

GOLPE DE ARIETE EN PLANATAS DE BOMBEO
Y
ALIVIADORES DE PRESION

ROBERTO CARLOS OROZCO MAJUL

LUIS ALBERTO LOPEZ BERTEL

VICTOR JAIRO RAMÍREZ PIÑEREZ

Director

JULIO CANTILLO TORRES

Ingeniero Mecánico.

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
CARTAGENA BOLÍVAR

2003

GOLPE DE ARIETE EN PLANATAS DE BOMBEO
Y
ALIVIADORES DE PRESION

ROBERTO CARLOS OROZCO MAJUL

LUIS ALBERTO LOPEZ BERTEL

VICTOR JAIRO RAMÍREZ PIÑEREZ

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA
CARTAGENA BOLÍVAR

2003

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	13
1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES	17
1.1. CLASIFICACION DE FLUJOS	17
1.1.1. Flujo Unidimensional	17
1.1.2. Flujo Permanente	17
1.1.3. Flujo No Permanente	18
1.1.4. Flujo Uniforme y No Uniforme	18
1.1.5. Flujo Compresible y No Compresible	18
1.1.6. Flujo Transitorio	18
1.2 RESONANCIA	18
1.3 ECUACION DE CONTINUIDAD PARA UN CONDUCTO	19
1.3.1 Principio de la Conservación de la Materia	19
1.3.2 Ecuación de la Continuidad	19
1.4 ECUACION DINAMICA PARA UN CONDUCTO	21
2. CONCEPTO DEL EFECTO DEL GOLPE DE ARIETE	24
2.1 CAUSAS QUE PRODUCEN EL GOLPE DE ARIETE	25
2.2 MEDIDAS PREVENTIVAS DEL GOLPE DE ARIETE	26
2.2.1. Tiempo critico de cierre para válvula	27
2.2.2. Tiempo critico	28
2.2.3. Constante k de la tubería	28
2.2.4. Relación de tiempo	29
2.2.5. Aumento de presión	29
2.2.6. Fórmula de Micheaud	30
2.2.7. Formula de Allievi	31
2.3. Analisis De La Columna Rigida En Sistemas De bombeo	34

	Pág.
2.3.1. Descripción del fenómeno	34
2.3.2. Teoría de la columna rígida	40
2.3.3. Teoría de la columna elástica	41
2.3.4. Celeridad de onda	42
3. GOLPE DE ARIETE EN PLANTAS DE BOMBEO	47
3.1. DESCRIPCION DEL FENOMENO	47
3.2. GOLPE DE ARIETE EN EL ARRANQUE DE UNA BOMBA	51
3.3. GOLPE DE ARIETE EN LA TUBERIA DE SUCCION	51
4. DISPOSITIVOS DE ALIVIOS	52
4.1 DESCRIPCION DE VALVULAS	52
4.1.1 Válvula de no retorno	52
4.1.2 Válvula de seguridad	53
4.1.3 Válvula aliviadora de presión	54
4.1.4 Válvula reguladora de presión	55
4.1.5 Válvula de admisión de aire	56
4.1.6 Instalación adecuada de las válvulas	57
4.2. TANQUE DE OSCILACION	59
4.2.1. Descripción	59
4.2.2. Tipos principales de tanques de oscilación	61
4.2.3. Requisitos para operación correcta para un tanque de oscilación	63
4.3 CAMARA DE AIRE	64
5. RECOMENDACIONES	66
6. CONCLUSIONES	67
BIBLIOGRAFIA	69
ANEXOS	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. Flujo en un conducto.	17
FIGURA 2. Volumen elemental.	19
FIGURA 3. Equilibrio dinámico.	21
FIGURA 4. Monograma para el calculo de K.	30
FIGURA 5. Curvas de gasto de una válvula.	32
FIGURA 6. Interrupción de corriente de una bomba	35
FIGURA 7. retroceso del frente de onda y del flujo	36
FIGURA 7a. Dilatación por sobrepresion de onda	37
FIGURA 8. retorno del fluido al deposito.	39
FIGUARA 9. recuperación del tamaño normal de la tubería	39
FIGURA 10. teoría de la columna rígida	41
FIGURA 11a. leyes para maniobras de cierre o apertura no uniforme	43
FIGURA 11b. leyes para maniobras de cierre o apertura no uniforme	44
FIGURA 12. descripción del fenómeno de la planta de bombeo	48
FIGURA 13. zona de operación de una bomba	49
FIGURA 14. Variación de la altura y la velocidad en la bomba cuando existe una válvula de retorno en la tubería de descarga	50
FIGURA 15. válvula de retorno	53

FIGURA 16. Válvula de seguridad.	53
FIGURA 17. Válvula aliviadora de presión o supresora de oscilación.	55
FIGURA 18. Operaron de una válvula reguladora de presión	56
FIGURA 19. válvula de admisión de aire	57
FIGURA 20a. Instalación adecuada de una válvula	57
FIGURA 20b. Instalación adecuada de una válvula	58
FIGURA 21a. Funcionamiento de un tanque de oscilación	60
FIGURA 21b. Funcionamiento de un tanque de oscilación	61
FIGURA 22. tanques de tipo simple	61
FIGURA 23. tanque con orificio diferencial	62
FIGURA 24. tanque diferencial.	63
FIGURA 25. Cámara de aire	65

LISTA DE TABLAS

	PAGINAS
TABLA 1. Diámetro de la ventosa en función del diámetro de la tubería	27
TABLA 2. Diámetro de la tubería VS Diámetro de limpieza.	27
TABLA 3. Valores usuales del coeficiente K para algunos materiales	29
TABLA 4. Valores del modulo de elasticidad para algunos materiales	43
TABLA 5. Valores comúnmente usados del modulo de elasticidad volumétrico y de la densidad para algunos líquidos	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Válvula ventosas combinadas de caudal con cierre lento	70
Anexo B. Funcionamiento de las tuberías por gravedad y en impulsión	73
Anexo C. Golpe de ariete en tuberías en diferentes materiales	84
Anexo D. Ventosas	86
Anexo E. Válvulas de control	88
Anexo F. Ariete hidráulico	91

RESUMEN

El golpe de ariete es conocido por la gente, aún cuando ésta no entienda de hidráulica porque se produce en las instalaciones domésticas de conducción de agua, en forma de martilleo, cuando se abre o cierra con rapidez una llave de paso en una tubería que conduzca agua a velocidad alta.

Los ingenieros especialistas, lo estudian muy detenidamente porque conocen bien de sus efectos devastadores. Sobre todo, se esfuerzan para determinar las medidas que permiten disminuir su intensidad y preparar las tuberías para resistir los esfuerzos que produce.

El golpe de ariete se ha venido estudiando desde el siglo XX con mucha meticulosidad. Podríamos señalar los siguientes nombres como los más conocidos por sus trabajos de este campo: Joukowski fue, en alguna medida, el pionero de los estudios; Allievi estableció la teoría de su nombre; Micheaud es el autor de la fórmula de cálculo de la sobrepresión cuando se conoce el tiempo de parada de la columna líquida; Bergeron publicó el excelente método de cálculo gráfico de su nombre; Parmakian es el autor de un método de cálculo utilizando ábacos para la determinación de las presiones en las tuberías .

En la actualidad, el cálculo del golpe de ariete se realiza por métodos informáticos cuando se trata de una instalación complicada y por el método de Bergeron o las curvas de Parmakian en instalaciones más sencillas.

Muchos análisis de golpe de ariete que se encuentran en tratados de hidrodinámica, hacen referencia al caso de una conducción con flujo hacia un obturador, que es la situación de una tubería de descarga de una presa y tratan

menos prolijamente, o incluso no tratan, el caso de una tubería de impulsión que sigue a un bombeo.

El golpe de ariete es un fenómeno de transformación de energía que se produce cuando hay un cambio brusco en la velocidad del agua. La energía cinética de la masa líquida se transforma de diversas maneras, como veremos al analizar el fenómeno, y si no se disipa, terminara produciendo un impacto sobre elementos de la conducción: válvula, bomba, tubería, etc. Este impacto puede ser destructivo, o simplemente degradar la energía en una deformación, calor y sonido.

Hay una teoría simplista, la de la columna rígida, que no se acepta en la actualidad, para el calculo del golpe de ariete, pero da una idea bastante clara del porque de la sobrepresión.

Hay distintos procedimientos para evitar que las acciones producidas por un golpe de ariete dañen la instalación:

La solución más elemental es calcular cuidadosamente la sobrepresión y equipar una tubería suficientemente resistente. Si la sobrepresión es importante, este método conduce a una solución extraordinariamente cara. De todas formas, en cualquier caso, la tubería deberá resistir la sobrepresión y la depresión que se produzcan.

Si se aumenta el diámetro de la conducción, se reduce el valor de la velocidad y proporcionalmente los valores de sobrepresión y depresión. También es un método muy caro, pero en algunas conducciones de poca importancia se emplea con frecuencia. Es recomendable para la instalación de bombes con energía solar para evitar daños a las válvulas de la bomba. Usando velocidades de 0.3 m/s no hay el menor riesgo para ellas.

La colocación de una o varias válvulas evacuadoras de presión puede reducir sustancialmente las sobrepresiones. Este método es especialmente recomendable para conducciones muy largas.

INTRODUCCION

En este trabajo se define algunos conceptos que posteriormente serán utilizados para el análisis del golpe de ariete en conducto por gravedad y plantas de bombeo tales como: clasificación de flujo y resonancia; también se hace una descripción de la cinética de una línea de corriente, y se establecen las ecuaciones de continuidad y dinámica para un conducto.

Es frecuente que por línea de conducción por gravedad para el abastecimiento de agua a poblaciones, en las obras de tomas de algunas presas y en los conductos de alimentación y desfogue en plantas hidroeléctrica ocurran perturbaciones en el flujo permanente inicial debido a los procesos de regulación del gasto, mediante maniobras de cierre o apertura de órgano de control como válvulas. A estas perturbaciones que dan origen a un flujo transitorio en los conductos se denominan comúnmente como el fenómeno golpe de ariete, y el conocimiento de sus efectos es de gran importancia en el diseño de las obras hidráulicas antes mencionadas.

Aquí se hace la descripción de este fenómeno en un conducto por gravedad y se lleva a cabo el análisis, una breve descripción de las teorías de la columna rígida y columna elástica; con base en esta última se establecen las ecuaciones de Allievi y la de Micheaud para la cuantificación de los efectos en el fenómeno en estudio.

Por otra parte, es necesario señalar que se utiliza el concepto carga piezométrica, a la que se ha definido como la suma de carga de la carga de presión y la carga de posición en el eje del conducto.

El golpe de ariete en plantas de bombeos puede presentarse como resultado de diversas condiciones de operación que modifican el régimen de flujo permanente a través de los equipos y las tuberías de succión y descarga, dando lugar a oscilaciones del gasto y la carga piezométrica.

Dentro de las causas que originan la presencia del fenómeno en estudio pueden citarse el cierre o apertura de válvulas de seccionamiento en la tubería de descarga que se efectúan ante el paro o después del arranque de una bomba respectivamente, el arranque o paro de una bomba sin válvula en la tubería de descarga, las fallas mecánicas en la bomba, y el paro ocasionado por una interrupción brusca de energía eléctrica al motor.

En nuestro medio, la condición que se presenta con más frecuencia es aquella en la que se instala una válvula de no retorno en la tubería de descarga para impedir la inversión del flujo en la bomba y para cuantificar los efectos del golpe de ariete en este caso, solo se requiere conocer el comportamiento de la bomba cuando el flujo conserva su dirección original.

Una de las formas de cuantificar la importancia de los problemas que se presentan en la operación de un sistema hidráulico, es pensar en los daños que en ocasiones produce el golpe de ariete cuando se presenta en un conducto por el que diariamente circula una gran cantidad de agua. Controlar los efectos asociados a este fenómeno requiere del estudio tanto de su mecanismo como de los dispositivos de alivio que deberán adoptarse para su control.

Así un sistema hidráulico puede ser diseñado con un factor de seguridad relativamente grande para poder soportar las cargas máximas y mínimas que se presentan, por ejemplo, en una planta de bombeo ante la interrupción del suministro de energía a las bombas, o en un conducto cuando se lleva a cabo una

determinada maniobra de cierre en algún órgano de control ubicado en cualquier sección del mismo.

En cuanto a los dispositivos de alivio, los de uso más común son las válvulas y, en algunos casos que así lo requieren, los tanques de oscilación y las cámaras de aire.

Aquí se hace una descripción de los dispositivos antes mencionados.

1. CONCEPTOS FUNDAMENTALES

1.1 CLASIFICACION DE FLUJOS

1.1.1. Flujo Unidimensional. Se dice que el flujo en un conducto es Unidimensional cuando sus características hidráulicas tales como la presión, la velocidad, y el gasto, varían como funciones del tiempo y una coordenada curvilínea x , que usualmente se hace coincidir con el eje del conducto.



Figura 1. Flujo de un conducto

En realidad el flujo en un conducto no es completamente unidimensional, debido al efecto de la viscosidad que da origen a un valor de la velocidad en la frontera del mismo igual a cero, y diferente de cero en otro punto; sin embargo, si se aceptan los valores medios de las características hidráulicas en una determinada sección como representativas de la misma, este se puede considerar unidimensional.

1.1.2. Flujo Permanente. El flujo permanente es aquel en el que las características hidráulicas en una determinada sección del conducto permanecen constantes para cualquier instante y no varían con el tiempo.

1.1.3. Flujo No Permanente. El flujo no permanente es aquel en el que las características hidráulicas en una determinada sección del conducto varían de un instante a otro.

1.1.4 . Flujo Uniforme Y No Uniforme. En hidráulica generalmente se acepta que el flujo en conducto es uniforme si la magnitud de la velocidad media en la dirección general del movimiento no varía de una sección a otra.

En caso contrario se dice que el flujo no es uniforme.

En hidráulica generalmente se acepta que el flujo en conducto es uniforme si la magnitud de la velocidad media en la dirección general del movimiento no varía de una sección a otra.

En caso contrario se dice que el flujo no es uniforme.

1.1.5. Flujo compresible y no compresible. Un flujo se considera incompresible, si al pasar de una sección a otra del conducto los cambios de la densidad del agua son despreciables, y en caso contrario se dice que este es compresible.

1.1.6. Flujo Transitorio. Se define como el flujo no permanente intermedio que tiene lugar entre el permanente inicial y final en un conducto. Un ejemplo particularmente importante de este tipo de flujo es el fenómeno denominado como golpe de ariete.

1.2. Resonancia. Este fenómeno se puede presentar, por ejemplo, cuando en un conducto a presión existen perturbaciones ocasionada por las vibraciones de

dispositivos que están colocados a lo largo del mismo, como las válvulas de no retrocesos y las de seccionamiento, que pueden originar incremento de presión superiores a los causados por el golpe de ariete cuando el periodo de las vibraciones se aproxima al de este ultimo fenómeno.

1.3. ECUACION DE LA CONTINUIDAD PARA UN CONDUCTO

1.3.1. Principio de conservación de la materia. Este principio establece que la totalidad de la masa que en la unidad de tiempo entra a un volumen establecido dentro del flujo, una parte queda almacenada dentro del mismo y el resto sale del volumen.

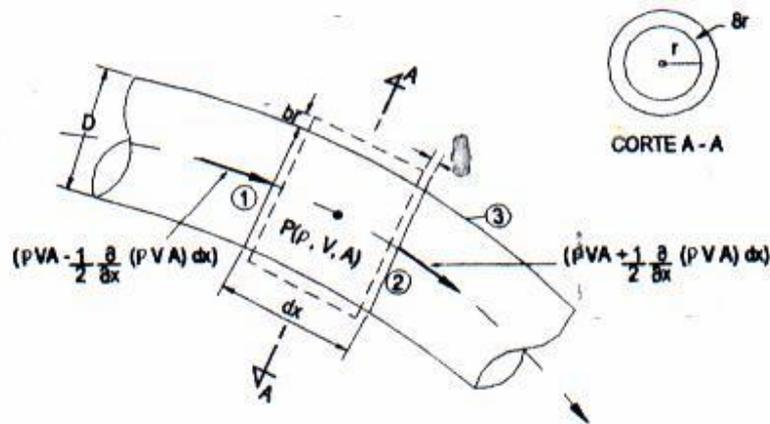


Figura 2. Volumen Elemental

1.3.2 Ecuación de la continuidad. En la figura pasada se muestra un volumen elemental limitado por una superficie interna del conducto 3, y por las secciones transversales 1 y 2 normales a las coordenada curvilínea x, que a su vez coincide con el eje del mismo.

La cantidad neta de masa que atraviesa la superficie de frontera del volumen en estudio es:

$$\left[rVA + \frac{\partial}{2\partial x}(rVA)dx \right] - \left[rVA - \frac{\partial}{2\partial x}(rVA)dx \right] = \frac{\partial}{\partial x}(rVA)dx$$

y la rapidez de variación de la masa dentro del mismo:

$$\frac{\partial}{\partial t}(rAdx)$$

En consecuencia, de acuerdo con el principio de conservación de la materia, se puede escribir:

$$\frac{\partial}{\partial x}(rVA)dx + \frac{\partial}{\partial t}(rAdx) = 0$$

Sin embargo, si se acepta que la variación longitudinal del volumen elemental es despreciable, la ecuación se reduce a:

$$\frac{\partial}{\partial x}(rVA) + \frac{\partial}{\partial t}(rA) = 0$$

Al desarrollar las derivadas parciales de la ecuación anterior y ordenar términos, se obtiene:

$$rA \frac{\partial V}{\partial x} + r \left(V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} \right) + A \left(V \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial t} \right) = 0$$

Así, también las derivadas totales de A y r se pueden escribir como:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{\partial A}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial A}{\partial t} = V \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t}$$

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\partial r}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial r}{\partial t} = V \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial r}{\partial t}$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en nuestra ecuación y dividiendo entre rA resulta:

$$\frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{r} \frac{dr}{dt} = 0$$

Que es la ecuación de continuidad para un conducto con flujo no uniforme, no permanente y compresible.

1.4 ECUACIÓN DINÁMICA PARA UN CONDUCTO

Para obtener la ecuación dinámica de un conducto sólo es necesario establecer el equilibrio de las fuerzas que actúan en la dirección tangencial a la coordenada curvilínea x , sobre la superficie de frontera que limita el volumen elemental que se muestra en la figura. Estas fuerzas aplicadas en la dirección $+x$, son las siguientes:

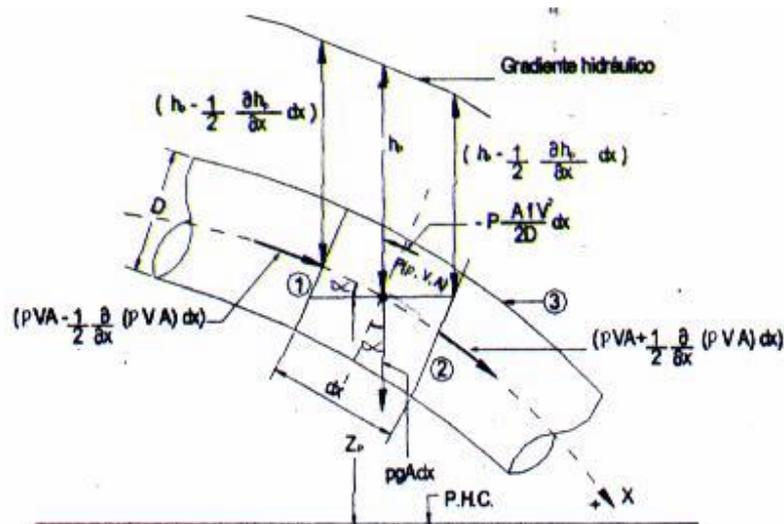


Figura 3. Equilibrio Dinámico

1. La fuerza de superficie resultante de las que actúan en las secciones 1 y 2 debida a un gradiente de presión:

$$\left[pA - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (pA) dx \right] - \left[pA + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} (pA) dx \right] = - \frac{\partial}{\partial x} (pA) dx \approx -A \frac{\partial p}{\partial x} dx .$$

2. La fuerza de superficie resultante debida a la resistencia al movimiento aplicada al volumen elemental y calculada a partir de la fórmula de Darcy-Weisbach:

$$- rA \frac{fV^2}{2D} dx$$

3. La componente tangencial del peso propio del volumen, aplicada en el centro de gravedad del mismo:

$$rgA dx \text{ sen } \alpha = -rgA \frac{\partial Z_p}{\partial x} dx$$

Donde $\text{sen } \alpha = - \frac{\partial Z_p}{\partial x}$

De acuerdo con la segunda ley de Newton, la suma de estas fuerzas debe ser igual a la masa del elemento $rA dx$ multiplicada por la componente tangencial de la aceleración, lo cual permite escribir:

$$A \frac{\partial p}{\partial x} dx + rA \frac{fV^2}{2D} dx + rgA \frac{\partial Z_p}{\partial x} dx = -rA \left[\frac{\partial V^2}{\partial x} \frac{1}{2} + \frac{\partial V}{\partial t} \right] dx$$

Si se recuerda que $p = rgh_p$ y se divide la ecuación anterior entre $rgA dx$, después de ordenar términos resulta:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(h_p + \frac{V^2}{2g} + Z_p \right) + \frac{h_p}{r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV^2}{2gD} = 0$$

Para una determinada sección del conducto el valor $H_r = h_p + \frac{V^2}{2g} + Z_p$ representa la energía total por unidad de peso o carga total que tiene el líquido, medida con relación a un plano horizontal de referencia, y el término V^2 puede ser definido como $V|V|$ para tomar en cuenta la inversión en la dirección del flujo cuando este es transitorio. De acuerdo con esto, la ecuación adquiere la forma:

$$\frac{\partial H_r}{\partial x} + \frac{h_p}{r} \frac{\partial r}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{fV|V|}{2gD} = 0$$

Que es la ecuación dinámica para un conducto con flujo no uniforme, no permanente y compresible.

2. CONCEPTO DEL GOLPE DE ARIETE

Una columna de líquido en movimiento tiene determinada cantidad de inercia, que es proporcional a su masa y la velocidad con que se desplaza. Ante la modificación súbita de la velocidad de desplazamiento del fluido, la inercia que éste posee se convierte en presión, es decir que la energía cinética del fluido se transforma en energía potencial, tan súbitamente como repentina sea dicha modificación.

El fenómeno mediante el cual se producen tales modificaciones de presión se conoce con el nombre de Golpe de Ariete.

Naturalmente, cuanto mayor sea la longitud de la tubería que experimenta el fenómeno (mayor masa líquida) y cuanto mayor sea la velocidad del líquido que se desplaza por ella, tanto mayor será la variación de la presión.

Si la velocidad aumenta, como puede darse el caso, a consecuencia de la apertura repentina de una válvula terminal, se produce una disminución de la presión interior (descompresión) que, dependiendo de su magnitud, puede ocasionar el aplastamiento de la tubería por fuerzas externas o por generación de vacío.

Si la velocidad disminuye, como por efecto del cierre repentino de una válvula, se produce un incremento de presión interior (sobrepresión) que pueden ocasionar la falla por rotura de la tubería.

El efecto del Golpe de Ariete se propaga a lo largo de la tubería en forma de ondas de presión que viajan a gran velocidad, causando una serie de choques violentos contra las paredes del tubo. La velocidad de propagación de tales ondas, denominada celeridad, y la resistencia de los conductos a las variaciones de presión que aquellas generan, son función del módulo de compresibilidad del fluido en movimiento y del módulo de elasticidad del material del cual están hechas las tuberías.

Cuanto más elástica sea una tubería, mayor será la disipación de la energía debida a su flexibilidad y más lento será el efecto de propagación de las ondas de presión.

Adicionalmente, aparte de la compresibilidad del fluido y de la elasticidad de la tubería, tienen influencia en la intensidad del Golpe de Ariete el diámetro, espesor y longitud del tramo, la velocidad del flujo, la rapidez con que varía la velocidad del flujo y la densidad del fluido.

2.1. Principales causas del Golpe de Ariete

- Acumulación y movimiento de burbujas de aire atrapado en la línea.
- Expulsión repentina de aire de una tubería.
- Separación y reencuentro de columnas de líquido.
- Apertura o cierres bruscos, totales o parciales, de válvulas.
- Operación rítmica de válvulas de control o regulación automáticas.
- Arranque o parada de bombas.
- Paradas de emergencia, interrupción súbita en el sistema de propulsión. Ejemplo, falla en el suministro de energía eléctrica.
- Cambios de velocidad en los equipos de propulsión. Ejemplo, bombas de velocidad variable.
- Pulsaciones durante la operación de bombas reciprocantes.

- Cambios de elevación de una cisterna de almacenamiento.
- Acción de ondas en tanques elevados.

2.2. Medidas Preventivas para Evitar El Golpe De Ariete

✓ Limitar la velocidad de diseño

- La velocidad de diseño del fluido para el sistema a plena operación, no debe superar: los 1.5 m/s para sistemas de riego y de distribución de agua potable, 0.6 m/s para líneas de aducción, y de 1.2 a 1.8 m/s para bombeo de aguas negras.

Durante el Llenado de la tubería, la velocidad no debe ser mayor de 0.3 m/s hasta que todo el aire salga y la presión Llegue a su valor nominal.

✓ Instalar válvulas de alivio de presión

✓ Instalar válvulas de cierre lento

✓ Usar bombas de bajo momento de inercia.

✓ Usar sistemas con juntas elásticas.

✓ Instalar ventosas de doble efecto, en los puntos altos, bajos y a lo largo de tramos rectos muy largos, para purgar el aire, y permitir su entrada cuando se interrumpe el servicio.

DIAMETRO DE LA VENTOSA EN LA FUNCION DEL DIAMETRO DE LA TUBERIA		
DIAMETRO .EXT. mm	DIAMETRO ventosa manual	DIAMETRO ventosa automática
110 a 250	1" a 3"	1/2"
315	4"	3/4"
400	6"	1

Tabla 1. Diámetro de la ventosa en función del diámetro de la tubería

Adicionalmente a las medidas preventivas para limitar el golpe de ariete, en las aducciones se deben tomar las siguientes previsiones.

Dotar al sistema con tuberías de limpieza. Estas deben ser ubicadas en los puntos bajos de la aduccion, para permitir la eliminación periódica de los sedimentos allí acumulados. Deben estar dotadas de llaves de paso y sus dimensiones, en función del diámetro de la línea, deben ser:

Diámetro tubería (mm)	DT	50 a 110	160	200	250
Diámetro limpieza (mm)	DL	50	110	100 a 160	160

Tabla 2. Diámetro de la tubería Vs. Diámetro de limpieza

Para tramos largos horizontales, es conveniente crear pendientes artificiales que favorezcan la acumulación de aire en puntos que faciliten la expulsión. Para tal efecto, es recomendable alternar una pendiente ascendente mínima de 3/1000 con una descendente mínima de 6/1000.

2.2.1. Tiempo Crítico de Cierre Para Válvulas. Durante el cierre de una válvula, se genera una onda de choque que se desplaza aguas arriba, desde la válvula hasta

la fuente de presión (o toma), donde rebotara la onda hasta chocar nuevamente contra la válvula en cierre. El tiempo que tarda la onda de presión en realizar este recorrido se define como “*tiempo critico*” (T_c).

Si el tiempo de cierre de la válvula es inferior o igual al tiempo critico ($t \leq T_c$) la sobrepresion generada por la onda de choque será máxima e igual a la de cierre instantáneo determinada por la ecuación ya definida. Si el tiempo de cierre de la válvula es superior al tiempo critico ($t \geq T_c$), las ondas regresaran como ondas de baja presión y tenderán a disminuir el aumento de presión en la relación: Tiempo critico / tiempo cerrado.

2.2.2 . Tiempo critico = T_c

$$T_c = 2L / a$$

L = Longitud de línea (m)

$T_c = t_{\text{ida}} + t_{\text{retorno}}$ (s)

a= celeridad de la onda de presión (m/s)

Mediante el uso del ábaco de allievi, es posible estimar el aumento de presión que se origina cuando el tiempo de cierre es superior al tiempo critico ($t \geq T_c$). Entrando en la grafica, con la constante de la tubería (K) y la relación de tiempo $N = t/T_c$, determinamos el aumento de presión P. De igual forma, si fijamos previamente el aumento de presión permisible por golpe de ariete P, podremos determinar el tiempo mínimo de cierre $t = N.T_c$.

2.2.3. Constante k de la tubería

$$k = a \cdot V_0 / 20 \cdot g \cdot P_0$$

Donde:

V_o = velocidad del fluido bajo operación normal del sistema (m/s)

P_o = presión dinámica del sistema, bajo operaron normal (Kg./cm²).

g = aceleración de gravedad = 9.81 m/s².

MATERIAL	K
Acero	0.5
Hierro dulce	0.5
Fundición de hierro	1
Hormigón armado	5
Fibrocemento	4
Polietileno o PVC	33.3

Tabla 3. Valores usuales del coeficiente K para algunos materiales

2.2.4. Relación de tiempo = n

$$N = t/T_c = a \cdot t / 2L$$

t = tempo de Cierre (s)

T_c = tiempo critico de cierre (s)

2.2.5. Aumento de presión = ΔP

$$\Delta P = P_o (I - 1)$$

Se debe tener presente que la tubería estará expuesta en cualquier sitio a la presión de operación del sistema (estática o dinámica) mas el exceso de presión provocado por el golpe de ariete = $P_o + \Delta P$

Como criterio para el diseño de sistemas de tuberías, el aumento de presión por el golpe de ariete debe limitarse entre 20 a 25 % de la presión de servicio de la

tubería. De esta manera, la presión estática o presión de operación del sistema debe corresponder a un 80 a 75 % de la presión de servicio. Es decir, para una tubería clase AB de PS = 10 Kg. /cm², es recomendable limitar los efectos por posibles golpe de ariete entre 2 a 2.15 Kg. /m² y así operar el sistema con una presión estática entre 7.5 y 8 Kg. /m².

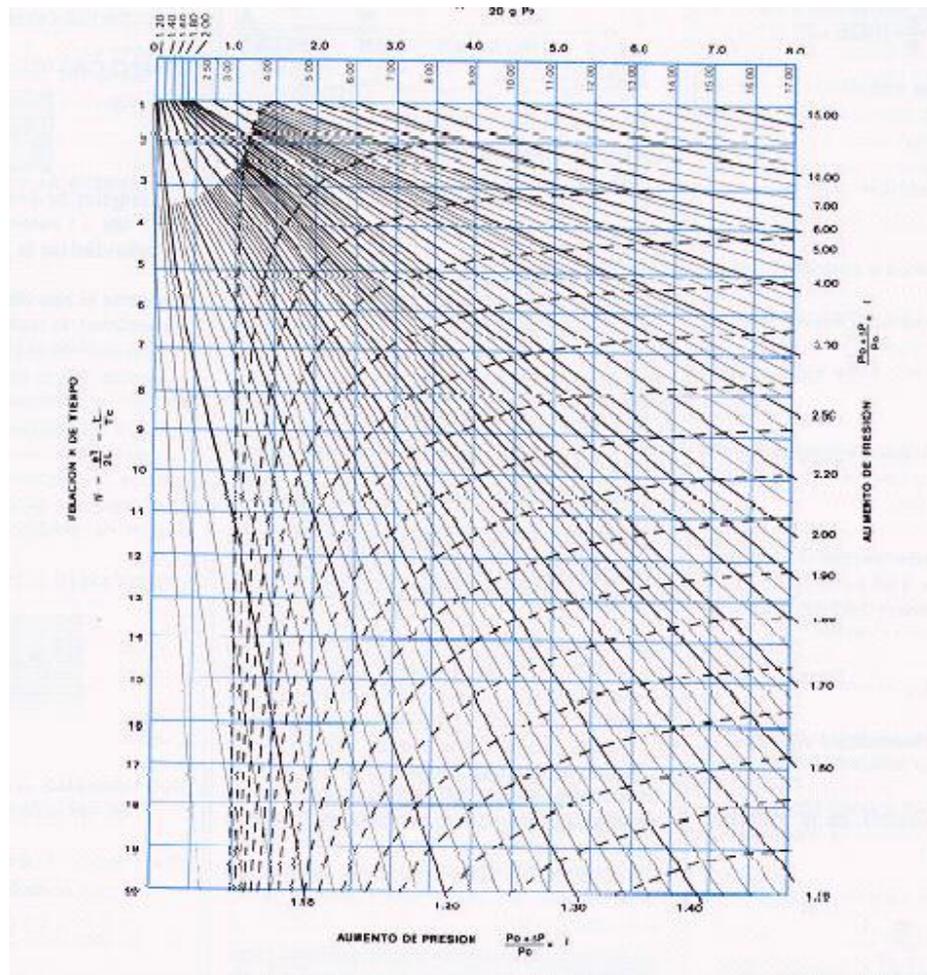


Figura 4. Monograma para el calculo de K

2.2.6. Formula de Micheaud. Si el tiempo que dura la maniobra de parada del flujo en la tubería es apreciable y lo llamamos T, la sobrepresión que se produce

en un punto distante L. del depósito, cuando la velocidad del agua en el momento inicial es V, se puede calcular con la siguiente formula debida al autor citado:

$$\Delta H = \frac{2 * L * V}{g * T}$$

Esta formula puede aplicarse siempre que el valor de L sea inferior a una longitud determinada. En tal caso, la elevación se conoce como “corta”

El valor critico de la longitud que separa las elevaciones “cortas” de las “largas” es el que viene dado por la igualdad siguiente:

$$L_c = \frac{T * a}{2}$$

De manera que este concepto de longitud corta o larga no es una cantidad fija, puesto que esta influido por el tiempo de duración de las maniobras.

Si la tubería es larga, el valor de la sobrepresion en todos los puntos que disten del depósito más de la longitud crítica dada por la formula anterior, se deduce al eliminar el tiempo T y queda:

$$\Delta H_2 = \frac{V * a}{g}$$

Como veremos este valor coincide con el valor de la siguiente formula.

2.2.7 Formula de Allievi. Ya hemos visto que para calcular aplicando la formula de Micheaud, hay que determinar el tiempo de la maniobra. En maniobras voluntarias de un equipo de bombeo, se puede determinar “a priori”, la duración de la maniobra. Por ejemplo, se puede establecer la secuencia de operaciones a realizar para poner la bomba en marcha: conexión de motor con válvula de salida en posición cerrada. Apertura de esta válvula a razón de ¼ de vuelta cada 2

segundos en la primera vuelta y de $\frac{1}{4}$ de vuelta cada segundo en el resto del recorrido.

En el desenganche, se puede operar a la inversa: cierre de $\frac{1}{4}$ de vuelta cada segundo, menos en la ultima vuelta, que se cerrara $\frac{1}{4}$ de vuelta de cada dos segundos. Corte de corriente. Si se actúa de esta forma, puede tomarse como tiempo T, el de 8 segundo porque con las válvulas corrientes de compuertas, y con otros modelos de válvulas incluidas las de mariposa o de bola, esta comprobado que se modifica mas de 80% del caudal de paso en el primer cuarto de su recorrido si es apertura, o en el ultimo cuarto si es cierre. En la figura. Se presenta un diagrama de caudales de paso para válvula corriente con un volante de 4 vueltas.

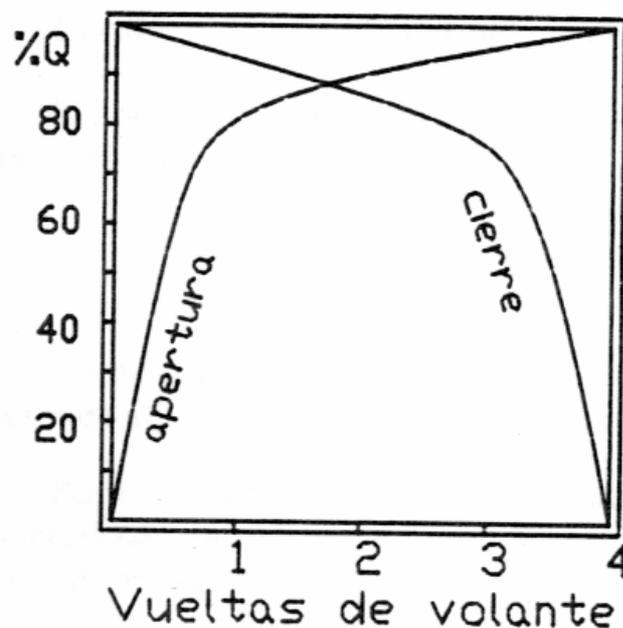


Figura 5. Curvas de gasto de una válvula

Actuando de esta forma, el golpe de ariete es muy reducido y no suele ofrecer riesgos para la instalación.

Pero en un bombeo se puede producir bruscas interrupciones de la marcha del motor y entonces el tiempo T resulta de muy difícil determinación. Si el motor es diesel y, aun mas, si es un diesel lento, la parada no es brusca por que las piezas del motor tiene gran inercia y el aire que se encuentra en los cilindros para ser comprimido actúa de colchón y la maquina cesa en su movimiento en algunos segundos, los suficientes como para que el golpe de ariete sea pequeño o inapreciable.

Pero si el motor es eléctrico, un corte de corriente no previsto, provoca una interrupción casi instantánea del flujo en el sentido "positivo". El tiempo T podría ser prácticamente nulo y no es posible aplicar la formula de Micheaud.

Allievi elaboro una completa teoría sobre el movimiento no permanente en tubería, basándose precisamente en la compresibilidad del agua y en la elasticidad de las tuberías, aunque supuso que el rozamiento del agua en las tuberías, era despreciable. Allievi tradujo esta teoría en la elaboración de unos gráficos que facilitan el cálculo mediante una red de rectas transversales.

Para el uso de parada instantánea indica que la sobrepresion (mca) que se produce si no hay rotura de la columna líquida, no es superior a:

$$\Delta H = \frac{V * a}{g}$$

La aplicación de esta formula proporciona unos resultados que sobredimensionan la seguridad de la tubería y esto desencadena unos gastos muy elevados.

Hemos hecho la comparación de la sobre presión que se obtiene en el calculo de un determinado ejemplo resuelto con la aplicación de la formula de allievi y con los ábacos de Parmakian.

2.3. ANALISIS DE LA COLUMNA RIGIDA EN SISTEMA DE BOMBEO.

Hay una teoría simplista, la de la columna rígida, que no se acepta en la actualidad, para el cálculo del golpe de ariete, pero da una idea bastante clara del porqué de la sobrepresión.

2.3.1 Descripción del fenómeno. Imaginemos un bombeo que impulsa agua por una tubería recta y corta, inclinada hacia arriba unos 45° y abierta en su extremo. Supongamos que repentinamente se para la bomba y que el agua de la parte superior se huela bruscamente. El trozo de agua se deslizará hacia arriba con su inercia, se detendrá y retrocederá acelerándose en la tubería, hasta chocar bruscamente con la bomba o con el obturador que hayamos colocado. No hay dificultad en calcular la inercia del trozo de agua, su energía cinética y la altura que llegará a alcanzar, y a partir de esta altura, es fácil deducir el impacto que provocará en su caída.

Pero el fenómeno no es tan simple. Se ha prescindido, absolutamente, de la elasticidad de la tubería y además se considera al agua como un fluido incompresible. Si bien lo segundo podría aceptarse en los cálculos, la elasticidad de la tubería es un fenómeno determinante de la importancia del impacto. Por otro lado, en cualquier líquido, y por supuesto en el agua, hay disueltos, aire y otros gases, y el líquido en determinadas circunstancias de presión y temperatura, pasa a estado de vapor, o gas. Además, el golpe de ariete, en un bombeo, no comienza con una sobrepresión, sino con una depresión.

Para analizar y comprender el fenómeno, puede ayudar el imaginarse que la tubería es de goma y se deforma fuertemente bajo la presión. Las tuberías de cualquier material también se deforman. Podríamos distinguir las siguientes fases de la parada brusca de una electrobomba por corte de corriente, que es cuando se produce el mayor golpe de ariete:

Se corta la corriente. La presión en el interior de la tubería en ese momento, es la Hm normal y la tubería se halla tensada por esta sollicitación y tiene un diámetro "normal" o mejor dicho, un poco mayor. El motor no aporta más energía a la bomba, ni ésta a la columna líquida que la de su inercia, pero mientras mantiene una velocidad de rotación suficiente (que es un mínimo instante), continúa elevando agua. Luego, al perder velocidad, ya no impulsa caudal alguno, pero el agua continúa fluyendo a su través, en el mismo sentido que al principio. Para entendernos, le llamaremos el sentido positivo. (A) La columna líquida avanza merced a la inercia propia hasta que se detiene. Supongamos que entra por la parte inferior de un depósito, pero significando que el efecto es muy similar haya depósito o no.

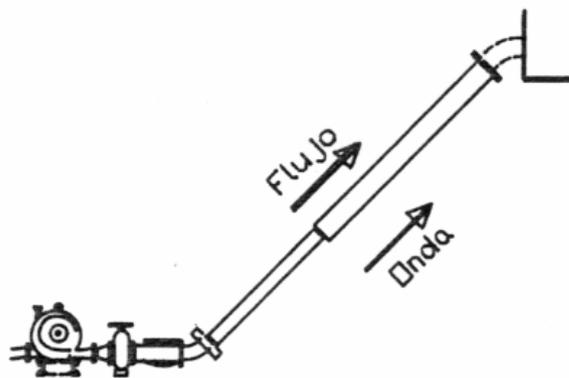


Figura 6. Interrupción de corriente de la bomba

Como el rotor de la bomba es un obstáculo al paso del agua, se produce una zona de depresión que comienza en la bomba y avanza a gran velocidad hacia el depósito (Figura 6). En esta zona, la presión interior es inferior a la atmosférica. Se produce una vaporización del agua y un desprendimiento de gases disueltos que, si llega a ser muy importante, provocará la rotura de la columna líquida apareciendo una gran burbuja gaseosa en el interior de la tubería.

La tubería que se encontraba dilatada bajo la presión del bombeo en el momento de la parada, al quedar en zona de depresión, disminuirá su diámetro. Si la presión interior cae por debajo de la presión atmosférica, el diámetro será incluso menor que el calibre de la tubería sin carga.

El conjunto, rotor de bomba + inducido de motor, giran, a menor velocidad en cada fracción de segundo y su velocidad de rotación no les permite impulsar agua.

Si el diámetro de la tubería no se hubiera alterado, el fenómeno habría terminado, porque la masa de agua estaría en situación estable al haber derramado en el depósito el sobrante.

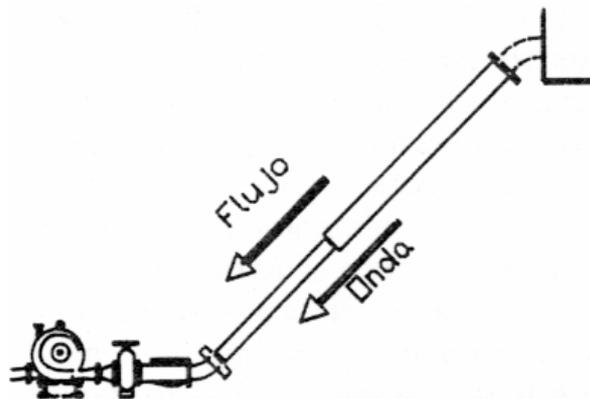


Figura 7a. Retroceso del frente de onda y del flujo.

Pero no es así. Al detenerse la columna en su ascenso, se vuelve a recuperar a partir del depósito, la presión estática en el interior de la tubería. Se reabsorben los gases desprendidos. El agua retrocede desde el depósito para ocupar los espacios y este fenómeno de dilatación de tubería- retroceso del agua avanza hacia la bomba (Figura7a); la masa choca allí con lo que halla, clapeta cerrada o bomba, y se produce una sobrepresión y un impacto en el obstáculo. Si no hay clapeta, la bomba comenzará a girar como turbina arrastrando al motor. Si se permite este giro hasta alcanzar la velocidad de embalamiento, se producirán daños en las máquinas.

Lo corriente es colocar una claveta y que ésta cierre el paso del agua protegiendo a las máquinas. La sobrepresión se traduce en una dilatación de la tubería y una superior disolución de burbujas de gas en el líquido.

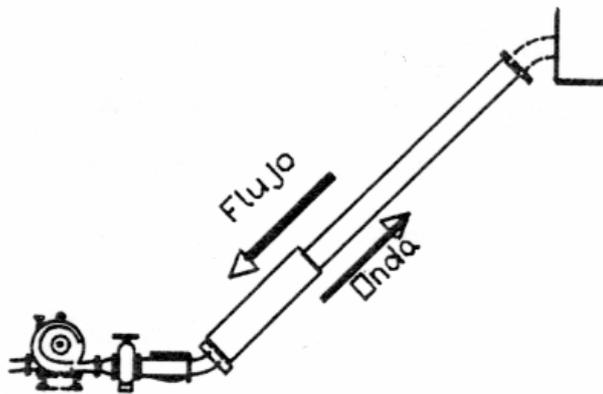


Figura 7b. Dilatación por sobrepresión de onda.

Es decir, bajo la sobrepresión, el líquido se contrae y la tubería aumenta de tamaño, por lo que hay más líquido de lo normal dentro de ella.

El agua continúa fluyendo hacia la bomba mientras que una onda de sobrepresión que dilata la tubería por encima de su diámetro "normal", avanza en sentido contrario, hacia el depósito. (Figura 7b). En esta figura, puede observarse que mientras el flujo se desplaza hacia la izquierda la onda de sobrepresión lo hace hacia la derecha dilatando la tubería desde la bomba.

Toda la Tubería se ha dilatado más allá de su diámetro "normal". En una tubería situada en pendiente como la figura, bajo una altura geométrica de presión variable, el diámetro "normal" disminuye desde la bomba hacia el depósito.

Ahora se repite el proceso. La tubería dilatada, al cesar el movimiento del agua, ve reducida la sobrepresión a que se encuentra sometida. La presión llega a ser estática. Entonces, bajo esta presión, la tubería comienza a recuperar su forma desde el obturador hacia el depósito. Los gases disueltos en el agua y sometidos a sobrepresión, se desprenden.

Sobra líquido dentro de la tubería. Esta disminución de capacidad hace avanzar una onda de agua en sentido positivo, retornando agua al depósito. (Figura 8.)

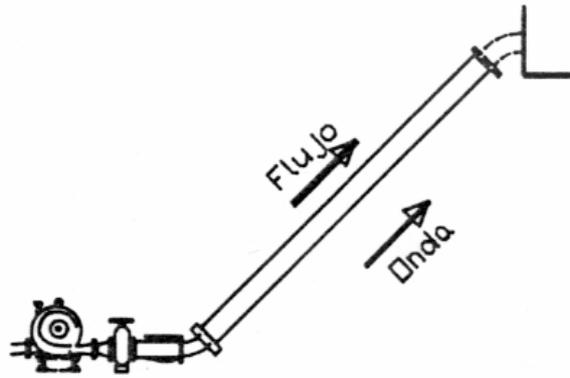


Figura 8. Retorno del fluido al deposito.

Cuando la tubería recupera su tamaño “normal”, el proceso sigue:

La inercia hace avanzar la columna, (figura 9), y estamos otra vez en el punto (A) de antes. Si no hubiese rozamiento que degradase la energía y los cuerpos fuesen perfectamente elásticos, el proceso se repetiría pendularmente de manera indefinida. Sin embargo los defectos de elasticidad y las fuerzas de rozamientos van degradando energía y las oscilaciones son siempre de menor amplitud

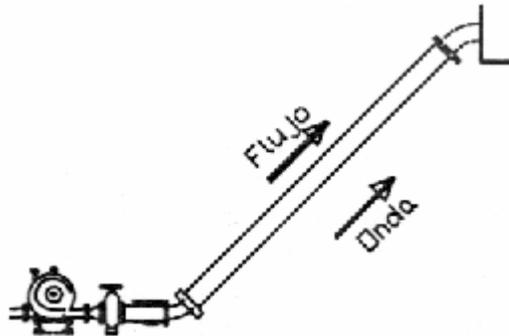


Figura 9. Recuperación del tamaño normal de la tubería

Hemos empleado con intención el concepto de tamaño “normal” de la tubería que no es el de la tubería sometida a la presión de la altura geométrica de elevación que es variable en toda su longitud. La tubería sometida a la presión Manométrica local sería ligeramente mayor si las pérdidas por rozamiento no son muy elevadas.

Un análisis similar al que precede es el que ha servido para establecer métodos de cálculo tan prestigiados como son los de Bergeron y Parmakian y se sigue asimismo, en los programas de cálculo informático para ordenador. Estos últimos

se suelen confeccionar basándose en el Método de las Características. (V. Evangelisti et al.)

2.3.2 Teoría de la columna rígida. Fue desarrollada para cuantificar la magnitud de los efectos del golpe de ariete en un túnel o en un conducto a presión con una misma sección transversal en todo su desarrollo con un depósito de nivel constante y un órgano de control, situados en los extremos aguas arriba y aguas abajo respectivamente, tal como se identifica en la Figura 10. Esta teoría esta basada en las siguientes hipótesis simplificadoras:

- El flujo en el conducto es incomprensible.
- Las paredes del conducto se consideran rígidas o indeformables.
- El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección de éste siempre es mayor que la presión de vaporización del agua.
- Las pérdidas de carga por fricción y las cargas de velocidad son despreciables en comparación con los cambios de presión en el conducto.
- Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- El nivel del depósito permanece constante mientras dura el fenómeno.
- La carga piezometrica varia linealmente con respecto a las coordenadas curvilínea x .

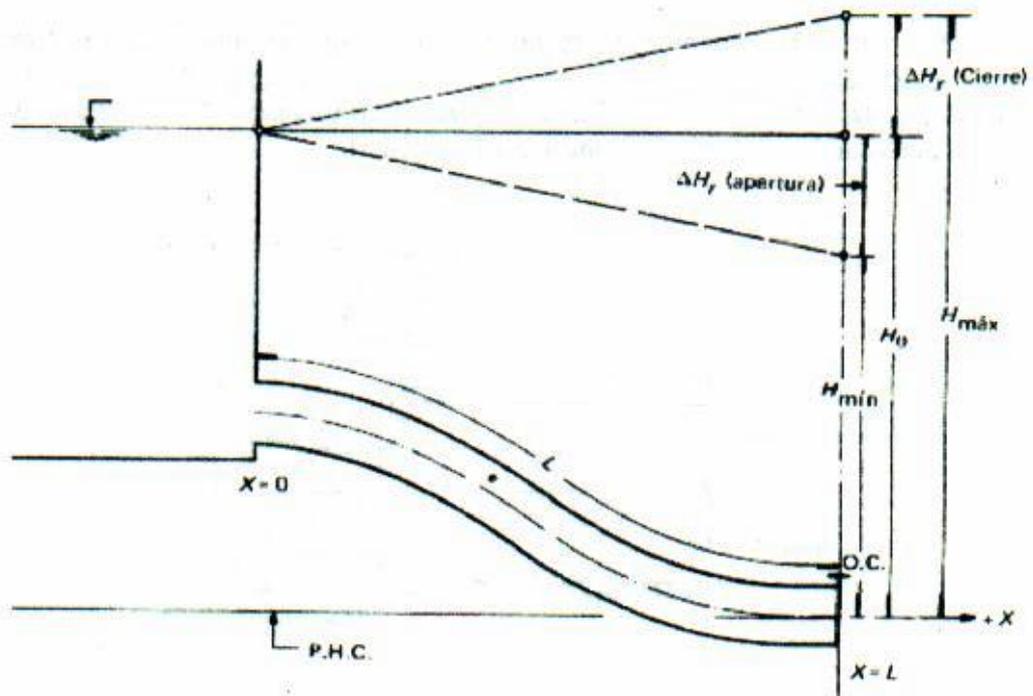


Figura 10. Teoría de la columna rígida

2.3.3 Teoría de la Columna Elástica. Esta teoría se acerca más al comportamiento real del fenómeno y ha sido comprobada en laboratorio. Las ecuaciones de la continuidad y dinámica en este caso están sujetas a las siguientes hipótesis simplificatorias:

- El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección siempre es mayor que la de vaporización del fluido.
- Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- Las formulas para el calculo de perdidas de carga cuando el flujo es permanente, también son validas cuando este es transitorio.

- La pared del conducto y el fluido se comportan de una manera elástica lineal y tiene pequeñas deformaciones.
- El incremento de la presión con respecto a la coordenada curvilínea x resulta pequeño comparado con el incremento de la misma con respecto al tiempo.
- El incremento de la carga de velocidad y la densidad del fluido resulta pequeño comparado con el de la carga piezométrica.

2.3.4 Celeridad de Onda. La celeridad de onda de presión en un conducto quedo

definida por $a = \frac{1}{\sqrt{r \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE_t} \right)}}$, en el cual puede verse que su valor depende

tanto de las propiedades elásticas del conducto y el fluido, como la geometría del primero.

Cuando el líquido fluyente es agua dulce y en la mencionada ecuación se aceptan valores prácticos de $E_v = 2.24 \cdot 10^8 \text{ Kg. / m}^2$ y $r = 101.94 \frac{\text{Kgfseg}^2}{\text{m}^4}$ se obtiene:

$$a = \frac{1.482}{\sqrt{1 + \frac{E_v * D}{E_t * e}}}$$

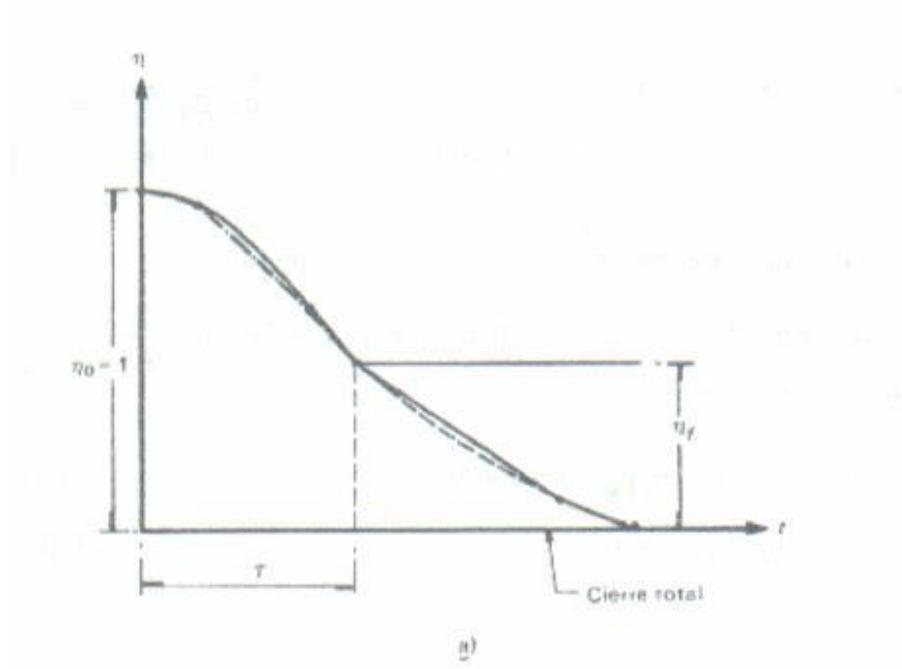


Figura 11a. Leyes para maniobras de cierre o apertura no uniforme.

MATERIAL	Et(Kg./M2)
Acero	$2,10 \times 10^{10}$
Abastesto-cemento	$2,45 \times 10^9$
P.V.C	$1,125 \times 10^8$
Fierro fundido	$9,30 \times 10^9$
Cobre	$1,30 \times 10^{10}$
Bronce	$1,05 \times 10^{10}$
Latón	$1,05 \times 10^{10}$
Zinc	$3,70 \times 10^9$
Plomo	$1,40 \times 10^9$
Estaño	$1,30 \times 10^{10}$
Aluminio	$7,20 \times 10^9$
Concreto simple	$1,25 \times 10^9$
Madera	$7,00 \times 10^8$
Hule	$3,50 \times 10^8$
Vidrio	$7,00 \times 10^9$

Tabla 4. Valores del módulo de elasticidad para algunos materiales

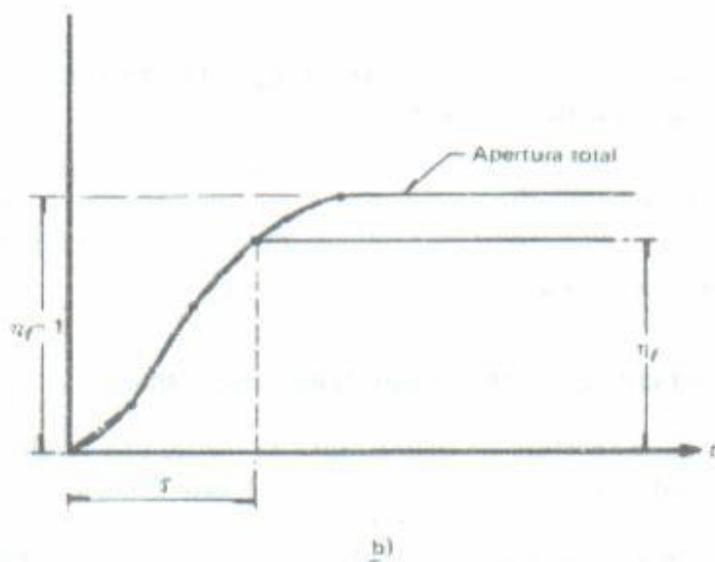


Figura 11b. Leyes para maniobras de cierre o apertura no uniforme

La ecuación anterior permite calcular la magnitud de la celeridad de la onda de presión de un conducto de pared delgada, cuyo espesor es menor o igual a la décima parte del diámetro, es decir, si $\frac{e}{D} \leq 0.10$.

Es necesario señalar que algunos autores sugieren la aplicación de la siguiente ecuación para el cálculo de la celeridad de onda:

$$a = \sqrt{\frac{E_v / r}{1 + \frac{E_v D}{E_t e} C_1}}$$

Donde C_1 es un parámetro que depende de la relación de poisson m del material con que está hecho el conducto y de sus condiciones de apoyo.

Líquido	E_v	r	Temperatura
Agua dulce	2.24×10^8	101.94	20
Agua salada	2.38×10^8	104.60	15
Petróleo	2.10×10^8	91.80	15
Gasolina	1.42×10^8	76.46	15

Tabla 5. Valores comúnmente usados del módulo de elasticidad volumétrico y de la densidad para algunos líquidos

Sin embargo, puede aceptarse un valor práctico de C igual a la unidad para la gran mayoría de los conductos.

Para algunos de los materiales más comunes en conducto de pared delgada, a partir de la última ecuación, se puede obtener la siguiente expresión:

$$a = \frac{1.482}{\sqrt{1 + K_a \frac{D}{e}}}$$

Donde $K_a = 0.0106$, 0.091 y $n = 1.993$ para conducto de acero, asbesto cemento y P. V. C. respectivamente. Obsérvese que si el valor de K_a fuese igual a cero, para un material con modulo de elasticidad infinito, el valor máximo de la celeridad sería de 1.482 m/seg., que es la velocidad con la cual se propaga el sonido en el agua a una temperatura de 20 C.

Tratándose de conductos de paredes gruesas, si se desprecia el efecto de la relación de poisson, la celeridad de onda se define como:

$$a = \sqrt{\frac{E_v / r}{1 + \frac{2E_v}{E_t} \left[\frac{(R+e)^2 + R^2}{(R+e)^2 - R^2} \right]}}$$

Donde R es el radio interior del conducto.

Para el conducto de concreto reforzado existe algunas incertidumbres debido a la heterogeneidad del material; sin embargo, para evaluar la celeridad de onda se recurre a un conducto de acero equivalente con un espesor virtual e_v dado por la siguiente formula:

$$a = \sqrt{\frac{\frac{E_v}{r}}{1 + \frac{2E_v}{E_t} \left[\frac{(R+e)^2 + R^2}{(R+e)^2 - R^2} \right]}}$$

3. GOLPE DE ARIETE EN PLANTAS DE BOMBEO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

En la sección anterior se llevo a cabo la descripción del fenómeno en estudio para el caso de un conducto con un depósito de nivel constante y un órgano de control situados en los extremos aguas arriba y aguas abajo respectivamente, lo que permitió tener un conocimiento cualitativo del mismo para este caso particular.

Sin embargo, ahora es necesario efectuar una nueva descripción para otro caso que se presenta con frecuencia en la práctica y que consiste en la interrupción instantánea del suministro de potencia en una planta de bombeo tal como la mostrada en la Fig. 12. Donde puede verse una bomba que opera en condiciones normales antes de la interrupción y un depósito de nivel constante situados en los extremos aguas arriba y aguas debajo de una tubería de descarga desprovista de válvulas respectivamente.

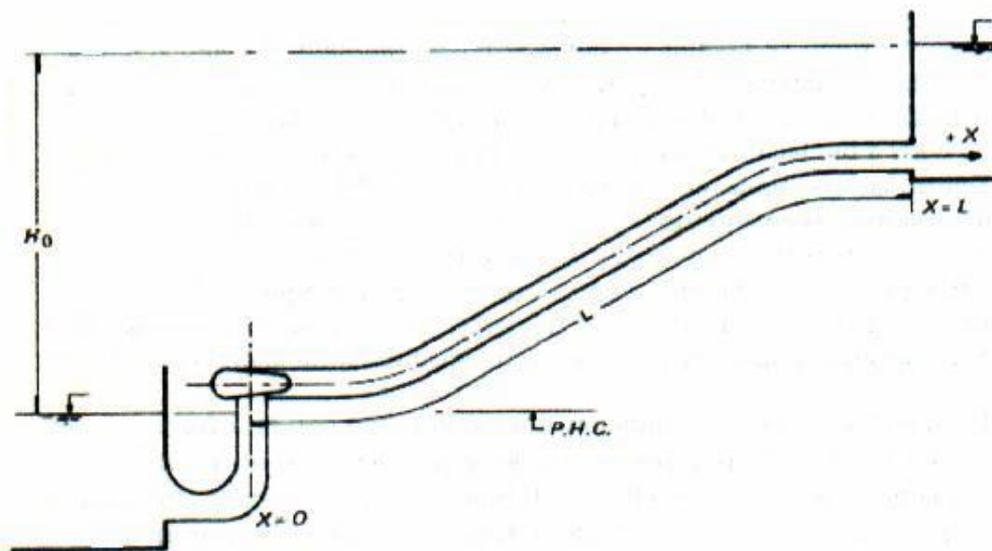


Figura 12. Descripción del fenómeno de planta de bombeo

En el instante en que se presenta la interrupción citada en el párrafo anterior, se indica la denominada Zona de operación de bomba (figura 13) donde la única energía que permite seguir girando a los elementos rotatorios del conjunto bomba-motor es la cinética de estos últimos, pero debido a que esta es muy pequeña comparada con las requeridas para las condiciones normales de operación, la velocidad angular de tales elementos disminuye rápidamente; tan pronto como esto acontece, la carga piezométrica y el gasto suministrado por la bomba también decrecen y se generan ondas de presión que partiendo de esta viajan por la tubería hasta llegar al depósito donde se reflejan.

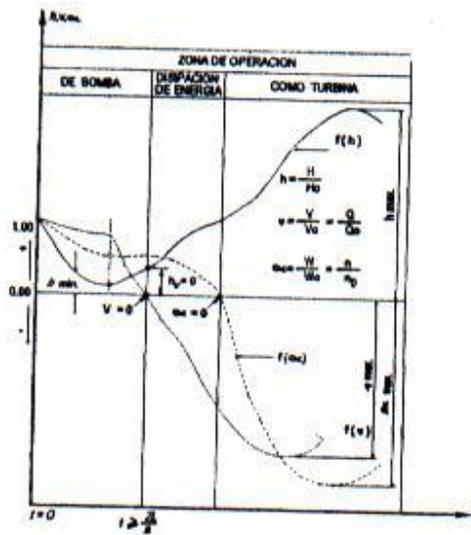


Figura 13. Zona de operación de una bomba

Mientras tanto, la disminución de la velocidad angular sigue progresando rápidamente hasta un límite en que la bomba no puede seguir alimentando a la tubería de descarga, y como no existe una válvula que le impida el flujo a través de la carcasa de la bomba invierte su dirección, aunque los elementos rotatorios todavía giren en el sentido original, iniciándose con esto la llamada zona de disipación de la energía.

A partir del instante anterior la velocidad angular disminuye aun más rápidamente hasta llegar a un valor igual a cero, terminando con esto la zona de disipación e iniciándose la operación de la bomba como turbina denominada como zona de operación de turbina, y a medida que la velocidad de rotación inversa de los elementos de la bomba se aproxima a su valor máximo, el flujo invertido que circula a través de ella se reduce rápidamente.

En consecuencia, puede verse que existen tres zonas de funcionamiento de la bomba perfectamente bien definida que son: las de operación de bomba, disipación de energía, y operación de turbina. La primera se caracteriza por un

decremento tanto en la carga piezometrica, que alcanza su valor mínimo en esta zona, como en el gasto bombeado que se reduce hasta cero; la segunda y tercera, por el incremento tanto en el flujo invertido como en la carga que llegan hasta su valor máximo en la ultima zona.

Ahora bien, si en la tubería de descarga existe una válvula de no retroceso que cierra cuando se invierte el flujo en la bomba (figura 14) esta solo trabajara en la primera zona y, en el instante de cierre, tendrá origen la oscilación asociada a la carga máxima que se presentara en la bomba T seg. Después, y si en lugar de esta válvula hay una de seccionamiento en la que se inicia una maniobra automática de cierre en el instante correspondiente a la interrupción de energía, dependiendo de la ley con la que se lleve a cabo dicha maniobra, serán las zonas en las que opere la bomba y la magnitud en las oscilaciones de carga y gasto.

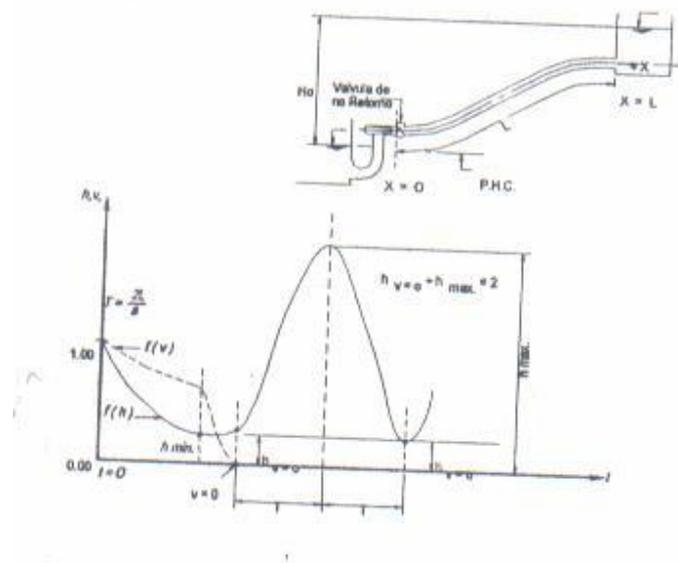


Figura14. Variación de la altura y la velocidad en la bomba cuando existe una válvula de no retorno en la tubería de descarga

Por otra parte, para la condición de paro normal de una bomba el efecto del golpe de ariete puede atenuarse si se instala una válvula de seccionamiento en la tubería de descarga que se cierre lentamente antes de la interrupción de energía.

3.2. GOLPE DE ARIETE DURANTE EL ARRANQUE DE UNA BOMBA

Los efectos del golpe de ariete debido al arranque normal de una bomba centrífuga generalmente son despreciables. Sin embargo, con objetos de reducir tales efectos, generalmente se instala una válvula de seccionamiento en la tubería de descarga inmediatamente aguas debajo de los equipos que permanece cerrada durante el proceso de arranque y aceleración de los mismos hasta llegar a la velocidad normal de operación.

Posteriormente, se abre la válvula lentamente hasta llegar a la condición de flujo permanente, lo cual se logra en un grado de apertura menor del 10% del total debido a que las pérdidas de carga después de este se reducen considerablemente.

3.3. GOLPE DE ARIETE EN LA TUBERIA DE SUCCIÓN

En las secciones anteriores se ha concentrado la atención del golpe de ariete exclusivamente en la bomba y la tubería de descarga. No obstante cualquier cambio de la magnitud del gasto en esta última se presenta también en la de succión y como consecuencia el golpe de ariete. Sin embargo, si se toma en cuenta que su longitud es generalmente pequeña, los efectos que produce el fenómeno resultan despreciables y es poco frecuente que ocurra una falla por esta causa.

4. DISPOSITIVOS DE ALIVIOS

Una de las formas de cuantificar la importancia de los problemas que se presentan en la operación de un sistema hidráulico, es pensar en los daños que en ocasiones produce el golpe de ariete cuando se presentan en un conducto por el cual diariamente circula una gran cantidad de agua. Controlar los efectos que asociados a este fenómeno requiere del estudio tanto de su mecanismo como de los dispositivos de alivio que deberán adoptarse para su control.

4.1. DESCRIPCION DE VALVULAS

4.1.1. Válvulas de retorno. Estas válvulas sirven para impedir la inversión del flujo en un conducto. En general, una válvula de este tipo deberá instalarse siempre en la tubería de descarga de una bomba para evitar el flujo en dirección opuesta a la original a los impulsores de esta, también se instalan en el extremo agua abajo del conducto que une a un tanque unidireccional con la tubería de descarga de una planta de bombeo.

Es muy importante destacar que esta válvula normalmente cierran de forma instantánea cuando se presenta la inversión del flujo y, en algunos casos, su diseño permite que su cierre sea lento y se lleve a un poco antes de la inversión, con objeto de disminuir la magnitud de la sobre presión asociada a un cierre instantáneo.

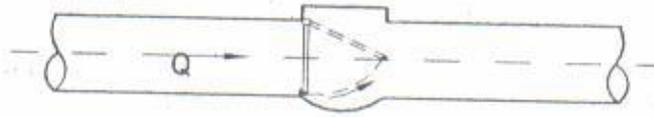


Figura 15. Válvula de no retorno

4.1.2. Válvula de seguridad

Sirve para disminuir el incremento de presión asociado al golpe de ariete.

Cuando se alcanza una presión P_2 en el conducto de tal manera que la fuerza generada supera a la resistencia del resorte, la válvula abre totalmente en forma instantánea y permite la salida de un determinado volumen de agua hasta que la presión disminuye y adquiere un valor igual a P_1 , cerrando totalmente y también de forma instantánea. Estas válvulas operan totalmente abierta o totalmente cerradas.

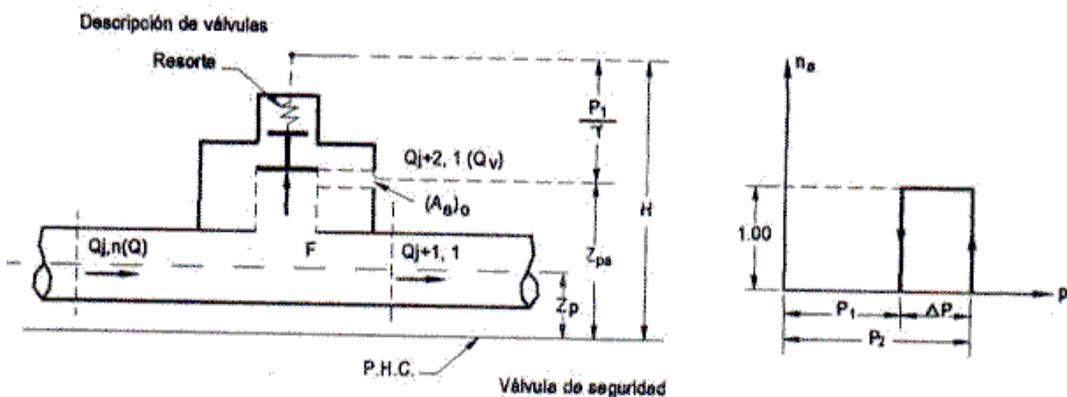


Figura 16. Válvula de seguridad

4.1.3. Válvulas aliviadoras de presión o supresoras de oscilaciones. En condiciones normales de operación la válvula permanece con un grado de apertura previamente calibrado, mientras que la constituida por un mecanismo de resorte, se encuentra cerrada; así la carga de presión que existe en el conducto es la misma a la que se encuentran sujetadas tanto la cámara como el mecanismo de válvula principal, prevaleciendo un equilibrio de fuerza que permite a esta última permanecer también cerrada.

Al producirse un aumento de la presión en el conducto que sobrepasa la prefijada para mantener cerrada la válvula, es decir, cuando $P > P_1$, se genera una fuerza F_2 y esta última se abre parcialmente y permite tanto el flujo a través de ella hacia la descarga como una reducción de la presión en la cámara, y la generación de una F_1 en el mecanismo de la válvula principal que da lugar a que esta inicie su apertura, la cual aumenta gradualmente conforme el valor de la presión en el conducto se aproxima a un valor igual a P_2 , instante en que se presenta apertura total y el valor del gasto máximo a través de dicha válvula.

Posteriormente, como consecuencia del volumen descargado por la válvula principal la presión en el conducto disminuye, y cuando tiene un valor igual a P_1 la válvula cierra y se establece un nuevo equilibrio de fuerzas en el mecanismo de la válvula principal que da lugar al cierre de ésta.

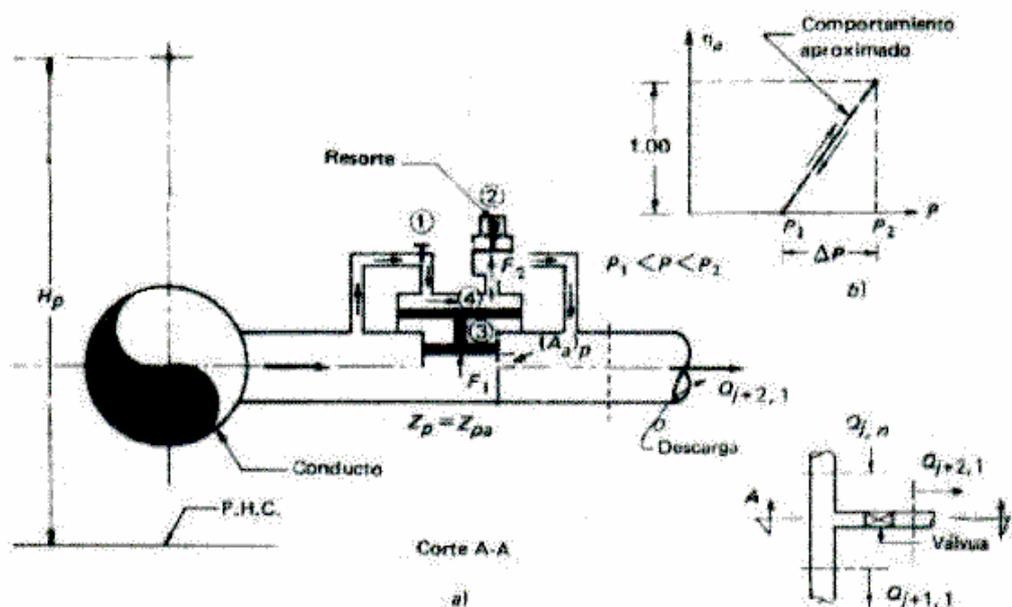


Figura 17. Válvula aliviadora de presión o supresora de oscilación

4.1.4. Válvula reguladora de presión

Estas válvulas tienen un funcionamiento semejante al de las vistas en la sección anterior, solo que tanto la apertura como el cierre de las mismas se llevan a cabo mediante la acción de un servomotor, y se caracterizan por que el tiempo de apertura es relativamente pequeño comparado con el cierre (figura 18a), lo cual ocasiona incrementos de presión despreciables en el sistema por causa de esta ultima maniobra.

En la figura 18b se puede apreciar el efecto de una válvula de este tipo ubicada inmediatamente aguas arriba del órgano de control situado en el extremo de un conducto por gravedad, transformando una maniobra de cierre total del primero en otra de cierre parcial, atenuando con esto el incremento de presión a lo largo del conducto.

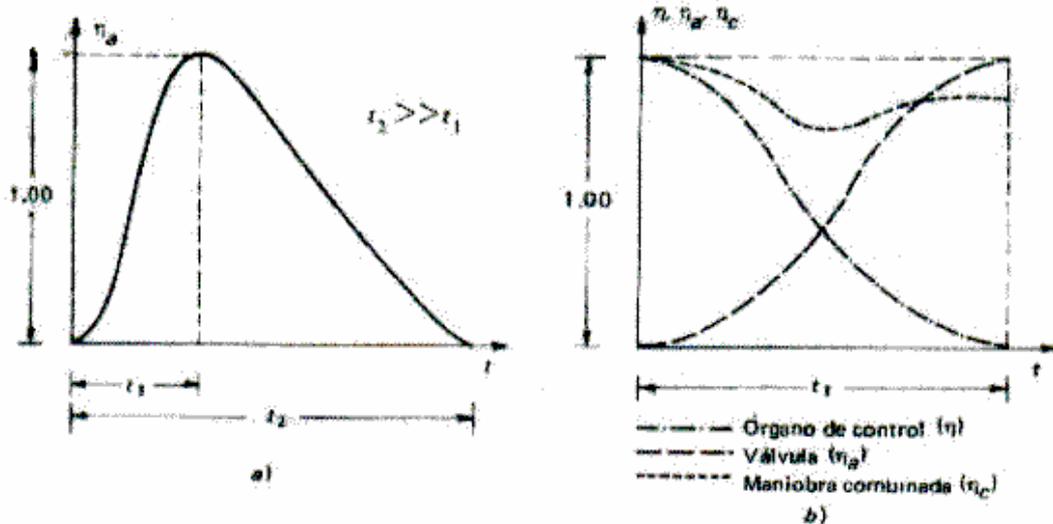


Figura 18. Operación de una válvula reguladora de presión

4.1.5. Válvula de admisión de aire. Son como se muestran esquemáticamente en la figura 19 y su funcionamiento es el siguiente:

El orificio de admisión de aire, que en condiciones de flujo permanente se encuentra cerrado, se abre cuando por efecto del golpe de ariete la presión de sección donde se encuentra ubicada la válvula desciende por debajo de un límite prescrito y permite la entrada de una determinada cantidad de aire que evita la formación de un vacío para prevenir el colapso del conducto, cerrándose nuevamente cuando la presión aumenta.

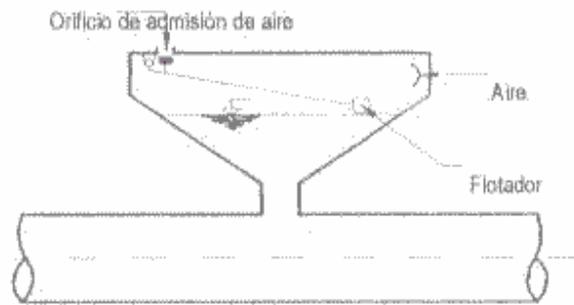


Figura 19. Válvula de admisión de aire

4.1.6. Instalación adecuada de una válvula. Una instalación adecuada de válvulas en un conducto por gravedad es como se muestra en la figura 20a.

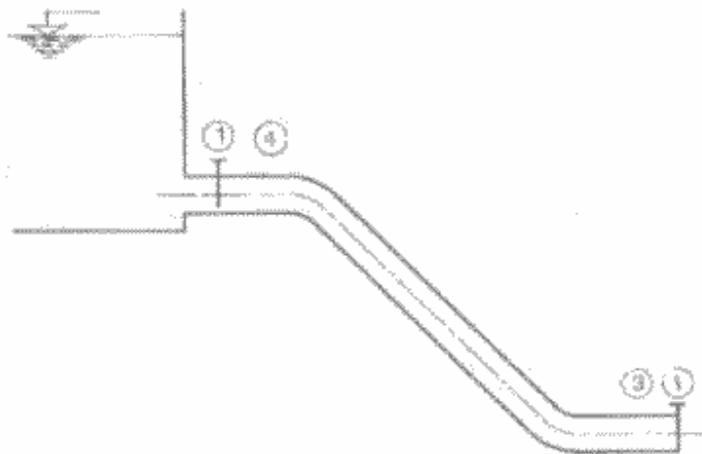


Figura 20a. Instalación adecuada de una válvula

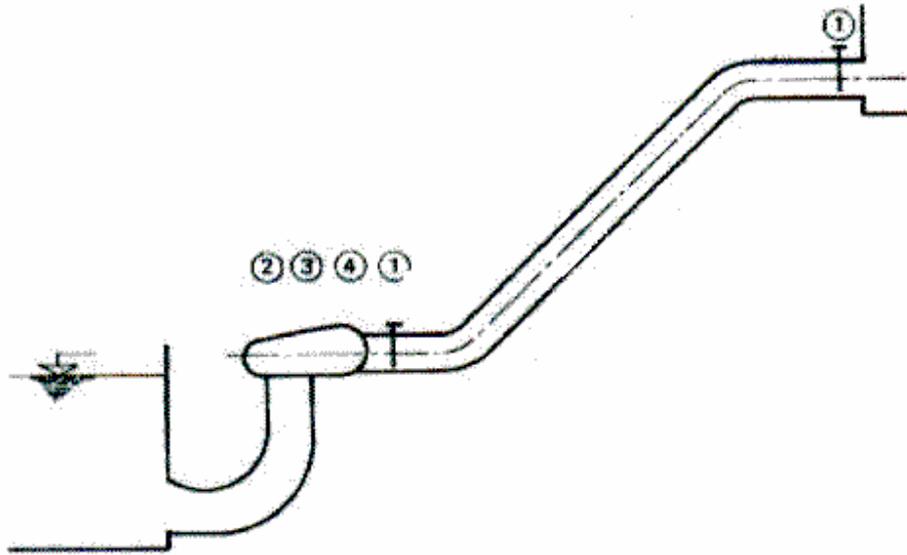


Figura 20b. Instalación adecuada de una válvula

Así, con las válvulas o compuertas de seccionamiento se puede regular el gasto y es posible efectuar trabajos de mantenimiento en el conducto cuando este así lo requiera; con la válvula de admisión de aire se evita la posibilidad de formación de un vacío cuando se cierra la válvula de seccionamiento ubicada aguas arriba y en la válvula del tipo aliviadora de presión, reguladora de presión o de seguridad, se reduce la magnitud de la sobrepresión si la de seccionamiento que se encuentra aguas abajo se cierra. En cuanto a las plantas de bombeo, la ubicación de válvulas se indica en la figura 20b. Sin embargo, es necesario destacar que la ubicación de válvulas propuesta se puede variar de acuerdo con las condiciones particulares de cada sistema y, en algunos casos, podría resultar necesaria la instalación de válvulas de los tipos mencionados en secciones adicionales a las que se indican, por ejemplo, de una válvula de admisión de aire en un punto de alto de la tubería de descarga en una planta de bombeo.

Asimismo, es posible que la carga de presión máxima resultante por efecto del golpe de ariete en los sistemas en estudio, sea de una magnitud tal que no se requiera de la instalación de válvulas para reducción de esta.

Finalmente, es necesario mencionar que cada uno de los tipos de válvulas descritas existe una gran variedad en el mercado, y las características especiales de cada una de ellas deben ser proporcionadas por el fabricante.

4.2 TANQUES DE OSCILACION

4.2.1 Descripción. Un tanque de oscilación es un dispositivo de alivio frecuentemente utilizado en estaciones hidroeléctricas y en plantas de bombeo para reducir el efecto producido por el golpe de ariete.

Con el objeto de analizar el funcionamiento de estas estructuras se pueden considerar los sistemas que se muestran en las figura 21 a y b, en los que existe un tanque de oscilación con un orificio en su parte inferior, en la sección del conducto inmediatamente aguas arriba o aguas debajo de un órgano de control o una válvula de no retorno respectivamente, y un deposito con nivel constante situado en el otro extremo.

Con relación a la estación hidroeléctrica de la figura 21b, cuando se efectúa una maniobra de cierre total en el órgano de control el nivel del agua en el tanque aumenta en forma gradual transformándose la energía cinética del agua en potencial, y con esto se reduce el efecto del golpe de ariete en el tramo del conducto situado aguas arriba del tanque; asimismo, cuando la maniobra en el órgano es de apertura, el nivel del agua en el tanque desciende y contribuya junto con el conducto a la demanda inmediata de agua por parte de la turbina.

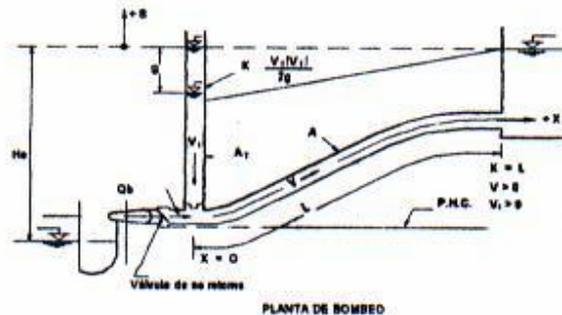


Figura 21a. Funcionamiento de un tanque de oscilación

Por lo que se refiere la planta de bombeo de la figura 21a, al presentarse una interrupción en el suministro de energía o una falla mecánica en la bomba, ante la reducción de la carga en esta última, el nivel del agua en el tanque desciende y da lugar a una disminución en la variación del gasto en la tubería de descarga, disminuyendo con esto también el valor de la depresión en esta última; posteriormente, cuando se invierte el flujo en la tubería y cierra la válvula de no retorno, el nivel del agua en el tanque empieza a subir y se transforma la energía tal como se mencionó en el párrafo anterior, reduciéndose con esto el valor de la sobrepresión en la bomba y la tubería de descarga.

Por otra parte, cuando se presenta el arranque de la bomba la mayor parte del flujo inicial penetra en el tanque, lo que reduce tanto el aumento súbito del gasto en la tubería como el incremento en la misma.

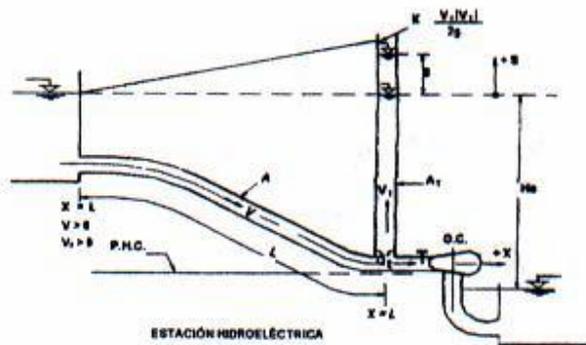


Figura 21b. Funcionamiento de un tanque de oscilación

4.2.2. Tipos principales de tanques de oscilación. Básicamente los tanques de oscilación se clasifican en vertedores y no vertedores. Los primeros tienen una altura menor que la que alcanzaría el nivel máximo del agua en el tanque, lo que provoca el vertido del agua, y se utilizan cuando las condiciones topográficas del terreno lo permiten sin ocasionar problemas.

Dentro de los tipos existen varios modelos, los principales son:

Tanque de tipo simple. En un cilindro abierto en la parte superior que se une con el conducto en su parte inferior. (figura 22)

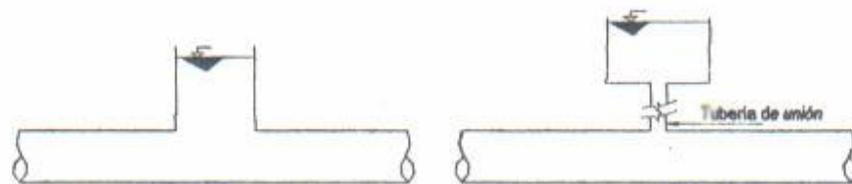


Figura 22. Tanque de tipo simple

Tanque con orificio diferencial. Es semejante al tanque de tipo simple, solo que en la parte inferior tiene un estrechamiento conocido como orificio diferencial, que produce pérdidas de carga que resultan mayores cuando el agua entra al tanque que cuando sale de este, por lo que ofrece una operación mas ventajosa que la tipo simple (figura 23).

En algunos casos, además del orificio diferencial existe una tubería de unión como la mostrada en la figura 23

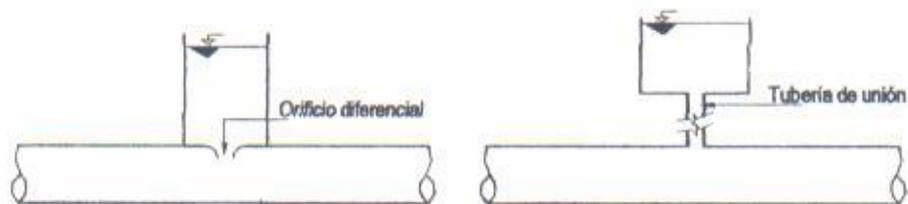


Figura 23. Tanque con orificio diferencial

Tanque diferencial o tipo Jonson. Esta constituido por un tanque principal donde se aloja un tubo central o tubo elevador, con orificios en su parte inferior (figura 24), y un diámetro aproximado al del conducto (80% como mínimo).

Cuando existe un incremento de carga en el conducto, por cualquiera de las causas descritas anteriormente, el agua sube rápidamente en el tubo elevador y se vierte en el principal, iniciándose un ascenso del agua con menor rapidez hasta llegar a un determinado nivel máximo; asimismo, cuando se requiere el suministro instantáneo de agua en el conducto, el agua desciende rápidamente por el tubo elevador y, en cualquier caso, la amortiguación de las oscilaciones se verifica en forma efectiva gracias al efecto del tanque principal.

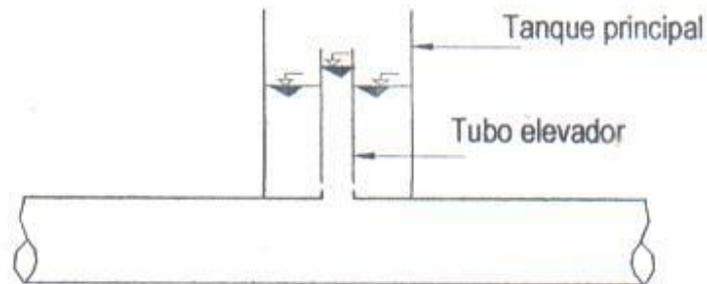


Figura 24. Tanques diferencial

4.2.3. Requisitos para la operación correcta para un tanque de oscilación. Con el fin de que un tanque de oscilación opere con efectividad, su localización y dimensiones deberán estar basados en las siguientes consideraciones:

En una estación hidroeléctrica donde la descarga esta controlada por un gobernador, el tanque debe tener suficiente área transversal para ser estable, de manera que las oscilaciones del nivel del agua en el mismo se amortigüen durante el tiempo que dure la descarga. En caso en que el área sea muy pequeña, un cambio en la carga de la turbina puede originar oscilaciones continua o creciente.

El tanque de oscilación deberá estar situado lo mas cerca posible de la estación hidroeléctrica o planta de bombeo, ya que el efecto del golpe de ariete será una intensidad bastante mayor en el tramo del conducto comprendido entre el tanque y el órgano de control.

Debe tener una altura suficiente para evitar derrame que se puedan presentar en cualquier condición de operación, excepto cuando el tanque sea tipo vertedor.

El nivel mínimo del agua en el tanque no deberá permitir el vaciado del mismo, y con esto la entrada del aire al conducto.

4.3. CAMARA DE AIRE

Un dispositivo eficaz para el control de las oscilaciones de carga que se originan en una planta de bombeo, al presentarse una falla en el suministro de energía a la misma, es la llamada cámara de aire que generalmente se instala inmediatamente aguas debajo de una válvula de no retorno colocada en la tubería de descarga. Figura 25.

Como puede verse, la parte inferior de la cámara contiene agua, mientras que la superior posee aire, que para las condiciones de flujo permanente inicial se encuentran comprimido bajo la carga de operación normal y almacena energía en forma análoga a un resorte. Al ocurrir la falla de energía, la presión en las bombas disminuye, el aire se expande y el agua sale de la cámara a través del orificio situado en el fondo, reduciendo con esto el cambio de velocidad y la caída de carga en la tubería. Una vez que la válvula de no retorno cierra, cuando el flujo en tubería se invierte, el agua penetra en la cámara y el aire se comprime bajo una carga superior a la del flujo permanente inicial.

Las cámaras de aire deben ser abastecidas constantemente con pequeñas cantidades de aire comprimido para reemplazar el que se disuelve en el agua, lo cual constituye su principal desventaja; asimismo, para lograr un funcionamiento más efectivo se requiere de un orificio diferencial en la cámara tal como se muestra en la figura, donde el flujo de la tubería a la cámara proporciona una pérdida de carga generalmente 2.5 veces mayor que para el flujo en la dirección opuesta, logrando con esto una mejor amortiguación.

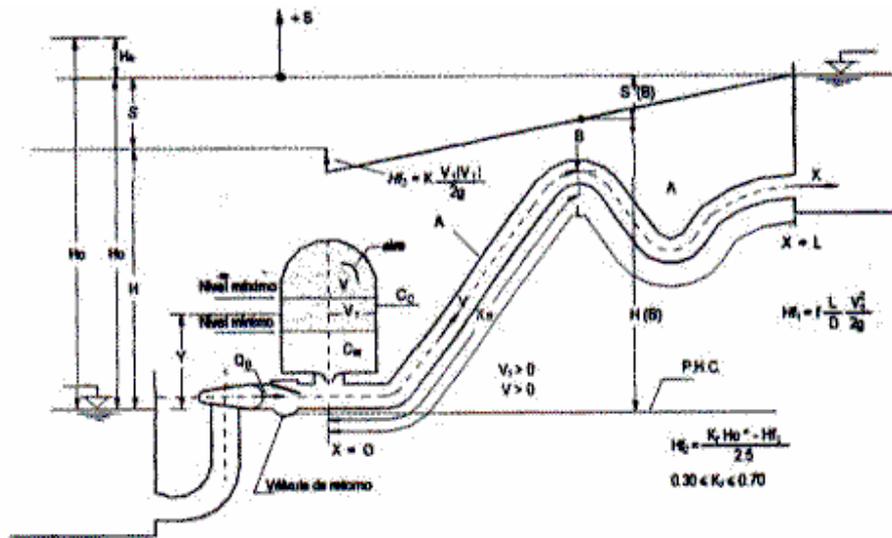


Figura 25. Cámara de aire

5. RECOMENDACIONES

- § Mantenga la velocidad del fluido por debajo de los 5 pies por segundo.
- § Use válvulas actuadas para controlar la velocidad de apertura y cierre.
- § Instruya al operario de la válvula Manual para abrir y cerrar la válvula.
- § Cuando arranque una bomba, cierre parcialmente la válvula en la línea de descarga para minimizar el volumen del líquido acelerándose a través del sistema. Abra completamente la válvula después de que la línea esté completamente llena.
- § Utilice una válvula check en la línea de descarga, para mantener siempre la línea llena.
- § Instale una válvula de purga ó alivio de aire (Air Relief Valve), (Punto más alto de la tubería), para controlar la cantidad de aire admitido o exhostado en la línea de descarga
- § La presión total del sistema de tubería (Presión de operación + el Golpe de ariete) no debe exceder la máxima presión de trabajo del elemento ó accesorio más débil en el sistema.

6. CONCLUSIONES

El golpe de ariete es un fenómeno mediante el cual se producen modificaciones de presión y esta aumenta naturalmente cuando mayor sea la longitud de la tubería que experimenta el fenómeno y cuando mayor sea la velocidad del líquido que se desplaza por ella.

Este fenómeno se propaga a lo largo de la tubería en forma de ondas de presión que viajan a gran velocidad, causando una serie de choques violentos contra las paredes del tubo.

Cuando más elástica sea una tubería, mayor será la disipación de la energía debido a su flexibilidad y más lento será el efecto de propagación de las onda de presión.

Las principales causas del golpe de ariete son:

- Expulsión repentina de aire de una tubería
- Apertura o cierres bruscos, totales o parciales, de válvulas
- Separación y reencuentro de columnas de líquido
- Arranque o parada de bombas
- Cambio de velocidad en los equipos de propulsión
- Cambio de elevación de un sistema de almacenamiento

Para eliminar o disminuir el golpe de ariete hay que tomar medidas preventivas tales como:

- Limitar la velocidad de diseño.
- Instalar válvulas de alivio de presión.
- Instalar válvulas de cierre lento.
- Usar bomba de bajo momento de inercia.
- Usar sistema con juntas elásticas.
- Instalar ventosas de doble efecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. http://fluidos.eia.edu.co/obrashidraulicas/articulos/almenaras/almenaras_y_golpe_de_ariete.html
2. http://www.asumincol.net/golpe_ariete.htm
3. http://www.istec.com.uy/esp/tecnica/fichas/calculo_jucowski.htm
4. <http://www.pavco.com.ve/macue/ariete.pdf>
5. <http://www.pavco.com.ve/mpresion/ariete.htm>
6. http://www.arivalves.com/Spanish/SP_Abastecimiento_Agua_NS.htm
7. <http://eyt.cubasolar.cu/Energia/Energia08/HTML/articulo03.htm>
8. <http://www.valvulasross.com/antigolp.html>
9. <http://www.valvulasross.com/regulado.html>
10. <http://www.valvulasross.com/retencin.html>
11. <http://www.valvulasross.com/ventosas.html>
12. <http://www.repsa.com.ar/epoxi/instalacion/ariete.htm>
13. <http://www.chileriego.cl/docs/015-15.doc>
14. <http://cipres.cec.uchile.cl/~rgalvez/ariete.htm>
15. <http://www.emmsa.com.mx/PDF/Cat-BIGBLUE-C905.pdf>
16. http://www.ingenieriarural.com/Trans_hidr/Tema9.PDF

STREETER, VICTOR L., Flujo no permanente en mecánica de fluidos, 4ª. Ed. México, Mac Graw Hill, 1974 Págs.298-350.

MANCEBO, URIEL. Teoría del golpe de ariete y sus aplicaciones en ingeniería hidráulica 1ª. Ed ., México, Editorial Limusa, 1987, Págs.23-203.

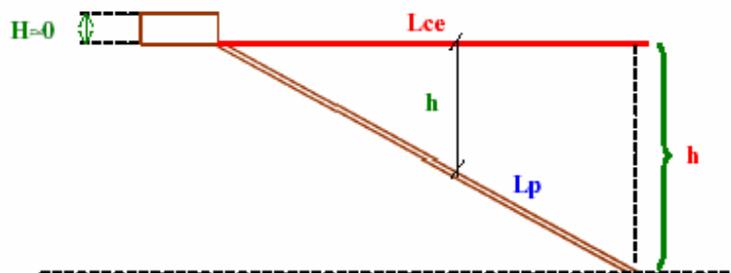
Anexo B

Funcionamiento de las tuberías por gravedad y en impulsión

1. Funcionamiento de una tubería por gravedad
2. Funcionamiento de una tubería en impulsión
3. Consideraciones sobre las depresiones
4. Vaciado y limpieza de tuberías
5. Influencia de las bolsas de aire en el funcionamiento de las instalaciones de gravedad e impulsión

Funcionamiento de una tubería por gravedad. En el funcionamiento de una tubería por gravedad se pueden distinguir, en principio, seis casos, que resumen las situaciones que pueden producirse en función de la uniformidad del trazado y de la existencia de válvulas reguladoras al inicio o al final del recorrido.

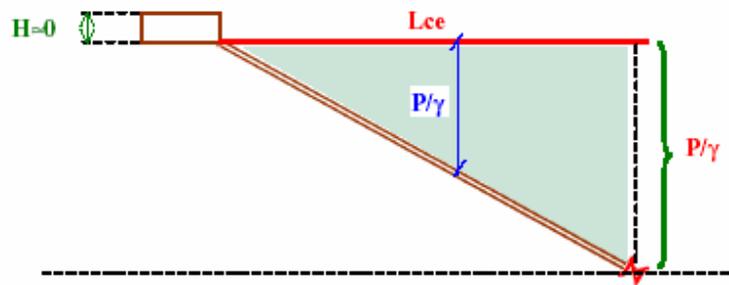
Circulación libre y pendiente uniforme.



Corresponde este caso a la apertura total de la válvula. La presión es constantemente nula en todo el recorrido de la tubería, por lo que la línea de carga o línea de alturas piezométricas (LP) coincide con la trayectoria, es decir, con la línea de alturas geométricas.

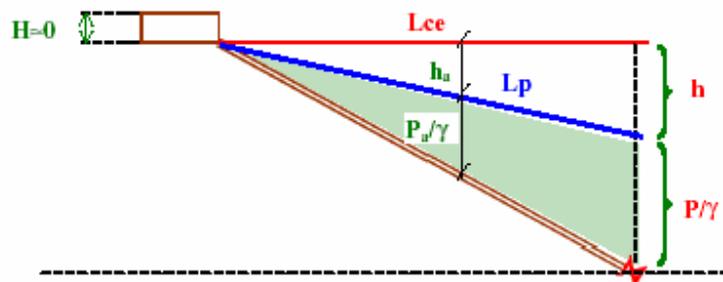
La pérdida de carga producida desde el origen a un punto determinado coincide con la distancia entre dicho punto y la línea de carga estática (Lce).

b) *Válvula de final de recorrido cerrada.*



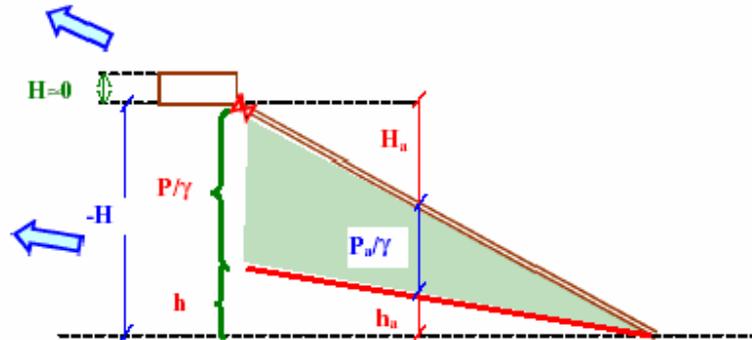
La presión en cada posición corresponde al desnivel en relación a la horizontal. Es el caso más desfavorable para una conducción de estas características, ya que se alcanza el máximo valor de P/γ , por lo que es el que hay que tener presente a la hora de dimensionar la tubería

c) *Válvula de final de recorrido semicerrada.*



La presión en cada punto es la presión estática menos la pérdida de carga desde el origen al punto considerado. Conforme se produce la apertura de la válvula, aumenta la pérdida de carga y disminuye P/γ .

d) *Válvula inicial semicerrada.*



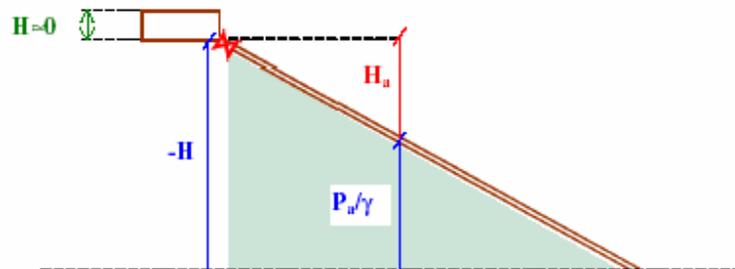
Existen depresiones en todo el recorrido, que se anulan en la posición inferior. Se observa en la figura que, en valor absoluto,

$$H = \frac{P}{\gamma} + h, \text{ luego:}$$

$$\frac{P}{\gamma} = -(H - h) = -H + h \quad \left(\frac{P}{\gamma} < 0 \right)$$

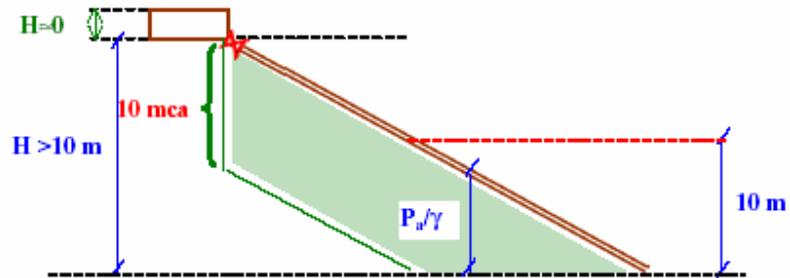
Valores máximos, en módulo, de las depresiones. Esquema válido para diferencias de nivel entre depósitos inferiores a 10

e) *Válvula inicial cerrada y desnivel de hasta 10 m.*



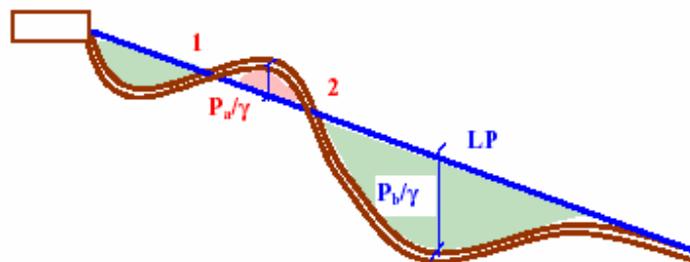
En este caso, $\frac{P_a}{\gamma} = -(H - H_a)$, es decir, $\frac{P_a}{\gamma} < 0$

f) *Válvula inicial cerrada y desnivel superior a 10 m.*



Si el desnivel es mayor de 10 m, al no poder ser las depresiones superiores a 1 atm, existe rotura de la vena líquida. A partir de la válvula el tubo está vacío y únicamente existe la presión de vapor del agua. Para el desnivel de 10 m e inferiores respecto al segundo depósito, el agua llena el tubo y decrecen las depresiones hasta anularse en el nivel inferior.

g) *Recorrido sinuoso.*

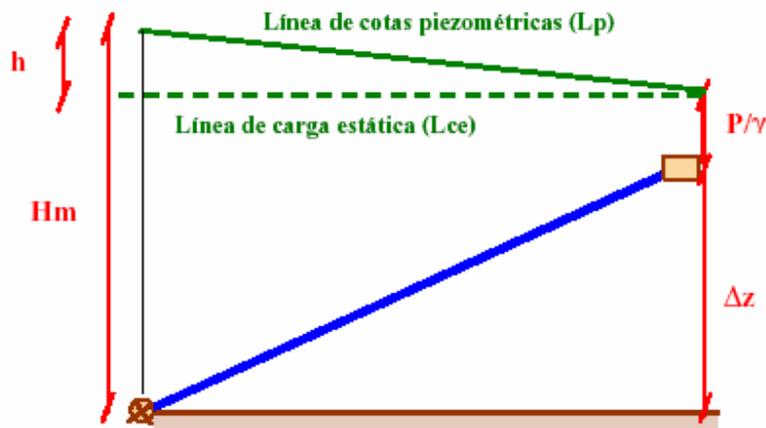


Si la línea de carga corta el trazado de la tubería, existirán zonas de presión positiva y zonas de presión negativa. Las depresiones se producirán en los tramos

en que la línea de alturas piezométricas que por debajo de la tubería (intervalo 1-2 en la figura).

Funcionamiento de una tubería en impulsión.

La altura manométrica que debe proporcionar el grupo de bombeo debe ser igual al desnivel geométrico que tiene que vencer el agua (Δz) más la presión mínima requerida en el punto a abastecer (P/γ) y más la pérdida de carga (h_T) que se produzca en todo el trayecto considerado.



$$H_m = H_g + h_T, \text{ siendo } H_g = \Delta z + \frac{P}{\gamma}$$

$$H_m = \Delta z + \frac{P}{\gamma} + h_T$$

Las condiciones específicas que se producen en función de la forma de trabajo de la bomba (en aspiración o en carga) Consideraciones sobre las depresiones. Hemos visto que cuando la línea de alturas piezométricas queda por debajo de la trayectoria de la tubería, se crea una zona de depresión, ya que la

$$\left(\frac{P_{abs}}{\gamma} < \frac{P_0}{\gamma} \right),$$

presión absoluta reinante en el interior es menor que la presión atmosférica por lo que puede haber peligro de aplastamiento de la tubería y posibilidad de cavitación si la presión se iguala a la tensión de vapor a esa temperatura.

$$r \left(\frac{P_v}{\gamma} \right)$$

Por lo tanto si habrá cavitación.

En estas zonas de presión negativa no se deben instalar ventosas bidireccionales, ya que entraría aire en la tubería, pero sí unidireccionales y bomba de vacío.

Vaciado y limpieza de tuberías.

Para evitar la acumulación de residuos y facilitar el vaciado y limpieza de la tubería, es conveniente colocar en los puntos bajos de la misma purgadores u otros dispositivos que permitan efectuar estas operaciones.

Influencia de las bolsas de aire en el funcionamiento correcto de las instalaciones de gravedad e impulsión.

En general, el aire que existe en las tuberías puede proceder:

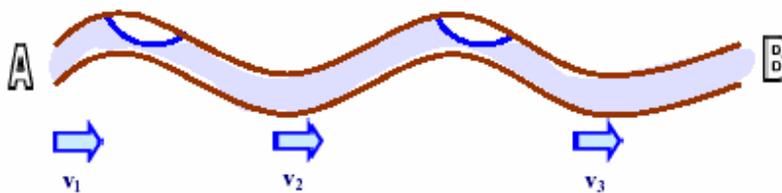
- Del aire que llena la conducción antes de que entre en servicio.
- Del aire disuelto en el agua, que se desprende al disminuir la presión.
- De los torbellinos que se forman en la aspiración.
- De pequeñas fisuras que puedan existir en las tuberías.

El aire de las tuberías se acumula en las partes altas de las mismas, interrumpiendo el paso del agua y originando unas sobrepresiones que pueden ser mayores que la presión de funcionamiento, por lo que es necesario evacuarlo a través de las ventosas.

Los principales problemas que plantean las acumulaciones de aire en las tuberías son los siguientes:

1. Durante El Arranque Del Sistema

Es uno de los problemas más importantes que puede presentar la acumulación de aire en los puntos más elevados de la conducción. El aire acumulado en la primera bolsa de la conducción será comprimido al abrir la válvula de entrada a B por la masa de líquido que hay aguas arriba, y empujará al fluido confinado en el segundo tramo, que adquirirá una velocidad menor que la existente en el primer tramo, y análogamente ocurrirá con la segunda bolsa de aire y el tercer tramo con agua, de manera que $v_1 > v_2 > v_3$.

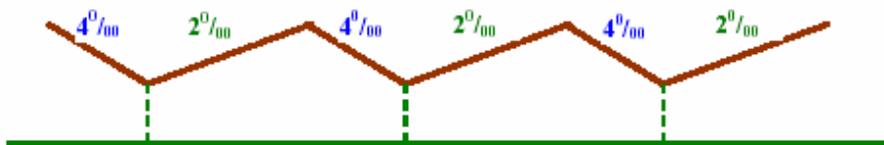


2. Reducción de la sección útil de la tubería. El espacio que ocupa el aire se resta de la sección útil de la conducción, por lo que la vena líquida reducirá su diámetro en esos puntos. En consecuencia, también circulará el agua con *mayor velocidad* y se creará una *pérdida de carga* adicional.

3. Golpe de ariete

Soluciones

1. Evitar en lo posible la entrada de aire.
2. Expulsar el aire colocando ventosas.
3. Al realizar el llenado de la conducción, hacerlo lentamente para evitar turbulencias (entrada de aire) y dar tiempo a que el aire que llena la tubería salga por las ventosas.
4. Para evitar bolsas de aire en posiciones desconocidas, con lo que no sería fácil su extracción, conviene dar a la tubería un perfil con tramos de distintas pendientes, ascendentes y descendentes, aunque el terreno sea poco irregular, de manera que estas bolsas de aire se desplacen a los puntos elevados y se facilite su extracción. Los valores mínimos recomendados son de un 2 – 3 ‰ para las pendientes ascendentes y de un 4 – 6 ‰ para las descendentes.



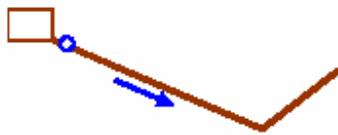
5. En cualquier caso, conviene colocar ventosas incluso en tuberías mhorizontales y en tramos descendentes si son de gran longitud, pues el permitir al aire una salida fácil evitará la formación de bolsas incontroladas que perjudiquen el buen funcionamiento de la instalación.

Colocación de las ventosas

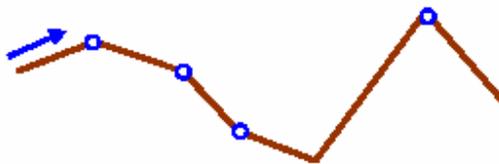
En puntos altos notables



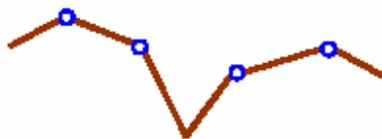
A la salida de depósitos



En ramas descendentes de más de 500 m de longitud



En puntos de cambio de pendiente brusca



En tramos largos con ninguna o poca pendiente



Anexo C

Golpe De Ariete En Tuberías De Diferentes Materiales

Es importante hacer notar que para las mismas condiciones de interrupción de flujo, el golpe de ariete generado en la tubería con módulos de elasticidad altos será mayor que los de tubería de módulos bajos (PVC) de dimensiones similares. Conforme los módulos de elasticidad para un material de tubería se incrementa, el golpe de ariete resultante causado por un cambio en la velocidad del flujo aumenta. Por ejemplo, un cambio instantáneo en velocidad de flujo de 0.6 m/seg en una conducción de 18 pulgadas creará sobre presiones según se muestra en la Tabla 1 para diferentes materiales de tubería.

TABLA 1
GOLPE DE ARIETE EN TUBERIA DE 18" DE DIAMETRO
(En respuesta a un cambio instantáneo de velocidad de 0.6 m/seg)

TIPO DE TUBERIA	GOLPE DE ARIETE, kg/cm ² (kPa)
HIERRO DUCTIL CLASE 50	7.0 (689)
ASBESTO-CEMENTO A-10	6.2 (611)
PVC RD-25	2.1 (202)

El golpe de ariete en la tubería de PVC con diferentes espesores de pared (rd) en respuesta a un cambio instantáneo de velocidad de 0.3 m/seg cambia como se muestra en la Tabla 2.

TABLA 2
GOLPE DE ARIETE EN TUBERIAS CON DISTINTOS RD
(En respuesta a un cambio instantáneo de velocidad de 0.3 m/seg)

RD	GOLPE DE ARIETE, kg/cm ² (kPa)
13.5	1.4 (139)
14	1.4 (139)
17	1.3 (123)
18	1.2 (120)
21	1.1 (110)
25	1.0 (101)
26	1.0 (99)
32.5	0.9 (88)
41	0.8 (79)

Anexo D

Ventosas

Las ventosas son elementos que se instalan en conducciones para eliminar aire de una red de forma automática. Nuestras ventosas llevan en el mercado desde 1905, se pueden encontrar más de 30 modelos de ventosas tanto para aguas limpias como para aguas sucias. Se pueden distinguir tres clases de ventosas en relación a sus funciones:

La ventosa Monofuncional, también denominada purgador, permite la eliminación de aire en presión cuando la conducción está en carga. Tenemos varios modelos desde el sencillo AR hasta el purgador de gran capacidad. También está el aductor.

La ventosa Bifuncional sirve para eliminar y admitir grandes cantidades de aire sin presión.

La ventosa Trifuncional. es la síntesis de las dos anteriores, elimina y admite grandes cantidades de aire sin presión y tiene la facultad de purgar la conducción cuando esta se encuentra en funcionamiento. Se construye tanto en doble cuerpo como en un solo cuerpo siendo la ventosa UNIVERSAL uno de los diseños más avanzados del momento ya que el sistema de cierre se basa en levas o palancas con lo que se evita la deformación de la bola.

Para el dimensionamiento de la ventosa se debe de tener en cuenta el caudal de eliminación y/o admisión de aire de la misma. Se debe elegir el diámetro apropiado en función del caudal de llenado de la conducción, de tal manera que si

se puede garantizar un caudal de llenado pequeño, la ventosa puede ser también pequeña.

Válvulas Automáticas Ross diseña la ubicación y el diámetro de las ventosas de cualquier proyecto u obra que se nos presente, indicando qué diámetro y modelo es el más apropiado para cada punto de la traza.



Anexo E

Serie 700 – Válvulas de Control

Modelos Principales

Modelo 710

Válvula de Control Eléctrico con Comando a Distancia. La válvula abre y cierra reponiendo a un comando eléctrico ubicado a la distancia.

La válvula funciona por medio de una válvula solenoide, la cual introduce el líquido de control a la cámara superior para cerrar la válvula, o, alternativamente, drena la cámara superior para abrir la válvula.

Aplicaciones Principales:

Sistemas de bombeo, distribución de aguas potables, sistemas contra incendio e instalaciones petrolíferas.

Modelo 720

Válvula Reductora de Presión. La válvula reduce la presión aguas arriba a una presión prefijada menor aguas abajo, independientemente de los cambios de presión y/o caudal que se produzcan aguas arriba.

Aplicaciones Principales:

Distribución de agua en sistemas de largas líneas de distribución para crear un balance de las presiones. Ideal para acueductos, ciudades con gran diferencia de alturas, edificios.



Modelo 730

Válvula Sostenedora de Presión/Alivio. Mantiene una presión determinada aguas arriba independientemente de los cambios de presión o caudal aguas abajo. Intercalada en el sistema se utiliza como sostenedora de presión, y puesta en derivación, se utiliza como válvula de seguridad o alivio.

Aplicaciones Principales:

Sostener limitar la presión determinada aguas arriba independientemente de los cambios de presión en estaciones de bombeo, prevención del drenaje de la línea.

Modelo 735

Válvula Anticipadora de Onda/Contra golpe de Ariete. La válvula protege los grupos de bombeo y al sistema de la onda de presión causada por parada de bomba o falló de energía. La válvula abre inmediatamente al inicio de la ola de presión negativa y evacua a la atmósfera el exceso de presión que provoca la onda de presión positiva.

La brusca variación de velocidad del flujo, regresando la columna de este hacia el grupo de bombeo, puede provocar un golpe de ariete, el que queda amortizado por la rápida reacción de la válvula, la cual consta de dos pilotos de alivio de presión.



Válvula de Retención. La válvula opera normalmente abierta en condiciones de flujo normal. Cuando la presión de salida excede a la presión de aguas arriba, la válvula cierra lentamente controlando la velocidad de apertura en prevención del golpe de ariete.

La válvula de retorno del modelo 760-03 es equipada con dos controladores de la velocidad de apertura y cierre, los que pueden ser regulables según la preferencia.

El indicador de la posición, pieza que puede ser montada en la válvula, hace posible la utilización de un dispositivo eléctrico para arrancar y parar la bomba.

En caso de existir la necesidad de reducir la presión, o sostener esta, entre la válvula y la bomba, se puede lograr con solo agregar un piloto de control a la válvula eliminando la necesidad de adquirir otra válvula para cumplir estas funciones.

Anexo F

El ariete hidráulico



Principio de funcionamiento. El sistema se basa en el fenómeno conocido en la hidráulica como golpe de ariete, el cual se observa cuando se interrumpe el flujo de agua cerrando bruscamente una tubería. La energía cinética, que trae el agua en movimiento, al ser detenida, origina un aumento brusco o golpe de presión.

Con el ariete hidráulico se producen continuamente estos golpes en un tubo que se alimenta con agua de una presa, de un río o cualquier desnivel, y se aprovechan los aumentos de presión para mandar una parte del agua que pasa por el tubo a una altura superior.

En el esquema se muestran los elementos esenciales para el funcionamiento del ariete hidráulico, que son:

- La presa, un río o cualquier otro medio que permite crear un desnivel en relación con el ariete (generalmente de 0,5 m como mínimo).

- El tubo de impulso. Según las reglas convencionales debe tener un largo entre 100 y 500 veces el diámetro del tubo, y un mínimo de 2 y hasta 7 veces la altura de la presa, según el tipo de ariete.

- La válvula de impulso (válvula 3) con su cámara, que según las mismas reglas, debe tener como mínimo el doble del diámetro del tubo de impulso.

- La válvula de retención (válvula 4), la cual generalmente es la mitad del diámetro de la válvula anterior, depende en primer lugar del caudal de bombeo y la frecuencia de los golpes.

- Encima de la válvula de retención se encuentra la cámara de aire (5) que debe tener un mínimo de 10 veces el volumen del agua que entra por golpe.

- Por último, se observa el tubo de bombeo, generalmente de la mitad del diámetro del tubo de impulso, aunque es más lógico determinarlo según el caudal de bombeo, el largo del tubo y la potencia disponible.

Cuando se llena el sistema, la válvula de impulso se cierra por la presión de la carga inicial de la presa y el agua sube a través de la válvula de retención, que se abre por la misma presión, hasta el nivel de la presa por el principio de los vasos comunicantes.

Se abre la válvula de impulso manualmente y el agua en el tubo de impulso comienza a acelerarse hasta que tiene suficiente velocidad para cerrar esta válvula. En este momento ocurre el golpe de ariete que produce la apertura de la válvula de retención, permite la descarga de energía del agua en movimiento y la

entrada de agua en la cámara de aire, y de ahí en el tubo de bombeo, donde sube el agua a un nivel superior.

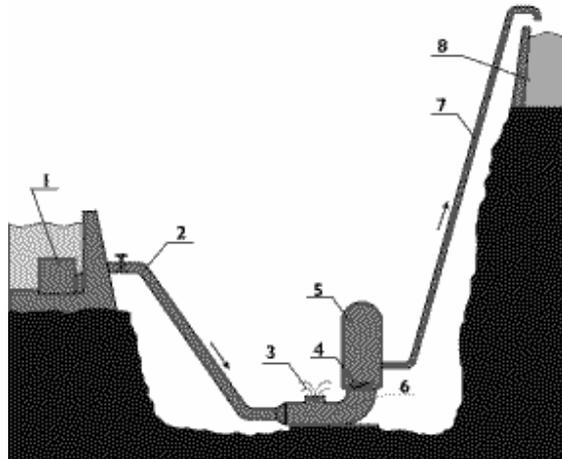
Al cesar el empuje del agua en el tubo de impulso, se cierra la válvula 2 por la presión que tiene encima.

Al repetir algunas veces la apertura manual de la válvula de impulso, la presión en el tubo de bombeo sube tanto que la columna de agua del tubo de impulso sufre una resistencia para entrar en la cámara de aire, y comienza a actuar como un martillo que golpea una superficie dura.

Es decir, la columna en el tubo de impulso golpea y "rebota", o retrocede (por la flexibilidad de los materiales), lo que hace que se produzca un flujo inverso hacia la entrada del tubo de impulso.

En este momento el agua ejerce una succión en el interior del tubo de impulso, por lo cual se abre la válvula de impulso y se reinicia la aceleración de la columna hasta que se cierra la válvula de impulso de nuevo.

De esta forma continúa el funcionamiento automáticamente, de día y de noche. El ariete hidráulico 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 un transformador eléctrico.



Esquema sobre la instalación y funcionamiento del ariete hidráulico

1. Fuente de alimentación
2. Tubería de impulso
3. Válvula de impulso
4. Válvula de retención
5. Cámara de aire
6. Caja de válvulas
7. Tubería de descarga
8. Tanque de abastecimiento