

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil

Tesis

**Diseño e implementación de una bomba de ariete
hidráulico de 520 l/hora para la alimentación de un
sistema de riego por goteo en los cultivos aledaños al
Ojo del Milagro en Arequipa**

Franchesco Moises Valdivia Quispe
Vicente Andres Navia Garcia

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil

Arequipa, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : DR. FELIPE NÉSTOR GUTARRA MEZA
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Manuel Julio Berlanga Barriga
Asesor de trabajo de investigación

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación

FECHA : 28 de Febrero de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO de 520 l/hora PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN LOS CULTIVOS ALEDAÑOS AL OJO DEL MILAGRO EN AREQUIPA

Autor:

1. FRANCHESCO MOISES VALDIVIA QUISPE – EAP. Ingeniería Civil
2. VICENTE ANDRES NAVIA GARCIA – EAP. Ingeniería Civil

Se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores SI NO
Nº de palabras excluidas (40):
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCION.....	1
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.1.2 Formulación del problema	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.3.1 Justificación Práctica	2
1.3.2 Justificación Ambiental	3
1.3.3 Justificación Teórica	3
1.4 HIPÓTESIS.....	3
1.4.1 Hipótesis General.....	3
1.4.2 Hipótesis Específicas.....	3
1.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	3
1.5.1 Variable independiente	3
1.5.2 Variable Dependiente.....	4
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	5
2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	5
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	5
2.2 BASES TEÓRICAS DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO.....	6
2.2.1 Reseña Histórica	6
2.2.2 Golpe de Ariete.....	8
2.2.3 Principio de Funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico	11
2.2.4 Componentes en su instalación	13
2.2.4.1 Rejilla o Válvula de Pie	13
2.2.4.2 Tanque de almacenamiento o Reservoirio	14
2.2.4.3 Tubería de alimentación.....	14
2.2.4.4 Válvula de cierre.....	14

2.2.4.5	Caja de válvulas.....	14
2.2.4.6	Válvula de servicio.....	14
2.2.4.7	Válvula de Choque o Impulso.....	14
2.2.4.8	Cámara de aire	15
2.2.4.9	Válvula de aire.....	15
2.2.4.10	Tubería de Descarga.....	15
2.2.5	Esquema de componentes en la instalación de una Bomba de Ariete Hidráulico	15
2.3	DEFINICIÓN DE FLUIDO	15
2.4	PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	16
2.4.1	Densidad	16
2.4.2	Volumen Específico	16
2.4.3	Peso Específico	16
2.4.4	Viscosidad	17
2.4.5	Viscosidad Absoluta	17
2.4.6	Viscosidad cinemática.....	17
2.5	PROPIEDADES DEL AGUA.....	17
2.6	DEFINICIÓN DE FLUJO.....	18
2.7	TIPOS DE FLUJO	18
2.7.1	Flujo permanente.....	18
2.7.2	Flujo no permanente.....	18
2.7.3	Flujo laminar.....	19
2.7.4	Flujo turbulento	19
2.8	NÚMERO DE REYNOLDS.....	19
2.9	DEFINICIÓN CAUDAL	19
2.10	ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.....	20
2.11	ECUACIÓN DE BERNOULLI.....	21
2.12	PÉRDIDAS DE CARGA.....	22
2.12.1	Pérdidas primarias.....	22
2.12.2	Factor de fricción para un régimen laminar	22
2.12.3	Pérdidas secundarias	25
2.13	GOLPE DE ARIETE.....	28
2.13.1	Cálculo de la celeridad y duración del transitorio	29
2.13.2	Determinación del tipo de cierre.....	29
2.13.2.1	Cierre rápido	30
2.13.2.2	Cierre lento	30

2.13.3 Cálculo de sobrepresiones	30
2.13.4 Ciclo teórico del ariete hidráulico	31
2.13.5 Modelo de Krol.....	32
2.13.5.1 Periodo 1	33
2.13.5.2 Periodo 2	35
2.13.5.3 Periodo 3	36
2.13.5.4 Periodo 4	38
2.13.5.5 Periodo 5	40
2.13.5.6 Periodo 6	41
2.13.5.7 Periodo 7	42
CAPÍTULO III METODOLOGÍA	44
3.1 MÉTODOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	44
3.1.1 Método de investigación	44
3.1.2 Alcance de la investigación	44
3.1.2.1 Tipo de investigación	44
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	44
3.2.1 Población	44
3.2.2 Muestra.....	44
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	46
4.1.1 Datos de entrada	46
4.1.1.1 Reservorio de almacenamiento.....	46
4.1.1.2 Altura y longitud de impulsión	49
4.1.2 Tubería de impulsión	50
4.1.2.1 Diámetro.....	50
4.1.2.2 Dimensiones y propiedades mecánicas de la tubería de impulsión	50
4.1.2.3 Factor de fricción de pérdidas primarias	51
4.1.2.4 Velocidad de flujo	52
4.1.2.5 Pérdidas primarias	52
4.1.2.6 Pérdidas secundarias.....	52
4.1.2.7 Número de Reynolds	52
4.1.2.8 Celeridad.....	53
4.1.2.9 Sobrepresión máxima.....	53
4.1.2.10 Esfuerzos máximos y mínimos.....	53
4.1.2.11 Diseño estático	54

4.1.2.12	Diseño a fatiga.....	54
4.1.3	Tubería de descarga.....	56
4.1.3.1	Dimensiones y propiedades mecánicas de la tubería de descarga.....	56
4.1.3.2	Pérdidas en la tubería de descarga.....	57
4.1.4	Cuerpo del ariete.....	58
4.1.4.1	Dimensiones y propiedades mecánicas.....	58
4.1.4.2	Esfuerzos máximos y mínimos.....	59
4.1.4.3	Diseño estático	60
4.1.4.4	Diseño por fatiga.....	60
4.1.5	Cámara de aire.....	60
4.1.5.1	Dimensionamiento.....	60
4.1.5.2	Presión de la cámara antes del golpe de ariete	62
4.1.5.3	Presión de la cámara después del golpe de ariete.....	63
4.1.5.4	Esfuerzos máximos y mínimos.....	63
4.1.5.5	Diseño estático	63
4.1.5.6	Diseño por fatiga.....	63
4.1.6	Válvula anti retorno.....	64
4.1.7	Válvula de impulsión	64
4.1.7.1	Generalidades	64
4.1.7.2	Características	65
4.1.7.3	Carrera de la válvula de impulsión	65
4.1.7.4	Coefficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso	65
4.1.7.5	Velocidad de flujo en la válvula de impulsión.....	66
4.1.7.6	Coefficiente de arrastre de la válvula de impulsión	66
4.1.7.7	Fuerza hidráulica que actúa sobre la válvula de impulso.....	66
4.1.7.8	Resorte de compresión	66
4.1.8	Ciclo de operación del ariete hidráulico	67
4.1.8.1	Periodo 1	68
4.1.8.2	Periodo 2	68
4.1.8.3	Periodo 3	69
4.1.8.4	Periodo 4	70
4.1.8.5	Periodo 5	70
4.1.8.6	Periodo 6	70
4.1.8.7	Periodo 7	70
4.1.9	Análisis del ciclo de operación del ariete hidráulico.....	71

4.2	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
4.2.1	Condiciones in situ	72
4.2.2	Pruebas experimentales	78
CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		83
5.1	CONCLUSIONES	83
5.2	RECOMENDACIONES	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		87
ANEXOS		89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1.	Diagrama de la bomba de ariete mejorada Joseph Montgolfier 1796.	7
Ilustración 2.2.	Esquema del ariete ideado por John Whitehurst.	8
Ilustración 2.3.	Golpe de Ariete.	9
Ilustración 2.4.	Fases del golpe de ariete.	11
Ilustración 2.5.	La fuerza de arrastre del agua provoca que la válvula de choque se cierre de golpe.	11
Ilustración 2.6.	Se produce un ‘golpe de ariete’ y aumenta mucho la presión de fluido.	12
Ilustración 2.7.	La válvula check se abre y permite el paso de agua hacia la cámara de aire y la tubería de elevación.	12
Ilustración 2.8.	Cierre de válvula check, se libera agua por la tubería de elevación.	13
Ilustración 2.9.	Apertura de la válvula de choque y reinicio del proceso.	13
Ilustración 2.10.	Esquema de ubicación de principales componentes.	15
Ilustración 2.11.	Tubería de secciones diferentes.	20
Ilustración 2.12.	Diagrama de Moody.	25
Ilustración 2.13.	Monograma para el cálculo de Leg en accesorios.	28
Ilustración 2.14.	Ciclo teórico del ariete Hidráulico.	33
Ilustración 2.15.	Periodo 1 – Krol, Ariete Hidráulico.	34
Ilustración 2.16.	Periodo 2 – Krol, Ariete Hidráulico.	35
Ilustración 2.17.	Periodo 3 – Krol, Ariete Hidráulico.	37
Ilustración 2.18.	Periodo 4 – Krol, Ariete Hidráulico.	38
Ilustración 2.19.	Periodo 4 – Krol, Ariete Hidráulico.	40
Ilustración 2.20.	Periodo 6 – Krol, Ariete Hidráulico.	42
Ilustración 2.21.	Periodo 7 – Krol, Ariete Hidráulico.	43
Ilustración 3.1.	Metodología – Etapas.	45
Ilustración 4.1.	Imagen referencial Geotanque de geomembrana D=2.10m H=1.5m.	47
Ilustración 4.2.	Canal de alimentación.	48
Ilustración 4.3.	Apertura de manguera para iniciar con el funcionamiento del sifón.	48
Ilustración 4.4.	Medición del caudal disponible.	49
Ilustración 4.5.	Medición del caudal disponible.	56
Ilustración 4.6.	Ensamble de la bomba de ariete.	59
Ilustración 4.7.	Compresión de aire por ingreso de agua a la cámara de aire.	61
Ilustración 4.8.	Válvula anti-retorno.	64
Ilustración 4.9.	Válvula check modificada.	65
Ilustración 4.10.	Canal de alimentación.	73

Ilustración 4.11. Caudal del canal de alimentación 17-12-2022 Q=144000 l/h.....	73
Ilustración 4.12. Caudal del canal de alimentación 13-05-2023 Q=162000 l/h.....	74
Ilustración 4.13. Caudal del canal de alimentación 08-07-2023 Q=144000 l/h.....	74
Ilustración 4.14. Instalación de la tubería de suministro en campo.....	74
Ilustración 4.15. Instalación de la tubería de suministro en campo.....	75
Ilustración 4.16. Instalación de la tubería de descarga en campo.....	75
Ilustración 4.17. Bomba de ariete ensamblada.....	76
Ilustración 4.18. Bomba de ariete instalada en campo.....	77
Ilustración 4.19. Bomba de ariete puesta en marcha.....	77
Ilustración 4.20. Caudal descargado por la bomba de ariete.....	78
Ilustración 4.21. Riego por goteo existente en cultivos aledaños.....	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Definición y Operacionalización de Variables	4
Tabla 2.1. Principales propiedades físicas del agua.....	18
Tabla 2.2. Coeficientes de rugosidad absoluta para tuberías comerciales.....	24
Tabla 2.3. Valores de K para accesorios	26
Tabla 2.4. Módulo de elasticidad de diferentes materiales	29
Tabla 2.5. Criterios para el tipo de cierre	30
Tabla 4.1 Caudal promedio de impulsión.....	49
Tabla 4.2 Diámetro de la tubería de impulsión.....	50
Tabla 4.3 Ficha Técnica de manguera HDPE para riego	51
Tabla 4.4 Rendimiento Hidráulico en función de H.....	57
Tabla 4.5 Tabla del Ciclo de operación del ariete hidráulico	71
Tabla 4.6 Condiciones en la zona de trabajo	72
Tabla 4.7 Resultados del Caudal de descarga obtenidos en campo.....	79

ÍNDICE GENERAL DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1.	Gráfica del Ciclo de operación del ariete hidráulico.....	71
Gráfico 4.2.	Curva de operación de la bomba de ariete.	79
Gráfico 4.3.	Relación de alturas y caudales.....	80
Gráfico 4.4.	Eficiencias de la bomba de ariete.	81
Gráfico 4.5.	Comportamiento de la bomba de ariete.	81
Gráfico 4.6.	Eficiencias de la bomba de ariete.	82

RESUMEN

El presente tema de investigación se eligió con el fin de brindar una solución económica, innovadora y eco amigable a los agricultores de la zona del ojo del milagro en Characato, Arequipa, Perú para resolver sus problemas con el transporte del agua.

Se diseñó, fabricó e instaló una bomba de ariete hidráulica, la cual nos permite bombear agua sin el uso de energía eléctrica o el uso de combustibles, Solo aprovechando la energía producida por los golpes de ariete al cerrarse repentinamente y repetidas veces una válvula check.

Para su diseño y construcción se consideraron las siguientes condiciones determinadas por la zona donde se instaló la bomba, una altura de impulsión de 4.42 m, un caudal de entrada disponible de 32031 l/h y una longitud de tubería de impulsión de 15 metros.

Bajo estas condiciones se realizaron varias pruebas a diferentes alturas y probando diferentes resortes en la válvula check modificada, (cada resorte tiene diferente longitud de carrera y diferente constante elástica, por ende, se generan diferentes fuerzas al cerrar la válvula check, por lo tanto, cada resorte genera diferentes golpes de ariete). Una vez realizado las distintas pruebas, se logró encontrar la mayor eficiencia de la bomba de ariete hidráulico elevando el caudal a una altura superior desde la ubicación de la bomba hasta el punto de descarga de 25 metros de alto y una longitud de 100 metros de manguera.

Descargando así un caudal de 520l/h, esta agua bombeada llegará a un reservorio; se propone el uso de un geotanque construido con malla electrosoldada y geomembrana HDPE que cumplirá la función de reservorio con una capacidad de 5m³, esto para asegurar un caudal constante a los cultivos, ya que este alimentará directamente el riego por goteo, previniendo así posibles reducciones del caudal por horas pico o en su defecto una falla en la bomba de ariete.

Finalmente, con el volumen de agua elevado por la bomba de 520 l/h a una altura de descarga de 25 metros, se logró bombear el agua de un punto a otro, con la cantidad de caudal requerida. Haciendo un comparativo con el volumen de agua que se necesita, se puede abastecer con la cantidad de agua requerida para el riego por goteo del cultivo en la zona del ojo del milagro Arequipa Perú”.

Palabras claves: bomba de ariete hidráulica, golpes de ariete, válvula check.

ABSTRACT

This research topic was chosen in order to provide an economical, innovative and eco-friendly solution to farmers in the area of Ojo del Milagro in Characato, Arequipa, Peru to solve their problems with water transportation.

A hydraulic water hammer pump was designed, manufactured and installed, which allows us to pump water without the use of electrical energy or fuels, only taking advantage of the energy produced by the water hammer when a check valve is suddenly and repeatedly closed.

For its design and construction, the following conditions were considered, determined by the area where the pump was installed, a discharge height of 4.42 m, an available inlet flow of 32031 l/h and a discharge pipe length of 15 meters.

Under these conditions, several tests were performed at different heights and testing different springs in the modified check valve, (each spring has different stroke length and different elastic constant, therefore, different forces are generated when closing the check valve, therefore, each spring generates different water hammer). Once the different tests were performed, it was possible to find the highest efficiency of the hydraulic ram pump by raising the flow at a higher height from the location of the pump to the discharge point of 25 meters high and a length of 100 meters of hose.

Discharging a flow of 520 l/h, this pumped water will reach a reservoir; it is proposed the use of a geotank built with electrowelded mesh and HDPE geomembrane that will serve as a reservoir with a capacity of 5m³, this to ensure a constant flow to the crops, as this will directly feed the drip irrigation, thus preventing possible reductions in flow during peak hours or otherwise a failure in the water hammer pump.

Finally, with the volume of water raised by the 520 l/h pump at a discharge height of 25 meters, it was possible to pump the water from one point to another, with the required flow rate. Making a comparison with the volume of water needed, it can be supplied with the amount of water required for drip irrigation of the crop in the area of the eye of the miracle Arequipa Peru”.

Keywords: hydraulic ram pump, water hammer, check valve.

INTRODUCCION

En la presente investigación se plantea diseñar e implementar una bomba de ariete hidráulico para abastecer el sistema de riego por goteo de un terreno de 2498 m², para un cultivo aledaño al ojo del milagro en Arequipa, Se pretende dar una opción diferente de bombeo a los agricultores de la zona, ya que al conversar con ellos, manifestaron su preocupación por el alto costo del transporte de agua entre puntos, debido al uso de sistemas de bombeo convencionales que funcionan con energía eléctrica o combustibles. A continuación, se detalla cada uno de los capítulos que se desarrollaron para diseñar e implementar con éxito la bomba de ariete.

En el Capítulo I, concerniente al planteamiento del estudio, definimos los problemas específicos y problema general, a partir de esto, se pudo encontrar los objetivos e hipótesis, donde se definió las variables, el tipo y nivel de investigación, la población y muestra. Finalmente se elaboró un cronograma y un presupuesto para el desarrollo de la investigación.

En el capítulo II, concerniente al marco teórico, encontraremos antecedentes relacionados con la investigación, el uso y diseño de arietes hidráulicos a través de la historia, Fenómenos físicos que hacen posible bombear agua sin energía externa mediante dicha bomba, además de la teoría de mecánica de fluidos para el diseño de una bomba de ariete hidráulico.

En el capítulo III, Se explica la metodología empleada para definir las secciones y los materiales a utilizar en la implementación de la bomba, esta metodología se dividió en cuatro etapas donde se detalla parte por parte el correcto proceso a llevar a cabo para el diseño, construcción y puesta en marcha de la bomba de ariete.

En el capítulo IV, se detalla los resultados de la puesta en marcha de la bomba, como también el procedimiento para diseñar e implementar la bomba de ariete hidráulico, desarrollando las cuatro etapas mencionadas en el capítulo 3, Realizamos una evaluación del trabajo que desempeñarán cada uno de los componentes de la bomba de ariete vs sus características físico mecánicas y, verificamos que los materiales a utilizar cumplan su función con la mayor eficiencia posible.

En el capítulo V, se realizó un análisis de la inversión para realizar el proyecto, esto contempla todos los gastos generados para llevar a cabo la investigación desde materiales para fabricar la bomba de ariete, herramientas y maquinaria utilizadas para fabricar piezas que no son comerciales.

Una vez desarrollados los 5 capítulos, se presentan las conclusiones y recomendaciones como resultado del proyecto, además de adjuntar anexos, panel fotográfico y referencias bibliográficas.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1 Planteamiento del problema

La bomba de Ariete es una máquina autosustentable de bombeo de agua, que se distingue por no utilizar fuentes de energía externa, ya que funciona solo con la energía cinética generada por la caída de agua a través de una tubería, permitiendo elevar parte del caudal a un punto más alto.

A un conociendo todas las ventajas de las bombas de ariete, su avance tecnológico fue desacelerado por la aparición de bombas con fuentes de energía externa, esto causo que poco a poco a que se dejaran de usar, ya que dichas bombas tenían una mayor eficiencia. Sin embargo, a causa de la explotación de los recursos naturales y la contaminación ambiental, las personas están tomando conciencia del daño causado al planeta y se están tomando en cuenta las energías renovables y amigables con el medio ambiente. Por lo que se está empezando a fomentar estos mecanismos de energías sostenibles.

Muchas veces las tierras de los agricultores se encuentran cerca de las fuentes de agua, pero debido a la topografía del terreno se les hace complicado conducir el agua a sus cultivos, una solución a este problema podría ser el uso de una bomba de ariete, estas son ideales para construir las cerca de ríos ya que durante su funcionamiento desperdician gran parte del agua que ingresa por la tubería de suministro.

Por esta razón, se diseñará una bomba de ariete para fomentar su uso y beneficiar a los agricultores que disponen de fuentes de agua abundante cerca de sus terrenos, pero con difícil acceso. Además, esta tecnología contribuirá al uso de energías renovables, permitiendo reducir sus costos, contando con una fácil puesta en marcha de la bomba, su funcionamiento es autosustentable para realizar el trabajo, pudiendo hacer trabajar la bomba sin parar las 24 horas del día y los 365 días del año.

1.1.2 Formulación del problema

Se realizaron las siguientes interrogantes para realizar la presente investigación.

- **Problema General**

¿Es factible realizar el diseño e implementación de la bomba de ariete hidráulico el cual podrá cumplir con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo?

- **Problemas Específicos**

- ¿Con una altura de captación de 4,42 m será posible generar la presión y caudal de descarga para alimentar un sistema de riego por goteo?
- ¿Es posible alimentar un reservorio de 5 m³ que abastecerá un área total de 2,498 m² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora?
- ¿Es posible alcanzar la máxima eficiencia de la bomba de ariete en el diseño e implementación?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar el diseño e implementación de una bomba de ariete hidráulico que cumpla con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- A. Generar la presión y caudal de descarga con una altura de captación de 4,42 m para alimentar un sistema de riego por goteo.
- B. Alimentar un reservorio de 5 m³ que abastecerá un área total de 2,498 m² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora.
- C. Diseñar e implementar la bomba de ariete de tal forma que alcance su máxima eficiencia.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación Práctica

Actualmente usan una bomba centrífuga que funciona con combustible, esta es usada periódicamente por el significativo costo del combustible que sumado a los costos del proceso de siembra, hace que sea una actividad poco rentable. Por este motivo, se quiere evitar el consumo de combustible y desarrollar una bomba de ariete, donde no intervenga la energía eléctrica ni el combustible, ahorrando y apoyando al campesino en sus labores cotidianas.

1.3.2 Justificación Ambiental

La bomba de ariete puede trabajar sin parar, está a comparación de las otras bombas de impulsión de agua, es mucho más amigable con el medio ambiente, presentándose como una máquina de energía renovable, dado que para funcionar no necesita ningún tipo de energía externa.

1.3.3 Justificación Teórica

Ante diversas opciones de métodos de irrigación para los cultivos donde el agua no llega satisfactoriamente, la bomba de ariete (el golpe de ariete se basa en la sobrepresión creada cuando el flujo de un líquido se interrumpe repentinamente, por ejemplo, cuando se cierra rápidamente un grifo) es una excelente elección para este problema que cada vez se ve más es la actualidad, logrando que por medio del golpe de ariete se pueda redirigir el agua a diferentes lugares según sea de conveniencia para el usuario.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis General

El diseño e implementación de la bomba de ariete hidráulico cumplirá con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo.

1.4.2 Hipótesis Específicas

- A. La bomba de ariete hidráulico generará la presión y caudal de descarga con una altura de captación de 4,42 m para alimentar un sistema de riego por goteo.
- B. La bomba de ariete hidráulico alimentará un reservorio de 5 m³ que abastecerá un área total de 2,498 m² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora.
- C. El diseño e implementación a realizar de la bomba de ariete alcanzará la máxima eficiencia.

1.5 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

1.5.1 Variable independiente

Las variables independientes de la presente investigación son:

- “Diseño de la bomba de ariete hidráulica”.

Tabla 1.1.*Definición y Operacionalización de Variables*

Variable	Dimensiones	Indicadores	Definición conceptual	Unidad de medida	Instrumentos
Diseño de la bomba de Ariete hidráulica	➤ Procedimiento para el cálculo del diseño.	➤ Etapa del cálculo matemático.	➤ En ella se desarrolla las fórmulas para el diseño de la bomba hidráulica.		➤ Software Excel –
		➤ Etapa de esquematización.	➤ En ella se plantea un esqueleto de como irá armada la bomba de ariete hidráulica.	➤ Digitales editables.	➤ Plantilla
		➤ Etapa de ensamble y armado.	➤ En ella se procede a desarrollar el ensamble y armado de la bomba hidráulica.	➤ Digitales editables.	➤ Software AutoCAD
				➤ Razón	➤ Planos Elaborados
	➤ Caudal de descarga		➤ Cantidad de fluido que circula a través de una sección por unidad de tiempo.		➤ Valde (20l)
	➤ Presión generada		➤ Fuerza que actúa perpendicularmente sobre una unidad de área	➤ (l/h) ➤ Bar	➤ Cronómetro ➤ Manómetro
	➤ Estanque de almacenamiento		➤ Lugar para acumular el líquido bombeado	➤ m ³	➤ Flexómetro ➤ Cálculos matemáticos

Fuente: Elaboración propia.

1.5.2 Variable Dependiente

La presente investigación no cuenta con una variable dependiente, ya que busca profundizar en una característica específica: el diseño de la bomba de ariete hidráulico.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1 Antecedentes Internacionales

En la revista titulada “Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones”, este estudio examina cómo afectan las diversas características al funcionamiento del ariete hidráulico. El muelle de la válvula de impulsión, el volumen del acumulador, la carrera de la válvula de impulsión y la relación entre las áreas de impulsión y descarga en la eficiencia del ariete, son las variables que se examinan. Se lleva a cabo una investigación experimental sobre un prototipo de ariete hidráulico de investigación con parámetros ajustables. Además, elaboraron un modelo teórico de la bomba de ariete que se verifica a partir de los resultados experimentales. El modelo propuesto permite analizar con mayor detalle los parámetros examinados, en particular la longitud de trabajo de la válvula de impulsión. De acuerdo con los resultados, se puede afirmar que la eficiencia del ariete es muy dependiente del muelle o resorte que se le agregó a la válvula check, para que se convirtiera en válvula de impulsión y la relación entre las áreas de las válvulas de impulsión y descarga. Por el contrario, el acumulador no tiene un impacto apreciable en la eficiencia del ariete (1).

En el artículo titulado “Diseño de una bomba de ariete hidráulico monopulsor para el aprovechamiento de aguas del manantial, anexo Anucariri Puno - 2021” El objetivo principal es encontrar la manera de construir una bomba de ariete hidráulico que satisfaga el volumen de agua que se requiere a determinada altura de elevación, para el suministro de agua en el anexo Anucariri Puno en 2021. Tras realizar un levantamiento topográfico con un GPS diferencial, se constató que el emplazamiento se encuentra a 8,49 metros sobre el nivel del río. Para elevar el agua a una altura de 20 metros, se construyó una bomba de ariete hidráulico monopulsor con una tubería de alimentación de 1”, 7.57 metros de largo y una pendiente de 2 metros, un cuerpo de ariete monopulsor con un diámetro interno de 0,0545 metros.

En los experimentos realizados, se obtuvieron como resultados 1,92 litros por minuto de caudal de bombeo, con un diámetro de ½ pulgada, 10 milímetros de carrera, 41 carreras por minuto y 32.832 litros por día, o 22,80 litros por minuto, como caudal de descarga. En consecuencia, la

bomba podía abastecer al anexo de Anucariri con 2,764.80 litros diarios; pero, durante las pruebas, la bomba estaba limitada a una altura de 14 metros y una presión de 20 PSI.

En la tesis titulada “Implementación de la Bomba de Ariete Hidráulico para minimizar la escasez de agua en regadío de cultivo en el campo agrícola de Castillo-Valle de Majes de la provincia de Castilla en el 2022”. La tesis mencionada, pretende aumentar el suministro de agua para riego en la Provincia de Castilla, en el Distrito de Castilla, mediante la implantación de la Bomba Hidráulica de Ariete. Teóricamente, puede utilizarse en aldeas remotas sin acceso a combustible o electricidad. Es sencilla de fabricar y se puede comprar los materiales de fabricación en el mercado nacional. También es barata y requiere poco mantenimiento. La instalación se realiza rápidamente. El presente trabajo pretende alcanzar tres objetivos específicos: en primer lugar, pondrá en funcionamiento la bomba hidráulica para reducir la falta de agua utilizada en el riego de cultivos; en segundo lugar, analizará el golpe de ariete que se genera durante el funcionamiento de la bomba al reducir la falta de agua para el riego de los cultivos; y en tercer lugar, mostrará cómo puede utilizarse la bomba hidráulica de ariete para hacer frente a la variación de los niveles de toma de agua en el riego de cultivos. Como muestran las conclusiones, los ríos del Valle del Majes son irregulares en sus términos, hay mucha agua disponible durante el verano, pero muy poca durante el invierno. Por ello, es imperativo instalar una bomba hidráulica de ariete para reducir la cantidad de agua no disponible para el riego en los cultivos de la zona.

2.2 BASES TEÓRICAS DE LA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO

2.2.1 Reseña Histórica

Entre las primeras máquinas para la impulsión de agua se encuentran las bombas. Grecia, Roma, China y Egipto las utilizaron. Después de los motores eléctricos, son actualmente la segunda categoría de equipos industriales más utilizada. De la misma forma como las famosas máquinas de vapor y los motores de combustión interna, el ariete hidráulico adquirió importancia al principio de la era de los grandes inventos (4).

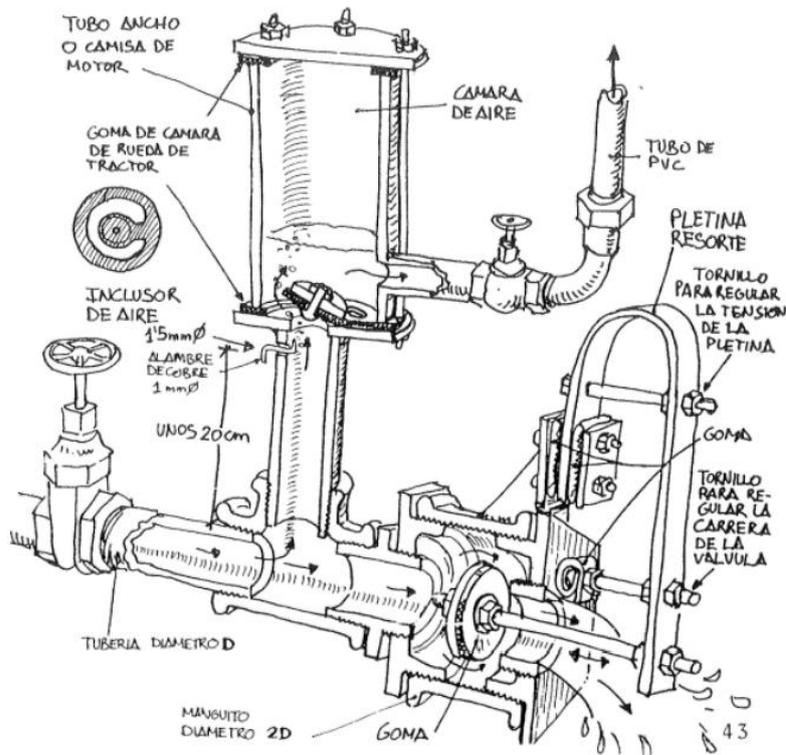
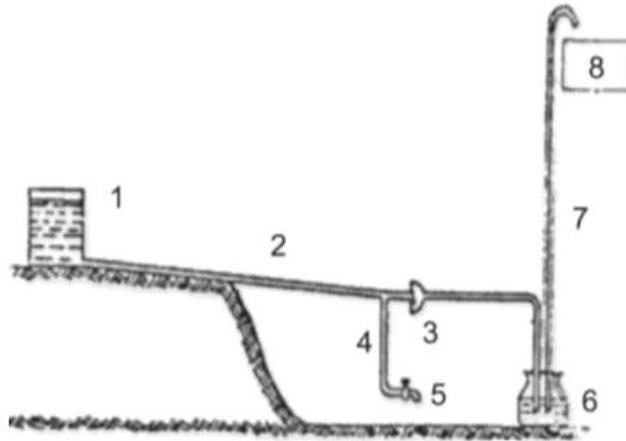


Ilustración 2.1. Diseño y Construcción de un Sistema de ariete Hidráulico.
Fuente: Diagrama de la bomba de ariete mejorada Joseph Montgolfier 1796.

El principio de funcionamiento del ariete hidráulico se le atribuye a John Whitehurst experimentó en 1772 con agua que se movía rápidamente a través de tubos; más tarde se hizo famoso por el globo aerostático. Utilizó su creatividad para crear un sistema con un principio de funcionamiento único en su fábrica de cerveza de Cheshire. Ideó un aparato que implicaba emplear a una persona que pueda girar manualmente un grifo que estaba conectado a una cañería que conducía a un tanque de suministro ubicado unos metros más arriba. Esto resultó en generar el fenómeno del "golpe de ariete", que hace que el agua suba aún más que el depósito de suministro. Se basó en sus experiencias, en las que cerró rápidamente el extremo inferior de un tubo para descubrir la potencia de propulsión; sin embargo, su aplicación no fue tan ideal debido al elevado ruido y las vibraciones, además del hecho de que era manual (4).

Cuando la máquina de vapor acababa de desarrollarse, la corriente eléctrica estaba aún muy lejos y la gasolina sólo se conseguía en botellitas en la botica, Joseph Montgolfier fue capaz de proporcionar en 1792 una máquina que podía elevar el agua a un nivel superior sin el uso de otras energías. Esto implicaba que las ciudades y pueblos remotos podían ahora acceder a este recurso hídrico mediante el uso de este artilugio, a diferencia de lo que ocurría anteriormente, que necesitaban obtener el agua de automóviles o cubos. Los investigadores que se dedicaron a mejorar el aparato y a conocer los misterios de su aparente magia precedieron a la famosa innovación tras el fallecimiento del gran inglés (4).



- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| 1. Tanque de entrega. | 5. Válvula grifo. |
| 2. Tubería inclinada. | 6. Cámara de aire. |
| 3. Válvula principal. | 7. Tubería de subida. |
| 4. Tubería auxiliar. | 8. Tanque elevado. |

Ilustración 2.2. Esquema del ariete ideado por John Whitehurst.

Fuente: Diseño y Construcción de un Sistema de ariete Hidráulico.

2.2.2 Golpe de Ariete

Cuando el movimiento del líquido cambia repentinamente, el impacto violento que se forma en la pared de la tubería forzada se denomina golpe de ariete. El golpe de ariete puede ocurrir en tuberías que llevan líquido a la parte superior cuando se frena o acelera el flujo, por ejemplo, al cerrar una válvula en la línea. Cuando una válvula en una tubería se cierra rápidamente durante la escorrentía, un impulso de alta presión se desplaza en dirección opuesta a la del flujo cuando el caudal a través de la válvula disminuye, aumentando la tensión en el lado aguas arriba de la válvula. Esta ola puede causar sobrepresión y hundimiento, haciendo que las tuberías se deformen y finalmente se rompan. La energía cinética del fluido se puede convertir en energía potencial elástica y viceversa desde una perspectiva energética. No habría pérdida de energía si no hubiera fricción y la tubería no se deformaría. Este proceso se repetiría sin fin. Cuando hay rozamiento y el conducto es elástico, una porción de la energía se pierde y la sobrepresión disminuye, por lo que este fenómeno desaparece (5).



Ilustración 2.3. Golpe de Ariete.

Fuente: Ilustración consecuencias y prevenciones del golpe de ariete, Victoria Zárate y Jorge Monroy

Las fases por las que pasa el golpe de ariete se ven en la ilustración 2.4 y se explican a continuación:

- 1) Sin perturbación. Régimen permanente. El líquido de las tuberías se mueve desde el depósito hasta la válvula a una velocidad de v . El diámetro normal de la tubería es D .
- 2) Tiempo 0. La válvula se cierra de inmediato. La velocidad del líquido no se elimina inmediatamente de la válvula, sino a lo largo de todo el conducto.
- 3) Tiempo $t_0 = 0,5 L / a$ El frente de onda ha llegado al centro de la tubería cuando la onda de presión ha viajado a velocidad a hacia el interior del depósito. La sobrepresión ha provocado la dilatación de la parte derecha de la tubería. Mitad izquierda: de tamaño regular. El agua sigue fluyendo hacia la válvula a velocidad v en esta mitad izquierda. $v=0$ en la mitad derecha. El líquido comprimido está en sentido contrario al de la válvula.
- 4) Tiempo $t(0) = L/a$. La onda de presión ha llegado al depósito. En toda la tubería, el líquido está en reposo y comprimido ($v=0$), no en equilibrio. La tubería ha alcanzado su máxima dilatación. Como un resorte que rebota en una compresión, el líquido en el conducto empieza a moverse con velocidad v , pero en la otra dirección, hacia el depósito. Inmediatamente aguas abajo de la unión depósito-tubería, el líquido comienza a fluir.

- 5) $5 L / a$ Tiempo $t_0 = 1$. La parte izquierda de la tubería se ha reducido a su diámetro típico. La onda sigue moviéndose con velocidad a hacia la derecha. El fluido viaja con velocidad v por la parte izquierda del conducto.
- 6) Tiempo $t_0 = 2 L / a$. Diámetro de una tubería típica en toda su extensión. Cada fluido en la tubería se mueve desde la válvula hasta el depósito a una velocidad de v . El diámetro de la tubería caerá por debajo de su diámetro normal debido a la inercia, incluso en ausencia de sobrepresión en cualquier área de la tubería. Esto dará como resultado una caída continua de la presión y la propagación de la onda elástica, ahora con una depresión que se extiende desde la válvula hasta el depósito a una velocidad a .
- 7) Tiempo $t_0 = 2,5 L / a$. La sección media de la tubería está ahora cubierta por la depresión. Hay agua en la mitad derecha, pero está en reposo y tiene menos presión que de costumbre. El diámetro de la tubería de esta mitad es menor que el habitual.
- 8) El tiempo t_0 es igual a $3 L / a$. El agua en la tubería está en reposo en general, pero no está en equilibrio, y se mueve hacia la derecha a una velocidad de v a medida que se desplaza desde el depósito hasta la válvula. En toda la tubería predomina la depresión. El diámetro total de la tubería es menor de lo habitual.
- 9) Tiempo $t_0 = 3 L / a$. El fluido se desplaza hacia la válvula con una velocidad v en la parte izquierda de la tubería. El fluido sigue en reposo y bajo depresión en la mitad derecha. El diámetro de la mitad izquierda es normal.
- 10) Tiempo $t_0 = 4 L / a$. diámetro normal para tuberías. Todo el fluido se desplaza hacia la válvula con velocidad v . Todas ellas son iguales al tiempo cero, lo que significa que el periodo de este movimiento es en realidad cuatro veces t_0 .

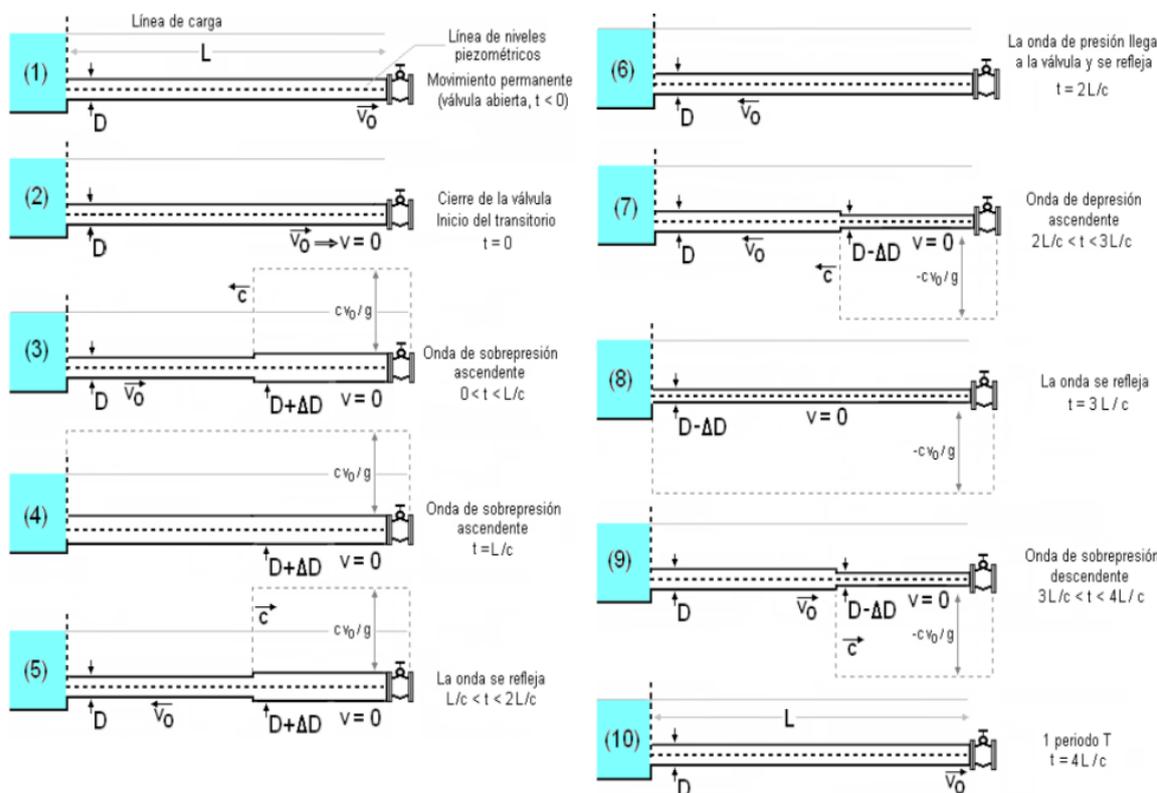


Ilustración 2.4. Fases del golpe de ariete.

Fuente: C. J. Renedo, F. Ortiz, J. T. Cueli, A. Santisteban, S. Pérez, A. Ortiz, C. Méndez
 Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética de la Universidad de Cantabria.

2.2.3 Principio de Funcionamiento de la Bomba de Ariete Hidráulico

Si tratamos de entender cómo funciona una bomba hidráulica de ariete, primero nos enfocaremos en dilucidar el procedimiento que se repetirá continuamente: Antes de que el agua descargue a través de la válvula check en la caja de válvulas, gotea desde el depósito a través de la tubería de suministro cuando se abre la válvula check. La fuerza de arrastre que el líquido aplica a la clapeta de la válvula check crece a medida que se acelera, hasta que alcanza un punto crítico en el que la clapeta se ve obligada a cerrarse:

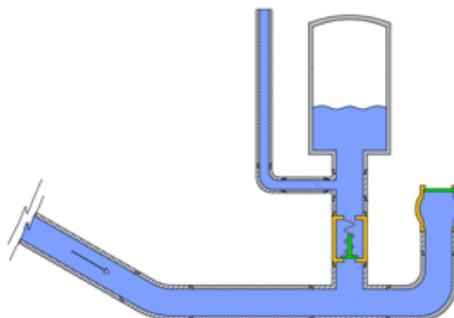


Ilustración 2.5. La fuerza de arrastre del agua provoca que la válvula de choque se cierre de golpe.

Fuente: Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete.

Cuando la válvula de check se cierra repentinamente, el agua que atraviesa la tubería de suministro de agua todavía tiene una energía cinética alta. Dicha energía cinética se va perdiendo a expensas de un aumento repentino de presión en la caja de válvulas.

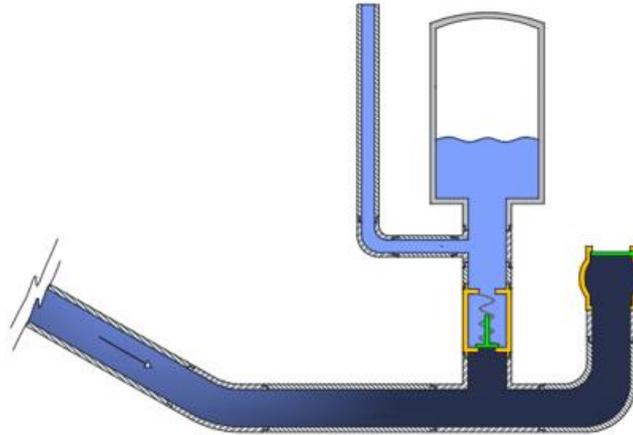


Ilustración 2.6. Se produce un ‘golpe de ariete’ y aumenta mucho la presión de fluido.

Fuente: Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete.

Dado que la caja de válvulas tiene altas presiones, hace posible que la válvula check vertical se abra y el líquido pase desde la caja de válvulas a la cámara de aire por el elevador.

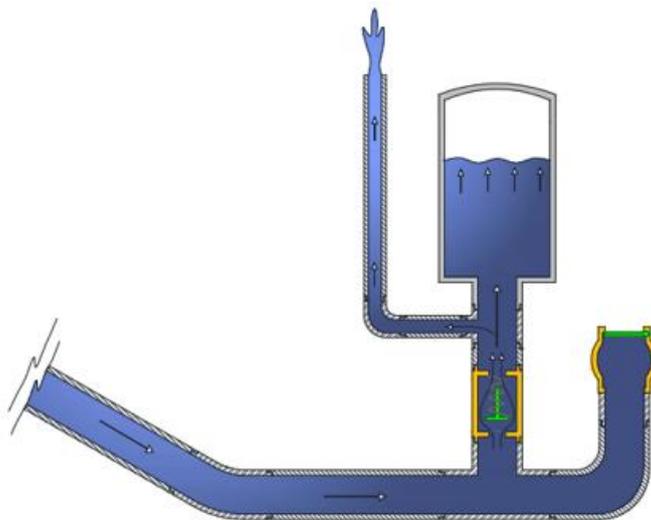


Ilustración 2.7. La válvula check se abre y permite el paso de agua hacia la cámara de aire y la tubería de elevación.

Fuente: Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete.

El fluido sube por el tubo de presión, de salida o de elevación cuando la válvula de retención se cierra, deteniendo el flujo de fluido y transfiriendo al fluido la presión que se ha acumulado en el aire del interior de la cámara.

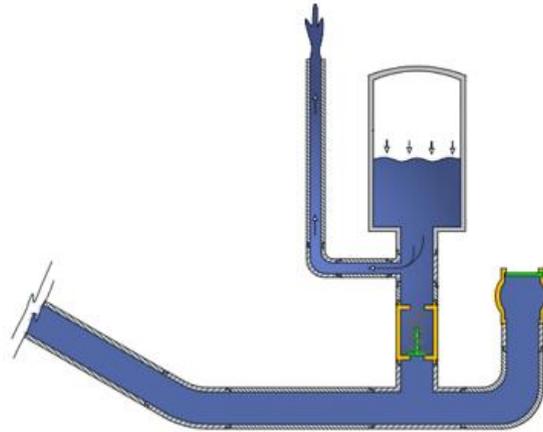


Ilustración 2.8. Cierre de válvula check, se libera agua por la tubería de elevación.
Fuente: Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete.

El flujo de agua se reanuda después de un tiempo cuando la tapa de la válvula check se abre debido a su propio peso y la presión de la caja de la válvula sigue bajando.

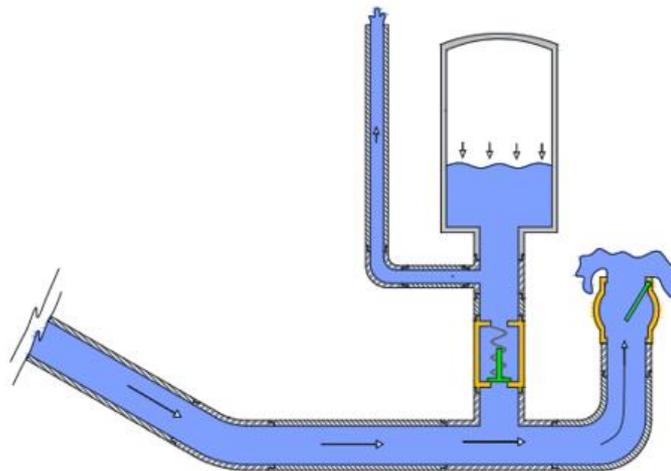


Ilustración 2.9. Apertura de la válvula de choque y reinicio del proceso.
Fuente: Estudio teórico y experimental de la bomba de ariete.

En este sentido, el proceso se repite hasta que se cierra conscientemente una llave de paso, momento en el que nos encontramos de nuevo donde empezamos.

2.2.4 Componentes en su instalación

2.2.4.1 Rejilla o Válvula de Pie

Esta es una válvula que sirve para evitar el retorno del agua en un sentido específico, además de cumplir la función de evitar el ingreso de desechos o materias extrañas al suministro de agua del ariete.

2.2.4.2 Tanque de almacenamiento o Reservorio

Una fuente continua de agua, generalmente un río, desde el cual el agua bombeada regresa unos metros más abajo. También puede ser un tanque lo suficientemente grande, generalmente hecho de geomembranas o concreto armado. Para abastecer la bomba esta fuente de agua debe ubicarse a una altura por encima del nivel del agua H donde se encuentra la bomba de ariete. Un valor común para esta altura H puede oscilar entre 2 y 5 metros, dependiendo del tipo de bomba que se utilice, la altura final a bombear y el rendimiento deseado (6).

2.2.4.3 Tubería de alimentación

El tubo de alimentación de agua conectará el canal que alimentará la bomba con el ariete hidráulico, que junto con la caja de válvulas conforman el elemento fijo más importante y al mismo tiempo en resistir con mayor fuerza la acción del golpe de ariete.

2.2.4.4 Válvula de cierre

Es una pieza opcional que funciona como llave de paso para iniciar o detener la actividad de la bomba de ariete. Las bombas de ariete fijas están hechas para funcionar continuamente, mientras que otros solo requieren una cantidad fija de agua.

2.2.4.5 Caja de válvulas

En esta zona se genera la inversión de la onda de presión y es donde se ubica la válvula de impulsión y la válvula de descarga, que a su vez conforman el cuerpo del ariete.

2.2.4.6 Válvula de servicio

Este es un tipo de válvula check que va a facilitar circulación del agua desde la caja de válvulas a la cámara de aire, impidiendo el retorno del líquido al cerrarse la válvula, ocasionado esto por la acción de rebote producida por el aire comprimido en la cámara, que permite que el agua suba por encima del nivel de captación. Debe construirse de forma que se consiga una buena estanqueidad para evitar pérdidas de eficacia y rendimiento. La válvula de escape se compone de una brida, una placa de goma, una placa semiesférica y un tornillo de apriete, y está situada en la parte inferior de la cámara de aire (7).

2.2.4.7 Válvula de Choque o Impulso

Es el componente más importante y fundamental en el funcionamiento de la bomba. Debido al cierre brusco provocado por el aumento de la velocidad del agua, genera golpes de ariete. Mediante la fuerza de un resorte metálico que se comprime por cada ciclo específicamente para este fin y

montados en el vástago de la válvula, ésta controla el volumen del líquido que entra en la cámara de aire alterando la frecuencia y la cantidad de golpes por minuto (7).

2.2.4.8 Cámara de aire

Es el dispositivo que regula el flujo de agua a la tubería de descarga, absorbe el exceso de presión (actuando como amortiguador) y conduce el agua a través de la tubería de descarga, proporcionando así un flujo casi continuo a niveles más altos al área de captación (7).

2.2.4.9 Válvula de aire

Puede colocarse dentro en la cámara de aire para reponer y acondicionar el aire que ha absorbido el agua que se ha filtrado fuera de la cámara (7).

2.2.4.10 Tubería de Descarga

Inmediatamente después de su salida de la cámara de aire, el agua es transportada por este conducto hasta el depósito de almacenamiento. Es posible crearla utilizando una manguera de goma, pvc o material metálico; sin embargo, hay que tener en cuenta la presión máxima que produce la columna de agua bombeada (7).

2.2.5 Esquema de componentes en la instalación de una Bomba de Ariete Hidráulico

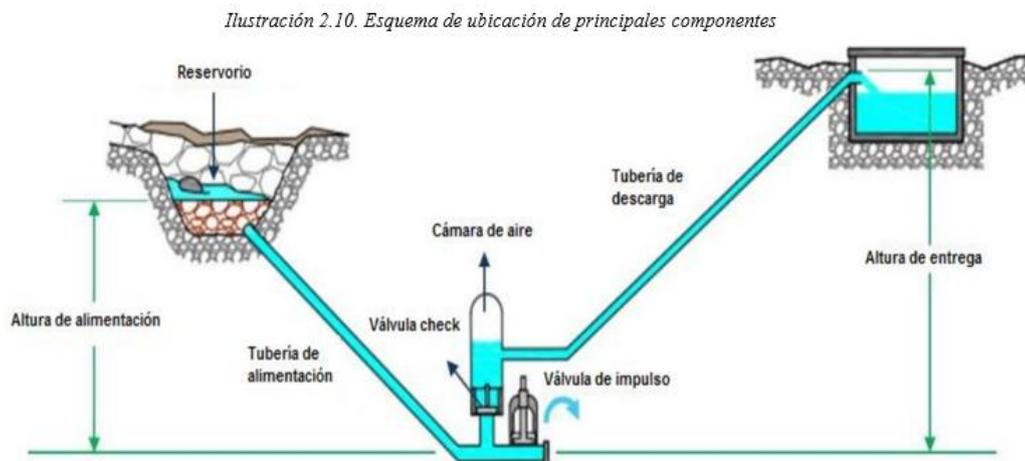


Ilustración 2.10. Esquema de ubicación de principales componentes.

Fuente: E-proceedings of the 36th Iahr Worl Congress 2015.

2.3 DEFINICIÓN DE FLUIDO

Un sólido debe ejercer una fuerza importante para deformarse en una forma limitada o discreta, mientras que un fluido es una porción de materia que se deforma continuamente cuando se le aplica una fuerza, por mínima que sea (8).

2.4 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

La conducción de fluido va a ser afectadas por sus propiedades físicas, las más principales son:

2.4.1 Densidad

Se define como masa por unidad de volumen. Las unidades utilizadas en su sistema internacional son [kg/m³]. Cuando un fluido es uniforme, su densidad es constante en todo su recorrido y puede expresarse como:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Ec. (N°01)}$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido (kg/m).

m : Masa del fluido (kg-m).

V : Volumen del fluido (m³).

2.4.2 Volumen Específico

El volumen que ocupa la unidad de masa se llama volumen específico. Para fluidos homogéneos, se define como (9):

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{Ec. (N°02)}$$

Donde:

v : Volumen específico del fluido (kg/m).

m : Masa del fluido (kg-m).

V : Volumen del fluido (m³).

2.4.3 Peso Específico

El peso por unidad de volumen es la definición del peso específico. En el sistema internacional, se mide en [N/m³]. En el caso de un fluido uniforme, sería (9):

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad \text{Ec. (N°03)}$$

$$\gamma = \rho \cdot g \quad \text{Ec. (N°04)}$$

Donde:

γ : Peso específico (N/m³).

W : Peso del fluido (kg-f).

V : Volumen del fluido (m³).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

g : Aceleración de la gravedad (m/s²).

2.4.4 Viscosidad

La viscosidad funciona de forma similar a la fricción en el movimiento de un sólido, ya que refleja la resistencia al cambio de un fluido. Aunque la viscosidad siempre está presente en algún grado tanto en los fluidos compresibles como en los incompresibles, no siempre es necesario tenerla en cuenta (9).

2.4.5 Viscosidad Absoluta

Según la composición del fluido, la viscosidad dinámica o absoluta denota lo contrario de la fuerza de rozamiento que impide el movimiento. En el sistema internacional, $[\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}]$ o $[\text{N s m}^{-2} \equiv \text{Pa s}]$ es la unidad de viscosidad dinámica. La presión influye muy poco en la viscosidad dinámica (μ), mientras que la temperatura tiene una influencia sustancial (9).

2.4.6 Viscosidad cinemática

La fórmula de la viscosidad cinemática, ν , es $\nu = \mu/\rho$. En el sistema internacional, esta fórmula tiene una dimensión de $[\nu] = \text{m}^2 \text{s}^{-1}$. Las características dinámicas del fluido no influyen en la viscosidad cinemática (9).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. (N°05)}$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s).

μ : Viscosidad absoluta o dinámica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$).

ρ : Densidad del fluido (kg/m^3).

2.5 PROPIEDADES DEL AGUA

Las características físicas primarias del agua a distintas temperaturas se presentan en la siguiente Tabla 2.1:

Tabla 2.1.*Principales propiedades físicas del agua*

UNIDADES SISTEMA INTERNACIONAL						
Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad μ (N.s/m ²)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kPa)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)
0	999.9	1.792 x 10 ⁻³	1.792 x 10 ⁻⁶	0.0762	0.61	1.98 x 10 ⁶
5	1000	1.519 x 10 ⁻³	1.519 x 10 ⁻⁶	0.0754	0.872	2.06 x 10 ⁶
10	999.7	1.308 x 10 ⁻³	1.308 x 10 ⁻⁶	0.0748	1.13	2.11 x 10 ⁶
15	999.1	1.140 x 10 ⁻³	1.141 x 10 ⁻⁶	0.0741	1.6	2.14 x 10 ⁶
20	998.2	1.005 x 10 ⁻³	1.007 x 10 ⁻⁶	0.0736	2.34	2.20 x 10 ⁶
30	995.7	0.801 x 10 ⁻³	0.804 x 10 ⁻⁶	0.0718	4.24	2.23 x 10 ⁶
40	992.2	0.656 x 10 ⁻³	0.661 x 10 ⁻⁶	0.0701	3.38	2.27 x 10 ⁶
50	988.1	0.549 x 10 ⁻³	0.556 x 10 ⁻⁶	0.0682	12.3	2.30 x 10 ⁶
60	983.2	0.469 x 10 ⁻³	0.477 x 10 ⁻⁶	0.0668	19.9	2.28 x 10 ⁶
70	977.8	0.406 x 10 ⁻³	0.415 x 10 ⁻⁶	0.0650	31.2	2.25 x 10 ⁶
80	971.8	0.357 x 10 ⁻³	0.367 x 10 ⁻⁶	0.0630	47.3	2.21 x 10 ⁶
90	965.3	0.317 x 10 ⁻³	0.328 x 10 ⁻⁶	0.0612	70.1	2.16 x 10 ⁶

Fuente: Jean Francois DULHOSTE – Escuela de Ingeniería Mecánica - ULA

2.6 DEFINICIÓN DE FLUJO

Movimiento o circulación de un fluido sin alterar sus propiedades físicas o químicas.

2.7 TIPOS DE FLUJO

2.7.1 Flujo permanente

Este tipo de flujo también se denomina flujo estacionario, ya que se define así por las condiciones de velocidad de escorrentía en un momento dado permanecen constantes o varían con respecto a un valor medio. Del mismo modo, en un flujo continuo nunca se producen cambios de temperatura, presión o densidad a lo largo del tiempo (10).

$$\frac{a\rho}{at} = 0 \quad \frac{aT}{at} = 0 \quad \frac{ap}{at} = 0$$

2.7.2 Flujo no permanente

A menudo denominado flujo en estado estacionario, este tipo de flujo suele tener características mecánicas y de fluido que cambian de un punto a otro de su campo, siempre que los atributos de un punto concreto también cambien con el tiempo (10).

$$\frac{a\rho}{at} \neq 0 \quad \frac{aT}{at} \neq 0 \quad \frac{ap}{at} \neq 0$$

2.7.3 Flujo laminar

Las partículas de fluido se mueven siguiendo trayectorias muy regulares, distintas y bien definidas, dando la apariencia de que se trata de láminas o capas aproximadamente paralelas entre sí y que se deslizan suavemente unas sobre otras sin que haya mezclas horizontales o macroscópicas entre ellas (10).

2.7.4 Flujo turbulento

Las partículas de fluido en este tipo de flujo siguen trayectorias inestables, que están marcadas por una irregularidad extrema y una falta de orden definido. Esto provoca una transferencia de movimiento a gran escala, similar a la transferencia de movimiento molecular, de una zona del fluido a otra (10).

2.8 NÚMERO DE REYNOLDS

Muchos problemas de dinámica de fluidos implican la relación entre el número de Reynolds (NR), la densidad, la viscosidad, la velocidad y las dimensiones típicas en una formulación adimensional. Este número indica si el flujo es turbulento o laminar. (11)

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad \text{Ec. (N°06)}$$

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad \text{Ec. (N°07)}$$

Donde:

Re : Numero adimensional Reynolds.

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

V : Velocidad media del fluido (m/s).

D : Diámetro interno del conducto (m).

μ : Viscosidad absoluta o dinámica (Pa.s).

ν : Viscosidad cinemática (m²/s).

Entonces podemos decir que el Reynolds se puede definir como:

- Flujo laminar se produce cuando, $N^\circ Re < 2000$.
- Flujo en transición se produce cuando, $2000 < N^\circ Re < 4000$.
- Flujo turbulento se produce cuando, $N^\circ Re > 4000$.

2.9 DEFINICIÓN CAUDAL

El volumen de fluido que pasa a través de un segmento de tubería (tubo, tubería, cañería, río o canal) en una unidad de tiempo, se conoce como caudal en mecánica de fluidos. Para identificarlo se suele utilizar el volumen que fluye a través de una determinada región en una determinada cantidad de tiempo o caudal volumétrico (12).

2.10 ECUACIÓN DE CONTINUIDAD

El principio de continuidad es aplicado para calcular la velocidad de flujo de un fluido en sistemas cerrados de tuberías.

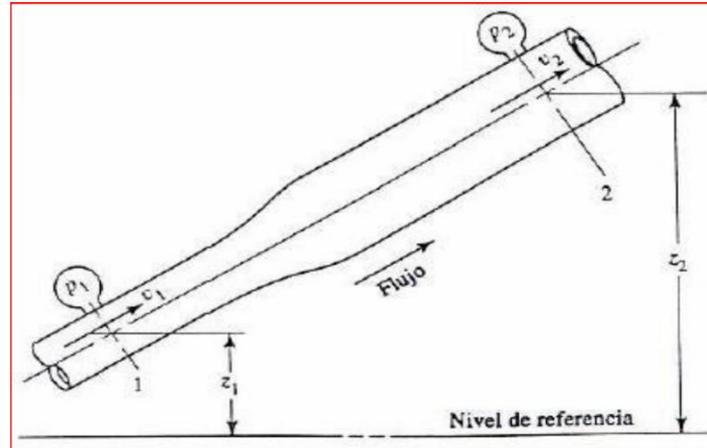


Ilustración 2.11. Tubería de secciones diferentes.

Fuente: Mecánica de fluidos aplicada Robert L. Mott (1996).

Si consideramos una tubería con dos secciones distintas a través de las cuales se mueve un fluido a velocidad constante, podemos suponer que el volumen de fluido que pasa por cualquiera de las dos secciones en un periodo de tiempo determinado, es el mismo y se mantiene así a lo largo del conducto, analizando el caso si no se agrega o retira fluido del conducto, entonces este será constante, el volumen de líquido que pasa por la tubería 1 en un periodo de tiempo debe ser el mismo que pasa por la tubería 2.

Expresándolo en función de la rapidez de masa tendríamos la siguiente ecuación.

$$m_1 = m_2 = \rho_1 * v_1 * A_1 = \rho_2 * v_2 * A_2$$

Si el fluido que circula por ambas secciones se considera incompresible, y que la densidad del fluido es constante a lo largo de las tuberías la siguiente expresión se reduce a:

$$Q_1 = Q_2$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Ec. (N°08)

Donde:

Q_1 = Caudal que pasa por la sección 1 (m³ /s)

Q_2 = Caudal que pasa por la sección 2 (m³ /s)

V_1 = Velocidad media del fluido en la sección 1 (m/s)

V_2 = Velocidad media del fluido en la sección 2 (m/s)

A_1 = Área de la sección transversal del conducto en la sección 1 (m²)

A_2 = Área de la sección transversal del conducto en la sección 2 (m²)

ρ_1 = Densidad del fluido en la sección 1 (kg/m³)

ρ_2 = Densidad del fluido en la sección 2 (kg/m³)

2.11 ECUACIÓN DE BERNOULLI

Esta fórmula se obtiene utilizando la ecuación de Navier-Stokes para fluidos reales y la ecuación de Euler para un fluido ideal. Cuando se utiliza el principio de conservación de la energía, la energía es energía interna que se mueve en el fluido y está causada por la presión, la velocidad y la ubicación espacial. Cuando la ley de la energía está en equilibrio, puede traducirse en la siguiente ecuación en la dirección del flujo: E. Sec. 1 + E. Sumado – E. faltante – E. Restado = E. Sec. 2. Esta ecuación muestra que la diferencia de energía interna es aproximadamente mínima debido a fluidos constantes con fluidos incompresibles.

Ya que el flujo permanente de fluidos es incompresible y los cambios en su energía interna es despreciable, La ecuación tomará la siguiente forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_A - H_L - H_E = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. (Nº09)}$$

Donde:

P_1 = Presión en la sección 1 (N/m²).

P_2 = Presión en la sección 2 (N/m²).

Z_1 = Energía potencial del fluido en la sección 1 (m).

Z_2 = Energía potencial del fluido en la sección 2 (m).

V_1 = Velocidad media del fluido en la sección 1 (m/s).

V_2 = Velocidad media del fluido en la sección 2 (m/s).

γ = Peso específico del fluido (N/m³).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

H_A = Adición de energía (m).

H_L = Remoción de energía (m).

H_E = Pérdidas de energía (m).

2.12 PÉRDIDAS DE CARGA

La reducción de presión que se produce en un sistema de tuberías cuando el fluido pasa por sus conductos se conoce como pérdida de carga. Esto se genera por la viscosidad del fluido lo cual hace que se genere fricción en la pared o accesorios de las tuberías con el fluido e interacciones entre diferentes fases del fluido. Esta pérdida se divide 2 partes pérdidas primarias y pérdidas secundarias.

2.12.1 Pérdidas primarias

Estas pérdidas se relacionan con las pérdidas de energía producidas en el recorrido de un fluido por el rozamiento entre las partículas del líquido y las paredes de la tubería. Mediante la fórmula de Darcy-Weisbach podemos hallar estas pérdidas mediante la fórmula universal con las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. (Nº10)}$$

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^5 \cdot g} \quad \text{Ec. (Nº11)}$$

Donde:

h_p = Altura de pérdidas primarias (m).

f = Factor de fricción en función del número de Reynolds y la rugosidad relativa.

D = Diámetro interior de la tubería (m).

V = Velocidad media del fluido (m/s).

Q = Caudal del fluido (m³ /s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

Para resolver la ecuación necesitamos el valor del factor de fricción “f” el cual dependerá directamente del tipo de flujo del fluido, para cada régimen tenemos una ecuación diferente.

2.12.2 Factor de fricción para un régimen laminar

En un flujo laminar para una tubería ya sea lisa o rugosa para hallar el factor de fricción, utilizaremos la fórmula de Pouseuille:

Si $N^\circ Re < 2000$

$$f = \frac{64}{N^\circ Re} \quad \text{Ec. (Nº12)}$$

Donde:

f = Factor de fricción.

$N^\circ Re$ = Número adimensional de Reynolds.

Factor de fricción para un régimen turbulento.

En el caso de flujo turbulento intermedio alto en tuberías debemos utilizar la fórmula de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon}{3.70D} + \frac{2.51}{N^{\circ}Re\sqrt{f}}\right) \quad \text{Ec. (N}^{\circ}\text{13)}$$

Donde:

f = Factor de fricción.

$N^{\circ}Re$ = Número adimensional de Reynolds.

ε = Rugosidad absoluta.

D = Diámetro interno de la tubería (m).

ε / D = Rugosidad relativa.

Dependiendo del tipo de tubería, también podemos determinar la rugosidad absoluta, que se muestra en la tabla siguiente. Para tuberías lisas con muy poca rugosidad, este valor puede ignorarse en el primer término del logaritmo:

Tabla 2.2.*Coefficientes de rugosidad absoluta para tuberías comerciales*

Coefficiente de rugosidad absoluta (ϵ) para tuberías comerciales	
Tipo de tubería	Rugosidad absoluta ϵ (mm)
Vidrio, cobre o latón estirado	< 0.001 (o lisa)
Latón industrial	0.025
Acero comercial	0.045 -0.09
Acero oxidado	0.15 – 4
Acero galvanizado	0.15
Acero inoxidable	0.015
Acero laminado nuevo	0.05
Acero laminado oxidado	0.15 a 0.25
Acero laminado con incrustaciones	1.5 a 3
Acero asfaltado	0.015
Acero roblonado	0.03 a 0.1
Acero soldado, oxidado	0.4
Hierro galvanizado	0.15 a 0.20
Fundición corriente nueva	0.25
Fundición corriente oxidada	01 a 1.5
Fundición asfaltada	0.1
Cemento alisado	0.3 a 0.8
Cemento bruto	Hasta 3
PVC y tubos de plástico	0.0015 – 0.007

Fuente: Computer Applications in Hydraulic Engineering, 5th Edition, Haestad Methods.

En el caso de un $N^{\circ}Re$ muy alto y una tubería con alta rugosidad se recomienda utilizar la segunda ecuación de Karman-Prandtl:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2. \log_{10} \left(\frac{D}{2\epsilon} \right) + 1.74 \quad \text{Ec. (N}^{\circ}14)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

ϵ = Rugosidad absoluta.

D = Diámetro interno de la tubería (m).

ϵ / D = Rugosidad relativa.

Además de estos cálculos, podemos conocer el factor de fricción mediante gráficos que son función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, como el diagrama de Moody que se muestra a continuación:

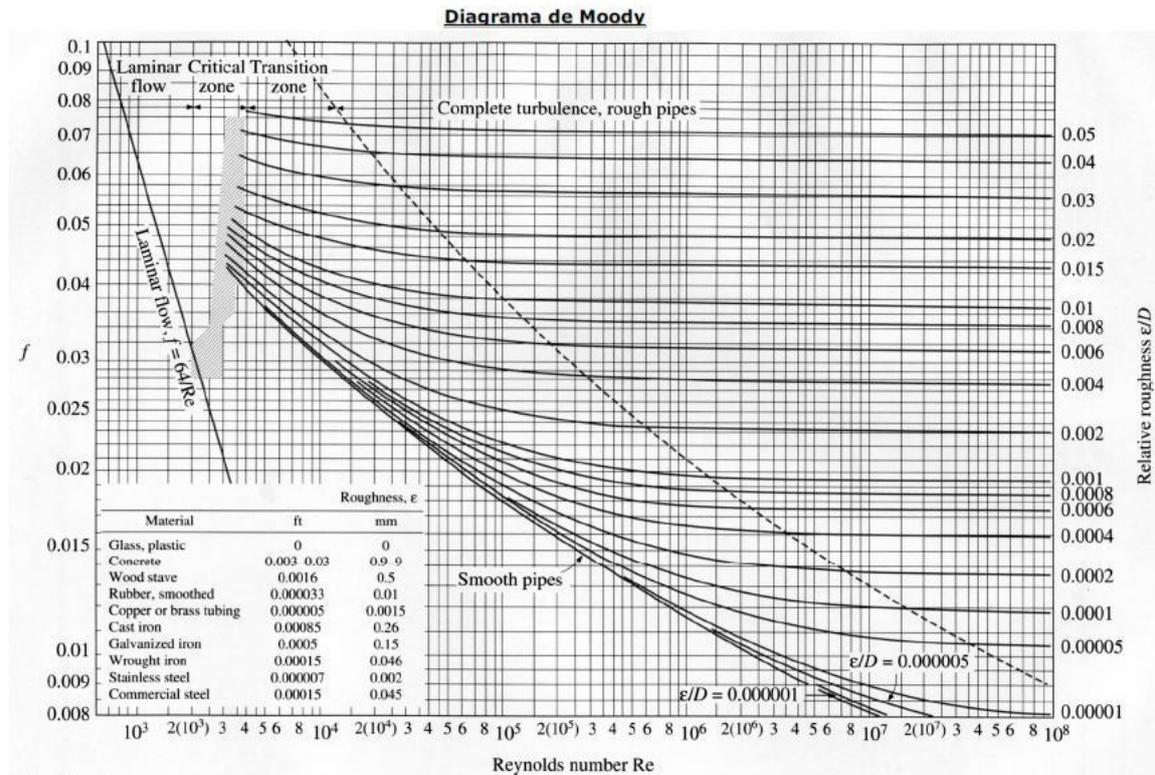


Ilustración 2.12. Diagrama de Moody.

Fuente: Hidráulica de los canales abiertos. Ven Te Chow. 1982

2.12.3 Pérdidas secundarias

También, se les conoce como pérdidas locales, son la pérdida o la caída de presión que se produce cuando el flujo de agua pasa a través de válvulas, codos, tes y toda especie de accesorios en un sistema de tuberías. Si los tramos de tuberías son largos, las pérdidas locales son insignificantes y pueden ignorarse, solo optamos por sumar del 5 al 10% de las pérdidas principales calculadas. Si el sistema de tuberías es corto y complicado.

Las pérdidas locales pueden alcanzar un valor más alto, pudiendo ser mayores a las principales y volviéndolas insignificantes, un método que se utiliza comúnmente es el del factor K , el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$h_S = \Sigma k \cdot \frac{V^2}{2g} = \Sigma k \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g} \quad \text{Ec. (N°15)}$$

Donde:

h_s = Altura de pérdidas secundarias (m).

Σk = Factores adimensionales de pérdidas secundarias.

D = Diámetro interior de la tubería (m).

V = Velocidad media del fluido (m/s).

Q = Caudal del fluido (m³ /s).

g = Aceleración de la gravedad (m/s²).

Para hallar el valor de K usaremos la siguiente tabla:

Tabla 2.3.

Valores de K para accesorios

ACCESORIOS		DIAMETRO NOMINAL (pulg)											
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 ½ - 3	4	6	8 - 10	12 - 16	18 - 24
		VALORES "K"											
Valv. de compuerta abierta		0.22	0.20	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.10	0.10
Valv. de globo abierta		9.20	8.50	7.80	7.50	7.10	6.50	6.10	5.80	5.10	1.80	4.40	4.10
Valv. de retención horizontal check		2.70	2.50	2.30	2.20	2.10	1.90	1.80	1.70	1.50	1.40	1.30	1.20
Valv. de retención oscilatoria horizontal check		1.40	1.30	1.20	1.10	1.10	1.00	0.90	0.90	0.75	0.70	0.65	0.60
Valv. de pie de disco con colador		11.30	10.50	9.70	9.30	8.80	8.00	7.60	7.10	6.30	5.90	5.50	5.00
Valv. de pie de disco con bisagra		2.00	1.90	1.70	1.70	1.70	1.40	1.40	1.30	1.10	1.10	1.00	0.90
Codos estándar	90°	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	90° Radio largo	0.43	0.40	0.37	0.35	0.34	0.30	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	180°	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.90	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60
Curvas de 90°		0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
T en línea con derivación en principal y lateral cerrada		0.54	0.50	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.30	0.28	0.26	0.24
T en línea con circulación por derivación		1.62	1.50	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.90	0.84	0.78	0.72

Fuente: Sotelo G. Hidráulica General. Limusa. México. 1998

Otro método es el de Longitud equivalente.

En esencia, el enfoque de la longitud equivalente, implica construir una longitud imaginaria de tubería recta para cada accesorio del sistema que se va a examinar y que cuando se utilice con la ecuación de pérdidas por fricción, genere una pérdida local idéntica a la generada por dicho accesorio (13).

De esta manera, la Pérdida Total (h_t) del sistema, se obtendrá evaluando tanto las Pérdidas Localizadas como las Pérdidas por Fricción, utilizando la misma ecuación de Pérdida por Fricción para cada diámetro del sistema. La única diferencia es que la longitud real de la tubería (L_r), se sumará a la suma de las Longitudes Equivalentes de cada accesorio para tener una longitud de cálculo de: (13)

$$h_s = f \cdot \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. (N°16)}$$

Donde:

h_s = Altura de pérdidas secundarias (m)

f = Factor de fricción

L_{eq} = Longitud equivalente (m)

D = Diámetro interior de la tubería (m)

V = Velocidad media del fluido (m/s)

Q = Caudal del fluido (m³ /s)

g = Aceleración de la gravedad (m/s²)

Para hallar la longitud equivalente (L_{eq}), haremos uso del monograma presentado en la ilustración 2.13, consideraremos el accesorio con el diámetro de la tubería ya sea nominal o interno, El ábaco cuenta con tres escalas: el tipo de accesorio, la longitud equivalente y la sección de la tubería, identificamos en el Abaco el tipo de accesorio en el lado derecho y lo unimos con el diámetro de la tubería en el lado izquierdo, en el medio interceptaremos una recta, este valor hallado será la Longitud equivalente del accesorio.

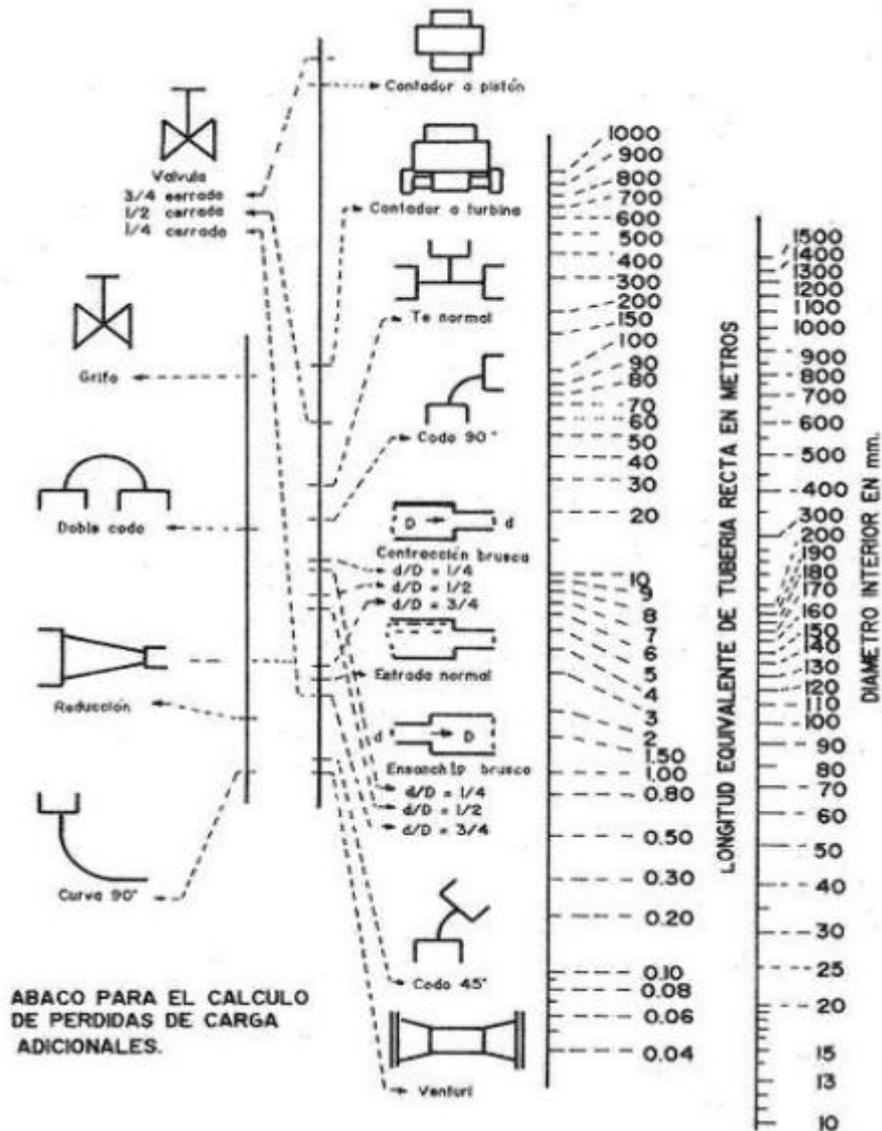


Ilustración 2.13. Monograma para el cálculo de Leg en accesorios.
Fuente: Nomograma de Pérdidas Secundarias de La Firma Gould Pumps, para Accesorios de Tuberías de Agua

2.13 GOLPE DE ARIETE

Cuando una válvula de control se cierra inesperadamente, la presión oscila. Esta rápida oscilación puede hacer que los tubos tiemblen o hagan un ruido sordo en condiciones extremas. Los golpes de ariete suelen generarse por válvulas que se cierran bruscamente o tuberías demasiado pequeñas, lo que provoca un flujo de agua a gran velocidad (14).

La bomba de ariete funciona debido a la repetición continua de este fenómeno, para lo cual emplea una tubería de alimentación de mayor diámetro que la de descarga (14). Para una máxima eficiencia se trata de generar más golpes de ariete en un menor tiempo ya que se generará mayor sobrepresión.

2.13.1 Cálculo de la celeridad y duración del transitorio

La velocidad a la que la onda de sobrepresión se mueve a través del agua de las tuberías tras la ocurrencia de un cierre de válvula o una interrupción abrupta del bombeo, se conoce como velocidad (a) (15).

Una derivación de la ecuación de movimiento y continuidad (15) produce la siguiente ecuación para el agua (15):

$$a = 9900 / \sqrt{48,3 + \left[\frac{10}{\epsilon} \right] D / e} \quad \text{Ec. (N°17)}$$

Dónde

a = celeridad en (m/s).

D = diámetro del tubo (mm).

e = espesor de tubo (mm).

ϵ = módulo de elasticidad de la tubería (kg/m²).

Los valores del módulo de elasticidad de la tubería usada se presentan a continuación:

Tabla 2.4.

Módulo de elasticidad de diferentes materiales

Material de la tubería	ϵ (kg/m ²)
Hierro y acero	2×10^{10}
Fundición	1×10^{10}
Hormigón	2×10^9
PVC	3×10^8
PE baja densidad	2×10^7
PE alta densidad	9×10^7

Fuente: Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas, Guevara Rodríguez, Vargas Obando, Quesada Chanto. Tecnología en marcha 34(1), 2021

Cuando la onda viaja desde su origen hasta el final de su conducción y luego regresa a su punto de origen, se reconoce que ha pasado por una fase en el ciclo del golpe de ariete. Se trata de un hecho bien conocido. En consecuencia, no es difícil averiguar el tiempo de la fase (t_o) en la que la onda recorre una distancia L , siempre que se tengan en cuenta la longitud de la sección y la celeridad de la que se ha hablado antes (15).

$$t_o = \frac{2 \cdot L}{a}$$

2.13.2 Determinación del tipo de cierre

Tanto Joukowski, que vivió en la segunda mitad del siglo XIX, como Allieve, que vivió en 1903, ampliaron este concepto señalando que el tiempo de duración de la fase (t_o) es igual a la

relación entre la longitud de la onda (que es el doble de su distancia de conducción) y su celeridad. Ahora que sabemos si el tiempo que tarda la válvula en cerrarse o la bomba en pararse es menor o mayor que el tiempo de fase, estamos en mejores condiciones de comprender las circunstancias que provocan los casos de sobrepresiones en la línea (15).

2.13.2.1 Cierre rápido

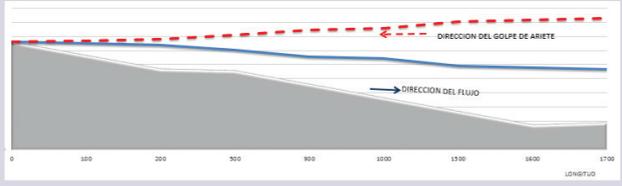
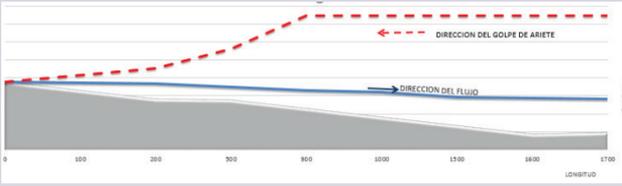
Si el tiempo que tarda la válvula en cerrarse o la bomba en pararse es inferior al tiempo de fase, estamos ante una parada rápida. Esto se debe a que la onda sigue yendo y viniendo incluso después de que el sistema se haya detenido por completo. Esto significa que la sobrepresión persistirá en toda la tubería y no cambiará hasta un momento preciso, que vendrá dictado por la gravedad del choque (15).

2.13.2.2 Cierre lento

Se produce un cierre lento si el tiempo de cierre de la válvula o de parada de la bomba supera el tiempo de fase. Esto se debe a que la onda ha completado su movimiento de un lado a otro, pero el sistema aún no ha alcanzado el cierre completo. En estas condiciones, la sobrepresión alcanza su punto máximo en el punto de cierre de la tubería y posteriormente disminuye linealmente hasta el origen de la tubería (15).

Tabla 2.5.

Criterios para el tipo de cierre

Comportamiento de la sobrepresión	Tipo de cierre	Criterio de comparación
	Lento	$T_c > t_0 = \frac{2 \cdot L}{a}$
	Rápido	$T_c < t_0 = \frac{2 \cdot L}{a}$

Fuente: Prevención del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas, Guevara Rodríguez, Vargas Obando, Quesada Chanto. Tecnología en marcha 34(1), 2021

2.13.3 Cálculo de sobrepresiones

Podemos examinar el comportamiento de la línea piezométrica recién instalada cuando se expone a la onda de sobrepresión resultante de una parada del sistema clasificando los cierres de

válvula en criterios rápidos y lentos. Con la modelización, ahora podemos determinar la sobrepresión máxima en función del tiempo de cierre o de parada del sistema.

Cuando la velocidad de cierre es más lenta que los tiempos de subida y bajada de la onda, se produce el cierre lento. Esto disminuye la sobrepresión desde el extremo del tubo hasta su origen al impedir que las ondas choquen en cualquier punto y producir el punto de máxima energía en el lugar de cierre. La fórmula de Michaud establece que la sobrepresión depende del diferencial del cambio de velocidad y es el doble de la longitud, o distancia, que recorre la onda. La situación más grave sería que el sistema se detuviera por completo con una velocidad final nula (15).

fórmula de Michaud para cierre lento

$$\Delta H = \frac{2.L.V}{g.T} \quad \text{Ec. (N°18)}$$

Donde

ΔH = sobrepresión expresada en metro de columna de agua.

L = Distancia.

V = Velocidad.

g = Aceleración de la gravedad.

T = Tiempo de parada.

En consecuencia, en los sistemas de cierre rápido, la sobrepresión no se produce necesariamente en el punto de parada, sino que se desplaza progresivamente desde el punto de inicio de la carrera hasta un lugar determinado, a diferencia de los sistemas de cierre lento, en los que las ondas de sobrepresión acaban chocando dentro del sistema. Como resultado, el valor de la sobrepresión es constante e independiente de la longitud de la tubería (15).

fórmula de Allievi para cierre rápido

$$\Delta H = \frac{\alpha.V}{g} \quad \text{Ec. (N°19)}$$

2.13.4 Ciclo teórico del ariete hidráulico

- La complejidad de los fenómenos físicos implicados, el factor de velocidad, el diseño hidráulico y la naturaleza simultánea contribuyen a que el funcionamiento hidráulico del ariete sea poco claro. Si no se recurre a la experimentación, los supuestos de un modelo puramente teórico son falsos, ya que las variables del proceso no satisfacen las fórmulas matemáticas. De la investigación sobre el ariete se desprenden tres categorías principales:
- Métodos empíricos: basados en fructíferas pruebas experimentales teóricamente sin fundamento o irrelevante. Las fórmulas empíricas son insuficientes para predecir la forma de trabajo del ariete hidráulico dado que el funcionamiento del ariete hidráulico está en función de muchas variables, que se ignoran en el estudio.

- Métodos analíticos: utilizando los conceptos de la mecánica de fluidos y la hidráulica para tratar de predecir la tasa de variación de los índices de deformación del agua en el conducto de impulsión en cada ciclo. Dado que las técnicas empíricas han arrojado resultados más precisos sobre los parámetros asociados al funcionamiento de Hydrum, estos métodos no han obtenido una aceptación generalizada.
- Métodos racionales: basado en el análisis teórico de la bomba de ariete hidráulico, de eficacia empíricamente demostrada. Define el proceso de análisis de la bomba de ariete hidráulico que ha demostrado ser el más eficaz. Krol ha creado un modelo matemático que conecta los datos teóricos y experimentales, interpretando los fenómenos físicos que se producen en una bomba de ariete de la mejor y más precisa manera posible a pesar de la multitud de variables y procesos que intervienen al mismo tiempo.

2.13.5 Modelo de Krol

Después de describir el funcionamiento de una instalación típica de ariete hidráulico, el artículo revisa los fundamentos del golpe de ariete como requisito previo para la comprensión adecuada de las limitaciones de esta máquina hidráulica. El desarrollo histórico se discute con algún detalle con el objeto de determinar qué trabajo de investigación quedaba por hacer. El autor presenta su propia teoría basada en la aplicación de las leyes generales de la mecánica al estudio de un ariete hidráulico experimental especialmente diseñado. Por medio de una teoría desarrollada, que concuerda satisfactoriamente con la experimentación (16).

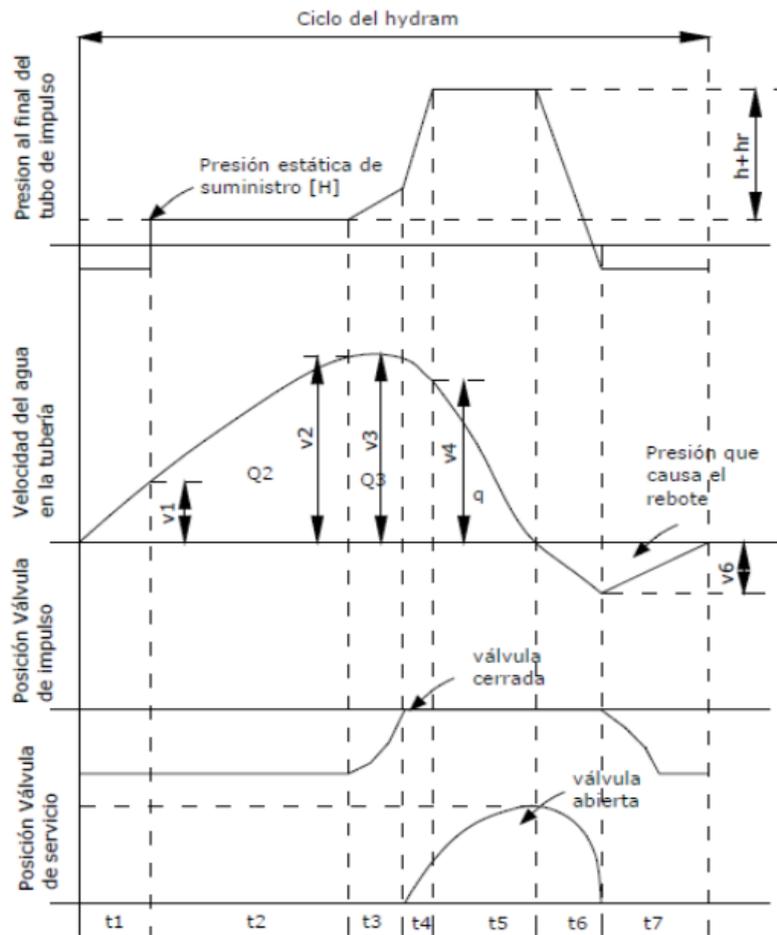


Ilustración 2.14. Ciclo teórico del ariete Hidráulico.
Fuente: Krol, J. (1951) The Automatic Hydraulic Ram. Its Theory and Design.

2.13.5.1 Periodo 1

Este tiempo a veces se denomina fase de aceleración, ya que el agua pierde masa durante este periodo hasta que adquiere suficiente energía cinética para provocar que la válvula se cierre. El periodo comienza al momento del ciclo cuando el agua ha regresado al depósito a una longitud "y" del extremo inferior del tubo de impulsión como resultado de los efectos del ciclo anterior (17).

El agua de la tubería de alimentación está totalmente en reposo y la presión atmosférica en el cuerpo del ariete; esto cambiará cuando la carga de agua del depósito de alimentación actúe sobre él. A la inversa, la carga de servicio que actúa sobre la válvula de suministro o de servicio la mantiene cerrada o en su asiento. Se forma una bolsa de aire, y el pequeño volumen de aire se mantiene en su sitio por la succión o vacío que el agua residual crea alrededor de la válvula de impulsión. El periodo 1 concluye cuando la parte delantera de la columna de agua entra en contacto con la válvula de impulsión (17).

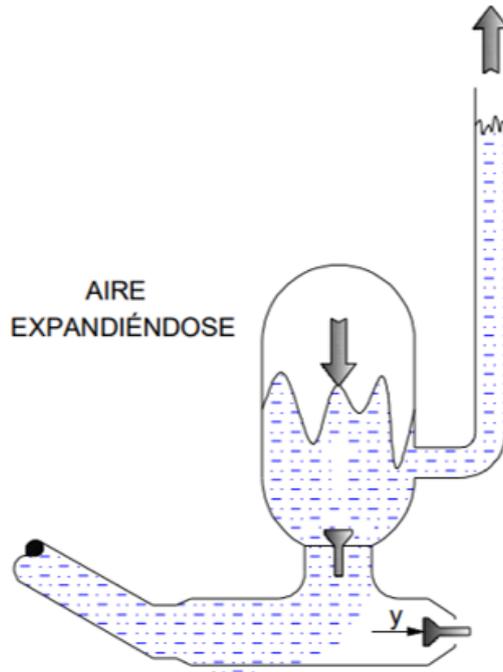


Ilustración 2.15. Periodo 1 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011).
 Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

Ya que las pérdidas durante este tiempo son despreciables, la ecuación del movimiento puede expresarse del siguiente modo.

$$H = \left(\frac{L}{g}\right) \frac{dv}{dt} \quad \text{Ec. (N°20)}$$

En el transcurso de dicho periodo, el agua tiene que recorrer la distancia “y”, lo que significa que:

$$V = \frac{dy}{dt}$$

Al reemplazar en la ecuación

$$H = \frac{Ld^2y}{gdt^2}$$

Integrando estas ecuaciones bajo las condiciones de borde podremos despejar el tiempo y la velocidad del ciclo 1

$$t_1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}}$$

$$y = \frac{Hg}{L} t^2$$

$$V_1 = \frac{gH}{L} t_1 \quad \text{Ec. (N°21)}$$

Donde:

t_1 = Tiempo de duración del periodo 1 (s)

V_1 = Velocidad durante el periodo 1 (m/s)

y = Distancia debida al retroceso del agua (m)

H = Altura del nivel de agua en el depósito de suministro (m)

2.13.5.2 Periodo 2

La figura siguiente ilustra este periodo. Hasta que la carga del resorte se desequilibra, la válvula check de impulsión se mantiene abierta y el agua sigue acelerándose. Mientras aumente la velocidad del flujo de la columna de agua, aumenta también la fuerza de arrastre. La fuerza de arrastre generada por la carga del resorte se desequilibra cuando la velocidad supera cierta magnitud (17):

$$W = A * \rho * \phi(s) * v^2$$

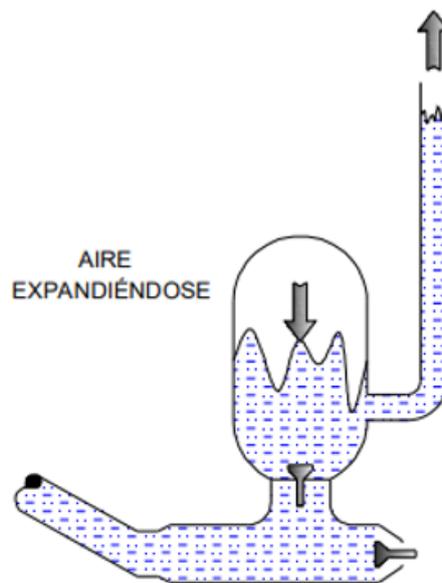


Ilustración 2.16. Periodo 2 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011).
Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

Las pérdidas en el periodo 2 no son insignificantes y el modelo debe tenerlas en cuenta.

Las siguientes expresiones proporcionan los valores para el peso de la válvula de impulsión, la fuerza de arrastre y la velocidad alcanzada:

$$F_{\text{arrastre}} = \frac{KA\gamma V_2^2}{g} \quad \text{Ec. (N}^\circ\text{22)}$$

$$W = A \cdot \rho \cdot K_0 V_2^2$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{W \cdot g}{K_0 \cdot A \cdot \gamma}} \quad \text{Ec. (N°23)}$$

Donde:

$F_{arrastre}$ = Fuerza de arrastre (N).

W = Peso de la válvula de impulso (N).

K_0 = Coeficiente de resistencia al cierre de la válvula impulso.

V_2 = Velocidad máxima para producir el cierre de la válvula de impulso (m/s).

A = Área de la válvula de impulso (m²).

g = Aceleración gravitatoria (m/s²).

γ = Peso específico del fluido (N/m³).

La pérdida de fluido producido por la válvula de impulso en un tiempo diferencial dt , tendrá un volumen de: (17)

$$Q_2 \frac{\pi D^2 L}{4M} \cdot \ln Z \quad \text{Ec. (N°24)}$$

El coeficiente total de pérdidas “Z” está definido por la siguiente expresión: (17)

$$Z = \frac{\frac{2 \cdot g \cdot H}{M} - V_1^2}{\frac{2 \cdot g \cdot H}{M} - V_2^2} \quad \text{Ec. (N°25)}$$

Donde:

Z = Coeficiente total de pérdidas.

g = Aceleración gravitatoria (m/s²).

H = Altura del nivel de agua en el depósito de suministro (m).

M = Coeficiente agrupado de pérdidas.

En base a la ecuación de coeficiente total de pérdidas, se tiene que Z , es infinito para:

$$(2 \cdot g \cdot H) / M - [V_2]^2 = 0$$

Reemplazando en la ecuación de la velocidad se tiene:

$$W_{max} (2 \cdot A \cdot H \cdot \gamma \phi_S) / M \quad \text{Ec. (N°26)}$$

Por ende el peso debe oscilar entre los valores ($0 < W < \dots$).

2.13.5.3 Periodo 3

Krol propone una ecuación que utiliza la segunda ley de Newton para determinar cuándo se cerrará la válvula de impulsión en función de los siguientes parámetros: la altura del depósito (H), la longitud y el diámetro de la tubería de impulsión, la carrera y el diámetro de la válvula check de impulsión, la masa total en dicha válvula, la densidad, la gravedad y los coeficientes de pérdida de carga. La válvula de impulsión empieza a cerrarse cuando la velocidad es suficiente para que la fuerza de arrastre que actúa sobre el asiento de la válvula de impulsión sea superior a la carga elástica. (17)

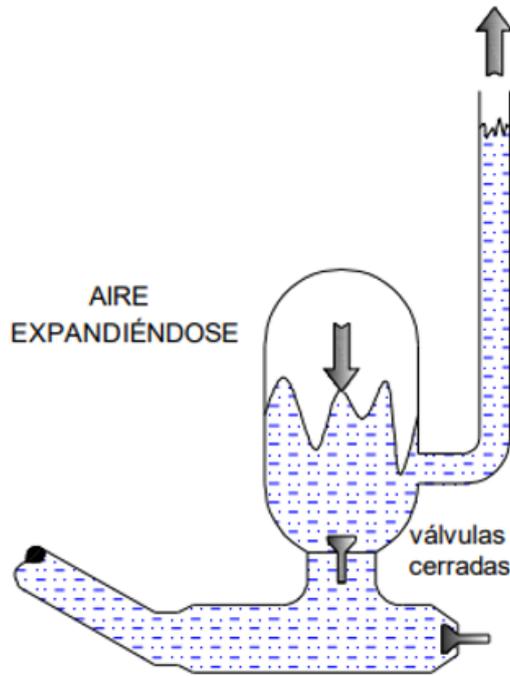


Ilustración 2.17. Periodo 3 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011).
 Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

El hecho de que tanto la válvula de impulsión como el fluido estén en movimiento, complica la comprensión matemática de este tiempo. Por ello, Krol propone la siguiente simplificación matemática utilizando la segunda ley de Newton. (17):

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{L.S. \sqrt{\frac{W.g}{A.\gamma.K_0}}}{4.g.H.(1 - \frac{W.Z}{2A.\gamma.H.K_0})}} \quad \text{Ec. (N°27)}$$

Donde:

t_3 = Tiempo de duración del periodo 3 (s).

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

Dada la breve duración de esta fase, podemos deducir que el caudal dispuesto en este momento puede representarse de la siguiente forma. (17):

$$Q_3 = \gamma . A . V_3 . t_3 = \gamma . A . V_2 t_3 \quad \text{Ec. (N°28)}$$

Donde:

Q_3 = Caudal desechado por la válvula de impulso (m³).

Finalizando el periodo 3, la energía cinética de la columna de agua puede ser hallada con la siguiente ecuación:

$$E_c = \frac{\gamma AL}{2g} . V_3 = \frac{\gamma AL}{2g} . V_2 \quad \text{Ec. (N°29)}$$

Donde:

V4: Velocidad al final del periodo 4 (m/s).

h: Altura de descarga medida desde el nivel de suministro (m).

hr: Pérdida de carga durante el periodo de retardación (m).

Podemos utilizar la siguiente fórmula para calcular la pérdida de carga en la tubería de impulsión, la tubería de descarga y la válvula de descarga a lo largo de este tiempo de retardo:

$$hr = 5.64 \left(1 - \frac{h}{h_{max}}\right) \quad \text{Ec. (N°32)}$$

Donde:

hmax: Altura de descarga máxima desarrollada por el ariete (m).

Teniendo en cuenta una V4=0 y hr= 0, obtenemos una nueva ecuación:

$$h_{max} = \frac{c.V3}{g} \quad \text{Ec. (N°33)}$$

Si V2=V3, entonces, podemos decir que la altura de descarga máxima producida por el ariete será:

$$h_{max} = \frac{c}{g} \cdot \sqrt{\frac{W.g}{A^n \cdot \gamma \cdot K_o}} \quad \text{Ec. (N°34)}$$

Por lo tanto, podemos deducir de esta ecuación que la altura de descarga aumenta con el peso de la válvula de descarga. Por el contrario, tendremos una altura de descarga baja si la válvula de descarga es muy ligera.

El golpe de ariete provocará una pérdida de energía cinética, que puede calcularse mediante la siguiente ecuación. Esta energía se pierde durante la compresión del agua que ya está en la tubería de impulsión y el ensanchamiento de sus paredes.

$$E_{CP} = \frac{m \cdot \Delta V^2}{2} \quad \text{Ec. (N°35)}$$

Donde:

E_CP: Energía cinética pérdida (J).

ΔV^2 : Incremento de la velocidad.

Si:

$$\Delta V^2 = \frac{(h+hr)^2 \cdot g^2}{c^2} \quad \text{Ec. (N°36)}$$

$$m = \frac{\gamma \cdot A \cdot L}{g} \quad \text{(N°37)}$$

Entonces, podemos decir que la energía cinética perdida puede ser expresada de la siguiente ecuación:

$$E_{CP} = \frac{\gamma \cdot A \cdot L \cdot (h+hr)^2 \cdot g}{2 \cdot c^2} \quad \text{Ec. (N°38)}$$

2.13.5.5 Periodo 5

En esta etapa se va a encontrar la válvula check de descarga totalmente abierta, donde va a estar contemplado netamente al bombeo del agua.

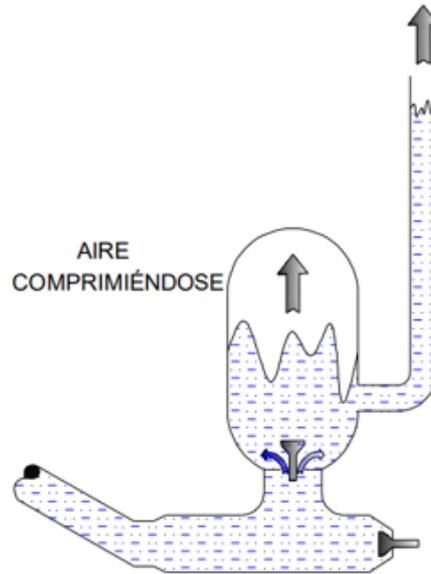


Ilustración 2.19. Periodo 4 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011).
 Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

La energía hidráulica se crea a partir de la energía cinética de la columna de agua que fluye. A continuación, se estimula la cámara de aire para que se llene de agua. Además del aire comprimido que se había almacenado y alojado debajo de la válvula de servicio desde el ciclo anterior, se empuja la masa de agua que satisface los requisitos de presión. (17)

Podemos calcular la cantidad de agua bombeada en cada ciclo mediante la Ley de Conservación de la Energía. También, la energía cinética de la columna de agua al final del periodo, menos la energía cinética utilizada para la expansión de las paredes de la tubería y la compresión del fluido, será igual a la energía utilizable necesaria para bombear agua hasta una altura $(h+hr)$. (17)

$$E_{DISP} = Eh \quad \text{Ec. (N°39)}$$

Donde:

E_{DISP} : Energía disponible.

Eh : Energía hidráulica.

Se tiene que:

$$E_{DISP} = Ec + E_{CP} \quad \text{Ec. (N°40)}$$

$$E_h = q' \cdot (h + hr) \quad \text{Ec. (N°41)}$$

Simplificando la ecuación, tenemos:

$$q' = \frac{E_C - E_{CP}}{h + hr} \quad \text{Ec. (N°42)}$$

Con el Teorema del impulso y la cantidad del movimiento, podemos determinar la duración del periodo 5:

$$\text{Impulso} = \int F dt \int_0^{t_5} \gamma \cdot (h + hr) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \gamma \cdot (h + hr) \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot t_5 \quad \text{Ec. (N°43)}$$

$$\text{Cantidad de movimiento} = \frac{\gamma \cdot A \cdot L}{g} \cdot (V_4 - V_5) \quad \text{Ec. (N°44)}$$

Donde:

V5: Velocidad durante el periodo 5 (m/s).

t5: Tiempo de duración del periodo 5 (s).

Igualando las ecuaciones $F dt = m dv$, se tiene:

$$\gamma \cdot (h + hr) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot t_5 = \frac{\gamma \cdot A \cdot L}{g} \cdot (V_4 - V_5) \quad \text{Ec. (N°45)}$$

Teniendo en consideración sobre la ecuación y que $V_2 = V_3$, el tiempo del periodo 5 queda reducido a la siguiente expresión:

$$t_5 = \frac{L}{g \cdot (h + hr)} \cdot \left[\sqrt{\frac{W \cdot g}{\gamma \cdot A \cdot K_o}} - \frac{(h + hr) \cdot g}{c} \right] \quad \text{Ec. (N°46)}$$

Podemos observar en la ecuación anterior que el tiempo de descarga, disminuye al aumentar la altura de descarga. El ciclo de bombeo finaliza cuando la sobrepresión se reduce gradualmente y el caudal se detiene. No obstante, como el fluido de la cámara de aire tiende a volver al cuerpo del émbolo, el aire tiene una presión mayor, por lo que la válvula de descarga debe funcionar normalmente para garantizar un buen cierre (18).

2.13.5.6 Periodo 6

Para cada una de las dos válvulas, esta duración se calculará como la diferencia entre los tiempos de cierre y apertura de las válvulas de descarga. Cuando la válvula de descarga se cierra, la presión de la cámara de aire es mayor que la del cuerpo del ariete en ese instante. Esto provoca un flujo de retorno de la válvula al depósito, disminuyendo la presión atmosférica del cuerpo del ariete.

Una válvula situada debajo de la válvula de descarga utiliza este espacio de "vacío" para introducir un cierto volumen de aire que sustituya al que pueda haberse disuelto en el agua durante las operaciones de bombeo. Durante esta fase de "vacío", una válvula situada debajo de la válvula de descarga inyecta un volumen de aire para reponer el que pueda haberse disuelto en el agua durante las operaciones de bombeo (18).

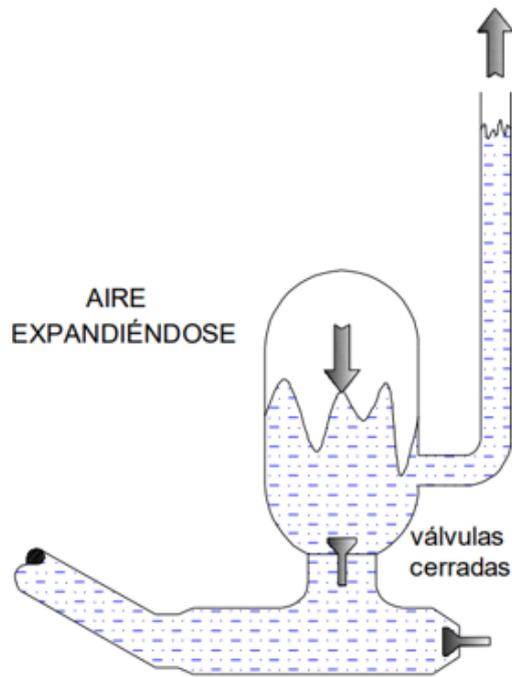


Ilustración 2.20. Periodo 6 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011).
 Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

El agua fluye de la válvula de descarga al depósito durante este periodo, produciendo una velocidad negativa. La energía de deformación del agua y la energía cinética en el tubo de impulsión se igualan para producir esta velocidad:

$$\frac{\gamma \cdot A \cdot L \cdot g \cdot (h + hr)}{2 \cdot c^2} = \frac{\gamma \cdot A \cdot L}{2 \cdot g} \cdot V_6 \quad \text{Ec. (N°47)}$$

$$V_6 = \frac{(h + hr) \cdot g}{c} \quad \text{Ec. (N°48)}$$

Donde:

V₆: Velocidad durante el periodo 6 (m/s).

El tiempo de este periodo puede considerarse como una reflexión completa de una onda de presión por ser muy corto:

$$t_6 = \frac{2 \cdot L}{c} \quad \text{Ec. (N°49)}$$

Donde:

t₆: Tiempo de duración del periodo 6 (s).

2.13.5.7 Periodo 7

El diferencial de presión provocado por el reflujo del agua y su propio peso hace que la válvula de impulsos se abra al concluir el periodo 6.

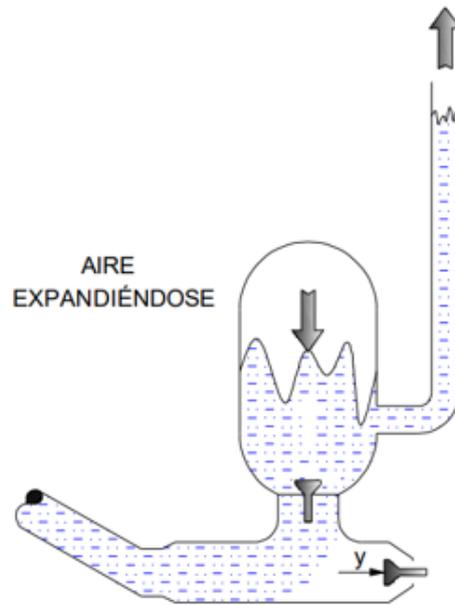


Ilustración 2.21. Periodo 7 – Krol, Ariete Hidráulico.
Fuente: Campaña C. N. & Guamán D. A. (2011). Diseño y construcción de una bomba de ariete hidráulico. Quito.

Al igual que el periodo 1 el tiempo de este periodo resulta de:

$$t_7 = \frac{L}{g.H} \cdot V_7 \quad \text{Ec. (N°50)}$$

Donde:

t_7 : Tiempo de duración del periodo 7 (s).

V_7 : Velocidad durante el periodo 7 (m/s).

Reemplazando el valor de v_6 se tiene:

$$t_7 = \frac{L.(h+hr)}{H.c} \quad \text{Ec. (N°51)}$$

Al igualar $V_1=V_7$ obtendremos la distancia de retroceso:

$$\sqrt{\frac{2.g.H.y}{L}} = \frac{(h+hr).g}{c} \quad \text{Ec. (N°52)}$$

$$y = \frac{(h+hr)^2.L.g}{2.H.c^2} \quad \text{Ec. (N°53)}$$

Donde:

y : Distancia de retroceso del agua (m).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 MÉTODOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.1 Método de investigación

Para identificar patrones de comportamiento y poner a prueba ideas, el presente estudio emplea una metodología cuantitativa que "utiliza la recopilación de datos para probar una hipótesis basada en la medición numérica y el análisis estadístico" (18).

3.1.2 Alcance de la investigación

3.1.2.1 Tipo de investigación

Tamayo y Tamayo (2003), definen la investigación aplicada como "también llamada activa o dinámica, estrechamente vinculada a la investigación pura y dependiente de sus descubrimientos y aportaciones teóricas" (p. 43). Con el fin de reunir conocimientos y hallazgos para el mayor crecimiento posible de la investigación, el presente estudio se elaborará tomando en consideración datos de estudios anteriores realizados en el mismo campo (19).

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 Población

El grupo objeto de estudio y la base sobre la que se pretende generalizar los resultados se conoce como población. Es el conjunto de todas las instancias que se ajustan a una serie de requisitos (18).

En la presente investigación de tipo aplicada la población está dada por el diseño de la bomba de ariete hidráulica la cual representa al producto de la investigación.

3.2.2 Muestra

Esta investigación no cuenta con muestra, dado que no hay un grupo de elementos a la cual hacer enfoque. Si no, demostrar la eficiencia de un equipo puesto en campo.

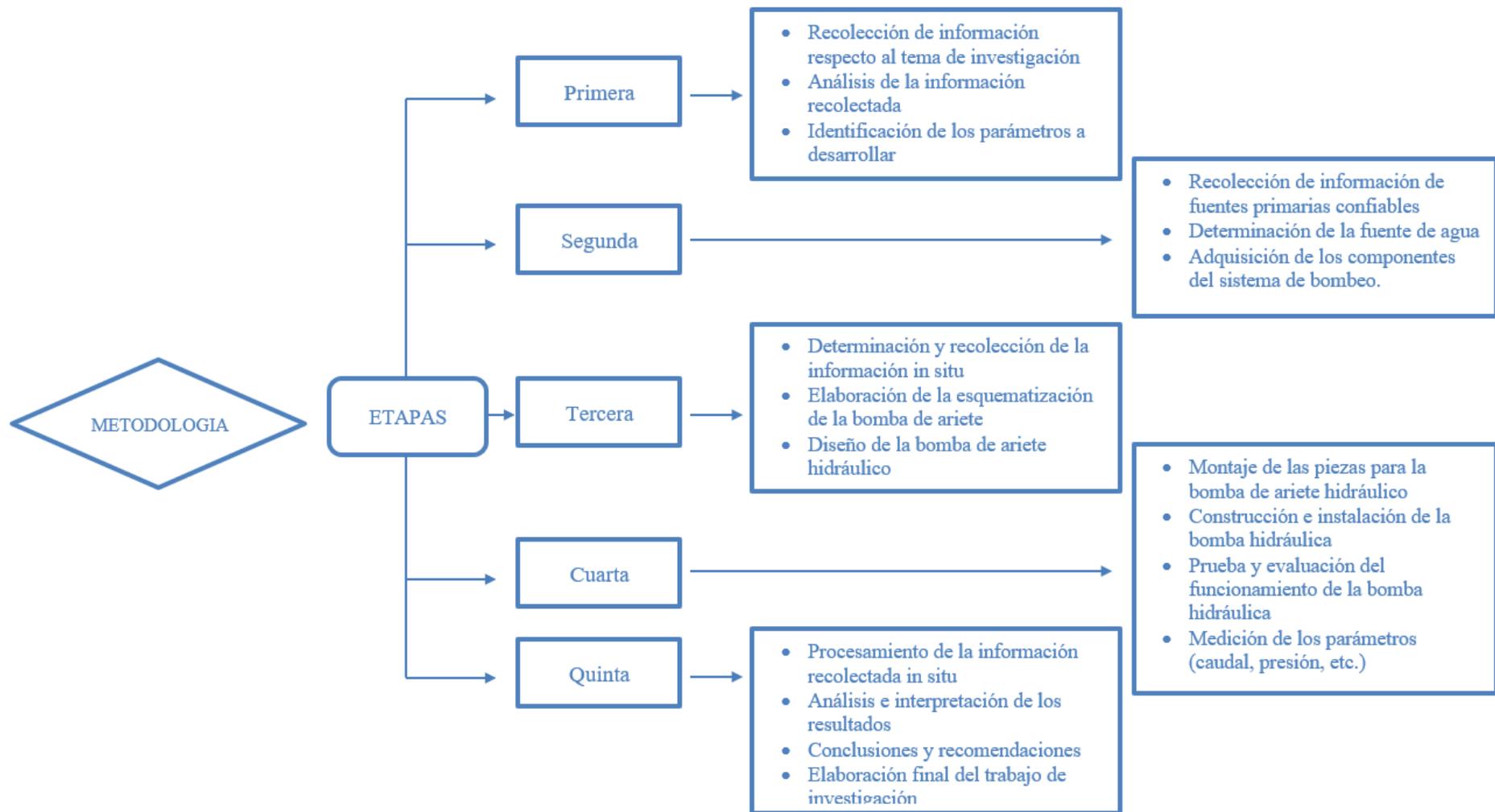


Ilustración 3.1. Metodología – Etapas.
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1.1 Datos de entrada

4.1.1.1 Reservorio de almacenamiento

Para el presente estudio, se propone la implementación de un reservorio de almacenamiento de 5 m³, el cual puede ser alimentado por la bomba de ariete con un caudal constante de 520 l/h, según los datos tomados en campo dicho caudal podría llenar el reservorio aproximadamente en 10 horas, este reservorio cumpliría la función de regular y abastecer con un caudal uniforme, debido a que el caudal de salida de la bomba es casi igual al caudal requerido por el cultivo, este reservorio puede ser construido de cualquier material o también puede ser prefabricado dependiendo de tamaño del reservorio y la geografía del terreno, para nuestro caso se está recomendando el uso de geotanques fabricados a base de geomembrana HDPE con estructura de malla electrosoldada, esto por su fácil instalación y por su resistencia a la abrasión e intemperie en especial a los rayos del sol ya que el material HDPE cuenta con filtro UV para protección solar .



Ilustración 4.1. Imagen referencial Geotanque de geomembrana D=2.10m
H=1.5m.

Fuente: GeoComercial - Empresa

Caudal de impulsión disponible

El caudal disponible para alimentar la bomba de ariete, es extraído de un canal perteneciente al Ojo del Milagro en Characato, Se evaluó distintas formas de conexión entre el canal y la bomba de ariete, pero la más practica y funcional fue aprovecharnos del efecto sifón, simplemente teníamos que hacer que la manguera este sumergida totalmente en el canal, pero antes de esto la manguera debería estar llena de agua, una vez cumplidas estas condiciones el agua empezaría a fluir, como si una bomba estuviera succionando el agua. Esto nos facilitó mucho la instalación de la bomba, esta conexión se realizó con una manguera HDPE 63mm C-8 la cual debe estar tapada en la parte inferior, llenar la tubería con agua al tope y una vez llena, destapar la parte inferior para que el agua empiece a fluir.



Ilustración 4.2. Canal de alimentación.
Fuente: Elaboración propia.

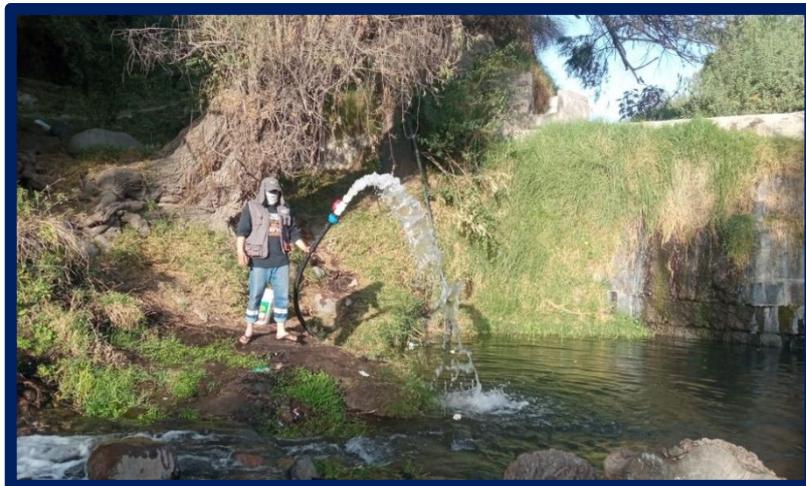


Ilustración 4.3. Apertura de manguera para iniciar con el funcionamiento del sifón.
Fuente: Elaboración propia.

Para medir el caudal de impulsión disponible, necesitamos de la ayuda de un balde (20 l) y un cronómetro; Al medir el tiempo que tarda en llenar el balde, nos permitirá medir el caudal en litros sobre segundos aplicando la fórmula $Q=V/T$. Para el cálculo de este dato vimos por conveniente recolectar 5 veces el tiempo que se tardó en llenar el balde para poder hallar el promedio y tener un resultado más exacto. Obteniendo los siguientes resultados:

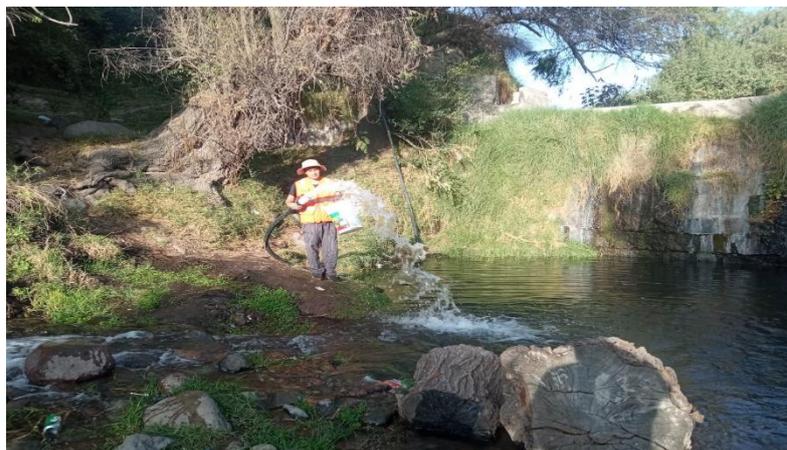


Ilustración 4.4. Medición del caudal disponible.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.1

Caudal promedio de impulsión

PRUEBA	CAPACIDAD (l)	TIEMPO (s)	CAUDAL Q (l/h)
1	20	2.21	32,576.4
2	20	2.38	30,250.8
3	20	2.17	33,177.6
4	20	2.23	32,284.8
5	20	2.26	31,856.4
		Promedio	32,029.2

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo así un caudal de impulsión disponible de 32,031 litros por hora.

4.1.1.2 Altura y longitud de impulsión

En el lugar elegido para la instalación de la bomba, se realizó un estudio del área para determinar la altura y la longitud de impulsión, y así establecer los mejores parámetros para el funcionamiento de la bomba de ariete. Es importante recalcar que el área de cultivo que será alimentado por el agua bombeada, está a un nivel superior de donde se ubica la bomba de ariete, además la bomba de ariete se ubicará cerca del río que pasa por el lugar, para que el agua desfogada por la válvula check de impulsión pueda retornar al río y así no desperdiciar el agua.

En función de los parámetros geográficos de la región de investigación y de la ubicación de los cultivos, podemos alcanzar una altura de impulsión de 4,42 m con una longitud de manguera de 15 m.

4.1.2 Tubería de impulsión

4.1.2.1 Diámetro

Para dimensionar la sección de la tubería de impulsión vamos a tener en cuenta la tabla que se encuentra a continuación, para eso vamos a necesitar el caudal de impulsión ya hallado anteriormente, entonces podemos decir que el diámetro de impulsión es de 2” .

Tabla 4.2

Diámetro de la tubería de impulsión

DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN – BOMBA HIDRÁULICA		
DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE IMPULSIÓN (pulg)	CAUDAL MÍNIMO (l/h)	CAUDAL MÁXIMO (l/h)
0.75	180	480
1	480	2280
1.5	2280	3420
2	3420	5700
2.5	5700	10200
3	10200	15900
4	15900	28380

Fuente: Elaboración propia.

Para seguir con el diseño, tenemos que corroborar la relación que hay entre la longitud y la sección de la tubería de impulsión. Podemos calcular esta relación de la siguiente manera:

$$150 \leq \frac{L}{D} \leq 1000 \quad \text{Ec. (Nº54)}$$

$$150 \leq 15/0.0554 \leq 1000$$

$$150 \leq 270.76 \leq 1000$$

Verificando la relación de la longitud y la sección de la tubería de impulsión se encuentran en el rango sugerido, por lo tanto, afirmamos que la sección de la tubería está bien dimensionada.

4.1.2.2 Dimensiones y propiedades mecánicas de la tubería de impulsión

La tubería de impulsión para este caso, deberá ser algo flexible y de fácil manejo para que se pueda adaptar al terreno irregular donde será instalada, además de resistente a altas presiones. La tubería de polietileno de alta densidad, fue elegida por ser resistente como una tubería de PVC y flexible como una manguera, además de ser muy económica y comercializada por muchas tiendas.

Se escogió una tubería HDPE de 63mm de diámetro clase 8 PE80 utilizada generalmente para riego tecnificado, por su alta resistencia a la abrasión y a los rayos solares, ya que estas tuberías cuentan con filtros UV.

En el siguiente cuadro se aprecia las diferentes medidas de tuberías HDPE más comerciales que podemos encontrar en el mercado.

Tabla 4.3

Ficha Técnica de manguera HDPE para riego

FICHA TÉCNICA DE MANGUERAS HDPE PARA RIEGO						
Diámetro N. Ex (mm)	P.N	Medida comercial	Espesor (mm)	Metros	Peso (kg)	
110	8	4"	6.6	100	205	
90	8	3"	5.4	100	138	
75	8	2" ½	4.5	100	95	
63	8	2"	3.8	100	67	
50	8	1" ½	3	100	40	
32	8	1"	2	100	18	
25	8	¾	1.7	100	11	

Fuente: Catalogo comercial industria Plasticir EIRL.

- Las medidas de la tubería elegida según el fabricante son las siguientes:
 Diámetro exterior: 63 mm.
 Espesor: 3.8 mm.
 Diámetro interior: 55.4 mm.
- Las propiedades mecánicas de la tubería elegida según el fabricante son las siguientes:
 Módulo de elasticidad = 1000 MPa o 1×10^9 N/m².
 Resistencia a la tracción = 21 MPa o 21×10^6 N/m².
 Resistencia a la fluencia = 8 MPa o 8×10^6 N/m².
 Coeficientes de rugosidad absoluta "ε" = 0.0015 mm.
 Presión Nominal = 8 bar.

4.1.2.3 Factor de fricción de pérdidas primarias

Se usará la Ecuación 14 para calcular el valor del factor de fricción de pérdidas primarias. Para ello, será necesario determinar la rugosidad absoluta del material de la tubería HDPE, el cual puede ser ubicado en la tabla N°2.2.

$$f = \left(\frac{1}{2 \log_{10} \frac{D}{2\varepsilon} + 1.74} \right)^2 \quad \text{Ec. (N°14)}$$

$$f = \left(\frac{1}{2 \log_{10} \frac{0.0554}{2 \times 0.0000015} + 1.74} \right)^2$$

$$f=0.0095$$

4.1.2.4 Velocidad de flujo

Antes de hacer el diseño hidráulico de la bomba de ariete, se midió el caudal disponible para la alimentación de la bomba, caudal que ingresará directamente a la bomba de ariete por lo que para hallar la velocidad de flujo utilizaremos la ecuación N° 3.

$$Q = A \times V \quad \text{Ec. (N°55)}$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.0089}{\frac{\pi \times 0.0554^2}{4}}$$

$$V = 3.692 \text{ m/s}$$

4.1.2.5 Pérdidas primarias

Estas pérdidas significativas serán generadas por la fricción en la tubería con el fluido, esto debido a la viscosidad del fluido. Se hallará con la ecuación N°4.

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ec. (N°56)}$$

$$h_p = 0.0095 \cdot \frac{15}{0.0554} \cdot \frac{1.477^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_p = 0.285 \text{ m}$$

4.1.2.6 Pérdidas secundarias

Estas pérdidas dependerán directamente del tipo de accesorio que utilizemos, ya que cada accesorio tendrá un factor "K", el cual utilizaremos en la fórmula N°5.

- Los accesorios que usaremos con su valor K serán:

- Válvula de globo abierta (2"): 6.5

- Tee (2"): 1.14

Entonces, las pérdidas secundarias son:

$$h_s = \sum k \frac{V^2}{2g}$$

$$h_s = (6.5 + 1.14) \times \frac{1.477^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_s = 0.849 \text{ m}$$

4.1.2.7 Número de Reynolds

El número de Reynolds determina el tipo de flujo con el que vamos a trabajar.

$$N^\circ Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

$$N^\circ Re = \frac{1.477 \times 0.0554}{1.007 \times 10^{-6}}$$

$$N^\circ Re = 81249.536$$

Si $Re > 3000$ entonces es flujo turbulento, por lo cual nuestro flujo vendría a ser turbulento.

4.1.2.8 Celeridad

La celeridad vendría a ser la velocidad con la cual se propaga la onda de un flujo en una tubería, esta se puede hallar con ayuda del módulo de compresibilidad del agua que a una temperatura de 20°C sería $2.2 \times 10^3 \text{ N/m}^2$, y el módulo de elasticidad de la tubería polietileno de alta densidad HDPE PE 80 es $1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$. (espesor de la tubería = 0.0038 m).

$$c = \frac{1345}{\sqrt{1 + \frac{\epsilon D}{e E}}}$$
$$c = \frac{1345}{\sqrt{1 + \frac{2.2 \times 10^9 \times 0.0554}{0.0038 \times 1 \times 10^9}}}$$
$$c = 233.87 \text{ m/s}$$

4.1.2.9 Sobrepresión máxima

Esta sobrepresión máxima va a ser generada por el golpe de ariete, en donde primero tenemos que hallar la velocidad y la sección por donde transcurre el fluido, con ayuda de la Ecuación podemos decir que:

$$Q = V \cdot A / V = Q/A$$

$$V = \frac{0.00356 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi \left(\frac{0.0554^2}{4}\right) \text{ m}^2}$$

$$V = 1.477 \text{ m/s}$$

Para calcular la sobrepresión máxima vamos a usar la fórmula de Allievi.

$$\Delta h_{max} = \frac{c \cdot V}{g}$$

$$\Delta h_{max} = \frac{233.87 \times 1.477}{9.81}$$

$$\Delta h_{max} = 35.21 \text{ m. c. a.}$$

$$\Delta h_{max} = 0.345 \text{ MPa o } 0.345 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.2.10 Esfuerzos máximos y mínimos

Los esfuerzos máximos y mínimos son datos que se hallan a partir del esfuerzo tangencial en recipientes de paredes delgadas, por ello podemos decir que:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot e} \quad \text{Ec. (N}^\circ\text{57)}$$

Donde:

σ_t : Esfuerzo tangencial (N/m²).

p : Sobrepresión (N/m²).

σ_t :: Diámetro interior (m).

e : Espesor (m).

Reemplazando los valores tenemos que el esfuerzo máximo será:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_t = \frac{0.345 \times 0.0554}{2 \times 0.0038}$$

$$\sigma_t = 2.517 \text{ Mpa o } 2.517 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Y el esfuerzo mínimo será:

$$\sigma_t = \frac{p \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_t = \frac{0.1 \times 0.0554}{2 \times 0.0038}$$

$$\sigma_t = 0.729 \text{ Mpa o } 0.729 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.2.11 Diseño estático

Aplicando la teoría de la distorsión vamos a poder desarrollar el diseño estático de la tubería de impulsión:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma_A^2 - \sigma_A \sigma_B - \sigma_B^2} \quad \text{Ec. (N°58)}$$

$$\sigma' = \sqrt{2.517^2 - 2.517 \times 0.729 - 0.729^2}$$

$$\sigma' = 1.992 \text{ Mpa o } 1.992 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

También hallamos el factor de seguridad estático para garantizar la no falla del material:

$$n_s = \frac{S_y}{\sigma'} \quad \text{Ec. (N°59)}$$

$$n_s = \frac{8}{1.992}$$

$$n_s = 4.016$$

4.1.2.12 Diseño a fatiga

Como bien sabemos, la bomba de ariete hidráulica trabaja gracias al golpe de ariete, esto genera cargas cíclicas afectando poco o mucho a la tubería. Con el diseño a fatiga, vamos a verificar que esta tubería no falle debido a estas cargas generadas. Podemos decir que:

Siendo la resistencia a la fatiga de la tubería: $S_u \leq 21 \text{ MPa}$

$$S_{e'} = 0.5 \times S_u \quad \text{Ec. (N°60)}$$

$$S_{e'} = 0.5 \times 21$$

$$S_{e'} = 10.5 \text{ Mpa o } 10.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Esta resistencia a la fatiga deberá ser modificada por los factores modificadores del límite de fluencia:

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot S_{e'} \quad \text{Ec. (N°61)}$$

Donde:

k_a : Va a depender de la calidad del acabado de la superficie (laminado en caliente: 57.7) y la resistencia a la tensión del material.

$$k_a = 57.7 \times 1000^{-0.718}$$

$$k_a = 0.405$$

k_b : Factor de modificación del tamaño. Coeficiente aplicando a resultados de flexión.

$$k_b = 0.879 \times d^{-0.107}$$

$$k_b = 0.879 \times 0.0554^{-0.107}$$

$$k_b = 1.20$$

k_c : Factor de modificación de la carga. Coeficiente aplicando a resultados de flexión.

$$k_c = 0.85$$

k_d : Factor de temperatura. Para una tubería a 20°C y una confiabilidad del 50 % podemos decir que el factor de temperatura es:

$$k_d = 1$$

k_e : Factor de modificación de efectos varios. Para el manejo práctico optaremos por $k_e = 1$

Reemplazando los valores en la Ecuación X tenemos:

$$S_e = 0.405 \times 1.20 \times 0.85 \times 1 \times 1 \times 10.5$$

$$S_e = 4.34 \text{ MPa} \text{ o } 4.34 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Luego, hallamos el esfuerzo medio y la amplitud del mismo, para así poder determinar el límite de resistencia a la fatiga:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad \text{Ec. (N°62)}$$

$$\sigma_m = \frac{2.517 - 0.729}{2}$$

$$\sigma_m = 0.89$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \text{Ec. (N°63)}$$

$$\sigma_a = \frac{2.517 + 0.729}{2}$$

$$\sigma_a = 1.62$$

Con ayuda del diagrama modificado de Goodman podremos calcular el límite de resistencia a la fatiga, entonces:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{1.62}{4.33} + \frac{0.89}{8} = \frac{1}{n}$$

$$n = 2.05$$

Para proteger la tubería de la variación de presiones generadas por el golpe de ariete se calculó los factores estáticos y de fatiga, estos factores aseguran que la tubería no tenga fallas durante el funcionamiento del ariete.

4.1.3 Tubería de descarga

4.1.3.1 Dimensiones y propiedades mecánicas de la tubería de descarga

La tubería de descarga deberá ser flexible y de fácil manejo para que se pueda adaptar al terreno irregular donde será instalada, además de ser resistente a la abrasión y a los rayos ultravioleta ya que será una instalación fija. La tubería de polietileno de alta densidad fue elegida por tener gran resistencia a la abrasión y a los rayos UV, además de ser muy económica, comercializada por muchas tiendas y viene en tramos de 100 metros, lo cual reduce el uso de accesorios y el tiempo de instalación.

Según estudios ya realizados los autores recomiendan que el diámetro para la tubería de descarga debe ser la mitad de la tubería de impulsión, por lo tanto, usaremos la tubería HDPE 32mm C-8.

Se usará un rollo de tubería HDPE 32mm C-8 de 100m de largo, ya que es suficiente para unir el punto donde se ubica la bomba de ariete ya instalada y el punto donde se quiere transportar el agua.

- Las medidas de la tubería elegida según el fabricante son las siguientes:

Diámetro exterior: 32 mm.

Espesor: 2 mm.

Diámetro interior: 28 mm.

- Las propiedades mecánicas de la tubería elegida según el fabricante son las siguientes:

Módulo de elasticidad = 1000 MPa o 100×10^6 N/m².

Resistencia a la tracción = 21 MPa o 21×10^6 N/m².

Resistencia a la fluencia = 8 MPa o 8×10^6 N/m².

Coefficientes de rugosidad absoluta “ ϵ ” = 0.0015 mm.

Presión Nominal = 8 bar.



Ilustración 4.5. Medición del caudal disponible.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.2 Pérdidas en la tubería de descarga

Se calcularán las pérdidas generadas por fricción, estas dependerán de la velocidad del flujo y el factor de fricción para la tubería.

No se considerará las pérdidas por accesorio ya que la tubería consta de un solo tramo de 100m.

Para hallar la velocidad necesitamos conocer el caudal de descarga de la bomba de ariete, para asumir este dato hallaremos un caudal teórico con la siguiente ecuación.

$$q = \frac{Q.R.H}{h}$$

Donde:

q = Caudal teórico entregado

Q = Caudal de entrada (l/min)

R = Rendimiento del ariete

H = Altura de alimentación (m)

h = Altura de descarga (m)

El rendimiento del ariete Hidráulico estará en función de la siguiente tabla

Tabla 4.4

Rendimiento Hidráulico en función de H

h/H	2	3	4	6	8	10	12
R	0.85	0.81	0.76	0.67	0.57	0.43	0.23

Fuente: Elaboración Propia.

$$\frac{h}{H} = \frac{25}{4.42}$$

$$\frac{h}{H} = 5.7$$

Interpolando de la tabla el valor 5.7 entre los valores 4 y 6 tenemos el valor de R.

$$R = 0.68$$

Con este valor podemos hallar el caudal de descarga teórico.

$$q = \frac{213.60 \times 0.68 \times 4.42}{25}$$

$$q = 25.73 \text{ l/min}$$

$$q = 0.429 \text{ l/s} \quad q = 1543.456 \text{ l/h}$$

Asumiremos un caudal de 1440 l/h para hallar la velocidad y pérdidas de carga por fricción.

La velocidad en el punto de descarga del agua será:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{0.004}{\pi x \frac{0.028^2}{4}}$$

$$V = 0.65 \text{ m/s}$$

Para hallar el factor de fricción, es necesario conocer la rugosidad del material, para este caso consideraremos la rugosidad del PVC, ya que la tubería HDPE tiene el mismo acabado que una tubería de PVC; por lo tanto, la rugosidad será igual a 0.0015mm.

La fórmula para hallar el factor de fricción es la siguiente:

$$f = \left(\frac{1}{2. \log_{10} \left(\frac{D}{2\epsilon} \right) + 1.74} \right)^2$$

$$f = \left(\frac{1}{2. \log_{10} \left(\frac{28}{2x0.0015} \right) + 1.74} \right)^2$$

$$f = 0.0107$$

Las pérdidas totales generadas por fricción en la tubería se calculan con la siguiente expresión:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_p = 0.0107 x \frac{100}{0.028} x \frac{0.65^2}{2x9.81}$$

$$h_p = 0.82 \text{ m}$$

4.1.4 Cuerpo del ariete

4.1.4.1 Dimensiones y propiedades mecánicas

Para el cuerpo del ariete se usó conexiones roscadas de fierro galvanizado por su alta resistencia a la presión y abrasión, además se verificó los esfuerzos estáticos y de fatiga para asegurarnos que el material resistirá las presiones generadas por el golpe de ariete.

Para el ensamblado de la bomba de ariete se necesitarán niples, tes, codo, reducción Bushing, reducción campana, tapón hembra y teflón, ya que todas las uniones se hacen mediante las roscas.

Todos estos accesorios que formarán parte del cuerpo del ariete serán de fierro galvanizado y deberán cumplir con las siguientes características mecánicas:

Presión Nominal = 20 bar.

Resistencia a la tracción (N/mm²) = 320 – 520.

Resistencia a la fluencia (N/mm²) = 80.



Ilustración 4.6. Ensamble de la bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.2 Esfuerzos máximos y mínimos

Para poder determinar los esfuerzos máximos y mínimos debemos que hallar primero las presiones máximas y mínimas utilizando las cargas máximas y mínimas.

Entonces, la presión máxima y mínima serán:

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

$$H_{max} = 35.21 + 4.42$$

$$H_{max} = 39.61 \text{ m. c. a}$$

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

$$P_{max} = 9810 \times 39.61$$

$$P_{max} = 0.381 \text{ MPa o } 0.381 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

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

$$H_{min} = 35.21 - 4.42$$

$$H_{min} = 30.81 \text{ m. c. a}$$

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

$$P_{min} = 9810 \times 30.81$$

$$P_{min} = 0.296 \text{ MPa o } 0.296 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

A continuación, calcularemos el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo:

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max} \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.381 \times 55.4}{2 \times 3.8}$$

$$\sigma_{max} = 2.778 \text{ MPa o } 1.339 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{min} = \frac{P_{min} \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{min} = \frac{0.296 \times 55.4}{2 \times 3.8}$$

$$\sigma_{min} = 2.16 \text{ MPa o } 2.16 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.4.3 Diseño estático

Aplicando la teoría de la energía de la distorsión podremos hallar el diseño estático:

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

$$\sigma' = \sqrt{2.16^2 + 2.16 \times 2.778 - 2.778^2}$$

$$\sigma' = 1.55 \text{ MPa} \text{ o } 1.55 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

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

$$n_s = \frac{80}{1.55}$$

$$n_s = 51.74$$

4.1.4.4 Diseño por fatiga

Como bien sabemos, la bomba de ariete hidráulica trabaja gracias al golpe de ariete, esto genera cargas cíclicas afectando poco o mucho a la tubería. Con el diseño a fatiga vamos a verificar que el cuerpo del ariete no falle debido a estas cargas generadas. Entonces la amplitud del esfuerzo es:

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

$$\sigma_a = \frac{2.778 + 2.16}{2}$$

$$\sigma_a = 2.47 \text{ MPa} \text{ o } 2.47 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

Usaremos el diagrama modificado de Goodman para determinar el límite de resistencia a la fatiga:

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_e} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = \frac{1}{n}$$

$$\frac{2.47}{4.33} + \frac{1.55}{8} = \frac{1}{n}$$

$$n = 1.31$$

Tanto el factor estático como el factor de fatiga, nos indican que el cuerpo del ariete no va a fallar por estar en continua variación de la presión generada por el golpe de ariete.

4.1.5 Cámara de aire

4.1.5.1 Dimensionamiento

La cámara de aire actúa como un impulsor debido a la sobrepresión que ejerce el aire con el agua que ingresa. Esta sobrepresión genera que el líquido se expanda suministrando una determinada cantidad de líquido a la tubería de descarga, dando un flujo continuo con un funcionamiento constante en la bomba. En la ilustración N° 4.08 se aprecia un antes y después en el momento que el líquido ingresa a la cámara comprimiendo el aire.

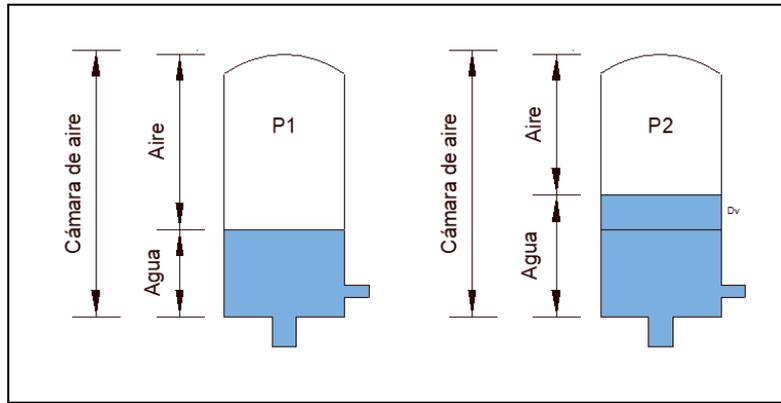


Ilustración 4.7. Compresión de aire por ingreso de agua a la cámara de aire.

Fuente: Elaboración propia.

Para saber el caudal por ciclo, simplemente usaremos el caudal teórico entregado haciendo la conversión de unidades, entonces podemos decir que el caudal teórico entregado es 1543.8 l/h por lo tanto el caudal por ciclo será 0.000429 m³/s.

Vamos asumir que la compresión del aire en la cámara actuará de forma politrópica, entonces:

$$P_1 \cdot V_1^n = P_2 \cdot V_2^n \quad \text{Ec. (N°64)}$$

Considerando que la presión 2 es la altura de impulsión más la altura de pérdida, y la presión 1 es el valor inicial es decir la presión atmosférica. Además, supondremos que la compresión es isotérmica, en cuyo caso el valor de n será igual a 1. A continuación, tenemos que:

$$P_{atm} \cdot V_c^1 = P_{sum} \cdot V_1^1$$

Entonces:

$$P_{atm} = \gamma_{aire} \times 10.33 \text{ m}$$

$$P_{sum} = \gamma_{aire} \cdot (h + hr) \text{ m}$$

Al momento de reemplazar los valores en la anterior ecuación, tenemos que:

$$\gamma_{aire} \times 10.33 \times V_c = \gamma_{aire} \cdot (h + hr) \cdot V_1$$

$$V_1 = \frac{V_c \times 10.33}{(h+hr)}$$

Considerando que debe aplicarse una sobrepresión en el tanque para poder bombear Dv de líquido en un ciclo, podemos decir que:

$$(h + hr) \cdot (1 + x) \cdot (V_1 - D_v) = (h + hr) \cdot V_1$$

Ahora, para determinar el volumen de la cámara de aire, se va a reemplazar el volumen de aire en la cámara en la ecuación anteriormente calculada de la presión de la altura de entrega, dando como resultado:

$$V_c = \frac{D_v \cdot (1+x) \cdot (h+hr)}{10.33x} \quad \text{Ec. (N°65)}$$

Con ayuda de la altura de impulsión, la pérdida de altura, el caudal de cada ciclo y el valor de $x = 2,7$ para mejorar la estabilidad de la cámara de aire, podemos determinar la longitud de la cámara de aire en función de su volumen.

$$V_c = \frac{D_v \cdot (1+x) \cdot (h+hr)}{10.33x}$$

$$A_c \cdot L_c = \frac{D_v \cdot (1+x) \cdot (h+hr)}{10.33x}$$

$$L_c = \frac{\frac{D_v \cdot (1+x) \cdot (h+hr)}{10.33x}}{A_c}$$

$$L_c = \frac{\frac{D_v \cdot (1+x) \cdot (h+hr)}{10.33x}}{\pi \cdot \frac{D^2}{4}}$$

$$L_c = \frac{\frac{0.000429 \cdot (1+0.25) \cdot (25+1.635)}{10.33 \times 0.25}}{\pi \cdot \frac{0.110^2}{4}}$$

$$L_c = 0.5817 \text{ m}$$

Entonces, las dimensiones de la cámara de aire son: $L_c = 0.60 \text{ m}$ y un $D_c = 0.11 \text{ m}$, obteniendo así, un volumen de:

$$V_c = L_c \cdot A_c$$

$$V_c = 0.60 \times \pi \cdot \frac{0.110^2}{4}$$

$$V_c = 0.005702 \text{ m}^3$$

En donde el volumen inicial y final de la cámara de aire serán dado de la siguiente expresión:

Volumen inicial

$$V_1 = V_c - V_{H2O}$$

$$V_1 = 0.005702 - 0.0022808$$

$$V_1 = 0.003421 \text{ m}^3$$

Volumen final

$$V_2 = V_1 - D_v$$

$$V_2 = 0.003421 - 0.000429$$

$$V_2 = 0.002992 \text{ m}^3$$

4.1.5.2 Presión de la cámara antes del golpe de ariete

Antes del golpe de ariete se va a producir una presión la cual es hallada de la siguiente manera:

$$P_1 = P_0 + \gamma \cdot p.$$

P_0 : Presión atmosférica (Pa).

p : Sobrepresión por golpe de ariete (m).

Reemplazando los valores tenemos que:

$$P_1 = 101325 + 9810(35.21)$$

$$P_1 = 0.4467 \text{ MPa} \text{ o } 0.4467 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.5.3 Presión de la cámara después del golpe de ariete

Para el cálculo de la presión después del golpe de ariete en la cámara de aire, vamos hacer uso de la ley de Boyle, ecuación de los gases ideales, teniendo como resultado lo siguiente:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot V_1}{V_2}$$

$$P_2 = \frac{0.4467 \times 0.003421}{0.002992}$$

$$P_2 = 0.51 \text{ MPa} \text{ o } 0.51 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.5.4 Esfuerzos máximos y mínimos

Cálculo de los esfuerzos máximos y mínimos:

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max} \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{max} = \frac{0.51 \times 55.4}{2 \times 3.80}$$

$$\sigma_{max} = 3.72 \text{ MPa} \text{ o } 3.72 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$\sigma_{min} = \frac{P_{min} \cdot d_i}{2 \cdot e}$$

$$\sigma_{min} = \frac{0.4467 \times 55.4}{2 \times 3.80}$$

$$\sigma_{min} = 3.26 \text{ MPa} \text{ o } 3.26 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

4.1.5.5 Diseño estático

Aplicando la teoría de la energía de la distorsión podemos decir que el diseño estático es igual a:

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

$$\sigma' = \sqrt{3.26^2 + 3.72 \times 3.26 - 3.72^2}$$

$$\sigma' = 2.98 \text{ MPa} \text{ o } 2.98 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

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

$$n_s = \frac{8}{2.98}$$

$$n_s = 2.69$$

4.1.5.6 Diseño por fatiga

Sabiendo que la resistencia a la fatiga es $S_e = 21 \text{ MPa}$ se tiene que:

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

$$\sigma_a = \frac{3.26 + 3.72}{2}$$

$$\sigma_a = 3.49 \text{ Mpa o } 3.49 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

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

$$\frac{3.49}{4.33} + \frac{2.98}{21} = \frac{1}{n}$$

$$n = 0.85$$

4.1.6 Válvula anti retorno

Dicha válvula tendrá la función de ceder el paso de agua entre el cuerpo del ariete y la cámara de aire, Al ser una válvula Check, también evitará el retorno de agua en cada ciclo de funcionamiento de la bomba o en caso la bomba de ariete de detenga.

Para cumplir dichas funciones se usará una válvula Check Horizontal 2" con resorte de asiento de asiento de goma NBR. Se puede observar dicha válvula en la ilustración 4.09,



Ilustración 4.8. Válvula anti-retorno.

Fuente: Descripción técnica de las válvulas antirretorno, 2010 en Wayback Machine.

4.1.7 Válvula de impulsión

4.1.7.1 Generalidades

Dicha válvula tendrá la función de generar el golpe de ariete, cerrando y abriéndose automáticamente por cada ciclo de funcionamiento. Este tipo de válvula no es comercializada, por lo que se optó por fabricar una partiendo de una válvula check de pie 2" para pozo. Para cumplir con las funciones requeridas, la válvula check se invertirá su montaje de modo que sea una válvula normalmente abierta, además se incluyó un resorte con un perno y una tuerca para poder regular la compresión del resorte, ya que mientras más comprimido este el resorte más fuerte será el golpe de ariete, pero ojo la caída de agua debe ser lo suficientemente fuerte para comprimir aún más el resorte, con este mecanismo se puede controlar la fuerza con la que será cerrada la válvula por cada ciclo y la presión generada por el golpe de ariete. En la ilustración 4.10 podemos observar la válvula y el sentido en el que será instalada.



Ilustración 4.9. Válvula check modificada.
Fuente: Elaboración Propia.

4.1.7.2 Características

Guiándonos de la ficha técnica dada en el Anexo N° 09, obtenemos el diámetro de apertura para calcular el área de la sección por donde fluirá el agua.

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi 0.05^2}{4}$$

$$A = 0.002 \text{ m}^2$$

4.1.7.3 Carrera de la válvula de impulsión

Según estudios previos se recomienda que la carrera máxima que podría desarrollarse para la válvula de impulso debe ser de 15mm.

4.1.7.4 Coeficiente de pérdida de carga en la válvula de impulso

Para el cálculo del coeficiente de carga, usaremos la siguiente fórmula en función de la carrera de la válvula de impulsión la cual deberá estar expresada en pulgadas.

S: Carrera de la válvula de impulso (m)

$$S = 15 \text{ mm}$$

$$S = 0.59 \text{''}$$

$$R(S) = \frac{2.43 - 1.06 \cdot S + 10^{(0.95 - 13.3S)}}{S}$$

$$R(S) = \frac{2.43 - 1.06 \times 0.59 + 10^{(0.95 - 13.3 \times 0.59)}}{0.59}$$

$$R(S) = 3.05 = K_3$$

4.1.7.5 Velocidad de flujo en la válvula de impulsión

Esta será calculada con la siguiente fórmula:

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

$$V_v = \sqrt{\frac{2 \times 9.81 \times 4.42}{1 + 0.0095 \cdot \frac{15}{0.0554} + 0.849 + 3.05}}$$

$$V_v = 3.40 \text{ m/s}$$

4.1.7.6 Coeficiente de arrastre de la válvula de impulsión

Para hallar el coeficiente de arrastre de la válvula de impulsión se usará la siguiente fórmula:

$$C_d = \frac{0.282 - 8.854S + 0.8 \times 10^{(0.52 - 270S)}}{S}$$

$$C_d = \frac{0.282 - 8.854 \times 0.015 + 0.8 \times 10^{(0.52 - 270 \times 0.015)}}{S}$$

$$C_d = 9.96$$

4.1.7.7 Fuerza hidráulica que actúa sobre la válvula de impulso

Sobre la válvula de impulsión actuará una fuerza hidráulica la cual será calculada con la siguiente fórmula:

$$F_d = C_d \cdot \frac{(\gamma \cdot V_v)}{2} \cdot A$$

Donde:

F_d = Fuerza hidraulica (N).

C_d = Coeficiente de arrastre de la válvula de impulso.

V_v = Velocidad en la válvula de impulso ($\frac{m}{s}$).

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

$$F_d = 9.96 \cdot \frac{(1000 \times 3.40)}{2} \cdot 0.002.$$

$$F_d = 33.25 \text{ N.}$$

$$F_d = 3.39 \text{ Kg.}$$

La válvula de impulso podrá tener un peso máximo de 3.39 Kg.

$$W_v = F_d = 3.39 \text{ Kg.}$$

Se debe cumplir lo siguiente

$$F_t < F_D \quad 1.39 < 3.39$$

4.1.7.8 Resorte de compresión

Se escogió el resorte de compresión con la siguiente descripción: Alambre de acero inoxidable AISI 302 EN 10270 – 3 1.4310 X10CrNi18-8 ya que estará en contacto con el agua

durante el funcionamiento de la bomba, este resorte tendrá una constante K de 0.0828 DaN/mm y las siguientes características:

- Diámetro exterior: 28mm.
- Diámetro de hilo: 2mm.
- Longitud: 90mm.
- Numero de espiras: 11.
- Paso: 8.18mm.
- Constante K: 0.0879DaN/mm.

Para verificar el funcionamiento de la válvula de impulsión, la suma del peso entre la fuerza producida por la compresión del resorte y el disco de la válvula deberá ser menor al peso máximo de la válvula de impulso. Del cálculo anterior sabemos que el peso máximo que podrá tener la válvula de impulsión es de 3.40kg.

Esto para que el resorte pueda cerrar la válvula ante la fuerza ejercida por el agua y se repita el ciclo de funcionamiento.

Para realizar el cálculo obtendremos la fuerza de compresión mínima del resorte:

$$F_c = k \cdot x$$

$$F_c = 0.0879 \times 15$$

$$F_c = 1.32 \text{ kg}$$

El peso del disco de la válvula contribuirá a cerrar la válvula por lo que para hallar la fuerza total debemos de sumarla.

$$F_t = F_c + W_v$$

$$F_t = 1.32 + 0.075$$

$$F_t = 1.39 \text{ kg}$$

Se debe cumplir lo siguiente.

$$F_t < F_D \quad 1.39 < 3.39$$

4.1.8 Ciclo de operación del ariete hidráulico

Previo al análisis y cálculo de los periodos aplicando el método de Krol, debemos tener en cuenta el valor de la pérdida de carga, el valor de la celeridad y también el valor de la sobrepresión máxima durante el periodo de retardación y la distancia de retroceso del agua.

Celeridad

$$C = 233.87 \text{ m/s}$$

Sobrepresión máxima

$$\Delta h_{\max} = 35.209 \text{ m}$$

La pérdida de carga en la válvula de descarga, la tubería de impulsión y la tubería de descarga durante el tiempo de retardo se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$h_r = 5.64x(1 - \frac{h}{h_{max}})$$

$$h_r = 5.64 (1 - \frac{25}{35.21})$$

$$h_r = 1.635$$

La distancia de retroceso del agua se calculará mediante la siguiente fórmula:

$$y = \frac{(h+h_r)^2.L.g}{2.H.c^2}$$

$$y = \frac{(25+1.635)^2 x 15 x 9.81}{2 x 4.42 x 233.87^2}$$

$$y = 0.2169$$

4.1.8.1 Periodo 1

La velocidad en el periodo 1 se hallará con la siguiente fórmula:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2gHy}{L}}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{2x9.8x4.42x0.2169}{15}}$$

$$V_1 = 1.117 \text{ m/s}$$

El tiempo en el periodo 1 se hallará con la siguiente fórmula:

$$t1 = \sqrt{\frac{2Ly}{gH}}$$

$$t1 = \sqrt{\frac{2x15x0.2169}{9.81x4.42}}$$

$$t1 = 0.388 \text{ s.}$$

4.1.8.2 Periodo 2

La velocidad en el periodo 2 se hallará con la fórmula Nª 23.

$$V_2 = \sqrt{\frac{w g}{K_0 \cdot A'' \cdot \gamma}}$$

Donde:

W: Peso de la válvula de impulso (N).

Ko: Coeficiente de resistencia al cierre de la válvula impulso.

A'' : Área de la válvula de impulso (m2).

γ : Peso específico del fluido (N/m3).

$$V_2 = \sqrt{\frac{33.25x9.81}{9.96x0.002x9810}}$$

$$V_2 = 1.3038 \text{ m/s}$$

El coeficiente de resistencia de cierre de la válvula de impulso se hallará con la siguiente fórmula:

$$K_0 = \frac{W}{A \cdot \delta \cdot V_2^2}$$

$$K_0 = \frac{33.25}{0.002 \times 1000 \times 1.3038^2}$$

$$K_0 = 9.96$$

Donde el coeficiente total de pérdidas será:

$$Z = \frac{0.32 \times g \times H}{V_2}$$

$$Z = \frac{0.32 \times 9.81 \times 4.42}{1.30}$$

$$Z = 10.59$$

Entonces, el tiempo en el periodo 2 se calcula de la siguiente manera:

$$t_2 = \frac{L}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot Z}} \cdot \ln \left[\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{W \cdot Z}{2 \cdot A \cdot H \cdot \gamma \cdot K_0}}\right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{y \cdot Z}{L}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{W \cdot Z}{2 \cdot A \cdot H \cdot \gamma \cdot K_0}}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{y \cdot Z}{L}}\right)} \right]$$

$$t_2 = \frac{15}{\sqrt{2 \times 9.81 \times 4.42 \times 10.59}} \cdot \ln \left[\frac{\left(1 + \sqrt{\frac{33.25 \times 10.59}{2 \times 0.0020 \times 4.42 \times 9810 \times 9.96}}\right) \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{9810 \times 10.59}{15}}\right)}{\left(1 - \sqrt{\frac{33.25 \times 10.59}{2 \times 0.0020 \times 4.42 \times 9810 \times 9.96}}\right) \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{9810 \times 10.59}{15}}\right)} \right]$$

$$t_2 = 0.29 \text{ s.}$$

4.1.8.3 Periodo 3

En este caso la velocidad del periodo 2 es igual a la velocidad del periodo 3, por lo tanto, podemos decir que:

$$V_3 = V_2 = 1.30 \text{ m/s}$$

Entonces, el coeficiente total de pérdida será:

$$Z_1 = \sqrt{2 \cdot C_d \cdot A \cdot H \cdot \gamma}$$

$$Z_1 = \sqrt{2 \times 9.96 \times 0.0020 \times 4.42 \times 9810}$$

$$Z_1 = 41.09$$

Entonces, el tiempo en el periodo 2 se calcula de la siguiente manera:

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot L \cdot S \cdot V_2^2}{2 \cdot g^2 \cdot H \cdot \left(1 - \frac{W \cdot Z}{Z_1^2}\right)}}$$

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{3 \times 15 \times 0.015 \times 1.30^2}{2 \times 9.81^2 \times 4.42 \times \left(1 - \frac{33.25 \times 10.59}{41.09^2}\right)}}$$

$$t_3 = 0.12 \text{ s.}$$

4.1.8.4 Periodo 4

Para calcular la velocidad en el Periodo 4 vamos a utilizar la fórmula N°31

$$V4 = V3 - (h + h_r) \cdot \frac{g}{c}$$

$$V4 = 1.30 - (25 + 1.635) \times \frac{9.81}{233.87}$$

$$V4 = 0.187 \text{ m/s}$$

Para calcular el tiempo en el Periodo 4 vamos a utilizar la fórmula N30

$$t4 = \frac{2L}{c}$$

$$t4 = \frac{2 \times 15}{233.87}$$

$$t4 = 0.128 \text{ s.}$$

4.1.8.5 Periodo 5

Para el Periodo 5, la velocidad determinada será:

$$V5 = 0 \text{ m/s}$$

Para calcular el tiempo en el Periodo 5 vamos a utilizar la fórmula N°46

$$t5 = \frac{L}{g \cdot (h + h_r)} \cdot \left[\sqrt{\frac{W \cdot g}{\gamma \cdot A'' \cdot K_0} - \frac{(h + h_r) \cdot g}{c}} \right]$$

$$t5 = \frac{15}{9.81 \times (25 + 1.635)} \cdot \left[\sqrt{\frac{33.25 \times 9.81}{9810 \times 0.0020 \times 9.96} - \frac{(25 + 1.635) \times 9.81}{233.87}} \right]$$

$$t5 = 0.17 \text{ s.}$$

4.1.8.6 Periodo 6

Para calcular la velocidad en el Periodo 6 vamos a utilizar la fórmula N°48

$$V6 = \frac{(h+h_r) \cdot g}{c}$$

$$V6 = -\frac{(25+1.635) \times 9.81}{233.87}$$

$$V6 = -1.117 \text{ m/s}$$

Para calcular el tiempo en el Periodo 6 vamos a utilizar la fórmula N°49

$$t6 = \frac{2L}{c}$$

$$t6 = \frac{2 \times 15}{233.87}$$

$$t6 = 0.128 \text{ s.}$$

4.1.8.7 Periodo 7

Para calcular el tiempo en el Periodo 7 vamos a utilizar la fórmula N°50

$$t7 = \frac{L.(h+h_f)}{H.c}$$

$$t7 = \frac{15 \times (25+1.635)}{4.42 \times 233.87}$$

$$t7 = 0.388 \text{ s.}$$

Para calcular la velocidad en el Periodo 7 vamos a utilizar la fórmula N°51

$$V7 = \frac{g.H.t7}{L}$$

$$V7 = \frac{9.81 \times 4.42 \times 0.388}{15}$$

$$V7 = 1.117 \text{ m/s}$$

4.1.9 Análisis del ciclo de operación del ariete hidráulico

Con los datos teóricos obtenido por el método de Krol, serán plasmados en la siguiente tabla N°4.5 para apreciar mejor la diferencia de velocidades del fluido vs tiempo.

Tabla 4.5

Tabla del Ciclo de operación del ariete hidráulico

CICLO DE OPERACIÓN DEL ARIETE HIDRÁULICO			
PERIODO	VELOCIDAD (m/s)	TIEMPO (s)	TIEMPO AC (s)
0	0.000	0.000	0.000
1	1.117	0.388	0.388
2	1.304	0.766	1.154
3	1.304	0.120	1.274
4	0.187	0.128	1.402
5	0.000	0.170	1.572
6	-1.117	0.128	1.701
7	1.117	0.388	2.089
TIEMPO DE CICLO (s)			2.09

Fuente: Elaboración propia. Ciclo de operación del ariete hidráulico Periodo velocidad tiempo



Gráfico 4.1. Gráfica del Ciclo de operación del ariete hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.2.1 Condiciones in situ

Antes de señalar los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, es importante tener en cuenta las condiciones que presenta a la hora de hacer el trabajo. Es por ello que, analizar estas condiciones nos facilitará el desarrollo y la ejecución de la bomba hidráulica.

Es importante tener en cuenta que la altura de descarga es un factor muy relevante al momento de diseñar la bomba de ariete hidráulico, porque afecta directamente al caudal descargado y al rendimiento de la bomba.

Por ello, las condiciones para la zona de alimentación y la zona de descarga in situ son:

Tabla 4.6

Condiciones en la zona de trabajo

		Zona de alimentación	Zona de descarga
Tubería	Longitud (m)	15	100
	Área (m ²)	0.00241	0.0095
Parámetros	Caudal (l/h)	5340	520.2
	Altura (m)	4.42	25

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentará imágenes de las pruebas realizadas en campo, así como también la instalación de la tubería de impulsión como la tubería de descarga.



Ilustración 4.10. Canal de alimentación.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.11. Caudal del canal de alimentación 17-12-2022 $Q=144000$ l/h
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.12. Caudal del canal de alimentación 13-05-2023 $Q=162000$ l/h.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.13. Caudal del canal de alimentación 08-07-2023 $Q=144000$ l/h.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.14. Instalación de la tubería de suministro en campo.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.15. Instalación de la tubería de suministro en campo.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.16. Instalación de la tubería de descarga en campo.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.17. Bomba de ariete ensamblada.
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.18. Bomba de ariete instalada en campo.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.19. Bomba de ariete puesta en marcha.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.20. Caudal descargado por la bomba de ariete.

Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 4.21. Riego por goteo existente en cultivos aledaños.

Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Pruebas experimentales

- Se desarrolló las pruebas experimentales tomando en cuenta las condiciones establecidas en la zona de estudio vistos en el anterior punto.
- Esta prueba se realizó variando la carrera del disco ubicado en la válvula de impulsión, viendo los resultados, se puede decir que, tomaremos la máxima carrera del disco como mejor opción por sus mejores resultados.
- Las pruebas se desarrollaron variando las alturas de descarga en 2 metros para una mejor interpretación de análisis, en donde veremos que caudal de descarga nos beneficia más.

- Viendo los resultados obtenidos, podemos decir que, a una altura de 25 metros, obtenemos un caudal de 520.476 (l/h). Se optó por esta altura de descarga porque abastece el caudal (520.416 l/h) que requerimos para el riego del cultivo en la zona.
- Con las condiciones ya mencionadas anteriormente, vamos a observar los datos recogidos de las pruebas experimentales en la siguiente tabla:

Tabla 4.7

Resultados del Caudal de descarga obtenidos en campo

Prueba Experimental	Altura de elevación (m)	Altura de captación (m)	Caudal de descarga (l/h)	Caudal de captación (l/h)
1	19	4.42	800.856	5340.00
2	21	4.42	749.628	5340.00
3	23	4.42	614.838	5340.00
4	25	4.42	520.476	5340.00
5	27	4.42	418.41	5340.00
6	29	4.42	128.7	5340.00
7	31	4.42	0	5340.00

Fuente: Elaboración propia.

Con los datos hallados anteriormente, procedemos a desarrollar la curva de operación de la bomba hidráulica para un mejor manejo de información expresado en la siguiente ilustración.

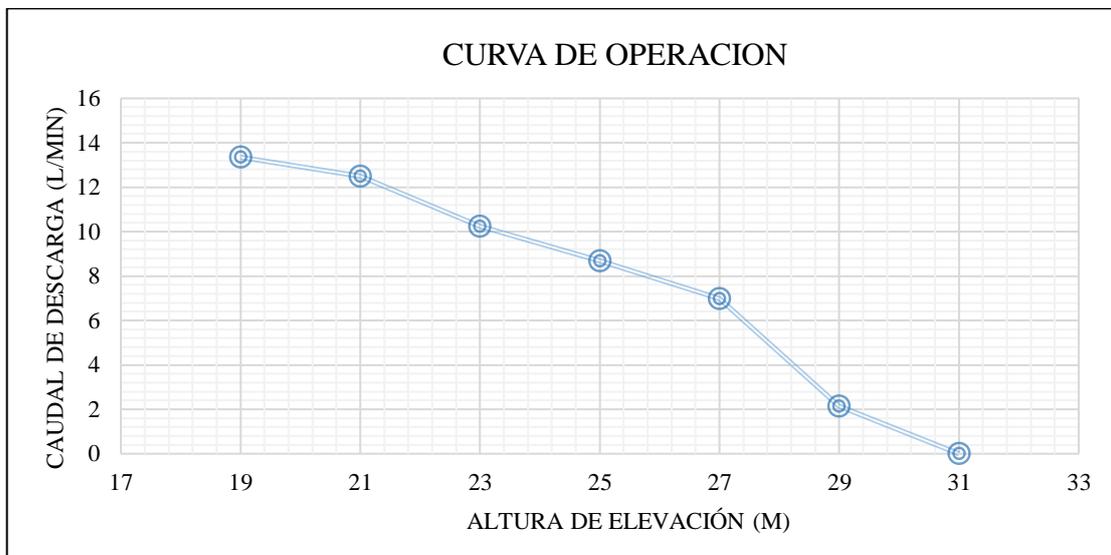


Gráfico 4.2. Curva de operación de la bomba de ariete.

Fuente: Elaboración propia.

- Como se aprecia en la ilustración anterior, podemos notar una relación inversamente proporcional, ya que a medida que la altura de elevación es mayor, el caudal de descarga va a ser menor.
- Con esta deducción podemos identificar de la misma forma la relación de alturas (altura de descarga y la altura de impulsión) y la relación de caudales (caudal de descarga y el caudal de impulsión) las cuales apreciamos en la siguiente ilustración.

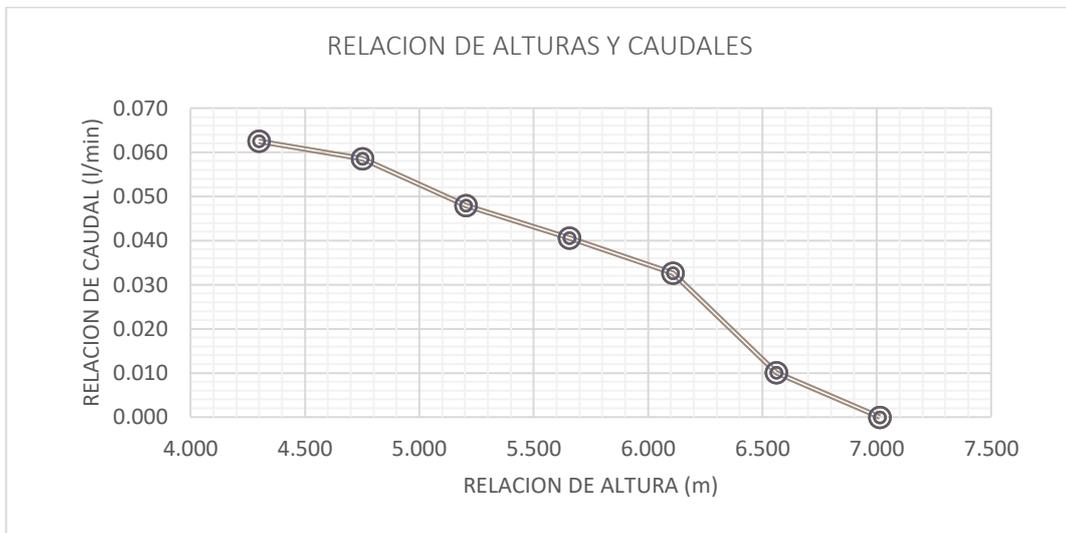


Gráfico 4.3. Relación de alturas y caudales.

Fuente: Elaboración propia.

- El resultado de dividir la potencia útil entregada en el punto de descarga con la potencia que se recibe el agua de alimentación, vendría a ser la eficiencia hidráulica.

Para determinar la potencia útil se debe aplicar la siguiente ecuación:

$$P_u = q \times h \times g \times \rho$$

Donde:

P_u : Potencia útil (W).

q : Caudal elevado (m³/s).

h : Altura de descarga (m).

g : Aceleración de la gravedad (m/s²).

ρ : Densidad del fluido (kg/m³).

- Para determinar la eficiencia volumétrica se debe tomar en consideración que este valor es el cociente del caudal de descarga y el caudal de impulsión.

Estas eficiencias se pueden notar en la siguiente ilustración.

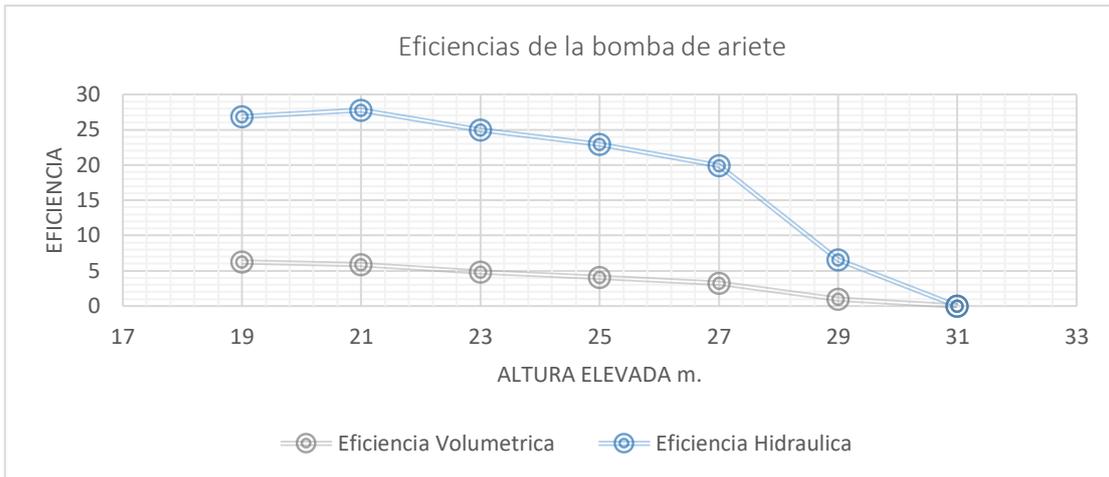


Gráfico 4.4. Eficiencias de la bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

- Para una mejor apreciación del comportamiento de la bomba de ariete en función de la altura de elevación, podemos verlo en la siguiente ilustración.

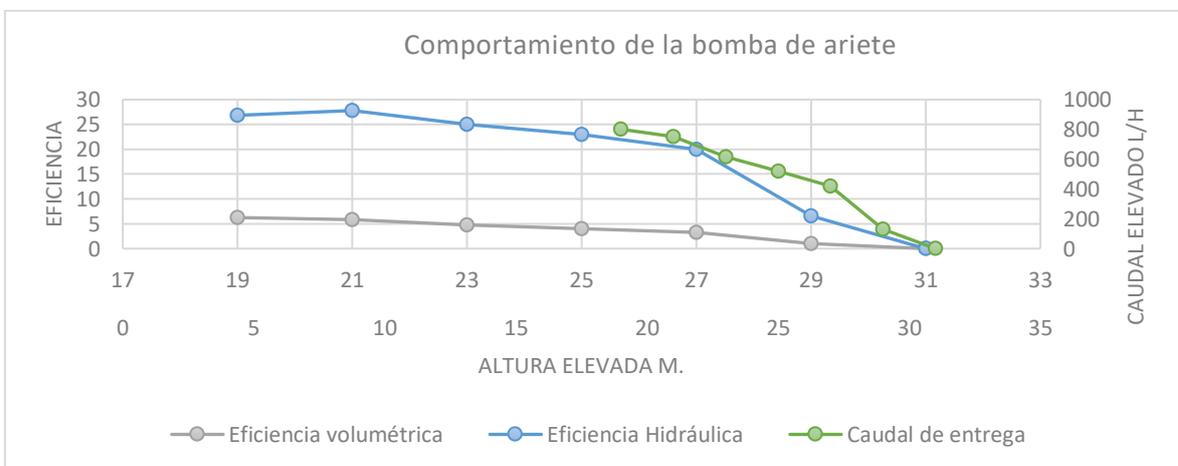


Gráfico 4.5. Comportamiento de la bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propia.

- En función a la altura de descarga podemos examinar una relación de la potencia útil entregada conjunto con el caudal de descarga ilustrada en la siguiente gráfica.

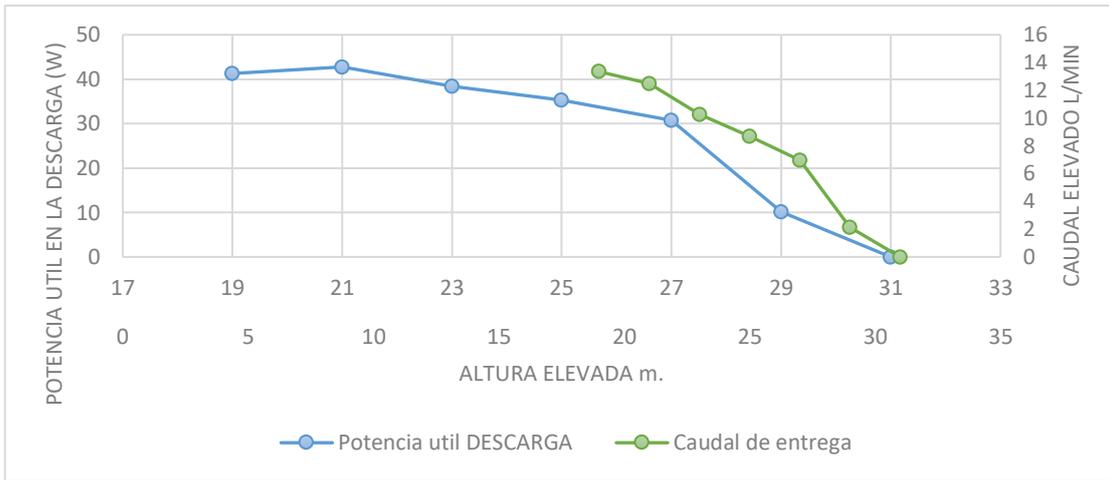


Gráfico 4.6. Eficiencias de la bomba de ariete.
Fuente: Elaboración propio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se encontró el punto máximo de eficiencia entre la altura de elevación y el caudal de descarga, ya que a una altura considerable de elevación de 25m se obtuvo un caudal de descarga de 8.67 l/min no tan menor al que se generaría con una altura de elevación menor, por el otro lado si aumentamos unos pocos metros la altura de elevación, el caudal de descarga disminuye exponencialmente hasta llegar a cero.
- Según el diseño elaborado en EXCEL el caudal de descarga esperado era de 0.43 l/s, pero una vez construida la bomba de ariete hidráulica obtuvimos un caudal real de 0.14 l/s, esto se debe a que en un diseño se contempla condiciones ideales que muchas veces son casi imposibles de replicar en la realidad y siempre habrá factores externos que afectarán el desempeño de la máquina los cuales no fueron considerados en el diseño.
- Se concluye que el desempeño de la bomba de ariete va a depender en gran parte por el buen funcionamiento de la válvula check modificada que toma el nombre de válvula de impulso, en esta se deberá probar diferentes longitudes de carrera y fuerzas que hacen que se cierre la válvula de impulso por cada ciclo, algunos autores utilizan diferentes pesas que ejercen una fuerza para cerrar la válvula, en nuestro caso se probó con resortes de diferente constante elástica.
- Podemos concluir que tanto la altura de descarga como el caudal de entrada, son factores a tener en cuenta para obtener un eficiente caudal de descarga, estos factores se verán definidos por las condiciones de la zona. Cuando la altura de captación es mayor, el caudal de ingreso se incrementará, provocando así mayor fuerza en el golpe de ariete por ende un mayor caudal de descarga.
- Se desarrolló 7 pruebas experimentales a diferentes alturas que van desde los 19 metros hasta los 31 metros, con una variación de 2 metros entre cada altura. Se concluye que a una altura de descarga de 25 metros obtenemos el caudal de 8.6746 l/min.

- Se concluye que el caudal obtenido (8.6746 l/min) a una altura de descarga de 25 metros si logra abastecer el caudal requerido para el riego por goteo presentado en la zona de la población de Characato.
- Se concluye que, para el presente estudio de investigación, se aplicó la máxima carrera de 15mm del disco ubicado en la válvula de impulsión, con el fin de una mejor eficiencia de la bomba de ariete hidráulica.
- Gracias al análisis y cálculo de los periodos aplicando el método de Krol, se calculó que, el tiempo de ciclo entre periodos será de 2.09 segundos según los cálculos realizados en Excel, mientras que al medir el ciclo de forma práctica en campo, se halló que el periodo real es de 1.80 segundos, este valor no esta tan alejado del calculado.
- Del presente estudio de investigación, se ha obtenido un caudal de descarga de 8.6746 (l/min). Por lo tanto, podemos concluir que en el lugar de estudio se puede sembrar verduras o vegetales que tengan un caudal requerido no mayor al caudal de descarga obtenido en dicha investigación.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para iniciar el funcionamiento de la bomba, se recomienda tener cerrada la válvula que controla el paso del fluido por la tubería de descarga, al abrir la válvula que da el paso al caudal de ingreso a la bomba de ariete, se recomienda hacer una apertura rápida para que el agua pueda ingresar de golpe, y así se genere el golpe de ariete, si hacemos una apertura pausada, el agua ingresará con la energía insuficiente para generar el golpe de ariete.
- Una vez abierta por completo la válvula de ingreso de agua e iniciado el golpe de ariete, mantener la válvula de descarga cerrada por unos minutos, esto para que se genere la presión necesaria en el tanque de aire para poder elevar el agua a un nivel superior, luego de unos minutos empezar a abrir la válvula de descarga pausadamente, hasta que esté abierta por completo y comience a funcionar la bomba de ariete.
- Dadas las fuertes vibraciones generadas por el golpe de ariete tanto la bomba como la tubería de impulsión puede desplazarse y moverse de su posición original, por esto es necesario asegurarlas bien ya que en el caso de la bomba, si la válvula Check modificada termina sumergida en agua, el ciclo del golpe de ariete se detendrá y con este el funcionamiento de la bomba, en el caso de nuestra tubería de alimentación está funcionando como un sifón, si esta tubería se mueve y absorbe un poco de aire el sifón dejara de funcionar por ende la bomba se detendrá.
- Se recomienda ver la forma de desviar el agua expulsada por la válvula Check modificada por cada ciclo del ariete aguas más abajo del mismo canal, del cual se está

obteniendo el caudal de ingreso a la bomba, o de lo contrario ver la forma de darle un uso, para no desperdiciar esta cantidad de agua.

- Se recomienda contar en campo con resortes de diferente coeficiente elásticos y diferentes longitudes, para probarlos y seleccionar aquel que ofrezca mejor desempeño.
- Como la altura de descarga y el caudal de entrada son factores importantes, se recomienda que, el lugar de aplicación de una bomba de ariete en campo, tiene que tener una pendiente considerable variando entre 40° y 50° para un mejor funcionamiento y rendimiento del mismo.
- Se recomienda hacer diferentes pruebas experimentales a diferentes alturas de descarga para así obtener varios resultados y de ellos una altura representativa, según sea conveniente en el terreno de estudio.
- Si la bomba será destinada para riego como el del presente estudio, debemos de tener en cuenta el cultivo a regar, por ello se recomienda, investigar y tener en cuenta la cantidad de agua por unidad de tiempo que necesita la planta a sembrar, para luego comparar con la cantidad del caudal que bombeará el ariete hidráulico y ver si abastecerá lo requerido para el regadío.
- Se recomienda fabricar una válvula de impulso desde cero para tener una mejor trabajabilidad de la bomba de ariete hidráulico, con este se facilitará el manejo de los periodos del golpe de ariete según vea conveniente el investigador.
- Del presente estudio de investigación, se ha obtenido un caudal de descarga de 8.6746 (l/min).
- Se recomienda dar mantenimiento a la válvula Check modificada, ya que contiene un jebe y al momento de que la válvula suba y baje ocasionado por el golpe de Ariete, este tiende a desgastarse y finalmente romperse perjudicando así la eficiencia de la misma Bomba de Ariete. Tener a disposición jebes para cambiarlos una vez que se halla gastado demasiado o se haya roto.
- Se recomienda dar mantenimiento a los accesorios cuando se note presencia de desgaste u oxidación, recubrir los componentes de la bomba con pintura anticorrosiva.
- Se recomienda realizar una inspección semanal para revisar el estado de las conexiones entre cada componente de la bomba y revisar si no hay fugas, si presenta fuga de agua en alguna conexión. Retirar por completo y unir nuevamente con teflón y sellar con formador de empaque.
- Se recomienda realizar una limpieza semanal interna de la bomba, dejando correr el agua por la bomba sin que se genere el golpe de ariete, si es posible desarmar la válvula Check modificada retirar el resorte y limpiarlo manualmente. Esto para evitar que con el tiempo se acumulen impurezas y obstruyan alguna zona de la bomba de ariete.

- Se recomienda llevar un control en un cuaderno de campo, donde se anotarán todas las reparaciones que se realizaron con su respectiva fecha además de cualquier otro incidente con la bomba de ariete.
- Se recomienda mantener el terreno limpio y ordenado donde este ubicada la bomba de ariete, el canal de alimentación y el reservorio, esto para una fácil inspección visual diaria de su funcionamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. QUIROGA-MÉNDEZ, J., SIERRA-GALLO, C. & BIANCHA-GUTIERREZ, G. Análisis del ariete hidráulico para diferentes configuraciones. Bucaramanga: Revista UIS Ingenierías, 2013. Vol. 12(2). 29-34. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/5537/553756870003.pdf>
2. CALLATA, J. Diseño de una bomba de ariete hidráulico monopulsor para el aprovechamiento de aguas del manantial, anexo Anucariri Puno - 2021. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Lima: Universidad César Vallejo, 2021. 195 p. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/58228>
3. HUERTA, MANUEL Alejandro. Implementación de la bomba de ariete hidráulico para minimizar la escasez de agua en regadío de cultivos en el campo agrícola de Castilla - Valle de Majes de la provincia de Castilla en el 2022. Arequipa: s.n., 2022.
4. RENGIFO, S. & GALLEGU, J. Diseño y construcción de un sistema de ariete hidráulico para el aprovechamiento de aguas lluvias. Tesis (Título de Tecnólogo Mecánico). Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2016. 75 p. Disponible: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/983c95b9-eee0-45f2-a4ca-4341a436a08f/content>
5. DE AZEVEDO, J. & ACOSTA, G. Manual de hidráulica. México: s.n., 1975.
6. MARTINEZ, W. Bomba de Ariete. Barinas: s.n., 2016.
7. REYES, V. & JIMÉNEZ, F. Cálculo, diseño y construcción de un prototipo de ariete hidráulico. Veracruz: s.n., 2011.
8. Severiano F. Pérez Remesal, Carlos Renedo Estébanez. Mecánica de los fluidos Tema 1. s.l.: Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas. Publicación (Dpto. de Ingeniería Eléctrica y Energética). España: Universidad de Cantabria
9. DOMINGO, A. Apuntes de Mecánica de Fluidos. Madrid: s.n., 2011.
10. Ballesteros, Gustavo. Clasificación de los flujos de fluidos. La Guajira: s.n., 2014.
11. JIMÉNEZ, C. Mecánica de fluidos: viscosidad y turbulencia. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica.
12. Física de fluidos y termodinámica. [En línea] 16 de 02 de 2015. Disponible en: <https://mauriciomedinasierra.wordpress.com>.
13. CIVIL, TUTORIALES AL DÍA – Ingeniería. Una Metodología (Adicional) Para el Cálculo de Pérdidas Localizadas: La Longitud Equivalente.
14. GUÍA AGROPECUARIA. Estudio de Promoción y Difusión de Buenas Prácticas "Bomba de Ariete del proyecto Tawan Ingnika. 2012. Disponible en: https://www.jica.go.jp/Resource/nicaragua/espanol/office/others/c8h0vm000001q4bc-att/32_realizados_01.pdf

15. GUEVARA-RODRÍGUEZ, G., VARGAS-OBANDO, A. & QUESADA CHANTO, J
Prevenición del golpe de ariete mediante el control del tiempo de cierre, al usar válvulas hidráulicas automatizadas. Revista Tecnología en Marcha, 2021. 34(1), Disponible en: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4821/5398
16. KROL, J. The Automatic Hydraulic Ram, 1951.
17. CAMPAÑA, C & GUAMÁN, D. Diseño y construcción de una bomba de ariete. Tesis (Título de Ingeniero Mecánico). Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2011. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4020/1/CD-3778.pdf>
18. HERNÁNDEZ, R. Metodología de la investigación. 6ta. ed. México: Interamericana Editores, S.A, 2014.
19. TAMAYO, M. El proceso de la investigación científica. 4ta. ed. México: Editorial Milusa, 2004.

ANEXOS

ANEXO 01: MATRIZ DE CONSISTENCIA

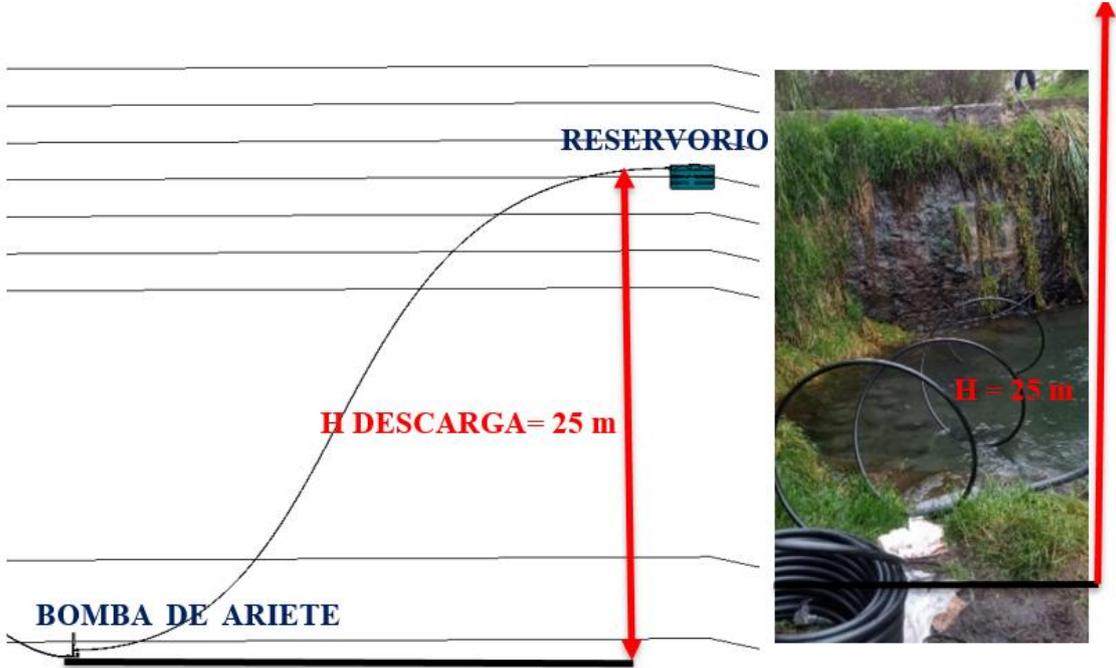
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES INDEPENDIENTES	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa del cálculo matemático • Etapa de esquematización
¿Es factible realizar el diseño e implementación de la bomba de ariete hidráulico el cual podrá cumplir con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo?	Realizar el diseño e implementación de una bomba de ariete hidráulico que cumpla con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo.	El diseño e implementación de la bomba de ariete hidráulico cumplirá con los requerimientos mínimos de 468 l/h de caudal y 2,5 bares de presión para alimentar un sistema de riego por goteo.	Diseño de la bomba de Ariete hidráulica	<ul style="list-style-type: none"> • Etapa de ensamble y armado
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	DIMENSIONES	POBLACIÓN
A. Con una altura de captación de 4,42m será posible generar la presión y caudal de descarga para alimentar un sistema de riego por goteo?	A. Generar la presión y caudal de descarga con una altura de captación de 4,42m para alimentar un sistema de riego por goteo.	A. La bomba de ariete hidráulico generará la presión y caudal de descarga con una altura de captación de 4,42 m para alimentar un sistema de riego por goteo.	<ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento para el cálculo del diseño • Caudal de descarga • Presión generada • Estanque de almacenamiento 	diseño de la bomba de ariete hidráulica
B. ¿Es posible alimentar un reservorio de 5 m ³ que abastecerá un área total de 2498 m ² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora?	B. Alimentar un reservorio de 5 m ³ que abastecerá un área total de 2498 m ² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora.	B. La bomba de ariete hidráulico alimentará un reservorio de 5 m ³ que abastecerá un área total de 2498 m ² para el cultivo de Brócoli con un caudal de 520 litros por hora.	MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	
C. ¿Es posible alcanzar la máxima eficiencia de la bomba de ariete en el diseño e implementación?	C. Diseñar e implementar la bomba de ariete de tal forma que alcance su máxima eficiencia	C. El diseño e implementación a realizar de la bomba de ariete alcanzará la máxima eficiencia.	ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	
			TIPO DE INVESTIGACIÓN	
			- Aplicada	

ANEXO 02: TABLA DE POSIBLES FALLAS Y SOLUCIONES EN EL FUNCIONAMIENTO

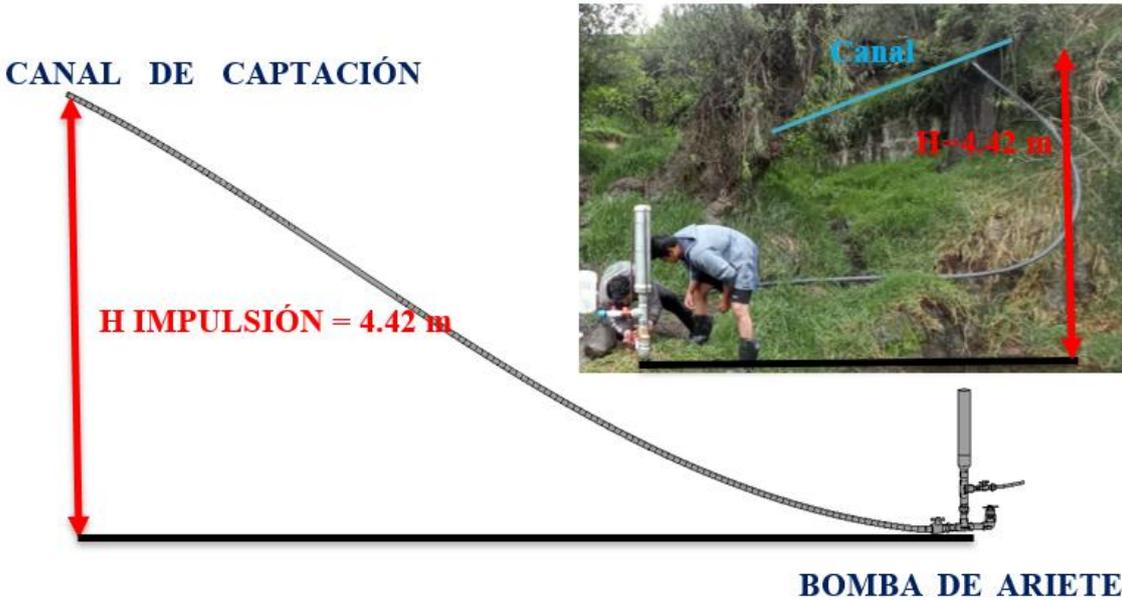
Falla	Causa	Solución
No inicia a funcionar la bomba al abrir por primera vez la válvula de alimentación de la bomba.	No generarse el primer golpe de ariete, por ende, no comienza el ciclo de golpes de ariete.	Abrir la válvula rápido y en un solo movimiento, ya que, si la abrimos pausadamente y en más de un movimiento, el agua no ingresará con la suficiente fuerza para generar el golpe de ariete.
No inicia a funcionar la bomba al abrir por primera vez la válvula de descarga.	No se ha generado la presión suficiente en la cámara de aire para elevar el agua a la altura deseada de bombeo.	Iniciado el golpe de ariete mantener la válvula de descarga cerrada por unos minutos, para que se genere la presión necesaria en el tanque de aire, luego abrir la válvula de descarga pausadamente, hasta abrirla por completo.
La válvula check modificada se detiene en la posición abierta.	No hay la suficiente presión de agua para cerrar de nuevo la válvula.	Reducir la resistencia al cierre de la válvula check modificada, cambiando el resorte por uno de menor coeficiente elástico
La válvula check modificada se detiene en la posición cerrada.	No hay la suficiente fuerza por parte del resorte para abrir de nuevo la válvula.	Aumentar la fuerza elástica generada por el resorte para la apertura de la válvula, cambiando el resorte por uno de mayor coeficiente elástico.
Reducción del caudal bombeado y presencia de burbujas de aire en la tubería de descarga.	Se ha formado una bolsa de aire en la tubería de descarga.	Instalar una válvula de aire en el cambio de pendiente de la tubería de descarga.
	Se almacenó una excesiva cantidad de aire en la cámara de aire, debido a que se apertura demasiado la válvula de aire.	Cerrar la válvula poco a poco hasta arreglar el problema.
El caudal bombeado es muy bajo en relación al caudal de ingreso.	Baja eficiencia de la bomba de ariete por obstrucción de la tubería de impulsión y la bomba debido a presencia de tierra, piedras, algas, etc..	Purgar la bomba y las tuberías.
	Válvulas check gastadas, debido al uso el neopreno que sella el cierre de las válvulas se gasta.	Mantenimiento de las válvulas check.

ANEXO 03: PANEL FOTOGRÁFICO

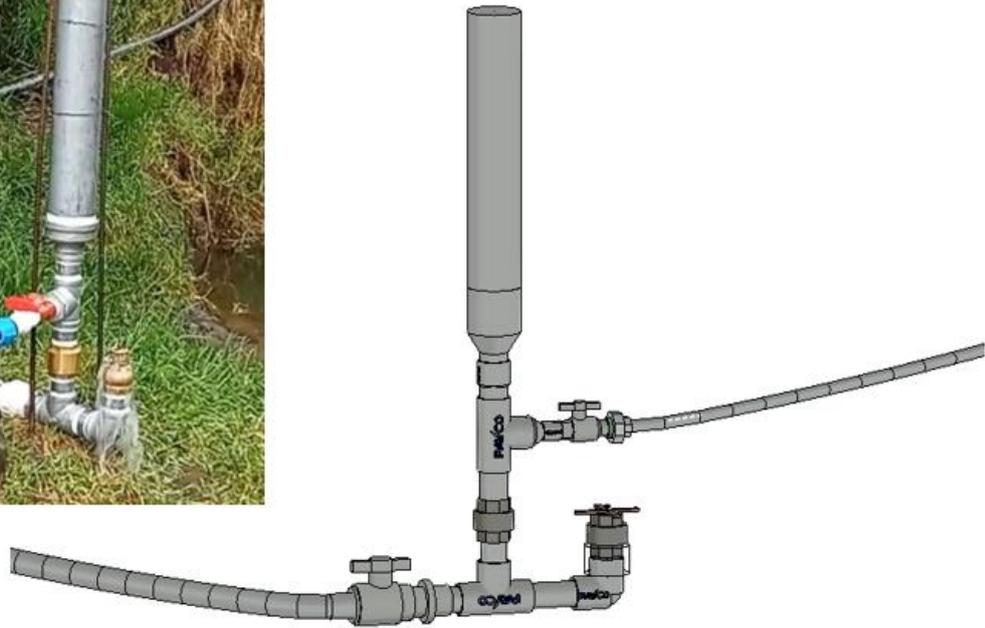
Altura de descarga de la bomba de ariete



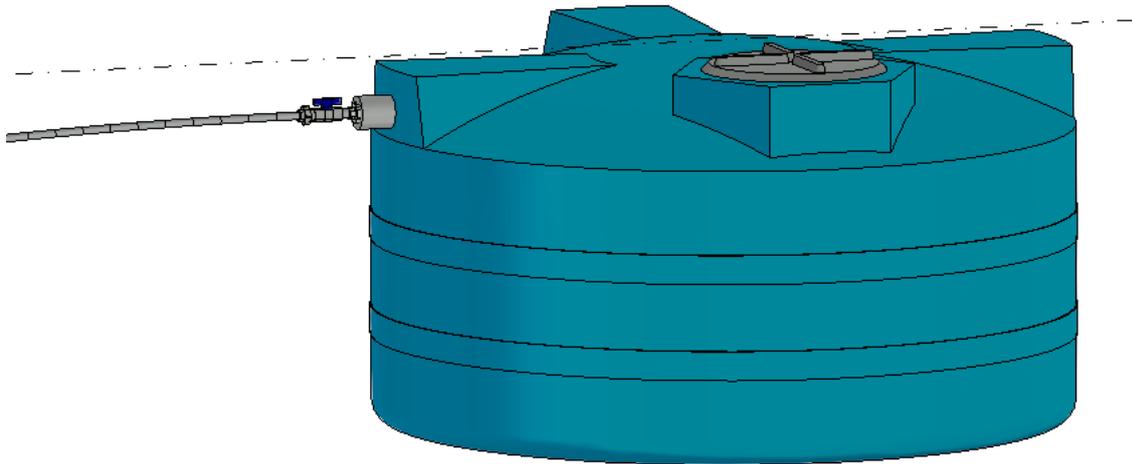
Altura de impulsión de la bomba de ariete



Bomba de ariete ensamblada



Reservorio de almacenamiento 5 m³



ANEXO 4: PROPIEDADES DEL AGUA

Temperatura °C	Peso Específico kN/m ³	Densidad kg/m ³	Visc. Dinámica (Pa*s) o (N*s/m ²)	Visc. Estática m ² /s
0	9,81	1,000	1,75 x 10 ⁻³	1,75 x 10 ⁻⁶
5	9,81	1,000	1,52 x 10 ⁻³	1,52 x 10 ⁻⁶
10	9,81	10,000	1,30 x 10 ⁻³	1,30 x 10 ⁻⁶
15	9,81	10,000	1,15 x 10 ⁻³	1,15 x 10 ⁻⁶
20	9,79	998	1,02 x 10 ⁻³	1,02 x 10 ⁻⁶
25	9,78	997	8,91 x 10 ⁻⁴	8,94 x 10 ⁻⁷
30	9,77	996	8,00 x 10 ⁻⁴	8,03 x 10 ⁻⁷
35	9,75	994	7,18 x 10 ⁻⁴	7,22 x 10 ⁻⁷
40	9,73	992	6,51 x 10 ⁻⁴	6,56 x 10 ⁻⁷
45	9,71	990	5,98 x 10 ⁻⁴	6,00 x 10 ⁻⁷
50	9,69	988	5,41 x 10 ⁻⁴	5,48 x 10 ⁻⁷
55	9,67	986	4,98 x 10 ⁻⁴	5,05 x 10 ⁻⁷
60	9,65	984	4,60 x 10 ⁻⁴	4,67 x 10 ⁻⁷
65	9,62	981	4,31 x 10 ⁻⁴	4,39 x 10 ⁻⁷
70	9,59	978	4,02 x 10 ⁻⁴	4,11 x 10 ⁻⁷
75	9,56	975	3,73 x 10 ⁻⁴	3,83 x 10 ⁻⁷
80	9,53	971	3,50 x 10 ⁻⁴	3,60 x 10 ⁻⁷
85	9,50	968	3,30 x 10 ⁻⁴	3,41 x 10 ⁻⁷
90	9,47	965	3,11 x 10 ⁻⁴	3,22 x 10 ⁻⁷
95	9,44	962	2,92 x 10 ⁻⁴	3,04 x 10 ⁻⁷
100	9,40	958	2,82 x 10 ⁻⁴	2,94 x 10 ⁻⁷

ANEXO 5: COEFICIENTE DE PÉRDIDA EN ACCESORIOS

VALORES DEL COEFICIENTE K EN PÉRDIDAS POR ACCESORIOS	K	L/D
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	10	350
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	5	175
Válvula de retención (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (abierta $\frac{3}{4}$)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{2}$)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta $\frac{1}{4}$)	5,6	160
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	24	900
T por salida lateral	-	40
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

ANEXO 6: VALORES DE RUGOSIDAD DE ALGUNOS MATERIALES

TIPO DE TUBERÍA	RUGOSIDAD (mm)
Vidrio, cobre o latón estirado	0,001 o lisas
Latón industrial	0,025
Acero laminado nuevo	0,05
Acero laminado oxidado	0,15 a 0,25
Acero con incrustaciones	1,5 a 3
Acero asfaltado	0,01
Acero soldado nuevo	0,03 a 0,1
Acero soldado oxidado	0,4
Hierro galvanizado	0,15 a 0,20
Fundición corriente nueva	0,25
Fundición asfaltada	0,1
Cementado Alisado	0,3 a 0,8
Cemento bruto	Hasta 3

ANEXO 07: FICHA TÉCNICA TUBERÍA HDPE DE ALTA DENSIDAD

TUBERIA POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD HDPE

Descripción : Tuberías polietileno de alta densidad (HDPE / PEAD)

Usos : Minería, Industria, Sanitario, Acuicola, Agrícola.
Para conducción de agua potable, se utiliza tubería coextruida (líneas azules).

Rango de diámetros: 20 - 1200 mm

Presión de Operación: Ver tablas dimensionales al reverso (agua a 20°C).

Rango de Temperaturas: 0° - 40°C. Para temperaturas mayores a 20°C, se debe aplicar coeficientes de reducción de presión de operación.



Resinas utilizadas : Ver tablas 1 y 2 (valores referenciales).

>>PE 100 (tabla 1)

Propiedad	Método de prueba	Valor típico	Unidad
Densidad (resina base)	ISO 1183	949	Kg/m ³
Densidad (compuesto)	ISO 1183	959	Kg/m ³
Índice de fluidez (190°C/5Kg)	ISO 1133	0,45	g/10 min.
Tensión máxima elástica	ISO 6259	25	MPa
Alargamiento a la rotura	ISO 6259	>600	%
Módulo de elasticidad	ISO 527	1400	MPa
T° de reblandecimiento Vicat (1Kg)	ISO 306	127	°C
T° de reblandecimiento Vicat (5Kg)	ISO 306	77	°C
Estabilidad térmica (OIT1), 210°C	ISO 10837	>20	min.
ESCR (10% Igepal), F ₅₀	ASTM D 1693-A	>10000	h
Contenido de negro de humo	ASTM D 1603	≥2	%

1) OIT: oxidation induction time

>>PE 80 (tabla 2)

Propiedad	Método de prueba	Valor típico	Unidad
Densidad (resina base)	ISO 1183	945	Kg/m ³
Densidad (compuesto)	ISO 1183	955	Kg/m ³
Índice de fluidez (190°C/5Kg)	ISO 1133	0,85	g/10 min
Tensión máxima elástica	ISO 6259	21	MPa
Alargamiento a la rotura	ISO 6259	>600	%
Módulo de elasticidad	ISO 527	1000	MPa
T° de reblandecimiento Vicat (1Kg)	ISO 306	125	°C
T° de reblandecimiento Vicat (5Kg)	ISO 306	72	°C
Estabilidad térmica (OIT1), 210°C	ISO 10837	>20	min
ESCR (10% Igepal), F ₅₀	ASTM D 1693-A	>10000	h
Contenido de negro de humo	ASTM D 1603	≥2	%

1) OIT: oxidation induction time

Designación y Clasificación: MRS (Minimun Required Strength) : es el nivel de resistencia (tensión) mínima requerida que se debe considerar en el diseño de las tuberías para la conducción de agua a 20°C por un tiempo de servicio de al menos 50 años.

Materiales	MRS
PE 80	8 MPa
PE 100	10 MPa

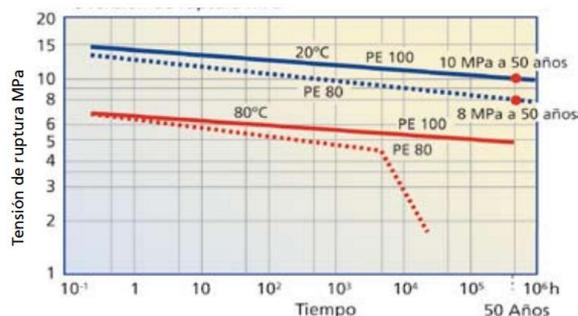
Normas utilizadas : ISO 4427, DIN 8074, Nch 398 /1.

Certificaciones : Certificación permanente Cesmec, ISO 14001 e ISO 9001.

Sistemas de unión - Fijas: Soldadura de tope (termofusión) y electrofusión.
- Desmontables: Uniones enflanchadas y roscados de compresión.

Sumisistro estándar :

Diámetro Nominal	Rollos	Tiras
20 - 63 mm ("1/2 - 1")	100 m	12 m
75 - 110 mm ("2 1/2 - 4")	50 m	12 m
125 -1200 mm ("5 - 48")		12 m



ANEXO 08: PROPIEDADES MECÁNICAS DEL RESORTE UTILIZADO

MUELLES COMPRESIÓN



MUELLES COMPRESIÓN					ALAMBRE DE ACERO FOSFATADO EN 10270 - 1 SH - PH							ALAMBRE DE ACERO INOXIDABLE AISI 302 EN 10270 - 3 1.4310 X10CrNi18-8									
D. Ext	Hilo	Largo	Espiras Útiles	Paso	Código	Cód. Tarifa	Constante K DaN/mm	Carga 25% DaN	Carga Máx DaN	Longitud Libre (mm)	Longitud Total (mm)	Bloque	Código	Cód. Tarifa	Constante K DaN/mm	Carga 25% DaN	Carga Máx DaN	Longitud Libre (mm)	Longitud Total (mm)	Bloque	
26,00	3,50	70	6,5	10,77	26081	CL	2,1535	37,686	52,50	90,446	28,00	26082	CM	2,0268	35,469	52,50	85,126	28,00			
26,00	3,50	75	7,0	10,71	26083	CL	1,9997	37,494	56,25	90,484	29,75	26084	CM	1,8820	35,288	56,25	85,162	29,75			
26,00	3,50	80	8,0	10,00	26085	CL	1,7497	34,994	60,00	81,798	33,25	26086	CM	1,6468	32,936	60,00	76,987	33,25			
26,00	3,50	90	9,5	9,47	26087	CL	1,4734	33,152	67,50	75,882	38,50	26088	CM	1,3868	31,202	67,50	71,418	38,50			
26,00	3,50	95	10,0	9,50	26089	CL	1,3998	33,244	71,25	76,637	40,25	26090	CN	1,3174	31,289	71,25	72,129	40,25			
26,00	3,50	100	11,0	9,09	26091	CL	1,2725	31,813	75,00	71,579	43,75	26092	CN	1,1977	29,941	75,00	67,368	43,75			
26,00	3,50	125	14,0	8,93	26093	CL	0,9998	31,245	93,75	70,738	54,25	26094	CO	0,9410	29,407	93,75	66,577	54,25			
26,00	3,50	150	17,0	8,82	26095	CL	0,8234	30,877	112,50	70,194	64,75	26096	CN	0,7750	29,061	112,50	66,065	64,75			
26,00	3,50	500	45,0	11,11	26097	SS	0,3111	38,882	375,00	104,904	162,75	26098	SS	0,2928	36,595	375,00	98,733	162,75			
26,00	4,00	40	3,5	11,43	26099	CK	7,2985	72,985	30,00	145,970	20,00	26100	CL	6,8692	68,692	30,00	137,383	20,00			
26,00	4,00	45	3,5	12,86	26101	CK	7,2985	82,108	33,75	182,462	20,00	26102	CL	6,8692	77,278	33,75	171,279	20,00			
26,00	4,00	50	4,0	12,50	26103	CK	6,3862	79,827	37,50	178,813	22,00	26104	CL	6,0105	75,131	37,50	168,295	22,00			
28,00	2,00	38	3,5	10,86	26157	CC	0,2764	2,625	28,50	7,738	10,00	26158	CC	0,2601	2,471	28,50	7,283	10,00			
28,00	2,00	40	3,5	11,43	26159	CC	0,2764	2,764	30,00	8,291	10,00	26160	CC	0,2601	2,601	30,00	7,803	10,00			
28,00	2,00	45	4,0	11,25	26161	CC	0,2418	2,720	33,75	8,221	11,00	26162	CC	0,2276	2,560	33,75	7,738	11,00			
28,00	2,00	50	4,5	11,11	26163	CC	0,2149	2,687	37,50	8,168	12,00	26164	CC	0,2023	2,529	37,50	7,687	12,00			
28,00	2,00	55	5,0	11,00	26165	CC	0,1934	2,660	41,25	8,125	13,00	26166	CC	0,1821	2,503	41,25	7,647	13,00			
28,00	2,00	60	5,5	10,91	26167	CC	0,1759	2,638	45,00	8,090	14,00	26168	CD	0,1655	2,483	45,00	7,614	14,00			
28,00	2,00	65	6,0	10,83	26169	CC	0,1612	2,620	48,75	8,060	15,00	26170	CD	0,1517	2,465	48,75	7,586	15,00			
28,00	2,00	70	7,0	10,00	26171	CC	0,1382	2,418	52,50	7,323	17,00	26172	CD	0,1300	2,276	52,50	6,893	17,00			
28,00	2,00	75	6,0	12,50	26173	CC	0,1612	3,023	56,25	9,672	15,00	26174	CD	0,1517	2,845	56,25	9,103	15,00			
28,00	2,00	80	9,0	8,89	26175	CC	0,1075	2,149	60,00	6,341	21,00	26176	CD	0,1011	2,023	60,00	5,968	21,00			
28,00	2,00	90	11,0	8,18	26177	CC	0,0879	1,978	67,50	5,715	25,00	26178	CE	0,0828	1,862	67,50	5,379	25,00			
28,00	2,00	95	12,0	7,92	26179	CC	0,0806	1,914	71,25	5,481	27,00	26180	CE	0,0759	1,802	71,25	5,159	27,00			
28,00	2,00	100	13,0	7,69	26181	CC	0,0744	1,860	75,00	5,283	29,00	26182	CE	0,0700	1,751	75,00	4,972	29,00			
28,00	2,00	500	50,0	10,00	26183	SS	0,0193	2,418	375,00	7,680	103,00	26184	SS	0,0182	2,276	375,00	7,228	103,00			
28,00	2,20	30	3,0	10,00	26185	CE	0,4831	3,623	22,50	9,710	9,90	26186	CE	0,4547	3,410	22,50	9,139	9,90			
28,00	2,20	38	3,5	10,86	26187	CE	0,4141	3,934	28,50	11,180	11,00	26188	CF	0,3897	3,702	28,50	10,523	11,00			
28,00	2,20	40	3,5	11,43	26189	CE	0,4141	4,141	30,00	12,009	11,00	26190	CF	0,3897	3,897	30,00	11,302	11,00			
28,00	2,20	45	4,0	11,25	26191	CE	0,3623	4,076	33,75	11,921	12,10	26192	CF	0,3410	3,836	33,75	11,219	12,10			
28,00	2,20	50	4,5	11,11	26193	CE	0,3221	4,026	37,50	11,852	13,20	26194	CF	0,3031	3,789	37,50	11,155	13,20			
28,00	2,20	55	5,0	11,00	26195	CE	0,2899	3,986	41,25	11,797	14,30	26196	CF	0,2728	3,751	41,25	11,103	14,30			
28,00	2,20	60	5,5	10,91	26197	CE	0,2635	3,953	45,00	11,753	15,40	26198	CF	0,2480	3,720	45,00	11,061	15,40			
28,00	2,20	65	6,0	10,83	26199	CE	0,2416	3,925	48,75	11,715	16,50	26200	CF	0,2273	3,694	48,75	11,026	16,50			
28,00	2,20	65	6,0	10,83	26199	CE	0,2416	3,925	48,75	11,715	16,50	26200	CF	0,2273	3,694	48,75	11,026	16,50			
28,00	2,20	70	7,0	10,00	26201	CE	0,2070	3,623	52,50	10,621	18,70	26202	CF	0,1949	3,410	52,50	9,997	18,70			
28,00	2,20	75	6,0	12,50	26203	CE	0,2416	4,529	56,25	14,131	16,50	26204	CF	0,2273	4,263	56,25	13,300	16,50			
28,00	2,20	80	9,0	8,89	26205	CE	0,1610	3,221	60,00	9,163	23,10	26206	CG	0,1516	3,031	60,00	8,624	23,10			
28,00	2,20	90	11,0	8,18	26207	CF	0,1318	2,964	67,50	8,235	27,50	26208	CG	0,1240	2,790	67,50	7,750	27,50			
28,00	2,20	95	12,0	7,92	26209	CF	0,1208	2,868	71,25	7,887	29,70	26210	CH	0,1137	2,700	71,25	7,423	29,70			
28,00	2,20	100	13,0	7,69	26211	CF	0,1115	2,787	75,00	7,592	31,90	26212	CH	0,1049	2,623	75,00	7,146	31,90			
28,00	2,20	500	50,0	10,00	26213	SS	0,0290	3,623	375,00	11,209	113,30	26214	SS	0,0273	3,410	375,00	10,550	113,30			
28,00	2,50	30	3,0	10,00	26215	CE	0,8343	6,258	22,50	15,644	11,25	26216	CF	0,7853	5,890	22,50	14,724	11,25			
28,00	2,50	38	3,5	10,86	26217	CE	0,7152	6,794	28,50	18,236	12,50	26218	CF	0,6731	6,394	28,50	17,164	12,50			
28,00	2,50	40	3,5	11,43	26219	CE	0,7152	7,152	30,00	19,667	12,50	26220	CF	0,6731	6,731	30,00	18,510	12,50			
28,00	2,50	45	3,5	12,86	26221	CE	0,7152	8,045	33,75	23,243	12,50	26222	CF	0,6731	7,572	33,75	21,875	12,50			
28,00	2,50	50	4,0	12,50	26223	CE	0,6258	7,822	37,50	22,684	13,75	26224	CF	0,5890	7,362	37,50	21,349	13,75			
28,00	2,50	55	4,5	12,22	26225	CE	0,5562	7,648	41,25	22,249	15,00	26226	CF	0,5235	7,198	41,25	20,940	15,00			
28,00	2,50	60	5,0	12,00	26227	CE	0,5006	7,509	45,00	21,902	16,25	26228	CF	0,4712	7,067	45,00	20,613	16,25			
28,00	2,50	65	5,5	11,82	26229	CE	0,4551	7,395	48,75	21,617	17,50	26230	CF	0,4283	6,960	48,75	20,346	17,50			
28,00	2,50	70	6,0	11,67	26231	CE	0,4172	7,301	52,50	21,380	18,75	26232	CG	0,3926	6,871	52,50	20,123	18,75			
28,00	2,50	75	7,0	10,71	26233	CE	0,3576	6,705	56,25	19,220	21,25	26234	CG	0,3365	6,310	56,25	18,089	21,25			
28,00	2,50	80	8,0	10,00	26235	CE	0,3129	6,258	60,00	17,600	23,75	26236	CG	0,2945	5,890	60,00	16,564	23,75			
28,00	2,50	90	10,0	9,00	26237	CF	0,2503	5,632	67,50	15,331	28,75	26238	CH	0,2356	5,301	67,50	14,429	28,75			
28,00	2,50	95	11,0	8,64	26239	CF	0,2275	5,404	71,25	14,506	31,25	26240	CH	0,2142	5,086	71,25	13,653	31,25			

Medidas en (mm), k = Constante, Carga en (DaN) = 1,02 Kg (Fuerza)

ANEXO 09: FICHA TÉCNICA VÁLVULA CHECK DE PIE DE BRONCE

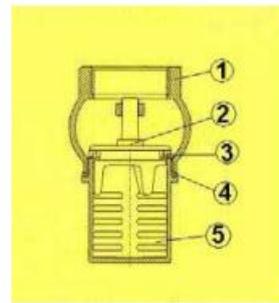
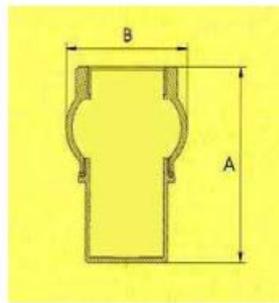
GENEBRE

Características

- Construcción en latón según UNE-EN 12165.
- Adaptado para todo tipo de instalación hidráulica y neumática.
- Temperatura de trabajo desde 0° C a 90° C.
- Unión roscada hembra NPT según ANSI / ASME B 1.20.1.

Features

- Brass construction according UNE-EN 12165.
- Suitable for all kind of hydraulic and pneumatic installation.
- Working temperature from 0° C to 90° C.
- Threaded female end according ANSI / ASME B 1.20.1.



Nº	Denominación / Name	Material / Material
1	Cuerpo / Body	Latón / Brass (CW617N)
2	Obturador / Obturator	Latón / Brass (CW617N)
3	Junta cierre / Seal joint	NBR / NBR
4	Junta union / Union joint	Fibra / Fiber
5	Filtro / Filter	Latón / Brass (UNI 5035)

Ref.	Medida/ Size	PN	Dimensiones / Dimensions (mm)			Peso / Weight (g)
			P	A	B	
3145 05	¾"	10	20	70	45	230
3145 06	1"	10	25	82	51	305
3145 07	1¼"	8	32	94	61	485
3145 08	1½"	8	40	102	68	580
3145 09	2"	8	50	119	80	950
3145 10	2½"	6	65	139	100	1370
3145 11	3"	6	80	175	121	1735
3145 12	4"	6	100	194	145	3135

ANEXO 10: DOSIS ORIENTATIVA DE RIEGO COLIFLOR

DOSIS DE RIEGO EN COLIFLOR

El agua es un recurso escaso y de ahí que resulte una exigencia ineludible el lograr una eficiencia alta en el riego de los cultivos. Para lograr un buen aprovechamiento del agua de riego, la dosis se debe ajustar a las necesidades del cultivo, de forma que sean mínimas las pérdidas por percolación, evaporación, o escorrentía, debiendo evitarse los estados extremos de humedad que puedan resultar perjudiciales para las plantas.

La planta de coliflor se caracteriza por tener una raíz pivotante de la que parte una cabellera ramificada y superficial de raíces. La textura de los suelos es preferible que sea ligera, con un buen punto de retención de humedad y con un elevado contenido en materia orgánica. Se pueden adaptar a suelos ácidos hasta pH 5.5 y son plantas medianamente resistentes a la salinidad.

Las necesidades totales de agua oscilan entre los 2500-3000 m³/ha en función de las condiciones climáticas y principalmente de la precipitación coexistente durante el ciclo del cultivo



Algunas consideraciones que deben tener en cuenta en el programa de riego de la coliflor son:

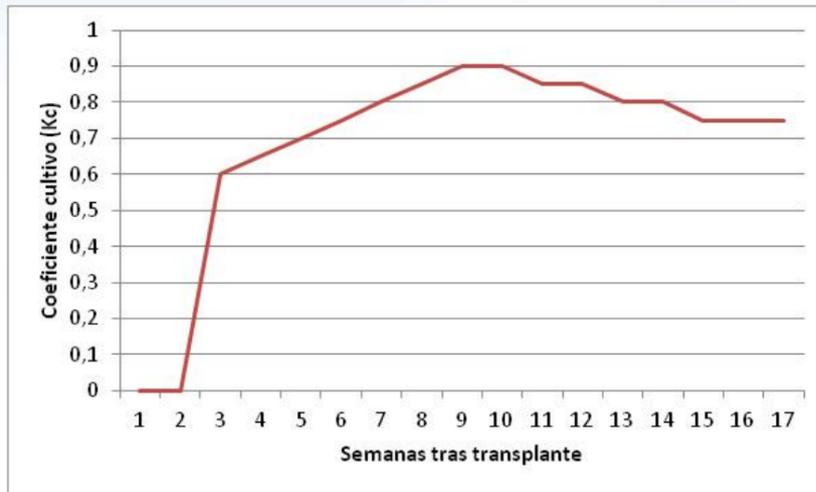
- El riego de plantación se debe realizar inmediatamente después del trasplante, y es conveniente que sea abundante para asegurar un buen arraigue de las plantas.
 - Durante las primeras fases del cultivo, el suelo se debe mantener con un nivel intermedio de humedad, para favorecer el arraigue y desarrollo radicular.
 - La frecuencia de riego debe hacerse en función del tipo de suelo, de la salinidad del agua, de las condiciones meteorológicas, etc. En general, se deben realizar un mínimo de 3 riegos / semana, y en los suelos muy arenosos o cuando se utilizan aguas con alta salinidad es conveniente aumentar la frecuencia de riego.
-
- Para evitar la aparición de problemas derivados de ataques de hongos patógenos, los goteros se deben colocar algo alejados de los tallos de las plantas (10-20 cm).
 - Se debe procurar que los bulbos húmedos queden solapados en la línea de riego (10-15%), para impedir la aparición de zonas secas que produzcan una acumulación de sales perjudicial para el cultivo y asegurar el suministro de agua a todas las plantas.
 - Cuando las plantas están arraigadas se inicia la programación del riego, determinando las necesidades totales de agua en función de la evapotranspiración del cultivo.



A partir de los resultados obtenidos en nuestras experiencias y para cultivo al aire libre, se propone un programa de dosificación de riego orientativo en el sistema de riego por goteo en cultivo al aire libre.

Aunque lo recomendable es utilizar los servicios de asesoramiento para el riego de cada Comunidad Autónoma:

Evolución de Kc del cultivo



DOSIS ORIENTATIVAS DE RIEGO.

Semanas tras el transplante	Estado vegetativo	Coeficiente de cultivo (K _c)	Aporte de agua de riego. (l/m ² /semana)
1	Plantación	-	30 - 45
2	Arraigue	-	20 - 30
3	Crecimiento	0,6	6 - 9
4	Crecimiento	0,65	10 - 15
5	Formación hojas	0,7	12 - 18
6	Formación hojas	0,75	12 - 18
7	Formación hojas	0,8	16 - 24
8	Formación hojas	0,85	16 - 24
9	Formación hojas	0,9	18 - 27
10	Formación hojas	0,9	18 - 27
11	Formación hojas	0,85	14 - 21
12	Formación hojas	0,85	14 - 21
13	Crecimiento pella	0,8	14 - 21
14	Crecimiento pella	0,8	14 - 21
15	Crecimiento pella	0,75	12 - 18
16	Crecimiento pella	0,75	12 - 18
17	Crecimiento pella	0,75	12 - 18
Dosis riego total (l/m ²)			250 - 375

ANEXO 11: CALCULO DEL CAUDAL SOLICITADO VS CAUSAL DISPONIBLE

DOSIS ORIENTATIVAS DE RIEGO.

Semanas tras el trasplante	Estado vegetativo	Coefficiente de cultivo (K_c)	Aporte de agua de riego. ($l/m^2/semana$)
1	Plantación	-	30 - 45

Tiempos para el llenado de recipiente de 20l

t1=	134 s
t2=	140 s
t3=	141 s
t Promedio=	138.333333 S

Capacidad L	tiempo (s)
20	138.333333
x	1
Q=	0.1446 l/s

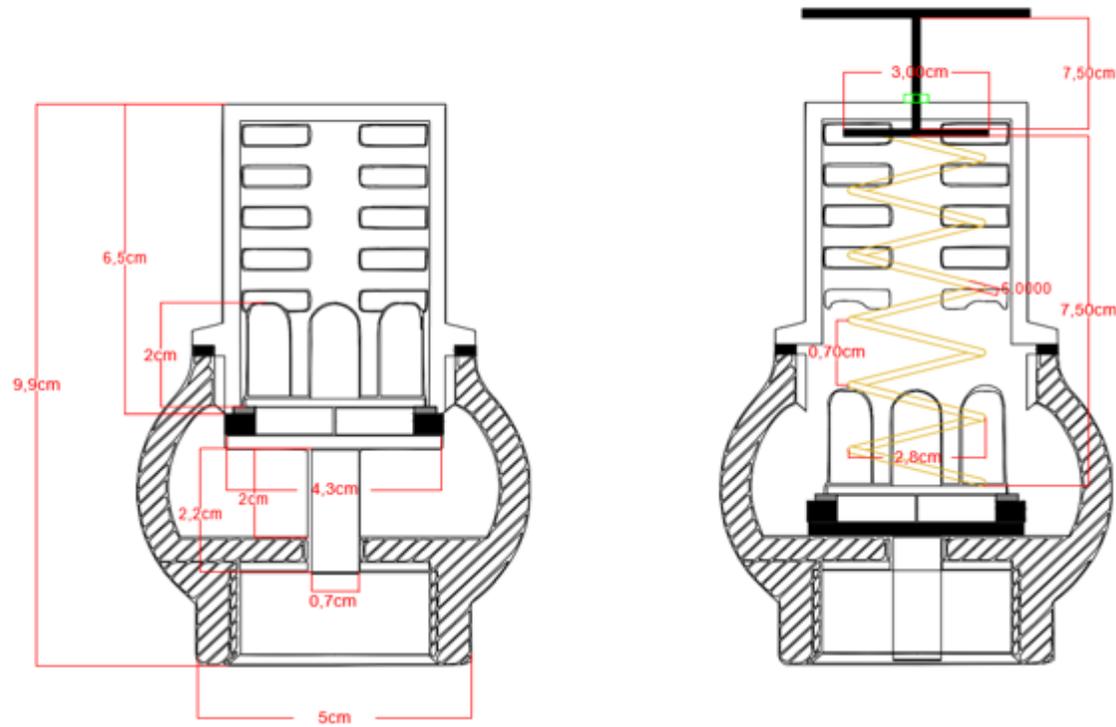
CAUDAL REQUERIDO	
Area =	2498 m ²
q / semana =	87430 Litros
q/día =	12490.00 Litros

CAUDAL DISPONIBLE	
Q caudal salida=	0.144578313 l/s
Q caudal salida=	12491.56627 l/día

ANEXO 12: DIMENSIONAMIENTO DEL RESERVORIO

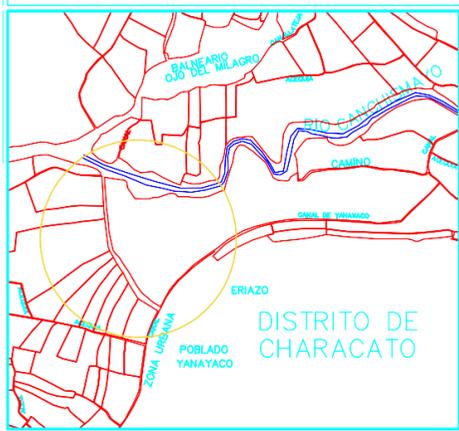
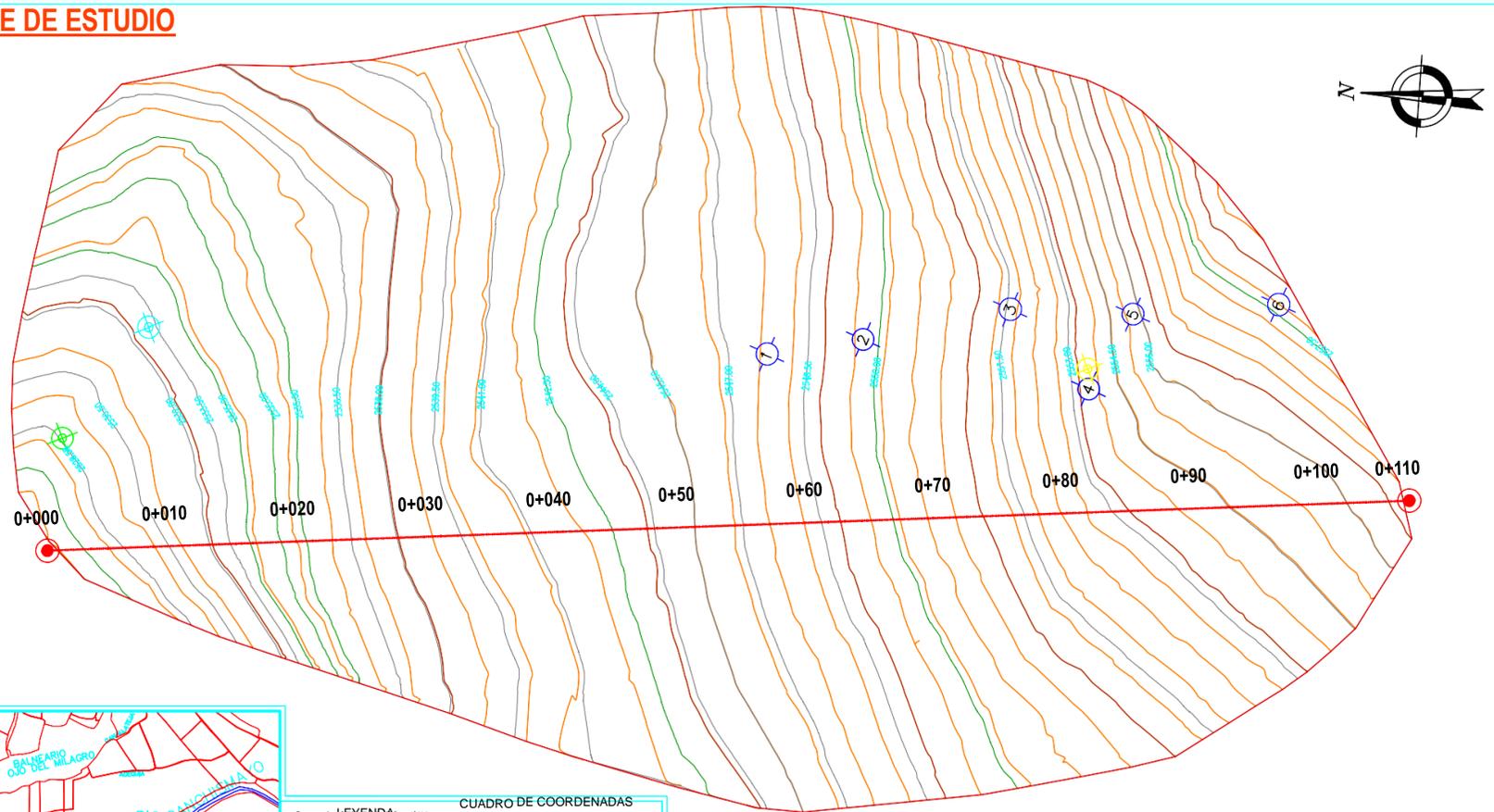
Hs	Caudal de aporte (l/s)	Caudal de consumo (l/s)	Volumen de aporte (m3/s)	Volumen de consumo (m3/s)		Volumen de regulación 1 (m3/s)	Volumen de regulación 2 (m3/s)
0	0.14	0.2168			0.0000	0.0000	0.5532
2	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-0.5532	0.0000
4	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-1.1065	-0.5532
6	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-1.6597	-1.1065
8	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-2.2130	-1.6597
10	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-2.7662	-2.2130
12	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-3.3195	-2.7662
14	0.14	0.2168	1.0080	1.5612	-0.5532	-3.8727	-3.3195
16	0.14		1.0080	0.7806	0.2274	-3.6454	-3.0921
18	0.14		1.0080	0.0000	1.0080	-2.6374	-2.0841
20	0.14		1.0080	0.0000	1.0080	-1.6294	-1.0761
22	0.14		1.0080	0.0000	1.0080	-0.6214	-0.0681
24	0.14	0.2168	1.0080	0.7806	0.2274	-0.3940	0.1593
SUMATORIA	1.6800	1.7347	12.0960	12.4900			

ANEXO 13: DETALLE DE LA VÁLVULA CHECK Y PLANO TOPOGRÁFICOS



UNIVERSIDAD CONTINENTAL			
 UNIVERSIDAD CONTINENTAL	PROYECTO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA BOMBA DE ASPIRTE HIDRÁULICO 4x200 PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO POR CORTED EN LOS CULTIVOS ASESADOS AL OJO DEL SELAJCO EN AREQUIPA		
	INTEGRANTES: NAVIA GARCIA ANDRES VICENTE VALDEVIA QUISE FRANCESCO MOISES		LAMINA: A-1
	PLANO: DETALLE DE VALVULA CHECK		
	DISEÑO: VALVULA CHECK	N.º V.:	ESCALA: 1/100

SUPERFICIE DE ESTUDIO

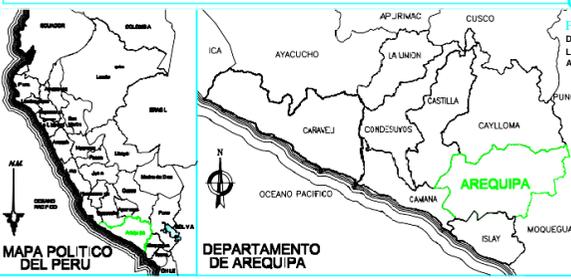


Curvas de **LEYENDA** 5 metros

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	PRIMERA PRUEBA
	SEGUNDA PRUEBA
	TERCERA PRUEBA
	CUARTA PRUEBA
	QUINTA PRUEBA
	SEXTA PRUEBA

PRUEBA	SUR	OESTE
	232821.571	8174449.546
	232843.032	8174438.167
	232900.515	8174316.706
	237390.312	8177254.981
	237398.896	8177242.446
	237413.004	8177223.825
	237407.247	8177207.422
	237420.603	8177206.194
	237431.853	8177186.436

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
	PIUNTO DE ALIMENTACIÓN
	PIUNTO DE IMPULSION
	PIUNTO DE DESCARGA



UNIVERSIDAD CONTINENTAL

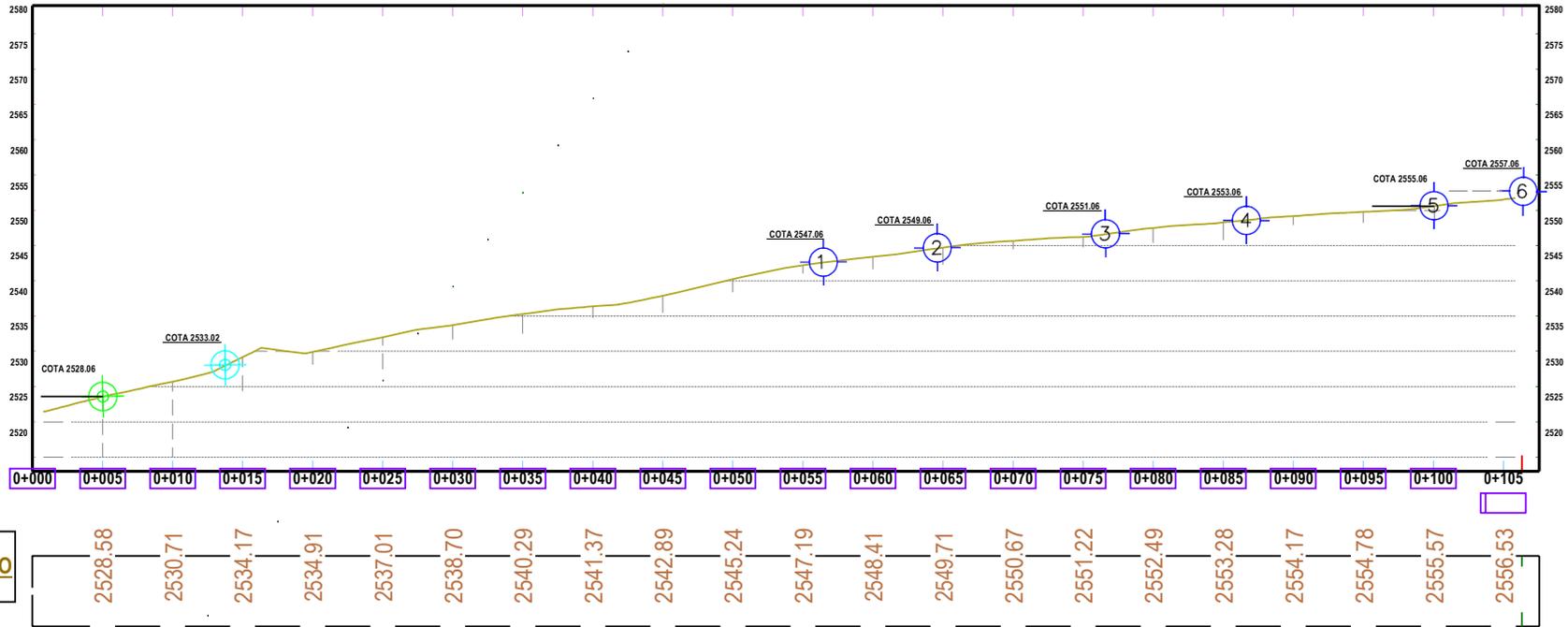
PROYECTO:
 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO de 520 l/hora PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN LOS CULTIVOS ALEDAÑOS AL OJO DEL MILAGRO EN

INTEGRANTES:
 NAVIA GARCIA VICENTE ANDRES
 VALDIVIA GUISEP FRANCESCO MOISES



LEYENDA	

PERFIL LONGITUDINAL
ESC: H-1/1000 → V-1/1000



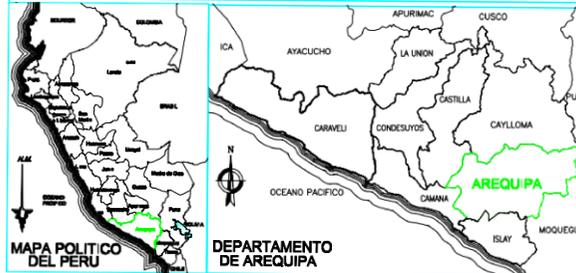
LEYENDA
 Curvas de nivel a 2.000 metros

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
①	PRIMERA PRUEBA
②	SEGUNDA PRUEBA
③	TERCERA PRUEBA
④	CUARTA PRUEBA
⑤	QUINTA PRUEBA
⑥	SEXTA PRUEBA

CUADRO DE COORDENADAS

PRUEBA	SUR	OESTE
1	232821.571	8174449.546
2	232843.032	8174438.167
3	232900.515	8174316.706
4	237390.312	8177254.981
5	237398.896	8177242.446
6	237413.004	8177223.825
7	237407.247	8177207.422
8	237431.853	8177186.436

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
☒	PUNTO DE ALIMENTACIÓN
☑	PUNTO DE IMPULSIÓN
☒	PUNTO DE DESCARGA



UNIVERSIDAD CONTINENTAL

PROYECTO:
 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA BOMBA DE ARIETE HIDRÁULICO de 520 litros PARA LA ALIMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE RIEGO POR GOTEO EN LOS CULTIVOS ALEAÑOS AL OJO DEL M LAGRO EN

INTEGRANTES:
 NAVIA GARCIA VICENTE ANDRES
 VALDIVIA GUISEP FRANCESCO MOISES

PLANO:
 PLANO TOPOGRAFICO 01

FECHA:
 NOV - 2024

ESCALA:
 1/100



Universidad
 Continental

LAMINA:
 TP - 2