la válvula: 0.0358
 - Espesor del pie de la válvula [m]: 0.0050
 - Diámetro del vástago de la válvula de imp: 0.0082
 - Longitud del vástago [m]: 0.1305
 - Carrera de la válvula [m]: 0.01196
- Peso de la válvula de impulso (Impulse Valve Weight):** Shows the calculation:

$$W_{max} = \frac{C_a * A_v * \rho * H_s}{M}$$
 with the condition $0 < W_v < W_{max}$. The resulting 'Peso máximo (Wmax) [Rejo de trabajo (Wv)]' is 0.318919. Other values include Coeficiente de arrastre (Ca) = 1.17, Area sección transversal (Av) = 0.001379, and Sumatoria de pérdidas totales (M) = 10.34.
- Peso por componente de la válvula Kg (Component Weight):** Lists:
 - Peso del vástago [kg]: 0.0553235
 - Peso del pie de la válvula [kg]: 0.0544506
 - Peso de las pesas [kg]: 0.209145
 - Peso total [kg]: 0.318919
- Diseño de la válvula de entrega (Delivery Valve Design):** Includes:
 - Número de Agujeros: 0
 - Área total que atraviesa el fluido [m^2]: 0.00081032
 - Área de cada agujero [m^2]: Inf
- Diseño de la cámara de aire (Air Chamber Design):** Includes:
 - Altura de cámara de aire [m]: 0.59462
 - Volumen de agua [m^3]: 0.0003885
 - Volumen de la cámara aire [m^3]: 0.0012952
- Diagram:** A schematic of the pump assembly with labels: CÁMARA DE AIRE, VÁLVULA DE ENTREGA, VÁLVULA DE IMPULSO, and CUERPO DE LA BOMBA. A secondary diagram shows a vertical pipe with height Hd and a chamber labeled P1 and V1 ariete.

Figura 4.14. Pestaña de Dimensionamiento de componentes.

Fuente: Propia

- **Válvula de impulso.-** El clúster de dimensionamiento de la válvula de impulso se compone de indicadores que expresan las medidas de la geometría de la válvula, y el cuerpo de la misma, estos indicadores muestran el cálculo realizado con los datos previamente ingresados.
 - Diámetro del cuerpo del Ariete

- Diámetro de la válvula de impulso
 - Diámetro del orificio del asiento de la válvula
 - Espesor del pie de la válvula
 - Diámetro del vástago de la válvula de impulso
 - Longitud del vástago
 - Carrera de la válvula
- **Válvula de entrega.-** Esta válvula es una placa circular perforada, por lo tanto se incluye un control donde el usuario puede ingresar el número estimado de agujeros, además cuenta con dos indicadores que expresan el Área total que atraviesa el fluido en (m^2) y el Área de cada agujero en (m^2).
 - **Cámara de aire.-** Se compone de tres indicadores. Altura de cámara de aire en m, Volumen de agua y Volumen total de la misma.

La bomba de ariete utiliza una configuración de elementos para su construcción de fácil adquisición que ya está fabricado y se los dimensiona en base a diámetros de tubería y a presiones internas. Accesorios de tubería y uniones bridadas configuran el cuerpo del ariete. Por lo que las necesidades propuestas y los cálculos realizados serán los que determinen las dimensiones de la bomba. Esto limita, facilita y agiliza el diseño haciendo mucho más accesible esta tecnología para áreas rurales o campesinas.

CAPITULO V

5. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Introducción

Se ha diseñado, construido y elaborado un software de dimensionamiento en base a las variables de entrada y salida del ariete hidráulico en los capítulos anteriores, ahora se pretende comprobar que los datos teóricos obtenidos mediante los cálculos realizados se relacionen con los datos obtenidos mediante las mediciones efectuadas.

Las pruebas se realizarán en un espacio abierto que ofrezca la posibilidad de medir alturas, caudal de entrega, caudal de suministro y caudal desperdiciado. Se utilizaran instrumentos de medición convencionales de acuerdo a la disponibilidad como son: manómetros, recipientes apropiados para medir caudal, cronometro, flexómetro, calibrador, y lo más importante ingenio.

No es indispensable en esta clase de equipos una alta precisión en la medida de los resultados por su naturaleza de funcionamiento.

A continuación se tabulan todos los datos obtenidos de las pruebas para interpretarlos y graficarlos.

5.2 Resultados e interpretación de las pruebas y gráficas de funcionamiento.

Los valores calculados son obtenidos mediante todo el desarrollo del diseño que se efectuó en el capítulo dos, considerando una altura de suministro de 2.2 m. En el siguiente cuadro se comparan los valores calculados versus los valores obtenidos en la puesta en marcha de la bomba de ariete, en base a los parámetros de diseño.

En la tabla 5.1 se encuentran todos los valores calculados y obtenidos en la primera prueba de funcionamiento.

PRUEBA	VALOR CALCULADO		VALOR OBTENIDO	
Altura de Suministro	2.2	m	2.2	m
Altura de Entrega	6.6	m	6.6	m
Caudal de Suministro	33.48	l/min	45	l/min
Caudal de Entrega	5.58	l/min	7.2	l/min
Caudal Desechado	27.9	l/min	37.8	l/min
Rendimiento	60	%	48	%
Presión 1 en la cámara de aire	9.4	psi	9	psi
Presión 2 en la cámara de aire	10.3	psi	13	psi

Tabla 5.1. Valores obtenidos con relación a valores calculados.

A continuación se procede otra prueba variando los parámetros con respecto al diseño inicial.

Los datos que se utilizaron para elaborar las gráficas fueron obtenidos y tabulados experimentalmente con la bomba trabajando a cuatro diferentes alturas de descarga, se modificó la carrera de la válvula de impulso junto con las pesas con el fin de variar la cantidad de ciclos por minuto para observar el comportamiento del ariete y determinar cuál configuración con respecto a la carrera y las pesas da como resultado mayor caudal entregado para cada altura de entrega.

Datos de las pruebas de funcionamiento con la variación de altura de entrega, carrera y número de pesas de la válvula de impulso, la altura de suministro se mantiene constante con un valor de 2.2 m.

5.3 Pruebas de funcionamiento

Prueba 1

En la tabla 5.2 se presentan los valores obtenidos con una altura de suministro de 2.2 m, altura de entrega de 6.6 m, variación de la carrera y el número de pesas de la válvula de impulso.

Altura de entrega (m)	Carrera (m)	Número de pesas	Caudal de entrega (l/min)	Ciclos (golpes/min)	Caudal desechado (l/min)	Rendimiento (%)	Potencia (Watt)	Rendimiento Volumetrico (%)	Presiones en la Cámara de aire	
									Presión 1 (psi)	Presión 2 (psi)
6.6	0.008	2	6.7	90	38.3	44.67	7.23	14.89	9	13
	0.01		6.3	89	38.7	42.00	6.80	14.00	9	13
	0.012		6.5	89	38.5	43.33	7.01	14.44	9	13
	0.014		7.2	79	37.8	48.00	7.77	16.00	9	13
	0.016		6.9	77	38.1	46.00	7.45	15.33	9	13
	0.008	3	6.6	85	38.4	44.00	7.12	14.67	9	13
	0.01		6.5	75	38.5	43.33	7.01	14.44	9	13
	0.012		6.4	66	38.6	42.67	6.91	14.22	9	13
	0.014		6.4	65	38.6	42.67	6.91	14.22	9	13
	0.016		7.2	64	37.8	48.00	7.77	16.00	9	13

Tabla 5.2. Valores obtenidos con altura de entrega de 6.6 metros.

Prueba 2:

En la tabla 5.3 se presentan los valores obtenidos con una altura de suministro de 2.2 m, altura de entrega de 8 m, variación de la carrera y el número de pesas de la válvula de impulso.

Altura de entrega (m)	Carrera (m)	Número de pesas	Caudal de entrega (l/min)	Ciclos (golpes/min)	Caudal desechado (l/min)	Rendimiento (%)	Potencia (Watt)	Rendimiento Volumetrica (%)	Presiones en la Cámara de aire	
									Presión 1 (psi)	Presión 2 (psi)
8	0.008	2	4.8	100	40.2	38.79	6.28	10.67	12	15
	0.01		5.3	85	39.7	42.83	6.93	11.78	12	15
	0.012		5.8	79	39.2	46.87	7.59	12.89	12	15
	0.014		5.1	77	39.9	41.21	6.67	11.33	12	15
	0.016		5.6	76	39.4	45.25	7.32	12.44	12	15
	0.008	3	5.5	87	39.5	44.44	7.19	12.22	12	15
	0.01		5.3	75	39.7	42.83	6.93	11.78	12	15
	0.012		5.8	70	39.2	46.87	7.59	12.89	12	15
	0.014		5.3	67	39.7	42.83	6.93	11.78	12	15
	0.016		5.5	65	39.5	44.44	7.19	12.22	12	15

Tabla 5.3. Valores obtenidos con altura de entrega de 8 metros.

Prueba 3:

En la tabla 5.4 se presentan los valores obtenidos con una altura de suministro de 2.2 m, altura de entrega de 10 m, variación de la carrera y el número de pesas de la válvula de impulso.

Altura de entrega (m)	Carrera (m)	Número de pesas	Caudal de entrega (l/min)	Ciclos (golpes/min)	Caudal desechado (l/min)	Rendimiento (%)	Potencia (Watt)	Rendimiento Volumetrica (%)	Presiones en la Cámara de aire	
									Presión 1 (psi)	Presión 2 (psi)
10	0.008	2	3.9	98	41.1	39.39	6.38	8.67	14	17
	0.01		4.2	92	40.8	42.42	6.87	9.33	14	17
	0.012		4.5	82	40.5	45.45	7.36	10.00	14	17
	0.014		4.4	80	40.6	44.44	7.19	9.78	14	17
	0.016		4.4	79	40.6	44.44	7.19	9.78	14	17
	0.008	3	3.9	92	41.1	39.39	6.38	8.67	14	17
	0.01		4.5	80	40.5	45.45	7.36	10.00	14	17
	0.012		4.5	69	40.5	45.45	7.36	10.00	14	17
	0.014		4.4	68	40.6	44.44	7.19	9.78	14	17
	0.016		4.2	67	40.8	42.42	6.87	9.33	14	17

Tabla 5.4. Valores obtenidos con altura de entrega de 10 metros.

Prueba 4:

En la tabla 5.5 se presentan los valores obtenidos con una altura de suministro de 2.2 m, altura de entrega de 12 m, variación de la carrera y el número de pesas de la válvula de impulso.

Altura de entrega (m)	Carrera (m)	Número de pesas	Caudal de entrega (l/min)	Ciclos (golpes/min)	Caudal desechado (l/min)	Rendimiento (%)	Potencia (Watt)	Rendimiento Volumetrica (%)	Presiones en la Cámara de aire	
									Presión 1 (psi)	Presión 2 (psi)
12	0.008	2	3.1	109	41.9	31.31	6.08	6.89	18	20
	0.01		2.8	108	42.2	28.28	5.49	6.22	18	20
	0.012		3.9	83	41.1	39.39	7.65	8.67	18	20
	0.014		3.4	85	41.6	34.34	6.67	7.56	18	20
	0.016		3	86	42	30.30	5.89	6.67	18	20
	0.008	3	3.5	93	41.5	35.35	6.87	7.78	18	20
	0.01		2.8	90	42.2	28.28	5.49	6.22	18	20
	0.012		3	79	42	30.30	5.89	6.67	18	20
	0.014		2.7	76	42.3	27.27	5.30	6.00	18	20
	0.016		3.1	73	41.9	31.31	6.08	6.89	18	20

Tabla 5.5. Valores obtenidos con altura de entrega de 12 metros.

5.2.1 Gráficas del comportamiento de la bomba a diferentes alturas de entrega

Para estas graficas se tomaron los datos en función de la mayor cantidad de caudal entregado por la bomba, en base a las cuatro alturas de entrega que se presentan en las tablas 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5.

En la figura 5.1 se observa la relación que tiene el caudal de entrega versus la altura de entrega. Se puede concluir que a mayor altura de entrega, menor caudal llegará lo que corrobora con toda la teoría estudiada acerca de bombas de ariete.

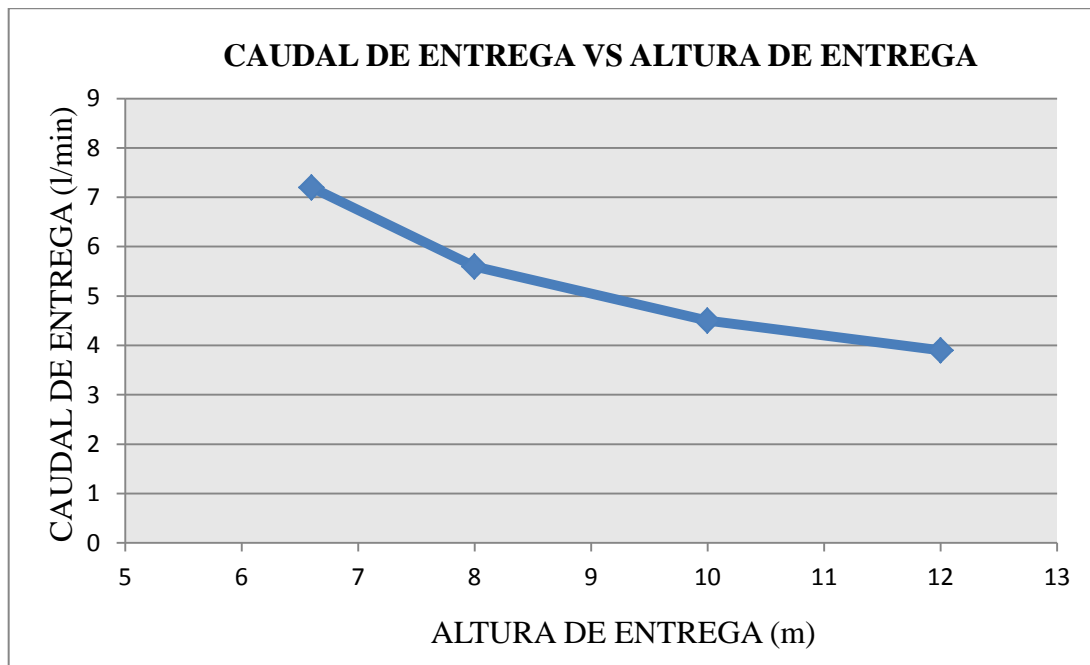


Figura 5.1. Altura de entrega vs caudal de entrega.

La figura 5.2 muestra cómo se desperdicia el caudal en la válvula de impulso conforme la altura de entrega aumenta. Una relación directamente proporcional que expresa que, a mayor altura de entrega, mayor caudal desechado.

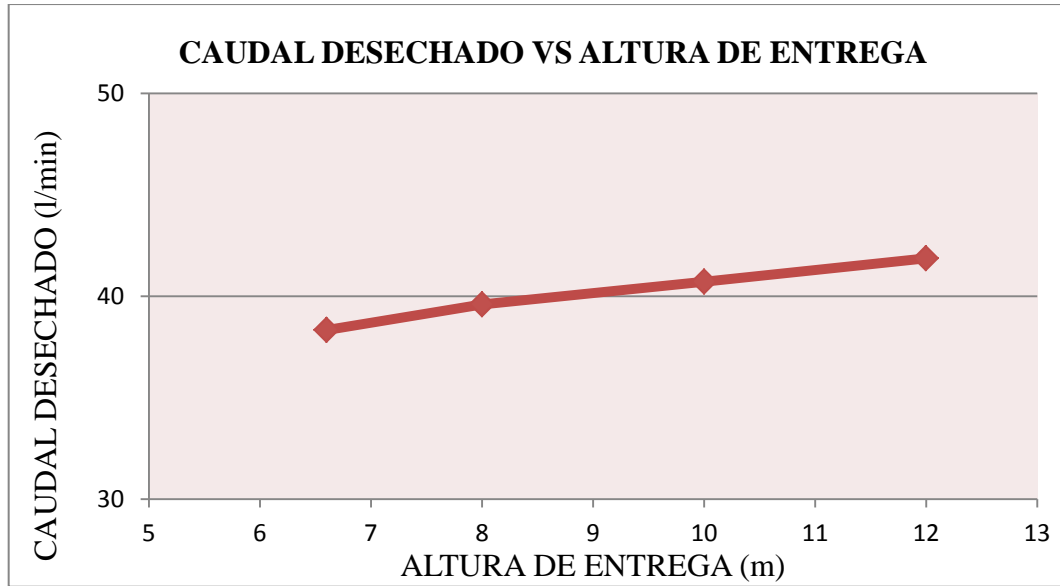


Figura 5.2. Altura de entrega vs caudal desechado.

En la figura 5.3 se observa que existe una relación inversamente proporcional entre el rendimiento y la altura de entrega de la bomba. Esto quiere decir que a medida que la altura de entrega aumenta, el rendimiento del ariete disminuye.

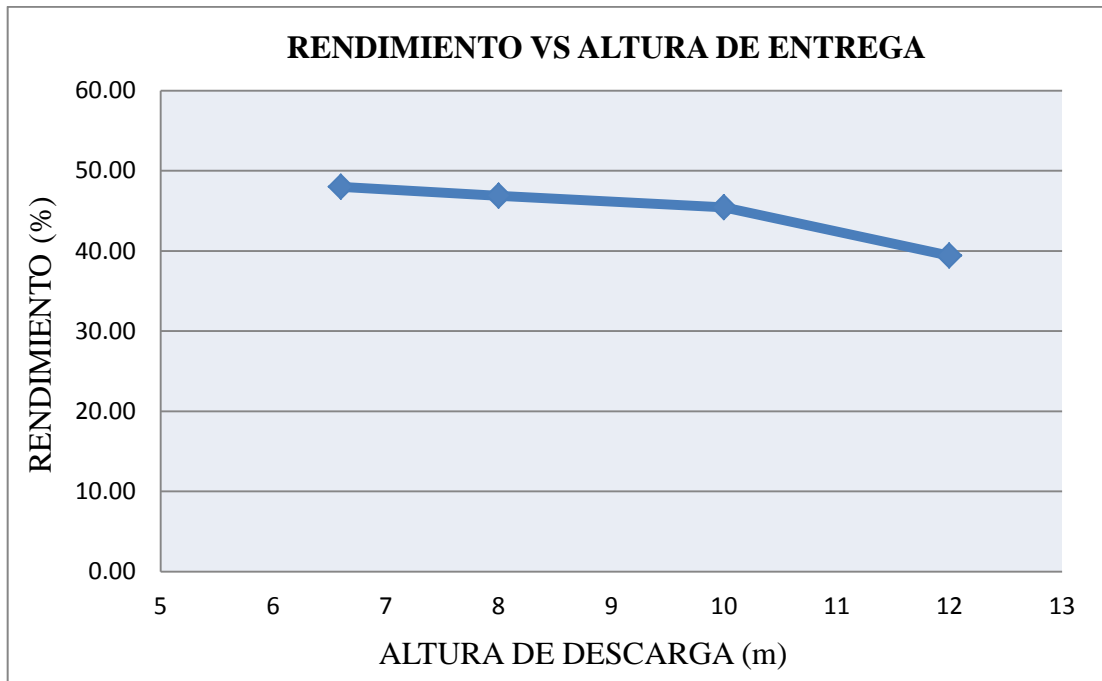


Figura 5.3. Altura de entrega vs rendimiento.

La figura 5.4 indica la relación existente entre las presiones mínimas y máximas que se producen en la cámara de aire, al momento que la bomba impulsa el fluido, estas presiones fueron calculadas en función de una altura de diseño (columna de agua contenida) correspondiente a 6.6 m. De manera experimental se determinó que el ariete es capaz de elevar mayores alturas, sin embargo se observa que en un determinado punto la diferencia entre la presión mínima y máxima disminuye ya que el ariete llega a un estado en el cual el bombeo de líquido es cada vez más difícil porque se supera la capacidad de elevación mediante el efecto del golpe de ariete.

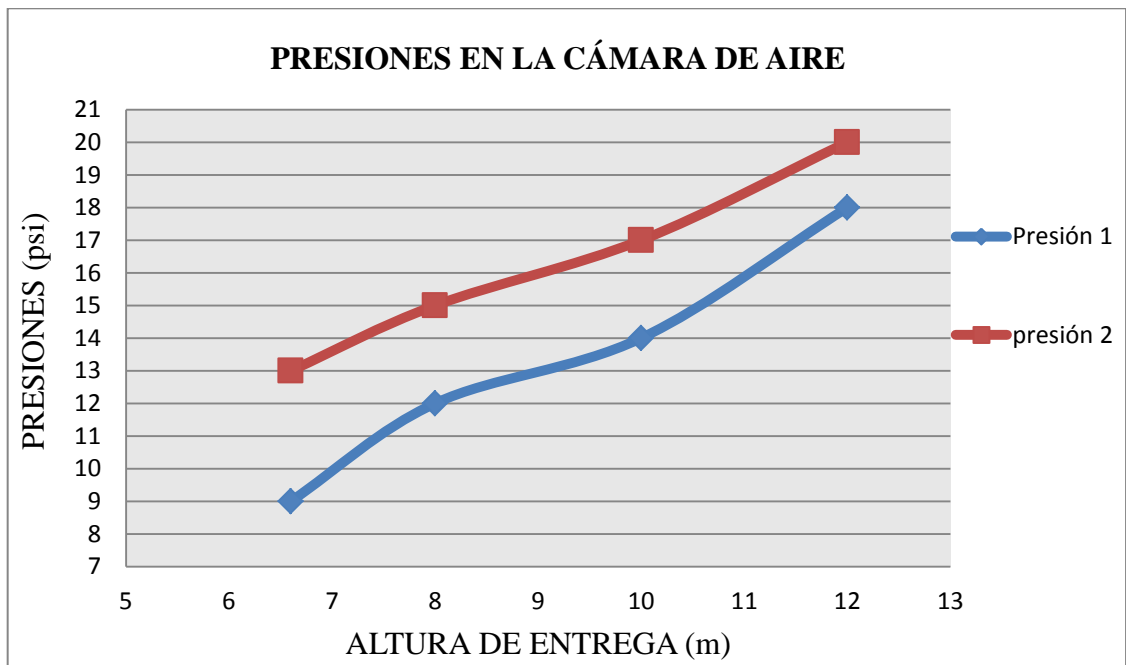


Figura 5.4. Presiones en la cámara de aire vs altura de entrega.

La figura 5.5 indica la relación entre la potencia versus la altura de entrega. Se puede observar que no existe mayor variación conforme la altura de entrega se incrementa.

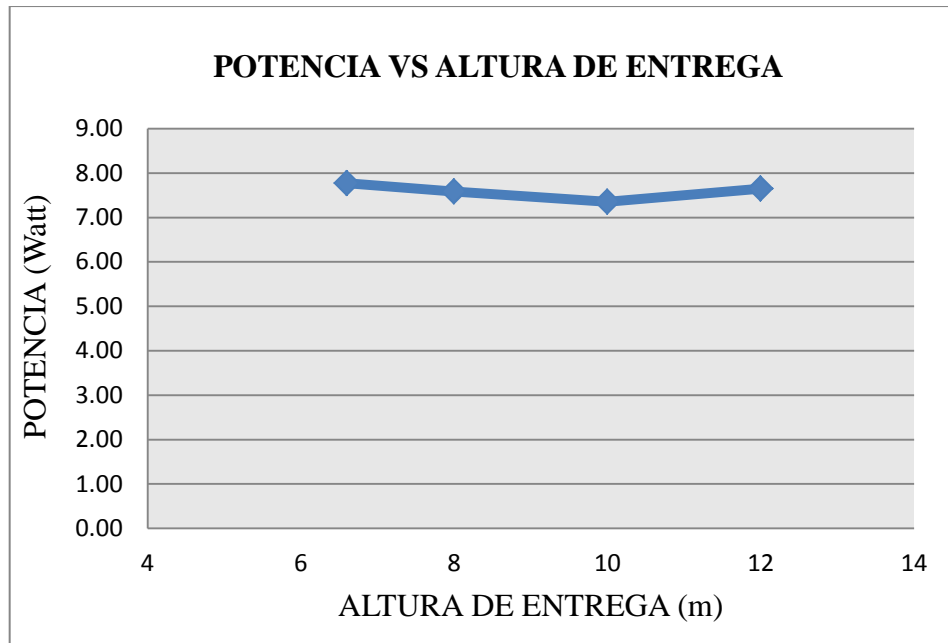


Figura 5.5. Presiones en la cámara de aire vs altura de entrega.

La figura 5.6 indica la relación del rendimiento volumétrico con respecto a la altura de entrega

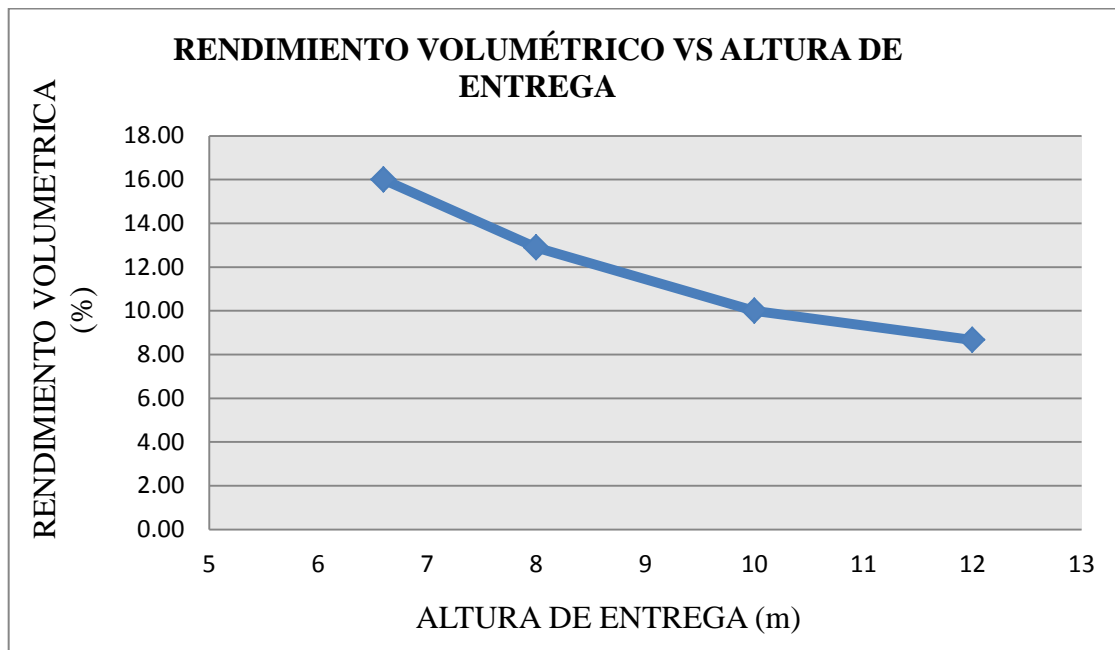


Figura 5.6. Rendimiento volumétrico vs altura de entrega.

5.2.2 Gráficas del funcionamiento con altura de entrega de diseño 6.6 metros.

Las siguientes gráficas fueron obtenidas a partir de datos experimentales con la bomba trabajando a su altura de entrega de diseño de 6.6 metros con dos y tres pesas en la válvula de impulso.

La figura 5.7 expresa que la mayor cantidad de caudal de entrega a una altura de 6.6 (m) se logra con 3 pesas y una carrera de 0.016 (m), también se observa que una buena alternativa también es utilizando dos pesas con una carrera de 0.014, Esta es la ventaja de tener la posibilidad de variar el desplazamiento de la válvula de impulso.

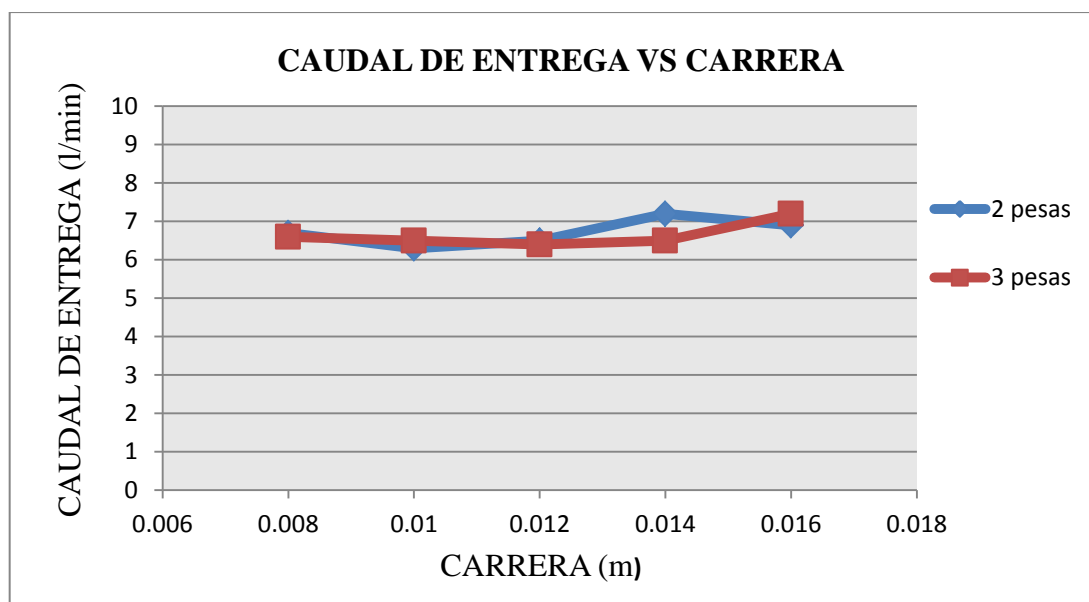


Figura 5.7. Caudal de entrega vs carrera.

La figura 5.8 indica la relación entre el rendimiento del equipo y la carrera de la válvula de impulso igualmente se puede comparar los comportamientos de la bomba utilizando dos y tres pesas, se puede observar que con tres pesas el punto de mayor rendimiento se logra cuando se modifica la carrera a 0.016 m, utilizando dos pesas el mayor rendimiento se alcanza cuando se tiene una carrera de 0.014 m.

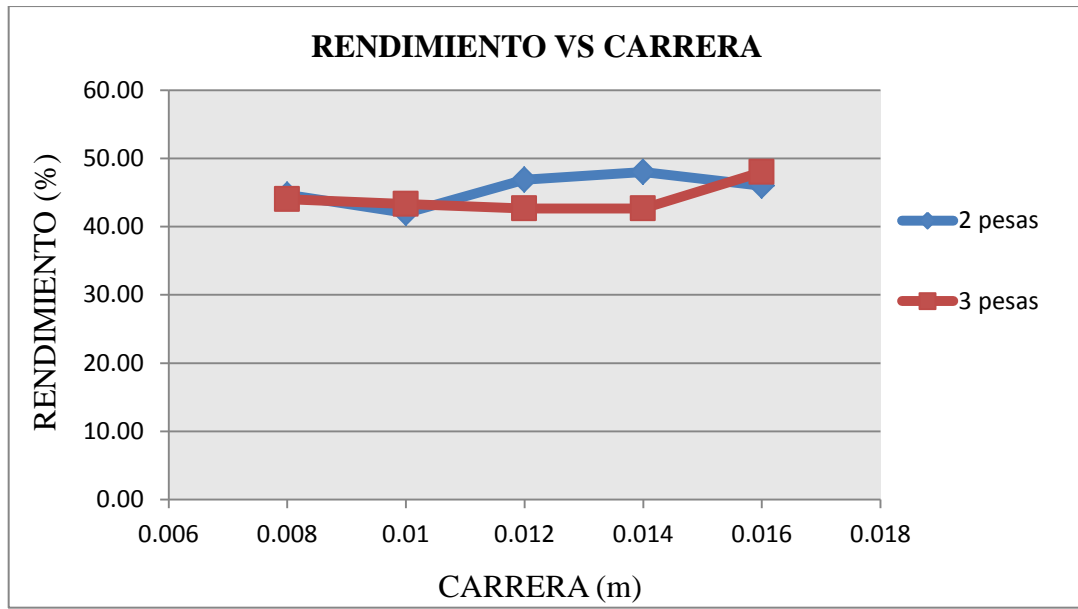


Figura 5.8. Rendimiento vs carrera.

En la gráfica 5.9 se puede observar la relación entre el caudal desperdiciado versus la carrera modificable de la válvula de impulso. El punto óptimo en el cual la bomba de ariete no desperdicia mucho fluido es con 2 pesas y una carrera de 0.014 y con tres pesas y una carrera de 0.016. Lo cual muestra que pueden haber varios puntos óptimos de funcionamiento por lo cual se requiere buscar el punto más adecuado de calibración.

Por ello se justifica el diseño de la válvula de impulso con pesas y carrea regulable para buscar el punto óptimo.

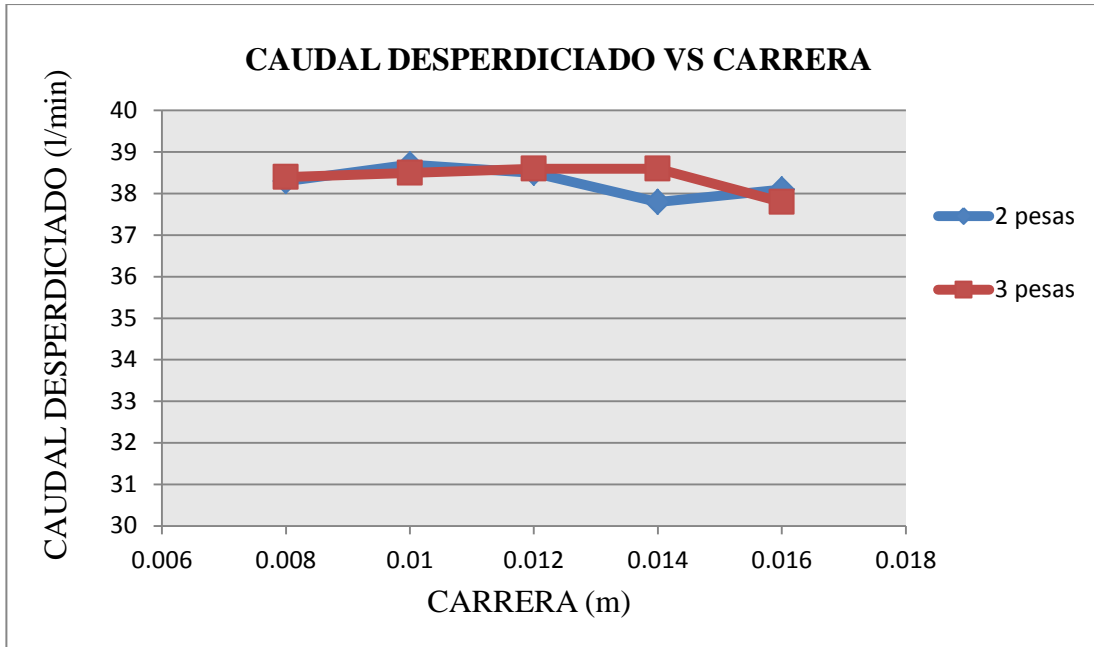


Figura 5.9. Caudal desperdiciado vs carrera.

En la figura 5.10 se puede observar la diferencia que se tiene al utilizar dos y tres pesas para determinar cuál opción se ajusta de mejor manera a la condición recomendada de 60 a 100 ciclos por minuto, y en especial a su mejor rendimiento variando la carrera de la válvula de impulso. La figura 5.10 muestra que si se aumenta la carrera el número de ciclos por minuto disminuye, se puede concluir que el punto óptimo es 3 pesas con una carrera de 0.016 y 67 ciclos por minuto lo que está dentro del rango recomendado.

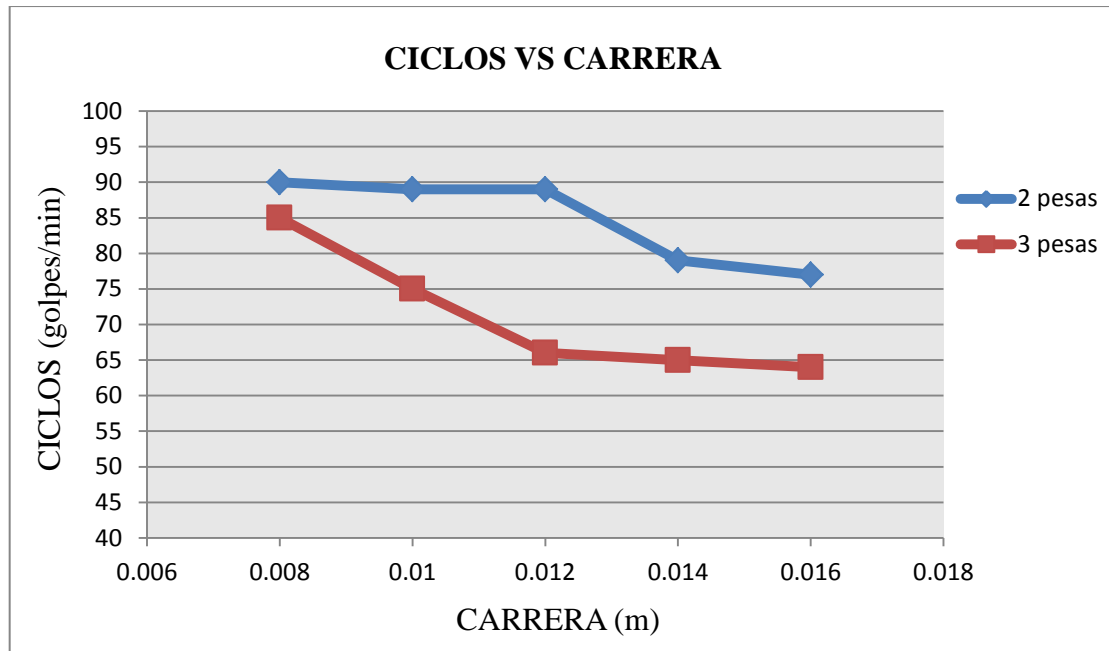


Figura 5.10. Ciclos vs carrera.

5.3 Análisis Costo-Beneficio

Bomba de Ariete hidráulico Vs Bomba centrífuga

Dependiendo la calidad de construcción de la bomba de ariete, esta puede tener una vida útil de aproximadamente 20 años o más. En este análisis se considerará una vida útil de un año para compararla con su similar una bomba centrífuga de 0.5 HP con una capacidad de elevación de 20 metros y un caudal de entrega de 10 *l/min*.

Datos técnicos y costo de la bomba de ariete construida.

- Máximo caudal de elevación: 7.2 (*l/min*).
- Máxima altura de elevación: 12 (*m*).
- Potencia: 7.7 *Watts* (0.010 *Hp*).
- Costo total de la bomba: 384 (*USD*).

Datos técnicos y costo de la bomba centrífuga Pedrollo.

- Máximo caudal de elevación: 10 (l/min).
- Máxima altura de elevación: 20 (m).
- Potencia: 370 Watts (0.5 Hp).
- Costo total de la bomba: 195 (USD).

Cálculo del costo de operación de la bomba centrífuga considerando los tiempos de operación de la bomba de ariete 24 horas al día a un año.

$$E = P * t$$

$$E = 370 \text{ Watt} * 24 \frac{h}{\text{dia}} * \frac{365 \text{ dias}}{1 \text{ año}}$$

$$E = 3241.2 \frac{KWh}{\text{año}}$$

El costo del KWh en nuestro país es de 0.27 USD, por lo que el costo de funcionamiento será:

$$\text{Costo de operación} = 3241.2 \frac{KWh}{\text{año}} * \frac{0.27}{KWh}$$

$$\text{Costo de operación} = 3241.2 \frac{KWh}{\text{año}} * \frac{0.27 \text{ USD}}{KWh}$$

$$\text{Costo de operación} = 875.12 \frac{USD}{\text{año}}$$

Al costo de operación se le suma el valor de la bomba centrífuga para obtener el costo total:

$$\text{Costo total} = \text{Costo de operación} + \text{Costo de la bomba}$$

$$\text{Costo total} = 875.12 \frac{USD}{\text{año}} + 195 \text{ USD}$$

$$\text{Costo total} = 1070.12 \text{ USD}$$

Esto justifica el costo de inversión para el presente proyecto considerando que la bomba de ariete tiene la capacidad de trabajar 24 horas seguidas todo el año sin interrupción, ninguna bomba centrífuga está diseñada para resistir estas condiciones de trabajo. Por lo que la bomba de ariete ofrece mayores prestaciones y ventajas para esta aplicación que la bomba centrífuga, justificando la inversión en una bomba de ariete en menos de un año de operación.

CONCLUSIONES

Del presente proyecto de titulación se puede concluir lo siguiente acerca de la bomba de ariete, del diseño, construcción, y software que se realizaron en los capítulos anteriores.

- Por el principio teórico del cierre brusco de una válvula dentro de una tubería (golpe de ariete), en el cual se basa el presente proyecto, se encontró que la sobrepresión teórica es diferente a la existente en condiciones de funcionamiento de la bomba de ariete, ya que esta permite disminuir dicha presión por la configuración de sus válvulas, por esta razón la sobrepresión real es menor que la calculada.
- La bomba de ariete permite elevar fluido sin la necesidad de utilizar fuentes de energía convencionales como combustibles fósiles o energía eléctrica, ya que aprovecha la energía que produce la caída de agua de su fuente de suministro.
- Con cada variación de la altura de descarga se determinó, que existe una configuración óptima al combinar la longitud de la carrera y el número de pesas en la válvula de impulso para elevar el máximo caudal posible.
- La construcción de la bomba de ariete es sencilla y factible ya que los materiales son fáciles de encontrar en el mercado y se puede construir en un taller metal mecánico convencional.
- El caudal desperdiciado de la bomba se lo puede reutilizar con varios métodos, ya sea encaminándolo a un sembrío o devolviéndolo a su fuente con un desagüe adaptado en una casa de bombas.
- En teoría, la bomba de ariete es capaz de elevar aproximadamente 3 veces su altura de suministro, pero se pudo determinar experimentalmente que puede trabajar a alturas superiores, de hasta 4 a 5 veces mencionada altura.

- El número de ciclos óptimos para la válvula de impulso utilizada en este proyecto es de 60 a 100 golpes.
- El software desarrollado garantiza la factibilidad de diseño y construcción de bombas de ariete de diversa capacidad, debido a que fue realizado en base al capítulo de diseño, el cual fundamenta su veracidad con la bibliografía consultada.
- Las tareas de mantenimiento de la bomba de ariete son sencillas y económicas puesto que hay muy pocas piezas que requieren remplazo, la mayor parte de actividades son limpieza y lubricación de los componentes.

RECOMENDACIONES

- Tanto las pesas, como la carrera del vástago de la válvula de impulso deben ser calibradas, con el fin de obtener el máximo rendimiento y las mejores condiciones de caudal de entrega y altura de acuerdo a la aplicación respectiva.
- La válvula de impulso es el elemento de mayor movimiento en el sistema, por lo tanto esta debe ser diseñada con el fin de garantizar un desplazamiento holgado, libre de atascamientos y que sea lo suficientemente resistente para alojar las pesas que regulan los golpes de calibración de la bomba.
- La superficie donde se asentara la bomba debe ser totalmente plana y a nivel, el ariete debe estar anclado o bien sujeto con el fin de evitar deslizamientos y vibraciones que puedan atascar sus partes móviles provocando una parada del equipo.
- Evitar obstruir el respiradero (válvula de aire), ya que es el encargado de restituir el aire presente en la cámara, el mismo que sirve como elemento impulsor del líquido, este aire se irá perdiendo mientras la bomba trabaja y por ello es importante reponerlo.
- Se recomienda utilizar pintura anticorrosiva o electrostática para el recubrimiento final de la bomba con el fin de evitar la corrosión y prolongar su vida útil.
- Se recomienda leer el instructivo desarrollado en el capítulo cuatro antes de operar cualquier variable en el software con la finalidad de asegurar correctos resultados.
- Se recomienda utilizar la aplicación creada “Ram Pump Soft v1.1.0” antes de diseñar y construir el ariete hidráulico, ya que el objetivo principal de este

software es ajustar las mejores opciones de tubería y material para llegar al desarrollo de una bomba de ariete que cumpla con todas las exigencias a las que va a estar sometida.

- Las pérdidas tanto en la etapa de suministro como en la etapa de descarga deben ser reducidas al mínimo, esto se logra diseñando la configuración del tren de tubería respectivo con el mínimo posible de elementos, por lo tanto se logra reducir el factor de pérdida (K) drásticamente.
- Se recomienda encausar el agua desperdiciada nuevamente a su fuente, si no fuese posible, reutilizarla de alguna manera. Esto puede ser, regadío de sembríos cercanos, bebedero de animales de granja, etc.
- Es muy recomendable el uso de una válvula de bloqueo en el suministro en caso de desmontaje de la bomba, con el fin de evitar desperdicio de agua y facilitar labores de mantenimiento.
- Generalmente la etapa de suministro parte de algún riachuelo, manantial o dique de alimentación por lo que se recomienda proteger el sistema de sólidos que pudiesen obstruir las tuberías o válvulas con mallas, filtros, tanques de retención, entre otros.
- Se debe considerar la recomendación de Wáter S.B Watt en su publicación Hydraulic Ram for Pumping Water referente al número de ciclos por minuto de la válvula de impulso, el mismo que debe ser aproximadamente $75 \frac{\text{ciclos}}{\text{min}}$, por lo que en forma experimental el peso de la válvula deberá ser controlado para que cumpla con este requerimiento.

BIBLIOGRAFÍA

- **Libros:**

Mataix Claudio. (1986) Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas. Segunda Edición. México: Alfaomega.

Shigley. (2008) Diseño en ingeniería mecánica. Octava edición. México: McGraw.

Nekrasov B. (1968) Hidráulica Tercera edición. Moscú: Editorial Mir.

Robert L. Moot. (1996) Mecánica de Fluidos Aplicada. Cuarta Edición. México: Pearson Educación.

Fox McDonald. (1995) Introducción a la Mecánica de Fluidos. Cuarta Edición. México: McGraw-Hill.

Wallace M. Lasford, Warren G. Duran. An Analytical and Experimental Study of the Hydraulic Ram

T.D. Jeffery. (1992) Hydraulic Ram Pumps. A guide to ram pump water supply systems. ITDG Publishing. London.

Yanus A. Cengel. (2007) Termodinámica. Quinta Edición. México: McGraw-Hill

- **Publicaciones:**

John Blake Publications.Pdf. A Manual on the Hydraulic Ram for Pumping Water. S.B Watt 1975

Young B W. Simplified analysis and design of the hydraulic ram pum 1996.

Sr. Hernán Levy. Nota Técnica: Tanques Hidroneumáticos 2005.

IDRC. Manuscript Report Proceedings of a Workshop on Hydraulic Ram Pump (Hydrum) Technology 1986.

John Blake. “Water supply for farms, country, houses and villages”.

S.B. Watt. “A Manual on the Hydraulic Ram for Pumping Water”

Desing, Sizing, Construction, and maintenance of gravity-fed systems in rural areas.

Proyecto de tecnología Popular; “Arietes I”; Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.

Proyecto de tecnología Popular; “Arietes II”; Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional.

- **Páginas Web:**

Breurrum. www.wot.utwente.nl

www.intikallpa.org Javier Vargas Rodríguez

www.valvias.com/coeficiente-de-descarga.php

www.valvias.com/coeficiente-de-descarga.php

http://emetreshache.com/pdf/notastecnicas/sep_2008.pdf

ANEXOS

ANEXO A. Propiedades físicas del agua.

Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)
0	9,805	999,8	1,98 · 10 ⁶	1,781 · 10 ⁻³	1,785 · 10 ⁻⁶
5	9,807	1000,0	2,05 · 10 ⁶	1,518 · 10 ⁻³	1,519 · 10 ⁻⁶
10	9,804	999,7	2,10 · 10 ⁶	1,307 · 10 ⁻³	1,306 · 10 ⁻⁶
15	9,798	999,1	2,15 · 10 ⁶	1,139 · 10 ⁻³	1,139 · 10 ⁻⁶
20	9,789	998,2	2,17 · 10 ⁶	1,102 · 10 ⁻³	1,003 · 10 ⁻⁶
25	9,777	997,0	2,22 · 10 ⁶	0,890 · 10 ⁻³	0,893 · 10 ⁻⁶
30	9,764	995,7	2,25 · 10 ⁶	0,708 · 10 ⁻³	0,800 · 10 ⁻⁶
40	9,730	992,2	2,28 · 10 ⁶	0,653 · 10 ⁻³	0,658 · 10 ⁻⁶
50	9,689	988,0	2,29 · 10 ⁶	0,547 · 10 ⁻³	0,553 · 10 ⁻⁶
60	9,642	983,2	2,28 · 10 ⁶	0,466 · 10 ⁻³	0,474 · 10 ⁻⁶
70	9,589	977,8	2,25 · 10 ⁶	0,404 · 10 ⁻³	0,413 · 10 ⁻⁶
80	9,530	971,8	2,20 · 10 ⁶	0,354 · 10 ⁻³	0,364 · 10 ⁻⁶
90	9,466	965,3	2,14 · 10 ⁶	0,315 · 10 ⁻³	0,326 · 10 ⁻⁶
100	9,399	958,4	2,07 · 10 ⁶	0,282 · 10 ⁻³	0,294 · 10 ⁻⁶

Fuente: METCALF & EDDY, INC. *Ingeniería de aguas residuales*. Mc Graw Hill. 3^a Edición (1995)

<http://www.miliarium.com/Paginas/Prontu/Tablas/Aguas/PropiedadesFisicasAgua.htm>

ANEXO B. Valores de diseño para la rugosidad de tubos

Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (pie)
Vidrio	Liso	Liso
Plastico	3.0×10^{-7}	1.5×10^{-6}
Tubo extruido; cobre, latón y acero	1.5×10^{-6}	5.0×10^{-6}
Acero, comercial o soldado	4.6×10^{-5}	1.5×10^{-4}
Hierro galvanizado	1.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Hierro dúctil, recubierto	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Hierro dúctil, no recubierto	2.4×10^{-4}	8.0×10^{-4}
Concreto, bien fabricado	1.2×10^{-4}	4.0×10^{-4}
Acero remachado	1.8×10^{-3}	6.0×10^{-3}

Fuente: **Robert L. Moot**; “Mecánica de Fluidos Aplicada”. Cuarta Edición. Pearson Educación. México 1996.

ANEXO C. Factor de Fricción para en la zona de turbulencia completa para tubería de acero comercial, nueva y limpia.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_t
1/2	0.027
3/4	0.025
1	0.023
1 1/4	0.022
1 1/2	0.021
2	0.019
2 1/2, 3	0.018
3 1/2, 4	0.017
5	0.016
6	0.015
8 – 10	0.014
12 – 16	0.013
18 – 24	0.012

Fuente: Fuente: **Robert L. Moot;** “Mecánica de Fluidos Aplicada”. Cuarta Edición. Pearson Educación. México 1996.

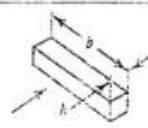






ANEXO D. Módulo de Elasticidad del Agua.

Temp. (°C)	Densidad (Kg/m ³)	Modulo de elasticidad Volumétrico (MPa)
0	1000.33	1981.62
5	1000.23	2050.29
10	1000.13	2109.15
15	999.44	2158.20
20	998.58	2197.44
25	997.38	2236.68
30	996.01	2266.11
35	994.44	2275.92
40	992.58	2285.73
50	988.46	2295.54

Fuente: <http://www.afta-asociacion.com/wp-content/uploads/Cap-5-C%3A%3A1lculos.pdf>

Módulo de Young del Acero = 206,01 GPa

ANEXO E. Coeficiente de arrastre para diferentes objetos.

Objeto	Diagrama	C_x ($Re \geq 10^3$)
Cilindro cuadrado		$b/h = \infty$ 2.05
		$b/h = 1$ 1.05
Disco		1.17
Anillo		1.27^2
Hemisferio (extremo abierto frente al flujo)		1.42
Hemisferio (extremo abierto del lado aguas abajo)		0.38
Sección C (lado abierto frente al flujo)		2.30
Sección C (lado abierto del lado aguas abajo)		1.20

Fox McDonald; “Introducción a la Mecánica de Fluidos”. Cuarta Edición. McGraw-Hill. México 1995.

ANEXO F

DATOS TUBO GALVANIZADO

Norma ASTM A-36

1 Especificaciones técnicas

1.1 Material:

Calidad norma JIS-G-3132-SPHT-1

1.2 Norma de fabricación

ASTM A53/A

Largo nominal: 6m

1.3 Acabado superficial

Negro o galvanizado

1.4 Roscado de tubería

Hilo NPT (ANSI / Asme B1.20.1)

DIMENSIONES						
DIAMETRO NOMINAL	Diam. Ext	Largo	Espesor	Peso	Área	P Hidros.
	D	L	e	P	A	
Pulg	mm	m	mm	Kg/m	cm ²	PSI
1/2	21.3	6	2.65	1.29	1.58	700
3/4	26.7	6	2.65	1.62	2.05	700
1	33.4	6	3.2	2.46	3.07	700
1 1/4	42.2	6	3.2	3.22	3.94	1000
1 1/2	48.3	6	3.6	3.98	5.06	1000
2	60.3	6	3.6	5.09	6.41	1000
2 1/2	73	6.4	5	8.52	10.686	1000
3	88.9	6.4	5	10.44	13.18	1000
4	114.3	6.4	5.2	14.08	17.62	1200

ANEXO G

PLANOS
BOMBA DE
ARIETE
HIDRÁULICO