

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 HIDROMECÁNICOS, PARA LIMITAR EL
TRANSIENTE DE SOBREPRESIÓN**

**ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE LA DINÁMICA DEL FENÓMENO DEL
GOLPE DE ARIETE, EN SISTEMAS HIDROMECÁNICOS, PARA
LIMITAR LOS EFECTOS NO DESEADOS DEL TRANSIENTE DE
SOBREPRESIÓN**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO/A EN
MECÁNICA**

ALEX PAUL CAGUANA MORALES

alex.caguana@epn.edu.ec

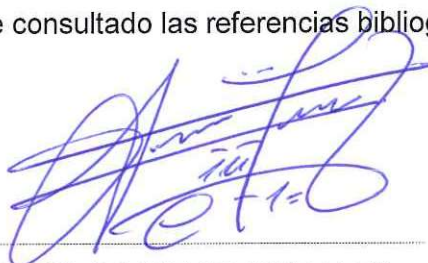
DIRECTOR: Ph.D. ALVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGAN

alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

DMQ, febrero 2023

CERTIFICACIONES

Yo, ALEX PAUL CAGUANA MORALES 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.



ALEX PAUL CAGUANA MORALES

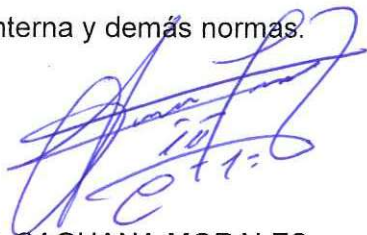
Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ALEX PAUL CAGUANA MORALES, bajo mi supervisión.



Ph.D. ALVARO AGUINAGA BARRAGAN
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.



ALEX PAUL CAGUANA MORALES



Ph.D. ALVARO AGUINAGA BARRAGAN

DEDICATORIA

Para mi madre, Carmen Amelia, por permitirme el regalo maspreciado que es la vida, por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida porque a pesar de las circunstancias, me demostró con su ejemplo que todo lo necesario para triunfar está en uno mismo, solo hay estar dispuesto dar un gran esfuerzo por aquello que se anhela.

Alex Caguana

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre y la vida por ser la persona que soy, por estar en este lugar, por poder gozar de todo lo que se nos fue entregado para nuestro deambular por este inmensurable mundo, por los conocimientos, las habilidades, las herramientas que me ayudaron a forjarme para ser un hombre libre y capaz de alcanzar todo cuanto esté dispuesto a conseguirlo.

De manera especial a mis tíos, Justo y Carmen por su apoyo, por sus consejos, por considerarme y quererme como un hijo más.

A todos quienes fueron partícipes de las experiencias vividas durante esta etapa universitaria.

Finalmente, un agradecimiento total para mi tutor, Ph.D., Álvaro Aguinaga Barragán por su paciencia, su compromiso en el desarrollo de este trabajo.

Alex Caguana

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE ECUACIONES	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance.....	2
1.4 Marco teórico.....	4
1.4.1 Golpe de ariete	4
1.4.2 Casos en los que se puede producir el fenómeno	5
1.4.3 Características y tipos de flujo transitorio.....	6
1.4.4 Inconvenientes del flujo transitorio.....	7
1.4.5 Modelos tradicionales de transitorios.....	8
1.4.6 Sistemas Hidromecánicos	10
Tuberías de Acero	11
Tuberías de cobre	12
Tubería de PVC (Cloruro de Polivinilo)	12
Bombas	13
Turbinas	14
2 METODOLOGÍA.....	15
2.1 Enfoque mecatrónico.....	15
2.2 Estructura del proceso.....	16
2.3 Modelo físico	17
2.4 Modelo matemático	19
2.5 Representación en diagramas de bloques.....	23
2.6 Cálculos Hidráulicos	24
2.6.1 Tiempo de cierre de la válvula	24
Cierre Brusco	25

Cierre Lento	25
2.6.2 Sobrepresión transitoria crítica	25
2.6.3 Tiempo de funcionamiento.....	26
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	26
3.1 Coeficientes y constantes empleados en el modelo matemático	26
3.2 Respuesta temporal de lazo-abierto	27
3.2.1 Resultados de la simulación numérica.....	28
3.3 Respuesta temporal de lazo cerrado	28
3.4 Conclusiones.....	29
3.5 Recomendaciones.....	30
4 Bibliografía.....	31
5 ANEXOS.....	33
ANEXO I.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Valores de los coeficientes y constantes empleados en el modelo matemático.....	26
Tabla 3.2. Resultados de la simulación en lazo abierto.	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.	Representación gráfica del golpe de ariete en un sistema de distribución.	5
Figura 1.2.	Representación de los tipos de transitorios en líneas de distribución.	6
Figura 1.3.	Sistema de Bombeo Hidráulico de un pozo petrolero.	11
Figura 1.4.	Especificaciones técnicas comerciales de los tubos de acero.	12
Figura 1.5.	Tubos de cobre empleado en aplicaciones domésticas.	12
Figura 1.6.	Tubería y Conexión CPVC SCHD 40 y 80 Hidráulico.	13
Figura 1.7.	Tipos de bombas empleadas en la industria.	13
Figura 1.8.	Tipos de turbinas empleadas en Hidroeléctricas.	14
Figura 1.9.	Tipos de válvulas con respectiva simbología.	14
Figura 2.1.	Elementos constitutivos del enfoque mecatrónico.	16
Figura 2.2.	Diagrama de flujo con los pasos a realizarse para el análisis del golpe de ariete en un sistema Hidromecánico. Fuente: Propia	17
Figura 2.3.	Sistema hidromecánico típico de distribución de líquidos por tubería.	18
Figura 2.4.	Diagrama caja negra con entradas, salidas y perturbaciones.	19
	Fuete: Propia.	19
Figura 2.5.	Representación de un sistema hidromecánico como un proceso objetivo mecánico. Fuente: Propia basado en (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019)	19
Figura 2.6.	Representación del espacio de estados en diagramas de bloques.	24
Figura 3.1.	Respuesta temporal de lazo-abierto para el gradiente de flujo durante el tiempo de operación de válvula. Fuente: Propia.	27
Figura 3.2.	Respuesta de lazo cerrado del transiente de golpe de ariete.	29

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1.	Primera ecuación de SAINT VENANT	8
Ecuación 1.2.	Segunda ecuación de SAINT VENANT	8
Ecuación 1.3.	Celeridad de la onda de presión.	9
Ecuación 1.4.	Primera ecuación de SAINT VENANT aplicando teoría de Allievi.	9
Ecuación 1.5.	Segunda ecuación de SAINT VENANT aplicando teoría de Allievi.	9
Ecuación 1.6.	Modelo de fricción transiente de Golpe de Ariete.....	10
Ecuación 2.1.	Expresión general de la Segunda ley de Newton.....	20
Ecuación 2.2.	Desarrollo de la ecuación general de la segunda ley de Newton.	20
Ecuación 2.3.	Fuerza elástica debido a la deformación del fluido.	21
Ecuación 2.4.	Fuerza de amortiguamiento viscoso del fluido.	21
Ecuación 2.5.	Fuerza debido al cierre de la válvula de control.	21
Ecuación 2.6.	Fuerza de elástica debido a la pared de la tubería.	21
Ecuación 2.7.	Expresión del momento de inercia del fluido.....	22
Ecuación 2.8.	Primera ecuación diferencial ordinaria que modela el sistema hidromecánico.	22
Ecuación 2.9.	Segunda ecuación diferencial ordinaria del sistema hidromecánico.	22
Ecuación 2.10.	Modelo del sistema hidromecánico en espacio de estados.....	22
Ecuación 2.11.	Vector de salidas del sistema.	23
Ecuación 2.12.	Tiempo de cierre crítico de la válvula.	24
Ecuación 2.13.	Presión máxima resultante debido a un cierre brusco de la válvula.	25
Ecuación 2.14.	Presión producida por el cierre lento de la válvula.....	25
Ecuación 2.15.	Sobrepresión crítica producida en el sistema hidromecánico.....	26
Ecuación 2.16.	Tiempo de funcionamiento del sistema hidromecánico.....	26

RESUMEN

El golpe de ariete es un fenómeno que se produce en los sistemas de distribución fluidodinámicos por tubería siendo imposible la atenuación total de su efecto, por lo que, los estudios realizados por diferentes investigadores alrededor del mundo permiten desarrollar modelos que ayuden a predecir el comportamiento de los transitorios de presión producidos por cambios bruscos en la velocidad de flujo, para reducir el desgaste y las pérdidas de los elementos del sistema, al mismo tiempo que mejore la confiabilidad durante la operación del sistema mediante el control de los parámetros que influyen en la generación de transitorios críticos.

Con este antecedente se presenta a continuación el estudio del golpe de ariete desde el enfoque mecatrónico como alternativa para el análisis y el control de los transitorios de presión en los sistemas hidráulicos.

En primer lugar, se define un modelo físico, donde el sistema hidromecánico se constituye por una tubería de ingreso, una válvula de control de flujo y una tubería de salía, con este se procede a obtener un modelo matemático representado como un proceso objetivo mecánico constituido con elementos como: masa, resorte y amortiguador, identificando las perturbaciones del sistema y mediante la aplicación de leyes fundamentales de la física se obtiene ecuaciones representadas en espacio de estados.

Para la resolución de las ecuaciones se emplea 'Python' el cual es un software libre de código abierto que presenta diferentes librerías de acceso libre con las que se puede realizar diferentes estudios.

La solución obtenida es producto de un proceso iterativo, en el cual los transitorios están siempre por debajo del gradiente de flujo durante el tiempo de operación del sistema, cabe mencionar que los resultados obtenidos fueron a partir de datos reales de una instalación hidroeléctrica determinada, aunque el modelo permite controlar los parámetros, coeficientes y variables haciendo reproducible, repetible y totalmente aplicable para diferentes casos.

PALABRAS CLAVE: golpe de ariete, transitorios de presión, sistemas hidromecánicos, espacio de estados, modelo, control, tiempos de respuesta.

ABSTRACT

Water hammer is a phenomenon that occurs in fluid dynamic distribution systems by pipe being impossible the total attenuation of its effect, so the studies carried out by different researchers around the world allow the development of models that help predict the behavior of pressure transients produced by sudden changes in flow velocity, to reduce wear and loss of system elements, while improving reliability during system operation by controlling parameters that influence the generation of critical transients.

With this background, the study of water hammer from the mechatronic approach as an alternative for the analysis and control of pressure transients in hydraulic systems is presented below.

First, a physical model is defined, where the hydromechanical system is constituted by an inlet pipe, a flow control valve and an exit pipe, with this we proceed to obtain a mathematical model represented as a mechanical objective process constituted with elements such as: mass, spring and damper, identifying the perturbations of the system and through the application of fundamental laws of physics equations represented in space of States.

For the resolution of the equations 'Python' is used, which is a free open-source software that presents different libraries of free access with which different studies can be carried out.

The solution obtained is the product of an iterative process, in which the transients are always below the flow gradient during the operating time of the system, it is worth mentioning that the results obtained were from real data of a given hydroelectric installation, although the model allows to control the parameters, coefficients and variables making reproducible, repeatable and fully applicable for different cases.

KEY WORDS: water hammer, pressure transients, hydromechanical systems, state space, model, control, response times.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En el presente trabajo de investigación se realizará el análisis y síntesis de la dinámica del golpe de ariete en sistemas de distribución por presión, entonces partiendo de un problema físico real, que para este caso se estudiará un sistema hidromecánico, a partir del cual se modela tomando en cuenta las variables, parámetros y condiciones de operación, de manera que represente el comportamiento dinámico del golpe de ariete en el sistema. A partir de este modelo se determina el efecto de las fuerzas que interactúan en el sistema para con ello a partir de leyes fundamentales conocidas, desarrollar una expresión matemática característica representada en espacio de estados, con esta y empleando medios computacionales se simulará y evaluará cuantitativamente el grado de incidencia de cada variable, además como estas influyen el desarrollo de los transitorios que pueden provocar la sobrepresión o depresión y causar daños en los elementos constitutivos del sistema.

Por lo general y basto de un sistema hidromecánico se delimitó este a un problema más particular como es el estudio del golpe de ariete producido por la apertura y cierre de una válvula, debido al fuerte impacto que producen las ondas de sobrepresión generadas por el cambio brusco de la aceleración del fluido durante la operación y maniobra del sistema, lo que provoca daños considerables en la tubería y en los elementos del sistema hidráulico, haciendo vital tener un conocimiento oportuno de este fenómeno para el control, manteniendo el sistema en condiciones seguras de operación (Kubrak, Kodura, Malesińska, & Urbanowicz, 2022). El sistema reducido cuenta con una sección inicial que corresponde a la entrada por donde el fluido ingresa, una válvula de control y una sección de salida por la cual el fluido es conducido fuera de este, el enfoque mecatrónico aplicado resulta de la sinergia de sistemas mecánicos, eléctricos, electrónicos e informáticos aplicados a un sistema físico real que permite predecir el comportamiento dinámico, además este en lugar de ofrecer una respuesta exacta permite además un conocimiento cualitativo al conocer la estabilidad, controlabilidad y la sensibilidad del sistema ante los cambios que se puedan presentar en los parámetros establecidos (Gordana, 2012). Finalmente se validará el modelo mediante comparación con trabajos previos los cuales emplean métodos conocidos tradicionalmente como: la teoría de Allievi, aplicados en cálculos ingenieriles y de diseño aceptados por organizaciones internacionales (AWWA, ASME, API), a fin de ofrecer una información con gran valor agregado (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2019).

1.1 Objetivo general

Modelar y simular, con enfoque mecatrónico, el comportamiento dinámico del golpe de ariete, en sistemas hidromecánicos, para limitar los efectos no deseados del transiente de sobrepresión.

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar una revisión del estado del arte para determinar los aspectos más importantes para la caracterización del problema a tratarse.
2. Conceptuar el fenómeno del golpe de ariete con variables de estado, considerando el sistema hidromecánico como una planta, con diferentes entradas y salidas.
3. Proponer el modelo matemático del golpe de ariete como una representación matricial en espacio de estados para obtener las ecuaciones diferenciales que caracterizan este fenómeno.
4. Simular computacionalmente el comportamiento dinámico del golpe de ariete mediante la simplificación y regulación de las variables de estado para lograr convergencia de los resultados.
5. Comparar los resultados de la simulación computacional con métodos o estudios realizados previamente con los cuales se pueda validar los resultados encontrados.

1.3 Alcance

En la ejecución del Trabajo de Integración Curricular se realizarán las siguientes actividades en cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados anteriormente:

Objetivo específico 1 (OE1): Realizar una revisión del estado del arte para determinar los aspectos más importantes para la caracterización del problema a tratarse.

- ✓ Actividad (A1.1): Recopilación de la información disponible.
- ✓ Actividad (A1.2): Análisis y sistematización de la información encontrada.
- ✓ Actividad (A1.3): Elaboración de la memoria técnica con la información sistematizada.

Objetivo específico 2 (OE2): Conceptuar el fenómeno del golpe de ariete con variables de estado, considerando el sistema hidromecánico como una planta, con diferentes entradas y salidas.

- ✓ Actividad (A2.1): Aproximar el sistema hidromecánico a un modelo simple que indique el proceso objetivo de una planta.
- ✓ Actividad (A2.2): Identificar las variables de entrada y salida del sistema, como también los parámetros específicos que describan el fenómeno de golpe de ariete.
- ✓ Actividad (A2.3): Elaborar la memoria técnica con la información establecida en la actividad 2.1 y 2.2.

Objetivo específico 3 (OE3): Proponer el modelo matemático del golpe de ariete como una representación matricial en espacio de estados para obtener las ecuaciones diferenciales que caracterizan este fenómeno.

- ✓ Actividad (A3.1): Establecer las ecuaciones necesarias para reproducir el comportamiento dinámico de un sistema Hidromecánico.
- ✓ Actividad (A3.2): Desarrollar el modelo mecatrónico paramétrico.
- ✓ Actividad (A3.3): Establecer el sistema matricial con todas las variables en espacios de estado.
- ✓ Actividad (A3.4): Elaborar la memoria técnica con información del modelo matemático definido.

Objetivo específico 4 (OE4): Simular computacionalmente el comportamiento dinámico del golpe de ariete mediante la simplificación y regulación de las variables de estado para lograr convergencia de los resultados.

- ✓ Actividad (A4.1): Establecer las condiciones necesarias para la solución del modelo matemático desarrollado.
- ✓ Actividad (A4.2): Empleo del software de simulación para resolver el modelo matemático.
- ✓ Actividad (A4.3): Análisis de la respuesta de la simulación
- ✓ Actividad (A4.4): Procesar la información en la memoria técnica.

Objetivo específico 5 (OE5): Comparar los resultados de la simulación computacional con métodos o estudios realizados previamente con los cuales se pueda validar los resultados encontrados.

- ✓ Actividad (A5.1): Obtener la solución por métodos tradicionales validados.

- ✓ Actividad (A5.2): Comparar los resultados de las soluciones numérica y por otros métodos, mediante gráficas y esquemas para validar los resultados obtenidos.
- ✓ Actividad (A5.3): Procesar los resultados en la memoria técnica del proyecto.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Golpe de ariete

El estudio de los transitorios que se producen en los sistemas de distribución por tuberías no es nada nuevo puesto que, muchos investigadores, ingenieros, técnicos, etc., buscan continuamente la manera de reducir el efecto de estos, ya que resulta inevitable su existencia en los sistemas de distribución por presión (Provenzano, Baroni, & Aguerre, 2011).

De manera específica se dice que hay golpe de ariete cuando estos transitorios se producen a elevada velocidad que provoca cambios críticos en la velocidad del fluido y por ende de presión, generando daños en el sistema, ya sean estos en: válvulas, bombas y turbinas principalmente. (Pérez, Guitelman, & Perez , 2002)

Como se observa en la figura 1.1 un típico caso de un sistema de distribución por tubería, que tiene un diámetro D , una longitud L y un medio de control que es la válvula, en primera instancia se presenta un estado donde la válvula se encuentra cerrada en un tiempo inicial t_0 en el cual el fluido permanece en reposo, en el estado siguiente se abre la válvula y se permite el paso del fluido, el cual aumenta su energía cinética en un $t_0 + \Delta t$, en el estado tres repentinamente se cierra la válvula provocando que el fluido que se encuentra en movimiento se detenga, esta acción provoca que el fluido que se encuentra más próximo a la válvula aumente su energía potencial y este será empujado por el que le sigue provocando una compresión del fluido que llega con su predecesor, dicha compresión se disipará por la acción de la fuerza de fricción que ejercen las paredes de la tubería sobre el líquido anulando la velocidad del fluido, este transitorio que se produce alcanza el grado de golpe de ariete cuando estas fluctuaciones alcanzan valores críticos de sobrepresión por encima o debajo del valor nominal de presión establecido para la operación del sistema de distribución (Budea, 2019).

Las ondas de presión producidas en el interior de la tubería de distribución son conducidas por una velocidad llamada celeridad cuya influencia radica principalmente en las características de la conducción, el coeficiente de elasticidad del fluido, el coeficiente elasticidad del material de la tubería, además de parámetros geométricos como el diámetro y espesor de las paredes internas, más sin embargo, determinar el tiempo de parada hace

más complicado el análisis de este fenómeno, algunos investigadores como Allievi realizaron estudios en sistemas de cierre gradual y la teoría Micheaud empleada, en cambio para sistemas con cierre lento, realizaron experimentos con los que lograron determinar relaciones empíricas de la velocidad de propagación de las fluctuaciones de presión, estas relaciones se emplearán más adelante para crear el modelo matemático que represente a este fenómeno, en este punto cabe señalar que no se debe considerar como influyente el aporte del tiempo de maniobra, la velocidad y la presión del fluido en la zona o región de estudio (Carnicer Royo & Mainar Hasta, 2001).



Figura 1.1. Representación gráfica del golpe de ariete en un sistema de distribución.

Fuente: (Ingeniería de Fluidos , 2022)

1.4.2 Casos en los que se puede producir el fenómeno

Como se observó en la figura 1.1., además de este, existen otro tipo de causas que desencadenan la aparición de transitorios en menor o mayor grado, causantes de daños en las líneas de transmisión:

- ✓ Al arrancar o encender una bomba
- ✓ Apertura y cierre de válvulas
- ✓ Mala operación del sistema
- ✓ Llenado y vaciado de tuberías
- ✓ Cambios de nivel en tanques
- ✓ Cambios bruscos de nivel

1.4.3 Características y tipos de flujo transitorio

Este tipo de flujo es inestable, provoca cambios hidráulicos en el sistema en cualquier instante, es decir, que se tiene condiciones en las cuales el fluido presenta estados de flujo permanente en un corto tiempo, cambiando súbitamente de forma infinita durante la operación del sistema. En observaciones y estudios realizados sobre el flujo transitorio se ha caracterizado dos tipos que son: transitorios leves o suaves y transitorios bruscos.

1.4.3.1 Transitorios leves

Estos se encuentran principalmente en sistemas de distribución con caudales pequeños donde los cambios en los elementos como: válvulas, maquinas hidromecánicas y demás dispositivos son lentos, en la figura 1.2. (b), se observa una representación de este transitorio, por lo general se consideran sistemas incompresibles de conducción rígida con número de Reynolds pequeños acercándose al flujo laminar, donde se evidencia además la existencia del fenómeno conocido como oscilación de masa, lo que hace que su tratamiento sea más fácil teniendo que resolver ecuaciones diferenciales ordinarias y los efectos que estos producen son mínimos (Provenzano, Baroni, & Aguerre, 2011).



Figura 1.2. Representación de los tipos de transitorios en líneas de distribución.

Fuente: (Méndez, 1995)

1.4.3.2 Transitorios fuertes

Este tipo de transitorio es como el que se puede apreciar en la figura 1.2. (c), se denomina también como golpe de ariete y es el que causa grandes inconvenientes en los sistemas de distribución debido principalmente a los cambios repentinos o bruscos que se puedan originar durante la operación, como por ejemplo: se puede tener este transitorio cuando existe una parada repentina de una bomba en la cual el fluido que inicialmente está cargado con energía cinética la disipa ocasionando graves daños a estos dispositivos y se debe

considerar el efecto de elasticidad tanto del fluido como del material, por ende, las ecuaciones que se obtienen para este tipo son más complejas y su resolución requiere aplicar métodos numéricos y simulación, además se aplican suposiciones a ciertos parámetros y añadiendo a esto los recursos tecnológicos que se necesitan para su análisis hace que aumenten las limitantes para su estudio y tratamiento (MAQUINAS HIDRAULICAS, 2022).

1.4.4 Inconvenientes del flujo transitorio

En la conducción de fluidos por tubería a presión se presenta transitorios los cuales producen fluctuaciones de presión por encima o debajo de las condiciones normales de operación, lo que provoca problemas como:

1.4.4.1 Sobrepresiones

Esto se produce cuando las fluctuaciones producidas en el interior de la tubería superan a la presión de trabajo establecida en el diseño, cuyas afectaciones pueden producir alteraciones en las sollicitaciones mecánicas del material, dando como resultado deformaciones en la tubería o perjuicios más graves como pérdida de válvulas y conexiones (Ríos Cando, 2016).

1.4.4.2 Depresiones

Estas se producen cuando las presiones alcanzan valores por debajo de la presión de trabajo en consecuencia, si estas presentan valores menores que la presión atmosférica local pueden producir problemas como los que se explican a continuación:

- Pandeo: se produce cuando la presión del exterior (atmosférica) es mayor que la del interior de la tubería, entonces provocará la deformación del material producido por las fuerzas de compresión generadas.
- Separación de la columna líquida: esto se produce como efecto de la variación de presiones, puesto que en el interior de la tubería se produciría la vaporización del agua generando cavidades, las cuales pueden reducir su volumen en un tiempo mínimo dando como resultado el choque violento del agua desprendida con las paredes de la tubería (Ríos Cando, 2016).

1.4.4.3 Altas velocidades en máquinas rotativas

Debido a condiciones ajenas o atípicas no esperadas en las operaciones de los sistema de transporte por presión, se puede generar paros súbitos de las maquinas como: turbinas y bombas principalmente, esto puede acelerar el proceso de desgaste, ya que, al

interrumpirse el suministro de energía la inercia del fluido y la masa de este pueden llegar a provocar sobreesfuerzos en el rodete y demás componentes de las maquinas rotativas (Ríos Cando, 2016).

1.4.5 Modelos tradicionales de transitorios

Para la mayoría de los cálculos en ingeniería, como para el diseño de sistemas hidráulicos se emplean ecuaciones empíricas basados en expresiones desarrolladas por Allievi, Michaud y Joukowski, que son aceptadas internacionalmente por organizaciones como: ASME, AWA y API, mismas que permiten conocer el comportamiento de los transitorios de presión, pero estas también presentan limitantes y es que estas incluyen coeficientes que no son aplicables para todos los casos, afectando de cierta manera el resultado obtenido (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2019). A continuación, se presenta algunos modelos:

1.4.5.1 Modelo de Saint Venant

Este modelo permite predecir el comportamiento de los transitorios de presión en los sistemas de distribución por tubería (Pérez, Guitelman, & Perez, 2002):

$$\frac{\delta}{\delta\lambda} \left(Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\delta U}{\delta t} - f \frac{U |U|}{2gD}$$

Ecuación 1.1. Primera ecuación de SAINT VENANT

$$\rho \frac{\delta U}{\delta \lambda} + \frac{1}{c^2} \left(U \frac{\delta p}{\delta \lambda} + \frac{\delta p}{\delta t} \right) = 0$$

Ecuación 1.2. Segunda ecuación de SAINT VENANT

Donde:

- Z : altura desde el plano de referencia al eje de conducción
- $\frac{p}{\gamma}$: corresponde a la altura de presión en cada sección
- U : corresponde a la velocidad media de cada sección en un instante de tiempo dado
- g : es la aceleración de la gravedad
- $-f \frac{U |U|}{2gD}$: representa la pérdida de energía hidráulica
- t : corresponde al tiempo
- λ : corresponde a la trayectoria a lo largo de la tubería

- c : representa la aceleración de la onda que está definida como:

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

Ecuación 1.3. Celeridad de la onda de presión.

Donde:

- ε : representa a la compresibilidad del fluido
- ρ : masa específica del fluido
- D : corresponde al diámetro interno de la tubería
- E : representa al módulo de elasticidad del material de la tubería
- e : grosor de la tubería

1.4.5.2 Teoría de Allievi

Esta teoría según (Pérez, Guitelman, & Perez , 2002), tiene un enfoque más ingenieril y parte de las ecuaciones de Saint Venant, de las cuales se desprecia el efecto de las pérdidas de energía ya que, considera mínimas en comparación con a los cambios de presión y la segunda consideración que evalúa las condiciones críticas de velocidad, es decir, los cambios críticos de esta, debido a que estas son las causantes de las sobrepresiones que afectan en gran medida a la tubería, así pues, con estas consideraciones las expresiones de Saint Venant se simplifican y quedan de la siguiente manera:

$$\frac{\delta}{\delta \lambda} \left(Z + \frac{p}{\gamma} \right) = - \frac{1}{g} \frac{\delta U}{\delta t}$$

Ecuación 1.4. Primera ecuación de SAINT VENANT aplicando teoría de Allievi.

$$P \frac{\delta U}{\delta \lambda} + \frac{1}{c^2} \left(\frac{\delta p}{\delta t} \right) = 0$$

Ecuación 1.5. Segunda ecuación de SAINT VENANT aplicando teoría de Allievi.

1.4.5.3 Modelo de fricción transiente

Este modelo parte de la combinación sinérgica de la ecuación de Continuidad y de la ecuación de Cantidad de Movimiento, donde además se añade el termino de fricción tanto

es estado estacionario como también del estado transitorio bajo la influencia de la aceleración instantánea de los estados previos del fluido (Provenzano, Baroni, & Aguerre, 2011). Así esta ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$g \frac{dZ}{dx} + U \frac{dU}{dx} + \frac{dU}{dt} + f_q + \frac{k * D * A}{U * |U|} \left(\frac{dU}{dt} + c * \text{sign}(U) * \left| \frac{dU}{dt} \right| \right) = 0$$

Ecuación 1.6. Modelo de fricción transiente de Golpe de Ariete.

Donde:

- f_q : coeficiente de fricción en el estado estacionario
- f_u : coeficiente de fricción en el estado transitorio (corresponde a toda la expresión después de f_q)

1.4.6 Sistemas Hidromecánicos

Estos sistemas se enfocan principalmente en la relación del flujo con las máquinas hidráulicas, como: bombas, turbinas, válvulas, etc., principalmente para determinar el rendimiento de estos elementos (Lobontiu, 2018). En estos sistemas la presión desempeña un papel muy importante, ya que, debido a esta es que se logra el transporte y operación de las líneas de transmisión, las cuales están diseñadas cumpliendo la ley de Pascal que menciona que en un recipiente de cualquier forma, tamaño o material que contiene un fluido incompresible, la fuerza ejercida por unidad de área (presión) se distribuye homogéneamente en todo el fluido y todas direcciones (MAQUINAS HIDRAULICAS, 2022).

Los sistemas de distribución por tuberías como: las redes de distribución de agua potable en las ciudades, estaciones de bombeo como el OCP (Oleoducto de Crudos Pesados), sistemas de producción de energía hidráulica, en la extracción de crudo, sistemas de calefacción, intercambiadores de calor, entre otras, pueden incluir numerosas conexiones tanto en serie como en paralelo de tuberías de diferente diámetro y espesor, incluyendo también otros elementos importantes como maquinaria hidráulica (Bombas, Turbinas), tanques de almacenamiento, elementos de control como: válvulas y dispositivos de monitoreo e inspección como: medidores de caudal, manómetros, entre otros (Méndez, 1995). En la figura 1.6., se observa un ejemplo típico de un sistema hidromecánico de extracción de crudo, el cual presenta líneas de succión, válvulas, bombas, tanques de almacenamiento y demás elementos, en estos sistemas tan complejos resulta importante el control principalmente de la presión, ya que, esta es causante de gran parte de los inconvenientes que se presentan en las líneas de distribución (Cengel & Cimbala, 2006).

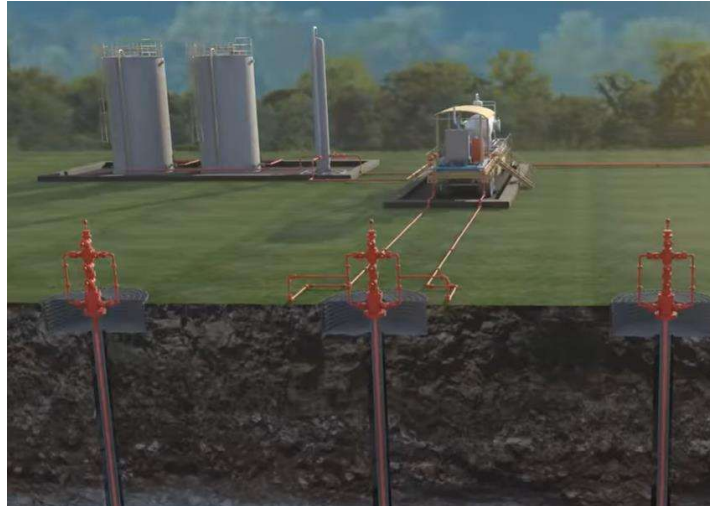


Figura 1.3. Sistema de Bombeo Hidráulico de un pozo petrolero.

Fuente: (Sertecpet, 2017).

1.4.6.1 Tuberías

En los sistemas de conducción de fluidos se puede distinguir dos tipos de ductos los circulares y los rectangulares los cuales presentan características propias para determinadas aplicaciones, así, es muy común emplearse tubería circular en los sistemas de transporte donde el fluido es un líquido, debido principalmente a la presión que deben soportar por la acción de bombas y las condiciones de presión propias durante la operación, por otro lado, los ductos rectangulares son muy empleados en sistemas de calefacción y aire acondicionado, es decir, en los que el fluido principal es un gas (Kubrak, y otros, 2021). En aplicaciones reales estos elementos por lo general ya están normalizados y los fabricantes proporcionan la información detallada en forma de tablas donde se presentan, los diámetros externo e interno, grosor y demás especificaciones mecánicas. A continuación, se presenta algunos ejemplos de tuberías usadas comúnmente en la industria:

Tuberías de Acero

Estos elementos se usan principalmente en aplicaciones industriales de procesamiento, transporte y almacenamiento de fluidos, en la figura 1.7., se observa un ejemplo de cómo se puede encontrar la información de este tipo de elementos, se diferencia ante todo el diámetro externo y el grosor.



Figura 1.4. Especificaciones técnicas comerciales de los tubos de acero.

Fuente: (FR, 2022).

Tuberías de cobre

Este tipo de tubos se emplean generalmente en aplicaciones domésticas y sistemas de calefacción y ventilación, este material destaca por poseer gran conductividad y alta resistencia, no pierde sus propiedades en el tiempo, se distinguen dos tipos K y L que se diferencian principalmente por el grosor en la figura 1.8., se observa un ejemplo de este tipo de tubos.



Figura 1.5. Tubos de cobre empleado en aplicaciones domésticas.

Fuente: (Cobre y Bronce , 2022)

Tubería de PVC (Cloruro de Polivinilo)

Este material es muy empleado en la industria de la construcción por sus excelentes propiedades, como: resistencia ante agentes químicos, de fácil transporte, moldeable, de muy bajo costo, resistente a la corrosión y por sobre todo por su larga vida útil (Méndez, 1995). En la figura 1.9., se presenta algunos tipos de elementos que se pueden fabricar con este material.



Figura 1.6. Tubería y Conexión CPVC SCHD 40 y 80 Hidráulico.

Fuente: (JESMAR, 2022).

1.4.6.2 Equipos Hidráulicos

En los sistemas hidráulicos los principales equipos que se emplean son las bombas ya que, estas aseguran que el fluido se transporte por las tuberías y además cumpla con las condiciones de presión óptimas de diseño, por otro lado, las turbinas que obtienen la energía del fluido para transformarla en otro tipo de energía y los ventiladores en los sistemas de calefacción y aire acondicionado, los cuales cumplen con una función similar a las bombas en los sistemas fluidodinámicos (Wuyi, Boran, & Xiaoyi, 2019).

Bombas

Estos elementos son los que más se utilizan en los sistemas hidráulicos, estos reciben energía externa como la eléctrica principalmente o de combustibles fósiles, energías que permiten el trabajo de un motor, el cual transmite el torque mediante un eje hacia los alabes de las bombas y estas transfieren la energía al fluido (Carnicer Royo & Mainar Hasta, 2001). En el mercado actualmente se puede encontrar una gran variedad de bombas de diferente tipo como: axiales, centrifugas e hidráulicas, las cuales se seleccionan para las operaciones que se desea destinar, en la figura 1.10., se presenta algunos tipos de bombas más usadas en la industria.



Figura 1.7. Tipos de bombas empleadas en la industria.

Fuente: (MAQUINAS HIDRAULICAS, 2022).

Turbinas

Estas máquinas se emplean para transformar la energía cinética de un fluido a otro tipo de energía como: la eléctrica, por medio del giro de las aspas, la energía cinética del líquido se transmite al movimiento de un eje, el cual produce energía mecánica que es transmitida a un generador que es el que transforma la energía mecánica en energía eléctrica (Kubrak, y otros, 2021). Actualmente se puede encontrar diferentes tipos de turbinas las más conocidas en la industria son: la Pelton, la Kaplan y la Francis en plantas hidroeléctricas y las turbinas de viento en plantas eólicas. Ver figura 1.11.

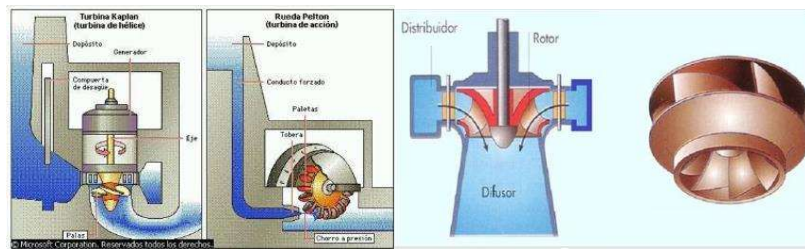


Figura 1.8. Tipos de turbinas empleadas en Hidroeléctricas.

Fuente: (Martinez, 2015).

1.4.6.3 Válvulas

Estos son dispositivos imprescindibles en todo sistema hidráulico por las múltiples tareas que realizan, las hay de diferentes tipos y se emplean para operaciones específicas de diseño en los sistemas de distribución por tubería, entre las principales tenemos: las válvulas reguladoras, de seguridad, antirretorno, de arranque o parada, por su diseño se las pueden catalogar como: válvulas de globo, de compuerta, de diafragma, reductoras, de mariposa, aguja, de retención, etc (Méndez, 1995). Independientemente de que tipo sean, todas cumplen con las funciones de regular, limitar, iniciar o detener el avance del fluido. Ver figura 1.12.

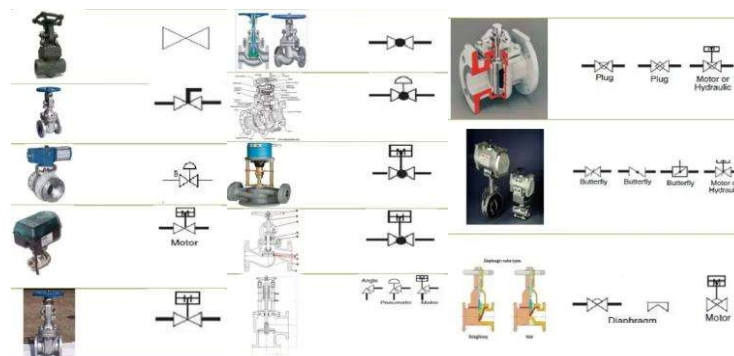


Figura 1.9. Tipos de válvulas con respectiva simbología.

Fuente: (Macias, 2015).

2 METODOLOGÍA

En esta sección se presenta las actividades realizadas para el análisis y síntesis de los transitorios producidos durante la operación de un sistema de transporte de fluidos, a partir de las condiciones de operación y maniobra de este sistema se determina las pautas necesarias a considerarse, además, de definir las variables o parámetros a evaluarse. En la documentación revisada previamente no se considera el enfoque mecatrónico como un método para el análisis de la dinámica de los transitorios de presión provocados por el golpe de ariete en sistemas de distribución de fluidos, no obstante, en este trabajo se presenta una alternativa con un gran potencial que es totalmente aplicable para este caso estudio (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019).

2.1 Enfoque mecatrónico

Este enfoque permite la participación de diferentes áreas de la física como también de áreas técnicas, pero estas no trabajan por separado, sino que juntas hacen sinergia para obtener un producto, diseño o servicio de alta calidad, mejorando tiempos y disminuyendo las pérdidas (Gordana, 2012). Las materias que forman parte de la mecatrónica son principalmente la mecánica, la informática y la electrónica, ciencias fundamentales aplicadas a sistemas físicos tales como: estáticos, dinámicos, termodinámicos, eléctricos, electrónicos, térmicos, hidráulicos, neumáticos, químicos y de otras disciplinas, las ventajas que presenta es que permite conocer el comportamiento de los parámetros como un todo más que la suma independiente de las partes y permite modificarlos para obtener un rango amplio de posibilidades, así como, evaluar la interdependencia de estas (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019). También permite acercarse a los límites de los sistemas y evaluar sus riesgos, pero también tiene desventajas entre las que tenemos, que un modelo muy simplificado puede no ser capaz de describir la interacción de un sistema, por otro lado, un modelo muy complejo requiere de mayor esfuerzo y consumo de recursos computacionales, además que un modelo puede no ser valido (Kubrak, Kodura, Malesi ´nska, & Urbanowicz, 2022). En la figura 2.1 se muestra los elementos clave del enfoque mecatrónico.

Donde los modelos desarrollados permiten manipular las variables para lograr un control mas preciso del sistema, para lo cual emplea recursos como la transformada de Laplace que permite obtener una relación entre las salidas y las entradas del sistema mediante la, función de transferencia, espacio de estados o diagramas de bloques (Gordana, 2012).

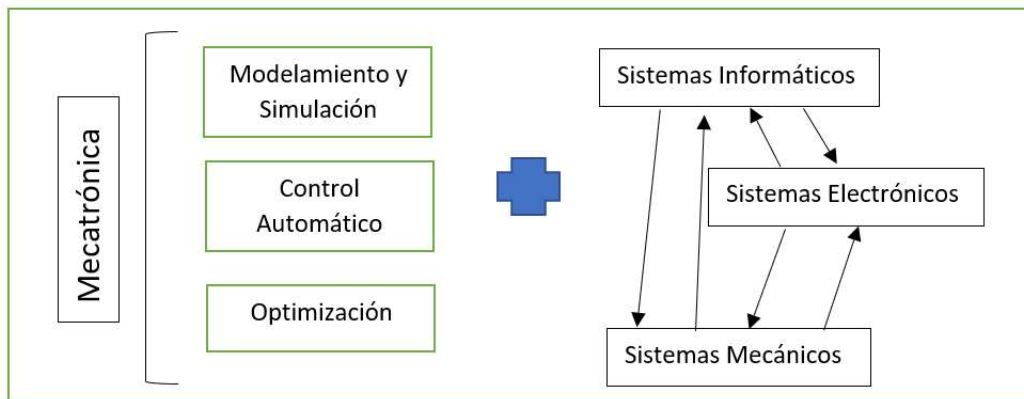


Figura 2.1. Elementos constitutivos del enfoque mecatrónico.

Fuente: Propia

2.2 Estructura del proceso

Una vez revisado el estado del arte, se realiza el diagrama de flujo del proceso a realizarse para la simulación del modelo matemático, como se observa en la figura 2.2 se empieza por definir el sistema físico a analizarse, para este caso el sistema hidromecánico se modela como una planta con diferentes entradas y salidas, al cual se le agrega las perturbaciones que pueden alterar el sistema, a partir de este se obtendrá un proceso mecánico objetivo, es decir, una representación con elementos: masa, resorte y amortiguador, del cual se derivaran las ecuaciones diferenciales características representadas en espacios de estado, así, con las matrices obtenidas se emplea un software para realizar la simulación dinámica, los datos de los coeficientes y constantes que se emplean en el modelo obtenido fueron recopiladas de una planta de producción de energía hidroeléctrica, así, las respuestas que se obtengan mediante este método permitirán conocer si el modelo obtenido permite el análisis del golpe de ariete, caso contrario, se debe revisar y cambiar lo que sea necesario hasta obtener resultados favorables, además, estas serán comparadas mediante métodos tradicionales empleados para el diseño y estimación del golpe de ariete, con el fin de dar validez al modelo desarrollado y finalmente se discutirá el alcance o limitaciones encontradas durante el proceso.

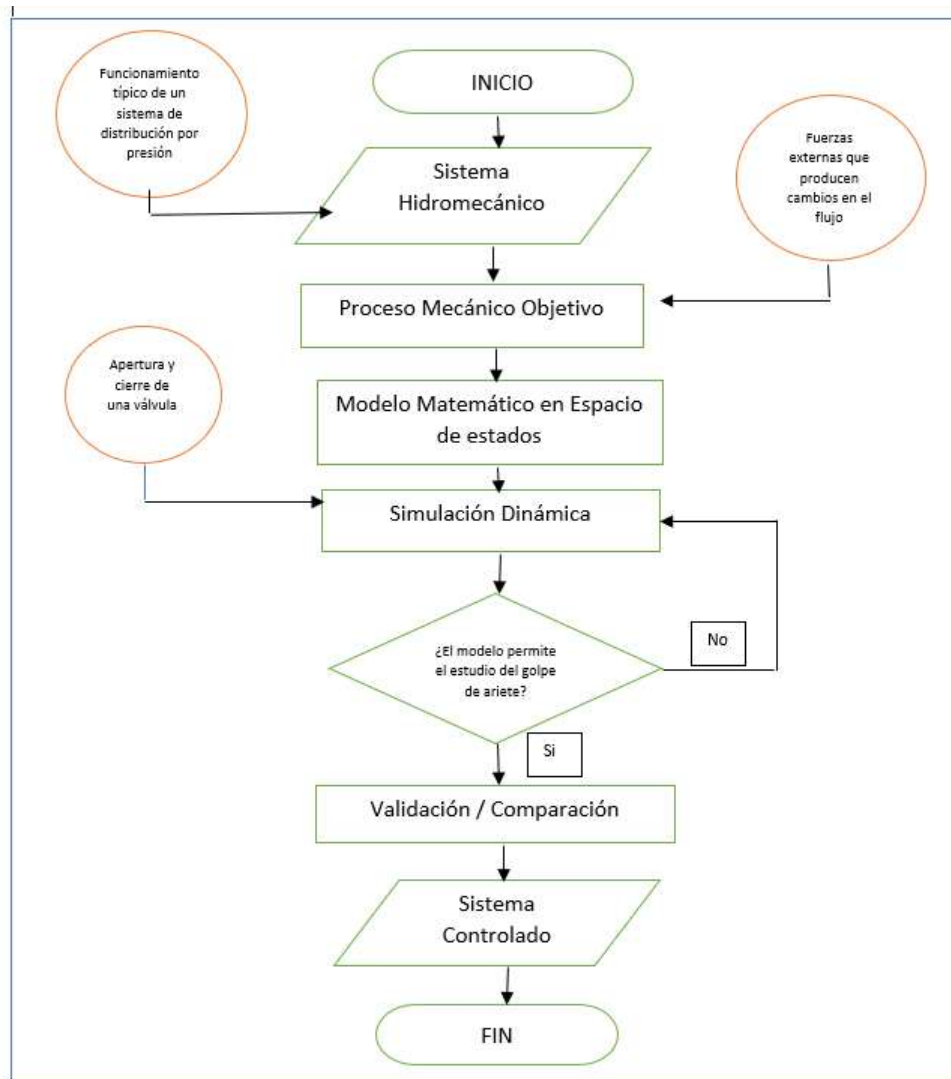


Figura 2.2. Diagrama de flujo con los pasos a realizarse para el análisis del golpe de ariete en un sistema Hidromecánico. Fuente: Propia

2.3 Modelo físico

Para esto se ha determinado que el sistema hidromecánico a emplearse consta de una tubería de entrada, una válvula de control de caudal y una tubería de salida. En la figura 2.3 se presenta el sistema físico real donde por acción de una válvula se altera el flujo normal del líquido, haciendo que este cambie violentamente su aceleración, generándose así, las ondas de presión aleatorias que viajan a gran velocidad por la tubería ocasionando daños a los elementos del sistema (Kubrak, y otros, 2021). Durante la operación de estos sistemas como lo menciona (Aguinaga, Cando, & Orquera, 2019), lo que se debe controlar principalmente es el tiempo de apertura y cierre de las válvulas, principales elementos que provocan inconvenientes como los expuestos en la sección 1.4.4., aunque se debe

mencionar que no es el único, ya que el factor de pérdida de la válvula también afecta en cierta proporción al incremento de los transitorios del golpe de ariete.

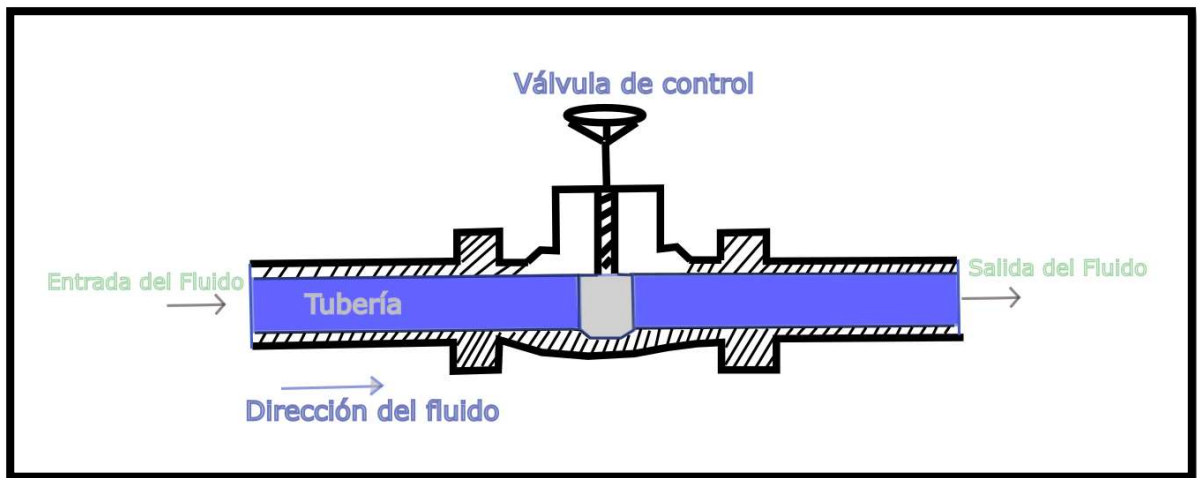


Figura 2.3. Sistema hidromecánico típico de distribución de líquidos por tubería.

Fuente: Propia.

Consideraciones que se tomarán para el modelado del sistema:

- El transporte del fluido es una sola dirección donde inicialmente, la presión y velocidad se mantienen invariantes en toda la sección.
- Se considera como elementos linealmente elásticos tanto al fluido como a las paredes de la tubería.
- Las propiedades del fluido son constantes y no cambian a lo largo de la tubería.
- Inicialmente el fluido se encuentra fluyendo en estado estacionario, hasta que es alterado por acción de la válvula de control.
- El transitorio del golpe de ariete es mayor comparado con los cambios de presión producido por la interacción del fluido con los elementos del sistema.
- El modelo debe considerar perturbaciones como: cambios en la temperatura del fluido y el efecto de la rugosidad interna de la tubería.
- Se considera mínima la existencia de gas en la tubería por lo que la propagación de los transitorios es constante.
- La presión de vapor del líquido es menor que la presión del sistema por lo que no se produce desprendimiento de la columna de líquido durante la operación.

2.4 Modelo matemático

Para desarrollar el modelo objetivo con el que se permita analizar la dinámica del golpe de ariete es importante conocer las entradas, salidas y perturbaciones del sistema, en la figura 2.4., se observa de manera general como es el comportamiento del sistema y lo que se espera obtener del modelo.

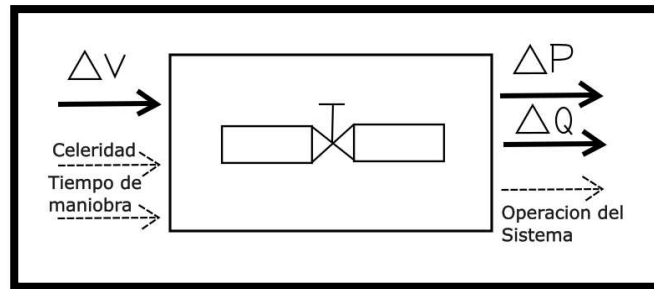


Figura 2.4. Diagrama caja negra con entradas, salidas y perturbaciones.

Fuete: Propia.

Así, a partir de la figura 2.3 se obtiene una representación del sistema como un proceso mecánico objetivo de control que contiene elementos como: masa, resorte y amortiguador, además de expresar las fuerzas que afectan al sistema, como se observa en la figura 2.5, para determinar estas fuerzas es necesario conocer los elementos que interactúan en este, así, de la tubería se determina que existe una fuerza elástica cuyo módulo de elasticidad dependerá de las características mecánicas del material, del fluido se determina que existe dos fuerzas, la una que corresponde a la fuerza elástica del fluido y la otra que hace referencia a la fuerza viscosa de amortiguamiento del fluido, también la fuerza que resulta importante incluir es la de cierre de la válvula, ya que, de esta se da inicio a los transitorios de presión.

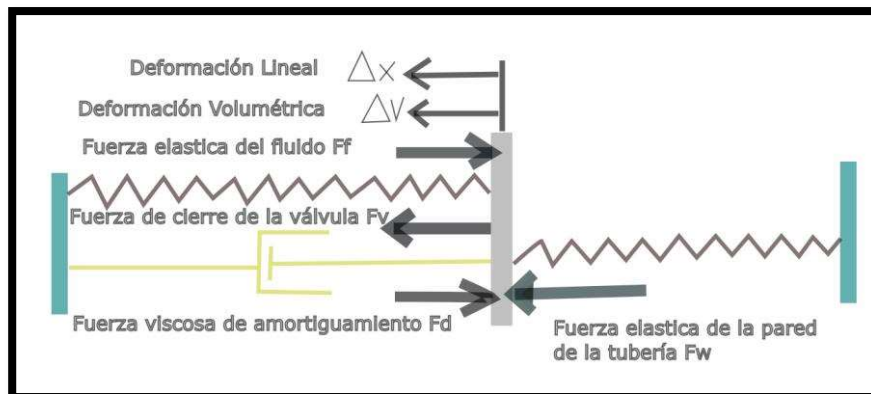


Figura 2.5. Representación de un sistema hidromecánico como un proceso objetivo mecánico. Fuente: Propia basado en (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019)

Como se mencionó en la sección 1.4.5, existen diferentes ecuaciones que permiten el análisis de la dinámica de los transitorios del golpe de ariete en los sistemas de distribución por tubería, los cuales emplean datos y coeficientes empíricos, siendo esto una limitante puesto que no abarcan todos los casos posibles, razón por la que resulta necesario del uso de otros elementos que permitan el control adecuado del sistema durante la operación (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019).

Del sistema objetivo mecánico determinado se obtiene las ecuaciones características, así aplicando la segunda ley de Newton que menciona que la interacción de fuerzas que actúan en un objeto o sistema producen un cambio en su movimiento, el cual puede ser perceptible y medible, entonces la ecuación sería:

$$\sum_{\text{Sistema}} F = m * \Delta \ddot{x}$$

Ecuación 2.1. Expresión general de la Segunda ley de Newton.

Donde:

- m : representa la masa del sistema [kg]
- $\Delta \ddot{x}$: corresponde al vector aceleración

Entonces, desarrollando la parte izquierda de la ecuación 2.1, tenemos:

$$-F_f - F_d + F_v + F_w = m * \Delta \ddot{x}$$

Ecuación 2.2. Desarrollo de la ecuación general de la segunda ley de Newton.

Donde:

- F_f : corresponde a la fuerza elástica del fluido [N]
- F_d : representa a la fuerza de amortiguamiento viscoso del fluido [N]
- F_v : corresponde a la fuerza de cierre de la válvula de control [N]
- F_w : corresponde a la fuerza de fricción de la pared de la tubería [N]
- m : representa la masa del fluido [kg]
- Δx : representa de deformación del fluido [m]

A continuación, se define el cálculo de cada fuerza expresada anteriormente en la ecuación 2.2., así, para la fuerza elástica debido a la deformación del fluido según (Aguinaga, Cando , & Orquera , 2019), se la determina de la siguiente manera en la ecuación 2.3.:

$$F_f = \frac{B}{L} * \Delta V$$

Ecuación 2.3. Fuerza elástica debido a la deformación del fluido.

Donde:

- B : representa el modulo de compresibilidad aparente del fluido [Pa]
- L : representa la longitud de la tubería [m]
- ΔV : representa la deformación volumétrica del fluido [m³]

La fuerza de amortiguamiento viscoso del fluido se determina de la siguiente manera en la ecuación 2.4.:

$$F_d = 40.74 * \frac{\mu * S * L}{d^4} * \Delta Q$$

Ecuación 2.4. Fuerza de amortiguamiento viscoso del fluido.

Donde:

- μ : representa la viscosidad dinámica del fluido [Pa*s]
- S : corresponde al área transversal del flujo en la tubería [m²]
- d : es el diámetro hidráulico de la tubería [m]
- ΔQ : variación del caudal en la tubería debido al cierre de la válvula [m³/s]

La fuerza debido al cierre de la válvula de la tubería se determina de la siguiente manera en la ecuación 2.5.:

$$F_v = \Delta P * S$$

Ecuación 2.5. Fuerza debido al cierre de la válvula de control.

Donde:

- ΔP : representa la variación de la onda de presión del golpe de ariete [Pa]

Para la fuerza elástica ocasionada por la pared de la tubería se determina de la siguiente manera en la ecuación 2.6.:

$$F_w = \frac{4 * E * e}{d * L} * \Delta V$$

Ecuación 2.6. Fuerza de elástica debido a la pared de la tubería.

Donde:

- E : corresponde al modulo de elasticidad del material de la tubería [Pa]
- e : es el grosor de la pared de la tubería [m]

Para determinar la expresión de la parte de derecha de la ecuación 2.2., se obtiene a partir del momento de inercia del fluido, como se observa en la ecuación 2.7.:

$$m * \Delta \ddot{x} = \rho * L * \Delta \dot{Q}$$

Ecuación 2.7. Expresión del momento de inercia del fluido.

Donde:

- ρ : es la densidad del fluido [kg/m³]

Entonces reemplazando las ecuaciones 2.3., 2.4., 2.5., 2.6 y 2.7., en la ecuación 2.2., obtenemos la expresión de la ecuación 2.8:

$$-\frac{B}{L} * \Delta V - 40.74 * \frac{\mu * S * L}{d^4} * \Delta Q + \Delta P * S + \frac{4 * E * e}{d * L} * \Delta V = \rho * L * \Delta \dot{Q}$$

Al desarrollar la expresión anterior para la tasa de la variación del caudal se obtiene:

$$\Delta \dot{Q} = -\frac{B}{\rho * L^2} * \Delta V - 40.74 * \frac{\mu * S}{\rho * d^4} * \Delta Q + \frac{S}{\rho * L} * \Delta P + \frac{4 * E * e}{\rho * d * L^2} * \Delta V$$

Ecuación 2.8. Primera ecuación diferencial ordinaria que modela el sistema hidromecánico.

A partir de la ecuación 2.3., derivando con respecto a la variación de la onda de presión se obtiene la expresión de la ecuación 2.9.:

$$\Delta \dot{P} = -\frac{B}{S * L} * \Delta Q$$

Ecuación 2.9. Segunda ecuación diferencial ordinaria del sistema hidromecánico.

Con las ecuaciones 2.8. y 2.9., se obtiene el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que permitirán el análisis de los transitorios del golpe de ariete causados por el cierre una válvula de control, a continuación, en la ecuación 2.10., se expresa las EDO's en notación matricial de espacio de estados para una mejor visualización de las entradas, salidas y perturbaciones del sistema hidromecánico:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{P} \\ \Delta \dot{Q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \end{bmatrix} * [\Delta V]$$

Ecuación 2.10. Modelo del sistema hidromecánico en espacio de estados.

Donde:

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= 0 & a_{12} &= -\frac{B}{S*L} & b_{11} &= 0 \\
 a_{21} &= \frac{S}{\rho*L} & a_{22} &= -40.74 * \frac{\mu*S}{\rho*d^4} & b_{21} &= -\frac{B}{\rho*L^2} + \frac{4*E*e}{\rho*d*L^2}
 \end{aligned}$$

Los valores de la matriz [A] representan los coeficientes de las entradas del sistema, los valores del vector [B] indican los coeficientes de las salidas del proceso objetivo. En la ecuación 2.11., se expresa el vector de salidas del sistema hidromecánico.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} \\ d_{21} \end{bmatrix} * [\Delta V]$$

Ecuación 2.11. Vector de salidas del sistema.

Donde:

$$\begin{aligned}
 c_{11} &= 1 & c_{12} &= 0 & d_{11} &= 0 \\
 c_{21} &= 0 & c_{22} &= 1 & d_{21} &= 0
 \end{aligned}$$

Los valores de [C] representan la matriz de escala, los valores de [D] corresponden a la matriz estéreo y y_1 / y_2 son las variables espejo.

2.5 Representación en diagramas de bloques

A fin de mostrar esquemáticamente la conexión de las variables para el control del sistema hidromecánico se presenta en la figura 2.6., el diagrama de bloques del espacio de estados del sistema donde se representa el conjunto más pequeño de variables con las cuales se determina el comportamiento de un sistema físico, es una forma de representar un sistema dinámico de 'n' ecuaciones diferenciales en partes que forman un todo. Así este esquema presenta la función de transferencia de cada subsistema, permite analizar y diseñar sistemas de control desde diferentes puntos de vista como la estabilidad, la respuesta transitoria y en estado estable, además permite el análisis de sensibilidad del sistema. (Lobontiu, 2018).

Las conexiones que aquí se presentan tienen una secuencia lógica, donde la entrada ΔV se conecta con el bloque B y este a un punto de suma, al cual se le adiciona el bloque A, del punto de suma salen las salidas de $\Delta \dot{P}$ y $\Delta \dot{Q}$, al realizar la integral se obtiene las salidas deseadas que conectan al bloque C y de este a otro punto de suma, del cual finalmente se obtiene las respuestas del sistema.

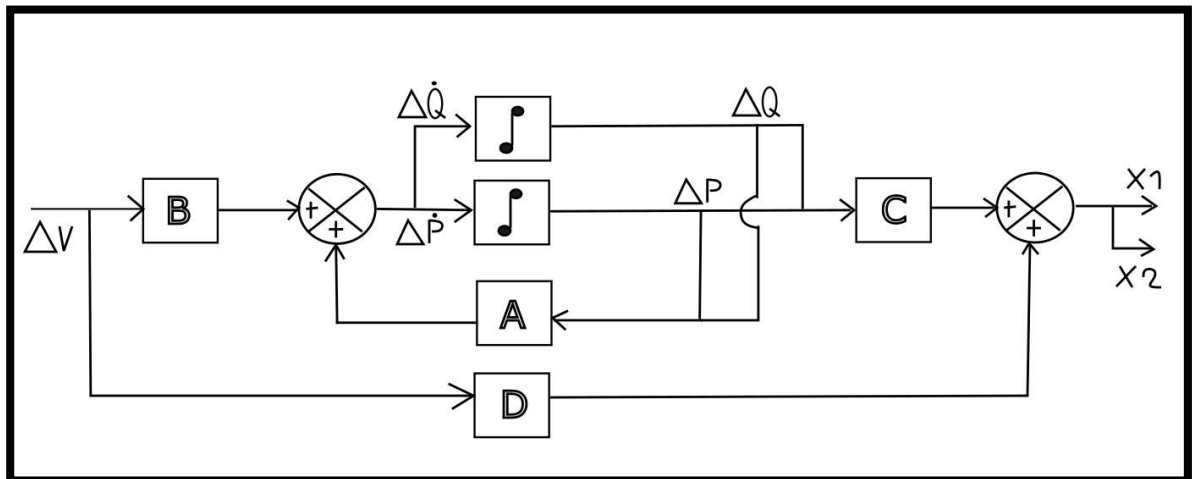


Figura 2.6. Representación del espacio de estados en diagramas de bloques.

Fuente: Propia.

2.6 Cálculos Hidráulicos

2.6.1 Tiempo de cierre de la válvula

En el sistema hidromecánico el elemento que inicia los transitorios de presión es la válvula, en la práctica lo que se busca es realizar el cierre en el menor tiempo posible, de manera que el tiempo que tarda la onda desde que se produce, es conducida y regresa, sea mayor al tiempo de maniobra de la válvula (Pérez, Guitelman, & Perez , 2002).

El tiempo de maniobra para fines prácticos se lo denota como tiempo crítico T_c y se lo calcula con la siguiente expresión:

$$T_c = \frac{2 * L}{c}$$

Ecuación 2.12. Tiempo de cierre crítico de la válvula.

Donde:

- L : representa la longitud de la tubería [m]
- c : corresponda a la celeridad del transiente de presión [m/s]

En la sección 1.4.5.1., en la segunda ecuación de SAINT VENANT se estableció el concepto de celeridad, que es la velocidad con la que se propaga la onda de presión en la línea de conducción y la cual se expresa en [m/s].

Para este tiempo crítico se tiene dos posibilidades, uno donde el cierre se realiza bruscamente y otro lentamente que influye de manera considerable en el desarrollo del transitorio de presión:

Cierre Brusco

Para este caso se debe cumplir que la ecuación 2.12., cumpla con la condición siguiente:

$$T_{CB} < \frac{2 * L}{c}$$

Como resultado de esto el valor de la presión resultante es máxima y se la calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta h_{max} = \frac{c * U}{g}$$

Ecuación 2.13. Presión máxima resultante debido a un cierre brusco de la válvula.

Donde:

- U : representa la velocidad media del fluido [m/s]
- g : es la aceleración de la gravedad [m/s²]

Cierre Lento

Se dice que el cierre es lento cuando el tiempo de cierre T_{CL} es mayor que el tiempo crítico, entonces se debe cumplir lo siguiente en la ecuación 2.12:

$$T_{CL} > \frac{2 * L}{c}$$

Donde como resultado se tiene que la presión producida no llega a alcanzar un punto máximo y esta se la obtiene de la siguiente expresión basada en MICHAUD:

$$\Delta h = \frac{2 * L * U}{g * T_{CL}}$$

Ecuación 2.14. Presión producida por el cierre lento de la válvula.

2.6.2 Sobrepresión transitoria crítica

Para determinar esta presión se parte de la teoría de Allievi para transitorios de golpe de ariete, la cual está expresada en la sección 1.4.5.2., donde la expresión es una función de la densidad del fluido, la celeridad de la onda y de la velocidad media del fluido y se la obtiene de la siguiente ecuación:

$$\Delta h_{critica} = \rho * c * U$$

Ecuación 2.15. Sobrepresión crítica producida en el sistema hidromecánico.

2.6.3 Tiempo de funcionamiento

Partiendo de la teoría de MICHAUD se determina el tiempo de funcionamiento durante el cual se producen los transitorios de presión que causan graves daños en los elementos del sistema hidromecánico, dicho tiempo esta representado en función de la longitud de la tubería, la velocidad media del fluido, de la aceleración de la gravedad y una variable importante que es la carga piezométrica, de la siguiente manera:

$$T_F = \frac{2 * L * U}{0.4 * g * \Delta Z}$$

Ecuación 2.16. Tiempo de funcionamiento del sistema hidromecánico.

Donde:

- ΔZ : representa la carga piezométrica [m]

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Coeficientes y constantes empleados en el modelo matemático

En la tabla 3.1 se muestra los datos numéricos de coeficientes y constantes empleadas en el desarrollo del modelo matemático, las cuales para fines prácticos fueron obtenidos de una planta de producción de energía Hidroeléctrica, localizada en Ecuador.

Tabla 3.1. Valores de los coeficientes y constantes empleados en el modelo matemático.

Cantidad	Valor
Longitud de la tubería (L)	100 [m]
Espesor de la pared de la tubería (e)	0.007 [m]
Diámetro hidráulico de la tubería (d)	0.5 [m]

Módulo de Young (elasticidad) del material de la tubería (E)	20.10x10 ¹⁰ (Para el acero) [Pa]
Viscosidad dinámica del fluido (μ) (agua)	0.001 [Pa*s]
Densidad del agua (ρ)	1000 [kg/m ³]
Módulo de compresibilidad del agua (B)	2.2x10 ⁹ [Pa]
Flujo nominal (Qo)	0.6 [m ³ /s]
Presión hidráulica nominal (Po)	1.5x10 ⁶ [Pa]

Fuente: Propia.

3.2 Respuesta temporal de lazo-abierto

En la figura 3.1., se observa la respuesta temporal de lazo-abierto del modelo matemático obtenido en la sección 2.4., donde se presenta dos gráficas, la curva tipo rampa en color naranja representa el gradiente de flujo ' ΔQ ' vs. el tiempo de operación de la válvula, la cual indica el valor máximo que se admite para la operación controlada del sistema hidromecánico estableciéndose así, un límite donde el transitorio de presión representado en la figura por la curva oscilatoria continua, estará siempre por debajo de la rampa.

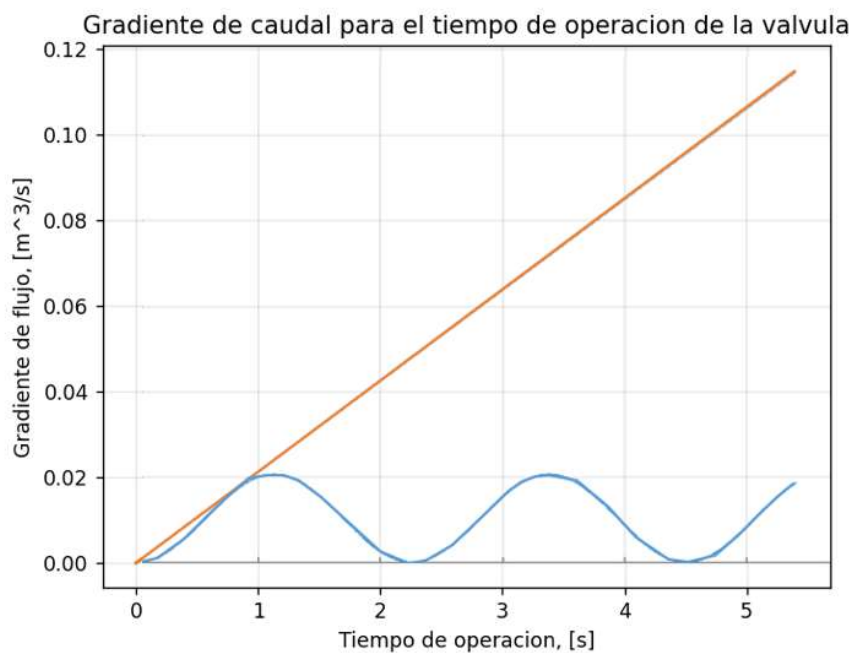


Figura 3.1. Respuesta temporal de lazo-abierto para el gradiente de flujo durante el tiempo de operación de válvula. Fuente: Propia.

3.2.1 Resultados de la simulación numérica

En la tabla 3.2., se presenta los resultados obtenidos de la simulación en lazo abierto, bajo los parámetros de la instalación hidroeléctrica de la cual se tomaron los datos.

Tabla 3.2.Resultados de la simulación en lazo abierto.

Cantidad	Resultado
Deformación volumétrica del fluido (ΔV)	-6.2845×10^{-4} [m ³]
Celeridad (c)	1265.2 [m ³ /s]
Transiente de presión crítica (ΔP_c)	1.6287×10^6 [Pa]
Presión permisible del golpe de ariete (ΔP)	0.625×10^6 [Pa]
Celeridad crítica (cc)	9.8235×10^2 [m/s]

Fuente: Propia

De los valores registrados se destaca que la celeridad crítica, razón por lo que el transiente de presión crítico se ve afectado, siendo este el causante de los transitorios más agresivos que causan daños a los elementos de la instalación hidráulica.

3.3 Respuesta temporal de lazo cerrado

Para realizar la simulación de este caso fue necesario utilizar un controlador proporcional integral derivado (PID), ya que resulta necesario realizar una retroalimentación hidráulica desde el punto de generación del transitorio, pero al realizar este paso y dado que la sobrepresión crece súbitamente debido a que el control es de tipo paso, la entrada de este es muy rápida, aunque permite contener a los transitorios críticos su aplicación en sistemas reales sería poco práctica por el hecho de que en el mercado existe válvulas de control que trabajan automáticamente siendo capaces de detectar la sobrepresión antes de que se produzca, aliviando así al sistema.

Por lo tanto, la respuesta de lazo-cerrado no sería aplicable para el modelo aquí planteado, mas bien, para este caso se debe usar la respuesta de lazo-abierto precautelando cumplir que el transitorio de presión no sobrepase la rampa que representa el gradiente de flujo, para que el sistema mantenga una operación segura y se reduzca los efectos nocivos del golpe de ariete.

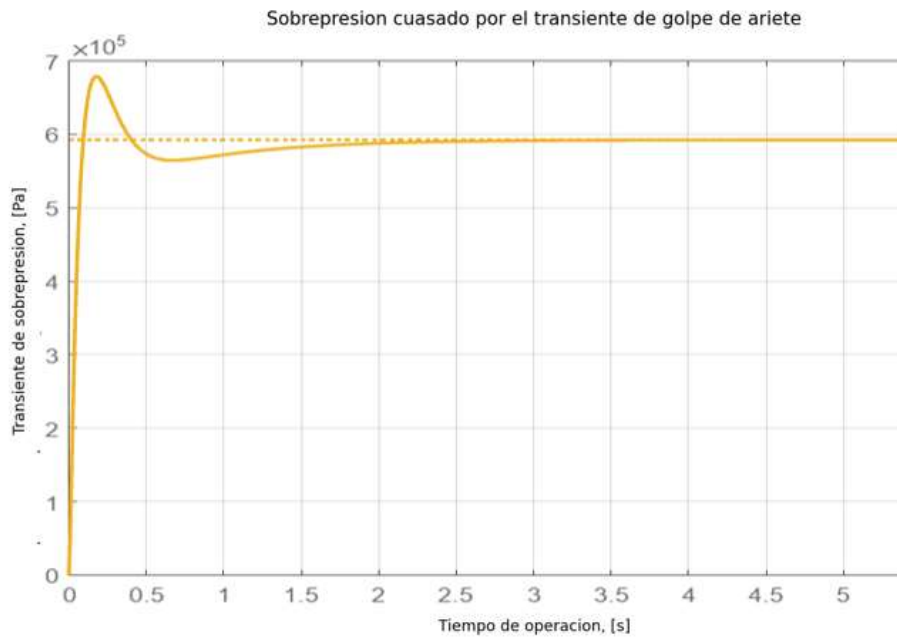


Figura 3.2. Respuesta de lazo cerrado del transiente de golpe de ariete.

Fuente: Propia.

3.4 Conclusiones

Se logró obtener un modelo matemático a partir de un problema físico, el cual se lo representó en espacio de estados y abarca las variables y datos numéricos tanto de la tubería (diámetro hidráulico, espesor de la pared, longitud, modulo de elasticidad, entre otras) como del fluido (viscosidad dinámica, densidad, compresibilidad, etc.), con los resultados obtenidos de la simulación se evidencia que este modelo no solo permite el análisis de la dinámica del golpe de ariete mediante un enfoque mecatrónico de un sistema hidromecánico representado como un proceso mecánico objetivo, sino que además permite establecer un protocolo de control de los coeficientes y constantes tanto del fluido como de la tubería los cuales influyen en la propagación de los transitorios de sobrepresión que causan daños en los elementos del sistema, en tanto se cumpla, que el transiente de presión no exceda los límites del gradiente de flujo.

El modelo está integrado holísticamente por cada variable, lo que lo hace confiable, seguro, totalmente aplicable para diferentes casos, es decir, que es repetible y reproducible también, el modelo al tener el tiempo como variable independiente permite obtener un completo estudio de la respuesta temporal del sistema a diferencia de sus homólogos convencionales, cuyas expresiones algebraicas permiten conocer un valor discreto de presión crítica, tiempo de cierre y de velocidad del fluido, a mas de no incluir el efecto de la deformación volumétrica del fluido en la generación de las ondas de sobrepresión.

La simulación realizada permite conocer los valores del gradiente de caudal máximos con los que se puede operar de manera segura el sistema de transporte de fluidos por tubería haciendo que la confiabilidad del sistema sea mayor y los riesgos sean mínimos para la infraestructura.

3.5 Recomendaciones

Se podría mejorar la robustez del modelo matemático incluyendo los cambios de presión que se producen por la interacción de los elementos del sistema con el fluido, además se podría incluir una variable que permita controlar el nivel de gas dentro de la tubería ya que el modelo desarrollado en este trabajo no incluye este efecto por lo que la propagación de los transitorios es permanente.

El modelo asume también que la presión de vapor de líquido es menor que la presión del sistema, en tal caso los transitorios se producen continuamente, pero para condiciones en las que se produzca el efecto de desprendimiento de la columna de líquido o que la presión de vapor alcance valores críticos y su efecto no se desprece y su influencia podría afectar al fenómeno de golpe de ariete, lo cual no se contempla en este estudio.

Se podría validar y/o comparar los resultados de este método mediante el análisis del fenómeno del golpe de ariete con resultados obtenidos con otros métodos como: el CFD, las diferencias finitas, el método de elementos finitos, etc. De manera que este método se pueda aplicar en el diseño y cálculo de elementos hidráulicos.

4 BIBLIOGRAFÍA

- Aguinaga, A., Cando , E., & Orquera , E. (2019). Mechatronic approach in the modeling and simulation of the dynamic behavior for the water hammer in hydromechanical systems. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 10-13.
- Air Tub. (25 de Diciembre de 2022). *Fabricación de conductos para climatización y ventilación* . Obtenido de <https://www.airtub.es/productos/conducto-rectangular-galvanizado/>
- Arevalo, H. A. (Dirección). (2020). *Flow simulation - Solidworks simulación de fluidos bomba hidraulica* [Película].
- Budea, S. (2019). Study of Mass Water Oscillations and Water Hammer Occurrence in Hydraulic Installations. *HIDRAULICA*.
- Carnicer Royo, E., & Mainar Hasta, C. (2001). *Bombas Centrífugas*. Madrid: Paraninfo.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de Fluidos, fundamentos y aplicaciones* . México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.
- Cobre y Bronce . (25 de Diciembre de 2022). *Tubería de Cobre*. Obtenido de <https://cobreybronce.com/tuberia-de-cobre/>
- FR. (25 de Diciembre de 2022). Obtenido de <https://imgv2-2-f.scribdassets.com/img/document/380975570/original/8f2d6bfc02/1595482296?v=1>
- Gordana, J. (2012). *Modelling and Simulation of Mechatronic Systems*. Bitola: Development of Regional Interdisciplinary Mechatronic Studies - DRIMS.
- Ingenieria de Fluidos . (9 de Diciembre de 2022). *Golpe de ariete*. Obtenido de Golpe de ariete: <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>
- JESMAR. (25 de Diciembre de 2022). *Tubería de PVC: Características y aplicaciones* . Obtenido de <https://jesmar.com.mx/tuberias-pvc-caracteristicas-y-aplicaciones/>
- Kubrak, M., Agnieszka, M., Kodura, A., Urbanowicz, K., Bury, P., & Stosiak, M. (2021). Water Hammer Control Using Additional Branched HDPE Pipe. *Energies*(8008), 14.
- Kubrak, M., Kodura, A., Malesińska, A., & Urbanowicz, K. (2022). Water Hammer in Steel–Plastic Pipes Connected in Series. *Energies*(3107), 14.
- Lobontiu, N. (2018). *System Dynamics for Engineering Students. Concepts and Applications*. London: Elsevier.
- Macias, C. D. (2015). *Academia* . Obtenido de https://www.academia.edu/12764259/tipos_de_valvulas
- MAQUINAS HIDRAULICAS. (26 de Diciembre de 2022). *Máquinas y Bombas Hidráulicas*. Obtenido de <https://maquinashidraulicas.cl>
- Martinez, C. (Marzo de 2015). *Prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/dgcdatkgoklr/transformacion-de-energia-cinetica-a-electrica/>

- Méndez, M. V. (1995). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas: Editorial Texto.
- Pérez, L., Guitelman, A., & Perez, S. (2002). *Estudio de transitorios: Golpe de ariete*. Buenos Aires.
- Provenzano, P., Baroni, F., & Aguerre, R. (4 de Noviembre de 2011). Golpe de ariete: simulación del transitorio amortiguado. XXX. Rosario, Argentina : Eds. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/236130342>
- Ríos Cando, L. (Julio de 2016). ANÁLISIS DEL FLUJO TRANSITORIO EN SISTEMAS DE BOMBEO. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Sertecpet (Dirección). (2017). *Sistema de Bombeo Hidráulico Jet Claw* [Película].
- Wuyi, W., Boran, Z., & Xiaoyi, C. (2019). Investigation on Water Hammer Control of Centrifugal Pumps in Water Supply Pipeline Systems. *Energies*, 12-108.

5 ANEXOS

ANEXO I

Código para la simulación del modelo obtenido en lenguaje de programación "Python 3.10"

```
1 # codigo de programacion para control de golpe de ariete en Sistemas hidromecanicos
2 # llamar librerias
3 import numpy as np
4 from scipy.signal import ss2tf, lsim
5 import matplotlib.pyplot as plt
6 import control
7 import math
8
9 # declaramos las variables (inputs and outputs)
10 #####
11 Ho=153 # mca
12 Po=Ho*(1*10**5/10.33) # presion [Pa]
13 Qo=0.6 # cuadal [m^3/s]
14 d=0.5 # diametro de la tuberia [m]
15 L=532 # Longitud libre de la tuberia [m]
16 S=np.pi*((d**2/4)) # area de la tuberia [m^2]
17 vo=Qo/S # velocidad de flujo
18 rho=1000 # densidade del fluido [kg/m^3]
19 g=9.81 # gravedad [m/s^2]
20 vis=1*10**-3 # viscosidad dinamica del fluido [Pa*s]
21 Bc=2.2*10**9 # constante de compresibilidad (modulo de bulk) [Pa]
22 E=20.5*10**10 # constante de elasticidad de la tuberia [Pa]
23 e=7*10**-3 # espesor de la pared de la tuberia
24
25
26 # ecuaciones diferenciales en espacio de estados
27 #####
28 Matriz_A= [[0,-Bc/(S*L)], [S/(rho*L),-40.74*vis*S/(rho*d**4)]]
29 Matriz_B= [[0],[-Bc/(rho*L**2)+4*E*e/(rho*d*L**2)]]
30 Matriz_C= [[1,0],[0,1]]
31 Matriz_D= [[0],[0]]
32
33 # transfer funtion
34 sys = ss2tf(Matriz_A,Matriz_B,Matriz_C,Matriz_D)
35 print (sys)
36 val0=sys[0]
37 val1=sys[1]
38 print (val1)
39
40 # State Space Function
41 #####
42 sys1 = control.ss(Matriz_A,Matriz_B,Matriz_C,Matriz_D)
43 print (sys1)
44
45
46 # calculos hidraulicos
47 #####
48 celeridad=math.sqrt((Bc/rho)/(1+(Bc*d/(E*e)))) #celeridad transiente joukowski m/s
49 tiempocierrerapido=2*L/celeridad #tiempo critico golpe de ariete al 100%
50 sobrepresionGAcritica=rho*celeridad*vo #Sobrepresión con golpe de ariete al 100%
51 tiempomaniobra=2*L*vo/(0.4*Ho*g) #(40% presión nominal Po)
```

```

53 #control de lazo abierto
54 #####3#
55 deltaQ=0.115
56 tiempodeoperacion=np.arange(0,tiempomaniobra,0.001)
57 slope=(deltaQ/tiempomaniobra)*tiempodeoperacion;
58 tout, y, x=lsim(deltaQ*val1,slope,tiempodeoperacion)
59 #tiempodecierre=fs*Qo/deltaQ % LEY DE CIERRE
60 tiempodecierre=tiempomaniobra*Qo/deltaQ # LEY DE CIERRE
61 plt.figure()
62 plt.plot(tiempodeoperacion, y,tiempodeoperacion,slope)
63 plt.title(' Gradiente de caudal para el tiempo de operacion de la valvula ')
64 plt.xlabel('Tiempo de operacion, [s]')
65 plt.ylabel('Gradiente de flujo, [m^3/s]')
66 plt.grid(alpha=0.3)
67 plt.show ()
68
69
70 # control de la onda de presion en lazo cerrado
71 #####
72
73 kp=3
74 taup=2
75 np = [kp]
76 dp=[taup,1]
77 gp=control.tf(np,dp)

78
79 td_p=1
80 np_exp=[-td_p/2,1]
81 dp_exp=[td_p/2,1]
82 gp_exp=control.tf(np_exp,dp_exp)
83
84 FOPDT=gp*gp_exp
85 print (FOPDT)
86
87 ## gc PID
88 ## cohen - Coon for tuning
89 kc=1/kp*taup/td_p*((3*td_p + 16*taup)/(12*taup))
90 tauI=td_p*(32 + 6*td_p/taup)/(13+8*td_p/taup)
91 tauD=4*td_p/(11+2*td_p/taup)
92
93 alpha=0.1
94 nc=[kc*(alpha*tauI*tauD+tauI*tauD),kc*(tauI+alpha*tauD),kc]
95 dc=[alpha*tauI*tauD,tauI,0]
96
97 gc= control.tf(nc,dc)
98
99 CL=(FOPDT*gc)/(1+FOPDT*gc)
00 print (CL)
01
02 deltaP=0.4*Po
03 T, yout = control.step_response(deltaP*CL,tiempomaniobra)
04 plt.figure()
05 plt.plot(T,yout)
06 plt.title(' Sobrepresion cuasado por el transiente de golpe de ariete ')
07 plt.xlabel('Tiempo de operacion, [s]')
08 plt.ylabel('Transiente de sobrepresion, [Pa]')
09 plt.grid(alpha=0.3)
10 plt.show()

```