



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

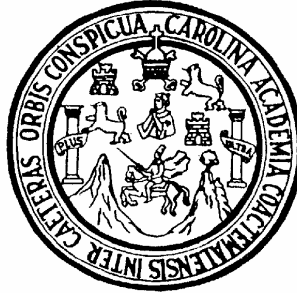
EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

Gustavo Adolfo Ortiz Masek

Asesorado por el Ing. César Vera Mendoza

Guatemala, agosto de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE
AGUA POTABLE**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GUSTAVO ADOLFO ORTIZ MASEK

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, AGOSTO DE 2006

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: Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III: Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR: Ing. Jeovany Rudaman Miranda Castañón
EXAMINADOR: Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
SECRETARIA: Inga. Marcia Ivonne 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:

EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha marzo de 2006.

Gustavo Adolfo Ortiz Masek



DIRECCIÓN
GENERAL

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE INGENIERÍA
CIUDAD UNIVERSITARIA * TELS.: (012) 229 55 00 EXT. 7610, 7617, 7618, 7619, 7623
FAX: 245 48 66
APDO. POSTAL J39 * PUEBLA, PUE., MÉXICO

Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala.
Presente.

El suscrito, M.I. César Vera Mendoza se dirige atentamente a Usted para informarle que como asesor de la tesis denominada "*El Golpe de Ariete en Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable*" presentada por *Gustavo Adolfo Ortiz Masek* -becario PIMA por la OEI-, autorizo la impresión de la misma ya que cumple con los requisitos académicos de forma y contenido correspondientes a un nivel de licenciatura en Ingeniería Civil.

Una vez impresa la tesis, el estudiante puede iniciar los trámites para fijar fecha de examen profesional.

Lo anterior lo hago de su conocimiento para los efectos a que hay lugar, sin otro particular por el momento quedo de Usted

Atentamente
H. Puebla de Z., a 19 de junio de 2006


M.I. César Vera Mendoza
Asesor de Tesis



c.c.p. Gustavo Adolfo Ortiz Masek. Para su conocimiento.

M.I. José Rubén Rodríguez y Domínguez. Secretario Académico





FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 9 de agosto de 2006

Ingeniero
Oswaldo Romeo Escobar Álvarez
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente

Estimado Ing. Escobar Álvarez.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE** desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Gustavo Adolfo Ortiz Masek, quien contó con la asesoría del Ing. César Vera Mendoza.

Considero este trabajo bien desarrollado y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
Revisor por el Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

"TODOPOR SI CAROLINGIA MIA"

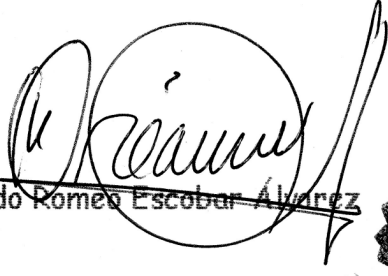
Dr. Carlos Martínez Durán, 2006 centenario de su nacimiento

/bbdeb.



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. César Vera Mendoza y del Revisor por el Departamento de Hidráulica, Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa, al trabajo de graduación del estudiante Gustavo Adolfo Ortiz Masek, titulado EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Oswaldo Romeo Escobar Álvarez



Guatemala, agosto 2006.

/bbdeb.

"TODO POR TI CAROLINGIA MÍA"

Dr. Carlos Martínez Durán, 2006 centenario de su nacimiento



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: **EL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE**, presentado por el estudiante universitario **Gustavo Adolfo Ortíz Masek**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, agosto 10 de 2,006

/gdech

Todo por ti, Carolingia Mía
Dr. Carlos Martínez Durán
2006: Centenario de su Nacimiento

AGRADECIMIENTOS A:

Mi familia, en especial a mis padres, ya que sin su apoyo no habría alcanzado esta meta.

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por ayudarme a realizar este trabajo de graduación, en especial al ingeniero César Vera Mendoza y a Ghislaine Arriola Cervantes, una gran amiga.

Todos los catedráticos que me brindaron sus conocimientos dentro y fuera de las aulas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Todos los compañeros con quienes compartí mi estadía como estudiante sancarlista.

Mi alma mater, la Universidad de San Carlos de Guatemala, por permitirme formar parte de ella.

Mi abuelo Vaclav Masek, con especial cariño, quien siempre me motivo a superarme y a tratar de sobresalir entre los demás.

Quienquiera que alguna vez haya confiado en mí.

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres

Gustavo Adolfo Ortiz Salazar y Patricia Masek de Ortiz

Mis hermanos

Omar Estuardo y Ana Isabel

Mis abuelos

José Felipe Ortiz Castellanos y Vaclav Masek Zivnusktkova

Mis abuelas

Eludia Salazar y Maritza Fernández

Ingeniera

Francés Annette Recari Fernández

Licenciada

Eda René Fernández Chew

Todos mis familiares

Todos mis amigos

Al destino que me ha guiado hasta aquí

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XIII
OBJETIVOS	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	1
1.1. Definición	1
1.2. Componentes del sistema	2
1.2.1. Fuente de abastecimiento	2
1.2.2. Obra de captación	3
1.2.3. Línea de conducción	4
1.2.4. Tanque de distribución	5
1.2.5. Distribución del agua	6
1.2.6. Colector de aguas residuales	6
1.3. Utilización de equipo de bombeo	7
1.3.1. Estaciones de bombeo	7
1.3.2. Bombas	7
1.3.3. Selección de equipo de bombeo	8
1.4. Utilización de válvulas	10
1.4.1. Válvulas	10

1.4.2.	Válvulas en sistemas de abastecimiento de agua potable	13
2.	EL GOLPE DE ARIETE	15
2.1.	Definición	15
2.2.	Causas que originan el golpe de ariete	17
2.3.	Efectos que produce el golpe de ariete	20
2.4.	Planteamiento hidráulico del golpe de ariete	21
2.4.1.	Introducción al análisis del golpe de ariete	22
2.4.2.	Deducción de ecuaciones para el cálculo del golpe de ariete	33
2.4.2.1.	Golpe de ariete por interrupción instantánea del flujo	33
2.4.2.2.	Golpe de ariete por interrupción gradual del flujo	42
2.4.3.	Resumen de fórmulas para el cálculo del golpe de ariete en conducción de agua potable	47
2.4.3.1.	Golpe de ariete por interrupción rápida parcial del flujo	47
2.4.3.2.	Golpe de ariete por interrupción rápida total del flujo	49
2.4.3.3.	Golpe de ariete por interrupción gradual parcial del flujo	50
2.4.3.4.	Golpe de ariete por interrupción rápida parcial del flujo	51
2.4.4.	Aplicación de las fórmulas para el cálculo del golpe de ariete en conducción de agua potable	52

2.4.4.1.	Comportamiento del golpe de ariete a diferentes velocidades de flujo	52
2.4.4.2.	Variación del golpe de ariete de acuerdo al material de fabricación de la tubería	54
2.4.3.3.	Determinación del tiempo necesario para el cierre de una válvula	56
3.	FORMAS DE EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO DEL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	59
3.1.	Cámaras de aire	61
3.1.1.	Descripción del mecanismo	61
3.1.2.	Ventajas de su uso	62
3.1.3.	Limitaciones	62
3.2.	Válvulas de alivio	62
3.2.1.	Descripción del mecanismo	62
3.2.2.	Ventajas de su uso	63
3.2.3.	Limitaciones	64
3.3.	Chimeneas de equilibrio	64
3.3.1.	Descripción del mecanismo	64
3.3.2.	Ventajas de su uso	66
3.3.3.	Limitaciones	67
4.	PRUEBA DEMOSTRATIVA DE LA OCURRENCIA DEL GOLPE DE ARIETE	69
4.1.	Descripción de la prueba	69

4.2.	Objetivos de la prueba	70
4.3.	Equipo a utilizar en la prueba	70
4.4.	Fórmulas a emplear para el desarrollo de la prueba	72
4.4.1.	Fórmulas generales	72
4.4.2.	Fórmulas para el golpe de ariete por cierre rápido de la válvula	74
4.4.3.	Fórmulas para el golpe de ariete por cierre gradual de la válvula	75
4.5.	Procedimiento para realizar la prueba	75
4.6.	Presentación de la información de la prueba	78
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		83
REFERENCIAS		85
BIBLIOGRAFÍA		87
APÉNDICES		89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Esquema general de un sistema de abastecimiento de agua potable	2
2	Esquema del funcionamiento de una bomba	8
3	Aplicaciones de válvulas	12
4	El fenómeno del golpe de ariete	16
5	Golpe de ariete en una conducción por gravedad	18
6	Golpe de ariete en una conducción por bombeo	18
7	Esquema representativo de un golpe de ariete en un conducto por el cierre de una válvula	32
8	Variación de la presión producida por el golpe de ariete en el tiempo	35
9	Funcionamiento de una cámara de aire	55
10	Funcionamiento de una válvula de alivio	57
11	Chimenea de equilibrio vertical	59
12	Chimenea de equilibrio con cámara de expansión	60
13	Equipo para la prueba del golpe de ariete	65
14	Procedimiento a realizar en la prueba del golpe de ariete	71

TABLAS

I	Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción rápida parcial del flujo	48
II	Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción rápida total del flujo	49
III	Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción gradual parcial del flujo	50
IV	Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción gradual total del flujo	51
V	Información para la prueba de golpe de ariete por interrupción rápida del flujo	72
VI	Información para la prueba de golpe de ariete por interrupción gradual del flujo	73
VII	Algunas unidades de medida	89
VIII	Propiedades del agua	90
IX	Valores de módulos de elasticidad para diferentes materiales	90
X	Presiones de servicio	91
XI	Valores promedio de velocidad de una onda de presión de agua para tuberías de diferente material	91
XI	Tubería de acero galvanizado	92
XII	Tubería de cobre tipo M	93
XIII	Tubería de hierro dúctil	94
XIV	Tubería de PVC	95
XV	Válvulas de alivio	96

LISTA DE SÍMBOLOS

A	:	Área
c	:	Celeridad o velocidad de una onda de presión
C_T	:	Celeridad o velocidad de una onda de presión dentro de una tubería
D	:	Diámetro interno de una tubería
e	:	Espesor de una tubería
E	:	Módulo de elasticidad
E_c	:	Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
E_v	:	Módulo de compresibilidad volumétrico
F	:	Fuerza
g	:	Aceleración debida a la gravedad
GA	:	Presión debida al golpe de ariete

L : Longitud

m : Masa

P : Presión

r : Radio interno de una tubería

t_c : Tiempo de cierre

T_{cr} : Tiempo crítico

V : Velocidad

Vol : Volumen

ρ : Densidad

γ : Peso específico

GLOSARIO

Agua potable	Sustancia líquida, inodora, insípida e incolora, sanitariamente segura y apta para su consumo.
Bomba centrífuga	También llamadas de flujo radial, son bombas diseñadas para suministrar caudal mediante la propulsión del líquido al girar el impulsor de esta.
Bomba sumergible	Tipo de bomba cuya succión se encuentra sumergida en el líquido que propulsará.
Canal	Conducto en que circula un líquido con una superficie libre.
Carga disponible	También llamada presión o carga hidráulica, es la diferencia entre la cota piezométrica y la cota del centro de una tubería en un mismo punto de referencia.
Caudal	Volumen de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección transversal al flujo.
Compresibilidad	En fluidos es la capacidad de deformación ante cambios de presión (es un cambio de volumen debido a un cambio de presión).

Curva característica de una bomba	Representación gráfica de la eficiencia de una bomba respecto al caudal que brinda.
Densidad	Cantidad de masa contenida en un volumen unitario.
Energía cinética	Energía de movimiento (por velocidad).
Energía de presión	Energía causada por cambios de presión.
Energía mecánica	Energía producida por una máquina.
Fluido	Cuerpo que cambia fácilmente su forma bajo la acción de fuerzas muy pequeñas. Son fluidos los líquidos y los gases.
Flujo	Movimiento de un fluido.
Línea piezométrica	Línea que describe la altura o carga resultante de sumar las alturas de presión, de movimiento y de posición geodésica.
Módulo de compresibilidad	Relación de cambio relativo de densidad a cambio de presión.
Peso específico	Peso por unidad de volumen.
Piezómetro	Aparato indicador para medir presiones.

Presión	Fuerza ejercida sobre una unidad de área.
Presión de operación	Valor promedio de presión, al cual opera un sistema de abastecimiento de agua.
Presión de servicio	Valor de presión que soporta de manera adecuada una tubería.
Tubería	Conducto de sección circular utilizado para transportar fluidos en su interior.

RESUMEN

Este trabajo de graduación, comprende lo relativo al fenómeno hidráulico del golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable.

En el primer capítulo se menciona de manera breve lo que es un sistema de abastecimiento de agua potable y sus componentes.

Los demás capítulos se refieren al golpe de ariete, desde la definición del mismo, las causas que lo originan, sus efectos y las maneras de evitar o reducir su impacto. Se incluye también el análisis hidráulico del fenómeno para poder calcular su magnitud en las diferentes situaciones en que puede originarse.

Aparece además en el documento la información necesaria para llevar a cabo una prueba de laboratorio demostrativa de la ocurrencia del golpe de ariete.

OBJETIVOS

General:

- Dar a conocer y evaluar el fenómeno hidráulico conocido como golpe de ariete.

Específicos:

1. Identificar las causas que originan el golpe de ariete y los efectos que produce.
2. Determinar de qué manera puede evitarse o reducirse el golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable.
3. Deducir ecuaciones que permitan calcular la magnitud del golpe de ariete.
4. Proponer una prueba de laboratorio donde se represente el golpe de ariete con la finalidad de observar su comportamiento y poder estudiarlo de una manera práctica.

INTRODUCCIÓN

El presente documento trata acerca del fenómeno hidráulico conocido como golpe de ariete, haciendo notar su influencia dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable.

Como información previa para entender el enfoque que se desea plantear respecto al golpe de ariete, se hace mención general de ciertos temas en los que repercute el fenómeno: los sistemas de abastecimiento de agua potable, los equipos de bombeo y las válvulas.

La investigación gira en torno a cuatro aspectos del golpe de ariete: las causas que lo originan (su naturaleza), sus efectos sobre un sistema de abastecimiento de agua potable, las formas o mecanismos para tratar de evitarlo o reducir su impacto y su planteamiento hidráulico.

Finalmente, para que el lector pueda comprender de mejor manera como ocurre el fenómeno, se muestra el procedimiento para realizar una prueba de laboratorio en donde se puedan observar las características que distinguen al golpe de ariete.

1. SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

1.1. Definición

Un sistema de abastecimiento de agua potable es un conjunto de componentes construidos para captar, conducir, tratar, almacenar y distribuir agua apta para consumo humano a los usuarios a quienes esta destinado¹.

Esta compuesto por:

- a) Fuente de abastecimiento
- b) Obra de captación
- c) Línea de conducción
- d) Tanque de distribución
- e) Distribución del agua
- f) Colector de aguas residuales

La configuración de un sistema de abastecimiento de agua potable puede observarse en la figura 1.

Existen dos tipos de fuentes de abastecimiento: superficiales (ríos, arroyos, lagos, lagunas y embalses o presas) y subterráneas (pozos y nacimientos).

1.2.2. Obra de captación

Una obra de captación es la estructura o grupo de estructuras que nos permiten tomar de manera eficiente el agua de la fuente elegida.

En dicha obra deben de considerarse ciertos aspectos, independientemente del tipo de fuente, con la finalidad de garantizar un correcto desempeño de la misma, son los siguientes:

- a) Evitar el acceso de agua, tierra, hojas, etc. en su superficie para prevenir la contaminación del agua captada de la fuente.
- b) Debe contar con ventilación y algún dispositivo de rebalse.
- c) El acceso a la obra debe estar restringido para garantizar la seguridad, estabilidad y funcionamiento de la misma.

1.2.3. Línea de conducción

La línea de conducción tiene la función de conducir o llevar el agua captada de la fuente hasta el lugar de su almacenamiento, tratamiento o distribución. La conducción puede realizarse de dos maneras, por gravedad o por bombeo, esto depende de las condiciones topográficas del terreno por donde pasará la línea.

La conducción por gravedad puede realizarse a través de canales (abiertos o cerrados) o tuberías, dependiendo de la capacidad de la fuente para brindar el caudal requerido, de los recursos disponibles, de la mano de obra y otros factores más.

La conducción por bombeo se utiliza cuando la fuente de abastecimiento se encuentra a un nivel inferior al del tanque de almacenamiento desde el cual el agua será distribuida a la población.

1.2.4. Tanque de distribución

El tanque de distribución o tanque de regularización* es una estructura cuya función principal es el almacenamiento del agua a distribuir, nivelar las variaciones de consumo y mantener presiones adecuadas de servicio. Es importante tomar en cuenta que el tanque debe estar a un nivel más elevado que la red de distribución, tal que permita llevar el agua a su destino por medio de gravedad, es decir, evitar el uso de equipo de bombeo para distribuir el agua.

Dependiendo de su posición con respecto al suelo, los tanques de distribución pueden ser elevados, superficiales o enterrados (parcial o totalmente).

De acuerdo con su material de fabricación, los tanques de distribución pueden ser de mampostería, metálicos, de concreto armado o plásticos.

*Se le da también el nombre de tanque de regularización porque transforma el régimen de aportación de la fuente (que es un caudal constante) a un régimen de demandas variables (mantiene la capacidad de suministro del sistema para las horas en que el consumo es mayor).

1.2.5. Distribución del agua

La distribución comprende las obras necesarias para hacer llegar el agua almacenada hacia la población. Abarca dos partes: la línea de alimentación y la red de distribución.

La línea de alimentación es la tubería instalada desde el tanque de distribución hasta la primera derivación de caudal.

La red de distribución es el conjunto de tuberías instaladas subterráneamente desde las cuales se derivan las tomas domiciliarias que llevan el agua hacia cada uno de los usuarios del sistema.

1.2.6. Colector de aguas residuales*

El colector de aguas residuales no forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable directamente, pero es importante recolectar el agua ya utilizada (aguas servidas) hacia el lugar en donde será tratada para poder reutilizarla. Esta obra esta formada por una red de drenaje y una línea de conducción de aguas residuales hacia la planta de tratamiento.

*El colector de aguas residuales es el inicio de un sistema de recolección y tratamiento de aguas residuales.

1.3. Utilización de equipo de bombeo

1.3.1. Estaciones de bombeo

Cuando en un sistema de abastecimiento de agua potable la energía hidráulica que se dispone en un conducto a presión (tubería) no es suficiente para cumplir con los requerimientos del diseño, es decir, el agua no llega a su destino, se instalan estaciones de bombeo en las cuales se incrementa la energía existente mediante la aplicación de energía externa.

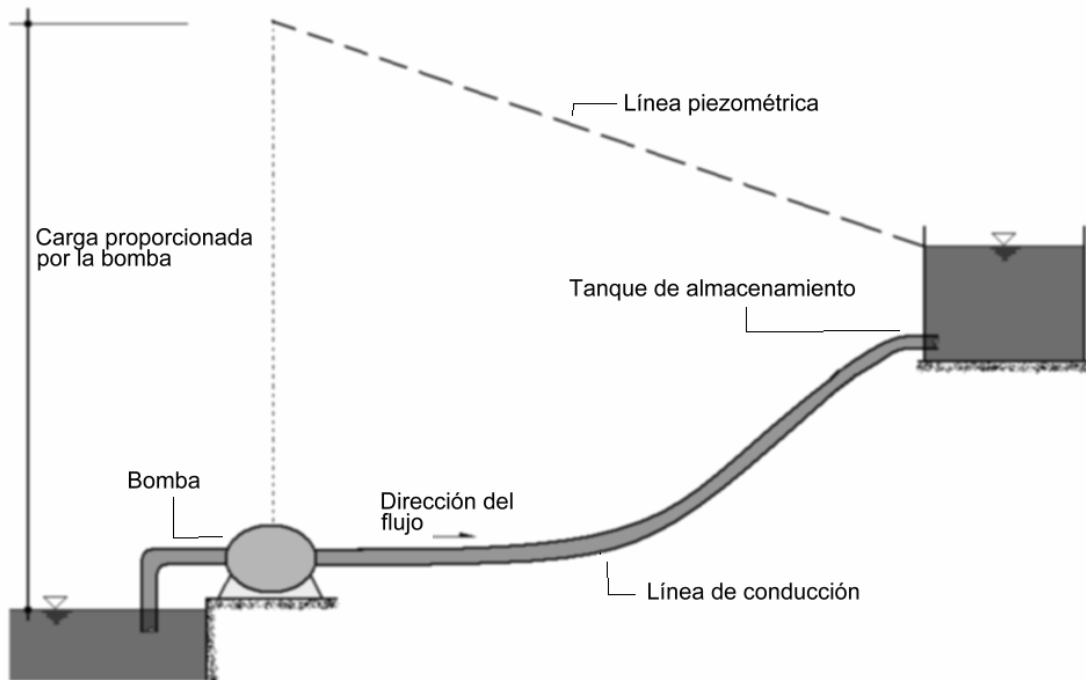
Una estación de bombeo consta de una o varias bombas con sus correspondientes fuentes, tubería de succión y descarga, y de las instalaciones civiles y electromecánicas adecuadas para su operación.

1.3.2. Bombas

Una bomba es una máquina hidráulica que transfiere energía mecánica a un fluido, es decir, aumenta la carga disponible para lograr el desplazamiento del fluido en una tubería (véase figura 2).

En sistemas de abastecimiento de agua potable, por lo general se emplean dos tipos de bombas: las centrífugas y las sumergibles.

Figura 2. Esquema del funcionamiento de una bomba



Es recomendable utilizar bombas únicamente en la conducción (de ser necesario), en la distribución debe de tratarse que el flujo sea por gravedad.

1.3.3. Selección de equipo de bombeo

Usar equipos de bombeo para prestar el servicio de agua potable debe de evitarse según lo posible, ya que su operación y mantenimiento representan un costo considerable que encarece significativamente la prestación del servicio.

Cuando es inevitable el uso de equipo de bombeo, deben tomarse en cuenta varios aspectos:

- a) Escoger una bomba con un rendimiento relativamente alto (eficiente). El procedimiento consiste en analizar la curva característica de la bomba* y observar cual se ajusta más a las necesidades del proyecto, la bomba más adecuada será aquella en la cual el punto de funcionamiento este cerca del punto de máximo rendimiento (PMR).
- b) La carga disponible que provea la bomba seleccionada deberá ser mayor a la requerida en el sistema.
- c) Se seleccionarán equipos de bombeo de gran potencia cuando los diámetros de la tubería a utilizar en el sistema sean pequeños y equipos de bombeo de menor potencia cuando los diámetros de tubería sean grandes.
- d) Debe de realizarse un estudio preliminar en el sitio del proyecto acerca de la disponibilidad de energía (electricidad, combustibles), para seleccionar una bomba que opere con la energía disponible en el lugar.

*La curva característica de la bomba es proporcionada por el fabricante de la misma.

1.4. Utilización de válvulas

1.4.1. Válvulas

Las válvulas son accesorios de tuberías que se utilizan para controlar el caudal que fluye a través de una tubería.

Existen diferentes tipos de válvulas, entre los cuales puede mencionarse:

- a) Válvulas de cheque. Permiten que el agua fluya en una sola dirección, se utilizan generalmente para impedir regreso de flujo.
- b) Válvulas de paso. Se utiliza para regular el flujo en ciertos puntos de control (en tramos muy largos, en cambios de dirección de la tubería, antes de elementos importantes, etc.).
- c) Válvulas de compuerta. Se utilizan en tramos de tubería con poca presión de flujo para cesar o permitir el paso del agua.
- d) Válvulas de globo. Sirven para graduar el flujo, pero son generalmente de uso doméstico (no soportan mucha presión).
- e) Válvulas de flotador. Se utilizan como dispositivos para evitar el rebalse de tanques y obras de captación, ya que constan de un flotador que abre o cierra la válvula de acuerdo al nivel del agua en el reservorio.

- f) Válvulas de aire. Estas válvulas se colocan en los puntos más altos de un tramo de tubería para permitir el escape del aire que se acumula en la línea, principalmente durante el llenado de la misma.

- g) Válvulas rompedoras de presión. Estas válvulas permiten reducir la presión estática en un tramo de tubería, para evitar el uso de tuberías de mayor resistencia para soportar la presión, reduciendo así el costo de la línea.

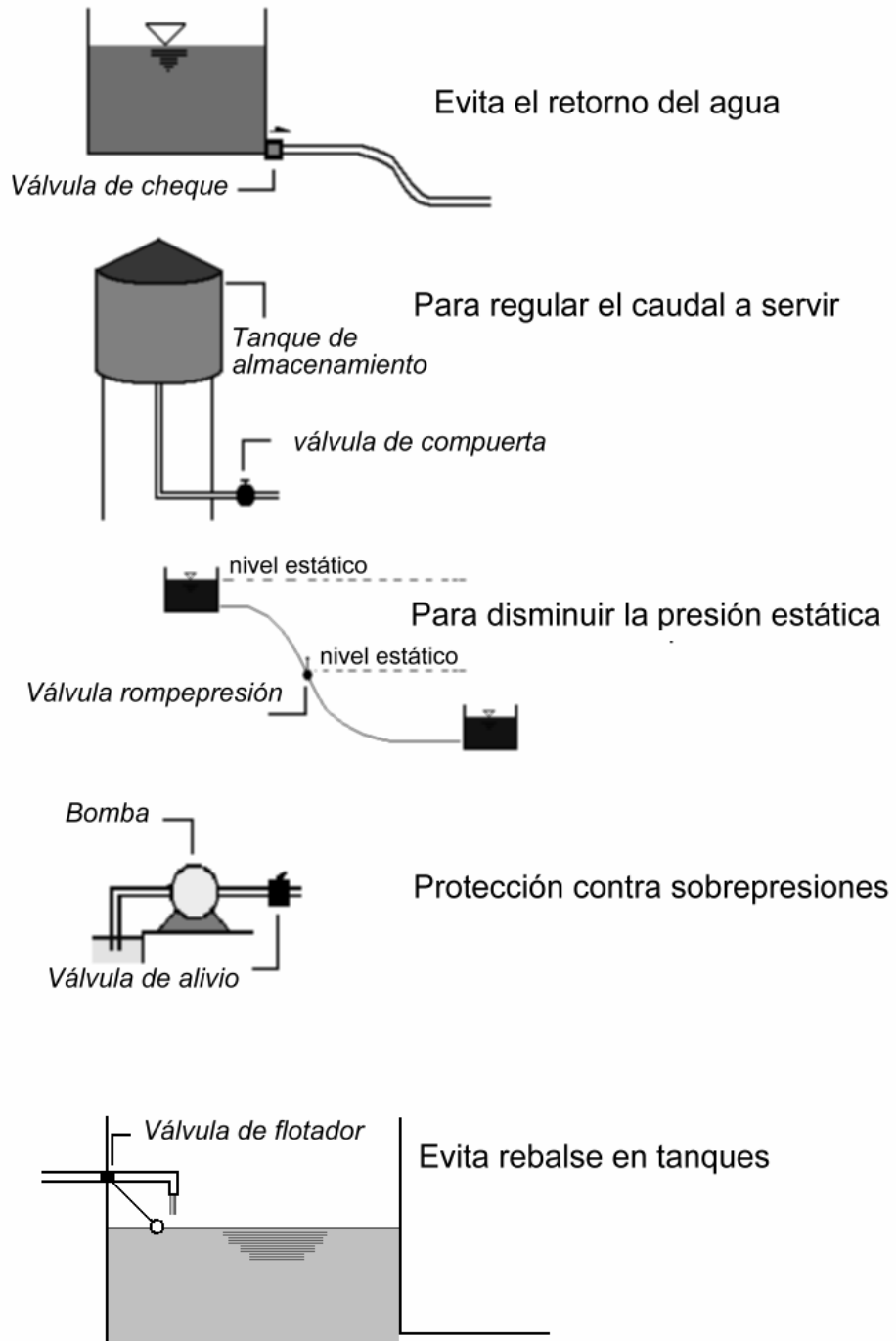
- h) Válvulas de limpieza. Estas se colocan en los puntos más bajos de un tramo de tubería para permitir el drenado de agua en esos puntos cuando sea necesario vaciar la línea.

- i) Válvulas de cierre. Se utilizan para interrumpir el flujo en una tubería.

- j) Válvulas de alivio. Este tipo de válvulas se utiliza para absorber cambios de presión en un tramo de tubería, protegiendo así a los elementos que estén en dicho tramo.

En la figura 3 puede apreciarse algunas aplicaciones de las válvulas antes mencionadas.

Figura 3. Aplicaciones de válvulas



1.4.2. Válvulas en sistemas de abastecimiento de agua potable

En un sistema de abastecimiento de agua potable el uso de válvulas es necesario para cubrir varios aspectos:

- a) Regular el caudal transportado por el sistema.
- b) Evitar que el agua regrese al pasar ciertos tramos de tubería.
- c) Absorber cambios de presión.
- d) Zonificar la distribución del agua en una red.
- e) Proteger los componentes del sistema (captación, tanques, bombas, etc.).

2. EL GOLPE DE ARIETE

2.1. Definición

El golpe de ariete* o “*waterhammer*” puede definirse como el fenómeno hidráulico ocasionado por rápidas fluctuaciones en el flujo debido a la interrupción o inicio súbitos del flujo en una tubería, produciendo una variación de presión por encima o debajo de la presión de operación y cambios bruscos en la velocidad del flujo.

El golpe de ariete es el resultado de una transformación repentina de energía cinética a energía de presión.

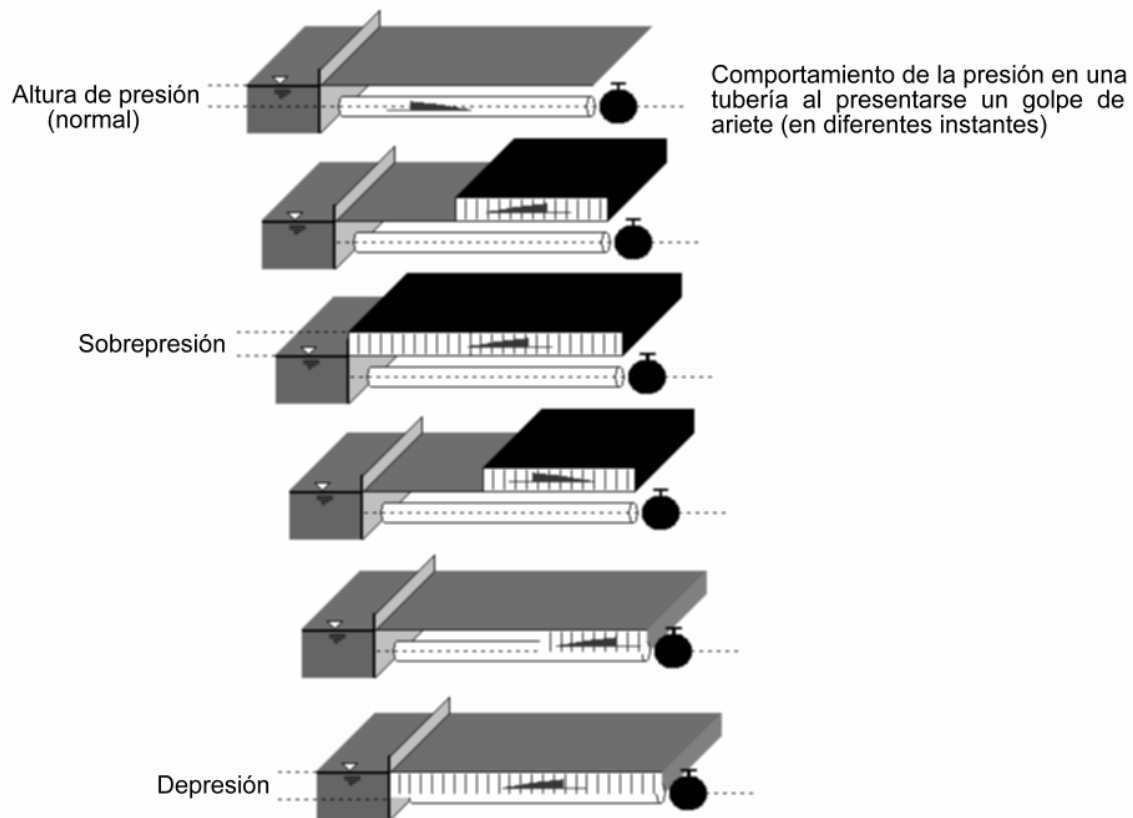
También puede identificarse a este fenómeno como un proceso oscilatorio caracterizado por ondas de presión de gran magnitud al momento de interrumpir o iniciar el flujo dentro de una tubería, las cuales decrecen en el tiempo hasta que la tubería en la que se generó el golpe logra absorber la energía del impacto y se estabiliza la presión en el conducto. Es un fenómeno transitorio.

*Algunos autores se refieren al golpe de ariete como martillo o pulso de agua.

La presión que se produce cuando ocurre un golpe de ariete es presión dinámica (debida al movimiento del fluido).

En la figura 4 puede observarse de manera general la manifestación del golpe de ariete.

Figura 4. El fenómeno del golpe de ariete



Adaptado de: Luis E. Pérez Farrás. **Estudio de transitorios: golpe de ariete.** p 7.

2.2. Causas que originan el golpe de ariete

Como se menciona anteriormente, el golpe de ariete se origina por variaciones repentinas en el flujo dentro de una tubería, en sistemas de abastecimiento de agua potable las causas principales que lo generan son las siguientes:

- a) Operación de bombas.
- b) Manipulación momentánea de válvulas.

En un sistema con conducción por gravedad el golpe de ariete es debido a abrir o cerrar una válvula (véase figura 5) y cuando la conducción es por bombeo se debe al arranque o parada de una bomba (véase figura 6).

Figura 5. Golpe de ariete en una conducción por gravedad

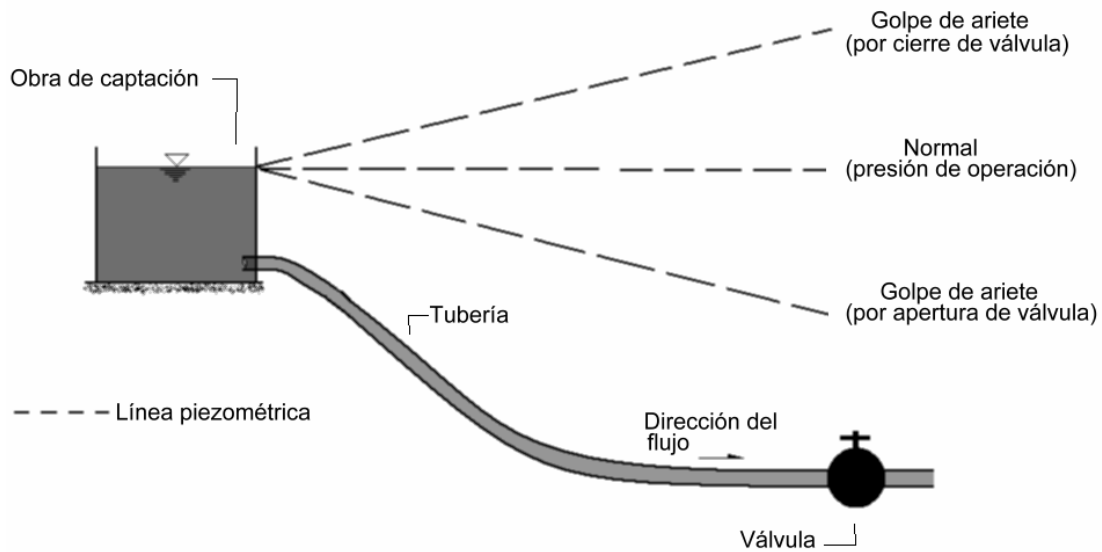
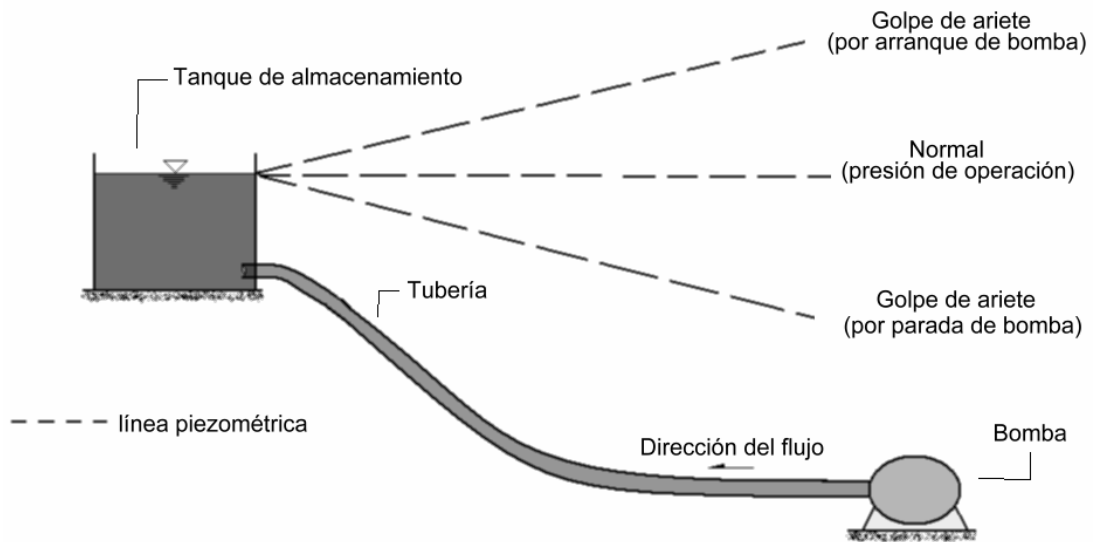


Figura 6. Golpe de ariete en una conducción por bombeo



Las situaciones a las que puede deberse la interrupción o inicio del flujo son las siguientes:

- a) Arranque o parada de una bomba. Por lo general, cuando se utiliza equipo de bombeo, las bombas no trabajan de manera permanente, muchas veces por razones económicas, por lo que se diseña la conducción por bombeo para funcionar en un plazo de horas diarias que son suficientes para brindar el volumen de agua necesario para cubrir la demanda del proyecto. También se interrumpe el funcionamiento por problemas fortuitos tales como la interrupción del suministro de energía a la bomba, cuando se excede la capacidad del tanque de almacenamiento, cuando existe algún desperfecto en la línea de la tubería, cuando la bomba necesita mantenimiento o cuando la bomba falla estando operando.

- b) Manipulación de válvulas. Una válvula se utiliza para controlar el flujo dentro de una tubería, en ocasiones simplemente para graduar el flujo, pero en ciertas circunstancias deben de detener el flujo, como por ejemplo, cuando existe la necesidad de revisar un tramo de tubería por posibles fugas, limpieza de tanques y cajas, excedencias en el suministro, etc.

2.3. Efectos que produce el golpe de ariete

Como consecuencia del aumento brusco y repentino de la presión dentro de un conducto ocasionada por el golpe de ariete, en un sistema de abastecimiento de agua potable pueden producirse los siguientes efectos:

- a) **Ruido.** Quizás sea el efecto menos nocivo (no afecta al sistema como tal), pero afecta a las poblaciones cercanas al lugar en donde se produce el golpe de ariete, interrumpiendo sus actividades y provocando alteraciones en su conducta lo cual puede generar estrés.

- b) **Vibraciones.** Las variaciones de presión al momento de ser absorbidas por el sistema generan vibraciones en las tuberías y en las estructuras cercanas al tramo afectado, ocasionando debilitamiento en su resistencia, agrietamiento (causa de fugas), también pueden aflojar el terreno causando inestabilidad y hundimientos en el suelo. Esta situación empeora el estado del sistema gradualmente cada vez que vuelve a ocurrir el fenómeno (los daños son progresivos).

- c) **Falla en bombas, válvulas y otros accesorios.** Cada uno de los componentes del sistema esta diseñado para soportar un valor de presión determinado e incluso tienen un cierto margen de tolerancia, pero el aumento de presión que ocurre en un golpe de ariete puede sobrepasar ese límite y causar desperfectos en los artefactos, teniendo que realizar en esas circunstancias reparaciones o incluso el reemplazo de la pieza dañada.

d) **Ruptura de tuberías.** El caso más indeseable que puede presentarse a causa del golpe de ariete es el colapso de algún tramo de tubería, esto requeriría atención inmediata ya que el suministro de agua quedaría interrumpido hasta el momento de corregir el problema suscitado.

2.4. Planteamiento hidráulico del golpe de ariete

Suele tratarse a un líquido como un fluido incompresible, es decir, que el cambio de la densidad con respecto al cambio de presión es despreciable.

Los líquidos se consideran comúnmente como fluidos incompresibles. No obstante las ondas de presión, los atraviesan. Esto es evidencia de la elasticidad de los líquidos. En problemas relacionados con el golpe de ariete es necesario tener en cuenta la compresibilidad del líquido².

Esa premisa, la compresibilidad de los líquidos, es la base para el estudio y análisis del golpe de ariete.

2.4.1. Introducción al análisis del golpe de ariete

Para poder plantear alguna ecuación que se refiera al golpe de ariete, de manera previa hay que reconocer que el fenómeno se presenta como ondas de presión (variaciones de presión), por tal motivo, su análisis comienza con la ecuación general de la rapidez de una onda elástica, también llamada celeridad de onda, cuya formulación es la siguiente para un líquido:

$$c = \sqrt{\frac{Ev}{\rho}}$$

O si se multiplica y divide por g :

$$c = \sqrt{\frac{g}{\gamma} Ev}$$

Donde:

- c : Celeridad o velocidad de la onda
- E_v : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- ρ : Densidad del fluido
- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración debida a la gravedad

Dado que el fluido viaja dentro de una tubería y esta tiene cierta elasticidad, en la ecuación anterior el módulo de compresibilidad volumétrico del fluido se reemplaza por el módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica, el cual considera la acción que ejerce la tubería ante el flujo.

El módulo de volumen combinado de un fluido E_c se determina de la siguiente manera:

El módulo de compresibilidad volumétrico de un fluido E_v , es el cambio de volumen de un fluido debido a un cambio de presión, se expresa así:

$$E_v = \frac{Vol \, dP}{dVol}$$

Donde:

- E_v : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- Vol : Volumen unitario de fluido
- dP : Cambio de presión
- $dVol$: Cambio de volumen (compresibilidad del fluido)

Cuando además de deformarse el fluido (cambio de volumen), también la tubería sufre deformación, en la ecuación de E_v se agrega un nuevo término referido al cambio en la tubería debido al cambio de presión (dando lugar a E_c), la expresión queda de la siguiente manera:

$$E_c = \frac{Vol dP}{dVol} + \frac{Vol dP}{dA_{ub}}$$

Donde:

- Ec : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
- Vol : Volumen unitario de fluido
- dP : Cambio de presión
- $dVol$: Cambio de volumen (compresibilidad del fluido)
- dA_{tub} : Cambio en la sección transversal interna de la tubería
- $\frac{Vol dP}{dVol}$: Compresibilidad del fluido debida a la presión (E_v)
- $\frac{Vol dP}{dA_{tub}}$: Compresibilidad de la tubería debido a la presión

El volumen unitario de fluido en el conducto es el área transversal interna de la tubería por unidad de longitud:

$$Vol = \pi r^2$$

El cambio de área de la tubería puede expresarse en función del radio del conducto (variación del área a razón de la variación del radio):

$$A_{tub} = \pi r^2 \Rightarrow dA_{tub} = \pi r dr$$

Donde:

Vol : Volumen unitario de fluido

A_{tub} : Área interna de la tubería

dA_{tub} : Cambio en la sección transversal interna de la tubería

r : Radio interno de la tubería

dr : Cambio en el radio interno de la tubería

La capacidad de deformarse de la tubería esta delimitada por el módulo de elasticidad E de su material de fabricación:

$$E = \frac{\text{Incremento de Esfuerzo}}{\text{Incremento de Deformación Unitaria}}$$

Ya que una tubería es un conducto de pared delgada, el incremento del esfuerzo es la variación del radio de la tubería a causa del cambio de presión con respecto al espesor de la misma:

$$\text{Incremento de Esfuerzo} = \frac{r dP}{e}$$

La deformación unitaria de la tubería expresada en términos de la longitud de su circunferencia (perímetro) es:

$$\text{Circunferencia} = 2\pi r \Rightarrow \text{Deformación Unitaria} = \frac{dl}{2\pi r}; dl = 2\pi dr$$

Sustituyendo dl en la deformación unitaria:

$$\text{Deformación Unitaria} = \frac{2\pi dr}{2\pi r} \Rightarrow \frac{dr}{r}$$

Donde:

- r : Radio interno de la tubería
- dP : Cambio de presión
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería
- dl : Cambio en la longitud de la circunferencia de la tubería

Sustituyendo el incremento de esfuerzo y la deformación unitaria en E :

$$E = \frac{r^2 dP}{edr}$$

De la expresión anterior se puede despejar la variable dP :

$$dP = \frac{eEdr}{r^2}$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- dP : Cambio de presión
- r : Radio interno de la tubería
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Entonces, la compresibilidad volumétrica del conducto, sustituyendo el volumen, el diferencial del área interna de la tubería en términos del radio y la expresión hallada para el cambio de presión, tenemos:

$$\frac{(\pi r^2) \frac{eEdr}{r^2}}{\pi dr}$$

Simplificando el término:

$$\frac{eE}{2r} ; D = 2r \Rightarrow \frac{eE}{D}$$

Donde:

- $\frac{eE}{D}$: Compresibilidad de la tubería debido a la presión
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- r : Radio interno de la tubería
- dr : Cambio en el radio interno de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

El módulo de volumen combinado de un fluido E_c es:

$$E_c = E_v + \frac{eE}{D}$$

Arreglando la expresión de otra manera, elevando ambos lados de la misma a la (-1) potencia:

$$\frac{1}{Ec} = \frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE}$$

Despejando Ec :

$$Ec = \frac{1}{\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE}}$$

Donde:

- Ec : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
- Ev : Módulos de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Entonces, la ecuación de la celeridad de la onda queda de la siguiente forma:

$$C_T = \sqrt{\frac{g}{\gamma} Ec}$$

Sustituyendo Ec por la expresión completa:

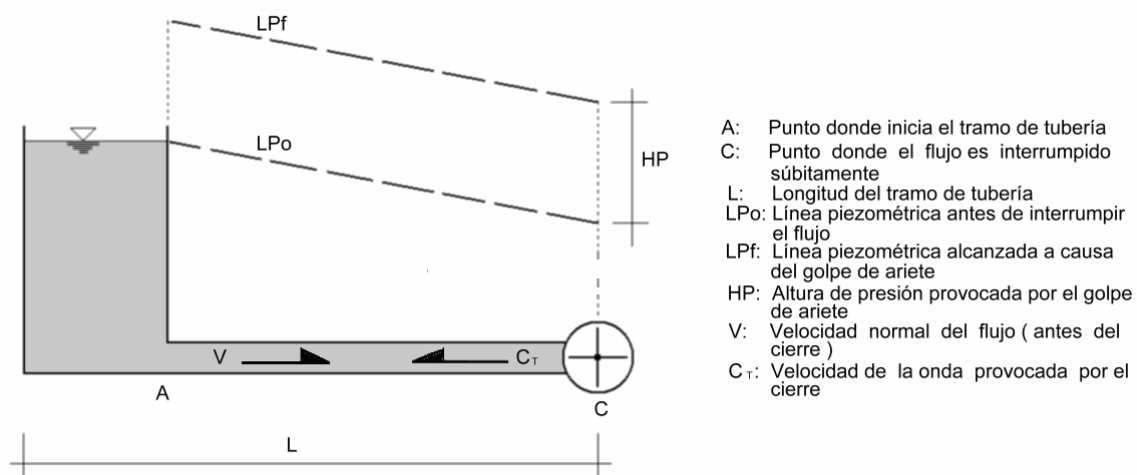
$$C_T = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Donde:

- C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- Ec : Módulo de volumen combinado para un fluido en una tubería elástica
- g : Aceleración debida a la gravedad
- γ : Peso específico del fluido
- Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Para comenzar de lleno con el análisis en sí del golpe de ariete, es conveniente observar de alguna manera que es lo que sucede, para ello a continuación, en la figura 7 se presenta un esquema del comportamiento del fenómeno.

Figura 7. Esquema representativo de un golpe de ariete en un conducto por el cierre de una válvula



Adaptado de: Joseph B. Franzini. **Mécanica de fluidos con aplicaciones en ingeniería.** p 358.

El esquema anterior servirá de referencia para la evaluación del golpe de ariete y poder deducir las ecuaciones que permitan calcularlo.

2.4.2. Deducción de ecuaciones para el cálculo del golpe de ariete

Del golpe de ariete, nos interesa poder determinar el valor máximo de presión que ocurre por su causa, es decir, el análisis se limita a conocer el valor extremo que puede suceder y no al comportamiento del mismo hasta que termina, ya que la situación que interesa para el diseño de los elementos del sistema que puedan someterse a este fenómeno es ese valor crítico de presión que puede alcanzarse.

2.4.2.1. Golpe de ariete por interrupción instantánea del flujo

Para empezar se puede determinar el tiempo que tarda una onda de presión en viajar desde el punto donde se interrumpe el flujo hasta donde inicia la tubería y vuelve otra vez al punto inicial*.

$$T_{cr} = \frac{Dist}{C_T} \Rightarrow T_{cr} = \frac{2L}{C_T}$$

*A este período de tiempo se le denomina tiempo crítico o tiempo de fase.

Donde:

T_{cr} : Tiempo que requiere una onda de presión para pasar de un extremo a otro de la tubería y volver al punto de partida

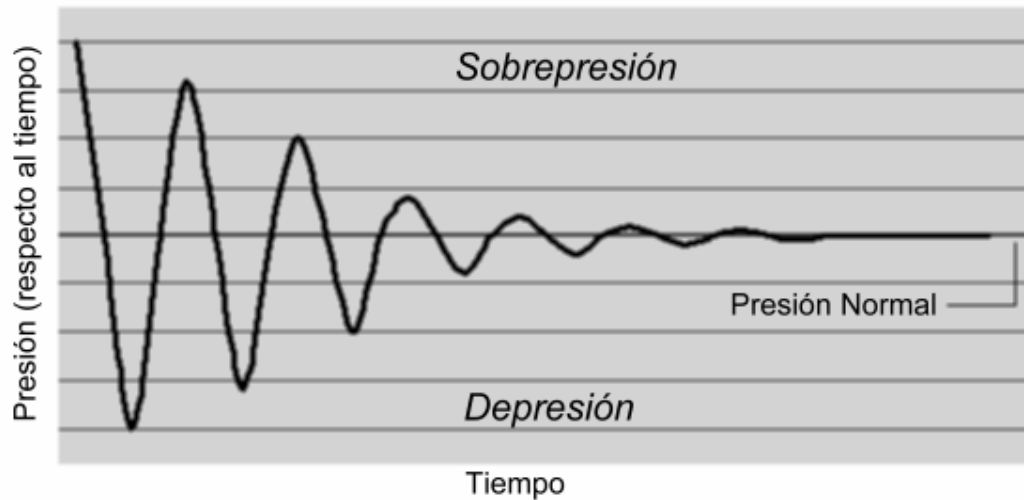
$Dist$: Distancia que debe recorrer la onda de presión

L : Longitud del tramo de tubería

C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Durante el tiempo T_{cr} , la onda de presión permanece constante (máximo valor de presión por el golpe de ariete). La presión comienza a decrecer paulatinamente de acuerdo a la oposición que ofrece la tubería (deformándose) y por la compresibilidad del fluido. Continúan generándose ondas, cada vez de menor magnitud, hasta que se regulariza o normaliza la presión del fluido en el conducto después de un tiempo y número de ondas determinado; este comportamiento puede observarse en la gráfica de la figura 8.

Figura 8. Variación de la presión producida por el golpe de ariete en el tiempo



Adaptado de: Luis E. Pérez Farrás. **Estudio de transitorios: golpe de ariete.** p 52.

Para calcular el cambio de presión causado por el golpe de ariete, se procede de la manera siguiente:

Sabemos que al momento de la interrupción del flujo se propaga una onda de presión con velocidad C_T ; al transcurrir un intervalo de tiempo Δt , el fluido de longitud $C_T\Delta t$ (despejando de la ecuación del tiempo crítico) sufre una desaceleración. La masa de fluido desacelerada en ese intervalo de tiempo es:

$$m = \rho(Vol); Vol = AL_f \Rightarrow Vol = A(C_T\Delta t)$$

Sustituyendo Vol en la ecuación de la masa:

$$m = \rho A(C_T \Delta t)$$

Donde:

- m : Masa del fluido
- ρ : Densidad del fluido
- Vol : Volumen del fluido
- A : Área transversal interna de la tubería
- $L_f, C_T \Delta t$: Longitud del fluido
- C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- Δt : Intervalo de tiempo transcurrido después de la interrupción del flujo

Si se aplica la segunda ley de Newton y se desprecia la fricción, tenemos:

$$F \Delta t = m \Delta V$$

Sustituyendo términos para la situación del golpe de ariete:

$$[PA - (P + \Delta P)A]\Delta t = (\rho AC_T \Delta t)\Delta V$$

Donde:

- F , $[PA - (P + \Delta P)A]$: Fuerza debida a la presión
- Δt : Intervalo de tiempo transcurrido después de la interrupción del flujo
- m , $\rho AC_T \Delta t$: Masa del fluido
- ΔV : Cambio de velocidad del flujo
- P : Presión normal en el conducto
- ΔP : Cambio de presión (manifestación del golpe de ariete)
- A : Área transversal interna de la tubería
- ρ : Densidad del fluido
- C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Considerando a ΔP como el golpe de ariete que se produce en un conducto por interrupción del flujo, de manera resumida puede decirse que el golpe de ariete por interrupción instantánea, total o parcial del flujo, simplificando la ecuación anterior es:

$$GA = -\Delta V \rho C_T$$

Sustituyendo C_T de la ecuación anterior, la ecuación para el golpe de ariete por interrupción instantánea, parcial o total del flujo, queda de la siguiente manera:

$$GA = -\Delta V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}} ; \Delta V = V_f - V_0$$

Donde:

- GA : Golpe de ariete (valor de presión)
- ΔV : Cambio de velocidad del flujo
- V_f : Velocidad del flujo después de la interrupción
- V_0 : Velocidad del flujo antes de la interrupción
- ρ : Densidad del fluido
- C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración debida a la gravedad
- E_v : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

Cuando la interrupción del flujo es instantánea y total, la velocidad varía desde V hasta cero, es decir:

$$\Delta V = 0 - V \Rightarrow \Delta V = -V$$

Donde:

- ΔV : Cambio de velocidad del flujo
- 0 : Velocidad final del flujo
- V : Velocidad inicial del flujo

Entonces, para la interrupción instantánea y total del flujo dentro de una tubería, la presión de golpe de ariete es:

$$GA = V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Donde:

- GA : Golpe de ariete (valor de presión)
- V : Velocidad del flujo
- γ : Peso específico del fluido
- g : Aceleración debida a la gravedad
- Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del fluido
- E : Módulo de elasticidad del material de la tubería
- D : Diámetro interno de la tubería
- e : Espesor de la tubería

La interrupción instantánea del flujo es imposible que ocurra en la realidad, lo que sucede realmente, es una interrupción rápida, ya que se emplea cuando menos un tiempo t_c para interrumpir el flujo.

Se considera que la interrupción del flujo es rápida cuando el tiempo a emplear en el proceso es mayor que cero pero menor o igual al tiempo T_{cr} en que se desplaza la onda de presión:

$$\text{Interrupción rápida} \Rightarrow t_c \leq T_{cr}$$

A pesar que las ecuaciones planteadas anteriormente fueron deducidas considerando una interrupción instantánea, estas son válidas para ser aplicadas en casos reales (interrupción rápida), ya que la presión máxima que se puede alcanzar es la misma, debido a que la onda de presión puede recorrer el tramo completo de tubería y toparse con la interrupción del flujo al momento de completar su recorrido.

2.4.2.2. Golpe de ariete por interrupción gradual del flujo

Se entiende por interrupción gradual o lenta del flujo cuando el tiempo t_c empleado para detener o mermar el flujo, es mayor al tiempo T_{cr} en que se desplaza una onda de presión a lo largo de la tubería y regresa al punto de partida:

$$\text{Interrupción gradual} \Rightarrow t_c > T_{cr}$$

En esta situación el incremento de presión es menor que cuando la interrupción del flujo en la tubería es rápida, debido a que la onda de presión retornará al punto de inicio antes de que la interrupción se haya completado, evitando un aumento adicional de presión producto del choque.

Anteriormente se planteo que una onda de presión requiere para recorrer un tramo de tubería y regresar al punto de partida, un tiempo mínimo:

$$T_{cr} = \frac{2L}{C_T}$$

Donde:

T_{cr} : Tiempo que requiere una onda de presión para pasar de un extremo a otro de la tubería y volver al punto de partida

L : Longitud del tramo de tubería

C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

De igual forma, se puede determinar el tiempo para una distancia cercana al inicio de la tubería en el cual una onda de presión completa un ciclo de acuerdo a la rapidez con que se realice la interrupción del flujo:

$$tc = \frac{2X}{C_T} \Rightarrow X = \frac{C_T tc}{2}$$

Donde:

tc : Tiempo empleado para interrumpir el flujo

X : Distancia hasta la cual puede desplazarse la onda de presión por la rapidez de la interrupción

C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería

Entonces, en el tiempo tc , la onda alcanzaría a llegar hasta una distancia X (la distancia recorrida por la onda sería mayor que el tramo de tubería).

Cuando la interrupción del flujo ocurre lentamente, la presión máxima ΔP sería alcanzada al llegar a una distancia X , pero la presión que realmente se alcanza es $\Delta P'$, esta es la resultante de recorrer el tramo completo de tubería L . De lo anterior, se puede hacer una relación de semejanza de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta P}{X} = \frac{\Delta P'}{L} \Rightarrow \frac{\Delta P'}{\Delta P} = \frac{L}{X}$$

Donde:

- ΔP : Cambio de presión si la interrupción ocurriera rápidamente
- $\Delta P'$: Cambio de presión por interrupción gradual del flujo (golpe de ariete)
- X : Distancia hasta la cual puede desplazarse la onda de presión por la rapidez de la interrupción
- L : Longitud del tramo de tubería

De la ecuación anterior $\Delta P'$, es la presión de golpe de ariete por interrupción gradual, parcial o total del flujo. El golpe de ariete queda expresado como:

$$GA = \frac{L}{X} \Delta P$$

Sustituyendo X por la expresión completa:

$$GA = \frac{2L}{C_r tc} \Delta P$$

Por último sustituyendo ΔP por la fórmula inicial del golpe de ariete por interrupción instantánea del flujo ($\Delta V \Delta CT$), la ecuación para determinar el golpe de ariete por interrupción gradual, parcial o total del flujo, queda de la siguiente forma:

$$GA = \frac{2L\rho\Delta V}{tc} ; \Delta V = V_f - V_0$$

Donde:

- GA : Golpe de ariete (valor de presión)
- L : Longitud del tramo de tubería
- X : Distancia hasta la cual puede desplazarse la onda de presión por la rapidez de la interrupción
- ΔP : Cambio de presión si la interrupción ocurriera rápidamente
- C_T : Celeridad o velocidad de la onda de presión dentro de la tubería
- tc : Tiempo empleado para interrumpir el flujo
- ρ : Densidad del fluido
- ΔV : Cambio de velocidad del flujo
- V_f : Velocidad del flujo después de la interrupción
- V_0 : Velocidad del flujo antes de la interrupción

De igual manera que en el caso de la interrupción instantánea total del flujo, en este caso se puede sustituir el cambio de velocidad por la velocidad del flujo cuando la interrupción es gradual y total. La ecuación para interrupción gradual total del flujo es:

$$GA = \frac{2L\rho V}{tc}$$

Donde:

- GA : Golpe de ariete (valor de presión)
- L : Longitud del tramo de tubería
- ρ : Densidad del fluido
- V : Velocidad del flujo
- tc : Tiempo empelado para interrumpir el flujo

2.4.3. Resumen de fórmulas para el cálculo del golpe de ariete en conducción de agua potable

2.4.3.1. Golpe de ariete por interrupción rápida parcial del flujo

$$GA = (V_f - V_0) \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Dimensionales de las variables:

Tabla I. Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción rápida parcial del flujo

Variable	Descripción	Dimensionales	
GA	Golpe de ariete	N/m ²	psf
V_f	Velocidad final del flujo	m/s	ft/s
V_0	Velocidad inicial del flujo	m/s	ft/s
γ	Peso específico del agua	N/m ³	lb/ft ³
g	Aceleración debida a la gravedad	m/s ²	ft/s ²
E_v	Módulo de compresibilidad volumétrico del agua	N/m ²	psf
E	Módulo de elasticidad del material de la tubería	N/m ²	psf
D	Diámetro interno de la tubería	Cualesquiera unidades coherentes con el espesor (e)	
e	Espesor de la tubería	Cualesquiera unidades coherentes con el diámetro (D)	

*Para obtener el golpe de ariete en psi, multiplicar por 1/144 el resultado en psf del cálculo.

*Para obtener el golpe de ariete en mca, multiplicar por 1/9810 el resultado en N/m² del cálculo.

2.4.3.2. Golpe de ariete por interrupción rápida total del flujo

$$GA = V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

Dimensionales de las variables:

Tabla II. Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción rápida total del flujo

Variable	Descripción	Dimensionales	
GA	Golpe de ariete	N/m ²	psf
V	Velocidad del flujo	m/s	ft/s
γ	Peso específico del agua	N/m ³	lb/ft ³
g	Aceleración debida a la gravedad	m/s ²	ft/s ²
Ev	Módulo de compresibilidad volumétrico del agua	N/m ²	psf
E	Módulo de elasticidad del material de la tubería	N/m ²	psf
D	Diámetro interno de la tubería	Cualesquiera unidades coherentes con el espesor (e)	
e	Espesor de la tubería	Cualesquiera unidades coherentes con el diámetro (D)	

*Para obtener el golpe de ariete en psi, multiplicar por 1/144 el resultado en psf del cálculo.

*Para obtener el golpe de ariete en mca, multiplicar por 1/9810 el resultado en N/m² del cálculo.

2.4.3.3. Golpe de ariete por interrupción gradual parcial del flujo

$$GA = \frac{2L\rho(V_f - V_0)}{tc}$$

Dimensionales de las variables:

Tabla III. Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción gradual parcial del flujo

Variable	Descripción	Dimensionales	
GA	Golpe de ariete	N/m ²	psf
L	Longitud del tramo de tubería	M	ft
ρ	Densidad del fluido	Kg/m ³	slug/ft ³
V_f	Velocidad final del flujo	m/s	ft/s
V_0	Velocidad inicial del flujo	m/s	ft/s
tc	Tiempo empelado para interrumpir el flujo	S	s

*Para obtener el golpe de ariete en psi, multiplicar por 1/144 el resultado en psf del cálculo.

*Para obtener el golpe de ariete en mca, multiplicar por 1/9810 el resultado en N/m² del cálculo.

2.4.3.4. Golpe de ariete por interrupción gradual total del flujo

$$GA = \frac{2L\rho V}{tc}$$

Dimensionales de las variables:

Tabla IV. Dimensionales de las variables para el golpe de ariete por interrupción gradual total del flujo

Variable	Descripción	Dimensionales	
GA	Golpe de ariete	N/m ²	psf
L	Longitud del tramo de tubería	m	ft
ρ	Densidad del fluido	Kg/m ³	slug/ft ³
V	Velocidad del flujo	m/s	ft/s
tc	Tiempo empelado para interrumpir el flujo	s	s

*Para obtener el golpe de ariete en psi, multiplicar por 1/144 el resultado en psf del cálculo.

*Para obtener el golpe de ariete en mca, multiplicar por 1/9810 el resultado en N/m² del cálculo.

2.4.4. Aplicación de las fórmulas para el cálculo del golpe de ariete en conducción de agua potable

2.4.4.1. Comportamiento del golpe de ariete a diferentes velocidades de flujo

Considerando que puede ocurrir un golpe de ariete por interrupción rápida del flujo, por ejemplo por el paro de una bomba, y tomando como condiciones de la conducción del agua las siguientes:

- Tubería de PVC de *2 pulgadas* de diámetro nominal, SDR 13.5.
- Presión normal de operación: *150 mca* (diferencia de alturas en el tramo).
- Longitud del tramo de tubería: *500 metros*.
- Tiempo empleado para interrumpir el flujo: *1.00 segundos*.

Como primer paso, se procede a corroborar que el golpe de ariete que puede ocurrir será por interrupción rápida del flujo, comparando el tiempo crítico con el tiempo en que se interrumpe el flujo:

Sabemos que C_T (velocidad de la onda de presión) es *450.77 m/s*. Podemos calcular el tiempo crítico:

$$T_{cr} = \frac{2(500)}{450.77} = 2.22 \text{ segundos}$$

Efectivamente: $1 s < 2.22 s \rightarrow$ cierre rápido

Ya que la tubería a utilizar es de PVC tipo SDR 13.5, sabemos que la presión máxima que soporta esta es $220 mca$, por lo que la máxima sobrepresión (golpe de ariete) que admite el sistema, es la diferencia entre la presión de servicio de la tubería y la presión de operación normal del sistema:

$$220 mca - 150 mca = 70 mca$$

Comprobado que el tiempo de cierre es rápido y conociendo la sobrepresión que admite el sistema, podemos calcular el golpe de ariete para distintos valores de velocidad¹⁸ y determinar que velocidad produce un golpe de ariete admisible:

$$0.5 m/s: GA = 0.5 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 22.21 mca$$

$$1.0 m/s: GA = 1.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 44.41 mca$$

$$1.5 m/s: GA = 1.5 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 66.62 mca$$

$$2.0 \text{ m/s: } GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 88.83 \text{ mca}$$

$$2.5 \text{ m/s: } GA = 2.5 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 111.03 \text{ mca}$$

$$3.0 \text{ m/s: } GA = 3.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{55.8}{4.5(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 133.24 \text{ mca}$$

Conociendo la magnitud del golpe de ariete para cada velocidad de flujo, se puede observar que la tubería lo soporta por sí misma hasta una velocidad de 1.5 m/s , en caso de que el sistema opere a una velocidad mayor sería necesario el uso de algún mecanismo de protección.

2.4.4.2. Variación del golpe de ariete de acuerdo al material de fabricación de la tubería

Considerando que sabemos que puede ocurrir una interrupción rápida en el flujo y las siguientes condiciones en la conducción del agua:

- Diámetro nominal de la tubería: 3 pulgadas .
- Velocidad del flujo: 2 m/s .

En esta situación nos interesa conocer el rango de variación de sobrepresión que se produce al utilizar diferentes tipos de tubería, por lo que se calcula el golpe de ariete para cada tipo de tubería:

Cobre:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{77.54}{1.83(120 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 223.08 \text{ mca}$$

Hierro dúctil:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{92.47}{8.13(166 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 274.66 \text{ mca}$$

PVC SDR 13.5:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{82.30}{6.60(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 91.77 \text{ mca}$$

PVC SDR 21:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{84.70}{4.20(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 73.54 \text{ mca}$$

PVC SDR 26:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{85.5}{3.4(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 66.27 \text{ mca}$$

PVC SDR 32.5:

$$GA = 2.0 \sqrt{\frac{9810}{9.81 \left(\frac{1}{2.074 \times 10^9} + \frac{86.2}{2.7(2.8 \times 10^9)} \right)}} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 59.14 \text{ mca}$$

Puede concluirse que el golpe de ariete aumenta conforme aumenta la rigidez del material de fabricación de la tubería.

2.4.3.3. Determinación del tiempo necesario para el cierre de una válvula

Cuando se manipulan válvulas puede controlarse la magnitud de un golpe de ariete tan solo determinando el tiempo de cierre óptimo de la válvula o al menos ocupando el tiempo suficiente para no generar sobrepresiones que dañen la tubería y así evitar el uso de algún tipo de protección. Por ejemplo, considerando un sistema con las siguientes características:

- Tubería de PVC de *4 pulgadas* de diámetro nominal, SDR 26.
- Presión normal de operación: *80 mca* (diferencia de alturas en el tramo).
- Longitud del tramo de tubería: *750 metros*.
- Velocidad dl flujo: *2 m/s*.

De este caso conocemos C_T : 328.80 m/s . El tiempo crítico es:

$$T_{cr} = \frac{2(750)}{328.80} = 4.56 \text{ segundos}$$

Quiere decir que el cierre deberá efectuarse en más de 4.60 segundos para producir un golpe de ariete por interrupción gradual del flujo.

Además, sabemos que la presión de operación del sistema es 80 mca y que la tubería admite un valor de presión de 112 mca , por lo que la sobrepresión que puede soportar el sistema es:

$$112 \text{ mca} - 80 \text{ mca} = 32 \text{ mca}$$

Calculando el golpe de ariete para diversos tiempos de cierre de la válvula:

$$5 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{5} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 61.16 \text{ mca}$$

$$6 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{6} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 50.97 \text{ mca}$$

$$7 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{7} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 43.69 \text{ mca}$$

$$8 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{8} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 38.22 \text{ mca}$$

$$9 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{9} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 33.98 \text{ mca}$$

$$10 \text{ segundos: } GA = \frac{2 \times 750 \times 1000 \times 2}{10} \times \left(\frac{1}{9810} \right) = 30.58 \text{ mca}$$

Como se observa, para que la tubería soporte el golpe de ariete generado por el cierre de la válvula, sin necesidad de utilizar protección, deberá llevarse a cabo en al menos 10 segundos.

3. FORMAS DE EVITAR O REDUCIR EL IMPACTO DEL GOLPE DE ARIETE EN SISTEMAS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE

El fenómeno del golpe de ariete se hace importante, y merece atención, cuando las condiciones de cambio de presión son drásticas y por ende peligrosas. Si esto no es así, el golpe de ariete puede ser soportado por cualquier tubería sin sufrir ninguna consecuencia³.

Evitar que se produzca un golpe de ariete es casi imposible, en realidad lo más pertinente para controlarlo es buscar algún mecanismo de protección contra el fenómeno o alguna forma de atenuar su efecto.

Es posible que un sistema soporte las variaciones de presión causadas por el golpe de ariete utilizando tuberías de mayor espesor y de materiales más resistentes, pero en algunas ocasiones las sobrepresiones alcanzan valores muy elevados o simplemente el costo del sistema aumenta demasiado.

Cuando el golpe de ariete es ocasionado por manipulación de válvulas, la magnitud de este puede minimizarse mediante el control del tiempo de apertura o cierre de la válvula, tal que sea lo suficientemente lento como para no generar sobrepresiones que sobrepasen los valores estipulados en el diseño.

Para el caso del golpe de ariete a raíz del paro o arranque de una bomba, la magnitud de la variación de presión es bastante significativa y no puede evitarse. Para esta situación existen diferentes mecanismos que ayudan a disipar la presión generada reduciendo el impacto de esta en el sistema.

Los mecanismos utilizados con mayor frecuencia para controlar el golpe de ariete son:

- a) Cámaras de aire.
- b) Válvulas de alivio.
- c) Chimeneas de equilibrio.

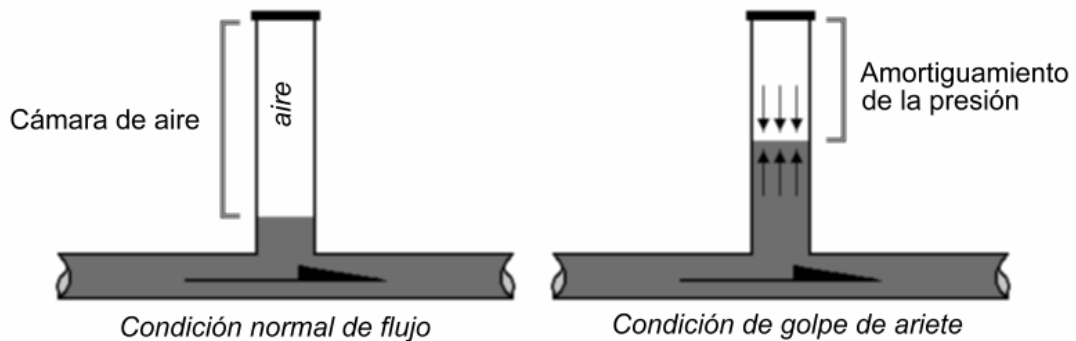
Cabe aclarar que estos mecanismos deben instalarse a la menor distancia posible del punto donde se origina el golpe de ariete, con la finalidad de evitar que las ondas de presión se propaguen mientras son disipadas.

3.1. Cámaras de aire

3.1.1. Descripción del mecanismo

Una cámara de aire, colchón de aire o “*air chamber*”, no es más que una tubería relativamente corta, unida verticalmente a la tubería de conducción, llena de aire o cualquier otro gas y con una tapa en su extremo superior. Estas cámaras funcionan amortiguando la sobrepresión del golpe de ariete cuando el agua ingresa al conducto lleno de aire y choca contra este, disipando gran parte de la energía de presión que se produce (véase figura 9).

Figura 9. Funcionamiento de una cámara de aire



3.1.2. Ventajas de su uso

- a) Fácil instalación.
- b) Bajo costo (es tan sólo una extensión de la tubería).
- c) Bastante capacidad para disipar presión.

3.1.3. Limitaciones

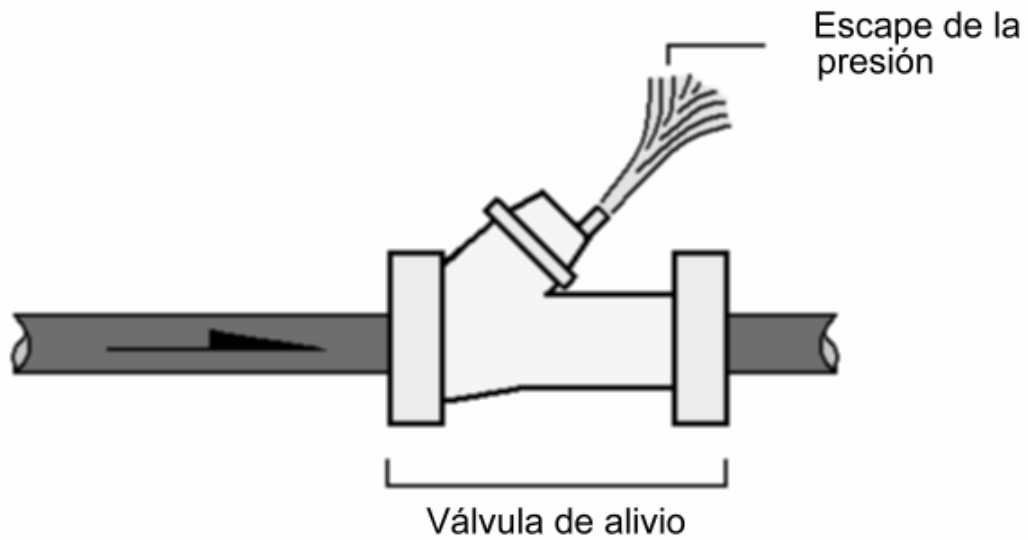
El problema de las cámaras de aire es que con el tiempo el agua absorbe el aire hasta anegarlas completamente, quedando inservibles para proteger al sistema.

3.2. Válvulas de alivio

3.2.1. Descripción del mecanismo

Las válvulas de alivio o compesadoras de presión, son dispositivos que pueden absorber variaciones repentinas de presión mediante la expulsión de agua a través de sí mismas, tienen una salida de desfogue ante el exceso de presión (véase figura 10).

Figura 10. Funcionamiento de una válvula de alivio



Adaptado de: Luis E. Pérez Farrás. **Estudio de transitorios: golpe de ariete.** p 58.

3.2.2. Ventajas de su uso

- a) Son fabricadas industrialmente (capacidad garantizada).
- b) No ocupan mucho espacio.
- c) Puede regularse la velocidad de apertura y cierre de acuerdo a las condiciones en que opera el sistema.

3.2.3. Limitaciones

La principal limitación de las válvulas de alivio es su capacidad de amortiguamiento de presión, ya que en promedio resisten hasta 50 mca de sobrepresión, lo cual es insuficiente en algunas situaciones.

Otro inconveniente, es que los diámetros disponibles son limitados, aunque existe diversidad de accesorios para acoplarlas, pero esto disminuye su efectividad.

3.3. Chimeneas de equilibrio

3.2.1. Descripción del mecanismo

Una chimenea de equilibrio, también conocida como pozo piezométrico o “*surge tank*”, es un depósito abierto a la atmósfera en su extremo superior conectado perpendicularmente a la tubería de conducción. La chimenea tiene por objeto recibir la onda de sobrepresión del golpe de ariete, disipándola mediante la fluctuación del agua en su interior por medio de la fricción del agua con las paredes de la misma*.

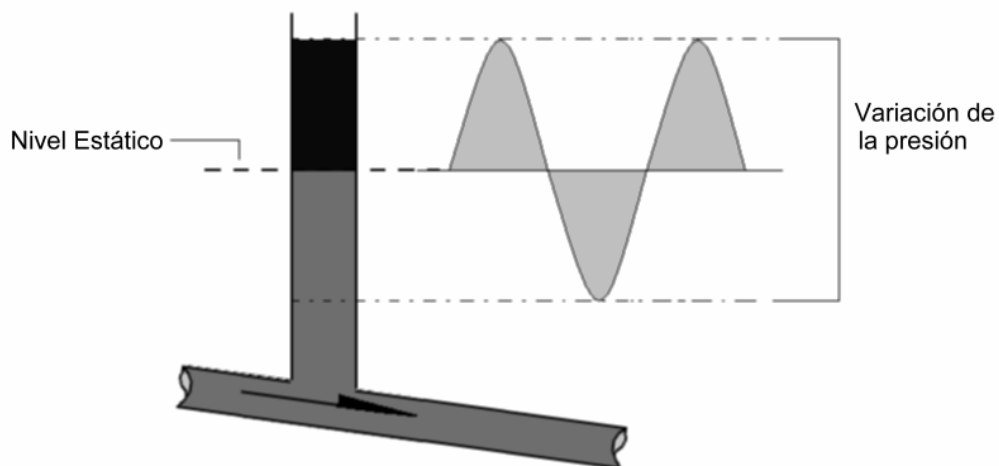
*Esta acción es conocida como oscilación de masa.

Dependiendo de la magnitud del golpe de ariete que pueda ocurrir en el sistema (de acuerdo a los análisis), pueden construirse dos tipos de chimeneas: verticales o con cámara de expansión (para reducir la altura del depósito). Así mismo, para reducir el tiempo en que se disipe el golpe de ariete puede instalarse más de una chimenea.

En sistemas de abastecimiento de agua potable, no suele emplearse este tipo de protección. Las chimeneas de equilibrio están destinadas para obras en donde los caudales y las velocidades de flujo son bastante significativas, tal el caso de las centrales hidroeléctricas.

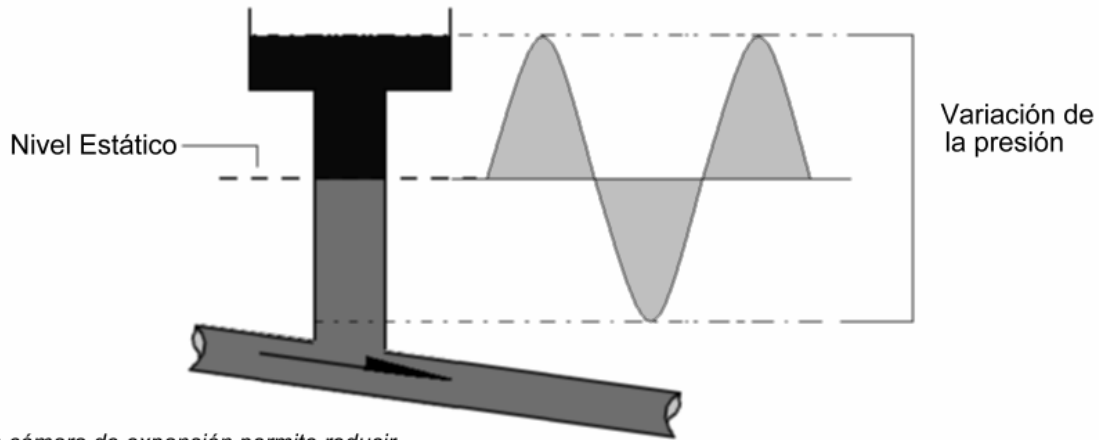
En las figuras 11 y 12 se muestra un esquema de los dos tipos de chimeneas de equilibrio que pueden construirse.

Figura 11. Chimenea de equilibrio vertical



Adaptado de: Gaudencio Zoppetti Júdez. **Centrales hidroeléctricas**. p 85.

Figura 12. Chimenea de equilibrio con cámara de expansión



La cámara de expansión permite reducir la altura de la chimenea

Adaptado de: Gaudencio Zoppetti Júdez. **Centrales hidroeléctricas.** p 86.

3.3.2. Ventajas de su uso

- a) Capaces de absorber grandes variaciones de presión.
- b) Vida útil bastante prolongada.
- c) Pueden diseñarse con suficiente precisión, evitando de esa forma sobredimensionamiento.

3.2.3. Limitaciones

Las limitantes de este mecanismo de protección contra el golpe de ariete es que su costo puede elevarse dependiendo de la altura que requieran y porque en algunas ocasiones se dificulta su construcción debido a las condiciones de topografía y espacio, lo cual puede generar problemas para lograr la estabilidad de la estructura.

4. PRUEBA DEMOSTRATIVA DE LA OCURRENCIA DEL GOLPE DE ARIETE

El presente capítulo tiene como finalidad mostrar la ocurrencia del golpe de ariete a través de pruebas de laboratorio. Se pretende lograr observar visualmente las variaciones de presión que se originan y poder comparar los resultados de la prueba con los que se obtienen de emplear las fórmulas mostradas en este documento.

Se presentan dos posibles modalidades para la prueba, para los dos casos del fenómeno, interrupción rápida y gradual del flujo en una tubería. Al realizar ambas pruebas, pueden observarse las diferencias entre cada caso.

4.1. Descripción de la prueba

En esta prueba de laboratorio se pretende ocasionar el fenómeno hidráulico del golpe de ariete a partir de la interrupción del flujo en una tubería manipulando una válvula, ya sea de manera rápida o gradual, observando de qué manera varía la presión en cada circunstancia.

Esta prueba del golpe de ariete, además de demostrativa, es muy sencilla (el equipo a utilizar y la forma de realizarla no es muy complicada), ya que se desea que sea un experimento que pueda ser efectuado como una práctica más de laboratorio del curso de mecánica de fluidos o de hidráulica.

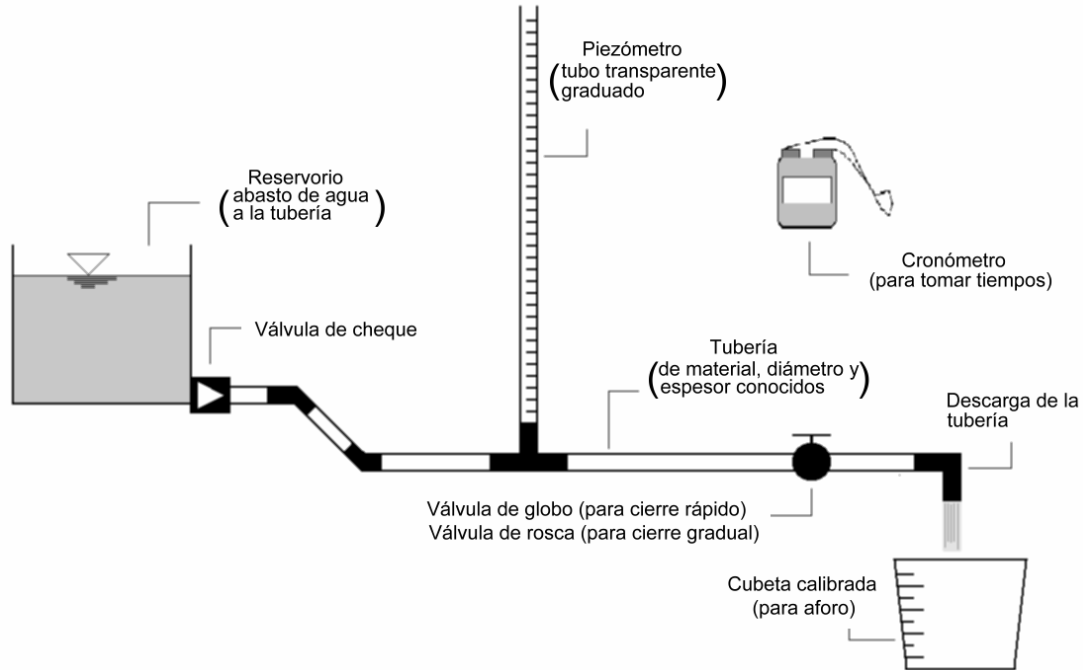
4.2. Objetivos de la prueba

- a) Provocar el golpe de ariete en condiciones de laboratorio.
- b) Observar el cambio de presión causado por el golpe de ariete al interrumpir el flujo en una tubería.
- c) Comparar los valores de presión observados con los esperados teóricamente (para cada caso del fenómeno).
- d) Identificar las diferencias entre un golpe de ariete por interrupción rápida y gradual del flujo.

4.3. Equipo a utilizar en la prueba

A continuación en la figura 13 se presenta un esquema del equipo a utilizar para llevar a cabo la prueba y la forma del montaje del mismo.

Figura 13. Equipo para la prueba del golpe de ariete



Los elementos mostrados en la figura 13 deberán de cumplir ciertos requisitos que se enumeran a continuación:

- a) Diámetro de la tubería. Para el caso del golpe de ariete por interrupción rápida del flujo, los diámetros no serán menores a 1 pulgada (25.4 mm), esto para evitar velocidades muy grandes. Para el golpe de ariete por interrupción gradual del flujo, usar diámetros de hasta ½ pulgada (12.7 mm), para generar la mayor velocidad posible del flujo.

- b) Longitud del tramo de tubería. Para ambos casos considerar una longitud mínima de 6 metros. Para el caso del golpe de ariete por interrupción rápida del flujo para que el tiempo crítico no sea muy pequeño y para la interrupción gradual para que los cambios de altura en el piezómetro sean apreciables.

c) Material de la tubería. De preferencia utilizar algún material plástico (PVC, polietileno, etc.) ya que las tuberías metálicas generan ondas de presión mucho mayores.

4.4. Fórmulas a emplear para el desarrollo de la prueba

4.4.1. Fórmulas generales

$$Q = \frac{Vol}{t_{aforo}}$$

Q : Caudal (m³/s)

Vol : Volumen de la cubeta calibrada (m³)

t_{aforo} : Tiempo de llenado de la cubeta calibrada (s)

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

A_t : Área transversal interna de la tubería (m²)

D : Diámetro de la tubería (m)

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

- V : Velocidad del flujo en la tubería (m/s)
 Q : Caudal (m³/s)
 A_t : Área transversal interna de la tubería (m²)

$$C_T = \sqrt{\frac{g}{\gamma \left(\frac{1}{E_v} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

- C_T : Velocidad de la onda de presión dentro de la tubería (m/s)
 g : Aceleración debida a la gravedad (m/s²)
 γ : Peso específico del agua (N/m³)
 E_v : Módulo de compresibilidad volumétrico del agua (N/m²)
 E : Módulo de elasticidad del material de la tubería (N/m²)
 D : Diámetro interno de la tubería (m)
 e : Espesor de la tubería (m)

$$T_{cr} = \frac{2L}{C_T}$$

- T_{cr} : Tiempo crítico (s)
 L : Longitud del tramo de tubería (m)
 C_T : Velocidad de la onda de presión dentro de la tubería (m/s)

4.4.2. Fórmulas para el golpe de ariete por cierre rápido de la válvula

$$GA_{teo} = V \sqrt{\frac{\gamma}{g \left(\frac{1}{Ev} + \frac{D}{eE} \right)}}$$

- GA_{teo} : Golpe de ariete teórico (N/m²)
 V : Velocidad del flujo en la tubería (m/s)
 γ : Peso específico del agua (N/m³)
 g : Aceleración debida a la gravedad (m/s²)
 Ev : Módulo de compresibilidad volumétrico del agua (N/m²)
 E : Módulo de elasticidad del material de la tubería (N/m²)
 D : Diámetro interno de la tubería (m)
 e : Espesor de la tubería (m)

$$GA_{exp} = (H_1 - H_0)\gamma$$

- GA_{exp} : Golpe de ariete experimental (N/m²)
 H_1 : Lectura del piezómetro alcanzada por el golpe de ariete (m)
 H_0 : Lectura del piezómetro antes del golpe de ariete (m)
 γ : Peso específico del agua (N/m³)

4.4.3. Fórmulas para el golpe de ariete por cierre gradual de la válvula

$$GA_{teo} = \frac{2L\rho V}{tc}$$

- GA_{teo} : Golpe de ariete teórico (N/m²)
 L : Longitud del tramo de tubería (m)
 ρ : Densidad del agua (Kg/m³)
 V : Velocidad del flujo en la tubería (m/s)
 tc : Tiempo empelado para cerrar la válvula (s)

$$GA_{exp} = (H_1 - H_0)\gamma$$

- GA_{exp} : Golpe de ariete experimental (N/m²)
 H_1 : Lectura del piezómetro alcanzada por el golpe de ariete (m)
 H_0 : Lectura del piezómetro antes del golpe de ariete (m)
 γ : Peso específico del agua (N/m³)

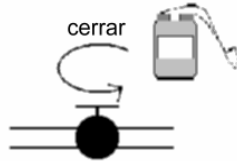
4.5. Procedimiento para realizar la prueba

- a) El primer paso será anotar el tiempo en el cual la válvula se cierra, para comprobar si la interrupción es rápida o gradual, es decir tomar el tiempo tc y compararlo con el T_{cr} .

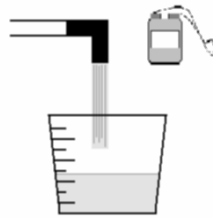
- b) Antes de medir la variación de presión, deberá de realizarse el aforo del agua en la tubería para determinar el caudal conducido, y a partir de este, la velocidad del flujo. Para ello se harán 3 mediciones y se utilizará el valor promedio.
- c) Con el agua fluyendo, se deberá anotar la lectura de la altura del agua en el piezómetro (H_0).
- d) Luego cerrar la válvula (con la rapidez requerida del caso) y ese mismo instante anotar la lectura más alta que se observe en el piezómetro (H_1).
- e) Proceder a tabular toda la información, realizar los cálculos necesarios y comparar los resultados.

Los pasos descritos anteriormente pueden observarse con mayor claridad en la figura 14.

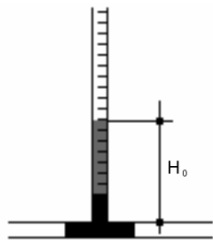
Figura 14. Procedimiento a realizar en la prueba del golpe de ariete



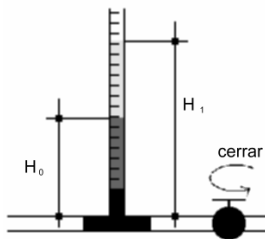
Tomar el tiempo que tarda en cerrarse la válvula completamente t_c .



Tomar el tiempo de llenado de la cubeta calibrada taforo (al menos 3 veces), esto para saber el caudal que circula en la tubería.



Medir la altura del agua en el piezómetro mientras fluye el agua (H_0).



Al momento de cerrar la válvula, medir la altura máxima alcanzada por el agua en el piezómetro (H_1).

Datos	Cálculos

Resultados

Teniendo recabada toda la información, se realizan los cálculos necesarios para obtener los resultados y se tabula la información.

4.6. Presentación de la información de la prueba

La forma de la toma de datos: conocidos, observados y calculados, se presenta en las tablas V y VI, tal y como deberá de tabularse la información en cada caso del golpe de ariete.

Tabla V. Información para la prueba de golpe de ariete por interrupción rápida del flujo

Magnitudes conocidas			Toma de datos de la prueba		
Símbolo	Valor	Unidades	Símbolo	Valor	Unidades
g		m/s ²	t_c		s
γ		N/m ³	t_{aforo1}		s
E_v		N/m ²	t_{aforo2}		s
E		N/m ²	t_{aforo3}		s
D		M	H_0		m
e		M	H_1		m
L		M	Cálculos posteriores prueba		
Cálculos previo a la prueba			Símbolo	Valor	Unidades
Símbolo	Valor	Unidades	Q		m ³ /s
A_t		m ²	V		m/s
C_T		m/s	GA_{teo}		N/m ²
T_{cr}		S	GA_{exp}		N/m ²

Tabla VI. Información para la prueba de golpe de ariete por interrupción gradual del flujo

Magnitudes conocidas			Toma de datos de la prueba		
Símbolo	Valor	Unidades	Símbolo	Valor	Unidades
g		m/s ²	t_c		s
γ		N/m ³	t_{aforo1}		s
ρ		Kg/m ³	t_{aforo2}		s
E_v		N/m ²	t_{aforo3}		s
E		N/m ²	H_0		m
D		m	H_1		m
e		m	Cálculos posteriores prueba		
L		m	Símbolo	Valor	Unidades
Cálculos previo a la prueba			Q		m ³ /s
Símbolo	Valor	Unidades	V		m/s
A_t		m ²	GA_{teo}		N/m ²
C_T		m/s	GA_{exp}		N/m ²
T_{cr}		s			

CONCLUSIONES

1. El golpe de ariete puede originarse de dos maneras, por interrupción rápida o gradual del flujo en una tubería, debido al arranque o paro de una bomba, o a la apertura o cierre momentáneo de una válvula.
2. Las variaciones de presión que genera un golpe de ariete puede dañar los elementos de un sistema de abastecimiento de agua potable, afectando bombas, estropeando válvulas y otros accesorios y haciendo colapsar tuberías.
3. El golpe de ariete provocado por el arranque o paro de una bomba es el que genera variaciones de presión de mayor magnitud, es decir, el uso de equipo de bombeo aumenta el riesgo de producir un golpe de ariete que pueda dañar algún elemento del sistema de abastecimiento.
4. Existen varias formas de proteger al sistema ante la manifestación del golpe de ariete, utilizando cámaras de aire, válvulas de alivio, chimeneas de equilibrio, e incluso controlando los cambios en el flujo (velocidad de interrupción o inicio del flujo).

RECOMENDACIONES

1. En conducción de agua potable es importante conocer del golpe de ariete la magnitud máxima que puede alcanzar; pero en otros casos, también es importante conocer la duración del fenómeno y su comportamiento (tal el caso de las hidroeléctricas). Para ello pueden utilizarse algunos programas de cómputo que realizan ese tipo de análisis, el cual conlleva un proceso más complejo que el utilizado para determinar el cambio máximo de presión.
2. A parte del golpe de ariete, en el diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable existen otros fenómenos que también merecen atención, tal es el caso de las pérdidas de energía, el desgaste de los componentes, la cavitación, y otras perturbaciones.
3. Los mecanismos descritos en este documento para proteger al sistema ante un golpe de ariete son una buena solución al problema, pero estos deben escogerse y diseñarse de acuerdo con el tipo de golpe de ariete que pueda suceder en cada caso específico, porque sí simplemente se coloca una protección sin determinar su capacidad de disipación, podría darse el caso que su funcionalidad llegara a ser insuficiente o quizás en exceso.

4. La utilización de equipo de bombeo hace más propenso a un sistema de abastecimiento de agua potable a sufrir un golpe de ariete de magnitud considerable, por lo cual el sistema debe de tratarse que opere por gravedad, ya que el golpe de ariete por manipulación momentánea de válvulas puede controlarse de mejor manera y su magnitud es significativamente menor.

REFERENCIAS

1. Pedro López Alegría. **Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas.** (3ª ed.; México: Editorial Alfaomega Grupo Editor: 2002). p 39.
2. Joseph B. Franzini. **Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería.** (9ª ed. España: Editorial McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.: 1997). p 11.
3. Luis E. Pérez Farrás. **Estudio de transitorios: golpe de ariete.** (Argentina: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica: 2005). p 11.

BIBLIOGRAFÍA

1. Fair, Gordon Maskew, John Charles Geyer y otros. **Ingeniería sanitaria y de aguas residuales**. 1ª ed. (Volumen 1). México: Editorial Limusa, S.A. de C.V. 2002. 547 pp.
2. Franzini, Joseph B. **Mecánica de fluidos con aplicaciones en ingeniería**. 9ª ed. Madrid, España: Editorial McGraw-Hill Interamericana de España, S.A. 1997. 704 pp.
3. López Alegría, Pedro. **Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas**. 3ª Ed. México: Editorial Alfaomega Grupo Editor. 2002. 295 pp.
4. Mataix, Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. 2ª Ed. México: Editorial Harla, S.A. de C.V. 1982. 660 pp
5. McGhee, Torrence J. **Abastecimiento de agua y alcantarillado**. 6ª ed. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, S.A. 1999. 602 pp.
6. Mott, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. 4ª Ed. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. 1996. 580 pp.
7. Parmakian John. **Waterhammer**. 1ª ed. Estados Unidos de América: Editorial Dover Publications, Inc. 1963. 161 pp.
8. Pérez Farrás, Luis E. **Estudio de transitorios: golpe de ariete**. 1ª ed. Argentina: Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Hidráulica. 2005. 71 pp.

9. Potter, Merle C. y David C. Wiggert. **Mecánica de fluidos**. 3ª ed. México: Internacional Thomson Editores, S.A. de C.V. 2002. 769 pp.
10. Russel, George E. **Hidráulica**. 1ª ed. México: Compañía Editora Continental S.A. 1979. 554 pp.
11. Streeter, Victor L. **Mecánica de los fluidos**. 8ª Ed. México: Editorial McGraw-Hill Interamericana, S.A. 1987. 594 pp.
12. Torres Herrera, Francisco. **Obras hidráulicas**. 1ª ed. México: Editorial Limusa, S.A. 1981. 278 pp.
13. Williams King, Horace. **Manual de hidráulica para la resolución de problemas de hidráulica**. 1ª ed. México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana S.A. de C.V. 1981. 536 pp.
14. Zoppetti Júdez, Gaudencio. **Centrales hidroeléctricas**. 1ª ed. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili, S.A. 1979. 509 pp.
15. Zurita Ruiz, José. **Obras hidráulicas**. 8ª ed. Barcelona, España: Ediciones CEAC, S.A. 1991. 240 pp.

APÉNDICES

Unidades de medida involucradas en el cálculo del golpe de ariete

Tabla VII. Algunas unidades de medida

Magnitud	Unidades de medida			
	Sistema internacional		Sistema inglés	
Aceleración	m/s ²	Metros por segundo cuadrado	ft/s ²	Pies por segundo cuadrado
Altura de Presión	mca	Metro columna de agua	ft	Pie de altura
Área	m ²	Metro cuadrado	ft ²	Pie cuadrado
Caudal	m ³ /s	Metros cúbicos por segundo	ft ³ /s	Pies cúbicos por segundo
Densidad	Kg/m ³	Kilogramos por metro cúbico	slug/ft ³	Slugs por pie cúbico
Fuerza/Peso	N	Newton	lb	Libra
Longitud	m	Metro	ft	Pie
Masa	Kg	Kilogramo	slug	Slug
Peso específico	N/m ³	Newton por metro cúbico	lb/ft ³	Libras por pie cúbico
Presión	Pa (N/ m ²)	Pascales (newton por metro cuadrado)	psf, psi	Libras por pie cuadrado, libras por pulgada cuadrada
Velocidad	m/s	Metros por segundo	ft/s	Pies por segundo
Volumen	m ³	Metro cúbico	ft ³	Pie cúbico
Tiempo	s	Segundo	s	Segundo

Algunas propiedades importantes del agua

Tabla VIII. Propiedades del agua

Propiedad	Valor	
	Sistema internacional	Sistema inglés
Densidad	1000 Kg/m ³	62.4 slug/ft ³
Módulo de compresibilidad volumétrico	2.074 x 10 ⁹ N/m ²	3.0 x 10 ⁵ psi
Peso específico	9810 N/m ³	1.94 Lb/ft ³

*Para agua dulce a temperatura ambiente promedio (20 °C)

Módulos de elasticidad de materiales utilizados para la fabricación de tuberías para conducción de agua

Tabla IX. Valores de módulo de elasticidad para diferentes materiales

Material	Módulo de elasticidad
Acero	207 x 10 ⁹ N/m ² (3.0 x 10 ⁷ psi)
Cobre	120 x 10 ⁹ N/m ² (1.7 x 10 ⁷ psi)
Hierro dúctil	166 x 10 ⁹ N/m ² (2.4 x 10 ⁷ psi)
PVC	2.8 x 10 ⁹ N/m ² (4.1 x 10 ⁵ psi)

Presión de servicio de tuberías de distintos materiales para conducción de agua

Tabla X. Presiones de servicio

Material de la tubería	Presión de servicio	
	Sistema internacional	Sistema inglés
Acero galvanizado	205 a 410 mca	290 a 585 psi
Cobre tipo M	265 a 590 mca	380 a 840 psi
Hierro dúctil	105 a 565 mca	150 a 805 psi
PVC	88 a 220 mca	125 a 315 psi

Valores típicos de velocidad de una onda presión de agua dentro de una tubería

Tabla XI. Valores promedio de velocidad de una onda de presión de agua para tuberías de diferente material

Material de fabricación de la tubería	Velocidad de la onda de presión de agua	
	Sistema internacional	Sistema inglés
Acero	1361.08 m/s	4465.48 ft/s
Cobre tipo M	1151.25 m/s	3777.07 ft/s
Hierro dúctil	1255.69 m/s	4119.72 ft/s
PVC SDR 13.5	450.77 m/s	1478.90 ft/s
PVC SDR 21	365.67 m/s	1199.70 ft/s
PVC SDR 26	328.80 m/s	1078.74 ft/s
PVC SDR 32.5	294.29 m/s	965.52 ft/s

Dimensiones de tuberías para conducción de agua

Tabla XII. Tubería de acero galvanizado

Diámetro Nominal	Diámetro exterior		Espesor de pared	
	plg	mm	plg	mm
1/8	0.125	3.18	0.035	0.89
3/16	0.188	4.76	0.035	0.89
1/4	0.250	6.35	0.035	0.89
5/16	0.312	7.94	0.042	1.07
3/8	0.375	9.53	0.042	1.07
1/2	0.500	12.70	0.055	1.40
5/8	0.625	15.88	0.055	1.40
3/4	0.750	19.05	0.055	1.40
7/8	0.875	22.23	0.055	1.40
1	1.000	25.40	0.076	1.93
1 1/4	1.250	31.75	0.076	1.93
1 1/2	1.500	38.10	0.076	1.93
1 3/4	1.750	44.45	0.076	1.93
2	2.000	50.80	0.076	1.93

*Cédula 40: 205 mca (290 psi). Cédula 80: 410 mca (585 psi).

Tabla XIII. Tubería de cobre tipo M

Diámetro Nominal	Diámetro exterior		Espesor de pared		Presión de servicio
	plg	Mm	plg	mm	
3/8	0.500	12.70	0.025	0.63	590 mca (840 psi)
1/2	0.625	15.87	0.028	0.71	535 mca (760 psi)
3/4	0.875	22.22	0.032	0.81	430 mca (610 psi)
1	1.125	28.57	0.035	0.89	360 mca (515 psi)
1 1/4	1.375	34.92	0.042	1.07	360 mca (515 psi)
1 1/2	1.625	41.27	0.049	1.24	355 mca (505 psi)
2	2.125	53.97	0.058	1.47	315 mca (450 psi)
2 1/2	2.625	66.67	0.065	1.65	290 mca (410 psi)
3	3.125	79.37	0.072	1.83	270 mca (385 psi)
3 1/2	3.625	92.07	0.083	2.11	270 mca (385 psi)
4	4.125	104.77	0.095	2.41	265 mca (375 psi)

Tabla XIV. Tubería de hierro dúctil

Diámetro Nominal	Diámetro exterior		Espesor de pared		Presión de servicio
	plg	mm	plg	mm	
3	3.96	100.6	0.32	8.13	565 mca (805 psi)
4	4.80	121.9	0.35	8.89	545 mca (770 psi)
6	6.90	175.3	0.38	9.65	500 mca (710 psi)
8	9.05	229.9	0.41	10.41	455 mca (650 psi)
10	11.10	281.9	0.44	11.18	410 mca (585 psi)
12	13.20	335.3	0.48	12.19	370 mca (525 psi)
14	15.65	397.5	0.51	12.95	325 mca (460 psi)
16	17.80	452.1	0.54	13.72	280 mca (400 psi)
18	19.92	506.0	0.58	14.73	235 mca (335 psi)
20	22.06	560.3	0.62	15.75	190 mca (275 psi)
24	26.32	668.5	0.73	18.54	105 mca (150 psi)

Tabla XV. Tubería de PVC

Diámetro Nominal	Diámetro exterior		Espesor de pared							
			SDR 13.5		SDR 21		SDR 26		SDR 32.5	
plg	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm	plg	mm
1/2	0.840	21.3	0.062	1.6	--	--	--	--	--	--
3/4	1.050	26.7	0.078	2.0	0.050	1.3		--	--	--
1	1.315	33.4	0.097	2.5	0.063	1.6	0.051	1.3	--	--
1 1/2	1.660	42.2	0.123	3.1	0.079	2.0	0.064	1.6	0.051	1.3
1 3/4	1.900	48.3	0.141	3.6	0.091	2.3	0.073	1.9	0.059	1.5
2	2.375	60.3	0.176	4.5	0.113	2.9	0.091	2.3	0.073	1.9
2 1/2	2.875	73.0	0.213	5.4	0.137	3.5	0.111	2.8	0.088	2.2
3	3.500	88.9	0.259	6.6	0.167	4.2	0.135	3.4	0.108	2.7
4	4.500	114.3	0.333	8.5	0.214	5.4	0.173	4.4	0.138	3.5
6	6.625	168.3	--	--	0.316	8.0	0.255	6.5	0.204	5.2
8	8.625	219.0	--	--	--	--	0.332	8.4	0.265	6.7
10	10.750	273.0	--	--	--	--	--	--	0.331	8.4
12	12.750	323.9	--	--	--	--	--	--	0.392	10.0
Presión de servicio			220 mca (315 psi)		185 mca (265 psi)		110 mca (160 psi)		90 mca (125 psi)	

*SDR= Diámetro exterior/Espesor

Características de válvulas de alivio

Tabla XVI. Válvulas de alivio

Tipo de válvula	Diámetros disponibles	Capacidad de disipación de presión
Latón y hierro	1 y 2 plg	Hasta 20 mca (28 psi)
Acero	½ a 2 plg	Hasta 50 mca (71 psi)
Operadas por piloto	1 ½ a 12 plg	Hasta 185 mca (260 psi)