



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE,
DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE
HIDRÁULICA**

Antonio Federico Toledo López

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, agosto de 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE,
DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE
HIDRÁULICA**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ANTONIO FEDERICO TOLEDO LÓPEZ
ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2009.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I:	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II:	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III:	Ing. Miguel Angel Dávila Calderón
VOCAL IV:	Br. José Milton De León Bran
VOCAL V:	Br. Isaac Sultán Mejía
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO:	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR:	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR:	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
EXAMINADOR:	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
SECRETARIA:	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE,
DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE
HIDRÁULICA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 17 de julio de 2008.



Antonio Federico Toledo López.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 13 de Julio de 2009

Ingeniero
Pedro Aguilar Polanco
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Aguilar:

Atentamente le informo que he revisado el Trabajo de Graduación del estudiante universitario ANTONIO FEDERICO TOLEDO LÓPEZ, carné 2002-12766, denominado **"ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE, DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA"**, habiéndose desarrollado según el protocolo aprobado.

Deseo manifestar que el estudiante Toledo López ha llenado las expectativas de este trabajo, por lo que en mi calidad de asesor lo doy por aprobado y le solicito darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular me es grato saludarle,

Deferentemente,

"Id y enseñad a Todos"

Una firma manuscrita en tinta negra, que parece ser la del Sr. Sandoval Mendoza.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
ASESOR



Guatemala, 4 de agosto de 2,009

Ingeniero
Sydney Alexander Samuels Milson
Director de Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ingeniero:

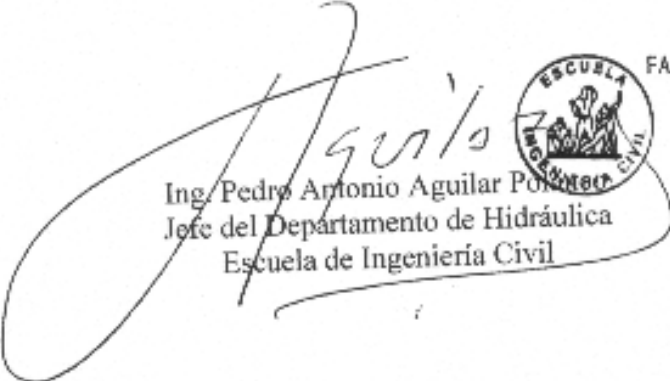
Atentamente y por este medio, envío a usted el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **ANTONIO FEDERICO TOLEDO LÓPEZ**, con el título **"ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE, DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA"**.

Por lo que habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo existiendo la **APROBACIÓN DEL MISMO**, por parte del asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por **APROBADO**; solicitándole darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Pedro Antonio Aguilar Ponce
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

cc. Archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Antonio Federico Toledo López, titulado ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE, DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Mgter. Ing. Sydney Alexander Samuels



Guatemala, agosto 2009

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE, DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA**, presentado por el estudiante universitario **Antonio Federico Toledo López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Reinos
Decano



Guatemala, agosto de 2009

/cc

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

Todopoderoso por ser la razón de mi existencia y el motivo de llevar una vida y profesión digna.

MIS PADRES

Por su lucha, por su amor, por su apoyo infinito y por haber sembrado en mí el deseo de superación.

MIS CATEDRÁTICOS

Por su tiempo, dedicación y enseñanzas, especialmente al Ingeniero Luis Manuel Sandoval Mendoza y al Ingeniero Daniel Antonio Colocho.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

De la Universidad de San Carlos de Guatemala, por formarme y enseñarme los conocimientos de la Ingeniería Civil, por ser parte de mi vida y respaldo de mi profesión.

TODA PERSONA

Que en su corazón sabe que contribuyó en mi desarrollo, con sus conocimientos y experiencias.

ACTO QUE DEDICO A:

MIS PADRES

Pascual Pedro Toledo (✕ con eterno amor)

María López González

MIS HERMANOS

Cristian

Mónica

Karen

Juan

Lucrecia

Jovita

Pedro

Verónica

MIS ABUELOS

Pedro Pascual Toledo ✕

Juana Juan ✕

Antonio Mateo

Concepción González

MI GUATEMALA

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE	1
1.1. Definición del golpe de ariete	1
1.2. Mecanismo del fenómeno	3
1.2.1. Proceso del golpe de ariete	5
1.3. Causas que provocan el golpe de ariete	10
1.3.1. Cambios en la abertura de una válvula, accidental o planeado	10
1.3.2. Cierre rápido de una válvula	11
1.3.3. Otras causas	11
1.4. Implicaciones del golpe de ariete en un sistema de tuberías	12
2. CONDICIONES FÍSICAS E HIDRÁULICAS A CONSIDERAR EN EL GOLPE DE ARIETE	13
2.1. Velocidad de propagación de ondas de velocidad y presión	13
2.2. Periodo de la tubería	16
2.3. Tiempo de cierre	17

2.3.1. Cierre rápido ($0 < t_c < 2t_0$)	18
2.3.2. Cierre lento ($t_c > 2t_0$)	18
2.4. Ecuaciones del golpe de ariete	18
2.4.1. Cierre total o parcial en una tubería elástica	19
2.4.1.1. Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula	20
2.4.1.2. Sobrepresión en cierre instantáneo parcial de la válvula	21
2.4.2. Sobrepresión máxima en cierre total, lento y uniforme de la válvula	22
2.4.2.1. Otras fórmulas y teorías	25
2.4.3. Tubería de característica variable	26
2.5. Golpe de ariete en líneas de descarga	28
2.6. Medidas generales para evitar el golpe de ariete	
en un sistema de bombeo	30
2.6.1. Válvulas de retención	31
2.6.2. Amortiguador de golpe de ariete	32
2.6.3. Válvulas de alivio contra el golpe de ariete	33
2.7. Cálculo de la sobrepresión	39
3. SISTEMAS DE CONTROL DEL GOLPE DE ARIETE	45
3.1. Acumuladores o depósitos de aire	45
3.2. Chimeneas de equilibrio	47
3.3. Válvulas de descarga	50
3.4. Ventosas	51
3.4.1. Válvulas de admisión de aire	51
3.4.2. Válvulas de expulsión de aire	52
3.5. Válvulas anticipadoras de onda	55
3.6. Otros métodos para reducir el golpe de ariete	56
3.6.1. Volante de inercia	56
3.6.2. Limitar la velocidad de diseño	56

4. EXPERIMENTO DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE	57
4.1. Descripción de la instalación e instrumentación	57
4.2. Descripción del ensayo	59
4.3. Obtención de datos	61
4.4. Procedimiento para realizar los cálculos	63
4.4.1. Cálculo de resultados teóricos	65
4.4.2. Cálculo de resultados experimentales	67
4.5. Análisis de resultados	69
4.6. Conclusiones	70
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
APÉNDICES	77
ANEXOS	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Sobrepresión debida al cierre de una válvula	2
2. Instalación susceptible al fenómeno de golpe de ariete	3
3. Esquema de evolución del golpe de ariete. No hay perturbación	5
4. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo t_0	5
5. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 0.5 L/C$	6
6. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = L/C$	6
7. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 1.5 L/C$	7
8. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 2 L/C$	7
9. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 2.5 L/C$	8
10. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 3 L/C$	8
11. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 3.5 L/C$	9
12. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 4 L/C$	9
13. Diagrama de sobrepresión y depresión para los casos teóricos y reales	10
14. Distribución de la sobrepresión debida al cierre lento de una válvula	24
15. Monograma de Allievi	26
16. Dispositivos de control y protección contra el golpe de ariete	30
17. Tipos de válvulas de retención	32
18. Amortiguador de golpe de ariete	33

19. Válvula de alivio	34
20. Disposición correcta de dispositivos contra el golpe de ariete	35
21. Dispositivos contra el golpe de ariete omitiendo el amortiguador	36
22. Dispositivos contra el golpe de ariete utilizando una válvula de retención de vaivén	37
23. Válvulas de retención colocadas erróneamente en un sistema de bombeo	37
24. Conexión de bomba mostrando los elementos de control y protección	38
25. Ejemplo 2	40
26. Cámara de aire	46
27. Chimenea de equilibrio	47
28. Esquema con chimenea de equilibrio	48
29. Válvula de admisión de aire	51
30. Válvula de expulsión de aire	53
31. Posición de válvulas de aire	54
32. Fotografía de la instalación para el ensayo del golpe de ariete	59
33. Esquema de alturas a considerar en el ensayo	60
34. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 1	78
35. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 2	79
36. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 3	80
37. Bosquejo del circuito para simular el golpe de ariete 1	81
38. Bosquejo del circuito para simular el golpe de ariete 2	82
39. Circuito para simular el golpe de ariete	82

TABLAS

I. Valores de k para hallar la celeridad con la expresión de Allievi	15
II. Golpe de ariete, principales teorías y fórmulas	25

III. Diámetro de ventosas en función del diámetro de tubería	55
IV. Datos obtenidos con H = 54.4 cm	62
V. Datos obtenidos con H = 65.3 cm	62
VI. Valores promedio de los ensayos	63
VII. Resumen de resultados	68
VIII. Materiales utilizados para simular el golpe de ariete	77
IX. Tubería de PVC 1120 ASTM D 2241 SDR 17	83
X. Tubería de PVC 1120 ASTM D 2241 SDR 26	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A_c	Área transversal de la tubería
C	Celeridad
D	Diámetro interno de la tubería
e	Espesor de tubería
E	Módulo de elasticidad del material de la tubería
F_i	Fuerza de inercia
g	Aceleración de la gravedad
H	Presión inicial o carga inicial
ΔH	Sobrepresión en metros columna de agua
t_c	Tiempo de cierre de la válvula
t_0	Tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre la válvula y el depósito o viceversa
T	Período o fase de la tubería
K	Módulo de elasticidad del fluido
l	Longitud finita de tubería
L	Longitud de tubería
m	Masa
\emptyset	Diámetro nominal
ΔP	Sobrepresión
ρ	Densidad del líquido
Q	Caudal
v	Velocidad del líquido en la tubería

GLOSARIO

Diámetro nominal	Designación numérica de la dimensión, que corresponde al número redondeado más aproximado al valor real del diámetro.
Bucle	Es una sentencia o fenómeno que se realiza repetidas veces.
Energía cinética	Es el trabajo necesario para acelerar un cuerpo de una masa dada desde el reposo hasta la velocidad que posee.
Fluctuación	Vacilar de las aguas por el movimiento agitado de ellas, porque crecen y disminuyen alternativamente.
Fluido incompresible	Fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición.
Inercia	Es la tendencia natural de los cuerpos a mantener un estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme (velocidad constante).
Inyector de una turbina	Es el órgano regulador del caudal del chorro de agua.

Momento de inercia	Desempeña un papel análogo al de la masa inercial en el caso del movimiento rectilíneo y uniforme.
Onda oscilatoria	Onda en la que cada partícula individual oscila alrededor de un punto, con un desplazamiento en la dirección de traslación de la onda.
Pistón	Parte cilíndrica que se mueve dentro de un motor durante su operación. Es uno de los componentes principales en la operación del motor.
Principio de conservación de la energía	Afirma que la energía no puede crearse ni destruirse, sólo puede cambiar de una forma a otra.
Resonancia	Fenómeno que se produce al coincidir la frecuencia propia de un sistema mecánico, hidráulico, etc., con la frecuencia de una excitación externa.
Turbina	Máquina rotativa que convierte la energía cinética de un fluido en energía mecánica.

RESUMEN

El fenómeno transitorio de golpe de ariete se estudia de una forma lógica por medio de cuatro capítulos que lo presentan a detalle. En el capítulo uno se describe y define el golpe de ariete. Asimismo se presentan las causas que lo producen y las implicaciones que genera la existencia de dicho fenómeno.

El capítulo dos presenta las condiciones físicas e hidráulicas a considerar en el golpe de ariete, por ejemplo: la celeridad, el periodo de la tubería, la velocidad del flujo, el tiempo de cierre de la válvula, etc. Además presenta el tema de la tubería de característica variable. Sin embargo, lo más importante de este capítulo es que da a conocer las ecuaciones del golpe de ariete para el cálculo de la sobrepresión, ya sea para cierre rápido o lento.

El capítulo tres da a conocer los sistemas de control contra el golpe de ariete, así como las condiciones adecuadas para su elección. Entre los sistemas de control se puede mencionar: la chimenea de equilibrio, los acumuladores o depósitos de aire y las válvulas de descarga, entre otros.

El capítulo cuatro abarca el experimento realizado para el estudio del golpe de ariete en el que se comparan y discuten resultados teóricos y experimentales. Dicho laboratorio se realizó a través de un experimento controlado y de una observación directa.

OBJETIVOS

General:

- Presentar un documento con toda la información necesaria sobre el fenómeno hidráulico de golpe de ariete, para que pueda utilizarse como referencia en los cursos de Ingeniería Civil que abarquen este tema.

Específicos:

1. Describir y definir teóricamente el golpe de ariete y dar a conocer las causas e implicaciones de este fenómeno transitorio.
2. Establecer los criterios de diseño que permitan reducir o evitar el impacto del golpe de ariete en conductos forzados y en sistemas de bombeo.
3. Observar y comprender el fenómeno de golpe de ariete provocado por el cierre de una válvula en un sistema por gravedad.
4. Hallar experimentalmente el valor de la sobrepresión que se genera en una tubería cuando se produce el golpe de ariete.
5. Hallar teóricamente el valor de la sobrepresión que se genera en una tubería cuando se produce el golpe de ariete y compararlo con el valor experimental.

INTRODUCCIÓN

Dentro de la problemática de la conducción de líquidos tiene enorme importancia el suministro de agua potable a cualquier comunidad por pequeña que ésta sea, y dentro del diseño y cálculo de la conducción de agua, un fenómeno que debe considerarse es el golpe de ariete.

El golpe de ariete es un fenómeno que se produce en una tubería forzada por el efecto de fluctuación del caudal circulante y que se traduce en una variación de la presión interna en la tubería por encima o por debajo de la presión de trabajo. Por lo tanto resulta conveniente y esencial estudiar el fenómeno transitorio de golpe de ariete al que puede estar sujeto, la mayor parte de los sistemas de conducción y distribución de agua. El golpe de ariete puede presentarse en un sistema hidráulico por diferentes razones, por ejemplo: por cambios en la abertura de una válvula, por la acumulación de aire, por el arranque o interrupción de bombas, etc. Debido a los efectos que el golpe de ariete produce, puede dejar en mal actividad a los sistemas de conducción de agua e incluso dañarlos hasta dejarlos sin funcionamiento. Entre las medidas generales contra el golpe de ariete se puede disponer de válvulas de alivio, válvulas de cheque, cámaras de aire, así como la manipulación del cierre de válvulas, entre otras formas. Dichas medidas generales tienen como fin evitar o reducir el golpe de ariete, traduciéndose esto al final en un ahorro de recursos, punto elemental de la realización de este trabajo. Por otro lado la realización teórica y experimental del estudio del golpe de ariete permite el análisis de las características y comportamiento del fenómeno a través de la chimenea de equilibrio utilizada, pues teoría y práctica, son el propósito del desarrollo de este tema.

1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE

En las tres fases de proyecto, instalación y funcionamiento de ciertos elementos, estructuras y máquinas hidráulicas, es necesario un control del fenómeno de golpe de ariete, ya que éste origina sobrepresiones o depresiones excesivas que pueden conducir a averías, llegando hasta la destrucción misma de las estructuras, máquinas hidráulicas o de los accesorios y elementos del sistema.

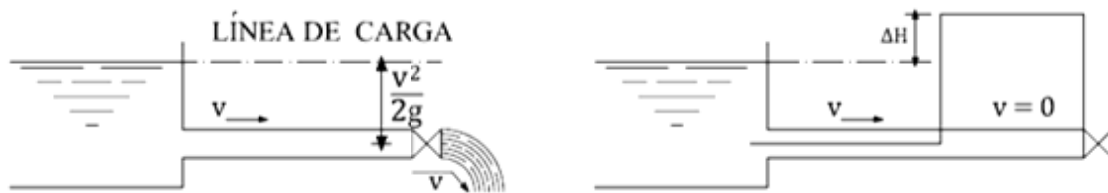
1.1. Definición del golpe de ariete

Se denomina golpe de ariete al choque que se produce sobre las paredes de un conducto forzado cuando el movimiento del líquido es modificado bruscamente. En otras palabras, consiste en la sobrepresión (o subpresión) que las tuberías reciben al cerrarse o abrirse bruscamente una válvula o al ponerse en marcha o detenerse una máquina hidráulica. El golpe de ariete puede ser positivo o negativo, de acuerdo a la forma en que se produzca. Cuando se cierra súbitamente una válvula se presenta un golpe de ariete positivo. El golpe de ariete negativo ocurre al efectuarse la apertura brusca de la válvula.

El fenómeno de golpe de ariete se presenta en forma de una onda oscilatoria que viaja a lo largo de la tubería. El primer pico que registra esa onda corresponde a la sobre elevación máxima y tiene la misma magnitud para el golpe de ariete positivo y para el negativo.

En el caso del cierre de una válvula, la fuerza viva con que el agua estaba animada se convertiría en trabajo (fig. 1), determinando en las paredes de la tubería presiones superiores a la carga inicial.

Figura 1. Sobrepresión debida al cierre de una válvula



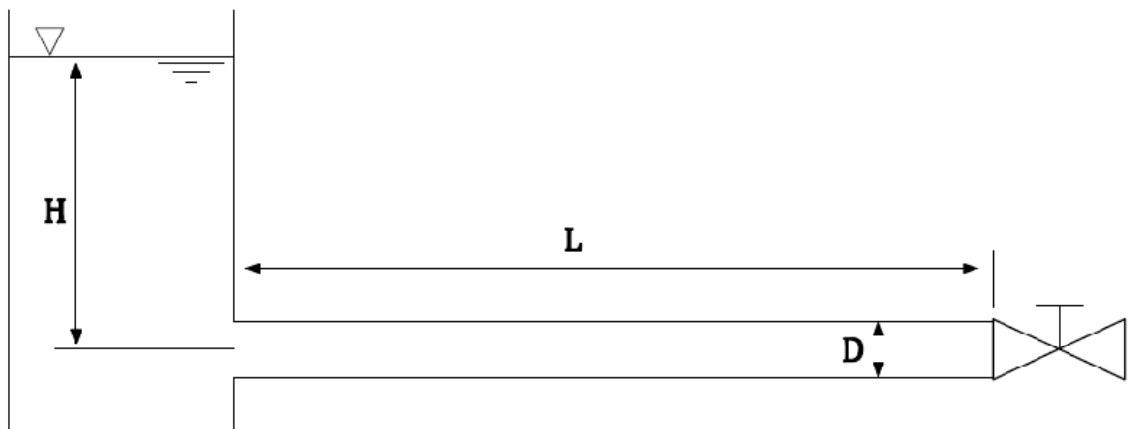
Fuente: J. M de Azevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**, pág. 292

Si el tiempo de cierre $t_c = 0$, se produce el cierre instantáneo y considerando que el agua fuese incompresible y la tubería no fuese elástica, la sobrepresión tendría un valor infinito. En la práctica, el cierre siempre lleva algún tiempo, por pequeño que sea y la energía que va a absorberse se transforma en esfuerzos de compresión del agua y deformación de las paredes de la tubería.

1.2. Mecanismo del fenómeno

El golpe de ariete es un fenómeno que se produce en una tubería forzada (líquido hasta el tope) por el efecto de fluctuación del caudal circulante, y que se traduce en una variación de la presión interna en la tubería, por encima o por debajo de la presión de trabajo. La figura 2 representa una tubería de longitud L , espesor e y diámetro interior D por la que circula agua proveniente de un depósito aguas arriba y que termina en una válvula en su extremo derecho. Si se cierra la válvula rápidamente, en virtud del principio de conservación de la energía al disminuir la energía cinética, ésta se va transformando en un trabajo de compresión del fluido que llena la tubería, así como en un trabajo necesario para dilatar esta última. Lo anterior da origen al golpe de ariete positivo o sobrepresión. Por el contrario, al abrir rápidamente una válvula se puede producir una depresión: golpe de ariete negativo o subpresión.

Figura 2. Instalación susceptible al fenómeno de golpe de ariete



En el estudio de este fenómeno hay que abandonar las dos hipótesis normalmente adoptadas en flujo en tuberías: fluido incompresible y régimen permanente. El golpe de ariete es un fenómeno transitorio y por tanto de régimen variable, en el que la tubería ya no es rígida y el líquido es compresible.

Aunque es físicamente imposible cerrar una válvula instantáneamente, el estudio inicial del caso de cierre instantáneo ayuda a comprender el estudio de los casos reales. Así, al cerrarse instantáneamente la válvula de la figura 2, el frenazo provoca una sobrepresión ΔP que se transmite aguas arriba a la velocidad del sonido, C . Por tanto, esta transmisión aguas arriba no ocurre de forma instantánea, sino que lo hace a una velocidad finita (C). En la zona por donde ha pasado la onda, el flujo se ha detenido, el fluido se ha comprimido y la tubería se ha expandido, mientras que donde aún no ha llegado, las condiciones siguen siendo las iniciales. De esta forma, se ha creado una onda elástica, una onda de presión que se propaga por la tubería, se refleja en el depósito, vuelve a la válvula y de nuevo al depósito, así sucesivamente, originando sobrepresiones y depresiones en la tubería, la cual se dilata o contrae al paso de la onda.

Si la longitud de la tubería se denota como L , entonces el tiempo que tarda la onda en recorrer la distancia entre la válvula y el depósito es: $t_0 = L/C$. Al cabo de un tiempo $4 t_0 = 4 L/C$, el ciclo se repite. Evidentemente, una situación ideal como esta conduciría a un bucle infinito. El proceso se repetiría indefinidamente si no existiera rozamiento en la tubería. En un caso real con rozamiento, el fenómeno se va amortiguando con el tiempo.

1.2.1. Proceso del golpe de ariete

A continuación se detalla el proceso del golpe de ariete instantáneo durante un ciclo completo. La explicación se complementa con la evolución gráfica de la figura correspondiente.

Figura 3. Esquema de evolución del golpe de ariete. No hay perturbación. Régimen permanente. El líquido en la tubería se desplaza con velocidad v desde el depósito a la válvula. Diámetro de la tubería normal, D .

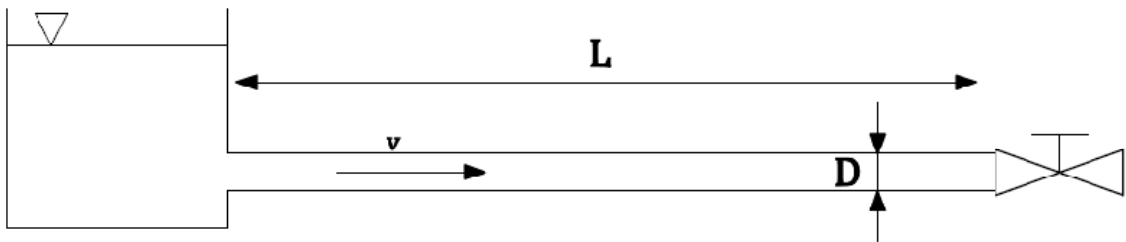


Figura 4. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo 0. La válvula se cierra instantáneamente. La velocidad del líquido se anula a partir de la válvula, no instantáneamente, en toda la tubería.

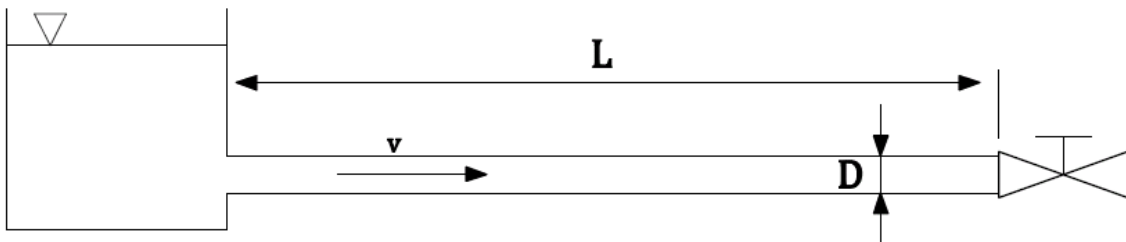


Figura 5. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 0.5 L/c$. La onda de presión se ha propagado hacia el embalse con celeridad C y el frente de onda ha llegado a la mitad de la tubería. Mitad derecha de la tubería dilatada por la sobrepresión. Mitad izquierda, diámetro normal. En esa mitad izquierda el agua sigue circulando con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha, $v = 0$. El fluido se ha comprimido en contra de la válvula.

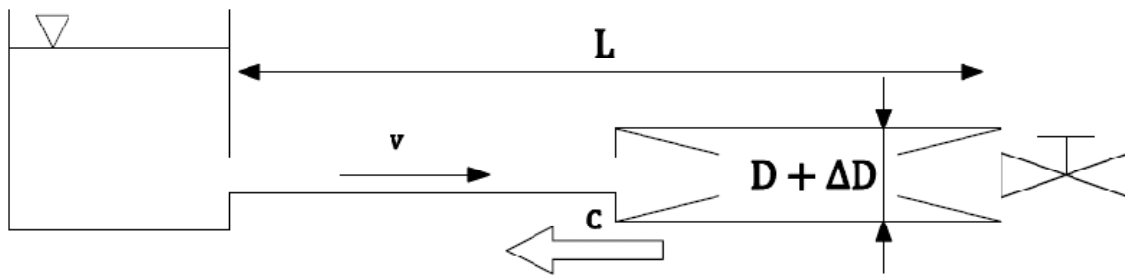


Figura 6. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = L/c$. La onda de presión ha llegado al depósito. En toda la tubería el líquido está en reposo, $v = 0$, pero no en equilibrio, pues se encuentra comprimido. Toda la tubería está dilatada. Como un resorte que se recupera tras la compresión, el agua de la tubería comienza a moverse con velocidad v , pero dirigida en sentido contrario, hacia el embalse. El líquido comienza a ponerse en movimiento justo en la zona inmediatamente después de la unión tanque-tubería.

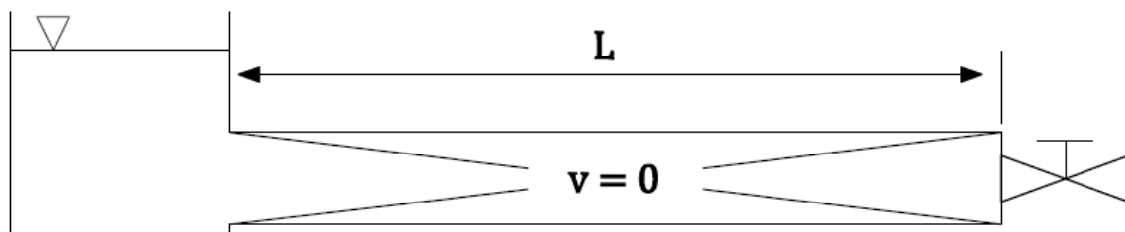


Figura 7. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 1.5 L/C$. La mitad izquierda de la tubería se ha contraído a su diámetro normal. La onda sigue propagándose hacia la derecha con velocidad C . En la mitad izquierda de la tubería el fluido circula con velocidad v .

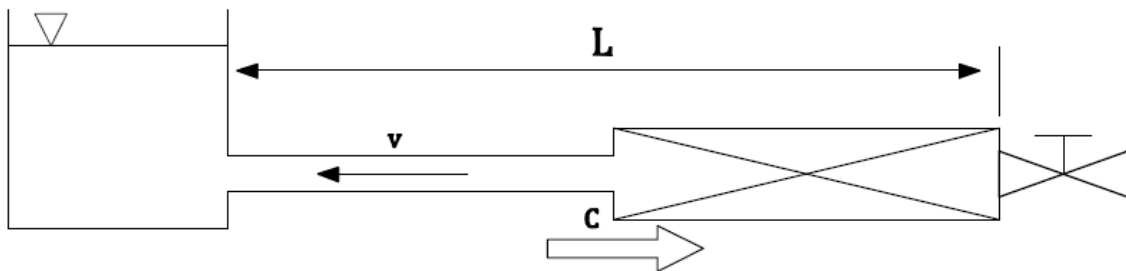


Figura 8. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 2 L/C$. Diámetro de toda la tubería normal. Todo el fluido de la tubería en movimiento desde la válvula hacia el embalse con velocidad v . No hay sobrepresión en ninguna parte de la tubería, pero por la inercia, la presión continúa disminuyendo, la onda elástica se sigue propagando, ahora con depresión desde la válvula hacia el embalse con la velocidad C : el diámetro de la tubería irá disminuyendo por debajo de su diámetro normal.

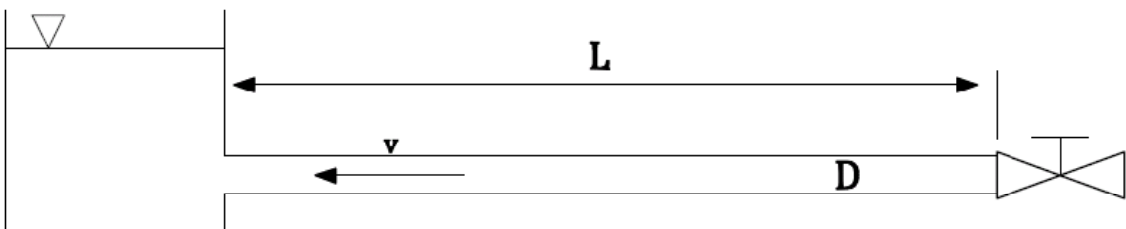


Figura 9. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 2.5 L/c$. La depresión ha alcanzado la mitad de la tubería. La mitad de la derecha contiene agua en reposo y a una presión por debajo de lo normal. El diámetro de la tubería en esta mitad es inferior al normal.

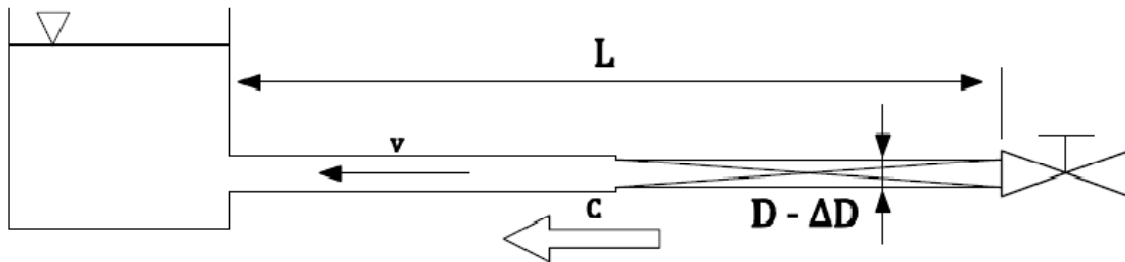


Figura 10. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 3 L/c$. El agua en toda la tubería está en reposo; pero no en equilibrio, y el agua inicia su movimiento desde el embalse a la válvula con velocidad v dirigida hacia la derecha. La depresión reina en toda la tubería. El diámetro de toda la tubería es inferior al normal.

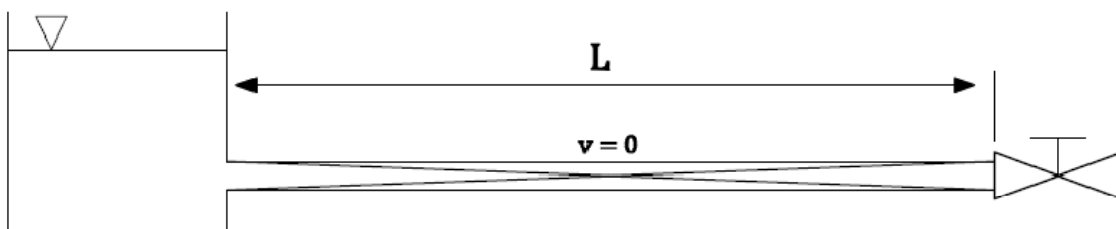


Figura 11. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 3.5 L/C$. En la mitad izquierda de la tubería el fluido está en movimiento con velocidad v hacia la válvula. En la mitad derecha, el líquido continúa en reposo y en depresión. El diámetro de la parte izquierda es normal. El de la mitad derecha menor que el normal; C y v tienen el mismo sentido.

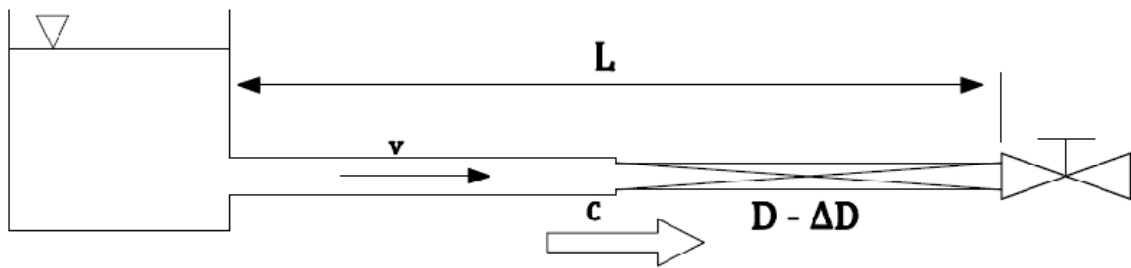
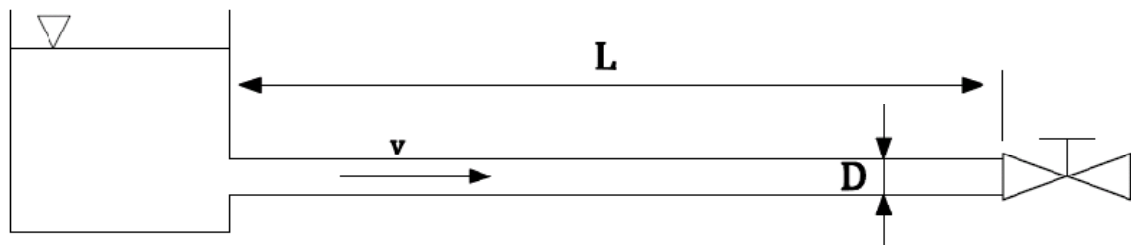
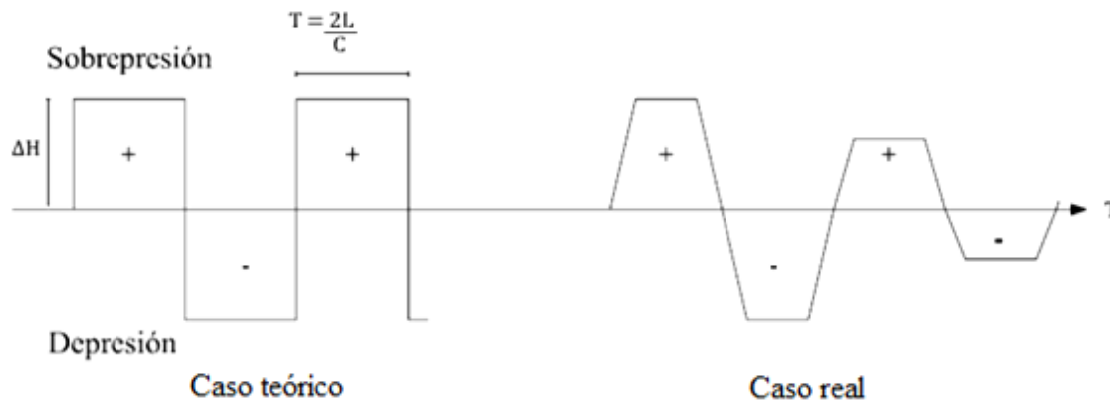


Figura 12. Esquema de evolución del golpe de ariete. Tiempo $t_0 = 4 L/C$. Diámetro de la tubería normal. Todo el fluido en movimiento con velocidad v hacia la válvula. Todo igual que el tiempo 0, así que efectivamente el período de este movimiento es cuatro veces t_0 .



En las consideraciones hechas arriba, fue despreciada la fricción a lo largo de la tubería, que en la práctica, contribuye para la amortiguación de los golpes sucesivos (fig. 13).

Figura 13. Diagrama de sobrepresión y depresión para los casos teóricos y reales



Fuente: Ricardo Alfredo López Cualla. **Diseño de acueductos y alcantarillados**, pág. 191

1.3. Causas que provocan el golpe de ariete

Los siguientes son algunos casos en que se puede presentar el golpe de ariete:

1.3.1. Cambios en la abertura de una válvula, accidental o planeado

Si los cambios en una válvula son graduales, los cálculos para el golpe de ariete se pueden efectuar siguiendo métodos como los empleados en el caso de las oscilaciones en un tubo en U (métodos no tratados en este documento), es decir, considerando incompresible el líquido y rígido el conducto.

1.3.2. Cierre rápido de una válvula

Al cerrarse rápidamente una válvula en la tubería durante el flujo, éste se reduce al paso de la válvula, lo cual incrementa la carga corriente arriba de la válvula, iniciándose así un pulso de alta presión que se propaga en dirección contraria a la del flujo. Este pulso de presión hace que la velocidad del flujo disminuya. La presión en el lado corriente abajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del flujo, disminuyendo también la velocidad del flujo. Si el cierre de la válvula es bastante rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja, se puede formar una bolsa de vapor corriente abajo de la válvula; cuando esto ocurre, la cavidad de vapor puede reducirse en forma violenta y producir una onda de alta presión que se propaga en la dirección corriente abajo.

1.3.3. Otras causas

- Abertura brusca de una válvula
- Acumulación y movimiento de burbujas de aire atrapado en la tubería
- Arranque o interrupción de bombas
- Cambios de elevación del embalse o cisterna de almacenamiento
- Cambios en la demanda de potencia de turbinas
- Expulsión repentina de aire de una tubería
- Ondas en el embalse o en tanques elevados
- Operación rítmica de válvulas de control o regulación automáticas
- Separación y reencuentro de columnas de líquido
- Variaciones en la apertura o cierre del gobernador o regulador de una turbina causadas por cambios en la carga de los sistemas eléctricos

- Vibración de accesorios deformables tales como válvulas
- Vibración de impulsores en bombas, ventiladores o turbinas.

1.4. Implicaciones del golpe de ariete en un sistema de tuberías

Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada puede llegar a entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en las redes hidráulicas de los pueblos o ciudades y en las instalaciones intradomiciliarias. Los accesorios instalados en los extremos de un sistema de tuberías (grifos, válvulas, etc.), también pueden sufrir roturas. La fuerza del golpe de ariete es directamente proporcional a la longitud del conducto, ya que las ondas de sobrepresión se cargarán de más energía, e inversamente proporcional al tiempo durante el cual se cierra la válvula: cuanto menos dura el cierre, más fuerte será el golpe.

El golpe de ariete como se mencionó anteriormente estropea el sistema de abastecimiento de agua, hace reventar tuberías, sobre todo las de plástico y hierro colado, ensancha las de plomo, arranca codos instalados y uniones en el sistema. También es causante de los sonidos fuertes que se escuchan en las tuberías de impulsión y de los sonidos característicos que se producen cuando se abre bruscamente el grifo de una casa. Las vibraciones pueden aparecer en el sistema, si se produce un desplazamiento brusco del aire que contienen las tuberías en su interior desde un tanque o tubería cerrados, que comienzan a verter líquido por su parte superior para contrarrestar la presión provocada. Por ello el agua tiende a desplazarse y puede provocar alguna avería (fugas de agua) al buscar una salida porque no puede ser contenida en las tuberías, debido a que el espacio que antes ocupaba se encuentra lleno de aire.

2. CONDICIONES FÍSICAS E HIDRÁULICAS A CONSIDERAR EN EL GOLPE DE ARIETE

Dado que se requiere un análisis extenso para la determinación del fenómeno de ondas de presión; mediante la metodología expuesta en el presente capítulo, es posible obtener, en forma práctica y científica, la estimación del efecto de sobrepresión originado por el golpe de ariete.

2.1. Velocidad de propagación de ondas de velocidad y presión

El estudio del golpe de ariete fue hecho en primer lugar por Joukowski, mientras que la solución completa del problema fue dada por Allievi. Joukowski también fue el primero en desarrollar una expresión para el cálculo de la velocidad de onda (celeridad), en función de los parámetros de la instalación. La celeridad (C) es entonces la velocidad de propagación de la onda elástica (de presión), a través del agua contenida en la tubería, por lo que su ecuación de dimensiones es $L \cdot T^{-1}$. Su valor se determina a partir de la ecuación de continuidad y depende fundamentalmente de las características geométricas y mecánicas de la conducción, así como de la compresibilidad del fluido. En definitiva:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{[K]}{[E]} \frac{[D]}{[e]}}}$$

Donde:

C es la celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s]

K es el módulo de elasticidad del fluido, [N/m²]

ρ es la densidad del líquido, [kg/m³]

D es el diámetro interior de la tubería, [m]

E es el módulo de elasticidad del material de la tubería, [N/m²] y

e es el espesor de la tubería, [m]

El numerador de la ecuación anterior es la celeridad de la onda elástica en el fluido. Algunos autores la denotan como C_0 . Para el agua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ y K (también conocido como módulo de compresibilidad) = $2.03 \times 10^9 \text{ N/m}^2$, este valor es:

$$C_0 = \sqrt{K/\rho} \approx 1425 \text{ m/s}$$

Nótese que si el material pudiera ser inelástico ($E \rightarrow \infty$) y/o la tubería tuviera mucho espesor, el denominador de la ecuación de celeridad (C), sería la unidad, por lo que $C \rightarrow C_0$. Lógicamente en la realidad $C < C_0$.

Una expresión práctica propuesta por Allievi, que permite una evaluación rápida del valor de la celeridad cuando el fluido circulante es agua, es la siguiente:

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \cdot \frac{D}{e}}}$$

Siendo:

k = coeficiente que toma en cuenta los módulos de elasticidad ($k \neq K$).

$$k = \frac{10^{10}}{E}$$

La tabla I contiene valores de E en Kg/m² y valores de k para distintos materiales utilizados como tubería.

Tabla I. Valores de k para hallar la celeridad con la expresión de Allievi

Material de la tubería	E [Kg/m ²]	k
Hierro y acero	2x10 ¹⁰	0.5
Fierro fundido	1x10 ¹⁰	1
Concreto (sin armar)	2x10 ⁹	5
Fibrocemento	1.85x10 ⁹	5.5 (5 - 6)
PVC	3x10 ⁸	33.3 (20 - 50)

Adaptado de: J. M de Azevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**, pág. 295

En el caso de tubos de concreto armado, tomándose $k = 0.5$, se considera un espesor representativo para los tubos, obtenido por la expresión:

$$e = e_m \left(1 + \frac{1}{m} \frac{e_b}{e_m} \right)$$

En la que

e = espesor representativo;

e_m = espesor medio distribuido de los hierros;

e_b = espesor de los tubos;

m = coeficiente práctico (valor aproximado = 10).

La celeridad, generalmente del orden de 1000 m/s, algunas veces llega a ser un tercio de este valor.

2.2. Periodo de la tubería

Período o fase de la tubería es el tiempo que la onda de sobrepresión tarda en ir y volver de una extremidad a otra de la tubería (igual a $2t_0$), generalmente entre la válvula de cierre y el tanque de carga. El período de la tubería está dado por la siguiente expresión:

$$T = \frac{2L}{C}$$

Siendo:

T: el período de la tubería, tiempo máximo de reflexión de la onda de sobrepresión

L: longitud de tubería

C: celeridad

2.3. Tiempo de cierre

El cálculo de la sobrepresión depende del tiempo de cierre, t_c de la válvula. Con anterioridad se ha hablado de cierre instantáneo de la válvula, pero éste en la práctica es gradual, con lo que la onda no presenta un frente brusco sino una rampa de mayor o menor pendiente según se tarde más o menos en cerrar. A pesar de ello, el incremento final de presión es el mismo, a no ser que haya tiempo suficiente para que las sobrepresiones iniciales viajen hasta el depósito y regresen. Por tanto, el cierre puede ser: cierre rápido o cierre lento.

2.3.1. Cierre rápido ($0 < t_c < 2t_0$)

La presión máxima es la misma que en el cierre instantáneo; aunque la curva de presiones en la tubería en función del tiempo sea distinta. En el cierre rápido una onda de presión no tiene tiempo de ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo. Por ejemplo, en una tubería de acero de 1000 metros de longitud, habría que cerrar la válvula en menos de 2 segundos para que existiera cierre instantáneo y se alcanzaran las presiones máximas. A partir de este tiempo, los rebotes en forma de depresión provenientes del depósito harían que el incremento de presión no fuese tan elevado.

2.3.2. Cierre lento ($t_c > 2t_0$)

La presión máxima es menor que en el caso precedente. Este último caso es más frecuente en la práctica. En definitiva, el tiempo de cierre es, por tanto, un factor fundamental para la reducción de la intensidad del golpe de ariete.

2.4. Ecuaciones del golpe de ariete

Una vez conocido el valor del tiempo t_c (tiempo de cierre) y determinado el caso en el que se encuentra el sistema hidráulico (cierre lento o cierre rápido), el cálculo del golpe de ariete se realizará de la forma siguiente:

2.4.1. Cierre total o parcial en una tubería elástica

Al cierre instantáneo de la válvula, el fluido sufre una brusca desaceleración, de forma que se genera una fuerza de inercia, según:

$$F_i = - m \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Donde Δt no es el tiempo de cierre de la válvula (por hipótesis, $t_c = 0$), sino el tiempo finito que ha transcurrido para que una cierta masa, $m = \rho \cdot l \cdot A_c$, que ocupa una longitud finita de tubería, reduzca su valor un cierto valor finito Δv , donde:

- En el cierre total: $\Delta v = - v$
- En el cierre parcial: $\Delta v = v' - v$ (donde v' es la velocidad final del fluido).

Agrupando estas consideraciones en la expresión de la fuerza de inercia, y teniendo en cuenta que la sobrepresión quede definida por $\Delta P = F_i/A_c$ y que, evidentemente, la celeridad de la onda es $C = l / \Delta t$, se obtienen las fórmulas de Joukowski, presentadas en las siguientes paginas.

2.4.1.1. Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula

Recordando que la sobrepresión máxima ocurre cuando la maniobra es rápida, esto es, cuando $t_c < 2 t_0$ (todavía no actúa la onda de depresión). Entonces la sobrepresión máxima, en el extremo de la línea, puede ser calculada por la expresión:

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot v$$

Donde:

ΔP = sobrepresión, [N/m²]

ρ = densidad del líquido, [kg/m³]

C = celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s]

v = velocidad del líquido, [m/s]

Igualmente se puede calcular el aumento de presión en metros columna de agua (m H₂O o mca) con la expresión que dedujo Allievi. Puede observarse cómo el valor de la sobrepresión es independiente de la longitud de la tubería.

$$\Delta H = \frac{C \cdot v}{g}$$

Siendo:

ΔH = sobrepresión debida al golpe de ariete, [m H₂O]

g = aceleración de la gravedad, [9.80 m/s²]

2.4.1.2. Sobrepresión en cierre instantáneo parcial de la válvula

Simplemente se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot (v' - v)$$

Donde:

ΔP = sobrepresión, [N/m²]

ρ = densidad del líquido, [kg/m³]

C = celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería, [m/s]

$\Delta v = v' - v$ (velocidad final menos velocidad inicial), [m/s]

2.4.2. Sobrepresión máxima en cierre total, lento y uniforme de la válvula

En una primera aproximación, se va a suponer que la tubería es rígida (inelástica) y que el cierre de la válvula es uniforme. Retomando la expresión de la fuerza de inercia del epígrafe 2.4.1, en términos de presión, se dice que:

$$\Delta P = -\rho \cdot L \cdot \frac{dv}{dt}$$

Como se supone un movimiento uniforme, entonces directamente se puede expresar que:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{0 - v}{t_c} = -\frac{v}{t_c}$$

Por tanto:

$$\Delta P = \rho \cdot L \cdot \frac{v}{t_c}$$

Modificando esta fórmula con un coeficiente λ que está comprendido entre 1 y 2 (normalmente inferior a 1.5), para tener en cuenta el efecto de la elasticidad de la tubería, se obtiene en definitiva:

- Sobrepresión en cierre lento y total de la válvula en tubería elástica

$$\Delta P = \lambda \frac{\rho \cdot L \cdot v}{t_c}$$

Esta ecuación, que rige el proceso en la mayoría de los casos, permite enunciar una serie de consecuencias prácticas. Así, el peligro del golpe de ariete en una instalación es tanto mayor:

- Cuanto mayor sea la longitud de la tubería (por ejemplo, una tubería forzada desde la turbina al embalse).
- Cuanto mayor sea la velocidad del líquido en la tubería
- Cuanto más rápido sea el cierre de la válvula (por ejemplo, el cierre demasiado rápido del inyector de una turbina Pelton puede producir el golpe de ariete).

La sobrepresión para el cierre lento y total de una válvula también puede ser expresada en metros columna de agua con la fórmula aproximada de Michaud, que considera la proporción de la velocidad con T / t_c , (válida para maniobras con variación lineal de velocidad). Pudiéndose escribir:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c}$$

Siendo:

ΔH = sobrepresión debida al golpe de ariete [m H₂O]

g = aceleración de la gravedad, 9.80 [m/s²]

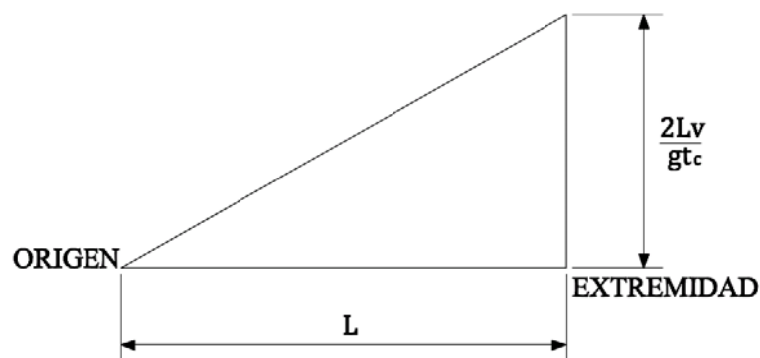
L = longitud de la tubería, [m]

v = velocidad del agua, [m/s]

t_c = tiempo de cierre, [s]

A lo largo de la tubería la sobrepresión se distribuye conforme indica el diagrama de la figura 14. La fórmula de Michaud también puede ser aplicada para la determinación del tiempo de cierre a ser adoptado, con el fin de que la sobrepresión no sobrepase determinado límite preestablecido.

Figura 14. Distribución de la sobrepresión debida al cierre lento de una válvula



Fuente: J. M de Azevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**, pág. 297

La fórmula de Michaud lleva a valores superiores a los verificados experimentalmente. Sin embargo, todavía viene siendo aplicada en la práctica por ser más segura.

2.4.2.1. Otras fórmulas y teorías

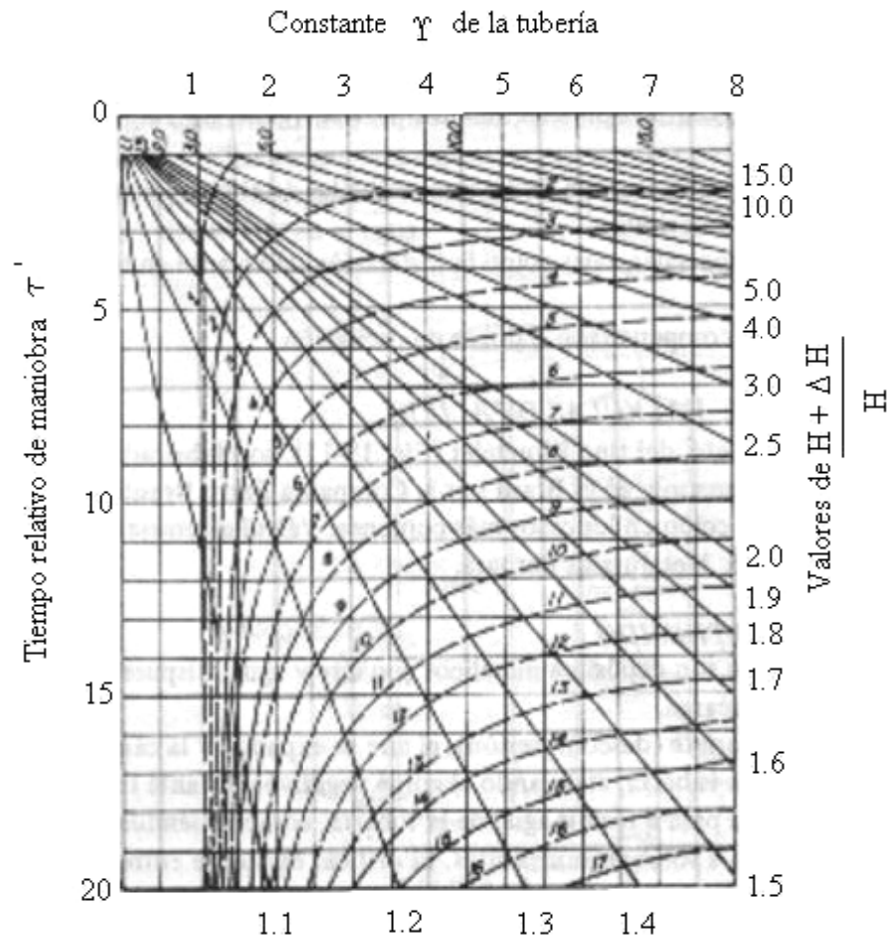
Diversas fórmulas han sido aplicadas para estimar la sobrepresión. El fenómeno de golpe de ariete es muy complejo y su estudio envuelve varias condiciones e innumerables variables. Con la finalidad de facilitar su análisis, pueden ser hechas algunas simplificaciones que dan origen a teorías o expresiones aproximadas (ver tabla II). Una de esas teorías es denominada abreviadamente inelástica, por el hecho de admitir condiciones de rigidez para la tubería e incompresibilidad para el agua. Según Parmakian, esta teoría da resultados aceptables para maniobras relativamente lentas, cuando $T > \frac{L}{300}$.

Tabla II. Golpe de ariete, principales teorías y fórmulas

Autor	Fórmula
Michaud, Vensano	$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c}$
de Sparre	$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c} \cdot \frac{1}{2 \left[1 - \frac{L \cdot v}{2 \cdot g \cdot t_c \cdot H} \right]}$
Teoría inelástica (Johnson, et al.)	$\Delta H = \frac{L \cdot v}{2 \cdot g^2 \cdot H \cdot t_c^2} \left[L \cdot v + \sqrt{4g^2 H^2 t_c^2 + L^2 v^2} \right]$
Teoría elástica (Allievi, Gibson, Q)	Ver Nomograma, (figura 15)

Fuente: J. M de Azevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**, pág. 297

Figura 15. Nomograma de Allievi



Adaptado de: J. M de Azevedo y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**, pág. 299

2.4.3. Tubería de característica variable

Una instalación puede estar formada por tuberías de varios diámetros y dentro de un mismo diámetro, con espesores diferentes. En ocasiones, pueden estar compuestas por tramos con distinto material.

El cálculo exacto del golpe de ariete, siguiendo el recorrido de las ondas de presión, que sufren reflexiones parciales en los puntos donde hay cambio de característica, es complejo. Sin embargo, puede hacerse un cálculo aproximado utilizando velocidades medias de la onda y del flujo.

Designando por $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$ a las distintas longitudes de tramos con material, espesor y/o diámetro distinto; $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ a las celeridades respectivas de la onda y $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ a los tiempos que tarda la onda en recorrer dichos tramos, el tiempo total que tarda la onda en completar la longitud total de la tubería se obtiene como:

$$t = L/C = \sum_{i=1}^n L_i/C_i$$

De aquí se despeja la velocidad de onda equivalente para toda la conducción:

$$C = \frac{L}{\sum_{i=1}^n L_i/C_i}$$

En el caso de que el diámetro de la tubería sea diferente en diversos tramos, también es necesario recalcular la velocidad equivalente del flujo. De forma análoga ha como se ha planteado en la ecuación anterior, se obtiene:

$$v = \frac{\sum_{i=1}^n L_i v_i}{L}$$

2.5. Golpe de ariete en líneas de descarga

El caso más importante de golpe de ariete en una línea de descarga de bombas accionadas por motores eléctricos, se verifica luego de una interrupción de energía eléctrica. En este caso, debido a la inercia de las partes rotativas de los conjuntos elevadores, inmediatamente después de la falta de corriente, la velocidad de las bombas comienza a disminuir, reduciéndose rápidamente el caudal. La columna líquida continúa subiendo por la tubería de descarga, hasta el momento en que la inercia es vencida por la acción de la gravedad. Durante este período se verifica una descompresión en el interior de la tubería. Enseguida, ocurre la inversión en el sentido del flujo y la columna líquida vuelve a las bombas.

No existiendo válvulas de retención, las bombas comenzarían, entonces, a funcionar como turbinas, girando en sentido contrario. Con excepción de los casos en que la altura de elevación es pequeña, con descarga libre, en las líneas de bombeo son instaladas válvulas de retención, con el objeto de evitar el retorno del líquido a través de las bombas.

La corriente líquida, al retornar a la bomba, encontrando la válvula de retención cerrada, ocasiona el choque y la compresión del fluido, lo cual da origen a una onda de sobrepresión (golpe de ariete).

Si la válvula de retención funciona normalmente, cerrándose en el momento preciso, el golpe de ariete no alcanzará el valor correspondiente a dos veces la altura manométrica. Si, al contrario, la válvula de retención no cierra rápidamente, la columna líquida retornará, pasando a través de la bomba y con el tiempo, pasará a adquirir velocidades más altas, elevándose considerablemente el golpe de ariete, en el momento en que la válvula funcione (pudiendo alcanzar 300% de la carga estática, dependiendo del tiempo de cierre).

El cálculo riguroso del golpe de ariete en una instalación de bombeo exige el conocimiento previo de datos relativos a los sistemas de bombeo, que influyen en el fenómeno:

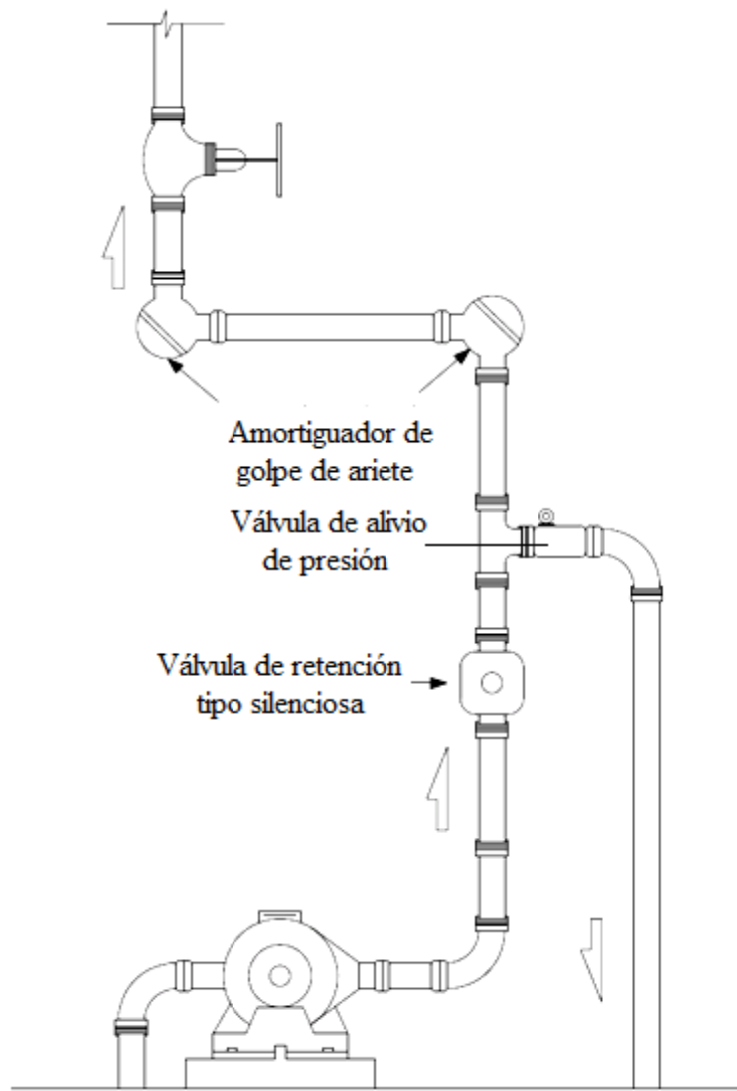
- a) El momento de inercia de las partes rotativas de la bomba y del motor ($\text{kg} \times \text{m}^2$, SI);
- b) Características internas de la bomba (efectos sobre la disipación de energía, funcionamiento como turbina);
- c) Condiciones de la bomba en la rama de descarga y comportamiento de la onda de presión.

Antes de adquiridas y conocidas las bombas, apenas se puede hacer una consideración del golpe de ariete, con base en datos admitidos (aproximados).

2.6. Medidas generales para evitar el golpe de ariete en un sistema de bombeo

La figura 16, se ha tomado como vía de ejemplo para la explicación de los dispositivos de control y protección.

Figura 16. Dispositivos de control y protección contra el golpe de ariete



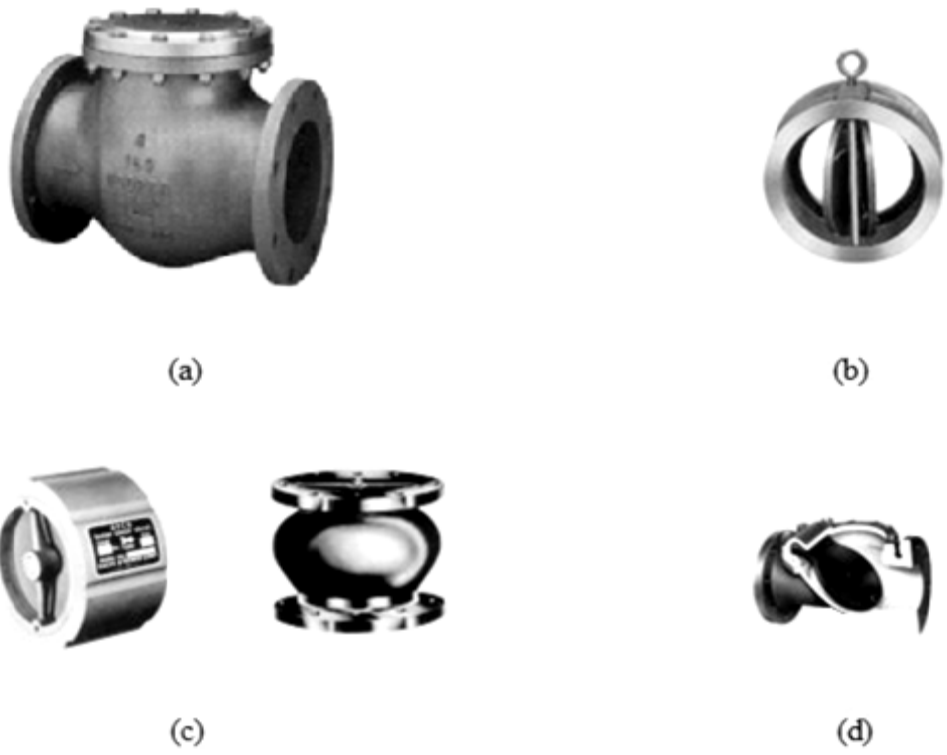
2.6.1. Válvulas de retención

Estas válvulas se usan con el objeto de retener la masa de agua que se encuentra en la tubería cuando la bomba suspende su operación y con el fin de evitar esfuerzos excesivos en la bomba debido al fenómeno del golpe de ariete. Esto no quiere decir que estas válvulas eliminen el efecto de este fenómeno, sino que únicamente lo atenúan.

Existen varios tipos en el mercado, y algunos de ellos se pueden observar en la figura 17. La primera (figura 17, a) representa la válvula de retención tradicional y comúnmente empleada llamada de columpio. La segunda (figura 17, b) se denomina dúo-retención y consta esencialmente de dos medias lunas conectadas a un eje vertical, que se abren según el sentido del escurrimiento. Esta válvula en comparación con la tradicional es más liviana, de menor tamaño y, consecuentemente, de menor costo; sin embargo, las pérdidas de carga son mayores que en la tradicional. La tercera (figura 17, c) tiene la característica de efectuar un cierre más o menos lento, con lo cual se consigue prolongar la vida de la válvula y casi eliminar el ruido que producen los otros tipos; suele llamarse de retención silenciosa. La selección del tipo de válvula de retención para una determinada instalación dependerá del diámetro de la válvula a emplear, de las presiones a que operará y de su costo en el mercado.

La figura 17 (d), muestra la sección según el eje longitudinal de la tubería, de la válvula llamada roto-retención, cuya operación es semejante a la de columpio. Por su diseño y procedimiento de construcción (se fabrica por mitades y se une con pernos) compite en costo con la válvula de retención tradicional y es especial para cuando se requieran diámetros grandes. Tiene la ventaja de efectuar un cierre lento y hermético.

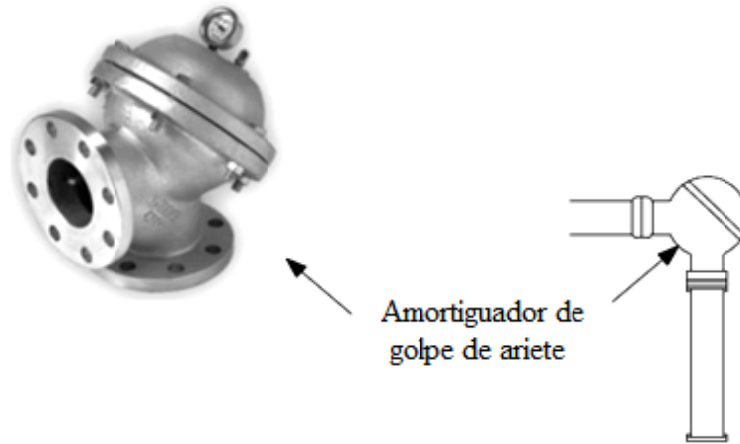
Figura 17. Tipos de válvulas de retención



2.6.2. Amortiguador de golpe de ariete

Absorbe la presión inestable cuando la compuerta de la válvula de retención se cierra de repente. Tranquiliza el impacto de flujo en la tubería. Ver figura 18.

Figura 18. Amortiguador de golpe de ariete



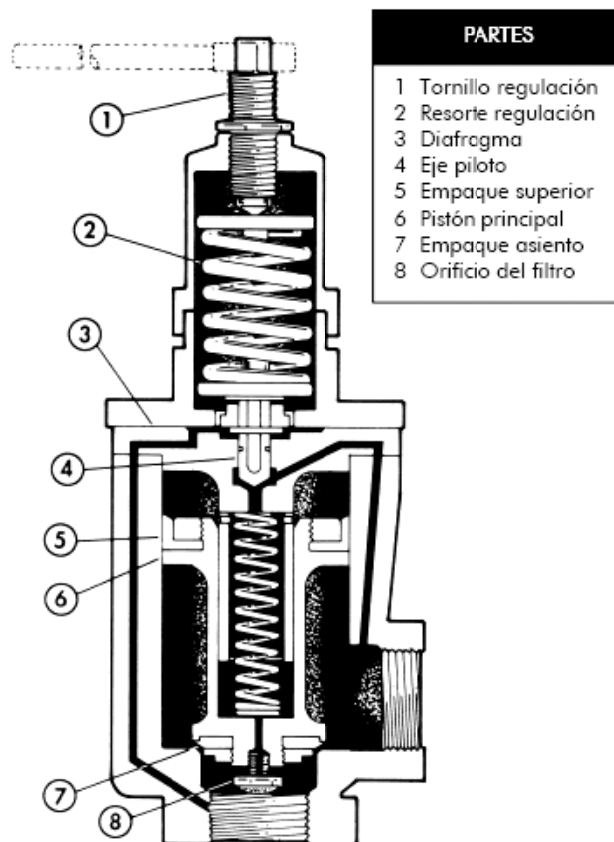
2.6.3. Válvulas de alivio contra el golpe de ariete

Las válvulas aliviadoras de presión son empleadas para proteger al equipo de bombeo, tuberías y demás elementos en la conexión, contra los cambios bruscos de presión que se producen por el arranque o paro del equipo de bombeo.

La válvula está diseñada de tal manera que puede abrirse automáticamente y descargar al exterior cuando la presión en el sistema es mayor que aquella con la que fue calibrada, lográndose con ello el abatimiento de la línea piezométrica. El cierre de esta válvula también es automático y se logra cuando la presión en la línea llega a ser menor que la de su ajuste o calibración. De acuerdo con lo anterior, el empleo de esta válvula dependerá de la magnitud de las presiones que se tengan debidas al golpe de ariete y de la conveniencia que surja al haber hecho un estudio económico, considerando la posibilidad de emplear elementos (tuberías, válvulas, etc.) resistentes a las presiones que se van a presentar.

En general, las válvulas de alivio que existen en el mercado, básicamente tienen el mismo diseño, véase la figura 19, y están constituidas en esencia por dos partes: una que corresponde al cuerpo de la válvula propiamente dicho y la otra formada por los mecanismos de control. En el cuerpo de la válvula se encuentra el elemento actuador, constituido por un pistón cuya posición regula el funcionamiento de la válvula. El control de este pistón se efectúa por medio de una válvula piloto calibrada que actúa con una presión determinada y no es más que una válvula de aguja de precisión para pequeños flujos. El piloto de control de esta válvula puede ser hidráulico, eléctrico o de ambos tipos.

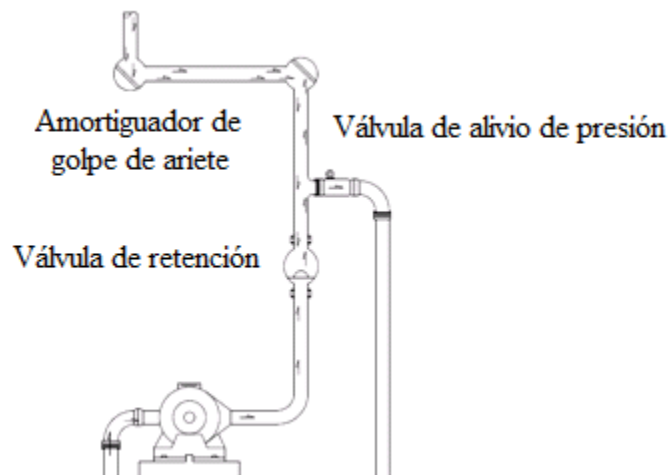
Figura 19. Válvula de alivio



Las válvulas que se usan con más frecuencia son las llamadas de pistón y las de diafragma, preferentemente con ambas clases de control. Las dos funcionan satisfactoriamente, pero en ocasiones se prefiere la válvula con pistón, porque la otra requiere de un servicio de mantenimiento frecuente, debido a que el material de que está hecho el diafragma (hule, neopreno, etc.) se deteriora dependiendo del tipo de agua o fluido que se maneje. Cuando se ha definido el empleo de válvulas de alivio, su diámetro se determina en función del gasto de escurrimiento en la tubería a la que se conectará, de las presiones originadas por el golpe de ariete, entre otros.

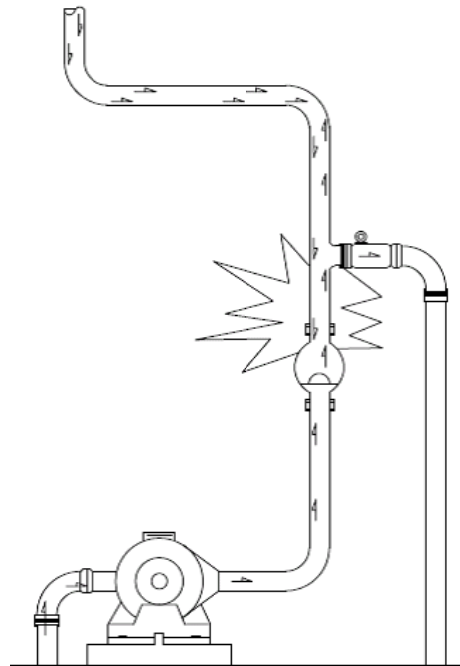
La siguiente gráfica (figura 20) es una referencia de la disposición de la válvula de retención, de la válvula de alivio de presión, y del amortiguador en un sistema de bombeo. Cuando la bomba es apagada, la válvula de retención silenciosa se cierra con velocidad adecuada, entonces el amortiguador puede absorber la contrapresión y la sobrepresión. Si la sobrepresión generada fuera más que el límite, dicha sobrepresión sería liberada por la válvula de alivio de presión para seguir asegurando la función correcta del sistema.

Figura 20. Disposición correcta de dispositivos contra el golpe de ariete



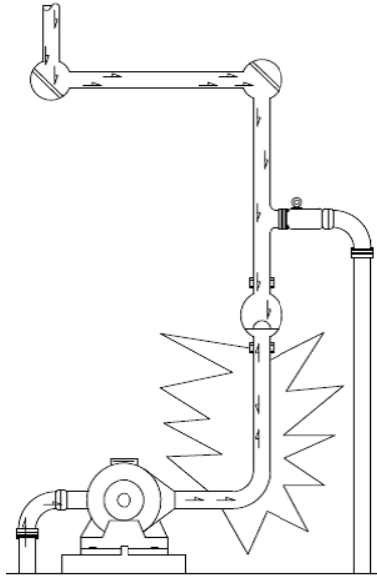
Si la válvula de retención se instala solamente (y el amortiguador es omitido), la contrapresión será impuesta en la compuerta de la válvula de retención, ya que la bomba se apaga y la válvula de retención se cierra; generando entonces otro impacto (el efecto del golpe de ariete). Ver figura 21.

Figura 21. Dispositivos contra el golpe de ariete omitiendo el amortiguador



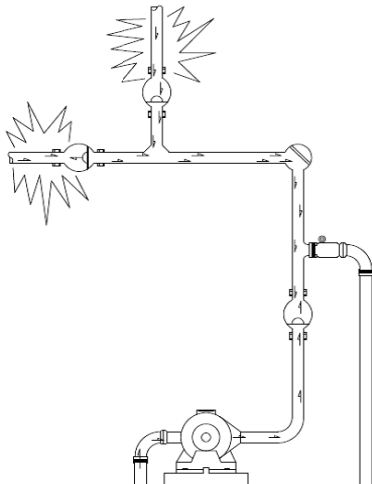
Si se utiliza una válvula normal de retención de vaivén, la contrapresión necesaria para cerrar la compuerta de la válvula cuando la bomba se apaga no ayudaría. Por consiguiente, el flujo de la contrapresión podría chocar con las hojas de los impulsores en la bomba y en casos serios, estas hojas serían estropeadas por la fuerza de corte. Ver figura 22.

Figura 22. Dispositivos contra el golpe de ariete utilizando una válvula de retención de vaivén



Si la tubería crece hacia arriba muy alto o si es larga y recta (figura 23), las válvulas de retención deben evitarse instalar en serie (no en paralelo), debido a la posibilidad que se produzca la pérdida de carga del agua cuando se interrumpe la bomba; lo que generaría al golpe de ariete.

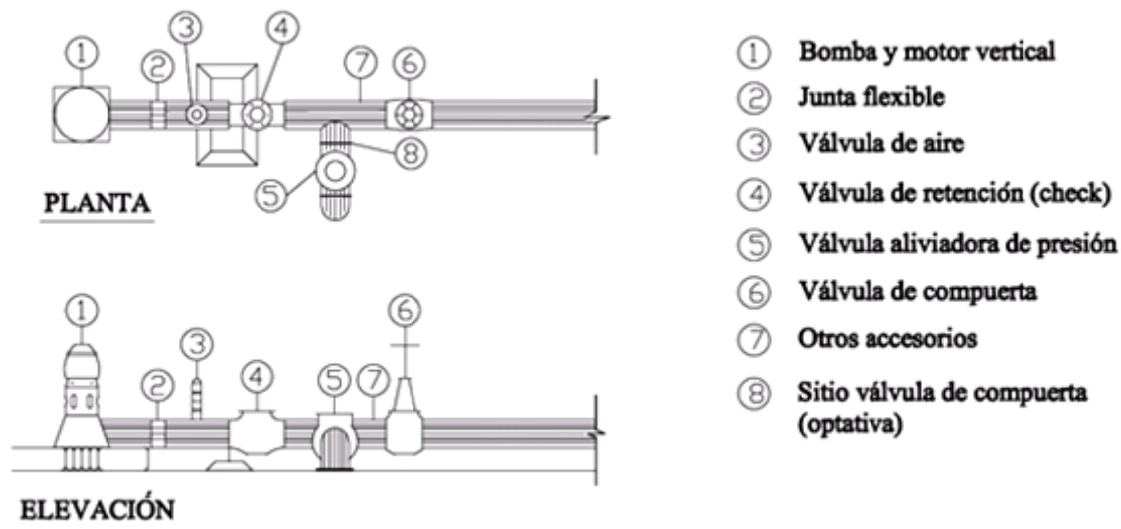
Figura 23. Válvulas de retención colocadas erróneamente en un sistema de bombeo



Cuando la bomba se apaga, la válvula superior de retención soporta la contrapresión que luego genera el efecto de golpe de ariete. El efecto de golpe de ariete se genera por una ola inestable de presión que se transmite adelante y al revés de la tubería. Este efecto hace muy probable el empuje y apertura de otra válvula de retención por sus dos lados, provocando así más presión inestable y más golpe de ariete en la tubería. En el caso de esta situación, la válvula de alivio de presión puede ser utilizada para liberar la presión aumentada (sobrepresión) y de este modo proteger mejor la tubería.

En la siguiente figura se muestra la conexión de otra bomba con elementos de control y protección. Observar la posición de los dispositivos contra el golpe de ariete.

Figura 24. Conexión de bomba mostrando los elementos de control y protección



Adaptado de: Enrique Valdez. **Abastecimiento de agua potable (volumen I)**, pág. 122

2.7. Cálculo de la sobrepresión

A continuación se presentan varios ejemplos del cálculo del golpe de ariete, en donde se debe tomar en cuenta las ecuaciones utilizadas y el sistema de unidades empleado.

- Ejemplo 1: Al final de una tubería de conducción de agua potable se tiene una válvula que se cierra según los requerimientos aguas abajo. Los datos que rigen el comportamiento se describen a continuación:

Diámetro nominal de tubería = 300 mm

Tipo ASTM D 2241 SDR-17

Módulo de elasticidad del PVC, $E = 2.75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Densidad del agua, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Módulo de elasticidad del fluido, $K = 2.03 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Velocidad del fluido, $v = 2.5 \text{ m/s}$

Tiempo de cierre de la válvula, $t_c =$ (se considerará cierre rápido)

Desarrollo: Para el tipo de tubería $D = 0.28575 \text{ m}$ y $e = 0.01905 \text{ m}$, entonces se procede a calcular la velocidad de propagación de la onda que genera la sobrepresión:

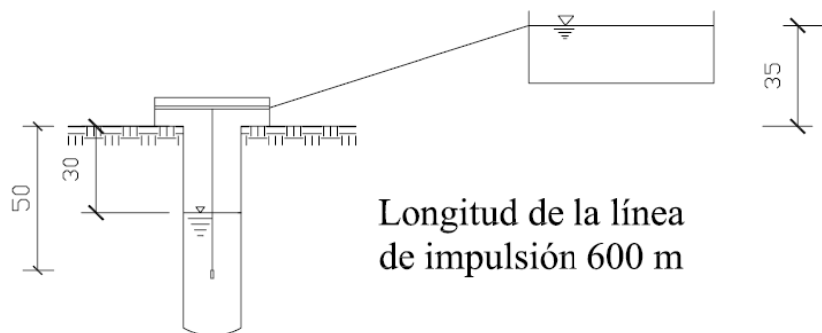
$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left[\frac{K}{E}\right] \left[\frac{D}{e}\right]}} = \sqrt{\frac{2.03 \times 10^9 / 1000}{1 + \left[\frac{2.03 \times 10^9}{2.75 \times 10^9}\right] \left[\frac{0.28575}{0.01905}\right]}} \approx \frac{1425}{3.47} \approx 410.66 \text{ m/s}$$

Seguidamente se calcula la sobrepresión para el cierre rápido:

$$\Delta P = \rho \cdot C \cdot v = 1000 \cdot 410.66 \cdot 2.5 \approx 1,026,650 \approx 1,026.65 \times 10^3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ o Pa}$$

- Ejemplo 2: De un pozo de 8 pulgadas (0.2032 m) de diámetro, nivel dinámico a 30 m, con bomba (de motor externo) colocada a 50 m, debajo de la boca del pozo. Se desea bombear un caudal de 15 Litros/s. La descarga está ubicada a 35 m, arriba de la boca del pozo al final de una línea de bombeo de PVC (ASTM D 2241 SDR 26), de 600 m de longitud. Del análisis previo se sabe que el diámetro (nominal) económico es de 6 pulgadas (150 mm). Determinar el golpe de ariete y verificar si la tubería lo soporta. Ver fig. 25.

Figura 25. Ejemplo 2.



Desarrollo: Para el tipo de tubería $D = 155.32$ mm y $e = 6.48$ mm, recordar que D es el diámetro interno de la tubería. Ahora se procede a calcular la celeridad:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \left[\frac{K}{E}\right] \left[\frac{D}{e}\right]}} = \sqrt{\frac{2.03 \times 10^9 / 1000}{1 + \left[\frac{2.03 \times 10^9}{2.75 \times 10^9}\right] \left[\frac{0.15532}{0.00648}\right]}} \approx \frac{1425}{4.32} \approx 329.86 \text{ m/s}$$

La velocidad (en m/s) del fluido se calcula por medio de una ecuación que relaciona el caudal (expresado en Litros/s) y el diámetro interno de la tubería (expresado en pulgadas):

$$v = \frac{Q}{A_c} = \frac{1.974 Q}{D^2} = \frac{1.974 \cdot 15}{6.115^2} = 0.79 \text{ m/s}$$

Ahora se calcula la sobrepresión máxima y se considera para una maniobra rápida (que es la más perjudicial), además se expresará la sobrepresión en metros columna de agua con la ayuda de la ecuación de Allievi:

$$\Delta H = \frac{C \cdot v}{g} = \frac{329.86 \cdot 0.79}{9.80} \approx 26.59 \text{ mca}$$

Por último se verifica si la tubería resiste el golpe de ariete o sobrepresión:

Carga (presión) a soportar de la tubería = 35 m + 26.59 m = 61.59 m o mca

Donde 35 m es la altura de la boca del pozo a la descarga. Se sabe que la tubería de PVC ASTM D 2241 SDR 26 soporta 112 mca, por lo tanto:

61.59 mca < 112 mca, la tubería sí resiste.

- Ejemplo 3: Calcular el golpe de ariete utilizando las principales teorías y fórmulas de la tabla II y de acuerdo a la siguiente información:

Tubería de acero con 27 pulgadas de diámetro (700 mm), e = 1/4 pulgada

L = 250 m., v = 3.60 m/s, $t_c = 2.1$ s, carga H (presión inicial en la tubería) = 50 m

Relación $D/e = 108$, celeridad C = 980 m/s.

Se procede a calcular el período:

$$T = \frac{2L}{C} = \frac{2 \cdot 250}{980} = 0.51 \text{ s}$$

Como $t_c > T$, se tiene una maniobra lenta. Recordando que la tabla II muestra fórmulas para casos de cierre lento, se calcula la sobrepresión máxima según:

Michaud, Vensano:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c} = \frac{2 \cdot 250 \cdot 3.60}{9.8 \cdot 2.1} \approx 87 \text{ m}$$

de Sparre:

$$\Delta H = \frac{2 \cdot 250 \cdot 3.60}{9.8 \cdot 2.1} \cdot \frac{1}{2 \left[1 - \frac{250 \cdot 3.60}{2 \cdot 9.8 \cdot 2.1 \cdot 50} \right]} \approx 98 \text{ m}$$

Teoría inelástica (fórmula de Johnson):

$$\Delta H = \frac{250 \cdot 3.60}{2 \cdot 9.8^2 \cdot 50 \cdot 2.1^2} \left[250 \cdot 3.60 + \sqrt{4 \cdot 9.8^2 \cdot 50^2 \cdot 2.1^2 + 250^2 \cdot 3.60^2} \right] \approx 67 \text{ m}$$

Allievi:

Se calcula la constante Υ (adimensional) de la tubería

$$\Upsilon = \frac{C \cdot v}{2 \cdot g \cdot H} = \frac{980 \cdot 3.60}{2 \cdot 9.8 \cdot 50} \approx 3.60$$

Se calcula el tiempo relativo de maniobra

$$\tau' = \frac{t_c}{T} = \frac{2.1}{0.51} \approx 4$$

En la intersección de $\tau' \approx 4$ y $Y \approx 3.60$ (Abaco de Allievi, figura 15) se encuentra:

$$\frac{H + \Delta H}{H} = 2.35 \therefore \Delta H = 2.35 \cdot 50 - 50 \approx 67.5 \text{ m}$$

3. SISTEMAS DE CONTROL DEL GOLPE DE ARIETE

Para la reducción del golpe de ariete se tienen básicamente dos posibilidades: bien actuar sobre la fuente que produce la perturbación, o bien reducirla una vez que ésta se ha producido. El primer sistema es el más aconsejable, pero no siempre es posible su aplicación.

3.1. Acumuladores o depósitos de aire

Las cámaras de aire comprimido son depósitos metálicos con aire y agua, dispuestos en la parte inicial de las tuberías de descarga.

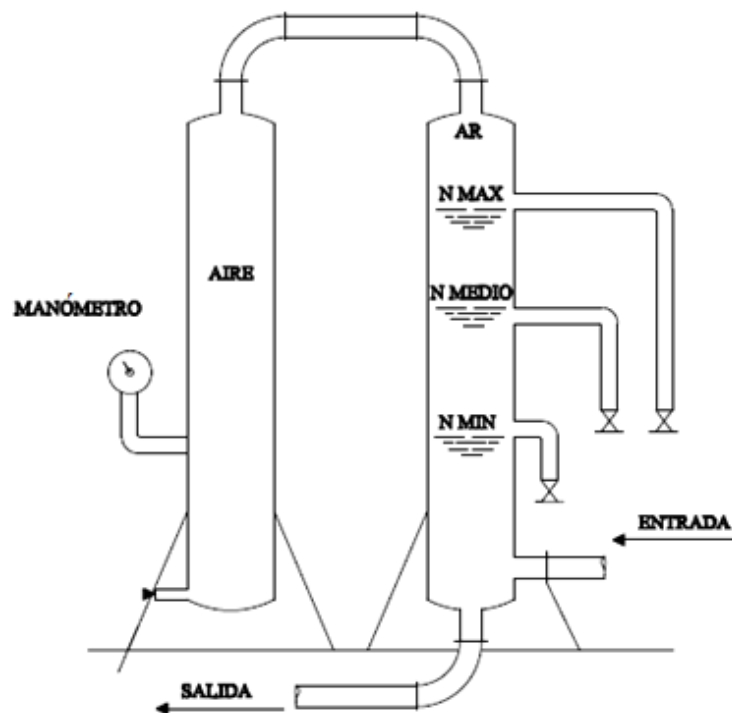
En la primera fase del golpe de ariete (descompresión), el aire se expande y la cámara cede una cierta cantidad de agua a la tubería, atenuando el golpe negativo. Durante la segunda fase (sobrepresión), la cámara pasa a recibir agua de la tubería, comprimiéndose el aire, se reduce en parte, la tendencia a sobrepresiones altas. El orificio existente entre la cámara y la tubería debe ser proyectado de manera que proporcione mayor resistencia a la entrada del agua en la cámara que en la salida.

El cálculo del volumen de las cámaras se hace fijándose el valor límite que será tolerado para el golpe de ariete. Los métodos de cálculo usualmente adoptados, son debidos a los ingenieros *Sonnet*, *Sliosberg* y *Parmkian*.

Las cámaras de aire comprimido son más indicadas para las presiones y caudales no muy altos. Ellas exigen una vigilancia permanente para evitar la falta o pérdida de aire por disolución. Es necesaria la instalación de un compresor para abastecer el aire que es perdido por disolución en el agua.

La compañía *Ingersoll – Rand* (compañía mundial) recomienda el tipo indicado en la figura 26 para instalaciones no muy grandes.

Figura 26. Cámara de aire



Una capacidad correspondiente de 10 a 20 s, para el caudal máximo de funcionamiento de la tubería, es considerada satisfactoria, y cuando sea conveniente se pueden emplear dos depósitos.

3.2. Chimeneas de equilibrio

Pueden considerarse como los elementos más seguros de todos los dispositivos utilizados para el control del golpe de ariete, ya que no están expuestos a fallas mecánicas. Su limitación está determinada por la topografía que puede ocasionar alturas excesivas que haga prohibitiva su construcción bajo el punto de vista económico.

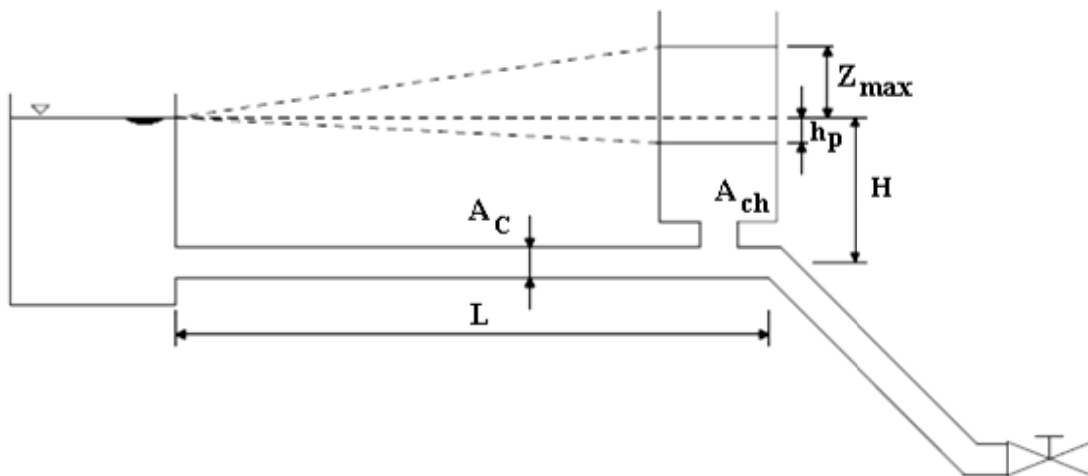
La ubicación de la chimenea de equilibrio debe ser tal que su altura esté por encima de la línea definida por la piezométrica de funcionamiento del sistema. Esto hace prohibitivo la utilización de chimeneas cercanas a la estación de bombeo, o donde la dinámica de funcionamiento alcance alturas mayores. La siguiente figura muestra algunos detalles de una chimenea de equilibrio.

Figura 27. Chimenea de equilibrio



Las chimeneas de equilibrio son túneles verticales abiertos que se sitúan cerca del elemento que provoca el golpe de ariete. De esta forma, la condición de contorno se transforma en la de un depósito (no ideal), convirtiendo la pulsación de alta intensidad y frecuencia del golpe de ariete en una pulsación de baja intensidad y frecuencia, correspondiente a una oscilación en masa. Es habitual su utilización en centrales hidráulicas para proteger los túneles de hormigón anteriores a las tuberías forzadas. Ver figura 28.

Figura 28. Esquema con chimenea de equilibrio



Al cerrar la válvula (o los álabes distribuidores de una turbina), el agua del túnel puede entrar libremente en la chimenea, donde se para al convertir su energía cinética en energía potencial. Si se quiere evitar el derrame del líquido por la parte superior de la chimenea, ésta deberá tener la altura suficiente.

A partir de la máxima sobrepresión como consecuencia de un cierre instantáneo (caso más desfavorable) es sencillo deducir la altura máxima de agua que se alcanzaría en ese cierre brusco:

$$Z_{\max} = v \sqrt{\frac{L A_c}{g A_{ch}}}$$

Donde A_c y A_{ch} son las secciones características (área transversal) de la tubería y de la chimenea de equilibrio respectivamente. A partir de esa ecuación, se puede calcular el periodo de oscilaciones (τ en segundos) originadas según:

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{L A_{ch}}{g A_c}}$$

Debe tenerse precaución con estas oscilaciones porque pueden provocar resonancias en el sistema. Para el caso de una central hidroeléctrica, *Thoma* definió el área mínima estable de la chimenea como:

$$A_{ch-\min} = \frac{L A_c}{h_p(H - h_p)} \frac{v^2}{2g}$$

Donde H es la altura del agua en la chimenea en reposo (carga inicial) y h_p es la caída de presión hasta la chimenea durante el funcionamiento normal. Habitualmente, se suele diseñar la chimenea con una restricción a la entrada que provoque una mayor pérdida de carga, bien durante la entrada y salida del agua o solamente durante la salida (orificios diferenciales), con el fin de amortiguar más rápidamente las oscilaciones. Si no existen problemas externos, se puede permitir el desbordamiento del agua por la parte superior, con lo que se puede reducir el diámetro de la chimenea. En este caso, actúa en parte como una válvula de descarga. En cualquier caso, la chimenea debe tener las dimensiones adecuadas para evitar la entrada de aire en la tubería durante las depresiones.

3.3. Válvulas de descarga

Localizadas en los puntos más bajos de las tuberías, permiten su evacuación cuando sea necesario. Las descargas son medidas como boquillas, teniéndose en cuenta el tiempo admitido para su vaciamiento completo de la línea o del tramo de la línea en consideración. Como regla práctica, se admite para el diámetro de las descargas,

$$d \geq \frac{D}{6}$$

Recordando que D es el diámetro interno de la tubería. La descarga es efectuada en galerías, valles, arroyos, etc., pero se debe evitar cualquier conexión peligrosa con alcantarillas.

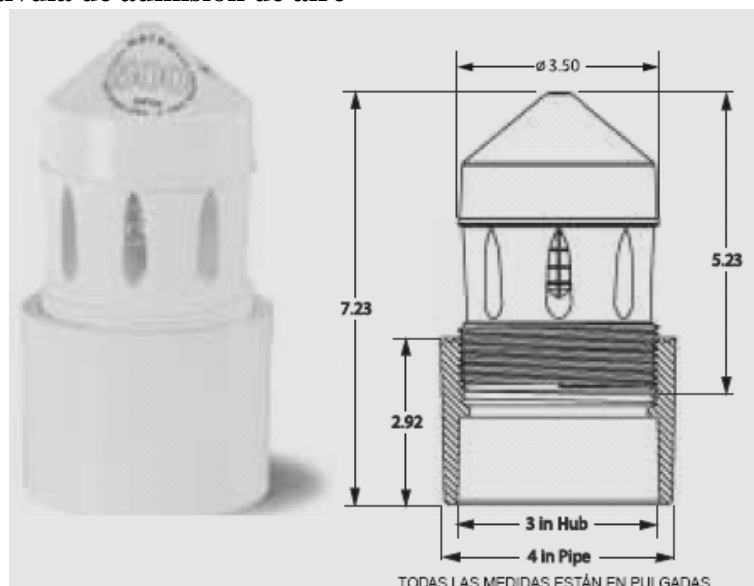
3.4. Ventosas

Dependiendo de su función, permiten la eliminación del aire acumulado en el interior de la tubería, admisión de aire cuando la presión en el interior es menor que la atmosférica y la eliminación de aire que circula en suspensión en el flujo bajo presión.

3.4.1. Válvulas de admisión de aire

El propósito de una válvula de admisión de aire (figura 29), consiste en ofrecer un método para permitir la entrada de aire al sistema de tuberías cuando se desarrollan presiones negativas en la tubería. El dispositivo cierra por gravedad y sella la terminal de ventilación a una presión diferencial de cero (sin condiciones de flujo), así como bajo presiones internas positivas.

Figura 29. Válvula de admisión de aire



3.4.2. Válvulas de expulsión de aire

Las líneas por gravedad tienen la tendencia a acumular aire en los puntos altos. Cuando se tienen presiones altas, el aire tiende a disolverse y continúa en la tubería hasta que es expulsado, pero en los puntos altos, de relativa baja presión el aire no se disuelve creando bolsas que reducen el área útil de la tubería.

La acumulación de aire en los puntos altos provoca una reducción del área de flujo del agua y consecuentemente se produce un aumento de las pérdidas y una disminución del gasto. La acumulación del aire puede ser ocasionalmente desplazada a lo largo de la tubería y provocar golpes repentinos e intermitentes similares a los golpes de ariete.

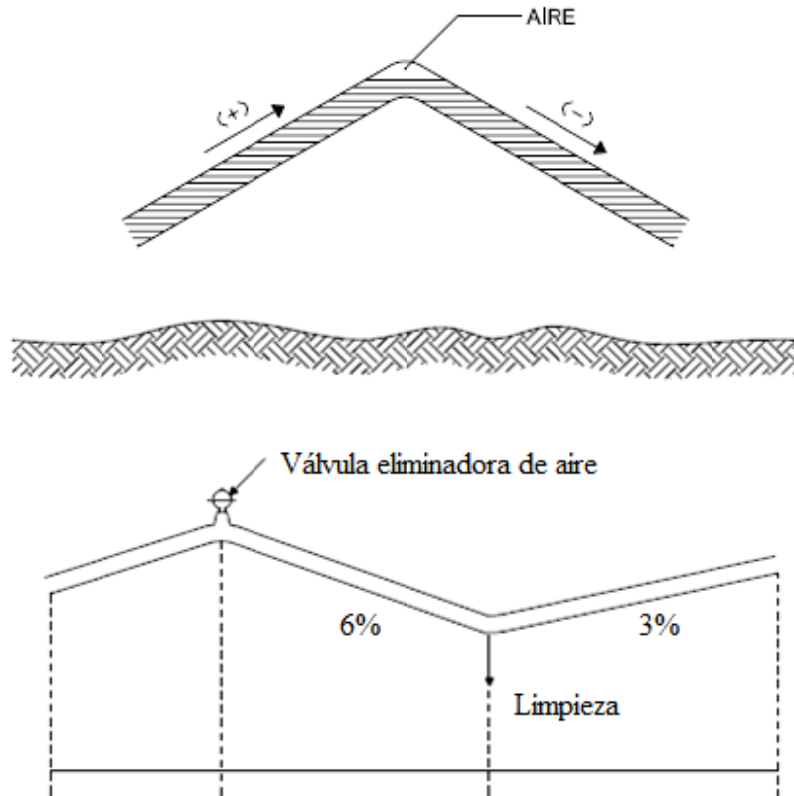
A fin de prevenir contra este fenómeno deben utilizarse válvulas automáticas que ubicadas en todos los puntos altos permitan la expulsión del aire acumulado y la circulación del gasto deseado. La colocación de ventosas o válvulas de expulsión de aire en tales puntos constituirá un factor de seguridad que garantizará la sección útil para la circulación del gasto deseado. El aspecto de la ventosa es variado, pero en general, consta de un cuerpo vacío que contiene un flotador esférico (ver figura 30) y su funcionamiento consiste en que este flotador asciende cuando existe presión de agua, el cual cierra automáticamente el orificio hacia el exterior. En cambio, si en la tubería de presión hay aire, éste no es capaz de levantar el flotador, pero permite el escape de aire que es expulsado al exterior.

Figura 30. Válvula de expulsión de aire



Puntos altos se consideran todos aquellos puntos donde existiendo una curva vertical se pasa de una pendiente positiva a una pendiente negativa y donde conviene la instalación de la ventosa. Debe procurarse una pendiente que facilite la expulsión de aire, aun en aquellos casos donde el terreno es horizontal, tratando de favorecer la concentración de aire en algún punto que permita su expulsión. Ello puede lograrse creando artificialmente puntos altos y bajos, para lo cual se recomienda usar pendientes mínimas de 6 por 1000 en los descensos y 3 por 1000 en los ascensos como lo muestra la figura 31.

Figura 31. Posición de válvulas de aire



La forma de conexión de la ventosa es de rosca, la cual puede ser conectada directamente a la tubería como si fuera una llave maestra, o interponiendo una llave de paso del mismo diámetro, a fin de poder repararlo. Es de notar, que su instalación debe ser vertical, directamente sobre la tubería auxiliar con trazado ascendente.

Para diámetros menores de 304.8 mm (12") pueden usarse ventosas automáticas de 12.7 mm (1/2") de diámetro. En el caso de redes de distribución generalmente no se utilizan ventosas, ya que el aire es expulsado a través de las conexiones domiciliarias.

Tabla III. Diámetro de ventosas en función del diámetro de tubería

\varnothing tubería	\varnothing ventosa manual	\varnothing ventosa automática
304.8 mm (12'')	101.6 mm (4'')	19.05 mm (3/4'')
355.6 mm (14'')	101.6 mm (4'')	19.05 mm (3/4'')
406.4 mm (16'')	152.4 mm (6'')	25.4 mm (1'')
457.2 mm (18'')	152.4 mm (6'')	25.4 mm (1'')
508.0 mm (20'')	152.4 mm (6'')	50.8 mm (2'')
609.6 mm (24'')	203.2 mm (8'')	50.8 mm (2'')
762.0 mm (30'')	203.2 mm (8'')	50.8 mm (2'')

Adaptado de: Simón Arocha R. **Abastecimiento de agua (Teoría & Diseño)**, pág. 116

Observar la tabla III, que contiene información sobre la elección de la ventosa manual o automática según el diámetro nominal de la tubería.

3.5. Válvulas anticipadoras de onda

Estas válvulas están diseñadas para que se produzca su apertura en el momento de parada de la bomba y cuando se produce la depresión inicial, de tal forma que cuando vuelva a la válvula la onda de sobrepresión, ésta se encuentre totalmente abierta, minimizando al máximo las sobrepresiones que el golpe de ariete puede originar.

3.6. Otros métodos para reducir el golpe de ariete

3.6.1. Volante de inercia

Consiste en incorporar a la parte rotatoria del grupo de impulsión un volante cuya inercia retarde la pérdida de revoluciones del motor, y en consecuencia, aumente el tiempo de parada de la bomba, con la consiguiente minoración de las sobrepresiones.

Este sistema crea una serie de problemas mecánicos mayores, cuanto mayor sea el peso del volante.

3.6.2. 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.

Por último, para reducir el efecto del golpe de ariete se puede realizar la fabricación de tubos con espesor aumentado, teniendo en cuenta la sobrepresión admitida. Así como hacer cierres lentos en las válvulas mediante la colocación de volantes de gran diámetro.

4. EXPERIMENTO DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE

A continuación se detalla el equipo utilizado para provocar el golpe de ariete. Así como el procedimiento para realizar la prueba de laboratorio; todo con el fin de poder observar las características y comportamiento de este fenómeno transitorio.

4.1. Descripción de la instalación e instrumentación

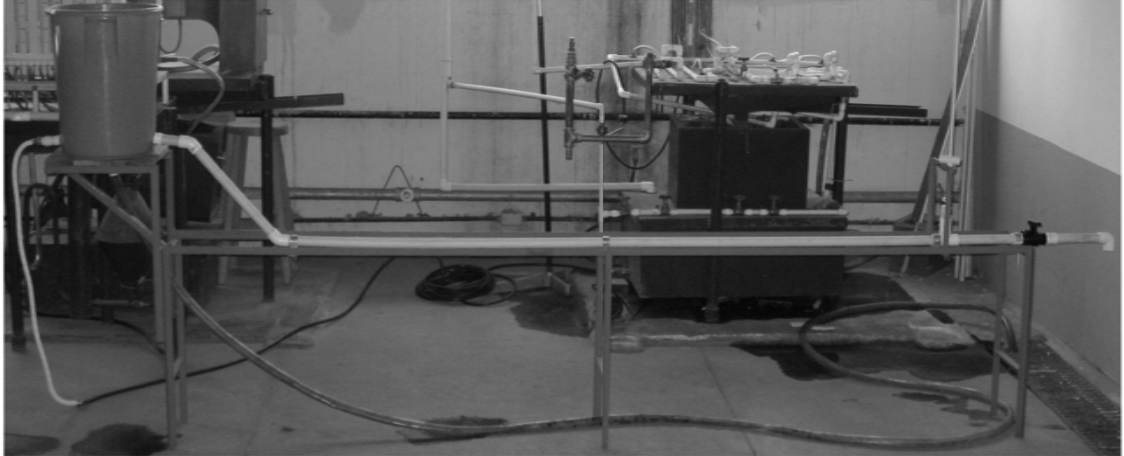
Los elementos que integran la instalación son:

- Estructura: la estructura es de angular tipo 1/8" x 1" x 20' con tornillos de 3/8" – 3/4". La estructura es totalmente desmontable y la chimenea de equilibrio puede estar apoyada mediante un marco que se levanta 30 cm sobre la parte superior de la estructura.
- Bomba centrífuga: el equipo hidráulico tiene una bomba centrífuga capaz de suministrar 4.3/5.5 HP y que se encarga de transferir agua del depósito del equipo hidráulico al depósito de nivel constante, el cual abastece al circuito para el ensayo.

- Depósito: el depósito de nivel constante está fabricado de plástico, material resistente a golpes y otros accidentes. Como se menciona al principio, con este depósito se desea mantener un nivel constante de presión sobre la salida inferior de la tubería. La unión depósito – tubería se logra perforando el depósito y colocando allí un adaptador hembra con un adaptador macho de 1 pulgada ambos, para luego sellar esta unión utilizando unos empaques de hule.
- Circuito: está construido con tubería de PVC con un diámetro nominal de 1 pulgada que cumple con la norma 1120 ASTM D 2241 SDR 26. Con este circuito se busca comprobar los efectos del golpe de ariete.
- Válvula: la válvula de bola colocada casi al final de la tubería abre o cierra completamente el circuito. Con esta válvula se desea cerrar herméticamente el circuito a través de una maniobra de cierre rápido o lento, necesaria para producir las sobrepresiones características del golpe de ariete.
- Chimenea de equilibrio: la chimenea de equilibrio se puede acoplar cuando así lo requiera al circuito, mediante un adaptador macho de $\frac{3}{4}$ de pulgada. Dicha chimenea de equilibrio o piezómetro se encuentra a 30 cm del final de la estructura.

Observar la fotografía de la siguiente página (fig. 32), donde se encuentra la instalación para el ensayo del golpe de ariete.

Figura 32. Fotografía de la instalación para el ensayo del golpe de ariete



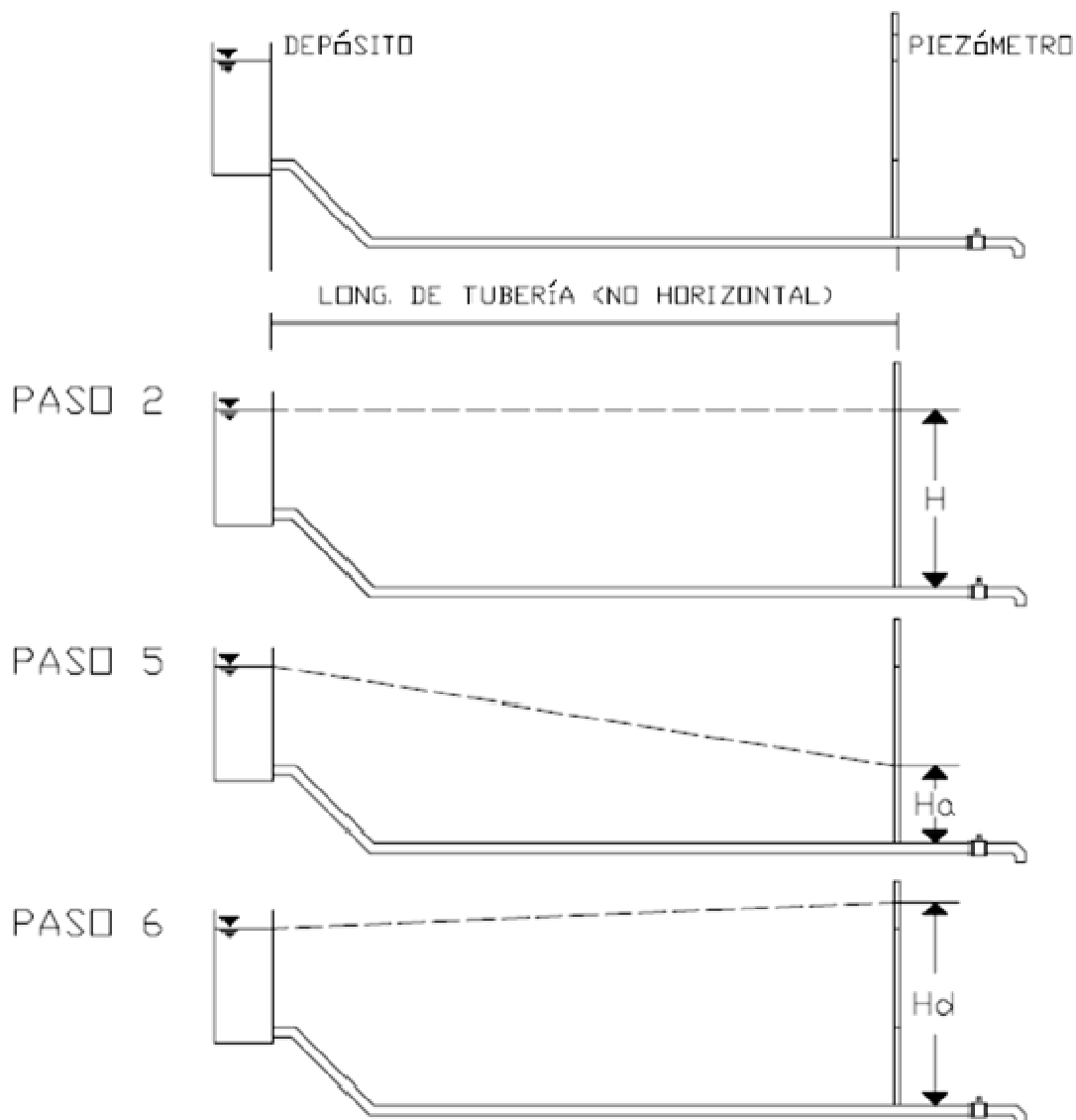
4.2. Descripción del ensayo

A continuación se presentan los pasos para realizar el ensayo, así mismo la figura 33 muestra un esquema con los pasos más importantes a considerar.

1. Llenar el depósito hasta un nivel constante, manteniendo cerrada la válvula de bola al final de la tubería.
2. Marcar o señalar el nivel estático H , en la chimenea de equilibrio.
3. Se deja fluir el agua en el sistema y luego se procede a tomar el tiempo que la válvula de bola tarda en cerrarse (t_c), esto con el objetivo de obtener un cierre instantáneo o lento en su defecto.
4. Nuevamente se deja fluir agua en el sistema (la válvula debe estar totalmente abierta), para determinar el caudal conducido por la tubería, para así conocer la velocidad del flujo (v).

5. Con el agua fluyendo en el sistema, se anota la altura de la columna de agua, que se encuentra en la chimenea de equilibrio (H_a).
6. Por último se cierra instantáneamente y completamente la válvula de bola, para que en ese instante se pueda tomar la lectura del nivel más alto de la columna de agua en el piezómetro (H_d).

Figura 33. Esquema de alturas a considerar en el ensayo



4.3. Obtención de datos

Se realizaron dos ensayos con el objetivo de variar la carga inicial H , por tal razón se entenderá con subíndice uno, el primer ensayo y con subíndice dos, el segundo ensayo. A continuación se detallan dos tablas con los resultados obtenidos de los ensayos; así mismo se recomienda revisar la figura 33 (esquema de alturas a considerar en el ensayo), que ayuda a comprender mejor las tablas.

Siendo:

L : longitud de la tubería

t de aforo: tiempo de llenado

H : presión inicial o carga inicial

t_c : tiempo de cierre de la válvula

D_{ch} : diámetro interno de la chimenea de equilibrio

Vol. de cubeta: volumen del recipiente que se utilizó para el aforo

H_a : altura de agua en la chimenea de equilibrio antes del cierre de la válvula

H_d : altura de agua en la chimenea de equilibrio después del cierre de la válvula

Tabla IV. Datos obtenidos con H = 54.4 cm

No.	Vol. de cubeta	t de aforo	D _{ch}	L	H ₁	H _a	H _d	t _c
0	m ³	s	cm	cm	cm	cm	Cm	s
1	0.019406	23.33	1.1	287.3	54.4	12.5	90	0.65
2	0.019406	23.07	1.1	287.3	54.4	12.5	90	0.65
3	0.019406	23.07	1.1	287.3	54.4	12.5	89	0.65
4	0.019406	23.07	1.1	287.3	54.4	12.5	90	0.91
5	0.019406	22.56	1.1	287.3	54.4	12.5	89	0.91
6	0.019406	22.82	1.1	287.3	54.4	12.5	91	0.91
7	0.019406	22.82	1.1	287.3	54.4	12.5	90	0.91
8	0.019406	23.07	1.1	287.3	54.4	12.5	91	0.91
9	0.019406	23.33	1.1	287.3	54.4	12.5	89	0.91
10	0.019406	23.07	1.1	287.3	54.4	12.5	91	0.91

Tabla V. Datos obtenidos con H = 65.3 cm

No.	Vol. de cubeta	t de aforo	D _{ch}	L	H ₂	H _a	H _d	t _c
0	m ³	s	cm	cm	cm	cm	cm	s
1	0.019406	22.04	1.1	287.3	65.3	15.0	106	0.91
2	0.019406	22.04	1.1	287.3	65.3	15.5	106	0.91
3	0.019406	21.79	1.1	287.3	65.3	15.5	105.5	0.65
4	0.019406	21.27	1.1	287.3	65.3	15.5	105	0.65
5	0.019406	22.04	1.1	287.3	65.3	15.5	105	0.65
6	0.019406	21.79	1.1	287.3	65.3	15.0	104.5	0.65
7	0.019406	22.04	1.1	287.3	65.3	15.1	104.5	0.91
8	0.019406	21.27	1.1	287.3	65.3	15.0	105	0.65
9	0.019406	21.27	1.1	287.3	65.3	15.5	105.5	0.91
10	0.019406	21.27	1.1	287.3	65.3	15.0	104.5	0.91

Obteniendo los valores promedio de cada columna se tiene la siguiente tabla:

Tabla VI. Valores promedio de los ensayos

Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Dimensionales
t _c	0.83	0.78	s
H	54.4	65.3	cm
H _d	90	105.15	cm
D _{ch}	1.1	1.1	cm
H _a	12.5	15.26	cm
t de aforo	23	21.68	s
L	2.873	2.873	m
Vol. de cubeta	0.019406	0.019406	m ³

4.4. Procedimiento para realizar los cálculos

1. Calcular el caudal Q en m³/s que circula

$$Q_1 = \frac{\text{Vol. de cubeta}}{t \text{ de aforo}} = \frac{0.019406 \text{ m}^3}{23 \text{ s}} = 8.437 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$Q_2 = \frac{\text{Vol. de cubeta}}{t \text{ de aforo}} = \frac{0.019406 \text{ m}^3}{21.68 \text{ s}} = 8.951 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

2. Calcular el área transversal de la tubería A_c , con el diámetro interno de la tubería:

$$A_c = \pi r^2 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{4} (0.03035)^2 = 7.23 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

3. Determinar la velocidad v :

$$v_1 = \frac{Q_1}{A_c} = \frac{8.437 \times 10^{-4}}{7.23 \times 10^{-4}} = 1.166 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2 = \frac{Q_2}{A_c} = \frac{8.951 \times 10^{-4}}{7.23 \times 10^{-4}} = 1.238 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

4.4.1. Cálculo de resultados teóricos

Primeramente se debe calcular la celeridad (C), utilizando los siguientes datos:

Diámetro nominal de tubería = 25 mm ó 1 pulgada

Tipo 1120 ASTM D 2241 SDR 26

Módulo de elasticidad del PVC, $E = 2.75 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Densidad del agua, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$

Módulo de elasticidad del fluido, $K = 2.03 \times 10^9 \text{ N/m}^2$

Para el ensayo 1:

Velocidad del fluido, $v_1 = 1.166 \text{ m/s}$

Tiempo de cierre de la válvula, $t_c = 0.83 \text{ s}$

Para el ensayo 2:

Velocidad del fluido, $v_2 = 1.238 \text{ m/s}$

Tiempo de cierre de la válvula, $t_c = 0.78 \text{ s}$

Desarrollo: para el tipo de tubería $D = 0.03035 \text{ m}$ y $e = 0.00152 \text{ m}$, entonces se procede a calcular la velocidad de propagación de la onda que genera la sobrepresión:

$$C = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{[K]}{[E]} \frac{[D]}{[e]}}} = \sqrt{\frac{2.03 \times 10^9 / 1000}{1 + \frac{[2.03 \times 10^9]}{[2.75 \times 10^9]} \frac{[0.03035]}{[0.00152]}}} \approx 359.13 \text{ m/s}$$

Se procede a calcular el período:

$$T = \frac{2L}{C} = \frac{2 \cdot 2.873 \text{ m}}{359.13 \text{ m/s}} = 0.016 \text{ s}$$

Al analizar el tiempo de cierre de la válvula, se determina que el valor para el primer ensayo es $t_c = 0.83 \text{ s}$, y para el segundo ensayo es $t_c = 0.78 \text{ s}$, sin embargo, el periodo de la tubería T (ó $2t_0$), es más pequeño que el t_c ; por lo tanto se tiene un cierre lento en ambos casos. Entonces se calcula la sobrepresión debida a un cierre lento.

Calculando la sobrepresión con la fórmula de Michaud:

$$\Delta H_1 = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c} = \frac{2 \cdot 2.873 \cdot 1.166}{9.8 \cdot 0.83} \approx 0.82 \text{ m}$$

$$\Delta H_2 = \frac{2 \cdot L \cdot v}{g \cdot t_c} = \frac{2 \cdot 2.873 \cdot 1.238}{9.8 \cdot 0.78} \approx 0.93 \text{ m}$$

La presión un metro de columna agua es teóricamente igual a 9810 N/m^2 por lo tanto se pueden expresar los resultados anteriores como:

$$\Delta P_1 = 0.82 \text{ m} \times \frac{9810 \text{ N/m}^2}{1 \text{ m}} = 8044.22 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_2 = 0.93 \text{ m} \times \frac{9810 \text{ N/m}^2}{1 \text{ m}} = 9123.3 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

4.4.2. Cálculo de resultados experimentales

Como son casos de cierre lento, solo se necesita calcular la sobrepresión según la siguiente fórmula experimental:

$$\Delta P_{\text{experimental}} = (H_d - H_a) \times 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

Donde:

$\Delta P_{\text{experimental}}$: es la sobrepresión o el golpe de ariete experimental

H_a : altura de agua en la chimenea de equilibrio antes del cierre de la válvula

H_d : altura de agua en la chimenea de equilibrio después del cierre de la válvula

Por lo tanto:

$$\Delta P_{\text{experimental } 1} = (0.90 \text{ m} - 0.125 \text{ m}) \times 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = 7602.75 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P_{\text{experimental } 2} = (1.0515 \text{ m} - 0.1526 \text{ m}) \times 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} = 8818.21 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

A continuación se presenta una tabla con un resumen de los resultados obtenidos de los dos ensayos.

Tabla VII. Resumen de resultados

No.	H	ΔP teórico	ΔP experimental	t_c	v
0	cm	N / m^2	N / m^2	s	m / s
1	54.4	8044.22	7602.75	0.83	1.166
2	65.3	9123.3	8818.21	0.78	1.238

4.5. Análisis de resultados

Los cálculos como el caudal (Q), el área de la tubería (A_c), la velocidad (v), y la celeridad (C), no se pueden comparar debido a que son resultados que provienen mutuamente de teoría y experimentación (o realidad).

La celeridad (C), y el periodo (T), son características que dependen exclusivamente de las propiedades de la tubería y del líquido a transportar. Es por esta razón que los ensayos 1 y 2 comparten la misma celeridad y periodo; no así el resto de datos. Entonces al comparar la sobrepresión (ΔP), según Michaud, el resultado teórico del primer ensayo es de 8044.22 N/m^2 y del segundo ensayo es de 9123.3 N/m^2 . Ahora, según el experimento de laboratorio la sobrepresión tiene un valor para el primer ensayo de 7602.75 N/m^2 y para el segundo ensayo un valor de 8818.21 N/m^2 . Al restar ambos resultados de sobrepresión (teoría y práctica) para cada ensayo respectivamente, se puede observar una diferencia de 441.47 N/m^2 para el primer ensayo que es una diferencia aproximada de 5.50% respecto al valor teórico. El segundo ensayo presenta una diferencia de 305.09 N/m^2 que es una diferencia aproximada de 3.34% también respecto al valor teórico.

Es importante recordar que las fórmulas teóricas aquí utilizadas fueron deducidas por sus autores a través de sistemas de gran envergadura, por tal motivo, estas fórmulas son seguras y útiles para su aplicación. Así mismo se debe considerar que tanto teoría como práctica nunca darán resultados iguales, sino solo aproximados.

4.6. Conclusiones

Debido a que existen diferentes factores que afectan las mediciones en el laboratorio, por ejemplo: el tiempo de reacción del experimentador, lo versátil del cronometro e inclusive la temperatura del ambiente, fue necesario realizar diez pruebas por cada ensayo (ver tablas IV y V), con el fin de obtener un valor promedio para cada dato necesario para la obtención de resultados. Se hace notar que el tiempo de observación para la toma de cada dato fue muy corto y por consiguiente; el dato es aproximado.

Se pudo observar en los dos experimentos que la onda de presión fue absorbida por la chimenea de equilibrio, que hizo que las oscilaciones (vaivén de la columna de agua) terminaran por disiparse. Todo lo observado en la chimenea se asemeja bastante a lo que sucedería en el interior de la tubería en caso de que no contara con dicha chimenea. Por otro lado a pesar de cerrar la válvula de globo de una manera rápida, el tiempo de cierre (t_c) logrado en los ensayos, fue mayor que el periodo (T), lo que dio como resultado un cierre lento. Este cierre lento se debe a que la longitud de la tubería es muy corta; por lo que se necesita una longitud de al menos 150 metros ($t_c = 2L/C$; $t_c = 0.83$, $C = 359.13$, despejar L) para lograr un cierre rápido en ambos ensayos, claro si se desea. La sobrepresión entonces debida al cierre lento, se distribuyo a lo largo de la tubería según la figura 14.

Por último, la parte importante del laboratorio la muestra el análisis de resultados, porque es donde se puede observar que los resultados teóricos son mayores que los experimentales, lográndose con ello la confianza de que la teoría que se utiliza para los cálculos hidráulicos es aceptable y segura.

CONCLUSIONES

1. Con las ecuaciones matemáticas es posible calcular la intensidad del golpe de ariete. Este cálculo permite dimensionar los elementos destinados para amortiguar el efecto del golpe de ariete en las conducciones hidráulicas.
2. Es habitual diseñar la chimenea de equilibrio con una restricción a la entrada que provoque una mayor pérdida de carga, bien durante la entrada y salida del agua o solamente durante la salida, con el fin de amortiguar más rápidamente las oscilaciones provocadas por el golpe de ariete.
3. El caso más desfavorable para la conducción (máximo golpe de ariete) se da con el cierre instantáneo ($t_c \approx 0$). En la práctica esto sólo ocurre en impulsiones de gran pendiente hidráulica, no siendo lo habitual.
4. Puesto que a mayor tiempo de cierre (t_c) menor sobrepresión, sí se puede controlar el t_c se limitarán en gran medida los problemas en tuberías, siendo éste el caso de los abastecimientos por gravedad.

RECOMENDACIONES

1. Es importante considerar el golpe de ariete en cualquier sistema de bombeo, pues éste se presenta cuando el caudal cambia repentinamente de un momento a otro, cualquiera que sea la causa.
2. Es esencial y necesario que el ingeniero sea capaz de predecir el golpe de ariete, a la vez que estima la presión máxima que éste pueda llegar a producir, y si es posible debe instalar equipo capaz de reducir esta presión hasta que quede dentro de los límites de seguridad.
3. Cuando se desee construir una chimenea de equilibrio es aconsejable estudiar bien la topografía del terreno, pues se pueden ocasionar alturas excesivas que hagan prohibitiva su construcción bajo el punto de vista económico. La ubicación de la chimenea de equilibrio debe ser tal que su altura esté por encima de la línea definida por la piezométrica de funcionamiento del sistema. Esto hace prohibitivo la utilización de chimeneas cercanas a la estación de bombeo, o donde la dinámica de funcionamiento alcance alturas mayores.

4. Se debe colocar todo dispositivo contra golpe de ariete, según se ha diseñado, por ejemplo: las válvulas de descarga deben estar localizadas en los puntos más bajos de la tubería, las válvulas de expulsión de aire deben estar en los puntos más altos, las cámaras de aire comprimido deben estar dispuestos en la parte inicial de las tuberías de descarga, etc.

5. El instructor o laboratorista deberá dar el mantenimiento requerido al sistema de conducción donde se realizan los ensayos; efectuar verificaciones de uniones para evitar posteriores fugas; vaciar el tanque de agua cuando no se utilice, para evitar la corrosión en el impulsor de la bomba y el crecimiento de moho dentro de la tubería de PVC.

6. La correcta operación del equipo, en especial para la toma de datos y en el abrir o cerrar de las válvulas es importante, para un buen funcionamiento y adecuado desarrollo de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arocha R., Simon. **Abastecimientos de agua: teoría & diseño**. Venezuela: Ediciones Vega, 1978. XVII+281pp.
2. de Azevedo, J.M. y Guillermo Acosta A. **Manual de hidráulica**. 6^a ed. México: Harla, 1975. 578pp.
3. Greene, Richard W. **Válvulas: selección, uso y mantenimiento**. México: McGraw-Hill, 1990. VIII+278pp.
4. López, C. Ricardo A. **Diseño de acueductos y alcantarillados**. 2^a ed. Colombia: Alfaomega, 2000. 383pp.
5. Mataix, Claudio. **Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas**. México: Harla, 1976. 582pp.
6. Saldarriaga, Juan. **Hidráulica de tuberías: abastecimiento de agua, redes, riegos**. México: Alfaomega, 2007. XVIII+690pp.
7. Streeter, L. Victor y E. Benjamin Wylie. **Mecánica de los fluidos**. 3^a ed. México: McGraw-Hill, 1996. IX+594pp.
8. Valdez, César Enrique. **Abastecimiento de agua potable**. 4^a ed. (Volumen I). México, D.F.: U.N.A.M, 1994. 258 pp.
9. Williams King, Horace. **Manual de hidráulica: para la resolución de problemas de hidráulica**. México: UTEHA, 1962. 525pp.

7. Aldana Reyes, Gustavo Adolfo. Soluciones numéricas al golpe de ariete por el método de las características. Tesis de graduación. Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1975. 76pp.
8. Arrecis Cabrera, Héctor Hugo. Válvulas de PVC. Trabajo de graduación. Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2007. XV+98pp.
9. Lau Ramos, Jorge. Estudio del golpe de ariete por el método de Louis Bergerón en la tubería de la estación de bombeo de Hincapié. Tesis de graduación. Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 1968. 117pp.
10. Ortiz Masek, Gustavo Adolfo. El golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable. Trabajo de graduación. Ing. Civil. Guatemala, universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2006. XVII+96pp.
11. Amanco. Consideraciones de diseño para instalaciones con tubería P.V.C. Catálogo técnico. Guatemala.

APÉNDICES

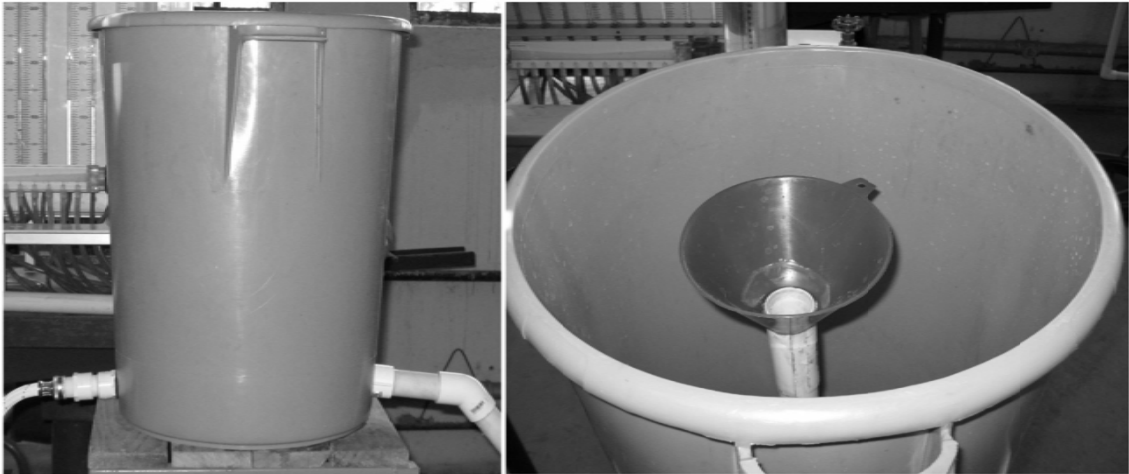
A continuación se presenta una tabla con el detalle de todo lo adquirido para la elaboración del sistema que simula el golpe de ariete.

Tabla VIII. Materiales utilizados para simular el golpe de ariete

No.	Cantidad	Material	Especificaciones	Precio Q	Observaciones
1	1	Tubo de PVC	Longitud = 6m, 160 PSI, $\phi = 1"$	51.14	1120 ASTM D 2241 SDR 26
2	1	Tee	PVC, 160 PSI $\phi = 1"$, roscada	13.75	
3	1	Codo 90°	PVC, 160 PSI $\phi = 1"$, liso	5.70	
4	2	Codo 45°	PVC, 160 PSI $\phi = 1"$, liso	11.40	
5	4	Adaptador macho	PVC, 160 PSI $\phi = 1"$	18.00	
6	1	Adaptador hembra	PVC, 160 PSI $\phi = 1"$	4.23	
7	1	Adaptador macho	PVC, 160 PSI $\phi = 3/4"$	4.00	
8	1	Reductor	PVC, 160 PSI $\phi = 1" - 3/4"$	4.50	
9	1	Manguera		37.50	Para enroscar y desenroscar fácilmente
10	1	Depósito		77.95	40 Litros de capacidad
11	1	Piezómetro			Tubo transparente con medidas
12	1	Cubeta			Para realizar el aforo
13	1	Cronómetro			Para tomar el tiempo de aforo
14	4	Abrazadera de metal		8.00	Para sujetar la tubería y el piezómetro
15	2	Empaque de hule		6.00	1-5/8-X1-3/8X1/8"
16	1	Pegamento para PVC		20.50	
17	1	Cinta de teflón		2.00	1/2X12 m.
18	1	Válvula de bola	PVC, $\phi = 1"$, roscada	33.09	Referencia: 12N-C/R-PVC ITALY 1
19	1	Estructura metálica		500.00	
			TOTAL	797.76	

Figura 34. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 1

Depósito y desagüe para mantener el nivel constante



Entrada del agua al depósito y salida del agua a la tubería

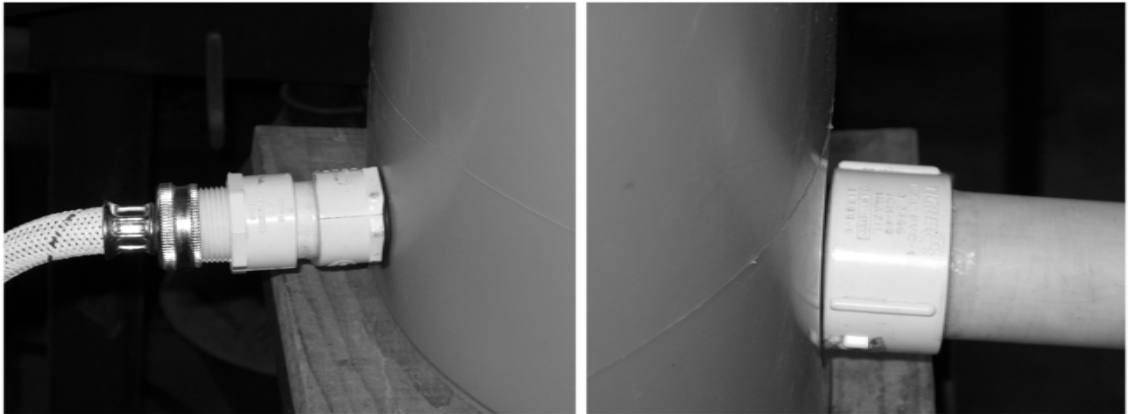


Figura 35. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 2

Acople de la chimenea de equilibrio



Válvula de bola colocada casi al final de la tubería

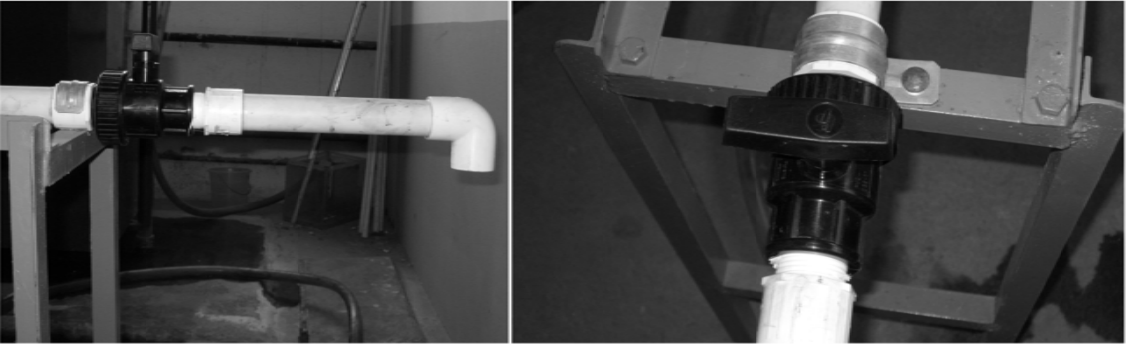


Figura 36. Fotografías de la instalación para el ensayo del golpe de ariete 3

Aforo y toma de medidas para calcular el caudal



Bomba centrífuga utilizada para el laboratorio

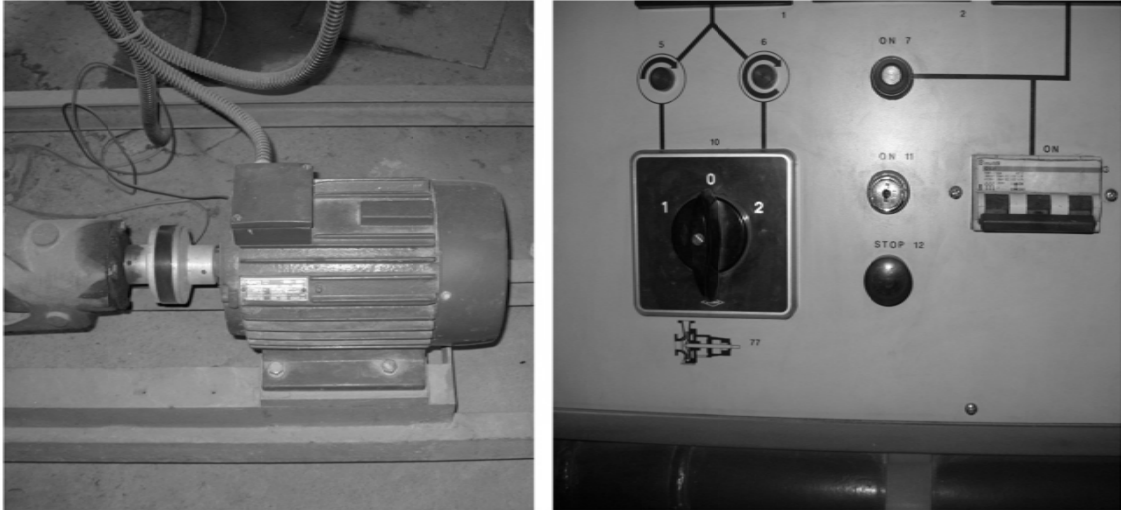
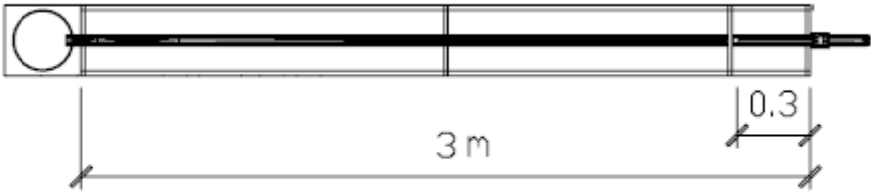
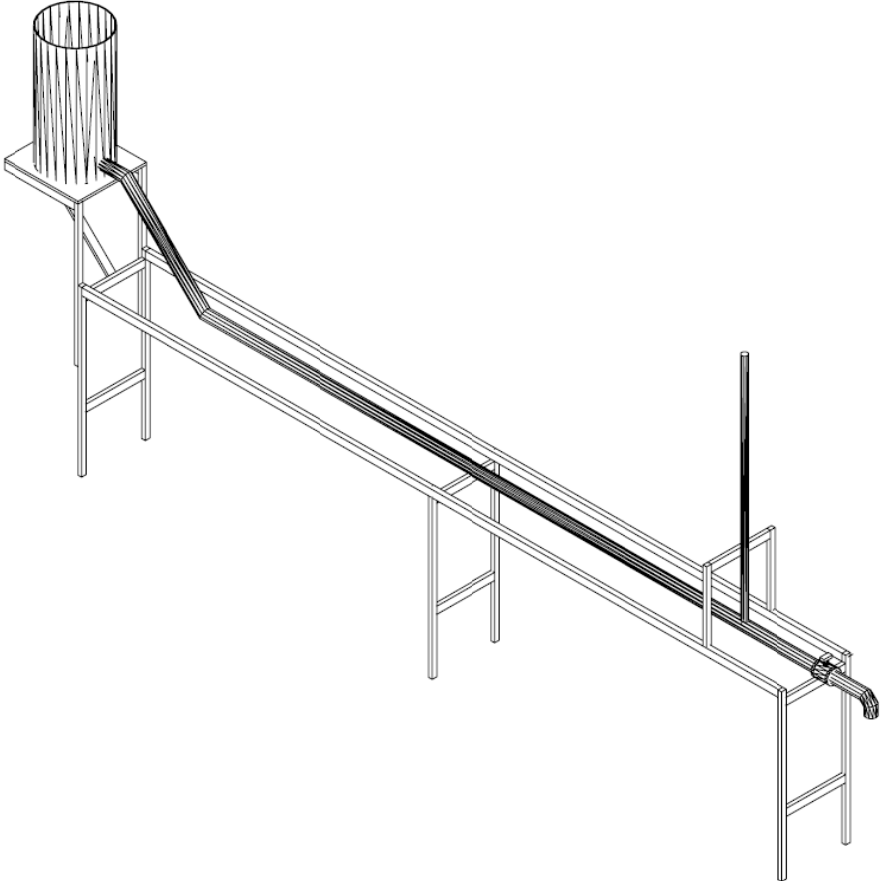


Figura 37. Bosquejo del circuito para simular el golpe de ariete 1



PLANTA

Figura 38. Bosquejo del circuito para simular el golpe de ariete 2

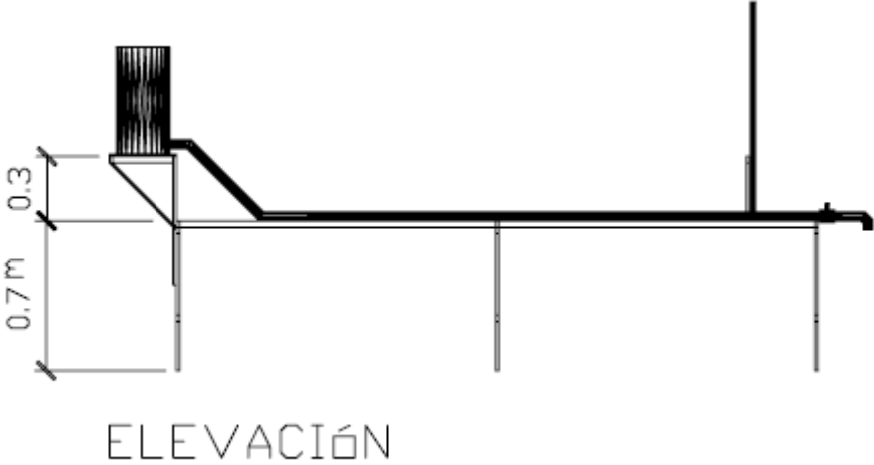
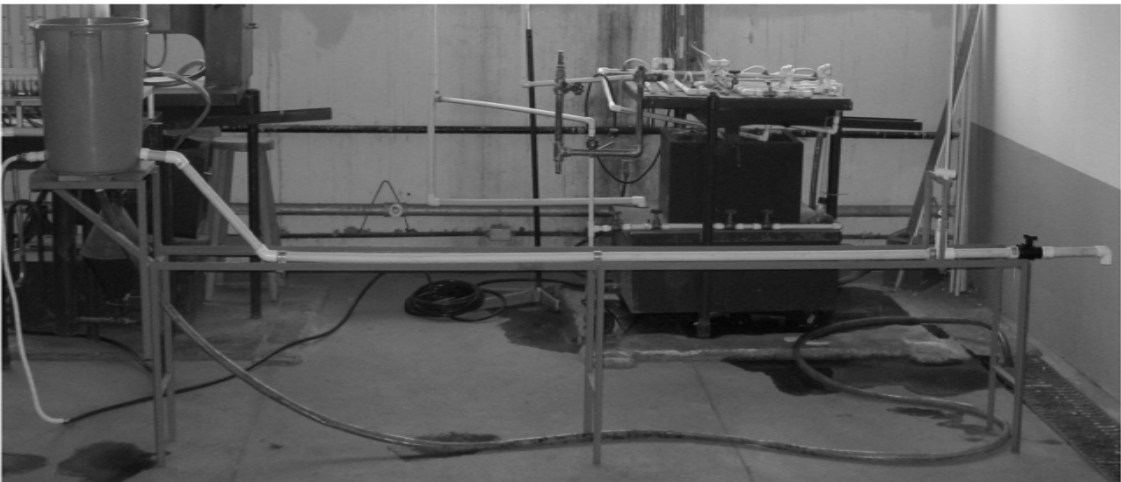


Figura 39. Circuito para simular el golpe de ariete



ANEXOS

Tabla IX. Tubería de PVC 1120 ASTM D 2241 SDR 17

Tubería de PVC ASTM D 2241 SDR 17

Presión de trabajo a 23° C: 250 psi = 17.6 Kg/cm² = 176 m

Presión Mínima de Ruptura: 800 psi = 56.3 Kg/cm² (falla en 60 a 90 segundos)

Longitud de cada tubo: 20 pies = 6.09 m

Diámetro Nominal		Diámetro Exterior		Espesor de Pared (min)		Diámetro Interior		Peso Aproximado	
mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pulg.	Kgs.	Lbs.
18	3/4	26.67	0.840	1.57	0.062	23.52	0.926	1.10	2.42
25	1	33.40	1.315	1.96	0.077	29.49	1.161	1.71	3.77
31	1 ¼	42.16	1.660	2.49	0.098	37.19	1.464	2.74	6.05
38	1 ½	48.26	1.900	2.84	0.112	42.57	1.676	3.59	7.91
50	2	60.33	2.375	3.56	0.140	53.21	2.095	5.61	12.36
62	2 ½	73.03	2.875	4.29	0.169	64.44	2.537	8.20	18.07
75	3	88.90	3.500	5.23	0.206	78.44	3.088	12.16	26.81
100	4	114.30	4.500	6.73	0.265	100.84	3.970	20.11	44.34
125	5	141.30	5.563	8.30	0.327	124.69	4.909	30.68	67.64
150	6	168.28	6.625	9.91	0.390	148.46	5.845	43.58	96.07
200	8	219.08	8.625	12.90	0.508	193.27	7.609	73.89	162.90
250	10	273.05	10.750	16.05	0.632	240.94	9.486	114.59	252.63
300	12	323.85	12.750	19.05	0.750	285.75	11.250	161.28	355.56

Fuente: Amanco. **Consideraciones de diseño para instalaciones con tubería P.V.C.**, pág. 28

Tabla X. Tubería de PVC 1120 ASTM D 2241 SDR 26

Tubería de PVC ASTM D 2241 SDR 26

Presión de trabajo a 23° C: 160 psi = 11.2 Kg/cm² = 112 m

Presión Mínima de Ruptura: 500 psi = 35.15 Kg/cm² (falla en 60 a 90 segundos)

Longitud de cada tubo: 20 pies = 6.09 m

Diámetro Nominal		Diámetro Exterior		Espesor de Pared (min)		Diámetro Interior		Peso Aproximado	
mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pulg.	mm	Pulg.	Kgs.	Lbs.
25	1	33.40	1.315	1.52	0.060	30.35	1.195	1.35	2.97
31	1 ¼	42.16	1.660	1.63	0.064	38.91	1.532	1.83	4.03
38	1 ½	48.26	1.900	1.85	0.073	44.55	1.754	2.39	5.27
50	2	60.33	2.375	2.31	0.091	55.70	2.193	3.72	8.21
62	2 ½	73.03	2.875	2.79	0.110	67.45	2.655	5.45	12.01
75	3	88.90	3.500	3.43	0.135	82.04	3.230	8.14	17.94
100	4	114.30	4.500	4.39	0.173	105.51	4.154	13.41	29.57
125	5	141.30	5.563	5.43	0.214	130.43	5.135	20.51	45.21
150	6	168.28	6.625	6.48	0.255	155.32	6.115	29.10	64.15
200	8	219.08	8.625	8.43	0.332	202.21	7.961	49.32	108.74
250	10	273.05	10.750	10.49	0.413	252.07	9.924	76.48	168.61
300	12	323.85	12.750	12.45	0.490	298.95	11.770	107.62	237.26
375	15	388.62	15.300	14.94	0.588	358.74	14.124	162.444	357.38

Fuente: Amanco. **Consideraciones de diseño para instalaciones con tubería P.V.C.**, pág. 29