

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MODELADO Y SIMULACIÓN, CON ENFOQUE MECATRÓNICO, DE
LA DINÁMICA Y CONTROL AUTOMÁTICO DEL GOLPE DE
ARIETE, EN SISTEMAS HIDROMECAÑICOS, PARA LIMITAR LOS
EFECTOS NO DESEADOS DEL TRANSIENTE DE SOBREPRESIÓN**

**DESARROLLO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DEL GOLPE DE
ARIETE, EN SISTEMAS HIDROMECAÑICOS, PARA LIMITAR LOS
EFECTOS NO DESEADOS DEL TRANSIENTE DE SOBREPRESIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

ALEXANDER OMAR NUÑEZ BALAREZO

alexander.nunez@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

DMQ, noviembre 2022

CERTIFICACIONES

Yo, ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO, bajo mi supervisión.



DR. ALVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.



ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO



DR. ALVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico principalmente a Dios, por ser quien me ha fortalecido con fe y salud para llegar a este momento tan importante de mi formación profesional, por darme la sabiduría, perseverancia y paciencia de alcanzar todos mis objetivos.

A mis padres por ser el mi pilar en mi camino y siempre demostrarme su cariño, paciencia y apoyo incondicional sin importar nuestras diferencias en opiniones. A mi abuelita Nelly, a quien quiero como una madre por siempre estar para mí desde muy pequeño para cuidarme, ayudarme y guiarme en cada paso que doy en mi vida.

A mis tíos que son como unos padres para mí, por cuidarme y aconsejarme ante cualquier eventualidad y guiarme a tomar la mejor decisión.

ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a mi Dios por la compañía de su Espíritu en mi vida, a mis padres por el apoyo y la confianza que me han brindado, por sus consejos en el momento indicado ayudándome a prevalecer y afrontar los retos que se me han presentado.

También agradezco infinitamente a mi abuela Nelly y a mis tíos por su apoyo incondicional, cuidados, amor y cariño en cada decisión y paso que doy siempre, siendo mi guía mi motor siendo uno de los regalos más bellos que Dios me regalo y a quien estoy infinitamente agradecido.

De antemano agradezco mucho a todas las personas que me brindaron su apoyo y ayuda en este proyecto.

ALEXANDER OMAR NÚÑEZ BALAREZO

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
INDICE DE FIGURAS	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	4
2 METODOLOGÍA.....	10
2.1 Enfoque metodológico	11
2.2 Modelado matemático	12
3 Resultados y conclusiones	23
3.1 Características de los sistemas hidromecánicos	23
3.2 Gradiente de caudal.....	24
3.3 Conclusiones	27
3.4 Recomendaciones	28
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28
5 ANEXOS	30
ANEXO I	30

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. GOLPE DE ARIETE.....	4
FIGURA 1.2. INSTALACIÓN DE UN VOLATE DE INERCIA.....	8
FIGURA 1.3. CÁMARA DE AIRE.....	9
FIGURA 2.1. METODOLOGÍA APLICADA A LA INVESTIGACIÓN.....	11
FIGURA 2.2 SISTEMA SIMPLE RESERVORIO, TUBERÍA Y VÁLVULA.....	12
FIGURA 2.3. ENTRADAS Y SALIDAS DE LA PLANTA A SER CONTROLADA.....	17
FIGURA 2.4. REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA HIDROMECAÁNICO EN MODELO MASA RESORTE AMORTIGUADOR.....	19
FIGURA 2.5. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DEL SISTEMA.....	19
FIGURA 3.1. GRADIENTE DE CAUDAL PARA TIEMPO DE OPERACIÓN DE VÁLVULA (CASO ESTUDIADO).....	25
FIGURA 3.2. GRADIENTE DE CAUDAL PARA EL TIEMPO DE OPERACIÓN DE VÁLVULA (CASO PROPUESTO).....	26

INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2.1. VARIACIÓN DE MOMENTO DE VOLUMEN DE AGUA.....	13
ECUACIÓN 2.2. VARIACIÓN DE MOMENTO DE VOLUMEN INFINITESIMAL.....	13
ECUACIÓN 2.3. ECUACIÓN DE EQUILIBRIO DE FUERZAS DE IMPULSO Y VARIACIÓN DE MOMENTO.	13
ECUACIÓN 2.4. VARIACIÓN DE PRESIÓN.....	13
ECUACIÓN 2.5. VARIACIÓN DE PRESIÓN EN TÉRMINOS DE COLUMNA DE AGUA.....	14
ECUACIÓN 2.6. ECUACIÓN DE MICHAUD.....	14
ECUACIÓN 2.7. ECUACIÓN DE ALLIEVI.....	15
ECUACIÓN 2.8. CELERIDAD.....	16
ECUACIÓN 2.9. ECUACIÓN DE LA CONTINUIDAD.....	16
ECUACIÓN 2.10. ECUACIÓN DE MOMENTO.....	17
ECUACIÓN 2.11. ECUACIONES GOBERNANTES EN ESPACIOS DE ESTADO.....	18
ECUACIÓN 2.12. CAMBIO DE VARIABLE.....	18
ECUACIÓN 2.13. ECUACIONES GOBERNANTES CON CAMBIO DE VARIABLES.....	18
ECUACIÓN 2.14. SEGUNDA LEY DE NEWTON EN TÉRMINOS DE INERCIA DE FLUIDO.....	20
ECUACIÓN 2.15. VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN TÉRMINOS DE LA FUERZA POR CIERRE DE VÁLVULA.....	20
ECUACIÓN 2.16. FUERZA DEBIDO AL CIERRE DE VÁLVULA.....	20
ECUACIÓN 2.17. LEY DE HOOKE APLICADA A LA REPRESENTACIÓN DEL SISTEMA.....	20
ECUACIÓN 2.18. LEY DE HOOKE APLICADA A REPRESENTACIÓN DE RESORTE DE UN FLUIDO.....	21
ECUACIÓN 2.19. LEY DE HOOKE APLICADA A REPRESENTACIÓN DE RESORTE DE UN MATERIAL.	21
ECUACIÓN 2.20. FUERZA DE AMORTIGUAMIENTO VISCOSO.....	21
ECUACIÓN 2.21. SEGUNDA LEY DE NEWTON RESULTANTE.....	22
ECUACIÓN 2.22. 1ERA ECUACIÓN PRINCIPAL DEL MODELADO MATEMÁTICO.....	22
ECUACIÓN 2.23. 2DA ECUACIÓN PRINCIPAL DEL MODELADO MATEMÁTICO.....	22
ECUACIÓN 2.24. REPRESENTACIÓN DE SISTEMA MASA-RESORTE-AMORTIGUADOR EN ESPACIOS DE ESTADO.....	22
ECUACIÓN 2.25. SISTEMA DE SALIDA.....	23

RESUMEN

El presente trabajo busca realizar el control automático del fenómeno de golpe de ariete mediante la simulación pues, una de las grandes problemáticas que se encuentra en los sistemas hidromecánicos es la propagación de ondas por variación de presión, velocidad y caudales debido a una mala operación durante el cierre de válvulas. Para ello, en el primer capítulo se hace una revisión bibliográfica acerca del fenómeno como tal, sus causas y efectos, así como también diferentes soluciones que se pueden aplicar. En el capítulo 2, se realiza una representación del fenómeno de golpe de ariete, como un sistema compuesto por masa-resorte-amortiguador y se realiza el modelo matemático del sistema en espacios de estado para la simulación en el software Matlab. En el capítulo 3, se define un sistema hidromecánico para la simulación y se hace una comparativa de los resultados obtenidos con un estudio previo para validar dichos resultados.

PALABRAS CLAVE: Golpe de ariete, control automático, gradiente de caudal, sobrepresión, transiente.

ABSTRACT

The present work seeks to carry out the automatic control of the water hammer phenomenon through simulation, since one of the great problems found in hydromechanical systems is the propagation of waves due to pressure, speed, and flow variations due to a bad operation during the closing of valves. For this, in the first chapter a bibliographic review is made about the phenomenon as such, its causes and effects, as well as different solutions that can be applied. In chapter 2, a representation of the water hammer phenomenon is made, as a system composed of mass-spring-damper and the mathematical model of the system is made in state spaces for the simulation in the Matlab software. In chapter 3, a hydromechanical system for simulation is defined and a comparison of the results obtained with a previous study is made to validate said results.

KEYWORDS: Water hammer, automatic control, flow gradient, overpressure, transient.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El golpe de ariete es un fenómeno provocado por la sobre y depresión que adquiere un fluido en estado líquido al cambio repentino del movimiento. Este fenómeno es muy común en tuberías dedicadas al transporte de agua, como es el caso de centrales hidroeléctricas y sistemas de distribución de agua; petróleo como en el caso de oleoductos (González & Bernal, 2015). Las variaciones de presión que se producen en este fenómeno pueden ocasionar ruptura y colapsos estructurales en la línea (sobrepresión) y ruptura o deformaciones en la tubería (depresión). Es por tal motivo que estos valores son muy importantes al momento de diseñar líneas de sistemas hidromecánicos (Enríquez, 2015).

Por todo lo anterior mencionado, el control de los transitorios del golpe de ariete es fundamental si se busca la optimización del sistema hidromecánico puesto que, permitirá reducir los valores críticos de la sobrepresión y depresión que causen daños en la infraestructura del sistema y pongan en riesgo la vida de operadores y economía de proyectos de gran inversión.

1.1 Objetivo general

Desarrollar el control automático del golpe de ariete en sistemas hidromecánicos, para limitar los efectos no deseados del transiente de sobrepresión.

1.2 Objetivos específicos

1. Recopilar información bibliográfica relevante acerca del fenómeno de golpe de ariete, ecuaciones involucradas y sistemas hidromecánicos.
2. Definir medios de control de transitorios, a fin de encontrar posibles soluciones para limitar transientes de sobrepresión.
3. Modelar matemáticamente el golpe de ariete en tuberías con variables de estado para describir la dinámica del fenómeno a estudiar.
4. Simular por ordenador, el modelo matemático del fenómeno de golpe de ariete, teniendo en cuenta el enfoque mecatrónico.
5. Validar los resultados numéricos obtenidos con estudios experimentales similares.

1.3 Alcance

Para que el Trabajo de Integración Curricular sea llevado a cabo de la mejor manera, se realizarán las siguientes subactividades de cada uno de los objetivos específicos planteados:

Objetivo específico 1 (OE1): Recopilar información bibliográfica relevante acerca del fenómeno de golpe de ariete, ecuaciones involucradas y sistemas hidromecánicos.

- Actividad (A1.1): Compilación de información bibliográfica acerca del fenómeno de golpe de ariete, ecuaciones y sistemas hidromecánicos.
- Actividad (A1.2): Análisis y selección de la información bibliográfica recopilada, que permita responder la interrogante planteada en el Trabajo de ingreso curricular.
- Actividad (A1.3): Elaboración de escrito con toda la documentación investigada acerca del fenómeno de golpe de ariete, las causas que lo producen, consecuencias, ecuaciones y sistemas hidromecánicos.

Objetivo específico 2 (OE2): Definir medios de control de transitorios, a fin de encontrar posibles soluciones para limitar transientes de sobrepresión.

- Actividad (A2.1): Compilación de información bibliográfica acerca de medios de control de transitorios.
- Actividad (A2.2): Análisis y selección de la información bibliográfica que permita limitar los transientes producidos por el golpe de ariete.
- Actividad (A2.3): Elaboración de un informe con la información recopilada acerca de los principales dispositivos o técnicas que permitan limitar los transientes en sistemas hidromecánicos.

Objetivo específico 3 (OE3): Modelar matemáticamente el golpe de ariete en tuberías con variables de estado para describir la dinámica del fenómeno a estudiar.

- Actividad (A3.1): Descripción del sistema hidromecánico y del modelo matemático asociado al mismo.
- Actividad (A3.2): Identificación de datos, variables y ecuaciones involucradas en la investigación.

- Actividad (A3.3): Definición de las matrices de espacio de estado mediante el grupo de ecuaciones diferenciales asociadas a al fenómeno.
- Actividad (A3.4): Realización del modelo matemático.
- Actividad (A3.5): Elaboración de un reporte con el desarrollo del modelo matemático del comportamiento dinámico del sistema.

Objetivo específico 4 (OE4): Simular el modelo matemático del fenómeno de golpe de ariete, teniendo en cuenta el enfoque mecatrónico.

- Actividad (A4.1): Definición de condiciones y parámetros iniciales
- Actividad (A4.2): Uso de software específico para la resolución del modelo matemático del fenómeno de golpe de ariete.
- Actividad (A4.3): Ingreso de las matrices de espacio de estados y de variables de entrada y salida.
- Actividad (A4.4): Evaluación de los resultados obtenidos de la simulación.
- Actividad (A4.5): Elaboración de un reporte con los resultados numéricos y gráficos de la simulación.

Objetivo específico 5 (OE5): Validar los resultados numéricos obtenidos con estudios experimentales similares.

- Actividad (A5.1): Recopilación de información documental sobre investigación referente a experimentos en condiciones similares del golpe de ariete.
- Actividad (A5.2): Análisis y selección de la bibliografía.
- Actividad (A5.3): Comparación de resultados obtenidos en la simulación, con valores encontrados en la recopilación bibliográfica
- Actividad (A5.4): Elaboración de un informe con las conclusiones y resultados referente al modelado matemático y la simulación realizada.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico del tipo transitorio producido por el cambio repentino en las condiciones de un flujo, es decir, variaciones en la velocidad o presión de un fluido debido al cambio brusco del movimiento por acciones de operadores o máquinas que conforman un sistema hidromecánico (Enríquez, 2015).

Otros autores también definen dicho fenómeno, como el resultado final de una variación de presiones debido al cambio en la energía cinética de una columna de agua que se encuentra dentro de una línea de tubería (Quispe, 2018).

La forma en cómo se desarrolla el fenómeno del golpe de ariete se puede representar de manera sucinta mediante la **Figura 1.1**, la cual como se puede observar, sucede en la siguiente secuencia: primero, se tiene un flujo de cierta sustancia a una determinada velocidad y presión pasando por una tubería; segundo, debido a un cierre de válvula repentino o paro de máquinas hidromecánicas, se produce un cambio en la energía cinética de la columna de agua y esto a su vez provoca cambios en la presión del flujo; tercero, se produce un retroceso de onda de presión lo cual provoca una disminución en la presión del fluido que se coloca por debajo de la presión de operación generando así una succión en la línea de tubería.

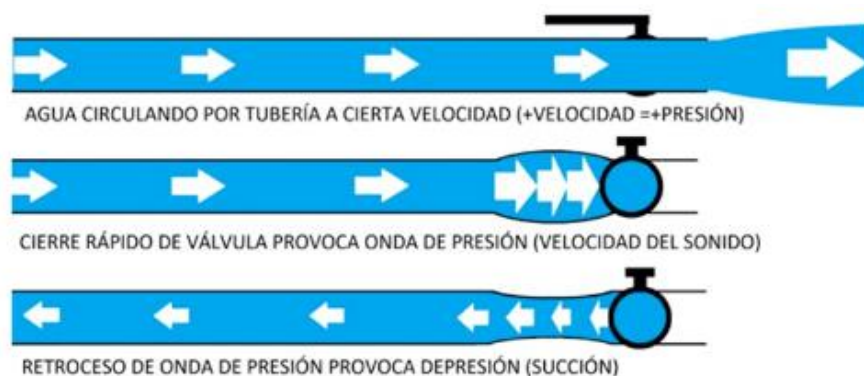


Figura 1.1. Golpe de ariete.

Fuente: (Kinenergy Internacional, 2022)

1.4.2 Causas que provocan el golpe de ariete

Dependiendo del tipo de sistema hidromecánico, el golpe de ariete se va a originar de diversas maneras, sin embargo, las causas principales y más comunes son provocados por los siguientes motivos (Rengifo & Gallego, 2016):

- Máquinas hidromecánicas
- Válvulas de control de flujo

Maquinas hidromecánicas

En el caso de máquinas hidromecánicas, el golpe de ariete puede darse por arranques bruscos o complicaciones en el funcionamiento, como, por ejemplo, un fallo en el suministro eléctrico que pueda provocar un paro repentino de bombas o su a vez, variaciones en la potencia de turbinas. Además, el desbalance en componentes internos de este tipo de máquinas puede crear vibraciones que generan defectos y esto por consecuencia el fenómeno de golpe de ariete.

Válvulas de control de flujo

Como bien lo define *Emerson Automation Solutions* en su publicación, una válvula, es un dispositivo de control que permite “mantener una variable de proceso, dentro de un rango operativo” (Emerson Automation Solutions, 2019), estas variables pueden ser presión, flujo, entre otros. Es por tal motivo que, una mala operación de éstas como es el caso de un cierre de forma abrupta puede ocasionar variaciones en la energía cinética del fluido que van acompañadas de ondas de presión, las cuales varían en valores que superan el rango de operación del sistema obteniéndose así picos de sobrepresión y subpresión.

En la actualidad, los sistemas hidráulicos operan con válvulas de control electrónicas para aumentar la eficiencia en la operación de un determinado proceso, sin embargo, una falla en el sistema de estos dispositivos puede generar el fenómeno del golpe de ariete no solo por cierres bruscos como se mencionó anteriormente, sino también, por variaciones durante el control de nivel de estanques y reservorios, además que pueden generar cambios bruscos en la demanda del fluido (Ingeniería de fluidos, 2016).

1.4.3 Defectos o consecuencias del golpe de ariete

El golpe de ariete se genera como resultado de cambios inesperados o bruscos en la velocidad que recorre el agua o en la presión que genera dentro de un conducto ocasionando diferentes efectos como son:

Rompimiento de Tuberías

Es un efecto producido por la presión que genera el flujo de agua en los conductos de las tuberías provocando un colapso en una parte de esta, donde el daño es impredecible ya sea en todo el sistema o en los equipos que los controlan, lo que a su vez involucra un paro en la operación que realice (Arreneche, 2021).

Fugas

Son pequeñas rupturas que empiezan levemente en las tuberías pasando desapercibidas y que solo generan un efecto grave a un largo plazo, sin embargo, causan daños en partes del equipo (Arreneche, 2021).

Daños en el sistema de la bomba (flujos)

El efecto del golpe de ariete se provoca a una presión tan alta que en algunos casos provoca el daño en las bombas pues a pesar de que estas poseen un margen de tolerancia a cualquier imperfecto, el golpe de ariete supera ese límite produciendo efectos en accesorios, empaques entre otros (Kumar, 2022).

Vibraciones

Se producen por los cambios de presión que sufren en las tuberías en la parte que se colapsó, rompió o afecto por la absorción del momento, llevando a fugas, grietas, inestabilidad en el suelo o a su vez si se genera el fenómeno repetidas veces daños progresivos (Escobar, 2015).

Sonidos

Los sistemas de tuberías o cañerías donde pasa el agua a grandes velocidades con presiones muy altas producen ruidos debido a las dilataciones ya sea que pasa de frío a caliente, la suspensión del servicio de agua la retención de las válvulas entre otros, generando un aumento brusco en la presión en que va el agua y origina una onda de choque en las tuberías que se expande en todo el sistema (Arreneche, 2021).

Por otro lado, aunque este efecto no es nocivo si implica molestias en el lugar que se produce ya sea en la población o los trabajadores como estrés, discontinuidad en el trabajo, suspensión de actividades entre otros (Arreneche, 2021).

Contratiempos (paralización del sistema)

Son efectos secundarios del golpe de ariete pues al haber un daño en una parte de la tubería o del sistema ocasiona inactividad, reparaciones, mantenimientos y pérdidas financieras.

Accidentes

En el golpe de ariete cuando se efectúan rupturas ponen en peligro la seguridad y salud del personal que se encuentre laborando, pues al intentar solucionar el problema o en proceso de mantenimiento, las fugas pueden aumentar el riesgo ya sea con caídas, golpes, resbalones entre otros accidentes.

1.4.4 Medios de control de transitorios

Dentro del fenómeno que implica el golpe de ariete es sustancial sistemas o mecanismos que prevengan o ayuden a controlar las variaciones de presión que se emiten al abrir o cerrar rápidamente una válvula, ejecutar el inicio de actividades de una bomba, la aparición de una onda de sobrepresión en una tubería, un cambio brusco en la fluctuación de fluidos entre otros casos (Paramio, 2015).

Según Paramio (2015), el golpe de ariete se produce por un incremento en la presión el cual es impredecible de conocer cuando y en qué momento pueda generarse, Por tal motivo es importante el implementar sistemas que ayuden a controlar el fenómeno o al menos mitigar el efecto que produce (Paramio, 2015).

El uso de sistemas para controlar el golpe de ariete es de gran ayuda aun cuando no lo controlan en su totalidad como el por ejemplo la implementación de una tubería de mayor espesor, materiales con mayor resistencia sin embargo esto no asegura que las sobrepresiones que se produzcan generen seguridad al sistema y en ocasiones estos métodos son más costos (Girona, 2018).

Una de las formas más básicas para la evitar el golpe de ariete es realizar cálculos de sobrepresión para poder compararla con la presión nominal de la tubería con la finalidad de poder dimensionar correctamente el sistema hidráulico sin embargo es uno de los métodos más costosos para un sistema (Girona, 2018).

Una manera de controlar el golpe de ariete es instalar en la tubería válvulas de bomba para sacar agua la cual ayuda a evitar el regreso de los fluidos quedando por varias tuberías en una unión simultánea, estas válvulas también llamadas capelas reducen las sobrepresiones y son de mayor utilidad si se cierran antes de que fluya el líquido en la tubería con ventosas que eviten la depresión (Vara, Uribe, & Halmil, 2015).

Entre los métodos de prevención de golpe de ariete más conocidos tenemos los siguientes:

Volante de inercia

Como ya se mencionó anteriormente, el golpe de ariete es originado por maquinas hidromecánicas tales como bombas y turbinas durante un paro repetido o planificado debido al momento de la desconexión, el rodete por su inercia seguirá rotando, pero a su vez disminuyendo su velocidad a tal punto que las condiciones del fluido sean inferiores a las de operación (Ríos, 2016). Es por tal motivo que se añade un volante de inercia el cual, es un elemento que guarda energía cinética y eleva la inercia en mecanismos rotativos con la finalidad de suavizar la variación de velocidad en el fluido impulsado.

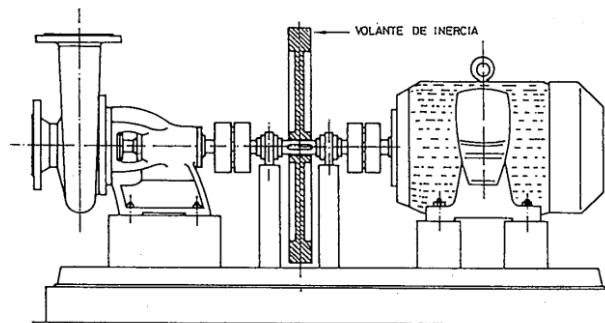


Figura 1.2. Instalación de un Volate de inercia.

Fuente: (Ríos, 2016)

Es importante tener en cuenta que este tipo de dispositivos a pesar de ser muy beneficioso para el control de transitorios también presentan inconvenientes al momento de su instalación pues es necesario tomar en cuenta varios aspectos como:

- Orientación del eje de planeación
- Sobredimensionamiento de motor para bombas
- Dimensiones del sistema hidráulico

Chimeneas de equilibrio

Las chimeneas de equilibrio son estructuras o tanques abiertos que están conectado a las líneas de transporte de fluido con la finalidad de permitir la oscilación de masa la cual

consiste absorber la energía de presión el fenómeno de golpe de ariete y desviarla hacia las paredes de estos elementos (Ríos, 2016).

Este método es mayormente utilizado en centrales hidro eléctricas debido a que requieren de abundante flujo de agua a elevadas velocidades, también es importante tomar en cuenta que las chimeneas son construidas en exteriores y es necesario que su altura no sea mayor a 20 metros, para reducir costos en el sistema hidráulico (Ríos, 2016).

Caldero de aire

Es un elemento cerrado el cual tiene la función de actuar como amortiguador de aire comprimido, en esta cámara se libera la energía de presión producida por el fenómeno de golpe de ariete mediante la colisión de los dos fluidos (Quispe, 2018).

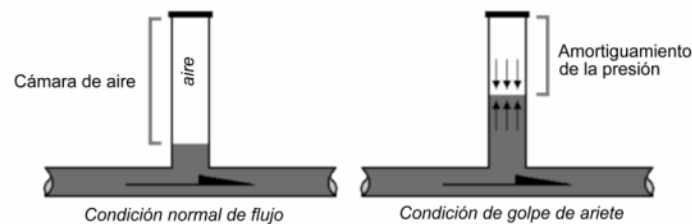


Figura 1.3. Cámara de Aire

Fuente: (Quispe, 2018)

Esta cámara hermética tiene un bajo costo de instalación debido a que puede ser construida a partir de una tubería, por otra parte, al ser de elaborada con simplicidad es muy utilizada por su gran capacidad para liberar energía, sin embargo, su tiempo de vida útil se ve afectada rápidamente debido a que la fluctuación de agua disminuye la cantidad de aire presente dentro de la cámara.

Válvulas de descarga

Son dispositivos de control mayormente utilizados para liberar fluido en casos que la presión sobrepase los límites superiores del rango de operación, pues constan de un orificio que permite el escape de presión. Su uso se ve limitado en la disipación de presión ya que su promedio de resistencia a la sobrepresión es baja comparado al resto de elementos de protección sin embargo tiene como ventaja que vienen en una variedad de tamaños lo cual lo hace adecuado para varias aplicaciones (Jimenez, 2011).

Válvulas de control

Como se mencionó, las válvulas son dispositivos que permiten mantener los regímenes de operación en un sistema hidráulico para compensar las perturbaciones del lazo de control y mantener la variable de proceso regulada lo más cercana posible al punto de ajuste.

En este tipo de dispositivo se presentan dos formas principales de diseño dependiendo de su elemento de cierre las cuales se clasifican en movimiento lineal y movimiento rotativo, sin embargo, las más utilizadas para controlar el fenómeno de golpe de ariete son:

- Válvulas de aire: son elementos mecánicos que bajo determinadas condiciones pueden permitir el ingreso o salida de aire en una tubería (Quesada, 2022).
- Válvulas anticipadoras de onda: Son dispositivos de control empleados para reducir las sobrepresiones y sub-presiones que se producen durante un paro repentino y puesta en marcha de equipos hidromecánicos (solutions, 2018).
- Válvulas alivio: Es un dispositivo empleado únicamente para reducir las sobrepresiones de un sistema mediante la descarga de fluido.

Ventosas

Son dispositivos de control utilizados durante el fenómeno de golpe de ariete, puesto que mientras se da el transiente las ventosas admiten la entrada/salida de aire para evitar la sub-presión/sobrepresión en el sistema. Este elemento se ubica en los alrededores de la válvula hacia donde se dirige el fluido y no resulta perjudicial en su instalación ya que pueden eliminar el exceso de aire antes del arranque de motores (Girona, 2018).

2 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo del presente proyecto se detalla en la **Figura 2.1**, ésta, consta de varias etapas que determinan el inicio del proyecto en el cual se define todo lo referente al fenómeno de golpe de ariete, y de igual forma el final del proyecto, en la cual se hace el análisis de resultados obtenidos por la simulación del control automático del golpe de ariete. Por tanto, el diagrama de flujo del presente trabajo es el siguiente:

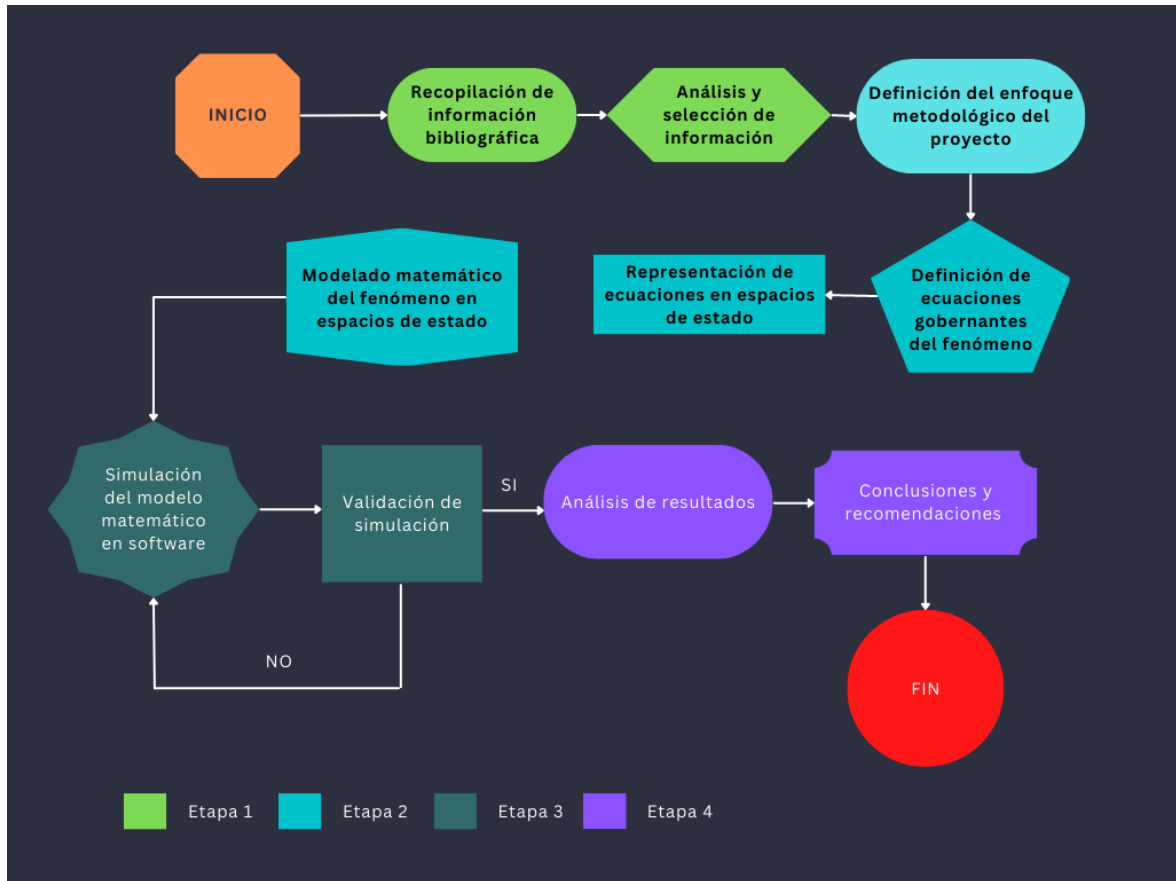


Figura 2.1. Metodología aplicada a la investigación.

Fuente: Propia

Como se puede visualizar en la **Figura 2.1**, la metodología consta de 4 etapas que son:

- Etapa 1: introducción al proyecto a desarrollar
- Etapa 2: desarrollo inicial del control automático del golpe de ariete.
- Etapa 3: desarrollo final del control automático del golpe de ariete.
- Etapa 4: análisis y discusión de resultados obtenidos.

2.1 Enfoque metodológico

Se busca realizar un enfoque mecatrónico, el cual permita controlar el golpe de ariete de manera más eficiente, ya que este proyecto surge debido a la necesidad de disminuir los efectos y problemas que aparecen con frecuencia en las tuberías por el cambio brusco de momento. Por lo que, este enfoque permite representar el fenómeno con variables, parámetros y coeficientes de una manera más amigable durante el modelado matemático y le otorga a la programación una versatilidad para poder desenvolverse bajo diferentes condiciones de entrada y de salida.

2.2 Modelado matemático

2.2.1 Ecuaciones que rigen el golpe de ariete

De acuerdo con el libro *Water Hammer Simulations*, el flujo transiente puede ser analizado de forma elástica y de forma inelástica, lo cual quiere decir que se va a tomar en cuenta o despreciar la compresibilidad del fluido para cada caso respectivamente. Sin embargo, el dejar de lado la compresibilidad del fluido trae consigo errores en los resultados de análisis, por tanto, para el caso del fenómeno de golpe de ariete se tomará en cuenta la compresibilidad del fluido (Mambretti, 2014).

Para empezar con la obtención de las fórmulas es necesario tomar en cuenta las siguientes condiciones del primer escenario (Mambretti, 2014):

- Se tiene un modelo simple de reservorio, tubería y válvula, tal y como se indica en la **Figura 2.2**.
- Se desprecia la energía cinética y las pérdidas de altura.
- Existe elasticidad y compresibilidad de flujo.
- Cierre de válvula repentino y nivel de fluido en el reservorio se mantiene constante.

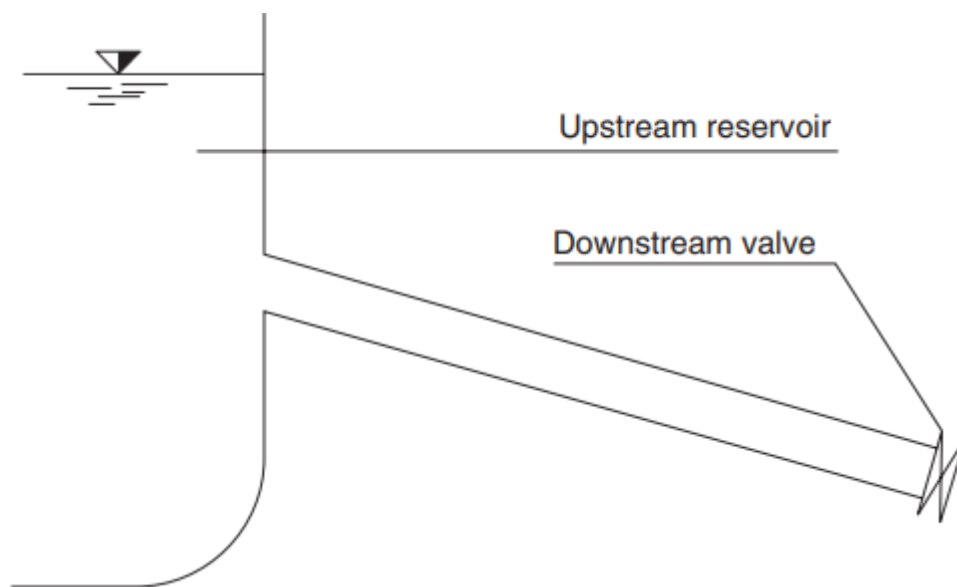


Figura 2.2 Sistema simple reservorio, tubería y válvula.

Fuente: (Mambretti, 2014)

Por tanto, bajo las consideraciones antes mencionadas, la variación del momento del volumen de agua detenida es:

$$P = m * v_0$$

Ecuación 2.1. Variación de momento de volumen de agua.

Donde

P = es el momentum del volumen de agua detenida.

m = masa de agua detenida

Vo = velocidad inicial en la tubería.

Sin embargo, como lo que se está analizado un volumen de control infinitesimal la variación de momentum puede ser expresada de la siguiente manera:

$$P = \rho * A * ds * v_0$$

Ecuación 2.2. Variación de momento de volumen infinitesimal.

Donde

ρ = densidad del fluido

A = el área de la tubería

ds = longitud infinitesimal del volumen de control.

De acuerdo con el libro *Water Hammer Simulations*, la variación del momento del volumen de control debe estar equilibrada con las fuerzas del impulso del mismo volumen, producidas por el cierre de válvula repentino, por tanto, se tiene que (Mambretti, 2014):

$$\rho * A * ds * v_0 = A * \Delta p * dt$$

Ecuación 2.3. Ecuación de equilibrio de fuerzas de impulso y variación de momento.

Donde simplificando la ecuación se puede obtener la variación de presión debido al cambio de movimiento del fluido:

$$\Delta p = \rho * \frac{ds}{dt} * v_0$$

Ecuación 2.4. Variación de presión.

Donde

Δp = variación de presión del fluido

ρ = densidad del fluido

$c = ds/dt$ = celeridad de la onda de presión

v_0 = velocidad inicial en la tubería

Es preciso indicar que, la ecuación puede ser representada en términos de columna de agua si se la divide para $\rho * g$, por tanto, queda de la siguiente manera:

$$\Delta H = \frac{c}{g} * v_0$$

Ecuación 2.5. Variación de presión en términos de columna de agua.

Donde

ΔH = variación de presión del fluido en términos de columna de agua (m.c.a)

g = gravedad

c = celeridad de la onda de presión

v_0 = velocidad inicial en la tubería

Esta expresión, es conocida como la **Ecuación de Joukowski**, la cual, de acuerdo con *Ríos Luis*, se utiliza simplemente cuando hay cierres instantáneos en válvulas. Además, el mismo autor establece que existen otras ecuaciones que pueden ser utilizadas teniendo en cuenta el tipo de cierre del dispositivo de control de flujo, estas son conocidas como (Ríos, 2016):

- Ecuación de Michaud, para cierre de dispositivos de control lento.
- Ecuación de Allievi, para cierre de dispositivos de control gradual.

2.2.1.1 Ecuación de Michaud

El autor *Ríos Luis*, establece que la ecuación es la siguiente (Ríos, 2016):

$$\Delta H = \frac{2L * v_0}{g * t_c}$$

Ecuación 2.6. Ecuación de Michaud.

Donde

ΔH = variación de presión del fluido en términos de columna de agua (m.c.a)

L = longitud de la tubería

g = gravedad

V_0 = velocidad inicial en la tubería

t_c = tiempo de duración del transitorio

2.2.1.2 Ecuación de Allievi

Por otro lado, el autor *Ríos Luis*, establece que la ecuación de Allievi es la siguiente expresión (Ríos, 2016):

$$\Delta H = \frac{H_0}{2} \left(C^2 \pm C * \sqrt{4 + C^2} \right)$$

$$C = \frac{L * v_0}{g * H_0 * t_c}$$

Ecuación 1.7. Ecuación de Allievi.

Donde

H_0 = carga sobre el dispositivo de control

$C^2 \pm C * \sqrt{4 + C^2}$ = variación de la carga piezométrica

2.2.1.3 Celeridad

Como se pudo observar en las anteriores fórmulas, la celeridad de la onda es algo que está muy presente en este fenómeno transitorio, por tanto, es preciso definirla con la finalidad de poder entender que representa y como afecta su valor durante el modelado.

La celeridad de acuerdo como lo definen los autores *Rengifo & Gallego (2016)*, “es la velocidad de propagación de una onda de presión a través del agua contenida en la tubería”, esta definida por la siguiente fórmula la cual de acuerdo con *Mambretti (2014)* es la siguiente:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \lambda * \frac{\varepsilon * D}{E * e}}}$$

Ecuación 2.8. Celeridad.

Donde

c = celeridad de la onda de presión

ε = módulo de elasticidad del fluido

ρ = densidad del fluido

D = diámetro de la tubería

e = espesor de la tubería

λ = coeficiente adimensional para juntas de tuberías

2.2.2 Formulación del fenómeno transiente (Golpe de ariete)

“Las ecuaciones que rigen el flujo transitorio proceden de un balance de fuerzas y masas en volumen de control considerando la inercia del agua” (Ríos, 2016, pág. 52) por lo tanto para obtener el modelo matemático es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se toma en cuenta la energía cinética y las pérdidas de altura.
- Existe elasticidad y compresibilidad de flujo.
- Se toma en cuenta que la dirección del fluido se da en un solo sentido es decir que es unidimensional.
- Cierre de válvula repentino y nivel de fluido en el reservorio se mantiene constante.

2.2.2.1 Ecuación de la Continuidad

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho * c^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0$$

Ecuación 2.9. Ecuación de la continuidad.

P = presión

c = ds/dt = celeridad de la onda de presión

t = tiempo

V = velocidad del fluido

X = posición

ρ = densidad

2.2.2.2 Ecuación de Momento

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho * \frac{\partial v}{\partial t} + v * \rho * \frac{\partial v}{\partial x} + \gamma * J + \gamma * \frac{dz}{dx} = 0$$

Ecuación 2.10. Ecuación de momento.

P = presión

ρ = densidad

J = inclinación de la línea de grado hidráulica

v = velocidad del fluido

$dz/dx = \sin \alpha =$ ángulo de la componente axial del peso de la columna de agua.

X = Posición

2.2.3 Modelado del golpe de ariete en espacio de estados

Para poder realizar el control del golpe de ariete se debe tratar el fenómeno como una planta a ser controlada, esto significa que es preciso definir las entradas y salidas que va a tener el sistema hidromecánico por tanto la siguiente **Figura 2.3** detalla lo anterior mencionado:

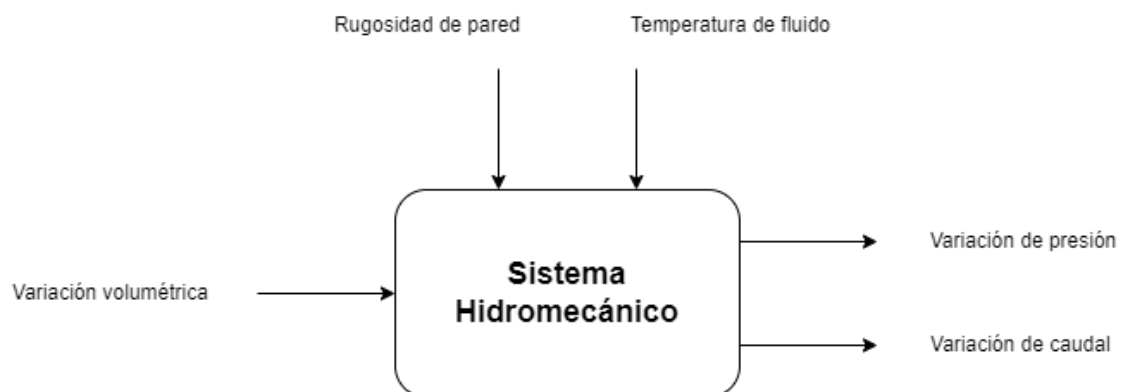


Figura 2.3. Entradas y salidas de la planta a ser controlada.

Fuente: Propia

Las ecuaciones gobernantes expresadas en espacios de estado son (Mambretti, 2014):

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v & \rho * c^2 \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix} * \frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g * \sin \alpha - g * J \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.11. Ecuaciones gobernantes en espacios de estado.

Donde también puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\vec{U} = \begin{bmatrix} p \\ v \end{bmatrix}$$

$$\vec{B} = \begin{bmatrix} v & \rho * c^2 \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix}$$

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ -g * \sin \alpha - g * J \end{bmatrix}$$

Ecuación 2.12. Cambio de variable.

Por tanto,

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \vec{B} * \frac{\partial \vec{U}}{\partial x} = \vec{E}$$

Ecuación 2.13. Ecuaciones gobernantes con cambio de variables.

Sin embargo, la instalación hidráulica conformado por tuberías y válvulas de control puede ser transformado en un sistema masa resorte amortiguador con la finalidad de poder aplicar un enfoque mecatrónico. En la **Figura 2.4**, el sistema consta de dos resortes y un amortiguador, el primer resorte representa la fuerza elástica del fluido mientras que el segundo representa la fuerza elástica del material de la tubería. Por otro lado, el amortiguador representa la fuerza de amoritguamiento por parte de la viscosidad del fluido.

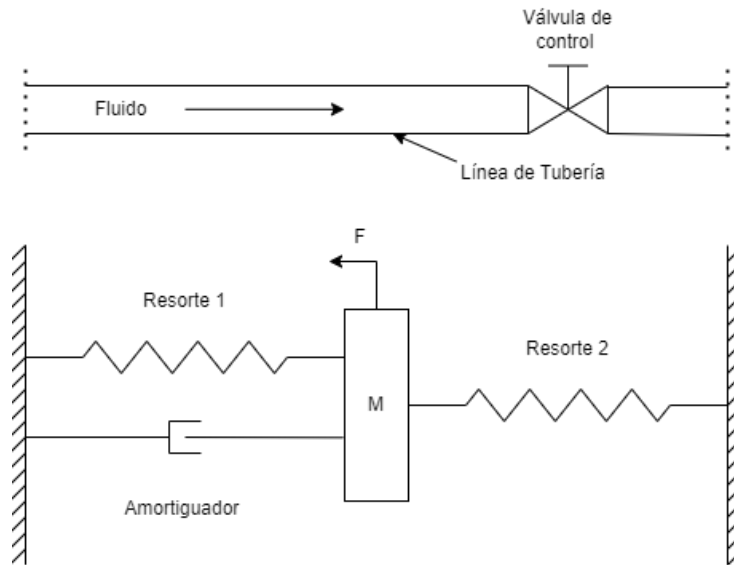


Figura 2.4. Representación del sistema hidromecánico en modelo masa resorte amortiguador.

Fuente: Propia

El diagrama de cuerpo libre del sistema masa resorte se desarrolla en la figura, de tal manera que aplicando la segunda Ley de Newton se tiene que, (Mambretti, 2014):

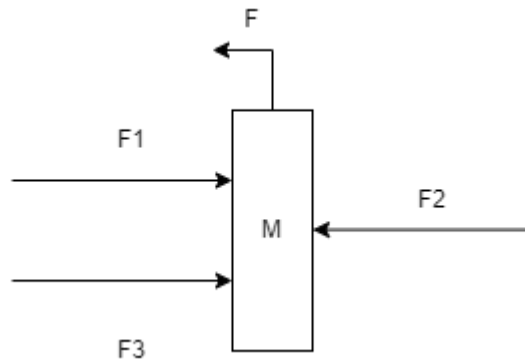


Figura 2.5. Diagrama de cuerpo libre del sistema.

Fuente: Propia

Donde,

- M = masa de fluido.
- F = fuerza producida por el cierre de válvula.
- $F1$ = fuerza elástica del fluido.
- $F2$ = fuerza elástica de las paredes de la tubería.
- $F3$ = fuerza de amortiguamiento viscoso.

Por tanto,

$$\sum F = M * \frac{d^2x}{dt^2} = \rho * g * \frac{dV}{dt}$$
$$F + F2 - F1 - F3 = M * \frac{d^2x}{dt^2} = \rho * L * \frac{dV}{dt}$$

Ecuación 2.14. Segunda Ley de Newton en términos de inercia de fluido.

Como ya se explicó con anterioridad, el fenómeno de golpe de ariete es producido por sobrepresiones y depresiones en el fluido de trabajo, por tanto, de la ecuación de presión se puede obtener la fuerza producida por el cierre de válvula, de tal manera que se puede representar de la siguiente forma (White, 2008):

$$\frac{dp}{dx} = \frac{F}{At}$$

Ecuación 2.15. Variación de la presión en términos de la fuerza por cierre de válvula.

Donde,

$$F = \frac{dp}{dx} * At$$

Ecuación 2.16. Fuerza debido al cierre de válvula.

dp/dx = variación de presión.

At = área transversal de la tubería.

Para la resolución de los resortes en la nueva representación del sistema hidromecánico, se aplica la Ley de Hooke la cual (Serway & Jewett, 2009) establece que:

$$F1 = K1 * \Delta x$$

$$F2 = K2 * \Delta x$$

Ecuación 2.17. Ley de Hooke aplicada a la representación del sistema.

Donde,

$K1$ y $K2$ = es la constante elástica del resorte.

Δx = deformación del resorte.

Sin embargo, es preciso indicar que al tratarse de un fluido no es posible determinar la deformación lineal que se produce en el resorte, por tanto, de acuerdo los autores Aguinaga A., Cando E. y Orquera E., establecen las siguientes expresiones que permitirán encontrar la fuerza elástica del fluido y de la tubería respectivamente, (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2023):

$$F1 = K1 * \frac{dV}{dx}, \quad K1 = \frac{B}{L}$$

Ecuación 2.18. Ley de Hooke aplicada a representación de resorte de un fluido.

$$F2 = K2 * \frac{dV}{dx}, \quad K2 = \frac{4 * E * e}{\phi_h * L}$$

Ecuación 2.19. Ley de Hooke aplicada a representación de resorte de un material.

Donde,

B = módulo de compresibilidad del fluido.

L = longitud de la tubería.

E = módulo de Young del material de la tubería.

e = espesor de la tubería.

ϕ_h = diámetro hidráulico.

dV/dx = deformación volumétrica.

Por otro lado, la fuerza de amortiguamiento viscoso puede ser calculado mediante la siguiente ecuación, (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2023):

$$F3 = 40,74 * \frac{\mu * At * L}{\phi_h^4} * \frac{dV}{dx}$$

Ecuación 2.20. Fuerza de amortiguamiento viscoso.

Donde,

μ = la viscosidad dinámica.

A_t = área transversal de la tubería.

dV/dx = variación de caudal.

Una vez definidas las ecuaciones del sistema masa resorte amortiguador, es posible mediante la derivación de la ecuación de la fuerza producida por la válvula y el reemplazo de las ecuaciones de la fuerza de resortes en la ecuación de la segunda ley de Newton, permite obtener el modelo matemático que será representado en espacios de estado, las ecuaciones principales son:

$$F + F_2 - F_1 - F_3 = M * \Delta \ddot{x} = \rho * L * \frac{dV}{dt}$$

$$\frac{dp}{dx} * At + \frac{4 * E * e}{\phi_h * L} * \frac{dV}{dx} - \frac{B}{L} * \frac{dV}{dx} - 40,74 * \frac{\mu * At * L}{\phi_h^4} * \frac{dV}{dx} = \rho * L * \frac{dV}{dt}$$

Ecuación 2.21. Segunda Ley de Newton resultante.

Despejando $\frac{dV}{dt}$ se tiene que:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dp}{dx} * \frac{At}{\rho * L} + \frac{4 * E * e}{\rho * \phi_h * L^2} * \frac{dV}{dx} - \frac{B}{\rho * L^2} * \frac{dV}{dx} - 40,74 * \frac{\mu * At}{\phi_h^4 * \rho} * \frac{dV}{dx}$$

Ecuación 2.22. 1era ecuación principal del modelado matemático.

Y la otra ecuación principal es la siguiente:

$$\frac{dp}{dt} = - \frac{B}{At * L} * \frac{dV}{dx}$$

Ecuación 2.23. 2da ecuación principal del modelado matemático.

Por tanto, la representación del modelo matemático diferencial del sistema masa resortes amortiguador en espacios de estado es el siguiente:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} p \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{B}{At * L} \\ \frac{At}{\rho * L} & -40,74 * \frac{\mu * At}{\phi_h^4 * \rho} \end{bmatrix} * \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} p \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{B}{\rho * L^2} + \frac{4 * E * e}{\rho * \phi_h * L^2} \end{bmatrix} * \frac{dV}{dx}$$

Ecuación 2.24. Representación de sistema masa-resorte-amortiguador en espacios de estado.

En el sistema de salida se tiene que:

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} * \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} p \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \frac{dV}{dx}$$

Ecuación 2.25. Sistema de salida.

3 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

3.1 Características de los sistemas hidromecánicos

3.1.1 Sistema hidromecánico propuesto

Para el presente trabajo se establece una determinada instalación hidráulica que permitirá el análisis del sistema bajo ciertas condiciones de entrada. Los datos del sistema hidromecánico le pertenecen al sistema de aguas secundaria de la central térmica Gualberto Hernández, esta central de generación es parte de la Empresa Eléctrica Quito y se encuentra ubicada en el sector de Guangopolo. Los datos del sistema son los siguientes:

- Caudal nominal: 700 [m³/h] = 0.194 [m³/s]
- Diámetro nominal de la tubería: 20 [in]
- Cedula de la tubería: 20
- Espesor de la tubería: 0.00952 [m]
- Longitud libre de la tubería: 20 [m]
- Gravedad: 9.81 [m/s²]
- Temperatura de salida del fluido 25 [°C]
- Densidad de fluido: 997.009 [Kg/m³]
- Viscosidad dinámica del fluido: 855E-6 [N*s/m²]
- Módulo de compresibilidad del fluido: 2.2E9 [Pa]
- Material de la tubería: ASTM-A53 grado B
- Módulo de elasticidad de la tubería: 30E6 [psi] o 2.068E11 [Pa]

Como el sistema de aguas secundarias de la central térmica es un sistema de refrigeración, el agua pasa por una torre de enfriamiento y sale a una temperatura de 25 °C es por tal motivo que las propiedades del agua son evaluadas a esa temperatura y obtenidas del libro de Transferencia de Calor y Masa (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011). Por otro

lado, las propiedades de la tubería son obtenidas del libro Mecánica de Materiales (Beer, DeWolf, Mazurek, & Johnston, 2012).

Por último, los datos de diámetro de tuberías, cédulas y caudales fueron obtenidos mediante mediciones directas de éstas, en la central térmica de Guangopolo.

3.1.2 Sistema hidromecánico estudiado

Como lo establece uno de los objetivos específicos del presente trabajo, la validación de la simulación del fenómeno del golpe de ariete requiere de una comparativa entre un caso propuesto con un caso ya estudiado, por tanto, para el caso ya estudiado se utilizarán los datos obtenidos en su publicación “El enfoque mecatrónico en el modelado matemático y simulación del comportamiento dinámico del golpe de ariete para el control de la onda de sobrepresión transitoria en instalaciones hidráulicas” (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2023).

- Caudal nominal: 0.6 [m³/s]
- Diámetro nominal de la tubería: 0.5 [in]
- Espesor de la tubería: 0.007 [m]
- Longitud libre de la tubería: 532 [m]
- Gravedad: 9.81 [m/s²]
- Densidad de fluido: 1000 [Kg/m³]
- Viscosidad dinámica del fluido: 0.001 [N*s/m²]
- Módulo de compresibilidad del fluido: 2.2E9 [Pa]
- Módulo de elasticidad de la tubería: 2.05E11 [Pa]

3.2 Gradiente de caudal

A partir de los datos ingresados en el apartado 3.2.2, se obtiene como resultado la **Figura 3.1**, que pertenece al caso ya estudiado por parte de Aguinaga A., Cando E., Orquera E.

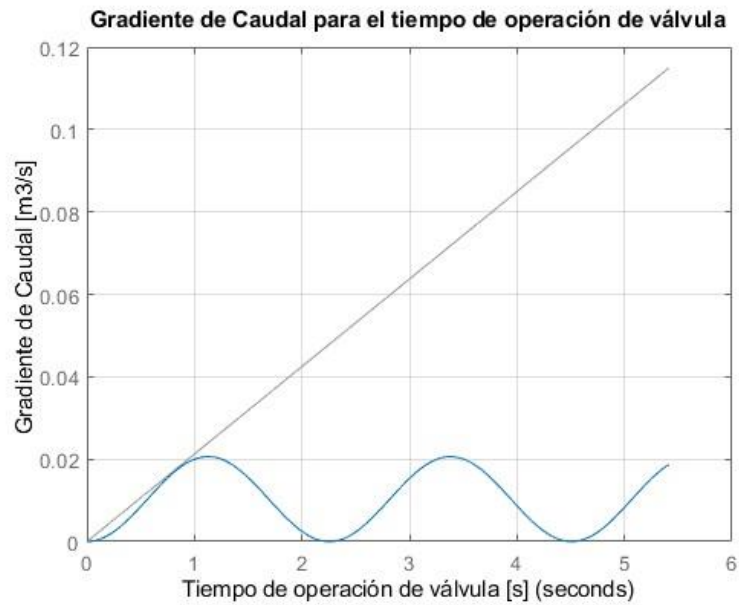


Figura 3.1. Gradiente de caudal para tiempo de operación de válvula (caso estudiado).

Fuente: Propia

Los resultados numéricos del caso ya estudiado se presentan en la **Tabla 3.1**, a continuación:

Tabla 3.1. Resultados obtenidos (caso estudiado). **Fuente:** (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2023).

Simbología	Resultados	Valor	Unidades
C	Celeridad	1,116	m/s
Tc	Tiempo de cierre de válvula crítico	0.953	s
P	Sobrepresión debido al golpe de ariete	3.41 x 10 ⁺⁶	Pa
To	Tiempo de operación	5.415	s
ΔQ_{wh}	Gradiente de caudal debido al golpe de ariete	0.1150	m ³ /s
Ttcv	Tiempo total de cierre de válvula	28.255	s

Por otra parte, para el caso propuesto los resultados se presentan en la **Figura 3.2:**

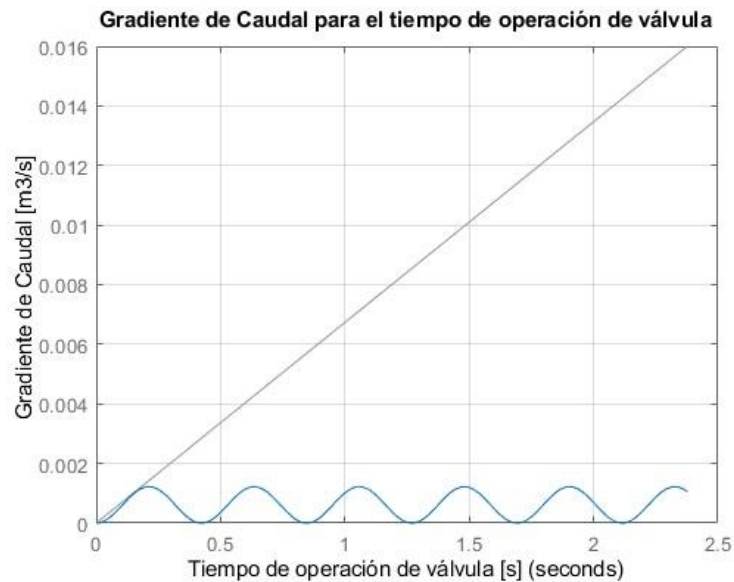


Figura 3.2. Gradiente de caudal para el tiempo de operación de válvula (caso propuesto).

Fuente: Propia

Los resultados numéricos para el caso propuesto se presentan en la **Tabla 3.2**, a continuación:

Tabla 3.2. Resultados obtenidos (caso propuesto). **Fuente:** Propia

Simbología	Resultados	Valor	Unidades
C	Celeridad	1,174	m/s
T _c	Tiempo de cierre de válvula crítico	0.1703	s
P	Sobrepresión debido al golpe de ariete	1.120 x 10 ⁺⁶	Pa
T _o	Tiempo de operación	2.3763	s
ΔQ _{wh}	Gradiente de caudal debido al golpe de ariete	0.0160	m ³ /s
T _{tcv}	Tiempo total de cierre de válvula	28.81	s

Como se puede visualizar en **Figura 3.2**, el gradiente de caudal debido al cierre de la válvula instantánea se mantiene por encima del transiente producido por el golpe de ariete, este comportamiento según lo mencionan los autores es el que se debe mantener con la finalidad de poder controlar el fenómeno de golpe de ariete. Es por tal motivo que, para el caso propuesto, se obtiene una grafica similar del comportamiento del transiente a un determinado gradiente de caudal de tal forma que la simulación cumple con el comportamiento obtenido en estudios similares.

Sin embargo, es preciso mencionar que el gradiente de caudal es diferente para ambos casos, siendo el mayor para el caso ya estudiado debido a que, se tienen una configuración

de sistema hidromecánico mas grande al analizado en el presente trabajo. Además, este valor debe ser variado gradualmente con la finalidad de poder obtener el valor límite con el cual el transiente pueda ser controlado.

3.3 Conclusiones

El enfoque mecatrónico aplicado al presente trabajo permite realizar el control del golpe de ariete de manera efectiva y simple, con la finalidad de disminuir efectos provocados por la sobrepresión y variación de caudal permitiendo de esta manera desarrollar sistemas hidromecánicos que cumplan con parámetros de seguridad y funcionalidad adecuados.

Para la simulación del fenómeno de golpe de ariete se consideraron muchas variables que forman parte del proceso como constantes simplificando su resolución, es por tal motivo que la simulación presenta una forma simple y aproximada de resolución que puede ser extrapolada a diferentes configuraciones de sistemas hidromecánicos, es decir, analizar diferentes tamaños de tuberías, diferentes fluidos, diferentes propiedades de fluidos para regímenes diferentes con la finalidad de poder establecer la ley de cierre de válvulas que disminuya o limite los efectos producidos por los transientes de sobrepresión.

Para la obtención de las ecuaciones gobernantes del fenómeno de golpe de ariete, es necesario en muchas ocasiones tomar en cuenta y despreciar ciertas variables dependiendo el caso a analizar, lo cual puede producir dificultad para la resolución del problema y generar cierto porcentaje de error en los resultados. Es por tal motivo que se aplicó un enfoque mecatrónico con la finalidad de facilitar el análisis y el control del fenómeno.

Se pudo determinar en las figuras, que para controlar el golpe de ariete es necesario establecer un valor límite en el gradiente de caudal que permita reducir los efectos de este fenómeno. Este valor se determina variando de forma gradual el gradiente de caudal en el código del software Matlab dependiendo de la configuración del sistema hidromecánico y manteniendo la función del transiente del golpe de ariete por debajo de la función de rampa generada por el tiempo de operación y el gradiente de caudal.

El caso propuesto presenta tiempos de cierre de válvula crítico y de operación menores al caso ya estudiado, esto en gran medida a que las dimensiones de la instalación propuesta son de menor tamaño y la tubería presenta un mayor espesor de pared sin embargo, las propiedades del fluido se mantienen muy cercanas para ambos casos. Por tanto, se puede determinar que las variaciones en la ley de cierre están mas ligadas a la configuración del sistema que de las condiciones del fluido.

3.4 Recomendaciones

Para una correcta aplicación del enfoque mecatrónico es necesario definir de manera correcta y clara los valores de variables y coeficientes, tanto en el modelado matemático como en el ingreso de datos del software, con la finalidad de poder representar de forma mas certera los resultados que serán aplicados para el diseño de una instalación hidromecánica.

Hay que tener en cuenta que, al tratarse de una programación muy generalizada, no esta libre de errores por tanto esto solo sirve para una aproximación rápida y que pueda ser utilizado como un modelo simplificado.

Para facilitar la resolución del fenómeno de golpe de ariete, es recomendable definir un solo caso de análisis simple debido a que las variables y parámetros que serán importantes considerar durante el modelado matemático se eliminarán y disminuirán el porcentaje de error. Sin embargo, se tendrán modelos más simples.

Con la metodología mecatrónica para análisis de la dinámica de sistemas, utilizada en este trabajo, se pueden realizar trabajos similares en el futuro, para otros tipos de sistemas técnicos, como: sistemas mecánicos, robóticos, térmicos y termodinámicos.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguinaga, Á., Cando, E., & Orquera. (2023). The mechatronic approach in the mathematical modelling and simulation of the dynamic behavior of the water hammer to control the transient overpressure wave in hydraulic facilities. *Proceedings of the 9th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering* , 8.
2. Beer, F., DeWolf, J., Mazurek, D., & Johnston, R. (2012). *Mechanics of Materials*. New York: McGrawHill.
3. Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Hoboken: John Wiley y Sons.
4. Emerson Automation Solutions. (2019). *Emerson*. Obtenido de Guía de válvulas de control: <https://www.emerson.com/documents/automation/gu%EDa-de-v%E1lvulas-de%AOcontrol-control-valve-handbook-spanish-es-5459932.pdf>
5. Enríquez, W. (2015). *Análisis de golpe de ariete para reducir la sobrepresión en el sistema de bombeo del tanque TK-007 al cajón LA003B de la presa de relaves de Smcv*. Huancayo: Universidad del Centro del Perú.
6. Escobar, M. (2015). *Diagnosís de averías en electrodomesticos de gama industrial*. España: Elearning S.L.

7. Girona, J. (2018). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona: Service poin.
8. González, J., & Bernal, J. (19 de Agosto de 2015). *Análisis teórico experimental del fenómeno del golpe de ariete por el cierre rápido de una válvula en tuberías*. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
9. Ingeniería de fluidos. (2016). *Ingeniería de fluidos protección anti ariete*. Obtenido de <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>
10. Jimenez, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones eléctricas*. Catalonia: UPC.
11. Kinenergy Internacional. (8 de Agosto de 2022). *Kinenergy Consultoría - Ingeniería*. Obtenido de <https://www.kin.energy/blogs/post/¿cómo-evitar-el-golpe-de-ariete-en-instalaciones-sanitarias>
12. Kumar, A. (2022). *What is piping*. Obtenido de <https://whatispiping.com/water-hammer-basics-in-pumps/>
13. Mambretti, S. (2014). *Water Hammer Simulations*. Southhampton: WIT Press.
14. Paramio, y. (2015). *Elementos de la construccion*. Madrid: Grefol, s.l.
15. Quesada, J. (Dirección). (2022). *Tipos de válvulas de aire* [Película].
16. Quispe, R. (2018). *Repositorio de la Universidad César Vallejo*. Obtenido de Evaluación Y Mejoramiento Del Abastecimiento Del Sistema De Agua Potable Aplicando Golpe De Ariete, Barrio Partido Alto-Shanao-Lamas-2018: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/30729>
17. Rengifo, S., & Gallego, J. (2016). *Repositorio Universidad Tecnológica de Pereira*. Obtenido de Diseño y construcción de un sistema de ariete hidraulico para el aprovechamiento de aguas lluvias: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/983c95b9-eee0-45f2-a4ca-4341a436a08f/content>
18. Ríos, L. (Julio de 2016). *Repositorio Escuela Politécnica Nacional*. Obtenido de Análisis del flujo transitorio en sistemas de bombeo: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16648/1/CD-7264.pdf>
19. Serway, R., & Jewett, J. (2009). *Física para ciencias e ingeniería*. México D.F.: CENGAGE Learning.
20. solutions, B. w. (Dirección). (2018). *Válvula anticipadora de Onda* [Película].
21. Vara, E., Uribe, c., & Halmil. (2015). *Golpe de Ariete*. Madrid: Inia quilampu.
22. White, F. (2008). *Fluid Mechanics, Seventh Edition*. New York: McGraw-Hill.

5 ANEXOS

ANEXO I

Código en Matlab del caso propuesto para resolver el modelo matemático y simular la dinámica del sistema.

```
%DEFINICIÓN DEL SISTEMA HIDROMECAÁNICO

d=0.508; % diametro tubería en m
L=100; % longitud libre de tubería m
At=pi*d^2/4; % área tubería m2
e=0.009; % espesor de la pared de la tubería m

%PROPIEDADES DEL FLUIDO A T= 25°c

rho=997; % densidad kg/m3
g=9.81; % gravedad m/s2
visd=855e-6; % viscosidad dinámica del fluido Pa.s (10 poises)
Bc=2.2e9; % constante de compresibilidad(módulo de bulk) Pa
E=2.068e11; % constante de elasticidad (módulo de Young) Pa

%CONDICIONES DE TRABAJO

Ho=20.53; % mca
Po=Ho*1e5/10.33 % presión Pa
Qo=0.194; % caudal m3/s
vo=Qo/At; % velocidad de flujo
g=9.81; % gravedad m/s2

% MATRICES DE ESPACIO DE ESTADO
A=[0 -Bc/(At*L);At/(rho*L) -40.74*visd*At/(rho*d^4)];
B=[0;-Bc/(rho*L^2)+4*E*e/(rho*d*L^2)];
C=[1 0;0 1];
D=[0;0];

% EMPAQUETAMIENTO DEL MODELO MATEMÁTICO
SS=ss(A,B,C,D);
GP=tf(SS);
```

```

% CALCULOS EN EL SISTEMA HIDRÁULICO
c=sqrt((Bc/rho)/(1+(Bc*d/(E*e)))) % celeridad m/s
tcr=2*L/c % tiempo crítico
pcritica=rho*c*vo % Sobrepresión con golpe de ariete
to=2*L*vo/(0.4*Ho*g)

% CONTROL LAZO ABIERTO LINEAL (RAMPA) DEL CAUDAL
deltaQ=0.016
t=0:0.001:to;
slope=(deltaQ/to)*t;
lsim(deltaQ*Gp2,slope,t)
tiempocierre=to*Qo/deltaQ % LEY DE CIERRE
pause;

```

Resultados

```

Po =
    1.9874e+05

c =
    1.1742e+03

tcr =
    0.1703

pcritica =
    1.1205e+06

to =
    2.3763

deltaQ =
    0.0160

```