

**TEORIA DEL FENOMENO DEL GOLPE DE ARIETE**

**FRANCIS JAVIER MENA CUESTA**

**JHON JAIRO RESTREPO ARITIZABAL**

**Monografía presentada como requisito parcial para  
optar por el título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Julio Cantillo**

**Ing. Mecánico**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**MINOR EN DISEÑO DE INGENIERIA MECANICA**

**NOVIEMBRE DEL 2003**

**CARTAGENA – BOLIVAR**

**TEORIA DEL FENOMENO DEL GOLPE DE ARIETE**

**POR**

**FRANCIS MENA CUESTAS**

**JHON JAIRO RESTREPO ARISTIZABAL**

**INSTITUCION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA**

**MINOR EN DISEÑO DE INGENIERIA MECANICA**

**NOVIEMBRE DEL 2003**

**CARTAGENA – BOLIVAR**

## **RESUMEN**

En esta monografía se definieron algunos conceptos básicos relacionados con el estudio del fenómeno del Golpe de Ariete .

En este mismo se explicará de forma breve y sencilla lo que verdaderamente pasa en una tubería de longitud dada cuando su flujo lleva una velocidad y en un trayecto de la tubería un organo de control es cerrado bruscamente, se presentará una serie de cambios en el sistema por lo cual conllevara al rompimiento de esta, esto si no se tienen en cuenta dispositivos de alivio .

Tambien se vera posibles organos de control que nos ayudaran a evitar posibles daños en la tuberia y por ultimo tener en cuenta algunas recomendaciones posibles para asi poder evitar el fenomeno del golpe de ariete.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b>	<b>3</b>
<b>1. GENERALIDADES</b>	<b>4</b>
<b>2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE</b>	<b>9</b>
<b>2.1 CLASIFICACION DE FLUJOS</b>	<b>9</b>
2.1.1 Flujo Permanente	9
2.1.2 Flujo No Permanente	9
2.1.3 Flujo Uniforme y No Uniforme	10
2.1.4 Flujo Compresible y No Compresible	10
2.1.5 Flujo Transitorio	10
<b>2.2 RESONANCIA</b>	<b>11</b>
<b>2.3 CAVITACION</b>	<b>11</b>
<b>2.4 COMPRESIBILIDAD</b>	<b>12</b>
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE</b>	<b>13</b>
<b>4. TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA</b>	<b>19</b>
<b>5. TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA</b>	<b>21</b>
<b>6. LIMITACIONES DE LA TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA</b>	<b>23</b>

<b>7.</b>	<b>DISPOSITIVOS PARA REDUCIR EL EFECTO PRODUCIDO POR EL GOLPE DE ARIETE</b>	<b>24</b>
<b>7.1</b>	<b>VÁLVULAS</b>	<b>25</b>
<b>7.1.1</b>	<b>Válvulas De No Retorno</b>	<b>25</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Válvulas De Seguridad</b>	<b>26</b>
<b>7.1.3</b>	<b>Válvulas Aliviadoras De Presión</b>	<b>27</b>
<b>7.1.4</b>	<b>Válvula Reguladora De Presión</b>	<b>28</b>
<b>7.1.5</b>	<b>Válvulas De Admisión De Aire</b>	<b>29</b>
<b>7.2</b>	<b>TANQUES DE OSCILACIÓN</b>	<b>30</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Tipos De Tanques De Oscilación</b>	<b>31</b>
<b>7.2.1.1</b>	<b>Tanque De Tipo Simple</b>	<b>31</b>
<b>7.2.1.2</b>	<b>Tanque Con Orificio Diferencial</b>	<b>32</b>
<b>7.2.1.3</b>	<b>Tanque Diferencial O Tipo Johnson</b>	<b>33</b>
<b>7.3</b>	<b>TANQUES UNIDIRECCIONALES</b>	<b>34</b>
	<b>CONCLUSIONES</b>	
	<b>RECOMENDACIONES</b>	
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	

## LISTA DE FIGURAS

	Pàg
<b>FIGURA 1 Compresion de Fluido</b>	<b>12</b>
<b>FIGURA 2. Condiciones de Conductos</b>	<b>14</b>
<b>FIGURA 3. Conducto a Presiòn</b>	<b>19</b>
<b>FIGURA 4. Valvula de Retorno</b>	<b>25</b>
<b>FIGURA 5. Valvula de Seguridad</b>	<b>26</b>
<b>FIGURA 6. Valvula Aliviadora de Presiòn</b>	<b>28</b>
<b>FIGURA 7. Valvula de Admisiòn de Aire</b>	<b>29</b>
<b>FIGURA 8. Tanque de Oscilaciòn</b>	<b>30</b>
<b>Figura 9. Tanque de Tipo Simple</b>	<b>32</b>
<b>Figura 10. Tanque con Orificio Diferencial</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 11. Tanque Diferencial</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 12. Tanque Unidireccional</b>	<b>34</b>

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar el comportamiento de un flujo en una tubería por gravedad cuando este se encuentra con algún órgano de control cuando se le este efectuando un trabajo de cierre rápido .

## **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

1. Evaluar los diferentes órganos de alivio que existen para aminorar el fenómeno .
2. Tener en cuenta algunas consideraciones estipuladas para llevar el sistema a un 100 % de no falla.
3. Realizar un estudio de diseño para en sistema específico de tubería .

## **INTRODUCCION**

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



## 1. GENERALIDADES

La hidráulica es una parte de las ciencias físicas que como técnica es tan antigua como el hombre, ya que éste para su seguridad y sustento siempre estuvo atento a dar solución a los problemas tales como: La protección contra el efecto de inundaciones, irrigación de terrenos de cultivo, dotación de agua a poblaciones, sistema de drenaje, canales de navegación, etc., pero como ciencia aun a fines del siglo pasado se encontraba en sus inicios y existía una gran cantidad de empirismo en torno a su aplicación a problemas de ingeniería hidráulica.

Sin embargo, debido a la evolución que ha tenido la ingeniería en el presente siglo, los aprovechamientos hidráulicos se han desarrollado notablemente en virtud de los constantes estudios y experimentos llevados a cabo por los investigadores en esta rama.

De los temas que comprende la hidráulica, uno de los más interesantes e importante en el diseño de obras hidráulicas es el relativo a los fenómenos transitorios, de los cuales el más común es el que se conoce como golpe de ariete, destacando también el de la resonancia.

De entre los investigadores y los científicos que constituyeron al mejoramiento de las condiciones de vida de los hombres, con sus estudios y experimentos relacionados con el golpe de ariete, cabe mencionar a Michaud, quien probablemente fue el primero en hacer investigaciones de este fenómeno en tuberías, mismas que dio a conocer en una población que apareció en Lausana, Suiza, en 1878 y cuyo título fue "*Coup de Belier Dans Les Conduites. etude des moyens employes pour attenuer les affets* " donde establece un análisis matemático del golpe de ariete que tiene lugar en una columna de agua elástica contenida en una tubería rígida.

Posteriormente, el ruso Nicolai Egorovich Joukowski ( 1847 – 1921) llevo a cabo importantes estudios vinculados con este fenómeno. Perfecciono sus estudios en Paris y mas tarde retorno a su patria para pasar el resto de su vida profesional en Moscú, donde fue profesor de mecánica en el Instituto Politécnico ( 1872) y posteriormente en la Universidad ( 1886).

Con antelación a los estudios y resultados a que llego el profesor Joukowski , Helmholtz , dentro de sus investigaciones en el campo de la Acústica había demostrado en 1848, que la celeridad o velocidad de propagación del sonido en el seno de un fluido compresible contenido en una tubería, era una función de elasticidad del material de las paredes de esta ultima, y en ese mismo año D.J Korteweg determino la ecuación correspondiente.

En tales circunstancias fue Joukowski el que en 1897 demostró que cuando en una tubería se presenta un incremento de presión a causa de un cierre brusco de una válvula situada en el extremo aguas abajo, la celeridad de la onda de presión generada por tal maniobra, al igual que el sonido, también es una función de la elasticidad de las paredes.

En ese mismo año supervisó una serie de experimentos de gran importancia cuya finalidad era la de obtener un valor máximo de la velocidad que pudiese ser utilizado con seguridad en las instalaciones de las obras de abastecimiento de Moscú, efectuando pruebas en tuberías de diferentes diámetros y longitudes. En ese tiempo Joukowski investigó y experimentó los efectos producidos por cierres de válvulas, cámaras de oscilación, válvulas de seguridad, etc., y en cada caso presentó un análisis matemático riguroso, incluyendo todos los elementos necesarios, de acuerdo con las diferentes condiciones. Tales resultados fueron publicados en (1898).

El sabio italiano Lorenzo Allievi ( 1856 – 1942) es quizás la figura más importante por sus estudios y aportaciones a la teoría del golpe de ariete. Profundizó en las investigaciones efectuadas por Joukowski y en (1902).

Partiendo de los resultados obtenidos por los científicos rusos, los cuales complementó con ideas propias, elaboró su primer trabajo importante sobre el golpe de ariete (1903).

Un gran interés por mejorar cada vez más sus teorías acerca del fenómeno en cuestión, tuvo un gran resultado con la aparición en (1913) de su obra teoría del golpe de ariete, es necesario destacar que su tratado de (1913) es considerado como la base para el desarrollo de los descubrimientos realizados posteriormente en este campo de revelantes importantes en la hidráulica moderna, y que además existen otras publicaciones del mismo Allievi, todas ellas de gran utilidad. Lorenzo de Allievi falleció en 1942.

En 1909, E. Brawn aportó una de las mejores contribuciones al desarrollo de la teoría de ariete, al introducir el valor de la característica de la tubería.

En Berlín, en 1910, en la revista alemana *Die Turbine* publicó trabajos similares a los expuestos por Allievi en su segundo tratado de 1912. Es por ello que en otro artículo publicado el 16 de agosto de 1934.

Sin embargo, el nombre de Allievi, destaca preponderantemente en esta teoría, conocida como teoría de Allievi, porque la presentación de los análisis y desarrollos, en especial de su trabajo de 1913, es una obra ejemplar en elegancia y claridad matemática.

Posteriormente surgieron los métodos gráficos, cuyo precursor fue el suizo Tomar Schnyder, que en 1929 desarrolló un método gráfico de solución del golpe de ariete en bombas, y en 1932 publicó su trabajo donde expone su método para

resolver cualquier sistema de tuberías, especialmente para las que alimentan turbinas.

En 1937, Bergeron demostró que el método gráfico de análisis que había desarrollado para resolver problemas de golpe de ariete podía ser aplicado a otros campos de la teoría de la elasticidad y también en los problemas electéricos.

Otro colaborador en el desarrollo de la teoría en cuestión fue el profesor R.W Angus de la universidad de Toronto, en Canadá, que mejoro notablemente los métodos gráficos y analíticos de solución, mediante valiosas aportaciones.

Cabe citar también al francés H. Favre, quien lleva a cabo las investigaciones en tuberías con dimensión gradual de diámetro.

En 1953, con el advenimiento de las computadoras, Gras introdujo el método de las características para poder llevar el análisis mecanizado del golpe de ariete.

Finalmente, sería justo dejar de mencionar el trabajo desarrollado por el ingeniero Francisco de Asís Tacare Escobar, quien en su tesis profesional titulada *Teoría General del Golpe de Ariete y sus aplicaciones*.

## 2. CONCEPTOS FUNDAMENTALES PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE

### 2.1 CLASIFICACION DE FLUJOS

Se dice que el flujo en un conducto es unidimensional cuando sus características hidráulicas tales como la presión  $p$ , la velocidad  $v$ , el gasto  $Q$ , varían como funciones del tiempo y una coordenada curvilínea  $X$ , que usualmente se hace coincidir con el eje del conducto.

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

De lo anterior, se deduce que:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p, V, Q) = 0 \quad \text{Ecuación 1.}$$

**2.1.2 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, y puede ser expresado como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (p, V, Q) \neq 0 \quad \text{Ecuación 2.}$$

**2.1.3 Flujo Uniforme y No Uniforme:** en hidráulica generalmente se acepta que el flujo de un conducto es uniforme si la magnitud de la velocidad media en la dirección general del movimiento no varía de una sección a otra, es decir, si:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad \text{Ecuación 3.}$$

en caso contrario, se dice que el flujo es no uniforme, y entonces se tendrá:

$$\frac{\partial v}{\partial x} \neq 0 \quad \text{Ecuación 4.}$$

**2.1.4 Flujo Compresible y No Compresible:** un flujo se considera incompresible, si al pasar de una sección a otra del conducto los cambios en la densidad del agua son despreciables, y en caso contrario se dice que este es compresible; lo anterior conduce a:

$$dp = 0 \quad \text{Ecuación 5}$$

para un flujo incompresible, y

$$dp \neq 0 \quad \text{Ecuación 6.}$$

para uno compresible.

**2.1.5 Flujo Transitorio:** se define como el flujo no permanente intermedio que tiene lugar entre el permanente inicial y final en un conducto. Un ejemplo particular importante de este tipo de flujo es el fenómeno denominado como golpe de ariete.

## **2.2 RESONANCIA**

Este fenómeno se puede presentar, por ejemplo, cuando en un conducto a presión existen perturbaciones ocasionadas por las vibraciones de dispositivos que están colocadas a lo largo del mismo, como las válvulas de no retroceso y las de seccionamiento, que pueden originar incrementos de presión superiores a los causados por el golpe de ariete cuando el periodo de las vibraciones se aproxima al de este último fenómeno .

## **2.3 CAVITACION**

La cavitación es un fenómeno que se produce siempre que la presión absoluta en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible que se conoce como presión de vaporización del líquido  $P_v$  para la temperatura local del mismo .

Una vez alcanzada esta presión el líquido entra en ebullición y se originan en su seno cavidades o burbujas de vapor, que son transportadas por la corriente hasta puntos donde la presión tiene un valor suficiente para que se produzca la condensación de tales cavidades, misma que tiene lugar en forma violenta y puede ocasionar graves daños en los componentes de un sistema hidráulico.

## **2.4 COMPRESIBILIDAD**

La compresibilidad de un líquido es una medida del cambio en su volumen y densidad originales cuando se somete a una determinada presión. Si un volumen



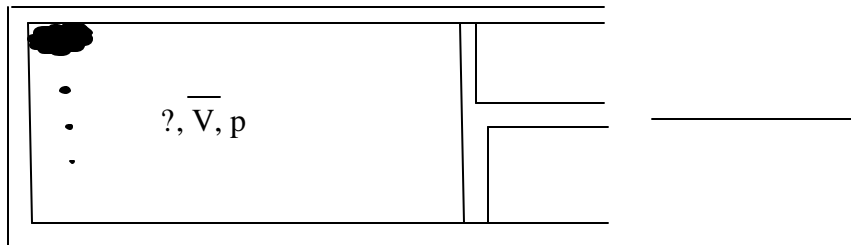
del líquido de densidad  $\rho$ , sujeto a una presión  $p$ , se comprime por efecto de una fuerza  $F$  tal como se indica en la figura 1, la masa total del fluido  $\rho V$  permanece constante, por lo que:

$$d(\rho V) = \rho dV + V d\rho = 0 \quad \text{Ecuación 7.}$$

Y de aquí se obtiene

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dV}{V} \quad \text{Ecuación 8.}$$

si se multiplican ambos miembros de la ecuación anterior por  $d\rho$  resulta:



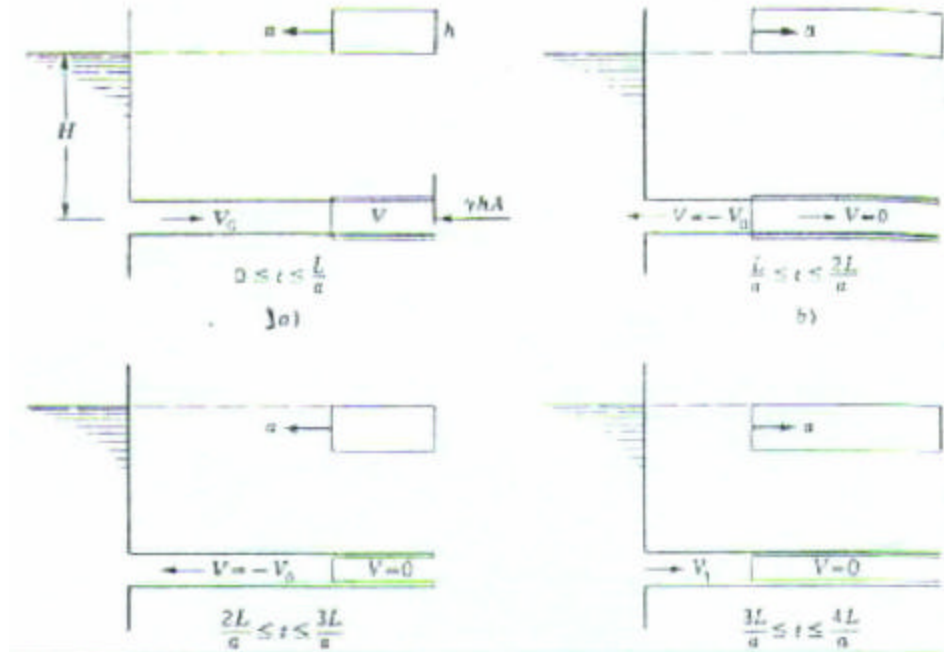
**Figura 1 Compresión de Fluido**

### 3. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE

El golpe de ariete se puede presentar en una tubería que conduzca un líquido hasta el tope, cuando se tiene frenado o una aceleración; Por ejemplo, el cambio en la abertura de una válvula en la línea. Si los cambios son graduales, los cálculos se pueden efectuar siguiendo métodos como los empleados en el caso de las oscilaciones en un tubo en forma de U, es decir considerando incompresible al líquido y rígido al conducto. Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el escurrimiento, el flujo a través de la válvula, iniciándose así un pulso de alta presión que se propaga en dirección contraria al del escurrimiento. Este pulso de presión hace que la velocidad del flujo disminuya. La presión en el lado aguas abajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del escurrimiento, disminuyendo también la velocidad del flujo. Si el cierre de la válvula es suficientemente rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja se puede formar una bolsa de vapor aguas debajo de la válvula; cuando esto ocurre, la cavidad del vapor puede eventualmente reducirse en forma violenta y producir una onda de alta presión que se propaga en la dirección aguas abajo.

Antes de deducir las ecuaciones que describen el fenómeno del golpe de ariete, se dará una relación de la secuencia de eventos que se presentan al cerrarse

bruscamente una válvula al final de una tubería proveniente de un vaso de almacenamiento. **Figura 2.**



**FIGURA 2. Condiciones de Conductos**

En este caso, se despreciará fricción. En el instante en que se cierra la válvula ( $t = 0$ ), el líquido más cercano a ella se comprime al mismo tiempo que su movimiento se reduce a cero; En estas condiciones, las paredes del conducto sufren una expansión **Fig. 2a.**

Tan pronto como se comprime la primera capa de líquido, el proceso se repite con la siguiente capa. El líquido en las partes mas alejadas aguas arriba de la válvula

continúa moviéndose sin que se vea afectada su velocidad hasta que es alcanzado por el efecto de la compresión del líquido que continúa llegando.

La alta presión que se desarrolla se mueve en dirección aguas arriba como una onda frenando al fluido hasta lograr su reposo, comprimiéndolo y dilatando las paredes de la tubería, Cuando la onda alcanza el extremo aguas arriba de la tubería ( $t = L / a$ ), todo el líquido se encuentra bajo una carga adicional  $h$  toda la cantidad de movimiento se ha perdido y toda la energía cinética se ha convertido en energía elástica.

En estas condiciones y, dado que la presión en el vaso de almacenamiento no ha cambiado, se tiene un desbalance en el extremo aguas de la tubería expandida comienza a escurrir con velocidad en sentido contrario, es decir, de la válvula hacia el vaso, comenzando en el extremo aguas arriba del conducto.

La presión en el fluido vuelve a tener el valor que tenía antes del cierre de la válvula, la pared del tubo recupera sus dimensiones originales y el líquido adquiere una velocidad  $V_0$  en el sentido contrario al original, ahora va de la válvula hacia el vaso.

Este proceso de conversión viaja hacia el extremo donde se encuentra la válvula a la velocidad del sonido en la tubería. En el instante  $2L / a$ , la onda ha llegado hasta la válvula y la presión en toda la tubería ha llegado a su valor normal, siendo

la velocidad del líquido en todo el conducto igual a  $V_0$  y en dirección hacia el vaso de almacenamiento.

Como la válvula se encuentra cerrada, no se dispone de líquido que mantenga el escurrimiento a través de ella, y por tanto, se desarrolla una presión negativa ( $-h$ ) tal que el fluido se frena otra vez hasta alcanzar el reposo. Esta onda de presión baja se propaga en dirección aguas arriba a una velocidad ( $a$ ), haciendo que el fluido sucesivamente se frene y logre un estado de reposo al mismo tiempo que se expande debido a la baja presión, ocasionando que las paredes del fluido se contraigan.

En el instante en que la onda de presión negativa llega al extremo superior de la tubería, es decir,  $(3L / a \text{ s})$  después del cierre de la válvula, el líquido se encuentra en reposo pero uniformemente a una carga menor, en  $(-h)$ , que la que tenía antes del cierre. En estas condiciones, se tiene una vez más un desbalance en el vaso de almacenamiento, lo cual ocasiona que el fluido comience a moverse desde el vaso hacia la tubería, adquiriendo una velocidad  $V_0$  tomando progresivamente las condiciones normales conforme a la onda que viaja a la velocidad ( $a$ ).

En el momento en que la onda llega a la válvula, las condiciones en que todo el sistema son exactamente las mismas que se tenía en el instante del cierre de la válvula, ocurrido  $4L / a \text{ s}$  antes.

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

La secuencia de eventos que tiene lugar en una tubería después del cierre de una válvula, se puede comparar con el paro brusco de un tren de carga al chocar contra un obstáculo inmóvil. El primer vagón comprime el muelle de su acoplamiento con la máquina y se detiene conforme ejerce una fuerza contra la locomotora; los demás vagones continúan moviéndose con su velocidad original, hasta que el vagón precedente a cada uno de ellos se detiene bruscamente en forma análoga a como hizo el primero: De este modo; una vez que el último vagón se ha detenido, toda la energía queda acumulada en los muelles de acoplamiento comprimidos ( se han despreciado las pérdidas).

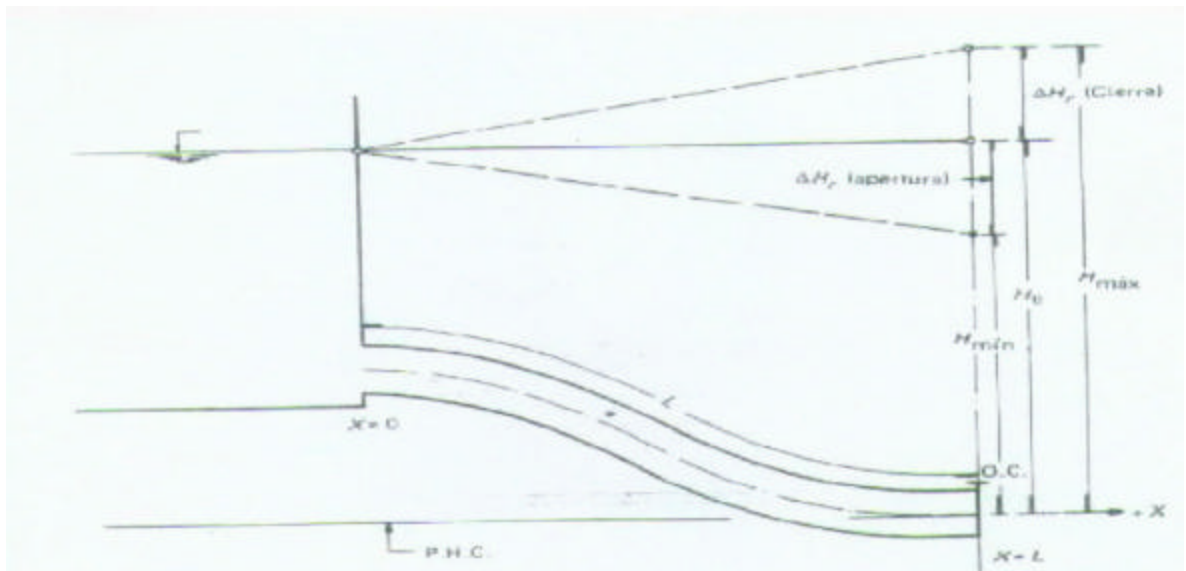
En estas condiciones, el vagón del final se encuentra bajo la acción de una fuerza desbalanceada comenzando, por tanto, a moverse hacia atrás y ocasionando que sucesivamente, bajo la acción de una fuerza desbalanceada.

Este efecto se presenta como una onda que se propaga hacia la locomotora, logrando a su paso que cada vagón adquiera una velocidad igual a la original pero en sentido contrario. Como la máquina se encuentra inmóvil el vagón inmediatamente detrás de ellas se vuelve detener una vez que llega onda proviene del vagón final del tren; esto se debe a la fuerza de tensión al acoplamiento con la máquina, análoga a la onda de baja presión en el golpe de ariete. El proceso se repite vagón por vagón hasta que todo el tren alcanza el reposo, estando todos los acoplamientos bajo la tensión. Enseguida, el vagón del final se pone en movimiento hacia la locomotora, debido a la acción de la fuerza de tensión desbalanceada en su acoplamiento, y el proceso se repite sucesivamente en el resto de los vagones. Cuando esta onda llega a la máquina, todos los vagones se encuentran en movimiento, igual que en el momento del impacto.

En esas condiciones, se repite el ciclo completo; en realidad, la fricción actúa reduciendo la energía a cero en unos cuantos ciclos.

#### 4. TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA

La 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 la 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 indica en la **Figura 3**.



**FIGURA 3. Conducto a Presión**

Esta teoría está basada en las siguientes hipótesis simplificatorias:

- El flujo en el conducto es incompresible.
- Las paredes del conducto se consideran rígidas o indeformables.



- c) El conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección de este siempre es mayor que la presión de evaporización del agua.
- d) Las pérdidas de carga por fricción y la carga de velocidad son despreciable en comparación con los cambios de presión en el conducto.
- e) Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
- f) El nivel del depósito permanece constante durante el tiempo que dura el fenómeno.
- g) La carga piezométrica varía linealmente con respecto a la coordenada curvilínea.

## 5. TEORIA DE LA COLUMNA ELASTICA

Esta teoría se acerca mas al comportamiento real del fenómeno y ha sido comprobada en laboratorio. Las cuestiones de continuidad y dinámica en este caso están sujetas a las siguientes hipótesis simplificadoras:

1. EL conducto permanece lleno de agua todo el tiempo y la presión mínima en cualquier sección siempre es mayor que la vaporización del fluido.
2. Las distribuciones de velocidad y presión en cualquier sección del conducto son uniformes.
3. Las formulas para el cálculo de perdida de la carga cuando el flujo es permanente, también son validas cuando este es transitorio.
4. La pared del conducto y el fluido se comportan de una manera elástica lineal y tienen pequeñas deformaciones.
5. El incrementó de la presión con respecto a la coordenada curvilínea  $x$  resulta pequeño comparado con el incremento de la misma con respecto al tiempo.

$$\frac{dp}{dt} = \frac{p}{t} \quad \text{Ecuación 9}$$

1. El incremento de la carga de velocidad y la densidad de fluido resulta pequeño comparado con el de la carga piezometrica.

$$\frac{HT}{x} + \frac{hp}{p x} = \frac{p * H}{x * t} + \frac{p * pg H}{t} \quad \text{Ecuación 10.}$$

En términos generales, para maniobras de cierre o apertura rápida es conveniente aplicar la teoría de la columna elástica.

## 6. LIMITACIONES DE LA TEORIA DE LA COLUMNA RIGIDA

Como pudo verse en la teoría analizada, se supone que el flujo en el conducto es uniforme, no permanente e incompresible, lo cual resulta aplicable solo a los conductos.

Cuando la maniobra de cierre o apertura del órgano de control es relativamente lenta, es decir, donde  $T > L / 3$  y para una relación de carga y velocidad para el flujo permanente inicial.

## **7. DISPOSITIVOS PARA REDUCIR EL EFECTO PRODUCIDO POR EL GOLPE DE ARIETE**

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.

Un sistema hidráulico puede ser diseñado con 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 la bomba, o en un conducto cuando se llevan a cabo una determinada maniobra de cierre en algún órgano de control ubicado en cualquier sección del mismo.

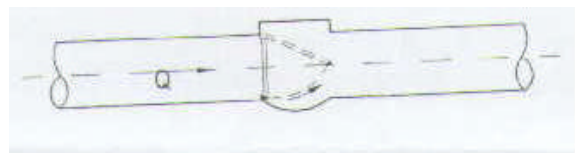
Sin embargo, para el diseño óptimo de un sistema deberá tomarse en cuenta la instalación de uno o varios sistemas de alivio, analizando un número conveniente de alternativas que permitan seleccionar aquella que presente la mayor respuesta ante el fenómeno en estudio y, a su vez, resulte factible económicamente.

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

## 7.1 VÁLVULAS

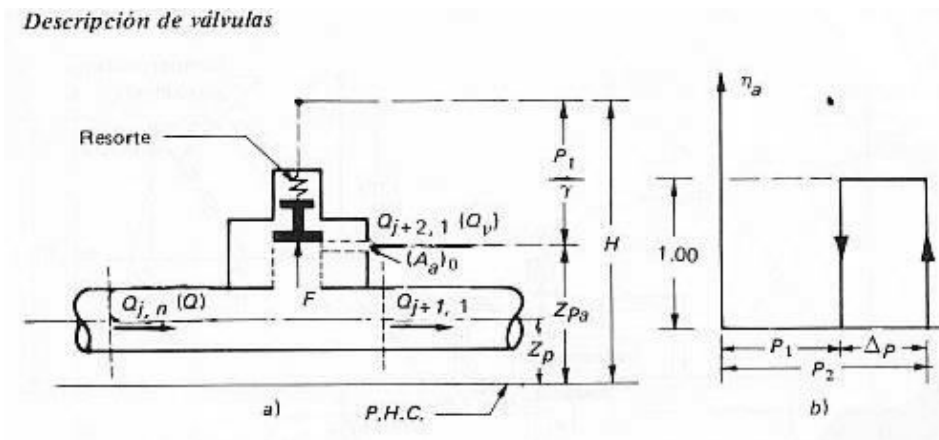
**7.1.1 Válvulas De No Retorno:** estas válvulas se encuentran representadas esquemáticamente en la Figura 4 y sirven para impedir la inversión de flujo en un conducto en general una válvula de este tipo deberá instalarse siempre en la tubería de descarga de una bomba para evitar el flujo en dirección opuesta a la original en los impulsores de esta, también se instalan en el extremo aguas abajo del conducto que une a un tanque unidireccional con la tubería de descarga de una planta de bombeo. Es muy importante descartar que estas válvulas normalmente cierran en forma instantánea cuando se presenta la inversión del flujo y, en algunos casos, su diseño permite que el cierre sea lento y se lleve a cabo un poco antes de la inversión, con el objeto de reducir la magnitud de la sobre presión asociada a un cierre instantáneo, pero si por alguna causa una bomba opera en la zona de disipación de energía durante un determinado intervalo de tiempo antes del cierre de la válvula, el aumento de carga será bastante mayor que el producido por cualquier tipo de cierre ya sea lento o instantáneo.

**FIGURA 4. Válvula de Retorno**



**7.1.2 Válvulas De Seguridad:** estas válvulas se indican en forma esquemática en la figura 5 y sirven 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 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 en forma instantánea (  **Figura 5**  ) Estas válvulas operan totalmente abiertas o totalmente cerradas.



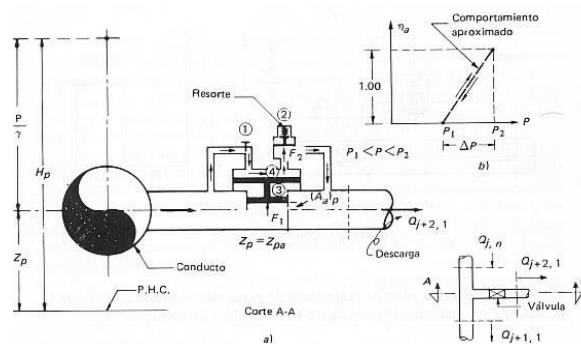
**FIGURA 5. Válvula de Seguridad**

**7.1.3 Válvulas Aliviadoras De Presión:** Estos tipos de válvulas están constituidas por los elementos que esquemáticamente se indican en la figura 6 y su funcionamiento es el siguiente: En condiciones normales de operación la válvula 1 permanece con un grado de apertura previamente calibrado, mientras que la 2, constituida con 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 4 como el mecanismo de la válvula principal 3, prevaleciendo un equilibrio de fuerzas 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 2, 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 fuerza  $F_1$  en el mecanismo de la válvula principal 3, 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 el que presenta la 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 disminuyen, y cuando tiene un valor igual a  $P$ , la válvula 2 cierra y se establece un nuevo equilibrio de fuerzas en el mecanismo de la válvula principal que da lugar al cierre de esta.



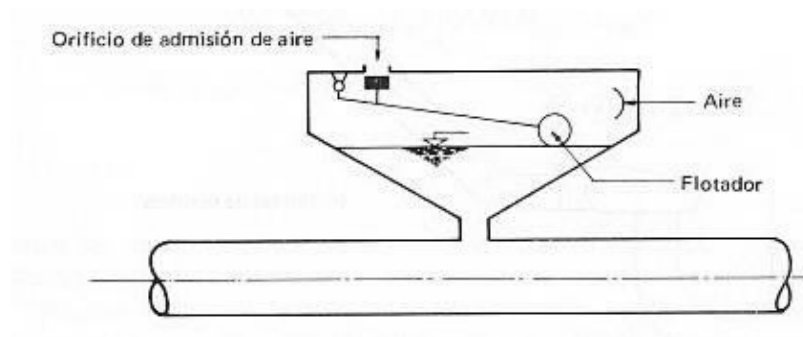
**FIGURA 6. Válvula Aliviadora de Presión**



**7.1.4 Válvula Reguladora De Presin:** Estas válvulas tienen un funcionamiento semejante al de la vista en la sección anterior, solo que tanto la apertura como el cierre de las mismas se lleva a cabo mediante la acción de un servomotor, y se caracteriza porque el tiempo de apertura es relativamente pequeño comparado con el de cierre, lo cual ocasiona incrementos de presión despreciables en el sistema por causa de esta última maniobra.

**7.1.5 Válvulas De Admisin De Aire:** Son como se muestra esquemáticamente en la figura 7 y su funcionamiento es el siguiente:

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

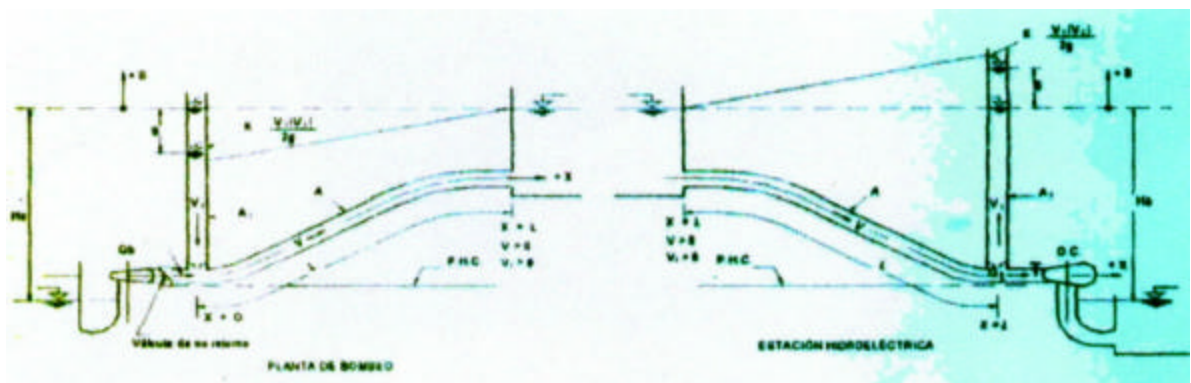


**FIGURA 7. Válvula de admisin de aire**

## 7.2 TANQUES DE OSCILACIÓN

Descripción. Un tanque de oscilación es un dispositivo de alivio frecuentemente utilizado en estaciones hidroeléctricas y en plantas de bombeo para reducir el fenómeno producido por el “Golpe de Ariete”.

Con el objeto de analizar el funcionamiento de estas estructuras se puede considerar los sistemas que se muestran en la **figura 8**, 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 abajo de un órgano de control o una válvula de no retorno respectivamente, y un dispositivo con nivel constante situado en el otro extremo.



**FIGURA 8. Tanque de oscilación**

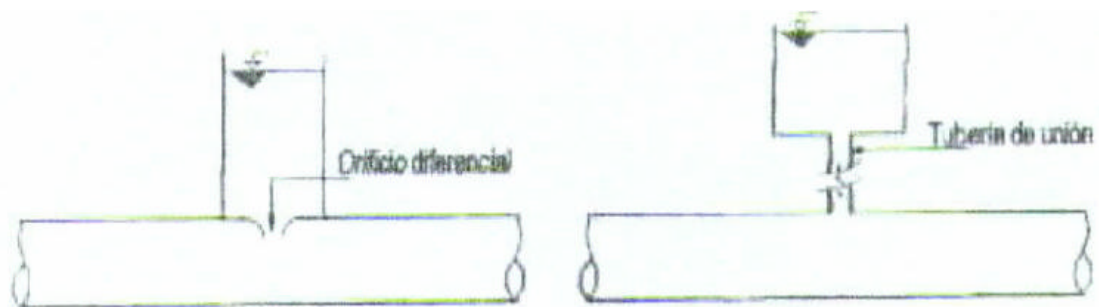
A la planta de bombeo de la **figura 8**, al presentarse una interrupción en el suministro de energía o una falla mecánica en la bomba, ante la reducción de carga en esta última, el nivel del agua en el tanque desciende y da lugar a una disminución en la variación del gasto en la tubería de descarga, disminuyendo con

esto también el valor de presión en esta última; posteriormente, cuando se invierte el flujo en la tubería y cierra la válvula de no retorno, el nivel de agua en el tanque empieza a subir y se transforma la energía tal como se menciona en el párrafo anterior, reduciéndose con esto el valor de la sobre presión en la bomba y la tubería de descarga.

**7.2.1 Tipos 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 del terreno lo permiten sin ocasionar problema.

Dentro de los dos tipos existentes varios modelos, los principales son:

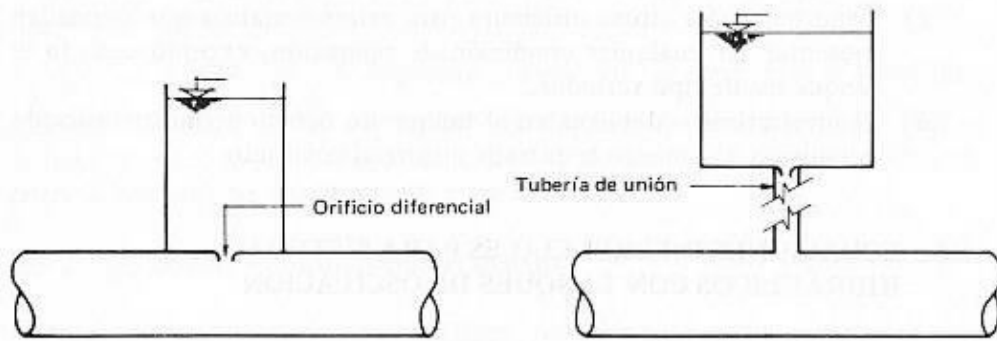
**7.2.1.1 Tanque de tipo simple:** Consiste en un cilindro abierto en la parte superior que se unen con el conducto en su parte inferior **Figura 9**.



**Figura 9. Tanque de Tipo Simple**

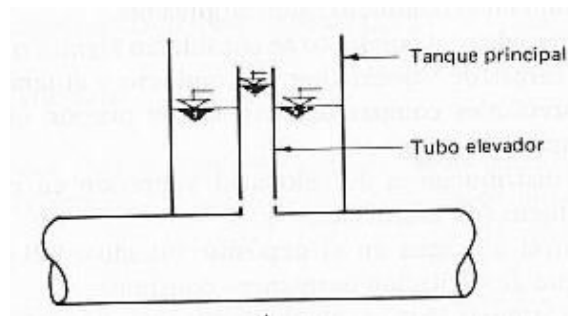
**7.2.1.2 Tanque con orificio diferencial:** Es semejante al de tipo simple, solo que en la parte inferior tiene un estrechamiento conocido como orificio diferencial, que

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 de tipo simple (**Figura 10**).



**Figura 10. Tanque con orificio diferencial**

**7.2.1.3 Tanque diferencial o tipo Jonson:** esta constituido por un tanque principal en donde se aloja un tubo central o tubo elevador, con orificios en su parte inferior (**Figura 11**) y un diámetro aproximado al del conducto (80% como mínimo).

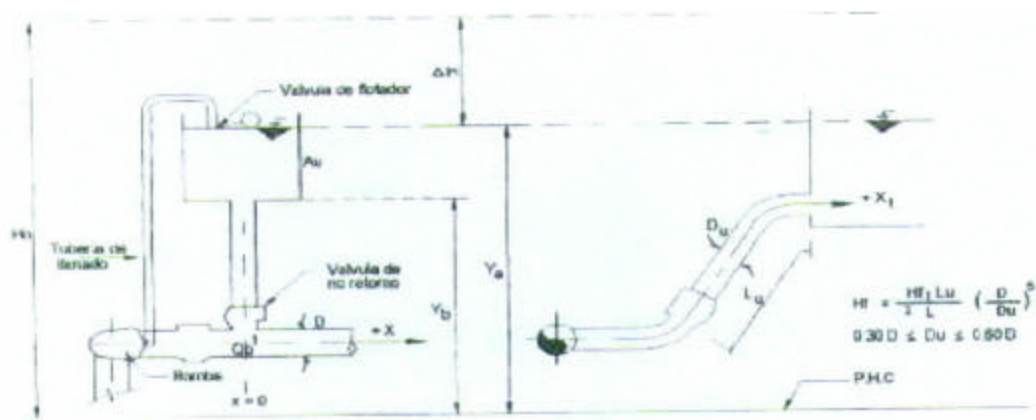


**FIGURA 11. Tanque diferencial**

Cuando existe un incremento de carga en el conducto, por cualquiera de las causas descritas, 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; así mismo, cuando se requiere el suministro instantáneo de agua en el conducto el agua desciende rápidamente por el tubo elevador y, en cualquier caso, las amortiguaciones de las oscilaciones se verifican en forma efectiva gracias al efecto del tanque principal.

### 7.3 TANQUES UNIDIRECCIONALES

Los tanques unidireccionales son dispositivos de alivio que tienen en funcionamiento hidráulico semejante a los de oscilación, pero solo sirven para atenuar la depresión que tiene lugar en la tubería de descarga de una planta de bombeo al presentarse una falla en el suministro de energía a la misma.



**FIGURA 12. Tanque unidireccional**

Como puede verse en la **figura 12**, están conectados a la tubería de descarga mediante un conducto que tiene en su extremo aguas abajo una válvula de no

retorno que cumple con la función de impedir el flujo hacia el tanque, y otro de menor sección con una válvula de flotador que cierra una vez que el tanque se llena cuando la condición de la planta son nuevamente normales.

## CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta lo descrito sobre el Golpe de Ariete, nos damos cuenta de lo difícil de realizar un diseño en el cual se presentaran cargas con ciclos que varían de estado positivo a un estado negativo; debido a esto los factores de seguridad son aun altos complicando así su diseño .
- El fenómeno del Golpe de Ariete se puede evitar, aplicando una velocidad de cierre lo más lenta posible en el órgano de control.
- En casos extremos en tuberías de alta presión es conveniente utilizar uno o mas dispositivos de alivio, para evitar los inconvenientes que trae por consecuencia el Golpe de Ariete.
- Las cargas de presión no deseables, pueden disminuir variando el trazado de los conductos, reduciendo la velocidad durante el flujo permanente.

## RECOMENDACIONES

- Puede ser controlado mediante dispositivos que mas favorezcan a cada caso por lo que hay que tener en cuenta cuando se està haciendo el diseño.
- Se puede evitar el fenomeno mediante una velocidad de cierre del organo de control lo mas lenta posible.
- Realizar un mantenimiento adecuado a los organos de control .
- En caso de fallas en el sistema de energia tener otro dispositivo de alivio para evitar los daños en el sistema .



## **BIBLIOGRAFIA**

**MANCEBO DEL CASTILLO URIEL** , Teoria de Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en la Ingenieria Hidraulica . Mexico D.F.

**VIGGIANO MERIAN , GUILLERMO Y ALVARO CAMACHO , JESUS** , Diseño y Construcccion de un Modelo Para Simular el Fenomeno del Golpe de Ariete .

**STREETER VECTOR L** . Flujo no Permanente en la Mecanica de los Fuidos 4<sup>a</sup> Ed . Mexico . MC. GRAW HILL , 1974 .

**MATIX CLAUDIO** , Mecanica de los fuidos y Maquinas Hidraulicas 2<sup>a</sup> Ed. Mexico .

Cartagena de Indias, Noviembre 10 de 2003

Señores :

**INSTITUCION UNIVERSITARIA TECNOLOGICA DE BOLIVAR**

Comité de Evaluación de Proyectos

Facultad de Ingeniería Mecánica

Respetados señores:

Por medio del presente nos dirigimos a ustedes, con el objeto de presentarles a su consideración, estudio y aprobación de la monografía Teoría del Fenómeno del Golpe de Ariete por requisito para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

Atentamente,

---

FRANCIS MENA CUESTAS  
CC. 79.952.605 de Bogota

---

JHON J. RESTREPO ARISTIZABAL  
CC. 7.921.247 de Cartagena.