

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE
ARIETE HIDRÁULICO

JAIRO EDUARDO AGUIRRE MAYA
CARLOS EDUARDO BOTINA PATIÑO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2001

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA BOMBA DE
ARIETE HIDRÁULICO

JAIRO EDUARDO AGUIRRE MAYA
CARLOS EDUARDO BOTINA PATIÑO

Trabajo de Grado para optar por el titulo de
Ingeniero Civil

Director:
Ing. JAIME CASTILLO GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO
2001

NOTA DE ACEPTACIÓN

**Ricardo Arturo Insuasty
Jurado**

**José Alfredo Jiménez
Jurado**

**Jaime Castillo González
Director**

San Juan de Pasto, noviembre 15 de 2001

Dedico este trabajo a DIOS, por haberme dado todo.

A LOLA, mi MADRE, por su sacrificio, sus desvelos y por haberme enseñado a afrontar la vida como una serie de retos que hay que superar para convertirse en una persona mejor.

A MARILÚ, mi novia, por ese apoyo incondicional que me brinda y me impulsa a seguir adelante, sin desfallecer y encarar el futuro con optimismo.

A mis hermanos, mis sobrinos, mis tíos, mi cuñada y mi suegra. quienes dan sentido a mi vida

JAIRO EDUARDO AGUIRRE MAYA

Dedico este trabajo a DIOS, por haberme dado la vida.

A mi MADRE, por su sacrificio, sus desvelos y por haberme enseñado a afrontar la vida buscando siempre ser mejor.

A SANTIAGO, mi hijo, por ser la persona más importante y haberle dado sentido a mi vida.

CARLOS EDUARDO BOTINA PATIÑO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Al Ingeniero JAIME CASTILLO GONZÁLEZ, director de este proyecto, por su gran colaboración y amistad.

A ROBERTO GARCÍA, director del laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería, por su desinteresada colaboración, sin la cual no hubiese sido posible la realización de este proyecto.

Al JURADO CALIFICADOR, que con sus conocimientos, experiencia y valiosa información colaboraron a mejorar nuestro trabajo.

A todas aquellas personas que de una u otra forma han creído en nosotros y nos han colaborado en cada una de las etapas de nuestra carrera.

CONTENIDO

		Pág.
	GLOSARIO	
	RESUMEN	
	ABSTRACT	
	INTRODUCCION	
1	GENERALIDADES	22
1.1	RESEÑA HISTÓRICA	23
1.2	PARTES DE UN ARIETE	26
1.2.1	La Fuente	27
1.2.2	El Tubo de Alimentación	27
1.2.3	La Válvula de Impulso	27
1.2.4	La Válvula de Retención	27
1.2.5	La Cámara de Aire	27
1.2.6	El Tubo de Elevación	27
1.3	FUNCIONAMIENTO	28
1.4	VENTAJAS DE UN ARIETE HIDRÁULICO	30
1.5	DESVENTAJAS DE UN ARIETE HIDRÁULICO	32
2	MARCO TEÓRICO	33
2.1	DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE	33

2.2	ECUACIONES PARA CALCULAR EL GOLPE DE ARIETE	38
2.3	ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UN ARIETE HIDRÁULICO	42
2.3.1	Cálculo del diámetro de la tubería de alimentación	43
2.3.2	Cálculo del diámetro de la tubería de elevación	44
2.3.3	Diseño de la válvula de impulso	44
2.3.3.1	Mediante un contrapeso	45
2.3.3.2	Mediante un sistema de resorte	47
2.3.4	Diseño de la válvula de retención	51
2.3.5	Cálculo de la sobrepresión	52
2.3.5.1	Cierre rápido	53
2.3.5.2	Cierre lento	54
2.3.6	Diseño de la cámara de aire	55
3	DISEÑO DEL ARIETE	57
3.1	CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN	57
3.1.1	Prediseño.	58
3.1.2	Diseño definitivo	58
3.2	CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE ELEVACIÓN	60
3.3	DISEÑO DE LA VÁLVULA DE IMPULSO	62
3.3.1	Mediante un sistema de resorte	62
3.4	DISEÑO DE LA VÁLVULA DE RETENCIÓN	63

3.5	CÁLCULO DE LA SOBREPRESIÓN	64
3.5.1	Cálculo cierre rápido	64
3.5.2	Cálculo cierre lento	65
3.6	DISEÑO DE LA CÁMARA DE AIRE	66
4	CONSTRUCCIÓN DEL ARIETE	70
4.1	VÁLVULA DE IMPULSO	70
4.2	VÁLVULA DE RETENCIÓN	72
4.3	CUERPO DEL ARIETE	73
4.4	CÁMARA DE AIRE	74
4.5	UNIDAD DE SALIDA	75
5	INSTALACIÓN EN EL LABORATORIO	78
6	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	82
6.1	OPERACIÓN DEL ARIETE HIDRAULICO	82
6.2	MANTENIMIENTO DEL ARIETE HIDRAULICO	85
7	REALIZACIÓN DE LABORATORIOS	87
7.1	EQUIPO UTILIZADO	87
7.2	LABORATORIO No. 1	
	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE GOLPES POR MINUTO	88
7.2.1	Objetivo	88
7.2.2	Procedimiento	88
7.2.3	Guía de laboratorio	93

7.3	LABORATORIO No. 2.	
	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE ALTURAS	95
7.3.1	Objetivo	95
7.3.2	Procedimiento	96
7.3.3	Guía de laboratorio	100
8	DISEÑO SIMPLIFICADO	102
8.1	DESCRIPCIÓN	102
8.2	ECUACIÓN GENERAL DEL ARIETE HIDRÁULICO	103
8.3	TUBERÍA DE ENTRADA	103
8.4	TUBERÍA DE SALIDA	105
8.5	VÁLVULA DE IMPULSO	105
8.6	VÁLVULA DE RETENCIÓN	106
8.7	CÁMARA DE AIRE	107
9	RECOMENDACIONES	108
	ANEXOS	110
	CONCLUSIONES	116
	BIBLIOGRAFIA	118

LISTA DE CUADROS

CUADRO		Pág.
1	Longitudes Equivalentes Para Accesorios de PVC	59
2	Elementos del Ariete	68
3	Consumo de Agua Diaria per Cápita	102
4	Valores de Rendimiento vs Relación de Alturas	103
5	Relación Caudal de Alimentación vs Diámetro de Tubería de Entrada	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		Pág.
1	Esquema del Ariete Hidráulico de Whitehurst	24
2	Esquema del Ariete Hidráulico de Montgolfier	25
3	Esquema General de un Ariete Hidráulico	26
4	Llegada del Agua de la Fuente a la Caja de Válvulas	28
5	Cierre de la Válvula de Impulso y Apertura de la Válvula de Retención	29
6	Apertura de la Válvula de Impulso y Cierre de la Válvula de Retención	29
7	Llegada del Agua Hasta el Depósito de Almacenamiento	30
8a	Instante $t = 0$	35
8b	Instante $t = L/c$	36
8c	Instante $t = 2L/c$	37
8d	Instante $t = 3L/c$	37
8e	Instante $t = 4L/c$	38
9	Croquis de Definición Para el Golpe de Ariete en Tuberías	40
10	Diagrama de Presión vs Tiempo de Cierre de la Válvula	41
11	Válvula de Impulso con Contrapeso	46

12	Válvula de Impulso con Resorte	50
13	Válvula de Retención	52
14	Diagrama de Presiones y Volúmenes en la Cámara de Aire	55
15a	Despiece General de la Válvula de Impulso	63
15b	Montaje de la Válvula de Impulso	63
16	Despiece y Montaje de la Válvula de Retención	64
17	Despiece General del Ariete Hidráulico	68
18	Base Para el Ariete Hidráulico	69
19	Despiece de la Válvula de Impulso	70
20	Eje Modificado Para Válvula de Impulso (torneado)	71
21	Despiece de la Válvula de Retención	72
22	Cuerpo del Ariete o Caja de Válvulas	73
23	Campana o Cámara de Aire	75
24	Unidad de Salida	76
25	Bomba de Ariete Hidráulico	77
26	Tanque de Alimentación	78
27	Conducción Tanque de Alimentación - Ariete	79
28	Base del Ariete Hidráulico	80
29	Manguera de Salida Ariete – Tanque de Almacenamiento	81
30	Alturas Mínimas de Operación Para el Ariete Hidráulico	83

31	Calibración del Número de Golpes por Minuto	84
32	Simulación de Altura Mediante Pérdida de Carga	85
33	Válvula de Retención con Tornillo de Purga	86
34	Gráfica Para Determinar la Máxima Eficiencia (η) en Función del Número de Golpes por Minuto (G/M)	92
35	Gráfica Para Determinar la Máxima Eficiencia (η) en Función de la Relación de Alturas (h/H)	99
36	Esquema de un Suministro con Ariete Hidráulico	107

GLOSARIO

Accesorio: Elemento auxiliar que sirve para posibilitar el empleo de otro, en hidráulica sirve para facilitar la instalación de varias tuberías.

Aforar: Medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.

Altura Hidrostática: Se refiere a la cota relativa de la superficie o espejo de agua con respecto a un nivel de referencia.

Bombear: Elevar agua o cualquier otro líquido utilizando algún tipo de mecanismo.

Buje: Pieza cilíndrica que tiene como fin disminuir el diámetro de un accesorio.

Celeridad: Es la velocidad de propagación de las ondas del golpe de ariete en un fluido y en un conducto rígido, es equivalente a la velocidad del sonido en ese medio.

Cinta Teflón: Material plástico fluorado resistente a la corrosión, se usa en instalaciones hidráulicas para hacer selle hermético en uniones roscadas.

Contrapeso: Peso extra que se pone en la parte opuesta de otro para que guarden equilibrio.

Émbolo: Disco que se ajusta y mueve en el interior de una válvula para comprimir un fluido o recibir de este un movimiento.

Longitud Equivalente: Es la equivalencia de un accesorio a longitud de tubería recta en donde las pérdidas por aditamentos son proporcionales a las pérdidas por fricción.

Motobomba: Mecanismo empleado para impulsar agua, con la Energía suministrada por un motor eléctrico o de explosión.

Niple: Tramo de tubería recta lisa o roscada que sirve para unir dos accesorios.

Piezómetro: Instrumento que permite medir la presión o altura hidrostática de los fluidos.

Probeta: Tubo de cristal graduado, cerrado por un extremo y sirve para medir el volumen de los fluidos.

PVC: Cloruro de Polivinilo, material plástico utilizado para la fabricación de tuberías

RDE: Es la relación existente entre el diámetro de una tubería y el espesor de sus paredes.

Reducción Bushing: Aditamento en hierro galvanizado que sirve para efectuar la unión de dos Accesorios roscados de diámetros diferentes.

Válvula: Dispositivo de cierre que regula el paso de un fluido por un conducto o tubería.

Válvula Cheque: Accesorio que en una tubería permite el flujo del liquido en un sentido y lo impide en el otro.

Válvula de Pie: Accesorio que va en el extremo final de la tubería de succión en una motobomba, sirve para que dicha tubería no se quede sin agua cuando el motor de la bomba está apagado.

RESUMEN

El **Ariete Hidráulico** es un ingenioso aparato cuya función es bombear parte del caudal de una presa, de un río o cualquier desnivel que lo alimenta hasta una altura superior a la hidrostática, utilizando la misma energía hidráulica, sin requerir ningún otro tipo de energía externa. El sistema se basa en el fenómeno conocido en la hidráulica como golpe de ariete, el cual se produce cuando una masa de agua en movimiento es detenida en forma repentina, la energía cinética que trae el agua en movimiento se transforma en energía elástica; con el **Ariete Hidráulico** se producen continuamente estos golpes en el tubo de alimentación y se aprovechan los aumentos de presión para elevar el agua al sitio de almacenamiento.

Las partes que constituyen un **Ariete** son: La fuente de abastecimiento, el tubo de alimentación, la válvula de impulso, la válvula de retención, la cámara de aire y por último el tubo de elevación. Nuestro **Ariete**, que se instaló en el laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, se construyó totalmente en tubería y accesorios de PVC, a excepción de las válvulas, las cuales son manufacturadas en bronce.

ABSTRACT

The **Hydraulic Ram Pump (Hydram)** is an ingenious device that pumps a part of the flow from a dam, from a river or any slope that supplies the **Hydram**, to a superior height to the hydrostatics, using the self hydraulic energy, no using any kind of external energy. The system is based on the hydraulics well-known phenomenon that is the water-hammer, which take place when a mass of moving water is stopped abruptly, the kinetic energy that the water brings becomes in elastic energy, with an **Hydram** these beats are produced continually in the drive pipe, and the pressure increase is used to pump water to the reservoir place.

The constitutive parts of an **Hydraulic Ram Pump** are: The drive pipe, the impulse valve, the retention valve, the air chamber and the delivery pipe. Our **Hydram** that was settled in the hydraulics laboratory from the “Universidad de Nariño” engineering college, was built totally in PVC pipe and accessories with the exception of the valves what are manufactured in Bronze

INTRODUCCIÓN

La situación actual de la Universidad Pública exige compromiso por parte de los estudiantes, quienes deben prestar su concurso para ayudar a solventar las necesidades más urgentes y proponer soluciones creativas las cuales deben ser ejecutadas con conciencia de pertenencia y solidaridad.

Ante la falta de apoyo por parte de las entidades encargadas de dotar a las Universidades y ante la apatía para aportar dichas soluciones, nosotros como estudiantes comprometidos con el progreso de nuestra Alma Mater proponemos el siguiente trabajo de grado el cual tiene por objetivo la construcción de una Bomba de **Ariete Hidráulico** que será de mucha ayuda para los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería y servirá de material académico para el desarrollo de prácticas en las áreas relacionadas.

1. GENERALIDADES

El **Ariete Hidráulico** es un dispositivo simple que utiliza la energía del agua procedente de una pequeña caída para obligar a una porción del caudal a elevarse a una mayor altura de la fuente original.

Para que el **Ariete** funcione se necesitan, principalmente, dos cosas: Agua en cantidades suficientes para impulsar el **Ariete** y suficiente altura de caída del agua por la tubería de alimentación, la cual debe ser de por lo menos 1 metro, bajo estas condiciones el **Ariete** está en capacidad de elevar el agua entre 10 y 12 veces la altura de alimentación, aunque la relación entre el agua desperdiciada y la bombeada varía entre 2:1 y 6:1

Una pequeña cantidad de agua con una gran caída bombeará tanta agua como una gran cantidad de líquido con poca caída y tanto mayor sea la altura a la que se deba elevar el agua, tanto menor será la cantidad de agua bombeada.

El **Ariete** puede ser considerado como un motor hidráulico y en su versión convencional funciona al mismo tiempo como bomba. Para un acercamiento fácil y práctico al cálculo general de este aparato, es más

cómodo compararlo con el funcionamiento de un transformador eléctrico. El transformador eléctrico recibe un voltaje bajo (voltios), con una corriente eléctrica relativamente alta (amperios) y lo transforma en un régimen de mayor voltaje y menor intensidad de corriente.

Análogamente ocurre a nivel hidráulico en una instalación con un **Ariete**. El aparato recibe un gran caudal con una altura moderadamente baja y lo transforma en un régimen de menor caudal a mayor altura de presión.

1.1 RESEÑA HISTÓRICA

John Whitehurst de Delby (Inglaterra), fue el descubridor de los principios fundamentales del **Ariete Hidráulico** en el año de 1775. En 1796 Joseph Michel Montgolfier (1740–1810), inventó un dispositivo que bajo los mismos principios fundamentales del aparato de Whitehurst operaba automáticamente, Joseph mundialmente conocido junto con su hermano Jacques Etienne (1745–1799) por ser los inventores del globo aerostático, crecieron en la región de Ardeche al sur de Francia, una zona caracterizada por sus planicies de caliza y ríos que forman profundas gargantas, este paisaje tan inusual pudo haber sido la inspiración para pensar en construir un aparato que ayude a elevar agua desde estas escarpadas profundidades hasta las planicies sobre ellas.

El **Ariete** de Whitehurst (Figura 1) operaba mediante la abertura y cierre de la válvula de escape con la mano, mientras que Montgolfier (Figura 2) en su invento acopló el mismo mecanismo automáticamente, utilizando una válvula construida en una tubería curva de mayor diámetro que la de entrada, que contaba con una esfera de hierro que encajaba holgadamente en la tubería y por lo tanto podía moverse libremente sobre la curvatura hasta llegar al extremo superior de la válvula de donde ya no podía pasar y generaba un cierre brusco el cual accionaba el aparato, gracias a este dispositivo se logró el uso práctico de la máquina ya que no requería la acción humana para su funcionamiento. Joseph Montgolfier, también fue quien llamó a la máquina “**Ariete Hidráulico**”. Desarrollos posteriores, con referencia especial a su automatización y aumento de la eficiencia, permitieron llegar al **Ariete** tal como lo conocemos hoy.

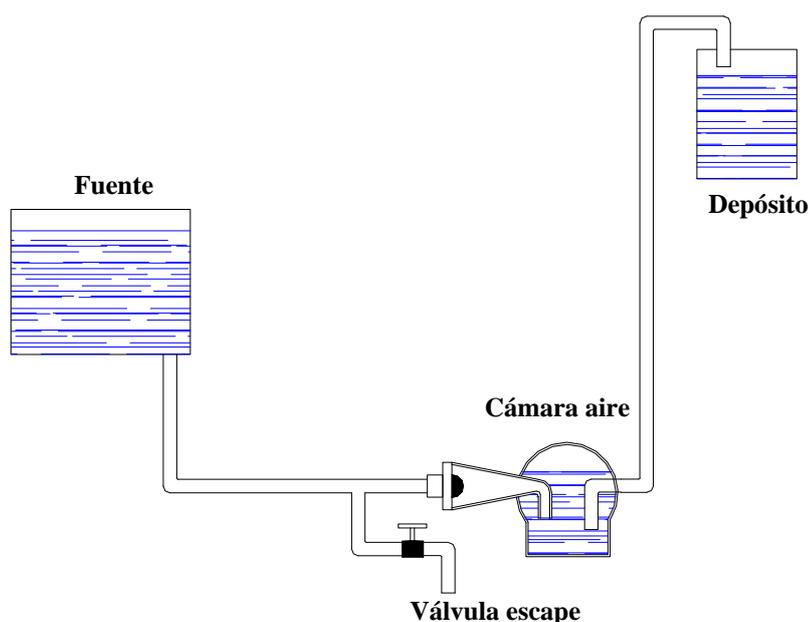


Figura 1. Esquema del Ariete Hidráulico de Whitehurst

Este aparato se difundió ampliamente por todo el mundo durante el siglo XIX, adaptándose por ejemplo a las famosas fuentes del Taj Majal en la India o en Ameer de Afganistán, su fabricación masiva comenzó en Bretaña (Francia) hacia 1820 y se convirtieron en la fuente de poder principal para bombear a los suministros de agua potable en casas rurales aisladas y empresas e incluso para abastecer poblaciones enteras.

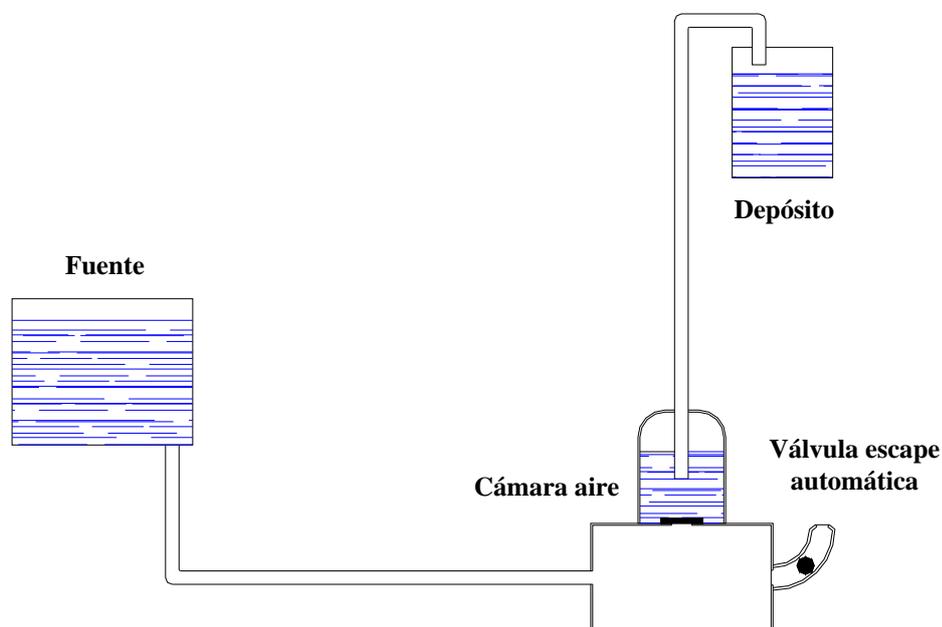


Figura 2. Esquema del Ariete Hidráulico de Montgolfier

La llegada de las redes principales de abastecimiento de agua potable para las ciudades y la aparición de la bomba centrífuga y la disminución de los costos de la energía para poder accionarla llevaron al desuso del **Ariete** como sistema de bombeo y ocasionaron su casi desaparición de la memoria de la civilización humana.

Ahora gracias al resurgimiento de la mentalidad ecológica y la necesidad de usar los recursos naturales con el menor impacto sobre ellos, intentando además, disminuir el consumo de energía, el **Ariete Hidráulico**, ciertamente, tiene enormes posibilidades de renacimiento.

1.2 PARTES DE UN ARIETE

En el esquema se muestran los elementos esenciales para el funcionamiento de un **Ariete Hidráulico**.

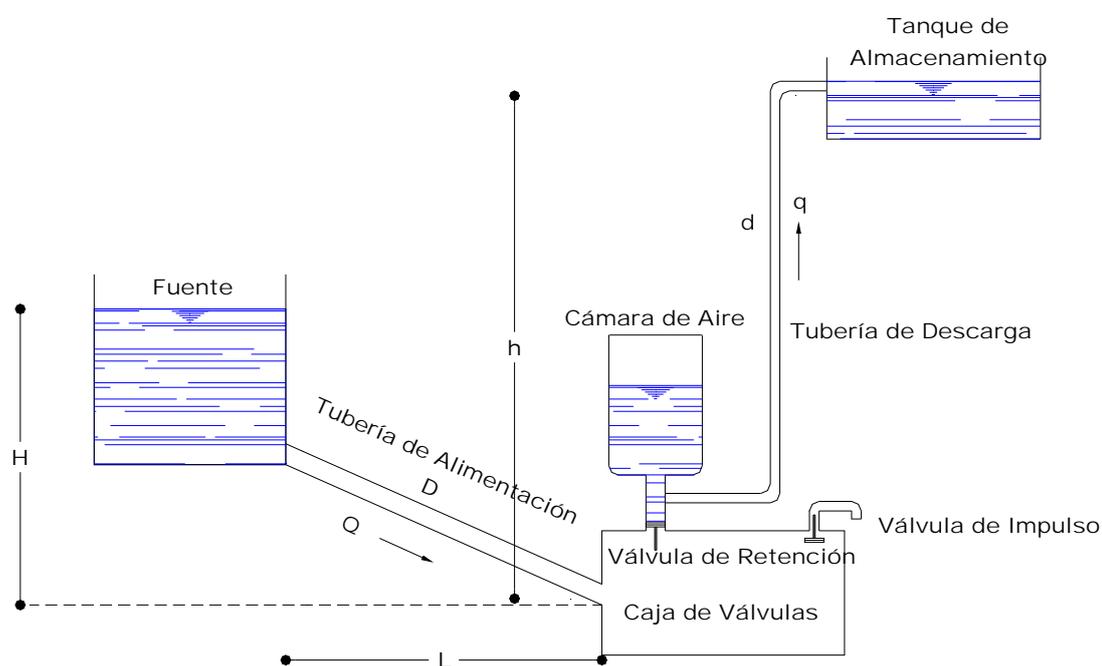


Figura 3. Esquema General de un Ariete Hidráulico

- 1.2.1 La Fuente:** Una presa, un río o cualquier otro medio que permita crear un desnivel con respecto al **Ariete**, esta abastece el tubo de alimentación.
- 1.2.2 El Tubo de Alimentación:** Se encarga de llevar el agua de la fuente al sistema de válvulas del **Ariete**, según las reglas convencionales debe tener una longitud adecuada, ser lo más recta posible y preferiblemente en un material de alta rigidez.
- 1.2.3 La Válvula de Impulso:** Es el alma del **Ariete** ya que es la que pone a funcionar automáticamente el aparato, aquí se genera el golpe de ariete mediante el cierre brusco de esta válvula.
- 1.2.4 La Válvula de Retención:** Es la encargada de permitir el paso del agua a la cámara de aire e impedir que esta retorne a la tubería de alimentación.
- 1.2.5 La Cámara de Aire:** Su función es amortiguar la sobre presión producida por el golpe de ariete y a su vez llevar el agua por la tubería de elevación, actúa como resorte.
- 1.2.6 El Tubo de Elevación:** Es el responsable de transportar el agua bombeada al sitio de almacenamiento.

1.3 FUNCIONAMIENTO

El **Ariete** funciona de acuerdo con principios simples. El agua comienza a descender desde la captación o fuente de almacenamiento por el tubo de alimentación hasta la caja de válvulas del **Ariete** (Figura 4),

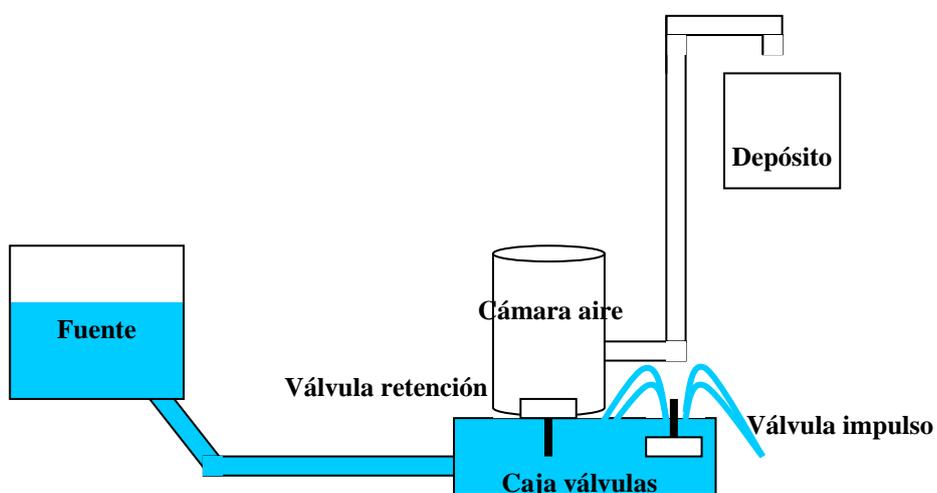


Figura 4. Llegada del agua de la fuente a la caja de válvulas

La velocidad del flujo se va incrementando cada vez más hasta que la fuerza inercial obliga a cerrar bruscamente el émbolo de la válvula de impulso en sentido ascendente. El peso del agua en movimiento detenida en forma repentina, crea una presión muy alta (principio del golpe de ariete) y obliga a cierta cantidad de agua a pasar por la válvula de retención hasta la cámara de aire (Figura 5),

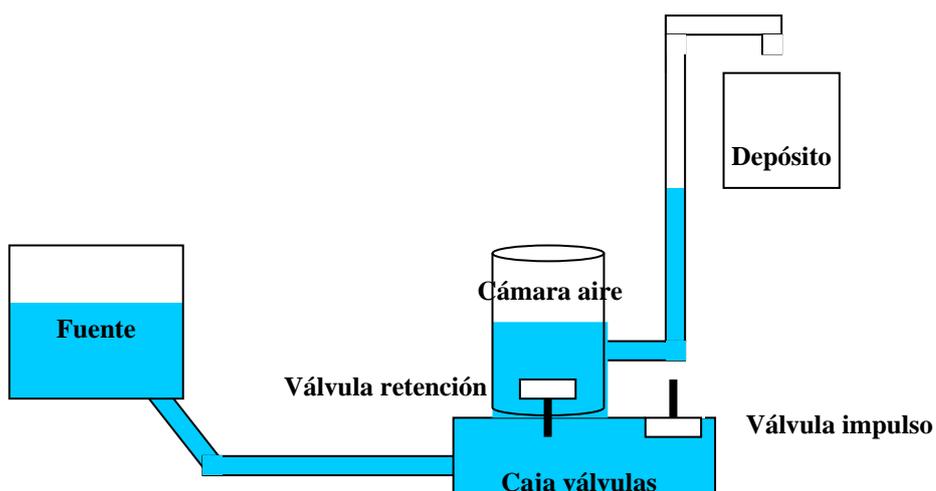


Figura 5. Cierre de la válvula de impulso y apertura de la válvula de retención

Cuando la onda de presión negativa regresa del depósito, la válvula de retención se cierra automáticamente en forma descendente y se abre la válvula de impulso (Figura 6).

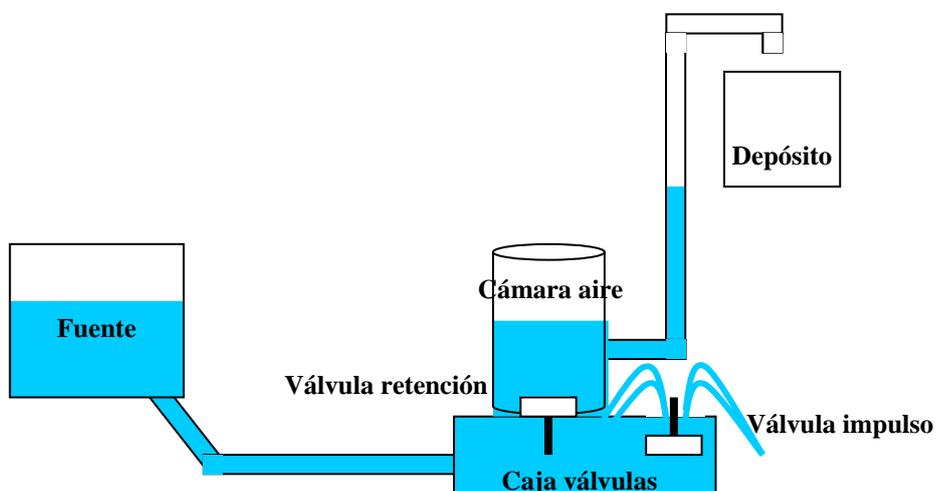


Figura 6. Apertura de la válvula de impulso y cierre de la válvula de retención

Se presenta nuevamente un flujo gradualmente acelerado por esta última válvula hasta que la fuerza neta ejercida hacia arriba excede al peso de la válvula y la cierra automáticamente para iniciar así un nuevo ciclo,

mientras exista un caudal suficiente desde la fuente. En la cámara el aire se va comprimiendo cada vez más, hasta que se suministra la energía necesaria para impulsar el agua a través de la tubería de elevación hasta el depósito de almacenamiento, (este aire comprimido actúa como resorte) (Figura 7).

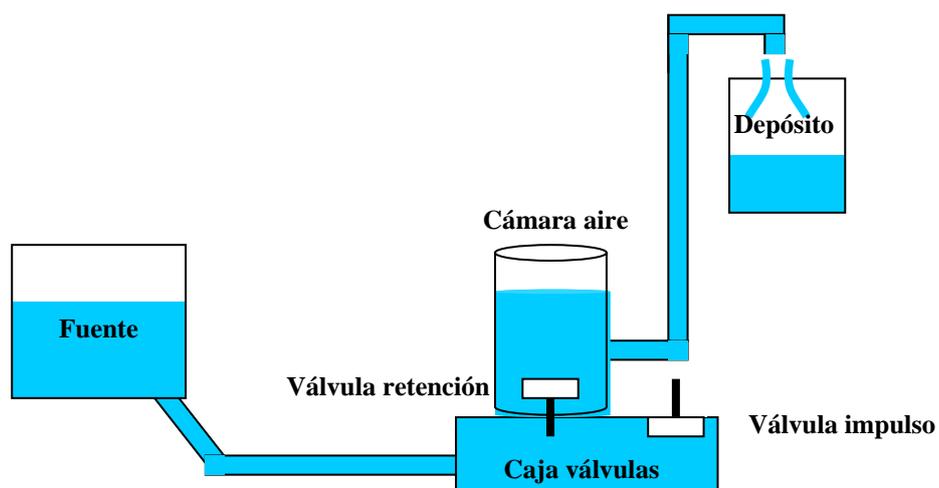


Figura 7. Llegada del agua hasta el depósito de almacenamiento

1.4 VENTAJAS DE UN ARIETE HIDRÁULICO

- No se necesita energía externa, no consume gasolina, diesel, electricidad, ni trabajo humano para su funcionamiento ya que es totalmente automático.
- El único mantenimiento necesario consiste en retirar las basuras que se presenten en la coladera de la entrada, reemplazar los empaques de las válvulas de retención y de impulso y purgar la cámara de aire,

actividades que pueden ser realizadas por cualquier persona sin ningún tipo de conocimientos especializados .

- Casi no hay gastos, aparte del costo inicial y además si se lo construye en casa, su costo es de casi una décima parte que el de un **Ariete** manufacturado.
- Un **Ariete** instalado y protegido con un mínimo de mantenimiento puede proveer un suministro de agua por más de 100 años sin ser reemplazado, trabajando las 24 horas del día.
- No emite contaminantes, ni gases nocivos para el medio ambiente constituyéndolo en un mecanismo sumamente ecológico, acorde con la mentalidad actual con respecto a nuestro planeta.
- Se puede conducir el agua a una distancia superior a los 2000 metros entre el **Ariete** y el sitio de abastecimiento ya que la pérdida de carga es mínima debido a que la velocidad es muy pequeña, contrario a lo que ocurre con las motobombas.
- Puede ser instalado a la intemperie ya que no contiene elementos que puedan sufrir daños por la acción del ambiente, por lo tanto no necesita de una caseta para su protección.

- Es sumamente portátil y puede ser llevado e instalado fácil y rápidamente en cualquier lugar que cumpla con las condiciones mínimas para su correcto funcionamiento.

1.5 DESVENTAJAS DE UN ARIETE HIDRÁULICO

- El **Ariete Hidráulico** para su funcionamiento requiere grandes cantidades de agua para poder elevar un pequeño porcentaje de la misma.
- Sólo puede usarse ventajosamente cuando se cuenta con una fuente natural de agua (ríos, arroyos, canales abiertos) en donde el desperdicio generado por el funcionamiento de la máquina pueda regresar al mismo cauce.
- Su eficiencia es muy baja comparada con una bomba centrífuga, porque requiere mayor tiempo para llenar un mismo volumen de agua.
- El flujo de entrega es intermitente, entregando un caudal variable de acuerdo al número de golpes de la válvula de impulso.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete se presenta en una tubería que conduzca un líquido hasta el tope, cuando se tiene un frenado o una aceleración en el flujo, por ejemplo el cambio en la abertura de una válvula en la línea de la tubería. Si los cambios son graduales los cálculos se pueden efectuar siguiendo métodos como los empleados en el caso de las oscilaciones en un tubo en forma de “u”., es decir, considerando incompresible el líquido y rígido el conducto.

Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el escurrimiento, el flujo a través de la válvula se reduce, lo cual incrementa la carga del lado aguas arriba de la válvula, iniciándose así un pulso de alta presión que se propaga en dirección contraria a la del escurrimiento. Este pulso de presión hace que la velocidad del flujo disminuya. La presión en el lado aguas debajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del escurrimiento, disminuyendo también la velocidad del flujo.

Si el cierre de la válvula es suficientemente rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja, se puede formar una bolsa de vapor aguas abajo de la válvula; cuando esto ocurre, la cavidad de vapor puede eventualmente reducirse en forma violenta y producir una onda de alta presión que se propaga en la dirección aguas abajo.

La siguiente es una relación de las secuencias de eventos que se presentan al cerrarse bruscamente una válvula al final de una tubería proveniente de un vaso de almacenamiento (despreciando la fricción), en donde t tiempo de cierre de la válvula, L longitud de la tubería de alimentación y c velocidad de propagación de la onda de sobrepresión:

- En el instante en que se cierra la válvula ($t = 0$, Figura 8a), el líquido más cercano a ella se comprime al mismo tiempo que su movimiento se reduce a cero; en estas condiciones, las paredes del conducto sufren una expansión. Tan pronto como se comprime la primera capa del líquido, el proceso se repite con la siguiente capa. El líquido en las paredes más alejadas aguas arriba de la válvula continúa moviéndose sin que se vea afectada su velocidad hasta que es alcanzado por el efecto de compresión del líquido que continúa llegando. La alta presión que se desarrolla se mueve en dirección aguas arriba como una onda, frenando al líquido hasta lograr su reposo, comprimiéndolo y dilatando las paredes de la tubería.

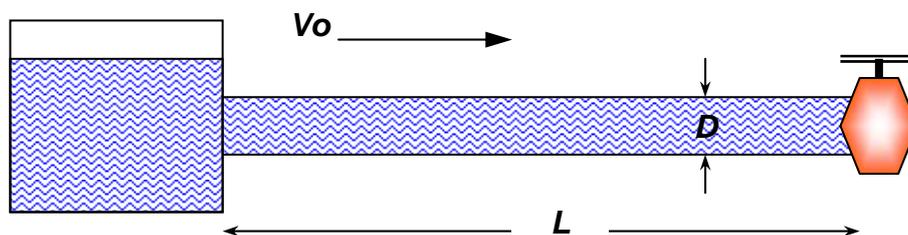


Figura 8a. Instante $t=0$

- Cuando la onda alcanza el extremo aguas arriba de la tubería ($t = L/c$, Figura 8b), todo el líquido se encuentra bajo una carga adicional h , toda la cantidad de movimiento se ha perdido y toda la energía cinética se ha convertido en energía elástica. En estas condiciones y, dado que la presión en el vaso de almacenamiento no ha cambiado, se tiene un desbalance en el extremo aguas arriba de la tubería en el momento en que llega la onda de presión. El líquido contenido en la tubería expandida comienza a escurrir con velocidad en sentido contrario, es decir, de la válvula hacia el vaso, comenzando en el extremo aguas arriba del conducto. La presión en el fluido vuelve a tener el valor que tenía antes del cierre de la válvula, las paredes del tubo recuperan sus dimensiones originales y el líquido adquiere una velocidad V_0 en el sentido contrario al original, ahora va de la válvula hacia el vaso. Este proceso de conversión viaja hacia el extremo donde se encuentra la válvula a la velocidad del sonido en la tubería.

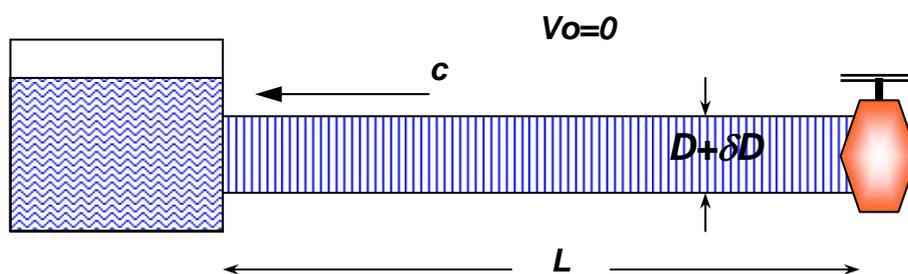


Figura 8b. Instante $t=L/c$

- En el instante ($t = 2L/c$, Figura 8c), la onda ha llegado hasta la válvula y la presión en toda la tubería ha regresado a su valor normal, siendo la velocidad del líquido en todo el conducto igual a V_0 y en dirección hacia al vaso de almacenamiento. Como la válvula se encuentra cerrada no se dispone de líquido que mantenga el escurrimiento a través de ella y, por tanto, se desarrolla una presión negativa ($-h$) tal que el fluido se frena otra vez hasta alcanzar el reposo. Esta onda de presión baja se propaga en dirección aguas arriba a una velocidad c , haciendo que el fluido sucesivamente se frene y logre un estado de reposo al mismo tiempo que se expande debido a la baja presión, ocasionando que las paredes del tubo se contraigan. Si la presión estática en la tubería no es lo suficientemente alta para compensar la carga ($-h$) de tal manera que la presión resultante sea mayor que la de vapor, el líquido se vaporizará parcialmente y continuará moviéndose hacia el vaso durante un periodo más largo.

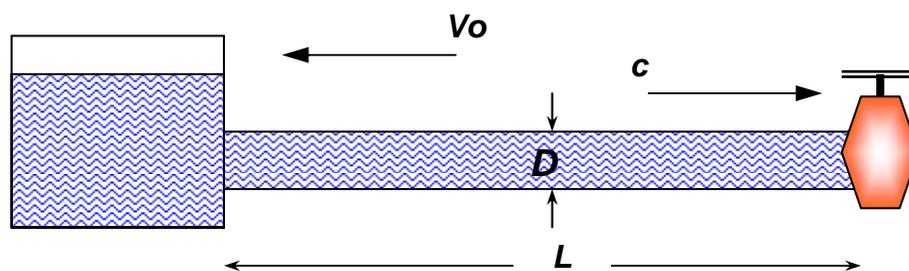


Figura 8c. Instante $t=2L/c$

- En el instante en que la onda de presión negativa llega al extremo final de la tubería, es decir, $t = 3L/c$ después del cierre de la válvula (Figura 8d), el líquido se encuentra en reposo pero uniformemente a una carga menor, en $(-h)$, que la que tenía antes del cierre. En estas condiciones, se tiene una vez más un desbalance en el vaso de almacenamiento, lo cual ocasiona que el fluido comience a moverse desde el vaso hasta la tubería, adquiriendo una velocidad V_0 en dirección a la válvula y haciendo que tanto la tubería como el líquido retornen progresivamente a las condiciones normales conforme la onda viaja en dirección a la válvula con velocidad c .

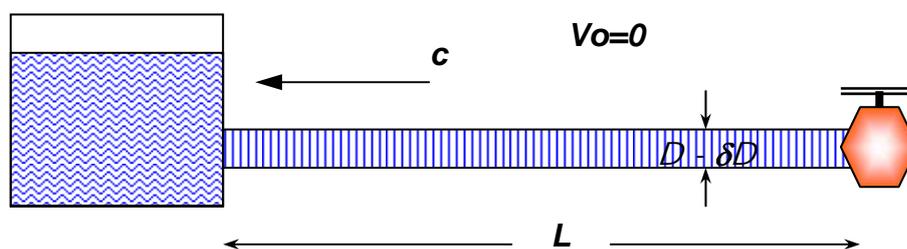


Figura 8d. Instante $t=3L/c$

- En el momento en que la onda llega a la válvula, las condiciones en todo el sistema son exactamente las mismas que tenía en el instante de cierre de la válvula, ocurrido a $t = 4L/c$ antes (Figura 8e).

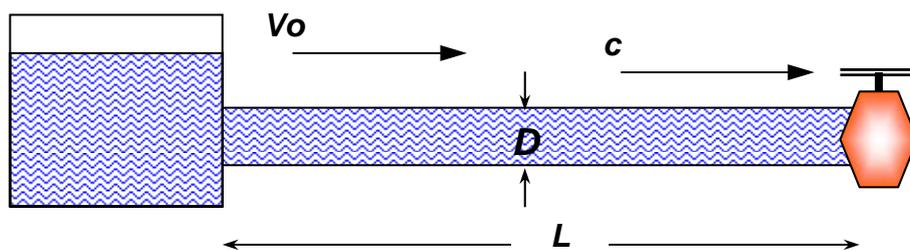


Figura 8e. Instante $t=4L/c$

El proceso descrito anteriormente se repite cada $4L/c$. Los efectos de la fricción en el fluido y la elasticidad imperfecta tanto en el fluido como en las paredes de la tubería, despreciadas en la consideración anterior, ocasionan que las oscilaciones se amortigüen y que el fluido alcance finalmente el estado de reposo permanente. Si el cierre de la válvula se lleva a cabo en un tiempo menor que $2L/c$, se llama cierre rápido, mientras que si se efectúa en un tiempo mayor se conoce como cierre lento.

2.2 ECUACIONES PARA CALCULAR EL GOLPE DE ARIETE

Para el cálculo de la sobrepresión debida al golpe de ariete se aplica la segunda ley de Newton y despreciando la fricción tenemos:

$$F = m \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1)$$

Como la velocidad se reduce a cero entonces $\partial v = v - 0 = v$ y la masa del líquido en movimiento es igual al producto del volumen de líquido

contenido dentro de la tubería multiplicado por su densidad ($m = \rho AL$).

Reemplazando estas igualdades en (1) tenemos:

$$F = \frac{\rho ALv}{\partial t} \quad (2)$$

La velocidad de propagación de la onda de sobrepresión es $c = \frac{L}{\partial t}$ y la

magnitud de dicha sobrepresión es $F = PA$. Reemplazando estas ecuaciones en (2) se tiene:

$$P = \rho v c \quad (3)$$

La velocidad c de una onda de presión en cualquier medio es la misma que la velocidad del sonido en ese medio y está dada por la ecuación

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. La velocidad de una onda de presión creada por el golpe de

ariete es menor que la descrita anteriormente debido a la elasticidad de la tubería. Si se previene la expansión longitudinal de la tubería antes que al contrario, el alargamiento en el contorno de la circunferencia ocurre sin obstáculo, la velocidad de una onda de presión está dada por:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{ED}{E_p e}}} \quad (4)$$

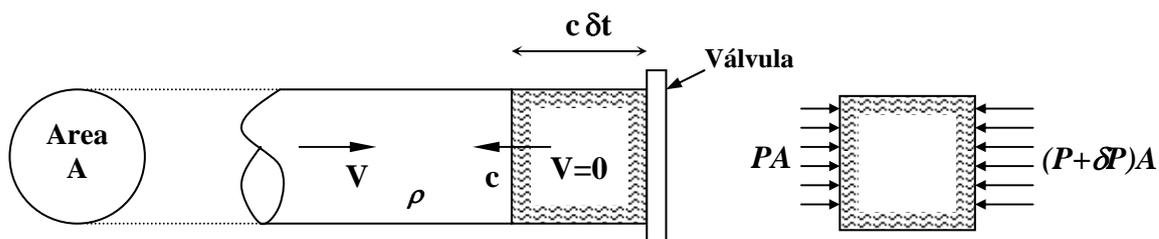


Figura 9. Croquis de definición para el golpe de ariete en tuberías

donde:

F = Fuerza de inercia provocada por la acción de la válvula.

m = Masa del líquido en movimiento.

v = Velocidad del líquido dentro de la tubería.

δt = Tiempo de propagación de la onda de sobrepresión.

ρ = Densidad del líquido

A = Área de la tubería de alimentación

L = Longitud de la tubería.

c = Velocidad de propagación de la onda.

P = Sobrepresión debida al golpe de ariete

E = Módulo de elasticidad del líquido

D = Diámetro de la tubería

E_p = Módulo de elasticidad de la tubería.

e = Espesor de las paredes de la tubería.

La presión total de la válvula inmediatamente después de su cierre es

$P_h + P$, donde P_h es la presión estática en la tubería.

Si la longitud de la tubería es L , la onda hace el recorrido desde la válvula hasta el depósito en un tiempo $T = 2L/c$ (periodo de la tubería). Este es el tiempo en que una presión positiva se mantendrá en la válvula. Si la válvula se cierra gradualmente, se transmite una serie de pequeñas ondas de presión por el tubo. Estas ondas se reflejan en el vaso y regresan por la tubería como ondas de presión normal. Si la válvula está completamente cerrada antes de que regrese la onda reflejada del depósito, el incremento de presión está dado aproximadamente por la ecuación (3). Si el tiempo de cierre t es mayor que T , se sobrepondrán ondas de presión negativas sobre las ondas positivas y no se alcanzará la presión total. La presión del golpe de ariete P_a desarrollada por el cierre gradual de la válvula cuando $t > T$, está dada aproximadamente por:

$$P_a = P \frac{T}{t} = \frac{2LP}{ct} = \frac{2LV\rho}{t} \quad (5)$$

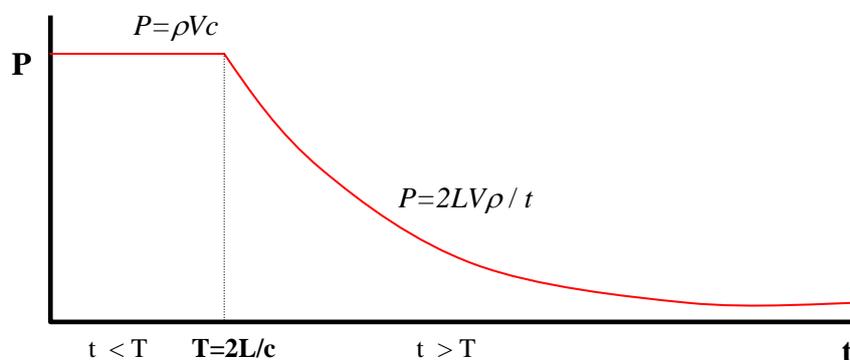


Figura 10. Diagrama de Presión vs Tiempo de cierre de la válvula

2.3 ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UN ARIETE HIDRÁULICO

La ecuación básica para el diseño es la que se conoce como: “LA ECUACIÓN GENERAL DEL ARIETE”, que sirve para conocer la cantidad de agua (q) que será capaz de elevar a una altura (h), dependiendo del caudal de entrada (Q), de la altura de alimentación (H) y el factor de eficiencia neta (η) la cual se presenta por la siguiente expresión:

$$q = \frac{Q * H}{h} * \eta \quad (6)$$

La eficiencia (η) varía de acuerdo con la relación h/H y de la perfección de **Ariete Hidráulico** (k), mediante la siguiente expresión:

$$\eta = 1 - k \frac{h}{H} \quad (7)$$

Donde k varía entre 5 y 7% dependiendo si el **Ariete** es manufacturado (5%) o casero (7%)

A continuación se describen las ecuaciones que se utilizan para cada una de las partes constitutivas de un **Ariete Hidráulico**:

2.3.1 Cálculo del diámetro de la tubería de alimentación

El cálculo se hará utilizando la fórmula de William Hazen, para tubería de PVC RDE 21:

$$hf = \left(\frac{Q}{0.2787 * C * D^{2.63}} \right)^{1.85} * L \quad (8)$$

$$hf = H - Hs$$

$$L = Lr + Le$$

donde:

hf = Cabeza disponible a perder (m)

H = Altura total de caída (m)

Hs = Altura de servicio de la válvula de impulso (m)

Q = Caudal de alimentación (m^3/seg)

D = Diámetro interno de la tubería (m)

C = Coeficiente de rugosidad

L = Longitud equivalente de tubería recta (m).

Lr = Longitud real de tubería recta (m)

Le = Longitud equivalente por accesorios (m).

2.3.2 Cálculo del diámetro de la tubería de elevación

Mediante la ecuación (7), calculamos el rendimiento η y reemplazándolo en la ecuación general del **Ariete** (6) calculamos el caudal de salida:

$$q = \frac{Q^* H}{h} * \left(1 - k \frac{h}{H} \right) \quad (9)$$

El diámetro de la tubería de elevación se asume como la mitad del diámetro de la tubería de alimentación ($d = D/2$) y se aplica la ecuación (8) de William Hazen para calcular las pérdidas por fricción.

2.3.3 Diseño de la válvula de impulso

La válvula de impulso funciona gracias a la altura de alimentación (H), la cual genera la presión necesaria para levantar un émbolo y provocar una detención repentina del flujo de agua generando una sobre presión conocida como *golpe de ariete*,

La válvula se diseñará en un diámetro igual al del cuerpo del **Ariete** (caja de válvulas), se recomienda que sea de 1.5 veces el diámetro de alimentación.

El diseño de esta válvula puede presentar dos opciones:

2.3.3.1 Mediante un contrapeso

El cálculo del contrapeso se realiza teniendo en cuenta el tiempo de cierre de la válvula, de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial.

$$Fs - W = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (10)$$

$$Fs = \gamma * Hs * A_{emb}$$

$$A_{emb} = \frac{\pi(D_{emb})^2}{4}$$

donde:

Fs = Fuerza de servicio (Kgf)

m = Masa del émbolo más contrapeso ($Kgf*s^2/m$)

W = Peso del émbolo más contrapeso ($m*g$) (Kgf)

x = Recorrido del émbolo hasta la posición de cierre (m)

t = Tiempo de cierre (s)

A_{emb} = Area del émbolo (m^2)

D_{emb} = Diámetro del émbolo (m)

Hs = Altura de servicio (m)

γ = Peso específico del agua ($1000 Kgf/m^3$)

Reemplazando (F_s) y (A_{emb}) en la ecuación (10) y resolviendo tenemos:

$$\gamma * H_s * \frac{\pi * D_{emb}^2}{4} - m * g = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

integrando

$$\iint \left(\gamma * H_s * \frac{\pi * D_{emb}^2}{4} \right) \partial t * \partial t - \iint (m * g) \partial t * \partial t = m * x$$

$$\left(\gamma * H_s * \frac{\pi * D_{emb}^2}{4} \right) * \frac{t^2}{2} - (m * g) * \frac{t^2}{2} = m * x$$

despejando m tenemos:

$$m = \frac{\gamma * H_s * \pi * (D_{emb})^2 * t^2}{4 * (g * t^2 + 2 * x)} \quad (11)$$

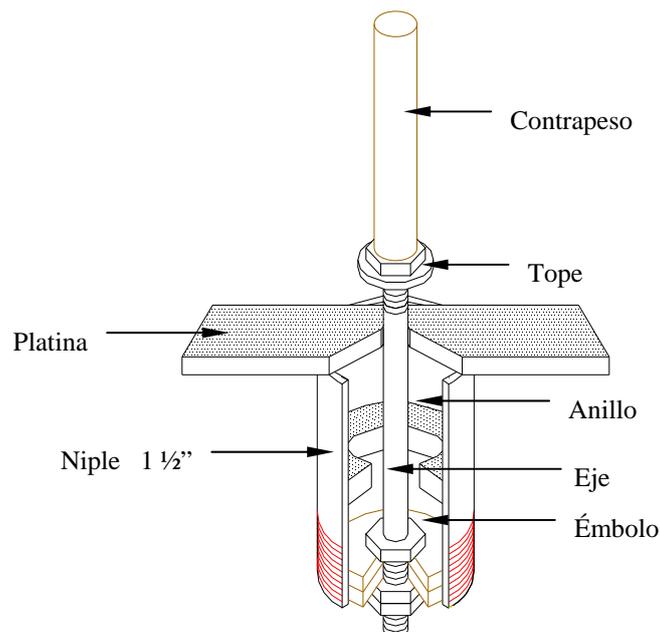


Figura 11. Válvula de Impulso con contrapeso

2.3.3.2 Mediante un sistema de resorte

El cálculo de la constante de resorte se realiza teniendo en cuenta el tiempo de cierre de la válvula, de acuerdo a la siguiente ecuación diferencial.

$$F_s - F_e = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (12)$$

$$F_s = \gamma * H_s * A_{emb}$$

$$A_{emb} = \frac{\pi(D_{emb})^2}{4}$$

donde:

F_s = Fuerza de servicio (Kgf)

m = Masa del émbolo más resorte (Kgf*s²/m)

F_e = Fuerza elástica del resorte ($k*x$) (Kgf)

k = Constante elástica del resorte (Kgf/m)

x = Recorrido del émbolo hasta la posición de cierre (m)

t = Tiempo de cierre (s)

A_{emb} = Área del émbolo (m²)

D_{emb} = Diámetro del émbolo (m)

H_s = Altura de servicio (m)

γ = Peso específico del agua (1000 Kgf/m³)

Solución de la ecuación (12):

$$Fs - k * x = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}$$

Ordenando y reemplazando $(\frac{\partial^2 x}{\partial t^2})$ por x'' tenemos:

$$m * x'' + k * x = Fs$$

cuya solución es:

$$x = x_h + \tilde{x}$$

Aplicamos el método de la ecuación característica para hallar la solución homogénea (x_h)

$$m * H^2 + k = 0$$

cuya solución es:

$$x_h = c * e^{\alpha * t} \cos(\beta * t)$$

donde:

α = Parte real de la solución (H).

β = Parte imaginaria de la solución (H).

$$H = \pm \sqrt{-\frac{k}{m}} = \pm \sqrt{-1} * \sqrt{\frac{k}{m}} = 0 \pm \sqrt{\frac{k}{m}} * i$$

$$xh = c * e^{0* t} \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} * t\right)$$

$$xh = c * \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} * t\right)$$

Aplicamos el método del polinomio operacional para hallar una solución particular (\tilde{x}):

$$(m * D^2 + k)\tilde{x} = Fs$$

$$\tilde{x} = \frac{1}{m * D^2 + k} * Fs$$

realizando la división $\frac{1}{m * D^2 + k}$ tenemos:

$$\tilde{x} = \left(\frac{1}{k} - \frac{m}{k^2} * D^2\right) * Fs = \frac{Fs}{k} - \frac{m}{k^2} \frac{\partial^2 Fs}{\partial t^2}$$

$$\tilde{x} = \frac{Fs}{k}$$

por lo tanto la solución general es:

$$x = c * \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} * t\right) + \frac{Fs}{k}$$

por la condición inicial [$x(0) = 0$] encontramos el valor de la constante

(c).

$$0 = c * \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} * 0\right) + \frac{Fs}{k} = c + \frac{Fs}{k}$$

$$c = -\frac{Fs}{k}$$

reemplazando los valores de (c) y (Fs) tenemos:

$$x = \frac{\gamma * H_s * \pi * (D_{emb})^2}{4 * k} * \left(1 - \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} * t\right)\right) \quad (13)$$

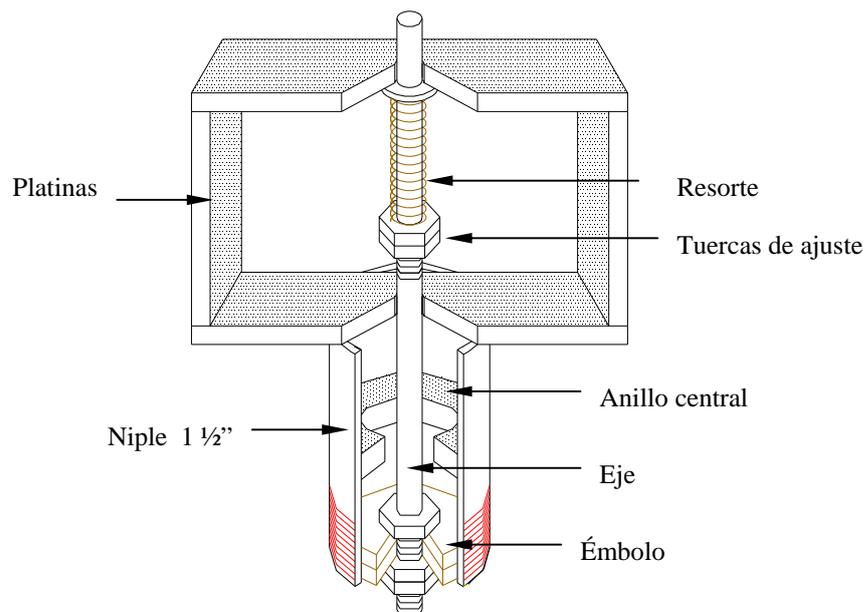


Figura 12. Válvula de Impulso con resorte

2.3.4 Diseño de la válvula de retención

La válvula de retención tiene la función de permitir el paso del agua a la cámara de aire por acción del golpe de ariete (el cual levanta el émbolo) e impedir que esta regrese a la tubería de alimentación por acción del aire comprimido, el cual regresa al émbolo a la posición de cierre, obligando así a que el agua vaya por la tubería de elevación hasta el tanque de almacenamiento. Se recomienda diseñar la válvula de retención con un diámetro igual al del cuerpo del **Ariete**, además es recomendable que el émbolo tenga un peso menor al de la válvula de impulso, para que la sobrepresión generada por el golpe de ariete no se pierda levantando el émbolo y se utilice toda comprimiendo el aire contenido en la cámara.

La ecuación que se utiliza para el cálculo de la presión necesaria para accionar el émbolo de la válvula está dada por:

$$Pr = \frac{Fr}{Ar} = \frac{4(mg + kx)}{\pi D_{emb}^2} \quad (14)$$

donde:

Pr = Presión necesaria para levantar el émbolo (kgf/m^2)

Fr = Fuerza resultante del peso del émbolo más la elástica del resorte
(Kgf)

m = Masa del émbolo de la válvula de retención ($Kgf \cdot s^2/m$)

g = Aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

k = Constante del resorte (Kgf/m)

x = Carrera del émbolo (m)

D_{emb} = Diámetro del émbolo de la válvula de retención (m)

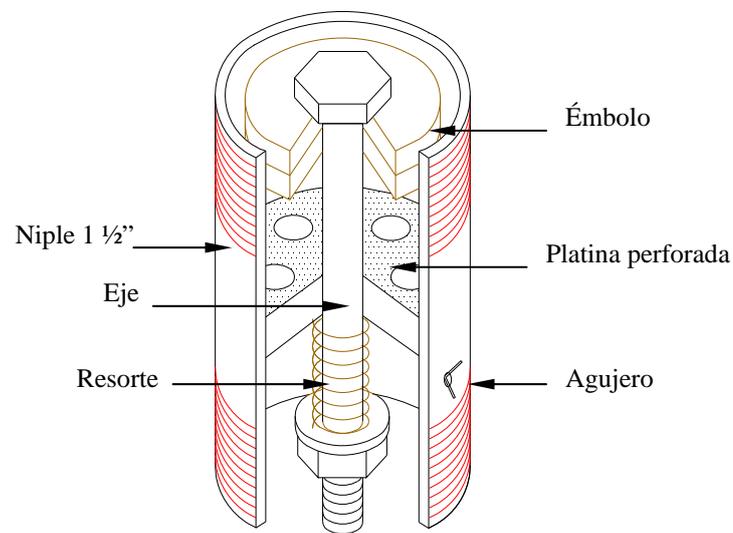


Figura 13. Válvula de Retención

2.3.5 Cálculo de la sobrepresión

Para el cálculo de la sobrepresión es necesario tener en cuenta el tiempo de cierre de la válvula, presentándose dos posibilidades para encontrarla:

2.3.5.1 Cierre rápido:

Se presenta cuando el tiempo de cierre de la válvula de impulso es menor al periodo de la tubería ($t < T = 2L/C$), teniendo en cuenta las siguientes expresiones:

$$Pa' = \gamma * V * C / g \quad (15)$$

$$v = \frac{4 * Q_{max}}{\pi * D^2}$$

$$C = \sqrt{\frac{E * g}{\gamma}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{ED}{E_p t}}} \quad (16)$$

donde:

Pa' = Sobrepresión producida por el golpe de ariete (Kgf/m^2)

γ = Peso específico del agua ($1000 Kgf/m^3$)

V = Velocidad máxima del flujo por la tubería de entrada (m/s)

C = Velocidad de propagación de la onda elástica, CELERIDAD (m/s)

g = Aceleración de la gravedad ($9.81 m/s^2$)

E = Módulo de compresibilidad del agua ($2.11 \times 10^8 Kgf/m^2$)

E_p = Módulo de rigidez de la tubería PVC. ($2.81 \times 10^8 Kgf/m^2$)

D = Diámetro de la tubería de alimentación (m)

t = Espesor de la tubería de alimentación (m)

2.3.5.2 Cierre lento

Si el tiempo de cierre de la válvula de impulso es más lento al periodo de la tubería ($T > t$) entonces la sobrepresión del golpe de ariete se disminuirá de acuerdo con la siguiente expresión :

$$Pa = Pa' * T / t \quad (17)$$

$$T = \frac{2L}{C} \quad (18)$$

Reemplazando (18) en (17) tenemos :

$$Pa = \frac{\gamma * V * C}{g} * \frac{2 * L}{C} * \frac{1}{t}$$

$$Pa = \frac{2 * \gamma * V * L}{g * t} \quad (19)$$

donde:

Pa = Presión del golpe de ariete en función del tiempo de cierre (Kgf/m^2)

t = Tiempo de cierre de la válvula de impulso (seg)

T = Periodo de la tubería (seg)

L = Longitud de la tubería (m)

C = Celeridad (m/s)

2.3.6 Diseño de la cámara de aire.

El volumen de la cámara de aire (campana) se lo calcula teniendo en cuenta que el volumen de aire comprimido o volumen final (V_f) no puede ser menor a 1.0 litro por lo tanto el volumen total de la campana o volumen inicial (V_o), se calcula aplicando la ecuación de Boyle, así:

$$\frac{V_f}{V_o} = \frac{P_o}{P_f} \quad (20)$$

donde:

V_f = Volumen Final (lt)

V_o = Volumen Inicial (lt)

P_f = Presión Final (Kgf/m^2)

P_o = Presión Atmosférica (Kgf/m^2)

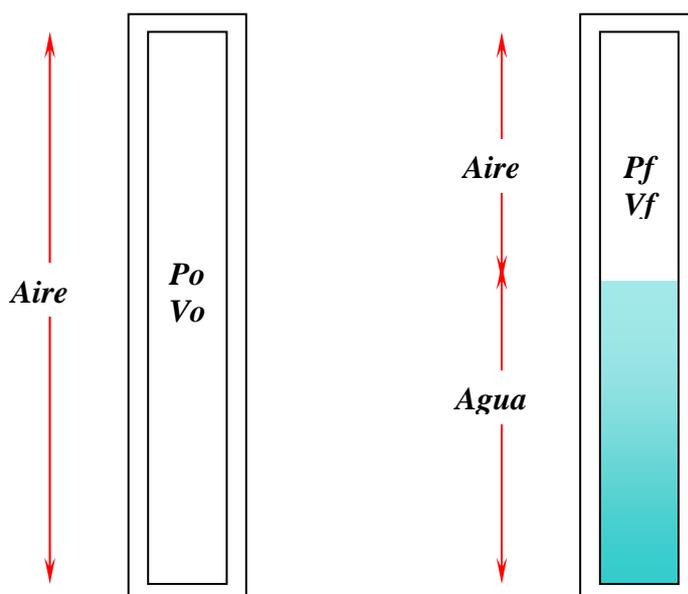


Figura 14. Diagrama de Presiones y Volúmenes en la Cámara de aire

Reemplazando $V_f = 1.0 \text{ lt}$ en la ecuación (20) tenemos:

$$\frac{1.0 \text{ lt}}{V_o} = \frac{P_o}{P_f} \Rightarrow V_o = \frac{1.0 \text{ lt} * P_f}{P_o}$$

Para el cálculo de la presión final (P_o) se tiene en cuenta la presión atmosférica ($P_{atm} = 10.33$ metros) la cual disminuye 1.2 metros por cada 1000 metros de altura sobre el nivel del mar.

Para el cálculo de la presión final (P_f) se tiene en cuenta la siguiente expresión:

$$P_f = P_a - P_r + P_{atm} \quad (21)$$

donde:

P_f = Presión Final (Kgf/m^2)

P_a = Sobrepresión del golpe de ariete (Kgf/m^2)

P_r = Presión para levantar el émbolo de la válvula de retención (kgf/m^2)

P_{atm} = Presión Atmosférica (Kgf/m^2)

3. DISEÑO DEL ARIETE

3.1 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN

Para el diseño de la tubería de alimentación es necesario conocer el caudal máximo que transita por ella, ya que el caudal no es constante, por lo tanto se toma un caudal promedio entre un caudal máximo, cuando la válvula de impulso está abierta y un caudal nulo cuando la válvula está

cerrada. $Q = \frac{Q_{max}}{2}$

DATOS:

$Q = 0.28$ LPS (Dato tomado por medición directa)

$Q_{max} = 0.56$ LPS

$Lr = 12$ m

$C = 150$ (PVC)

$H = 1$ m.

$Hs = 0.25$ m.

$hf = 1$ m - 0.25 m = 0.75 m.

3.1.1 Prediseño.

Debido a que no se conoce aún el diámetro de la tubería, es necesario realizar un primer tanteo, asumiendo las pérdidas por accesorios como un porcentaje (100%) de la longitud recta de la misma, así:

$$L = 12 \text{ m} + (12 \text{ m} * 100\%) = 24.00 \text{ m}.$$

Reemplazando estos valores en (8) y despejando el diámetro tenemos:

$$D = \left(\frac{L}{hf} \right)^{0.21} \left(\frac{Q}{0.2787 * C} \right)^{0.38} \quad (22)$$

$$D = \left(\frac{24.00m}{0.75m} \right)^{0.21} \left(\frac{0.00056m^3 / seg}{0.2787 * 150} \right)^{0.38} = 0.0291m$$

entonces D en pulgadas:

$$D = 2.91\text{cm} / 2.54 \text{ cm/plg} = 1.15 \text{ pulg}$$

equivalente a un tubo de **PVC de 1" RDE 21** cuyo diámetro interno es igual a 1.18 pulg.

3.1.2 Diseño definitivo.

Una vez encontrado el diámetro de la tubería se calculan las pérdidas por accesorios por el método de longitudes equivalentes, el cual consiste en

igualar las pérdidas que producen estos como si fuese un tramo de tubería recta.

Cuadro 1. Longitudes equivalentes para accesorios de PVC.

ACCESORIO (und)	DIÁMETRO (plg)	LONGITUD EQUIVALENTE (m)	TOTAL (m)
1 Salida	1	0.7	0.7
2 Llaves de paso	1	4.6	9.2
2 Codos 45°	1	0.4	0.8
1 Buje	1 ½ x 1	0.5	0.5
1 Tee (paso directo)	1 ½	0.9	0.9
1 Codo 90°	1 ½	1.3	1.3
1 Válvula de pie	1 ½	2.2	2.2

Longitud Equivalente Total = 15.6 metros.

$$L = 12 \text{ m} + 15.6 = 27.6 \text{ m.}$$

$$D = \left(\frac{27.6\text{m}}{0.75\text{m}} \right)^{0.21} \left(\frac{0.00056\text{m}^3 / \text{seg}}{0.2787 * 150} \right)^{0.38} = 0.0299\text{m}$$

entonces D en pulgadas:

$$D = 2.99\text{cm} / 2.54 \text{ cm/plg} = 1.18 \text{ pulg}$$

Lo cual confirma que el diámetro de la tubería de alimentación corresponde a un tubo **PVC de 1" RDE 21**

3.2 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA TUBERÍA DE ELEVACIÓN

DATOS:

$$Q = 0.28 \text{ LPS} = 17 \text{ LPM}$$

$$H = 1 \text{ m}$$

$$h = 5 \text{ m. (altura del tanque de almacenamiento)}$$

$$k = 0.065 \text{ (PVC)}$$

$$L = 8 \text{ m} + (8 \text{ m} * 50\%) = 12.0 \text{ m}$$

$$d = D/2 = 1/2" = 0.0127 \text{ m}$$

$$\eta = 1 - 0.065 \frac{5m}{1m} = 0.675 \approx 67.5\%$$

$$q = \frac{17LPM * 1m}{5m} * 0.675 = 2.30LPM$$

$$q = 2.3 \text{ LPM} = 0.038 \text{ LPS} = 0.000038 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El diámetro de la tubería de elevación se asume como la mitad del diámetro de la tubería de alimentación (1") en este caso equivalente a una manguera **PF de 1/2"** cuyo diámetro interno es igual a 0.50 pulg.

Debido a que este es un tipo de manguera flexible no es necesario hacer un calculo riguroso por longitudes equivalentes simplemente se asume un porcentaje (50%) de su longitud total.

Utilizando la formula de William Hazen (8) tenemos:

$$hf = \left(\frac{0.000038m^3 / seg}{0.2787 * 150 * 0.0127m^{2.63}} \right)^{1.85} * 12.0m = 0.14m$$

$$ht = h + hf + hs = 5.0m + 0.14m + 0.25 m = 5.39 m$$

donde:

ht = Altura total a elevar

h = Altura estática

hf = Pérdidas por fricción

hs = Presión de servicio

Nota: La altura necesaria a elevar suele diferir de la longitud de la manguera de salida, esta última puede ser mayor para más comodidad en la instalación.

3.3 DISEÑO DE LA VÁLVULA DE IMPULSO

3.3.1 Mediante un sistema de resorte.

DATOS:

$$H_s = 0.25 \text{ m}$$

$$D_{emb} = 0.055 \text{ m}$$

$$m = 0.156 \text{ Kgf} / 9.81 \text{ m/s}^2 = 0.0159 \text{ Kgf*s}^2/\text{m}$$

$$x = 0.005 \text{ m}$$

$$t = 0.3 \text{ s}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$0.005 \text{ m} = \frac{1000 \text{ kgf} / \text{m}^3 * 0.25 \text{ m} * \pi * (0.055 \text{ m})^2}{4 * k} * \left(1 - \cos \left(\sqrt{\frac{k}{0.0159 \text{ Kgf} * \text{s}^2 / \text{m}}} * 0.3 \text{ s} \right) \right)$$

$$K = 25.04 \approx 25 \text{ Kgf/m}$$

por lo tanto

$$F_e = k * x = 25 \text{ Kgf} / \text{m} * 0.005 \text{ m} = 0.125 \text{ Kgf}$$

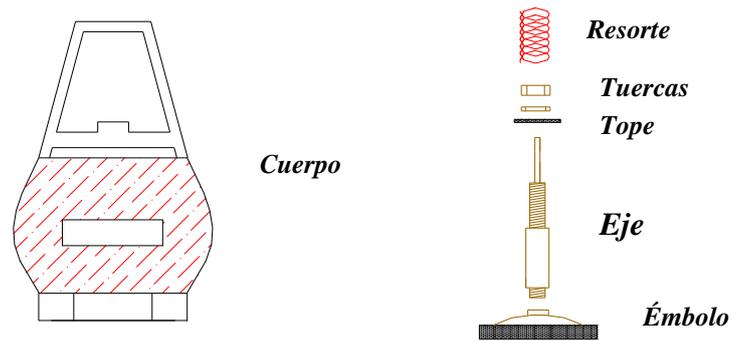


Figura 15a. Despiece general de la Válvula de Impulso

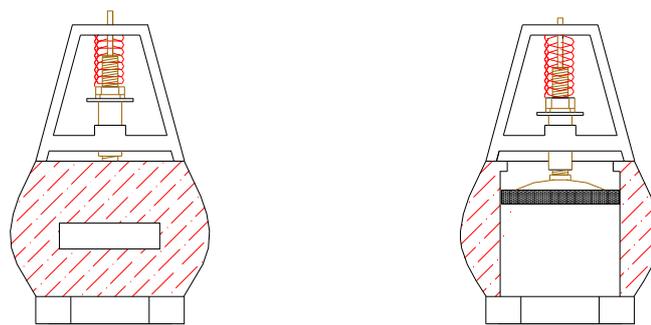


Figura 15b. Montaje de la Válvula de Impulso

3.4 DISEÑO DE LA VÁLVULA DE RETENCIÓN

DATOS:

$$m = 0.08 \text{ Kgf}/9.81\text{m/s}^2 = 0.0082 \text{ Kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$$

$$D_{em} = 0.035 \text{ m}$$

$$k = 20 \text{ Kgf/m}$$

$$x = 0.01 \text{ m}$$

$$Fr = m\cdot g + k\cdot x = 0.0082 \text{ kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}\cdot 9.81\text{m/s}^2 + 20\text{kgf/m}\cdot 0.01\text{m}$$

$$Fr = 0.28\text{Kgf}$$

$$A_r = \pi * D^2 / 4 = \pi * (0.035\text{m})^2 / 4 = 0.00096 \text{ m}^2$$

$$P_r = F_r / A_r = 0.28 \text{ Kgf} / 0.00096 \text{ m}^2 = 292.1 \text{ Kgf} / \text{m}^2$$

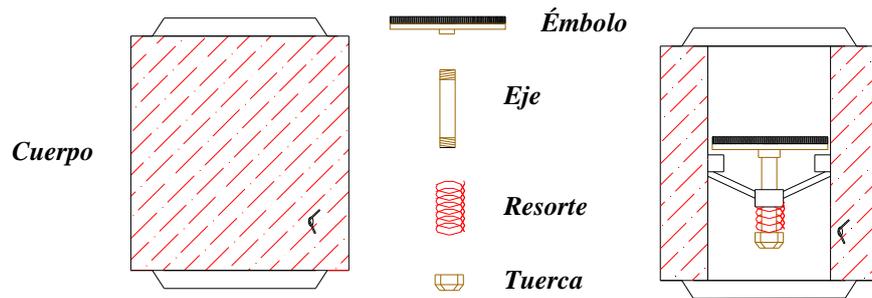


Figura 16. Despiece y montaje de la Válvula de Retención

3.5 CÁLCULO DE LA SOBREPRESIÓN

3.5.1 Cálculo cierre rápido

$$C = \sqrt{\frac{2.11 \times 10^8 \text{ Kgf} / \text{m}^2 * 9.81 \text{ m} / \text{s}^2}{1000 \text{ Kgf} / \text{m}^3}} \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{2.11 \times 10^8 \text{ Kgf} / \text{m}^2 * 30.2 \text{ mm}}{2.8 \times 10^8 \text{ Kgf} / \text{m}^2 * 1.6 \text{ mm}}}} = 368.74 \text{ m} / \text{s}$$

$$v = \frac{4 * Q_{max}}{\pi * D^2} = \frac{4 * 0.00056 \text{ m}^3 / \text{s}}{\pi * (0.0299 \text{ m})^2} = 0.80 \text{ m} / \text{s}$$

$$Pa' = \frac{1000 \text{ Kgf} / \text{m}^3 * 0.8 \text{ m} / \text{s} * 368.74 \text{ m} / \text{s}}{9.81 \text{ m} / \text{s}^2} = 30070.5 \text{ Kgf} / \text{m}^2$$

3.5.2 Cálculo cierre lento

$$T = \frac{2 * 12m}{368.74m/s} = 0.065seg$$

para $t = 0.3$ seg tenemos

$$Pa = \frac{30070.5Kgf/m^2 * 0.065seg}{0.3seg} = 6515.3Kgf/m^2$$

Debido a que necesitamos llevar el agua a una altura $h=5.0$ m, más una altura debida a pérdidas por fricción $hf=0.14$ m y además que el agua tenga una presión de servicio a la salida $hs=0.25$ m; equivalente a una altura total a elevar de $ht=5.39$ m (5390 Kgf/m^2) y la presión generada por el golpe de ariete $Pa=6515.3$ Kgf/m^2 menos la presión necesaria para levantar el émbolo de la válvula de retención $Pr=292.1$ Kgf/m^2 , es igual a una presión neta $Pn = 6223.2$ Kgf/m^2 .

$$ht \leq Pn \quad (23)$$

donde:

$$Pn \geq ht \Rightarrow 6223.2 \text{ Kgf/m}^2 \geq 5390.0 \text{ Kgf/m}^2 \quad \text{OK!!}$$

3.6 DISEÑO DE LA CÁMARA DE AIRE.

$$P_{atm} = 10.33 - 1.2 * 2500/1000 = 7.33 \text{ metros}$$

$$P_{atm} = 7.33 \text{ m} * 1000 \text{ Kgf/m}^3 = 7330 \text{ Kgf/m}^2$$

Para el cálculo de la presión final (P_f) se tiene en cuenta la siguiente expresión:

$$P_f = 6223.2 \text{ Kgf/m}^2 + 7330.0 \text{ Kgf/m}^2$$

$$P_f = 13553.2 \text{ Kgf/m}^2$$

Reemplazando en la ecuación (20) se tiene:

$$V_o = \frac{1.0 \text{ lt} * 13553.2 \text{ Kgf} / \text{m}^2}{7330 \text{ Kgf} / \text{m}^2} = 1.85 \text{ lt}$$

La cámara de aire se construirá con un tubo de PVC de diámetro 2 ½” (6.61 cm), por lo tanto la altura necesaria para lograr el volumen inicial (V_o) se calcula de acuerdo al siguiente procedimiento:

$$V_o = A * H$$

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

entonces:

$$H = \frac{4 * V_o}{\pi * D^2}$$

donde:

H = Altura del tubo (m)

V_o = Volumen de la cámara de aire (m^3)

A = Área del tubo (m^2)

D = Diámetro del tubo (m)

$$H = \frac{4 * 0.00185m^3}{\pi * (0.0661m)^2} = 0.54m \approx 0.50m$$

A continuación se presentan los planos del despiece general, la descripción de las partes constitutivas con sus dimensiones correspondientes y la base del diseño definitivo de la bomba de **Ariete Hidráulico**.

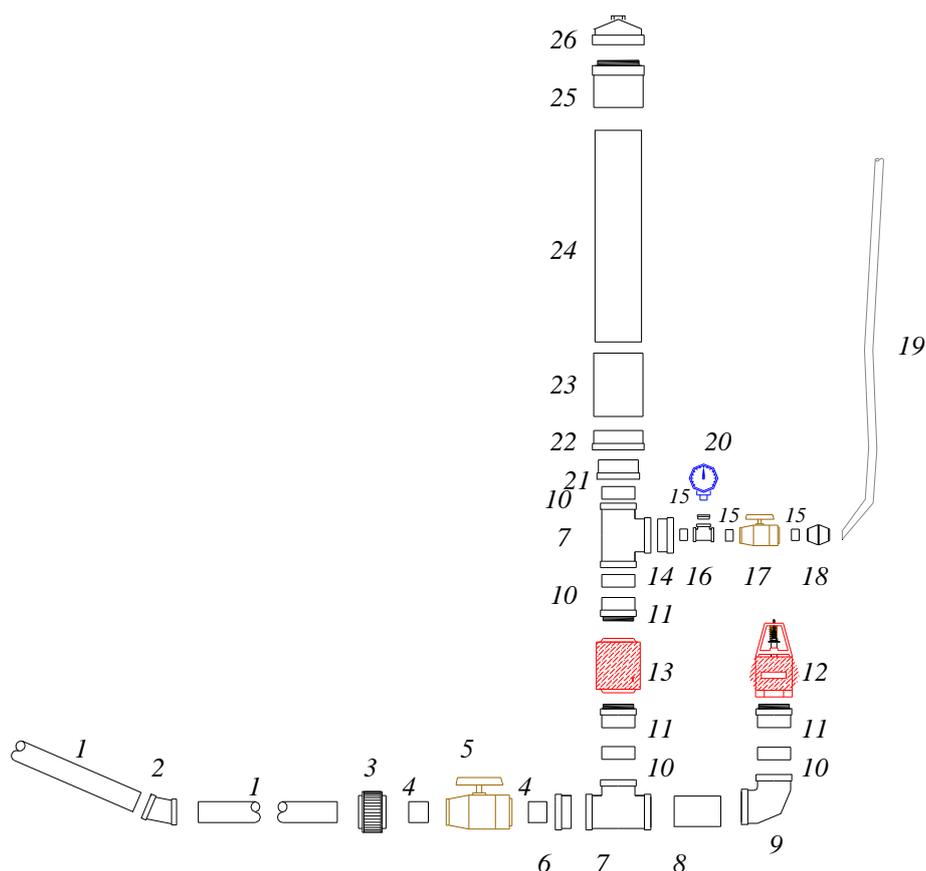


Figura 17. Despiece general del Ariete Hidráulico

Cuadro 2. Elementos del Ariete.

No.	NOMBRE	DIMENSIÓN
1	Tubo de entrada PVC	1"x12m
2	Codo 45° PVC	1"
3	Unión universal PVC	1"
4	2 Niples PVC	1"x5cm
5	Llave de paso PVC	1"
6	Buje PVC	1 ½"x1"
7	2 Tees PVC	1 ½"
8	Niple PVC	1 ½"x20cm
9	Codo 90° PVC	1 ½"
10	4 Niples PVC	1 ½"x5cm
11	3 Adaptadores Macho	1 ½"
12	Válvula de impulso	1 ½"
13	Válvula de retención	1 ½"

No.	NOMBRE	DIMENSIÓN
14	Buje PVC	1 ½"x1½ "
15	3 Niples PVC	½"x4cm
16	Tee PVC	½"
17	Llave de paso PVC	½"
18	Adaptador PF	½"
19	Manguera salida PF	½"x8m
20	Manómetro	60 psi
21	Buje PVC	1 ½"x2"
22	Buje PVC	2 ½"x2"
23	Unión PVC	2 ½"
24	Niple PVC	2 ½"x50cm
25	Adaptador Macho	2 ½"
26	Tapón Roscado PVC	2 ½"

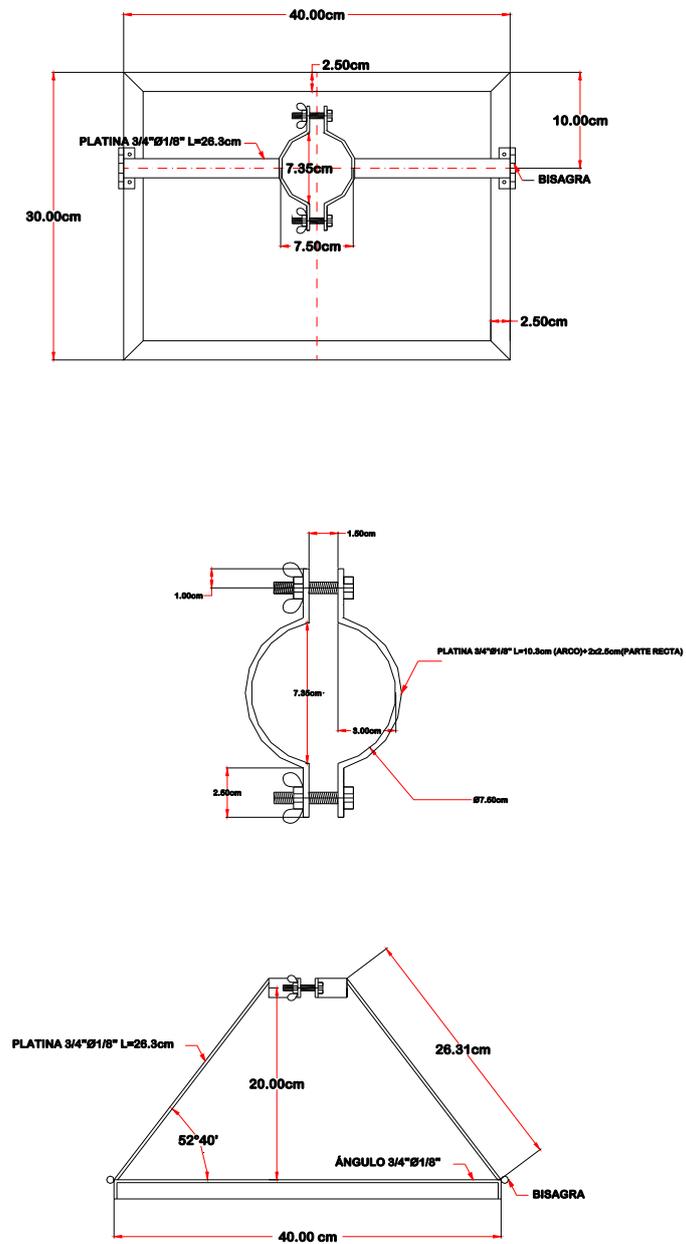


Figura 18. Base para Ariete Hidráulico

4. CONSTRUCCIÓN DEL ARIETE

4.1 VÁLVULA DE IMPULSO.

Para comenzar se construye la válvula de impulso (Figura 19), la cual comercialmente se consigue con el nombre de “Válvula de Pie” para motobombas, de diámetro 2” en bronce con una reducción bushing a 1 ½”, a la que hay que hacerle algunas modificaciones que se explican enseguida:



Figura 19. Despiece Válvula de Impulso

- Se debe retirar la canastilla de la parte superior de la válvula.
- Se desmonta el émbolo y se retira el resorte.
- Se extrae el eje original del émbolo de la válvula.
- Se reemplaza por un eje torneado de acuerdo con las especificaciones mostradas en la Figura 20

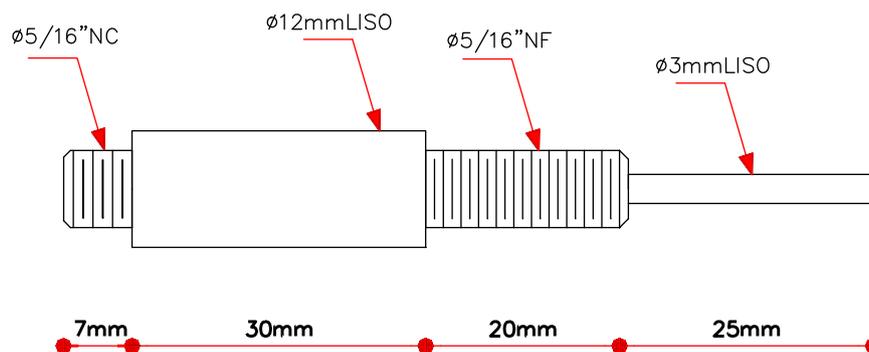


Figura 20. Eje modificado para válvula de Impulso (torneado)

- Se debe reemplazar el resorte original por uno de las siguientes especificaciones: $k = 25 \text{ Kg/m}$, $L = 20 \text{ mm}$, Diámetro = 7 mm
- Se monta el nuevo émbolo dentro de la válvula,
- Se coloca un anillo para disminuir la carrera del émbolo dentro de la válvula

- Se coloca un tope de caucho dentro del eje el cual se lo ajusta con una tuerca 5/16" de rosca fina.
- Se coloca una contratuerca 5/16" rosca fina.
- Se inserta el nuevo resorte, el cual junto con la contratuerca sirve para calibrar el número de golpes por minuto de la válvula de impulso.
- Se monta sobre la caja de válvulas del **Ariete**

4.2 VÁLVULA DE RETENCIÓN.

La válvula de retención que se utilizó se consigue en el mercado con el nombre de "Válvula Cheque Vertical", de diámetro 1 ½" en bronce (Figura 21), a la cual hay que hacerle las siguientes modificaciones:



Figura 21. Despiece Válvula de Retención

- Se recomienda hacer un orificio de 1/16" debajo del émbolo de la válvula, para que la cámara tome una burbuja de aire en cada golpe
- Luego se traspasa con un seguro de alambre.
- Se procede a montar la válvula sobre el cuerpo del **Ariete**.

4.3 CUERPO DEL ARIETE

El cuerpo del **Ariete** también conocido como "caja de válvulas" se construyó en material plástico (PVC) de diámetro 1 ½" (Figura 22) construida de la siguiente forma:

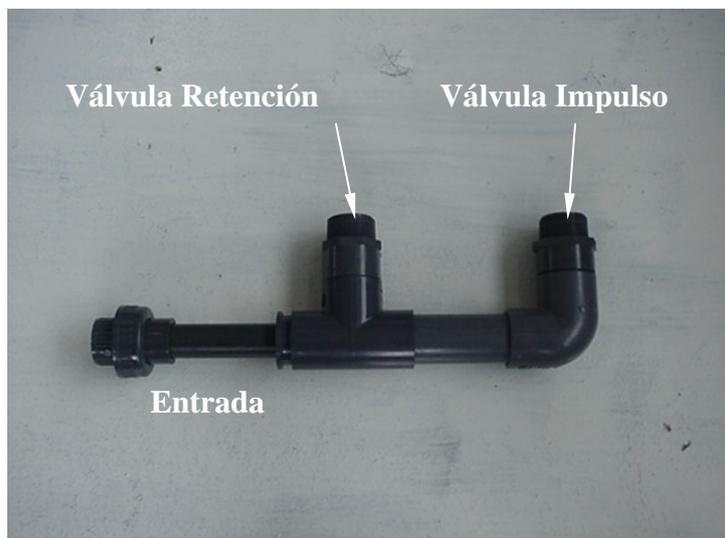


Figura 22. Cuerpo del Ariete o Caja de Válvulas

- Se corta un tubo de PVC 1 ½” de diámetro, en 4 niples de 5 cm y uno de 20 cm de longitud
- Se procede a pegar con soldadura de PVC los siguientes accesorios de diámetro 1 ½”, utilizando los niples antes descritos como indica la Figura anterior: una universal, una llave de paso, una tee, un codo de 90° y 2 adaptadores machos
- Se colocan las válvulas de impulso y retención en la parte roscada de los machos como se indica (Figura 22), se debe cubrir muy bien la rosca con cinta teflón para evitar fugas.

4.4 CÁMARA DE AIRE.

La cámara también se la conoce como “campana” La cual se la construyó en material plástico (PVC) de diámetro 2 ½” (Figura 23), su proceso de construcción es el siguiente:

- Se corta un tubo de PVC de diámetro 2 ½” en un niple de 50 cm de longitud.
- Se procede a unir los siguientes accesorios en la secuencia que se indica en la Figura No. 23: un buje 2” x 1 ½” , un buje 2 ½” x 2”, una

unión de 2 ½”, luego se pega el niple de 50 cm mencionado en el numeral anterior, en la parte superior de este se pega un adaptador macho de 2 ½” y por ultimo un tapón roscado de 2 ½” .

- Se une todo lo anterior a la unidad de salida .



Figura 23. Campana o Cámara de Aire

4.5 UNIDAD DE SALIDA.

La unidad de salida se construyó en material plástico (PVC) de diámetro ½”, unida a una tee de 1 ½” (ver Figura 24). El proceso de construcción es como sigue:



Figura 24. Unidad de Salida

- Se cortan 3 niples de diámetro 1 ½" de 5 cm de longitud y 3 niples de diámetro ½" de 4 cm de longitud.
- Se procede a pegar los siguientes accesorios utilizando los niples antes mencionados para unir a cada uno de ellos, como se indica en la Figura anterior: un adaptador macho de 1 ½", una tee de 1 ½", un buje de 1 ½" x ½", una tee de ½", un buje de ½" x ¼" roscado sobre el cual se instala un manómetro de 60 psi, una llave de paso de ½", un adaptador macho de ½" y un adaptador hembra para manguera PF de ½".

El ensamblaje de todas las partes descritas en los numerales anteriores produce como resultado la Bomba de **Ariete Hidráulico** cuya imagen se muestra a continuación (Figura 25).



Figura 25. Bomba de Ariete Hidráulico

5. INSTALACIÓN EN EL LABORATORIO.

- Para la instalación del **Ariete** en el laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño fue necesario simular una fuente de abastecimiento, la cual se hizo con la ayuda de un tanque de almacenamiento de 105 litros colocado a una altura de 80 cm sobre el piso, además se le acoplaron las unidades de: entrada, salida, rebose y un piezómetro para poder observar el nivel del agua contenida en su interior (Figura 26).



Figura 26. Tanque de Alimentación

- La conducción desde esta fuente hasta el **Ariete** es de PVC RDE 21 de diámetro 1", para presión color blanco que es totalmente desmontable para su fácil instalación. Esta conducción consta de tres tramos: uno de 1.20 m de longitud en ángulo de 45°, otro de 4.80 m y por último uno de 6.00 m, para un total de 12 m, los cuales se acoplan al tanque, al **Ariete** y entre sí por medio de uniones universales de 1" (Figura 27).



Figura 27. Conducción Tanque de alimentación - Ariete

- Para poder mantener erguido el **Ariete** se construyó una base en lámina metálica (Figura 28.) que se puede montar y desmontar del **Ariete** con sólo el uso de unos tornillos de ajuste. Esta base posee un sistema de bisagra que le permite abrirse y cerrarse fácilmente para poder sujetar el cuerpo del **Ariete** cuantas veces se requiera. La base por el hecho de estar en continuo contacto con el agua debe ser pintada con anticorrosivo.



Figura 28. Base del Ariete Hidráulico

- La salida del **Ariete** está constituida por una manguera PF de presión de diámetro $\frac{1}{2}$ " y una longitud total de 8.00 m, que está sujeta a una de las correas de la cubierta del laboratorio, la cual se encuentra ubicada a una altura de 5.60 m desde el nivel del piso. Esta es la altura de elevación que hay que vencer para poder alimentar el tanque de almacenamiento (ver Figura 29).



Figura 29. Manguera de Salida Ariete – Tanque de Almacenamiento

6. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO.

Estas dos funciones son extremadamente sencillas en este aparato ya que simplemente se limitan a alcanzar las condiciones mínimas para su funcionamiento.

6.1 OPERACIÓN DEL ARIETE HIDRAULICO.

Las actividades que tienen que ver con este ítem son las que se enumeran a continuación:

- Mantener la altura del agua dentro del tanque de alimentación en, por lo menos 30 cm desde la unidad de salida y además tener una altura hidrostática total (del piso al nivel del agua dentro del tanque) mínimo 1 m (Figura 30).

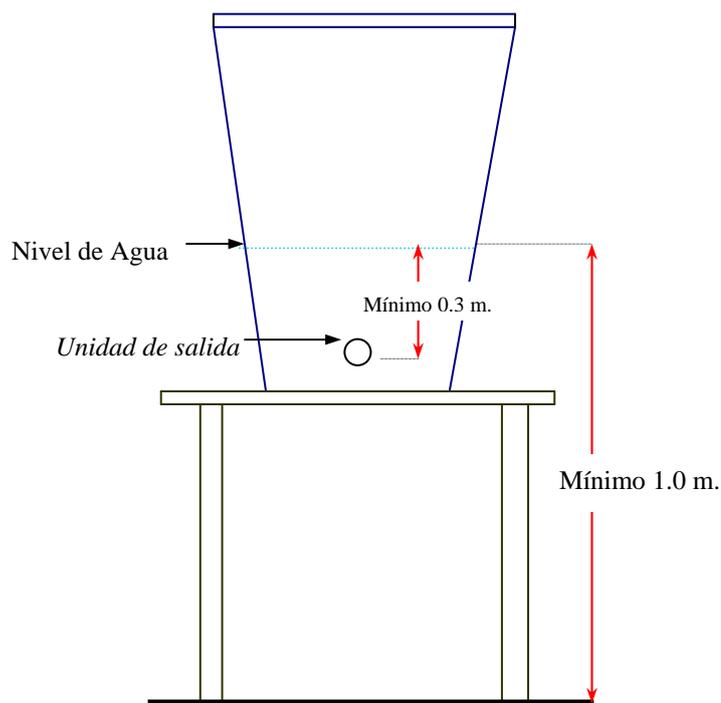


Figura 30. Alturas mínimas de operación para el Ariete Hidráulico

La longitud óptima de la tubería de alimentación, para las condiciones de diseño, debe oscilar entre 6.0 m y 12.0 m. Si dicha longitud es menor de 6.0 m, la presión generada por el golpe de ariete se disminuye al igual que la eficiencia del aparato debido a que existe un cruce de ondas de presión positivas y negativas a lo largo de la tubería (ver golpe de ariete numeral 2.1). Y si supera los 12.0 m entonces las pérdidas generadas por la fricción son muy grandes lo cual genera que la presión hidrostática no sea suficiente para accionar la válvula de impulso.

- La calibración del número de golpes por minuto de la válvula de impulso se logra gracias a que esta válvula posee un sistema de resorte ajustable por medio de la acción de una tuerca que aumenta o

disminuye la fuerza elástica de este resorte. Si el resorte está comprimido (aumento de la fuerza elástica) el número de golpes por minuto disminuye y si el resorte no está comprimido (disminución de la fuerza elástica) el número de golpes aumenta (Figura 31).



Figura 31. Calibración del Número de Golpes por Minuto

- Si se quiere variar la altura de elevación, sin alterar la instalación, es posible conseguirlo simplemente generando pérdidas con la llave de paso ubicada en la salida del **Ariete**. Para ello se cierra totalmente dicha llave, se deja acumular la presión en la cámara de aire hasta alcanzar el valor correspondiente a la altura deseada (registrada en el dial del manómetro), luego se gira parcialmente la llave (aproximadamente 10°) y se espera a que la lectura se estabilice en

un valor superior al inicial (8 psi equivalente a 5.60m de altura) (Figura 32).



Figura 32. Simulación de Altura Mediante pérdida de Carga

6.2 MANTENIMIENTO DEL ARIETE HIDRAULICO.

Las actividades que tienen que ver con este ítem son solamente las que se enumeran a continuación:

- Es necesario cambiar los empaques de las válvulas de retención y de impulso, que son prácticamente las únicas piezas que deben renovarse, cuando se detecte algún deterioro de estas debido a su constante uso, una de las mejores fuentes de caucho para reemplazar los empaques lo constituye una vieja rueda de tractor, que no da

muestras de desgaste al cabo de 8 meses de utilización ininterrumpida.

- Se debe purgar periódicamente la cámara de aire, ya que puede llegar a disminuirse la cantidad de aire contenida dentro de ella, que gradualmente es absorbida por el agua bombeada, este fenómeno se detecta cuando se observa que la tubería de conducción comienza a vibrar muy fuertemente con cada golpe, lo cual puede ocasionar la rotura de una o más piezas del **Ariete**, porque se ha perdido el efecto amortiguador de la bolsa de aire que la cámara debe contener en su interior. El proceso de purga se realiza retirando la manguera de salida y dejando que el líquido contenido dentro de la cámara se evacue totalmente, o se puede utilizar una válvula cheque con tornillo de purga (Figura 33)

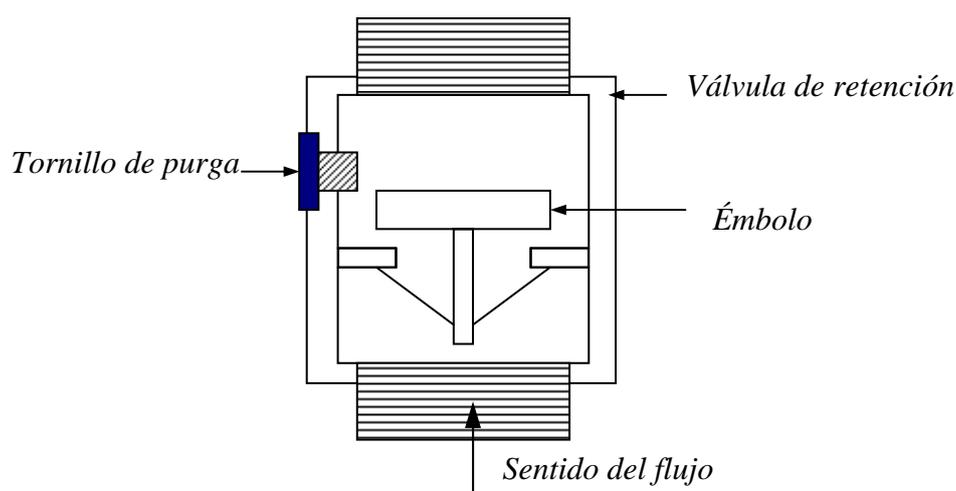


Figura 33. Válvula de retención con tornillo de purga

7. REALIZACIÓN DE LABORATORIOS

El objetivo principal en estos laboratorios es determinar la máxima eficiencia del **Ariete** mediante la obtención de las mejores condiciones para su funcionamiento, esto se logra mediante la realización de dos laboratorios:

7.1 EQUIPO UTILIZADO:

- Instalación completa del **Ariete Hidráulico** (Tanque, conducción, **Ariete** y descarga)
- 2 cronómetros (aproximación 1/100 seg)
- 1 probeta graduada de 1000 ml (1 litro)
- 1 Cinta métrica

7.2 LABORATORIO No. 1

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE GOLPES POR MINUTO.

7.2.1 Objetivo:

Con este laboratorio se pretende demostrar que existe un número de golpes por minuto en donde se tiene la máxima eficiencia (η) del **Ariete Hidráulico**, manteniendo una relación de alturas (h/H) constante.

Para conseguir la variación del número de golpes por minuto se procede a variar la compresión del resorte de la válvula de impulso, por lo menos en cuatro posiciones diferentes para lograr un amplio número de valores y así conseguir una gráfica de *golpes por minuto contra eficiencia*, mucho más confiable.

7.2.2 Procedimiento:

7.2.2.1 Se llena el tanque de alimentación hasta conseguir una altura desde el piso superior a 1 metro (medida con la cinta métrica).

7.2.2.2 Se coloca la tuerca de ajuste del resorte en la posición más baja en el eje (ver Figura No. 31), donde el resorte presenta su

menor compresión, con ello se logra obtener el mayor número de golpes por minuto de la válvula de impulso.

- 7.2.2.3 Se abre la llave de paso y se permite que el agua llegue hasta el **Ariete**, asegurándose de que la altura (H) en el tanque de alimentación permanezca constante durante la realización del laboratorio.
- 7.2.2.4 Se pone a funcionar el **Ariete** hasta que el flujo de entrega se estabilice a un ritmo constante.
- 7.2.2.5 Se determina la altura de elevación (h) mediante la lectura sobre el dial del manómetro (ver Figura No. 32), haciendo la conversión necesaria a metros de columna de agua (1 *psi* equivale a 0.70 *metros* de columna de agua; 1 *bar* equivale a 10 *metros* de columna de agua).
- 7.2.2.6 Encontramos la relación h/H , la cual se mantiene constante durante todo el laboratorio.
- 7.2.2.7 Se realiza el conteo del número de golpes del émbolo de la válvula de impulso durante 1 minuto, con la ayuda del cronómetro No. 1 (ver anexo No.3a), esto debe hacerse por lo

menos en 3 ocasiones y el valor que se registra es el promedio aritmético de los diferentes conteos.

- 7.2.2.8 Se afora el caudal de salida tomando con el cronómetro No. 2 el tiempo que tarda en llenarse 1 litro de agua en la probeta (ver anexo No. 3b), se calcula el caudal de acuerdo con la expresión (24), igualmente deben hacerse por lo menos tres mediciones para obtener el promedio aritmético de las mismas.

$$q(LPM) = \frac{1(lt) * 60(seg / min)}{Tiempo(seg)} \quad (24)$$

- 7.2.2.9 Se suspende la entrada de agua al tanque de alimentación y se deja que el **Ariete** siga funcionando, se toma el tiempo que se demora el agua en descender entre dos marcas volumétricas consecutivas ($\Delta Vol = 5$ litros) con el cronómetro No. 1 (ver anexo No. 3c), se realiza una segunda lectura en para la siguiente marca utilizando el cronómetro No.2. (el descenso del agua se observa en el piezómetro que trae el tanque). Se calcula el caudal de entrada para cada lectura utilizando la expresión (25). deben hacerse dos mediciones para obtener el promedio aritmético de las mismas.

$$Q(LPM) = \frac{5(lt) * 60(seg/min)}{Tiempo(seg)} \quad (25)$$

7.2.2.10 Con los datos anteriores (Q = caudal de entrada, q = caudal de salida, H = altura de alimentación, h = altura de elevación) se calcula la eficiencia en porcentaje (η) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100\% \quad (26)$$

7.2.2.11 Se cierra la llave de paso del **Ariete**, y se permite que el tanque de alimentación se llene hasta alcanzar la misma altura de alimentación (H) conseguida en el paso 1.

7.2.2.12 Se varia el número de golpes por minuto en la válvula de impulso, llevando la tuerca de ajuste a una nueva posición, (teniendo en cuenta que se deben obtener por lo menos cuatro posiciones diferentes) aproximadamente a la mitad de la rosca del eje de la válvula, con esto se disminuye el número de golpes por minuto.

7.2.2.13 Se repiten los pasos desde el 3 hasta el 12, por tres veces más para así obtener cuatro valores de eficiencia (η) en función de los golpes por minuto (G/M),

7.2.2.14 Estos pares de valores conseguidos en los pasos anteriores (*Golpes por minuto vs Eficiencia*) deben ser registrados en la siguiente gráfica.

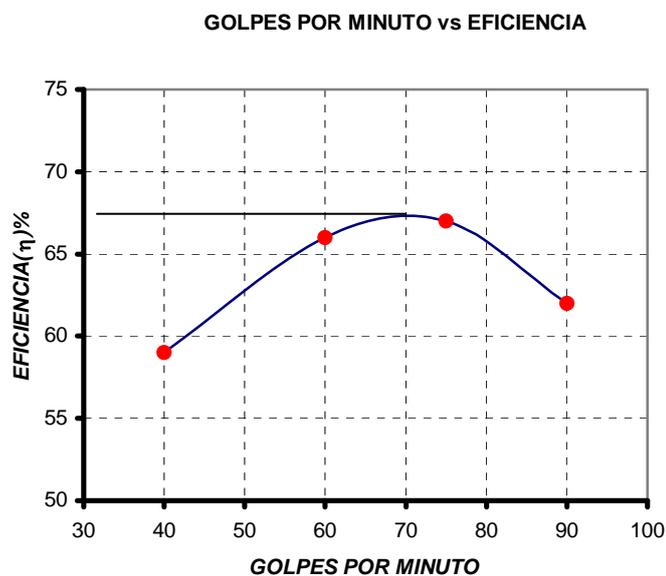


Figura 34. Gráfica para determinar la máxima eficiencia (η) en función del número de Golpes por Minuto (G/M)

7.2.2.15 Por interpolación se puede determinar a que número de golpes por minuto debe funcionar el aparato para obtener el máximo rendimiento, para una relación de alturas (h/H) constante.

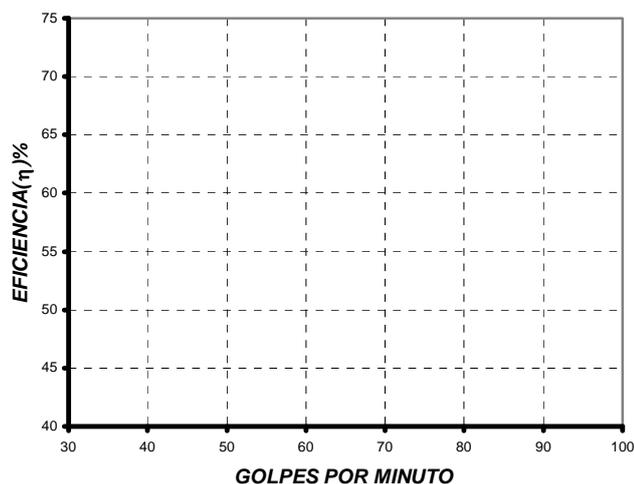
7.2.3 Guía de laboratorio.

Determinación de la eficiencia en función de los golpes por minuto.

Materia: _____

Grupo No: _____

Alumnos:



GOLPES POR MINUTO vs EFICIENCIA

Punto No 1.

Golpes por minuto _____

Q = _____ (Lpm)

q = _____ (Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

Punto No 2.**Golpes por minuto** _____

Q = _____(Lpm)

q = _____(Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

Punto No 3.**Golpes por minuto** _____

Q = _____(Lpm)

q = _____(Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

Punto No 4.**Golpes por minuto** _____

Q = _____(Lpm)

q = _____(Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

7.3 LABORATORIO No. 2.

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE ALTURAS.

7.3.1 Objetivo:

El objetivo de este laboratorio es determinar la *eficiencia* (η) variando la relación entre la altura de entrada (H) y la altura de elevación (h) que se conoce como *relación de alturas* (h/H), manteniendo un ritmo regular de la válvula de impulso (número de golpes por minuto constante).

Para variar la relación de alturas se utiliza la llave de salida del **Ariete** para generar pérdidas por fricción y por lo tanto simular una mayor altura de bombeo (h), la cual puede ser controlada gracias al manómetro del **Ariete**, por lo menos debe hacerse para tres valores de altura, manteniendo constante la altura de alimentación (H),.

También es posible cambiar la relación de alturas variando la altura de alimentación (H) y manteniendo constante la altura de elevación (h).

7.3.2 Procedimiento:

- 7.3.2.1 Se llena el tanque de alimentación hasta conseguir una altura desde el piso superior a 1 metro (medida con la cinta métrica).
- 7.3.2.2 Se coloca la tuerca de ajuste del resorte de la válvula de impulso en una posición fija (ver Figura No. 31), con lo cual se logra un número de golpes por minuto constante durante todo el laboratorio.
- 7.3.2.3 Se abre la llave de paso y se permite que el agua llegue hasta el **Ariete**, asegurándose también que la altura (H) en el tanque de alimentación permanezca constante durante la realización del laboratorio.
- 7.3.2.4 Se pone a funcionar el **Ariete** hasta que el flujo de entrega se estabilice a un ritmo constante, luego se realiza el conteo del número de golpes por minuto con ayuda del cronómetro No 1 (ver anexo No.3a), preferiblemente este valor debe estar entre 50 y 70 golpes por minuto.
- 7.3.2.5 Se deja la llave de salida del **Ariete** totalmente abierta, Se determina la altura de elevación (h) mediante la lectura sobre el

dial del manómetro (ver Figura No. 32), haciendo la conversión necesaria a metros de columna de agua (1 *psi* equivale a 0.70 *metros* de columna de agua; 1 *bar* equivale a 10 *metros* de columna de agua).

7.3.2.6 Procedemos a calcular la relación de alturas (h/H).

7.3.2.7 Se afora el caudal de salida tomando con el cronómetro No. 2 el tiempo que tarda en llenarse 1 litro de agua en la probeta (ver anexo No. 3b), se calcula el caudal de acuerdo con la expresión (24), deben hacerse por lo menos tres mediciones para obtener el promedio aritmético de las mismas.

$$q(LPM) = \frac{1(lt) * 60(seg / min)}{Tiempo(seg)} \quad (24)$$

7.3.2.8 Se suspende la entrada de agua al tanque de alimentación y se deja que el **Ariete** siga funcionando, se toma el tiempo que se demora el agua en descender entre dos marcas volumétricas consecutivas ($\Delta Vol = 5$ litros) con el cronómetro No. 1 (ver anexo No. 3c), se realiza una segunda lectura en para la siguiente marca utilizando el cronómetro No.2. (el descenso del agua se observa en el piezómetro que trae el tanque). Se calcula el caudal de entrada para cada lectura utilizando la expresión (25),

deben hacerse dos mediciones para obtener el promedio aritmético de las mismas.

$$Q(LPM) = \frac{5(lt) * 60(seg / min)}{Tiempo(seg)} \quad (25)$$

7.3.2.9 Con los datos anteriores (Q = caudal de entrada, q = caudal de salida, H = altura de alimentación, h = altura de elevación) se calcula la eficiencia en porcentaje (η) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100\% \quad (26)$$

7.3.2.10 Se cierra la llave de paso del **Ariete**, y se permite que el tanque de alimentación se llene hasta alcanzar la misma altura de alimentación (H) conseguida en el paso 1.

7.3.2.11 Se abre la llave de paso de la entrada y se permite que el agua llegue hasta el **Ariete**, mientras este sigue funcionando se cierra totalmente la válvula de salida y se deja que se acumule una cierta cantidad de presión en la cámara de aire, registrada en el manómetro (teniendo en cuenta que por lo menos se deben tener dos alturas más).

7.3.2.12 Se permite el paso del flujo de bombeo abriendo parcialmente la llave de salida, aproximadamente a 10° y se espera a que el manómetro se estabilice (ver Figura No. 32).

7.3.2.13 Se repiten los pasos desde el 3 hasta el 12, por dos veces más para así obtener tres valores de eficiencia (η) en función de la relación de alturas (h/H),

7.3.2.14 Estos pares de valores conseguidos en los pasos anteriores deben ser registrados en la siguiente gráfica.

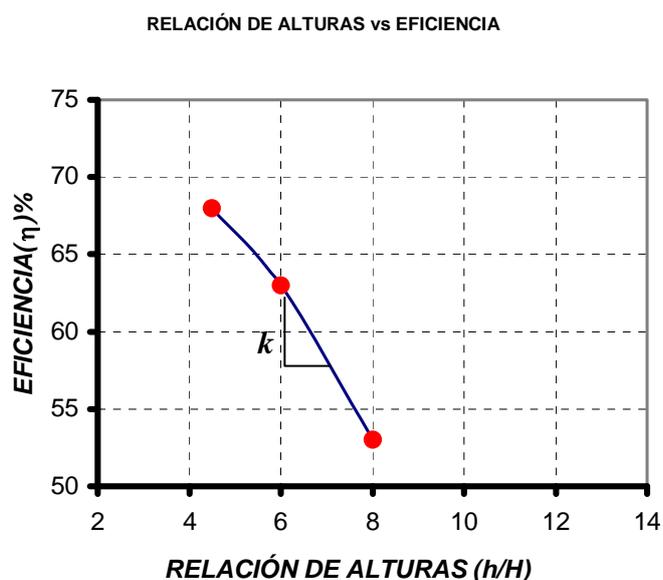


Figura 35. Gráfica para determinar la eficiencia (R) en función de la Relación de Alturas (h/H)

7.3.2.15 En la gráfica se observa una relación lineal, donde a mayor relación de alturas (h/H) menor eficiencia (η), determinándose con la pendiente de la recta la constante (k) del **Ariete**.

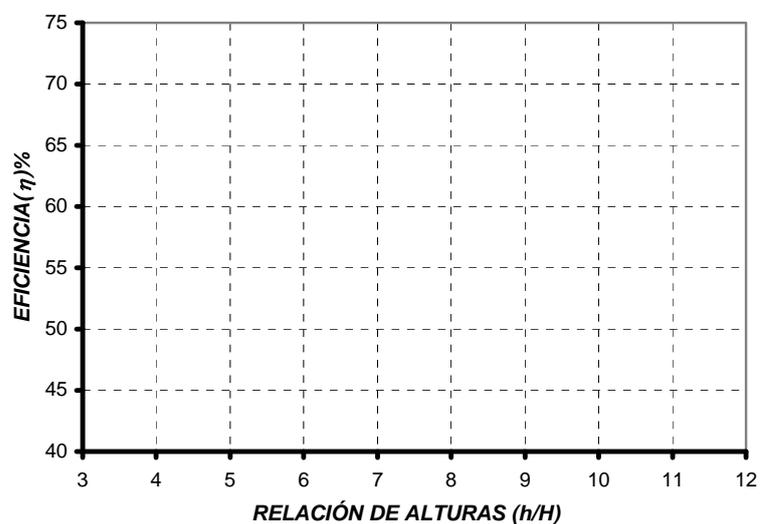
7.3.3 Guía de laboratorio.

Determinación de la eficiencia en función de la relación de alturas.

Materia: _____

Grupo No: _____

Alumnos:



RELACIÓN DE ALTURAS vs EFICIENCIA

Punto No 1.

Relación de Alturas (h/H) _____

Q = _____ (Lpm)

q = _____ (Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

Punto No 2.

Relación de Alturas (h/H) _____

Q = _____ (Lpm)

q = _____ (Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

Punto No 3.

Relación de Alturas (h/H) _____

Q = _____ (Lpm)

q = _____ (Lpm)

H = _____ (m)

h = _____ (m)

$$\eta = \frac{q * h}{Q * H} * 100 = \text{_____} (\%)$$

8. DISEÑO SIMPLIFICADO

8.1 DESCRIPCIÓN.

El **Ariete Hidráulico** de bajo costo construido a partir de tubos y accesorios de PVC aliados a dos válvulas metálicas (bronce) las cuales se encargan de dar funcionamiento al aparato, es muy fácil de construir, instalar y operar.

Para el diseño es necesario comenzar por determinar el caudal que se requiere elevar, el cual depende del tipo de uso que se le vaya a dar. En el siguiente Cuadro muestra el consumo diario per cápita a elevar.

Cuadro 3 : Consumo de agua diaria per cápita

CONSUMIDOR (und)	CONSUMO (lts/día)
HOMBRE	100 – 250
BOVINO	40
EQUINOS Y MENORES	30
PORCINOS	5
OVINOS	5
AVES	0.15
HUERTAS Y JARDINES x m ²	0.3 – 0.5

8.2 ECUACIÓN GENERAL DEL ARIETE HIDRÁULICO.

Aplicando la ecuación general del **Ariete Hidráulico** podemos determinar el caudal de entrada en función de la altura de elevación, el caudal a elevar, la altura de caída, y el rendimiento del aparato así:

$$\text{Caudal de Entrada} = \frac{\text{Caudal de Salida} \times \text{Altura a Elevar}}{\text{Altura de Caída} \times \text{Rendimiento}}$$

A continuación se muestra un Cuadro en el cual aparecen los valores de rendimiento en función de la relación de alturas de elevación y caída.

Cuadro 4: Valores de rendimiento vs relación de alturas

ELEVACIÓN : CAÍDA (m/m)	2 : 1	3 : 1	4 : 1	6 : 1	8 : 1	10 : 1	12 : 1
RENDIMIENTO (%)	87	81	76	65	54	42	29

8.3 TUBERÍA DE ENTRADA

El diámetro de la tubería de entrada no depende del **Ariete** sino que está en función del caudal de alimentación.

En el siguiente Cuadro se pueden ver relacionados estos parámetros:

Cuadro 5 : Relación Caudal de Alimentación vs Diámetro de Tubería de Entrada

Caudal lt/min	7	15	25	45	75	125
Diámetro Pulgadas	$\frac{3}{4}$	1	1 $\frac{1}{2}$	2	2 $\frac{1}{2}$	3

La longitud de la tubería de entrada depende de la altura de elevación, siendo recomendable que satisfaga las siguientes relaciones:

L < 2 veces la altura de elevación.

L > 10 veces la altura de caída

L > 8 metros.

L < 75 metros

La diferencia de nivel o caída aprovechable para accionar el **Ariete** no debe ser inferior a un (1) metro, debido a que el rendimiento será muy bajo o puede dejar de funcionar porque la carga hidráulica no es capaz de accionar la válvula de impulso; y no superior a diez (10) metros debido a que el desgaste de la válvula será muy grande o puede dejar de funcionar porque dicha válvula permanecerá cerrada a causa de la gran presión hidrostática a la cual está sometida.

Hay que tener en cuenta que el agua que se acelera en el tubo de alimentación es el que provoca el golpe de ariete por lo cual debe tener una longitud, inclinación y diámetro adecuados, sin curvas ni estrechamientos.

8.4 TUBERÍA DE SALIDA

El diámetro de la tubería de salida no depende del **Ariete** sino que está en función del caudal de elevación. Generalmente este diámetro se considera como la mitad del diámetro de la tubería de alimentación.

La longitud de esta tubería no tiene restricciones ni condiciones especiales, solamente se requiere que sea suficiente para poder llegar al tanque de almacenamiento

La altura de la tubería de salida debe estar máximo entre diez (10) y doce (12) veces la altura de alimentación, no siendo aconsejable una mayor relación de altura, debido a que baja su rendimiento.

8.5 VÁLVULA DE IMPULSO.

El diámetro de esta válvula se considera el mismo del cuerpo del **Ariete** el cual debe ser de 1.5 veces el diámetro de la tubería de alimentación.

El rango de carrera del émbolo debe estar comprendido entre 5 milímetros para alturas de alimentación pequeñas y 30 milímetros para grandes alturas de alimentación.

El número de golpes por minuto debe estar comprendido entre 30 y 90. Los **Arietes** pequeños funcionan muy bien a unos 75 a 90 golpes por minuto, pero cuanto más lento sea su funcionamiento tanto más agua utiliza y mayor es su bombeo.

8.6 VÁLVULA DE RETENCIÓN.

El diámetro de esta válvula se considera el mismo del cuerpo del **Ariete** y de la válvula de impulso el cual, en general, debe ser de 1.5 veces el diámetro de la tubería de alimentación.

Un importante detalle en la válvula de retención es el orificio de alivio de 2 milímetros de diámetro que debe ser perforado debajo de su lengüeta , que aunque desperdicia un poco de agua, absorbe una burbuja de aire en cada golpe que es necesaria para mantener aire en la cámara.

8.7 CÁMARA DE AIRE.

El volumen de la cámara de aire depende de la presión necesaria para elevar el agua a una determinada altura, dicho volumen oscila entre 1.5 litros para pequeñas alturas de elevación y 3 litros para grandes alturas.

Opcionalmente se puede instalar un manómetro en la parte superior de la cámara para poder registrar la presión acumulada hasta la altura de elevación considerando las pérdidas en la tubería.

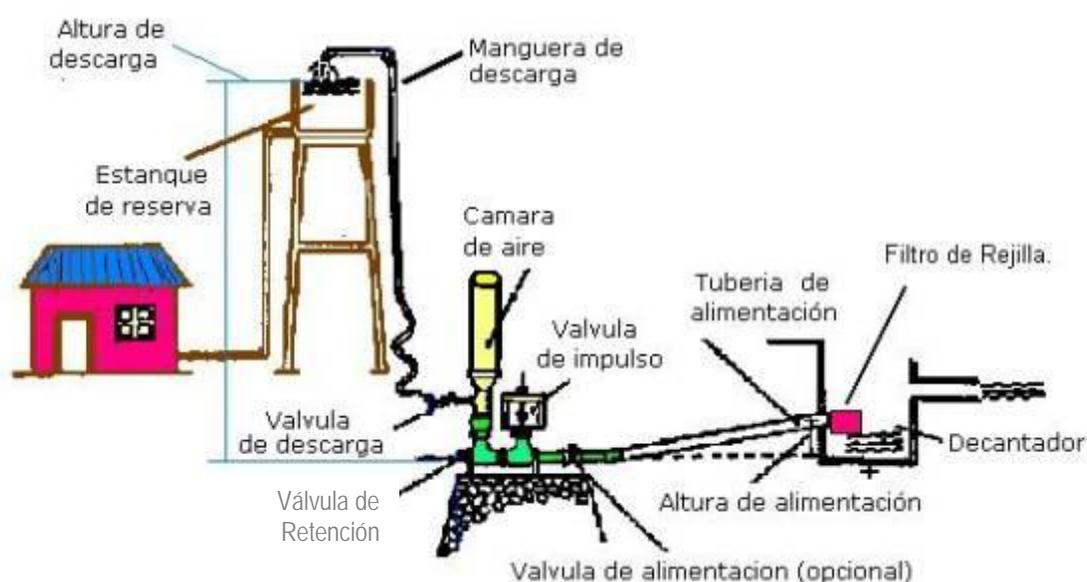


Figura 36. Esquema de un suministro con Ariete Hidráulico

9. RECOMENDACIONES.

- Para **Arietes Hidráulicos** instalados en ríos, quebradas, arroyos, o cualquier fuente que pueda llevar basuras o sólidos gruesos, es necesario cubrir la entrada de la tubería de alimentación con una coladera de alambre u otro material que impida el paso de estos desperdicios, que pueden llegar a alterar el buen funcionamiento del aparato.
- Si el **Ariete** no tiene capacidad para elevar el caudal deseado se puede recurrir a la instalación de una batería de dos o más aparatos funcionando en paralelo (se puede aumentar la eficiencia si se alternan sus ciclos), los cuales deben tener tuberías de alimentación separadas; pero las tuberías de salida se pueden unir, a condición de que los tubos sean lo suficientemente anchos para transportar esa mayor cantidad de agua.
- Se debe revisar periódicamente el rendimiento volumétrico ($RV\% = q/Q * 100$) y la eficiencia del sistema; si se observa un descenso de tales relaciones, se debe disponer de las medidas conducentes a

corregir tal situación descritas en el numeral de *operación y mantenimiento* , si es que esa variación se considera inconveniente.

- Si después de instalar y poner a operar el **Ariete Hidráulico**, la válvula de impulso no funciona, entonces es necesario accionarla manualmente algunas veces antes de que ella comience trabajar sola.
- Cuando en un río no es posible crear el desnivel, se lo puede crear, siguiendo la pendiente natural del curso del río, usando una longitud de tubería tal que en una distancia razonable se pueda obtener la altura necesaria (1 metro como mínimo).
- Es muy conveniente instalar una llave de paso en el tubo de alimentación para suspender el flujo cuando se realizan las actividades de operación y mantenimiento, pero no es indispensable, la otra llave de paso instalada en la tubería de elevación es absolutamente necesaria, porque evitará que se vacíe todo el tubo de descarga siempre que se limpie el **Ariete**.

ANEXOS



a. Tanque – Tubería de alimentación



b. Tubería de alimentación - Ariete

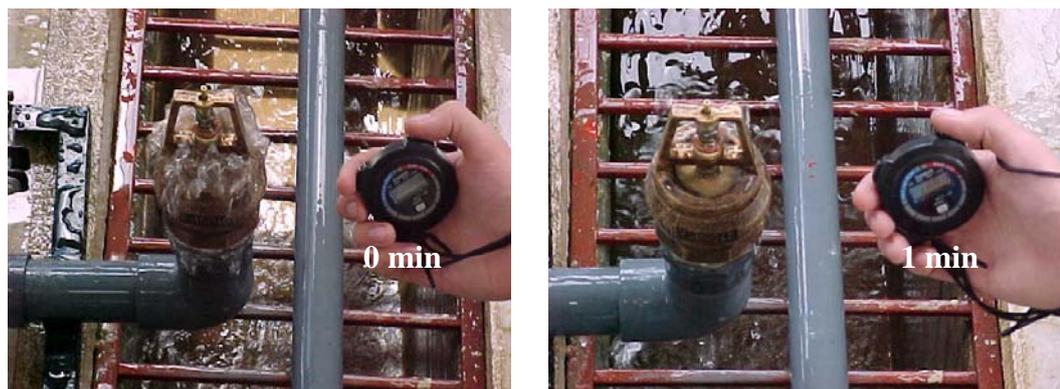


c. Ariete – Manguera de salida

Anexo 1. Conexiones de entrada y salida del Ariete



Anexo 2. Instalación completa en el laboratorio



a.. Conteo del número de golpes por minuto



b. Procedimiento para aforar caudal de salida



c.. Procedimiento para aforar caudal de entrada

Anexo 3. Procedimientos para determinar las variables del funcionamiento



Anexo 4. Diferentes tipos de Arietes Hidráulicos comerciales

CONCLUSIONES

- Conforme a las pruebas realizadas al **Ariete** podemos decir que se comporta con un rango de eficiencias dentro de lo normal para aparatos contruidos artesanalmente, e incluso presenta unos valores de eficiencia mayores de lo encontrado en la literatura consultada.
- Las variables que intervienen en la eficiencia de los **Arietes** en general son netamente controlables con nuestro montaje, lo que permite realizar una amplia gama de pruebas para poder determinar las mejores condiciones para el funcionamiento del **Ariete**.
- La prueba hecha con la instalación del **Ariete Hidráulico** con Accesorios y Tuberías de PVC (material plástico), ha dado muy buenos resultados en cuanto a eficiencia se refiere, contrario a lo que la mayoría de la literatura expone, que sugiere montar la instalación en tubería metálica (materiales rígidos), lo que conduce a encarecer los costos notablemente.

- El **Ariete Hidráulico** además de ser un aparato muy didáctico, sirve para ayudar a tomar conciencia de la necesidad de proteger la naturaleza, evitando la explotación indiscriminada de los recursos naturales, ya que para su funcionamiento no precisa de ninguna fuente de energía externa, como son los combustibles fósiles o la electricidad y además no produce ningún tipo de contaminación, por ello se puede decir que el **Ariete Hidráulico** es el sistema de bombeo más ecológico que existe.
- Fue muy satisfactorio para nosotros poder construir con nuestras propias manos este aparato, utilizando materiales de muy fácil consecución en el mercado y además significó un enorme orgullo para nosotros verlo funcionar de acuerdo con lo esperado.
- Creemos haber logrado el objetivo propuesto desde el principio, el cual era la construcción del **Ariete** para dotar al laboratorio de hidráulica de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Nariño, con ello quisimos colaborar con nuestro granito de arena para el mejoramiento de la calidad de la educación impartida en nuestra muy querida facultad.

BIBLIOGRAFIA

AZEVEDO NETTO, J.M. Y ACOSTA ALVAREZ, Guillermo. Manual de Hidráulica. Ed. Harla. México D.F. 1983, p. 89-90, 274-275.

CALDERÓN C. F. El Ariete Hidráulico. Conferencias. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Palmira. 1985, p. 1-7.

EMBRATER, Servicio de Extensão Rural. Min. Agricultura. Bombeamento de água para pequena irrigação. Energia Alternativa na Propiedade Rural. Brasilia 1984, p. 53-61.

HUPPING STONER, Carol. Como Usar las Fuentes de Energía Natural Ed. Diana. México. 1980, p. 121-131.

KARASSIK Igor, KRUTZSCH William, FRASER Warren Y MESSINA Joseph. Manual de Bombas. Diseño, Aplicación, Especificaciones, Operación y Mantenimiento. Ed. Mcgraw-Hill. México. 1983 p. 9.82-9.98.

LINSLEY, Ray K. Y FRANZINI, Joseph B. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos.. Ed. Mcgraw-Hill. México 1984, p. 364-369, 434-436.

STREETER, Víctor L. Y WYLIE E. Benjamin. Mecánica de los Fluidos. Ed. Mcgraw-Hill. México. 1971, p. 669-696.

PÁGINAS WEB

cipres.cec.uchile.cl/~fmaureir/ariete/bomba.htm, cipres.cec.uchile.cl/~fmaureir/ariete/Ariete.htm

www.apcovalves.com/spawhich.htm

www.bae.ncsu.edu/programs/extension/publicat/wqwm/ebae161_92.html

www.biohabitat.org/solar2001/innova.htm

www.cepis.ops-oms.org/eswww/proyecto/repidisc/publica/tesauro/tesauro/Tesaurv.html

www.cepis.org.pe/eswww/proyecto/repidisc/publica/hdt/hdt051-a.html

www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia08/HTML/articulo03.htm
personal3.iddeo.es/msans/ariet.htm

www.laosa.org/revista/9/bioconstruccion9.htm

www.mec.utfsm.cl/renovables/proyectos/ariete/arih.htm

www.pucp.edu.pe/invest/grupo/presentacion/tsld006.htm

www.yin-yang.com/rampumps/