

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO



Título del trabajo de grado

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO.

Nombres y apellidos completos del autor o autores

Andrés Fabián Sandoval Morantes. Cód.: 979778.

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

29 de septiembre de 2024

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

Título del trabajo de grado

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO.

Nombres y apellidos completos del autor o autores

Andrés Fabián Sandoval Morantes. Cód.: 979778.

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de
Proyectos

Asesor(a)

Henry Alberto Rodríguez Guzmán
Docente Investigación II

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Septiembre de 2024

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

Contenido

Lista de tablas	6
Lista de figuras	7
Abstract	8
Introducción.....	11
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 Descripción del problema	14
1.2 La pregunta de investigación	15
1.3 Los objetivos de investigación	15
Objetivo general.....	16
Objetivos específicos	16
1.4 Justificación de la investigación	16
2. MARCO DE REFERENCIA.....	17
2.1. Marco de Antecedentes.....	18
2.2. Marco Teórico	18
2.2.1 Nomenclatura	18
2.2.2 Tasa de flujo de un fluido.....	22
2.2.3 Ecuación de cálculo de la energía	22
2.2.4 Número de Reynolds.....	23
2.2.5 Flujo turbulento en tuberías	24
2.2.6 Fracción de fricción en tubería	25
2.2.3 PÉRDIDAS MENORES.....	26
2.2.3.1 ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE DARCY.....	26
2.2.4 Potencia de bomba agregada al fluido.	31
2.3 Fenómeno Golpe de ariete	31
2.3.1 Golpe de ariete.....	31
2.3.2 CONSECUENCIAS DEL GOLPE DE ARIETE.....	31
2.3.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE.....	32

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

2.3.6 FLUJO PERMANENTE O ESTACIONARIO	35
2.3.7 FLUJO NO PERMANENTE O TRANSITORIO	35
2.4 ECUACIONES BÁSICAS PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE	37
2.4.1 CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESIÓN	37
2.4.2 PERIODO DE LA TUBERÍA	39
2.4.3 TIEMPO DE APERTURA Y CIERRE DE LA VÁLVULA.....	39
2.4.4 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS PARA VÁLVULAS Y ACOPLAMIENTOS.....	40
2.4.5 SOBREPRESIÓN MÁXIMA	41
2.5 VALVULA SOLENOIDE	43
2.5.1 TIPOS DE VÁLVULAS DE SOLENOIDE	44
2.5.2 OPERADAS POR PILOTO	45
2.3. Marco normativo	47
3. METODOLOGÍA	48
3.1. Enfoque y alcance de la investigación	48
3.2. Población y muestra.....	49
Definición de la población.....	49
3.2.1. Cálculo y selección de la muestra	49
3.3. Instrumento(s)	49
3.4. Descripción de procedimientos	49
3.5. Análisis de información.....	51
3.5.1 Recolección y Almacenamiento de Datos.....	51
3.5.2. Procesamiento de Datos.....	51
3.5.3. Aplicación de Análisis Cuantitativo	52
3.5.4 Visualización de Datos	53
3.5.5. Codificación Personalizada	53
3.5.6. Aplicación de Medidas Estadísticas	54
3.5.7. Análisis Comparativo y Conclusiones.....	54
3.6.1 Análisis de consideraciones éticas	54
3.6.1.1 Cumplimiento de los Principios Éticos Universitarios.....	55
3.6.1.2 Protección de las Organizaciones	56
3.6.1.3 Consideraciones para la Población Objeto de Investigación	56

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

3.6.1.4	Cumplimiento de Normas Internacionales y de la Comunidad Científica	57
3.6.1.5	Cumplimiento de la Normativa de Propiedad Intelectual	58
3.6.1.6	Revisión Ética del Proyecto	58
4.	RESULTADOS	58
4.1	GOLPE DE ARIETE POR APAGADO DE UNA BOMBA.....	58
4.2	GOLPE DE ARIETE POR SWITCHEO.....	60
4.3	GOLPE_ARIETE_B1_SWITCH+OFF_PMAX	61
4.4.	GOLPE DE ARIETE POR APAGADO DEL CONJUNTO DE BOMBAS.....	62
4.5	GOLPE DE ARIETE POR SWITCHEO DEL CONJUTO DE BOMBAS.....	62
4.6	GOLPE ARIETE SWITCH+OFF PMAX DOS BOMBAS	64
5.	CONCLUSIONES.....	67
6.	Recomendaciones	69
7.	Referencias.....	69
	Anexos.....	73
	ANEXO A. VALVULAS SOLENOIDES DE ACCIÓN DIRECTA Y ACCION INDIRECTA.....	73
	CODIGO DE ADQUISICION DE DATOS.	83

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

Lista de tablas

Tabla 1. Valores de rugosidad relativa.....	25
Tabla 2. Coeficiente de resistencias para válvulas y acoplamientos	29
Tabla 3. Coeficientes de pérdidas para accesorios (k)	30
Tabla 4. Valores de K según el tipo de material.....	38
Tabla 5. Factor de fricción en la zona de turbulencia completa.	40
Tabla 6. Datos Relevantes del golpe de ariete por apagado de una bomba.	59
Tabla 7. Datos Relevantes del golpe de ariete por switcheo con una bomba funcionando.	60
Tabla 8. Datos relevantes del golpe de ariete switch+off_pmax.....	61
Tabla 9. Datos Relevantes del golpe de ariete por apagado del conjunto de bombas.	62
Tabla 10. Datos relevantes del golpe de ariete por switcheo del conjunto de bombas.	63
Tabla 11. Datos Relevantes del golpe ariete switch+off pmax dos bombas.	64
Tabla 12. factor de proyección de variación en la demanda de redes.	75
Tabla 13. Evaluación de consumo.....	76
Tabla 14. Presiones Estandarizadas Para Sistemas Hidroneumáticos	77
Tabla 15. Ciclos De Encendidos Recomendados (Para Motores De Superficie No Sumergidos).....	78
Tabla 16. Rango de presiones y factor función de las presiones de pérdida	79
Tabla 17. Selección bomba por rango de presión.....	80

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Lista de figuras

Ilustración 1. Sistema de flujo que ilustra la ecuación de energía.....	22
Ilustración 2. Pérdidas menores en una sección de tubería con una válvula de compuerta.	27
Ilustración 3. Pérdida de carga provocada por accesorio.....	29
Ilustración 4. Equilibrio de las fuerzas para teoría de columna rígida.....	34
Ilustración 5. Clasificación de los flujos transitorios.....	35
Ilustración 6. Onda de presión de cierre instantáneo de una válvula.....	37
Ilustración 7. Distribución de la sobrepresión máxima en cierre rápido.....	41
Ilustración 8. Distribución de la sobrepresión máxima en cierre lento.....	42
Ilustración 9. Válvula solenoide.....	44
Ilustración 10. Válvula de solenoide de dos vías, normalmente cerrada, operada por piloto con diafragma.....	45
Ilustración 11. Gráfica golpe de ariete por apagado de una bomba.....	58
Ilustración 12. Gráfica golpe de ariete por switcheo con una bomba funcionando.....	60
Ilustración 13. Gráfica golpe de ariete switch+off_pmax.....	61
Ilustración 14. Gráfica golpe de ariete por apagado del conjunto de bombas.....	62
Ilustración 15. Gráfica golpe de ariete por switcheo del conjunto de bombas.....	62
Ilustración 16. Gráfica golpe ariete switch+off pmax dos bombas.....	64
Ilustración 17. Etapas del golpe de ariete producido por apertura y cierre de una válvula.....	64
Ilustración 18. Etapas del golpe de ariete producido por apagado de bombas.....	66
Ilustración 19. Válvula de solenoide típica de acción directa.....	73

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Abstract

Keywords: This degree project is motivated by a pressing need in the academic field, to develop a conceptual, experimental and practical analysis of the hydraulic phenomenon called 'water hammer'.

This same problem is evidenced in the following degree projects which served as a basis for the analysis of the water hammer phenomenon such as the “Experimental theoretical analysis of the water hammer phenomenon due to the rapid closure of a valve in pipes”. González Martínez, Jesús David. Bernal Restrepo, Jhonattan Higuey. August 19, 2015” (Gonzalez Martinez & Bernal Restrepo, 2015) where expresses us one of the main problems in fluid mechanics and engineering applications is the water hammer project in which they designed a hydraulic model which contained variations in the discharge height and initial pressure where the phenomenon was demonstrated, This demonstrates the importance of a good selection of materials and elements present throughout the system, as well as the influence of pipe diameters and pressure for this particular water hammer phenomenon.

Another project we relied on was “Study of the water hammer produced by the opening and closing of a solenoid valve in a polyvinyl chloride (PVC) pipe to determine the pressure variation in the pipe. Bombon Lascano, Edison Patricio.” 2016. Project aimed to study the water hammer produced by an opening or closing of a solenoid valve in PVC pipe to determine the pressure variation inside the pipe in a hydraulic test bench.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

This project became important in our research because it provided us with design parameters for the selection of hydraulic equipment to drive, load and unload our system, as well as an important opening to analyze in detail what type of measuring instruments were the most appropriate for our research.

Our research question: How can the study of water hammer in hydraulic systems be carried out? is a consequence of wanting to innovate and characterize us as one of the universities of higher education with greater projection at regional and national level.

In order to solve the proposed objectives, we will resort to analytical tools and data acquisition software.

This analysis will have two approaches, first to perform a theoretical calculation where mathematical expressions developed in the field of hydraulics and fluid mechanics with knowledge acquired throughout the electromechanical engineering are applied, on the other hand this theoretical method is contrasted with the data acquired through an academic module designed by students of specialization in project management at the university uniminuto for the study of the water hammer phenomenon.

As a high point in the analysis and data acquisition, the module will have a digital pressure sensor with analog signal output which will be encoded through a code in C programming language

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

developed in MATLAB, which will allow to visualize through graphs and tabulation in real time sudden pressure changes that propagate through the water hammer module when transferring a fluid that is instantly interrupted by the closure of a solenoid valve.

One of the important aspects that can be evidenced in the course of the study of the water hammer phenomenon is the pressure wave produced by the system when the pumps in service are turned off, simulating an electrical shortage present in the system. It is possible to visualize the way in which the system suddenly and abruptly loses all the pressure energy and also the way in which it tries to stabilize this sudden pressure change, this pressure wave could be called negative pressure wave or vacuum suction pressure.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Introducción

Este proyecto de grado está motivado por una apremiante necesidad en el ámbito académico, de poder desarrollar un análisis conceptual, experimental y práctico respecto al fenómeno hidráulico denominado ‘golpe de ariete’.

Se ve evidenciado esta misma problemática en los siguientes proyectos de grado los cuales sirvieron de base para realizar el análisis del fenómeno golpe de ariete como lo es el “Análisis teórico experimental del fenómeno del golpe de ariete por el cierre rápido de una válvula en tuberías. González Martínez, Jesús David. Bernal Restrepo, Jhonattan Higuey. 19 de agosto de 2015” (Gonzalez Martinez & Bernal Restrepo, 2015) donde nos expresa uno de los principales problemas en mecánica de fluidos y aplicaciones ingenieriles es el golpe de ariete proyecto en el cual diseñaron un modelo hidráulico el cual contenía variaciones en la altura de descarga y la presión inicial donde se demostró el fenómeno, con el fin de evidenciar la magnitud del fenómenos que generalmente traduce en el daño de la tubería, lo que demuestra la importancia de una buena selección de materiales y elementos presentes a lo largo del sistema, así como la influencia de los diámetros de tubería y presión para este fenómeno de golpe de ariete en particular.

Otro proyecto en el cual nos apoyamos fue “Estudio del golpe de ariete producido por la apertura y cierre de una válvula solenoide en una tubería de poli cloruro de vinilo (PVC) para determinar la variación de presión en la tubería. Bombon Lascano, Edison Patricio.”

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

2016. Proyecto que tenía como objetivo el estudio del golpe de ariete producido por una apertura o cierre de una válvula solenoide en tubería PVC para determinar la variación de presión al interior de la tubería en un banco de pruebas hidráulico.

Este proyecto se hizo importante en nuestra investigación porque nos brindó parámetro de diseño en selección de equipos hidráulicos para impulsión carga y descarga de nuestro sistema, así como una apertura importante en analizar de manera detenida que tipo de instrumentos de medición eran los más acordes a nuestra investigación.

Nuestra pregunta de investigación ¿Cómo se puede realizar el estudio de golpe de ariete en sistemas hidráulicos? es consecuencia del querer innovar y caracterizarnos como una de las universidades de educación superior con mayor proyección a nivel regional y nacional.

Para resolver los objetivos planteados recurriremos a herramientas analíticas y software de adquisición de datos.

Este análisis tendrá dos enfoques, primero realizar un cálculo teórico donde se aplican expresiones matemáticas desarrolladas en el ámbito de la hidráulica y la mecánica de fluidos con conocimientos adquiridos a lo largo de la ingeniería electromecánica, por otro lado dicho método teórico se contrasta con los datos adquiridos a través de un módulo

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

académico diseñado por estudiantes de especialización en gerencia de proyectos en la universidad uniminuto para el estudio del fenómeno de golpe de ariete.

Como punto alto en el análisis y adquisición de datos, el módulo gozará de un sensor de presión digital con salida de señal analógica la cual se codificará por medio de un código en lenguaje de programación C desarrollado en MATLAB, el cual permitirá visualizar a través de gráficas y tabulación en tiempo real cambios de presión súbitos que se propagan a través del módulo de golpe de ariete al trasegar un fluido que es interrumpido instantáneamente por el cierre de una electroválvula.

Uno de los aspectos importantes que se pueden evidenciar en el transcurso del estudio del fenómeno de golpe de ariete, es la onda de presión producida por el sistema cuando las bombas en servicio son apagadas, simulando un desabastecimiento eléctrico presente en el sistema. Se puede visualizar la manera en que brusca y súbitamente el sistema pierde toda la energía de presión y también la manera en que trata de estabilizar ese cambio de presión repentino, esta onda de presión se podría denominar onda de presión negativa o presión de succión de vacío.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico que se produce en las tuberías de agua cuando se interrumpe bruscamente el flujo, generando un aumento repentino de presión que puede ser perjudicial para la infraestructura y el funcionamiento de los sistemas de distribución de agua. Este fenómeno puede causar daños en las tuberías, válvulas y otros elementos del sistema, así como provocar fugas de agua y afectar la calidad del servicio.

En el contexto del presente proyecto de investigación, se plantea el problema del golpe de ariete en sistemas de distribución de agua, con el objetivo de comprender sus causas, efectos y posibles soluciones para mitigar sus impactos negativos.

1.1 Descripción del problema

La realización de prácticas es una parte fundamental en el proceso educativo de un ingeniero debido a que, es en dicho momento cuando se da la posibilidad de interactuar con los equipos y materiales de los que se rodea en su vida profesional. Por tanto, se hace necesario que cada una de las universidades que poseen programas académicos relacionados con la industria proporcione a sus estudiantes equipos necesarios para aplicar cada uno de los conocimientos adquiridos en las aulas de clase.

La universidad uniminuto se encargan de facilitar a sus alumnos espacios donde la praxis es su objetivo principal brindando los instrumentos para la realización de actividades con el fin de observar el funcionamiento que cumplen los equipos en el desarrollo industrial.

La universidad uniminuto se caracteriza por ser una de las instituciones con mayor proyección a nivel regional e implementar tecnología de punta en cada uno de sus laboratorios; por tal motivo se hace necesario el estudio de este fenómeno hidráulico por la continua actualización y modernización, razón por la cual los estudiantes y los grupos de

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

investigación ven como principal inconveniente implementar un equipo que por medio de la experimentación contrasté lo experimental con lo analítico en el área de golpe de ariete.

1.2 La pregunta de investigación

Estudiantes o grupos de investigación en diferentes instituciones han desarrollado módulos automatizados y/o controlados electrónicamente de sistemas hidroneumáticos y golpe de ariete como las presentadas en el siguiente proyecto: Arenas Arce, Leandro en su investigación menciona que el golpe de ariete se manifiesta por medio de vibraciones y ruido a lo largo de una sección en un sistema hidráulico, esto es debido al cambio súbito de las condiciones del flujo y al constante cambio de energía producido por un cambio imprevisto de la presión al interior del fluido. Las pruebas realizadas en la investigación del modelo de golpe de ariete utilizo para la recopilación de información el software de Arduino para la conversión de datos arrojados debido a la variación de la presión del fluido. Determino una de las formas de mitigación del fenómeno es la chimenea de equilibrio, la cual disipa las ondas de presión en el fluido. (Arenas Arce, 2014)

Lo anterior se resume en una pregunta de investigación: ¿Cómo se puede realizar el estudio de golpe de ariete en sistemas hidráulicos?

1.3 Los objetivos de investigación

El fenómeno de golpe de ariete es un tema relevante en el campo de la ingeniería hidráulica, ya que puede tener efectos devastadores en las redes de distribución de agua. Este fenómeno se produce cuando se interrumpe bruscamente el flujo de agua en una tubería, generando un aumento repentino de presión que puede dañar las tuberías, válvulas y otros elementos del sistema.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

En el contexto del presente proyecto de investigación, se busca estudiar y comprender en profundidad el fenómeno de golpe de ariete en sistemas de distribución de agua, con el objetivo de desarrollar estrategias efectivas para mitigar sus efectos y garantizar la operación segura y eficiente de las redes hidráulicas.

Objetivo general

Estudiar modelo de golpe de ariete mediante un sistema hidroneumático en el laboratorio de mecánica de fluidos.

Objetivos específicos

- Implementar un módulo didáctico para el estudio de golpe de ariete analizando la magnitud de la carga de energía y las pérdidas presentes en el sistema hidráulico.
- Analizar los datos obtenidos en la experimentación en el módulo académico respecto al fenómeno del golpe de ariete.
- Contrastar los datos obtenidos de manera experimental con los valores obtenidos de forma analítica.

1.4 Justificación de la investigación

En el sector productivo en el área de la dinámica de los fluidos se hace necesario la aplicación del encuentro de las cargas de energía y las pérdidas hidráulicas que se tienen en los procesos industriales; por tal razón se busca implementar un módulo que facilite contrastar lo teórico con lo experimental. Logrando una mayor funcionalidad en el laboratorio de mecánica de fluidos y sus bancos de prácticas, ofrecer un proceso completo, donde el estudiante

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

identifiqué tipo de flujo, las diferentes cargas energéticas, perdidas en accesorios, por medio de un proyecto de grado.

La formación de profesionales con competencias en el área de mecánica de fluidos ayuda a nivel social y regional, al diseño de redes eficientes de transporte de fluido a sectores tanto industriales como residenciales. La presente investigación enfoca dos aspectos principales, realizar el ensamble y puesta en marcha del sistema hidroneumático, mientras de manera conjunta estudiar el fenómeno del golpe de ariete presente en los sistemas hidroneumáticos debido a cierres inesperados de válvulas o accesorios presentes en la tubería.

Debido a los constantes avances tecnológicos se hace necesario el estudio de este fenómeno presente en los diversos equipos lo cual permite evidenciar la naturaleza de su propagación y sus efectos, como también la manera de mitigarlo, además de ofrecer una mirada integral acerca de cuán importante es para los estudiantes tanto de tecnología e ingeniería, además de los grupos de investigación, tener a su disposición un equipo el cual pueda suplir con todas las necesidades presentes para el estudio de este fenómeno y abordar de manera más clara uno de los principales problemas a nivel industrial.

2. MARCO DE REFERENCIA

El golpe de ariete, también conocido como transitorios hidráulicos, es un fenómeno común en sistemas de distribución de agua que puede tener consecuencias adversas en la infraestructura y el funcionamiento de dichos sistemas. Este fenómeno se produce cuando se interrumpe bruscamente el flujo de agua en una tubería, generando un aumento repentino de presión que viaja a lo largo de la tubería y puede causar daños en válvulas, tuberías y otros elementos del sistema (Hunt, 2020).

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Desde el punto de vista hidráulico, el golpe de ariete se puede describir como una onda de presión que se propaga a través del fluido debido a la inercia del agua y la elasticidad de las paredes de la tubería (Ghidaoui, 2005). Este fenómeno ha sido ampliamente estudiado en la literatura científica y se han desarrollado diversas teorías y modelos matemáticos para su análisis y predicción (Brunone, 2010).

La comprensión del golpe de ariete es fundamental para el diseño y la operación segura de sistemas de distribución de agua. En este sentido, se han propuesto diferentes estrategias para mitigar los efectos del golpe de ariete, como el uso de válvulas de cierre lento, tanques de amortiguamiento y dispositivos de control de presión (Sousa, 2018).

2.1. Marco de Antecedentes

2.2. Marco Teórico

2.2.1 Nomenclatura

$Q = \text{flujo volumétrico } [m^3/s]$

$A = \text{Área de la sección transversal por donde circula el fluido } [m^2]$

$V = \text{Velocidad del flujo } \left[\frac{m}{s}\right]$

$VR = \text{Volumen de regulación.}$

$PA = \text{Presión máxima del sistema (Absoluta) } + 1$

$P_1 = \text{Presión máxima del sistema (Absoluta)}$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

$P_2 =$ Presion minima del sistema(Absoluta)

$\Delta p =$ Caida de presion entre dos puntos.

$V_{prom} =$ Velovidad promedio del flujo. $\left[\frac{m}{s}\right]$

$g =$ aceleracion de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$P_c =$ Presion de corte en caso de sobrepresion [psi]

$P_{min} =$ Presion minima en el tanque hidroneumatico[psi]

$\gamma =$ Peso especifico del fluido $\left[\frac{KN}{m^3}\right]$

$P =$ presion del sistema[PSI]o [Pa]

$\frac{P}{\gamma} =$ Carga de presion del sistema[m]

$\frac{V^2}{2g} =$ Carga de velocidad del fluido[m]

$Z =$ Carga de elevacion del flujo [m]

$\dot{E}_1 =$ Energia del fluido entrada $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

$\dot{E}_2 =$ Energia del fluido entrada $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

$h_A =$ Energía agregada al fluido mediante un dispositivo mecánico. (Bomba).

$h_r =$ Energía retirada al fluido mediante un dispositivo mecánico. (turbina).

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

h_l = Energía que pierde el sistema debido a la fricción que se produce en las paredes del conductor, o pérdidas menores debido a la presencia de válvulas y conectores.

R_e = Numero de reynolds

ϑ = viscosidad cinemática del agua $\left[\frac{m^2}{s} \right]$

D = diametro interno de la tubería [m]

D_h = diametro equivalente tubería [m]

f = Factor de fricción [m^3]

L = longitud de la tubería [m]

ε = Rugosidad relativa del material

L_e = Longitud equivalente

L_e/D = Longitud equivalente en diámetros de tubería

k = Coeficiente de pérdida en tuberías

Dotacion = Cantidad de litros día

K_p = Factor de proyección de variación en la demanda de redes

∂v = variación de velocidad

∂t = variación del tiempo

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

∂v = *variacion de la viscosidad*

∂T = *variacion de la temperatura*

$\partial \rho$ = *variacion de la densidad*

C = *Velocidad de onda de presion [m/s]*

E_v = *Modulo de elasticidad volumetrico del agua [Pa ó KPa]*

ρ = *Densidad del fluido* $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

ξ = *Modulo de elasticidad de Young de la tuberia [Pa ó KPa]*

e = *Espesor de la pared del tubo [m]*

K = *Coeficiente en funcion del modulo de elasticidad(ξ) del material de la tuberia*

T = *Periodo de la tuberia, tiempo maximo de reflexion de la onda de sobrepresion [s]*

t_c = *tiempo de cierre de la valvula [s]*

$h'_{max} = \Delta h$ = *Delta de presion en m. c. a*

W = *Potencia [Watts], [N – m/s; J/S]*

P_b = *Potencia de bomba [Watts]*

f_t = *Factor de friccion en zona de turbulencia.*

V_{hc} = *Volumen tanque hidroneumatico.*

V_{bc} = *Volumen tanque hidroneumatico para prevenir daños.*

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

2.2.2 Tasa de flujo de un fluido

Es la cantidad de fluido que pasa en un determinado tiempo y se expresa de la siguiente manera:

$$Q = A * V \quad \text{Ecuación 1}$$

2.2.3 Ecuación de cálculo de la energía

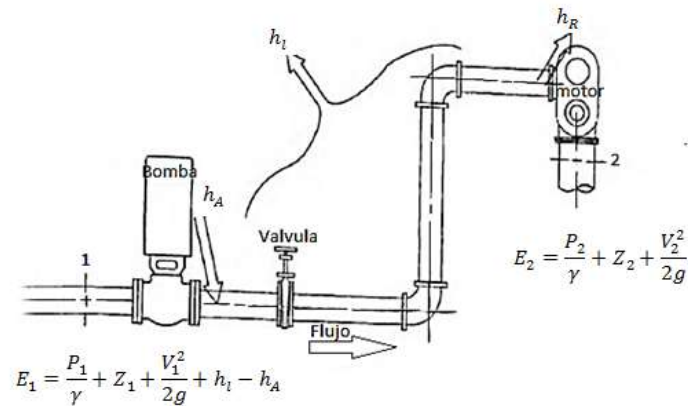
En un flujo permanente e incompresible del agua en la tubería, se expresan sus pérdidas en función de la energía presión o de caídas en la línea de alturas piezométricas del sistema hidráulico, que es la representación de la presión sobre el peso específico del líquido (P/γ), a lo largo de la tubería. Las pérdidas y ganancias de energías en un sistema se denotan en términos de energía por unidad de peso que circula por él. Se denomina con la letra “ h ”. La ecuación de energía o Bernoulli, nos permite solucionar problemas donde existe pérdida y ganancia de energía.

$$\dot{E}_1 + h_A - h_r - h_l = \dot{E}_2 \quad \text{Ecuación 2}$$

De la ecuación 2 podemos evidenciar que los términos \dot{E}_1 y \dot{E}_2 denotan la energía del fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2 respectivamente, y energías agregadas de ganancia y pérdidas (h_A, h_r, h_l) en un sistema de conservación de energía.

Ilustración 1. Sistema de flujo que ilustra la ecuación de energía

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (Mott, 2006)

La ecuación que define a un fluido por unidad de peso es la siguiente:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_l - h_A = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 3}$$

2.2.4 Número de Reynolds

La transición de flujo laminar a turbulento depende de la geometría, la rugosidad de la superficie, la velocidad del flujo, la temperatura de la superficie y el tipo de fluido, entre otros factores. Se descubrió años atrás que el régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido. Esta razón se llama **número de Reynolds** y se expresa para flujo interno en una tubería circular como:

$$R_e = \frac{V \cdot D_h}{\nu} \quad \text{Ecuación 4}$$

La velocidad promedio de una sección circular se calcula de la siguiente manera:

$$V = \frac{Q}{D} \quad \text{Ecuación 5}$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Para una sección circular el diámetro hidráulico es igual a:

$$D_h = \frac{4A_c}{p} = \frac{4 \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \right]}{\pi D} = D \quad \text{Ecuación 6}$$

“Es deseable tener valores precisos del número de Reynolds para flujos laminar, transicional y turbulento, pero éste no es el caso en la práctica. Es evidente que la transición de flujo laminar a turbulento también depende del grado de perturbación del flujo por la rugosidad de la superficie en la tubería, las vibraciones de la tubería y las fluctuaciones en el flujo. En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería circular es laminar para $Re \leq 2300$, turbulento para $Re \geq 4000$, y transicional entre ellos.”
(ÇENGEL & CIMBALA)

$Re \leq 2300$ Flujo laminar

$2300 \geq Re \geq 4000$ Flujo en transición

$Re \geq 4000$ Flujo turbulento

2.2.5 Flujo turbulento en tuberías

La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica de ingeniería son turbulentos, por esta razón es importante entender cómo afecta dicha turbulencia el esfuerzo de corte de pared. Sin embargo, el flujo turbulento es complejo dominado por fluctuaciones.

El flujo es caracterizado por fluctuaciones aleatorias y rápidas de regiones giratorias de fluido, llamadas remolinos, a través del flujo. Dichas fluctuaciones proporcionan un mecanismo adicional para transferir movimiento y energía. En el flujo turbulento, los remolinos giratorios transportan masa, cantidad de movimiento y energía a otras regiones del flujo con mayor rapidez y aumentan enormemente la masa, la cantidad de movimiento y la transferencia de calor.

Como resultado, el flujo turbulento está relacionado con valores mucho más altos de coeficientes de fricción y transferencia de masa, aun cuando el flujo promedio sea estacionario, el movimiento en remolino en flujo turbulento provoca fluctuaciones importantes en los valores de velocidad, temperatura, presión.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

2.2.6 Fracción de fricción en tubería

El factor de fricción de flujo en tubería turbulento totalmente desarrollado depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa ε/D , que es la razón de la altura media de rugosidad de la tubería al diámetro de la tubería. El factor de fricción se calcula a partir de las mediciones de la razón de flujo y la caída de presión.

Este factor de fricción se puede calcular por medio de la ecuación de Colebrook quien combinó los datos disponibles para flujo en transición y turbulento en tuberías lisas y rugosas en la siguiente relación implícita conocida como ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7 * D} + \frac{2.51}{R_e * \sqrt{f}} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Tabla 1. Valores de rugosidad relativa.

Material	ε (mm)	Material	ε (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Fuente: (Ingeniería Rural)

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

2.2.3 PÉRDIDAS MENORES

2.2.3.1 ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE DARCY

La fórmula de Darcy es uno de los métodos para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos, la ecuación general de energía se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A - h_r - h_l = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ecuación 8}$$

Cuando existe flujo laminar el fluido parece moverse como si fueran varias capas compactas, una sobre la otra. Debido a la viscosidad del líquido, se crea un esfuerzo cortante entre sus capas, se pierde energía del fluido por la interacción de las fuerzas de fricción que se deben vencer, y que son producidas por el esfuerzo cortante del flujo. Debido a que el líquido es laminar por lo tanto es regular y redondo, es posible obtener una relación entre la pérdida de energía y los parámetros que interactúan en el sistema de flujo. Dicha relación se conoce como ecuación de Hagen-poiseville.

$$h_l = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2g} \quad \text{Ecuación 9}$$

Al término h_l se le definió como la pérdida de energía del sistema. Una componente de la pérdida es la fricción presente en el flujo que al trasegar al interior por la tubería, esta fricción es proporcional a la velocidad de flujo y a la relación entre la longitud de la tubería y su diámetro. Esto se expresa con el modelo analítico de Darcy.

El fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de conexiones en T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos accesorios interrumpen el transitar flujo y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen.

En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos y se llaman pérdidas menores. Aunque por lo general esto es cierto, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

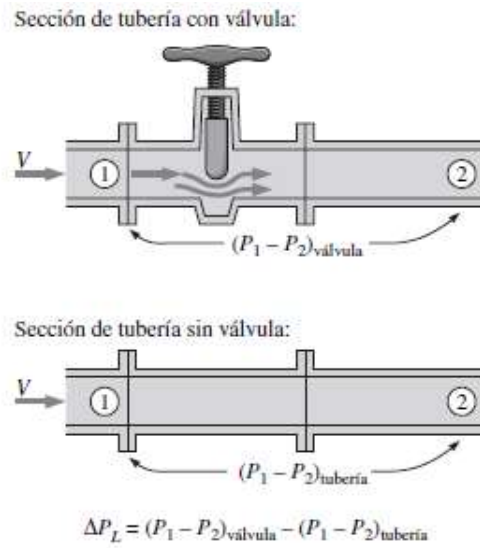
las pérdidas mayores. Las pérdidas de carga que resultan de una válvula totalmente abierta, por ejemplo, pueden ser despreciables. Pero una válvula cerrada parcialmente puede provocar la pérdida de carga más grande en el sistema, como pone en evidencia la caída en la razón de flujo. El flujo a través de válvulas y uniones es muy complejo, y por lo general no es lógico un análisis teórico.

En consecuencia, usualmente los fabricantes de los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental. Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida k también llamado coeficiente de resistencia, que se define como:

$$h_l = k \frac{v_{prom}^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde h_l es la pérdida de carga irreversible adicional en el sistema de tuberías provocado por la inserción del accesorio, y se define como $h_l = \Delta p / \rho g$. Por ejemplo, imagine reemplazar la válvula en la figura 1 con un tramo de tubería de diámetro constante de la posición 1 a la posición 2. Δp Se define como la caída de presión de 1 a 2 para el caso con la válvula, (P1, P2) válvula, menos la caída de presión que ocurriría en la imaginaria sección recta de tubería de 1 a 2 sin la válvula, (P1, P2) tubería a la misma razón de flujo. Mientras que la mayoría de las pérdidas de carga irreversibles ocurren localmente cerca de la válvula, parte de ellas ocurre corriente abajo de la válvula, debido a los remolinos turbulentos inducidos que se producen en la válvula y continúan corriente abajo. Dichos remolinos “desperdician” energía mecánica porque, a final de cuentas, se disipan en calor mientras que el flujo en la parte corriente abajo de la tubería finalmente regresa a condiciones del flujo totalmente desarrollado. Cuando se miden pérdidas menores en algunos accesorios, como los codos, por ejemplo, la posición 2 debe estar considerablemente lejos corriente abajo con la finalidad de tomar en cuenta las pérdidas irreversibles adicionales debidas a estos remolinos en decaimiento.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (ÇENGEL & CIMBALA)

En general, el coeficiente de pérdida depende de la geometría del accesorio y del número de Reynolds, tal como del factor de fricción. Sin embargo, usualmente se supone que es independiente del número de Reynolds. Ésta es una solución razonable porque, en la práctica, la mayoría de los flujos tienen números de Reynolds grandes y los coeficientes de pérdida (que incluyen el factor de fricción) tienden a ser independientes del número de Reynolds a números de Reynolds grandes.

Las pérdidas menores también se expresan en términos de la longitud equivalente l_e , que se define como en la siguiente ecuación y la figura 2:

$$\text{longitudes equivalentes} \quad h_l = f * \frac{l_e}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde f es el factor de fricción y D es el diámetro de la tubería que contiene el accesorio. La pérdida de carga que provoca el accesorio equivale a la pérdida de carga causada por un tramo de la tubería cuya longitud es l_e . Por lo tanto, la aportación de un accesorio a la pérdida de carga se puede explicar simplemente con añadir l_e a la longitud de tubería total.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

En la práctica se usan ambos procedimientos, pero el uso del coeficiente de pérdida es más común. Por lo tanto, en este libro también se usará este procedimiento. Cuando ya estén disponibles todos los coeficientes de pérdida, la pérdida de carga total en un sistema de tubería se determina de:

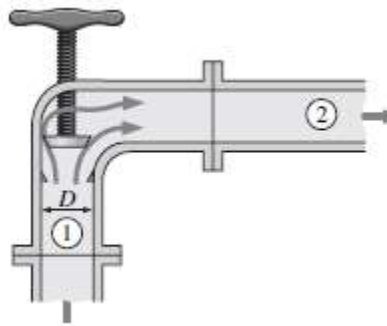
$$\text{Pérdida de carga total } h_{l,total} = h_{l,mayor} + h_{l,menor} \quad \text{Ecuación 12}$$

Para este proyecto se usan las pérdidas para una sección de tubería con un diámetro constante en toda la instalación, por lo tanto se aplica la siguiente formula:

Pérdida de carga total con ($D = \text{constante}$)

$$h_{l,total} = \left(f * \frac{L_e}{D} + \sum k_l \right) * \frac{v_{prom}^2}{2 * g} \quad \text{Ecuación 13}$$

Ilustración 3. Pérdida de carga provocada por accesorio.



Fuente: (ÇENGEL & CIMBALA)

Tabla 2. Coeficiente de resistencias para válvulas y acoplamientos

Tipo de accesorio	Longitud equivalente en diámetros de tubería L_e/D
-------------------	--

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

Válvula de globo - abierta por completo	340
Válvula de ángulo – abierta por completo	150
Válvula de compuerta – abierta por completo	8
Válvula ¾ abierta	35
Válvula ½ abierta	160
Válvula ¼ abierta	900
Válvula de verificación – tipo giratorio	100
Válvula de verificación – tipo bola	150
Válvula de mariposa – abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
Válvula de mariposa – abierta por completo, 10 a 14 pulg	35
Válvula de mariposa – abierta por completo, 16 a 24 pulg	25
Válvula de pie – tipo disco de vástago	420
Válvula de pie – tipo bisagra	75
Codo estándar a 90°	30
Codo a 90° de radio largo	20
Codo roscado a 90°	50
Codo estándar a 45°	16
Codo roscado a 45°	26
Vuelta Cerrada en retorno	50
Te estándar – con flujo directo	20
Te estándar – con flujo en el ramal	70

Fuente: Crane Valves, Signal Hill, C A. (Mott, 2006)

Tabla 3. Coeficientes de pérdidas para accesorios (k)

Tipo de accesorio	Valor Coeficiente de perdida (k)
Válvula esférica, totalmente abierta	10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	5
Válvula de retención de clapeta	2,5
Válvula de pie con colador	0,8
Válvula de compuerta, totalmente abierta	0,19
Codo de retroceso	2,2
Empalme en T normal	1,8
Codo de 90° normal	0,9
Codo de 90° de radio medio	0,75
Codo de 90° de radio grande	0,60
Codo de 45°	0,42

Fuente: Crane Valves, Signal Hill, C A. (Mott, 2006)

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

2.2.4 Potencia de bomba agregada al fluido.

Potencia es la rapidez con la que se transmite la energía al fluido, puede estar expresada en Watts [W], y sus equivalentes [N·m/s; J/S]. El cálculo de potencia de la bomba viene definido por la siguiente Ecuación, la cual parte de los conceptos básicos adquiridos anteriormente.

$$P_b = h_A * \gamma * Q \quad \text{Ecuación 14}$$

2.3 Fenómeno Golpe de ariete

2.3.1 Golpe de ariete

Se denomina Golpe de Ariete al fenómeno hidráulico transitorio que se produce por variaciones de velocidad al interior del fluido transportado. Este fenómeno se puede evidenciar en la propagación de ondas de presión a lo largo de la tubería, debido a la transformación súbita de energía cinética en energía de presión y elástica. Si el Golpe de Ariete no se controla eficientemente puede producir rotura en la tubería por sobrepresión o por depresión, así como generar serios problemas de operación del sistema hidráulico.

Los transitorios hidráulicos son eventos causados por cambios en la operación del sistema hidráulico el cual produce una variación de velocidad del fluido, este cambio de velocidad genera cambios súbitos de presión que se propagaran al interior del sistema de tuberías a una velocidad del sonido, y su celeridad depende de la elasticidad del fluido que trasiega al interior de la tubería.

2.3.2 CONSECUENCIAS DEL GOLPE DE ARIETE

Las principales consecuencias evidentes en los transitorios hidráulicos son: altas presiones, presiones negativas, separación de la columna de agua llegando inclusive a valores de

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

cavitación, riesgo sanitario asociado a la intromisión de contaminantes como consecuencia de las presiones negativas, y como consecuencia de esto rotura de la tubería o fatiga en los accesorios colocados a lo largo del tiempo.

2.3.3 IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DEL GOLPE DE ARIETE

El análisis de los transitorios hidráulicos se hace crítico al interior del sistema en régimen permanente. Las presiones de este fenómeno durante el periodo transitorio son mayores cuando los cambios de velocidad son más súbitos o repentinos, como por ejemplo durante el cierre de una válvula o una parada de bombas.

Estas perturbaciones pueden ser causadas por la mala operación del sistema hidráulico como por ejemplo cierre de válvula, parada de bombas por corte de energía, y en ambos casos generan ondas de presión de elevadas magnitudes que se suman a las condiciones de presión ya existentes en el sistema como consecuencia de la operación en régimen permanente; y pueden fácilmente exceder la resistencia de la tubería.

Para el estudio del golpe de ariete existen tres teorías:

Periodos de Simulación Extendida

Teoría del Golpe de Ariete

Teoría de la columna rígida de agua

2.3.4 PERIODOS DE SIMULACIÓN EXTENDIDA

Comprende transitorios muy lentos, también se conoce como teoría casi-permanente, resuelve una secuencia de resultados de régimen permanente vinculados por un esquema de

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

integración. Los efectos inerciales y elásticos no tienen mayor relevancia. Este directriz puede ser aplicada en situaciones donde las fuerzas de aceleración del fluido no sean significativas.

2.3.5 TEORÍA DEL GOLPE DE ARIETE

Esta última teoría corresponde a los trascendentes rápidos y se tiene en consideración la elasticidad de las paredes de la tubería y del fluido. Aplicable a situaciones donde el cambio de la velocidad del fluido es súbito o repentino, por ejemplo, parada de bombas, en estos casos es necesario considerar la compresibilidad del líquido y la elasticidad de las paredes en las tuberías. Para este tipo de fluido permanente, el fenómeno transitorio se desarrolla en forma de ondas de presión que se disipan en el flujo a la velocidad del sonido. Las ondas de presión son producidas por los cambios repentinos de velocidad y su intensidad varía según las propiedades elásticas anteriormente mencionadas. Las ondas de presión se propagan a lo largo del sistema de tuberías y son principalmente transmitidas y reflejadas en todas las discontinuidades del sistema.

2.3.6 TEORÍA DE LA COLUMNA RÍGIDA DE AGUA

El golpe de ariete más simple para nuestro estudio es analizado por una de las ecuaciones de la teoría de columna rígida de agua que es la ecuación de Michaud-Vensano:

$$\Delta h = \frac{cVT}{gt_c} \quad \text{Ecuación 15}$$

“La ecuación asume que es para maniobras lentas donde el tiempo de cierre de la válvula es mayor al tiempo donde se puede producir la sobrepresión o supresión máxima en el sistema. Además, considera que la velocidad depende del tiempo de forma lineal. Usos prácticos de

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

esta ecuación son para determinar el tiempo de cierre requerido para que las presiones generadas no excedan un límite establecido. Esta ecuación generalmente predice valores mayores a los que se obtienen experimentalmente esto lo hace seguro para utilizar en instalaciones pequeñas. No se debe utilizar en proyectos de gran magnitud” (Piñero, 2014)

Para su aplicación se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones: las paredes de la tubería no sufren ningún tipo de deformación a causa de una elevación súbita de la presión.

La tubería se encuentra llena con fluido en todo momento.

El fluido o líquido es incompresible.

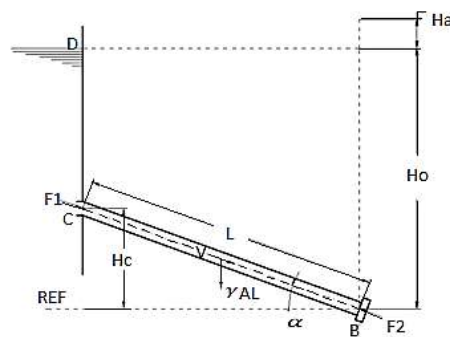
Las pérdidas por fricción son despreciables.

La velocidad del fluido es uniforme en cualquier sección de la tubería.

Presión del fluido uniforme en cualquier sección de la tubería.

El diámetro de la tubería es constante.

Ilustración 4. Equilibrio de las fuerzas para teoría de columna rígida.



Fuente: (Dennis J lussi, 2008)

Se procede a hacer el siguiente análisis equilibrando fuerzas:

H_o = altura en el punto B para la presión del fluido,

H_a = altura producida por el golpe de ariete

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

$\alpha =$ ángulo de inclinación de la tubería

F_1 y $F_2 =$ Fuerzas resultantes en los puntos C y B

2.3.6 FLUJO PERMANENTE O ESTACIONARIO

Sus características principales se ven reflejadas dado el movimiento del fluido y sus propiedades no varían con el transcurrir del tiempo o sus variaciones son pequeñas con respecto a su valor promedio. Las expresiones analíticas que definen el concepto son las siguientes deducciones:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \text{constante} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = 0; \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 17}$$

2.3.7 FLUJO NO PERMANENTE O TRANSITORIO

El flujo es no permanente cuando las condiciones de desplazamiento y las propiedades del fluido si varían con el tiempo.

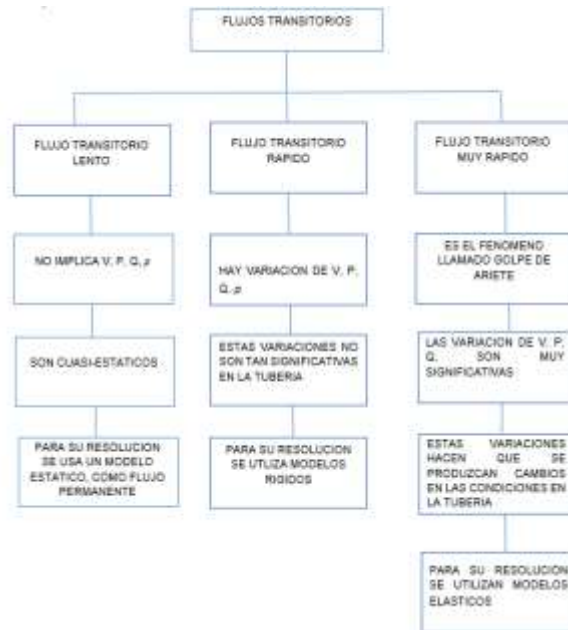
$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq \text{constante} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial T}{\partial t} \neq 0; \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0 \quad \text{Ecuación 19}$$

A los flujos no permanentes o transitorios se los clasifica como se indica en la siguiente figura 5. Para el actual estudio se tomará como flujo transitorio muy rápido ya que se desea estudiar el fenómeno del golpe de ariete.

Ilustración 5. Clasificación de los flujos transitorios.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (R.G, 1994)

2.3.7 FLUJO INCOMPRESIBLE

Se denomina como flujo incompresible a todo fluido en movimiento que conserva su densidad parcialmente invariable en el tiempo, mientras se desplaza en un medio de conducción. Tanto los fluidos en movimiento líquidos o gases son conceptuados como flujos incompresibles.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad \text{Ecuación 20}$$

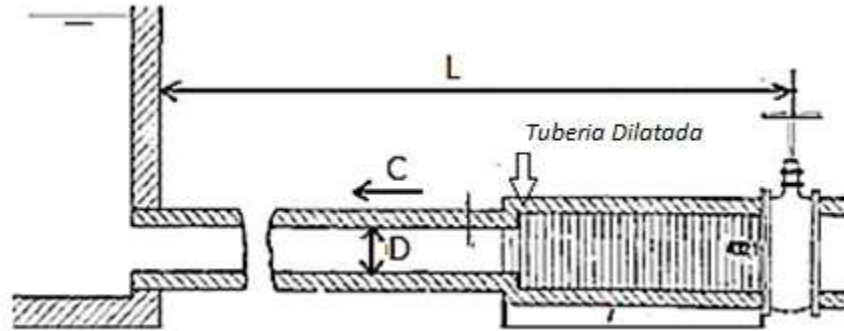
2.3.8 FLUJO COMPRESIBLE

Se denomina como flujo compresible a todo fluido en movimiento que al momento de trasegar en la tubería se altera su densidad en el tiempo. Siendo estas variaciones notables

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

tanto en gases como en líquidos produciendo modificaciones de presión a través de la tubería definiéndose este fenómeno como Golpe de Ariete.

Ilustración 6. Onda de presión de cierre instantáneo de una válvula



Fuente: (Mataix, 1986)

2.4 ECUACIONES BÁSICAS PARA EL CÁLCULO DEL GOLPE DE ARIETE

2.4.1 CELERIDAD DE LA ONDA DE PRESIÓN

La celeridad de la onda de sobrepresión es la rapidez que alcanza al desplazarse de un lugar a otro al interior de la tubería, esto va relacionado con la geometría y el material de la tubería, además de las propiedades elásticas del fluido en otras palabras la viscosidad.

Los parámetros influyentes son:

Geometría. Circular, rectangular, etc.

Condiciones de borde: extremos anclados, enterrados, anclados con juntas de dilatación.

Materiales: PVC, hierro dúctil, hierro fundido, acero, hormigón, roca.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

Para nuestro estudio se tendrá presente los siguientes parámetros:

Geometría: Circular.

Condiciones de borde Extremos anclados.

Material: PVC.

Por lo tanto, tomando en cuenta los parámetros antes mencionados se considerarán las siguientes ecuaciones.

La celeridad de la onda de sobrepresión para tuberías de pared delgada se puede calcular bajo la siguiente ecuación.

$$c = \sqrt{\frac{\frac{E_p}{\rho}}{1 + \left(\frac{E_p}{k}\right)\left(\frac{D}{e}\right)}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Una expresión para una evaluación rápida para el cálculo de Celeridad sabiendo que el fluido es agua, es la siguiente:

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \frac{D}{e}}} \quad \text{Ecuación 22}$$

Dónde:

$$k = \frac{10^{10}}{\varepsilon} \quad \text{Ecuación 23}$$

Tabla 4. Valores de K según el tipo de material

Tipo de material	$\varepsilon \left[\frac{kg}{m^2} \right]$	K
Palastros de hierro y acero	$2 * 10^{10}$	0

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

Fundición	$1 * 10^{10}$	1
Hormigón (sin armar)	$2 * 10^9$	5
Fibroceemento	$1.85 * 10^9$	5.5
PVC	$3 * 10^8$	33.33
PE baja densidad	$2 * 10^7$	500
PE alta densidad	$9 * 10^7$	111.11

Fuente: (Mott, 2006)

2.4.2 PERIODO DE LA TUBERÍA

El periodo de la tubería, es el tiempo que emplea la onda de sobrepresión de un punto a otra en la tubería, generalmente entre una válvula de cierre y el tanque de carga. Para este estudio se utilizará la siguiente fórmula ya que en el presente proyecto no se encuentran instaladas chimeneas de equilibrio.

$$T = \frac{2L}{c} \quad \text{Ecuación 24}$$

2.4.3 TIEMPO DE APERTURA Y CIERRE DE LA VÁLVULA

Es un componente trascendental de establecer, ya que por medio este puede definir si la apertura o cierre de la válvula, es súbito o lento. Si la interrupción es rápida, la válvula quedará completamente cerrada antes de actuar la onda de sobrepresión, por otra parte si el cierre es demasiado lento la onda gozará de tiempo para desplazarse de un extremo a otro, antes del cierre total de la válvula.

De lo cual se pueden tener dos tipos de cierres:

- Cierre Rápido

$$t_c < T \quad \text{Ecuación 25}$$

$$t_c = \text{Tiempo de cierre de la válvula [s]}$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

- Cierre Lento

$$t_c > T \quad \text{Ecuación 26}$$

$$t_c = \text{Tiempo de cierre de la válvula [s]}$$

Si el tiempo que tarda una onda de presión en efectuar la pertinente operación es mayor a $\frac{2L}{c}$ Entonces se concluye que la onda ha logrado nuevamente dirigirse a la válvula y sin embargo la maniobra en la válvula todavía no ha terminado su operación.

- Tiempo de maniobra rápida:

$$T \leq \frac{2L}{c} \quad \text{Ecuación 27}$$

- Tiempo de maniobra lenta

$$T \geq \frac{2L}{c} \quad \text{Ecuación 28}$$

2.4.4 COEFICIENTE DE PÉRDIDAS PARA VÁLVULAS Y ACOPLAMIENTOS.

El método de cálculo para este estudio es similar al anterior y se utiliza la misma ecuación solo que en este caso varía el método de cálculo de K, ya que se reporta de la siguiente manera.

$$k = \left(\frac{L_e}{D}\right) f_t \quad \text{Ecuación 29}$$

Los valores de f_t varían según el diámetro de la tubería y la válvula, como se lo puede apreciar en la Tabla 2. Se puede observar la tabla, En la Tabla 5. en la que se encuentra detallado el valor $\frac{L_e}{D}$, se conoce como relación de Longitud Equivalente y son constantes para la variedad de válvula y acoplamientos.

Tabla 5. Factor de fricción en la zona de turbulencia completa.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción de f	Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f
1/2	0.027	3.5 , 4	0.017

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

3/4	1.025	5	1.016
1	0.023	6	0.015
1.25	0.022	8 -10	0.014
1.5	0.021	12 – 16	0.013
2	0.019	18 - 24	0.012
2.5 , 3	0.018	-	-

Fuente: (Mott, 2006)

2.4.5 SOBREPRESIÓN MÁXIMA

La sobrepresión máxima es producida al momento de cierre instantánea de la válvula, es decir cuando no se da tiempo para que la onda de sobrepresión se traslade a partir de la válvula hasta el depósito y retorne.

- **Cierre rápido**

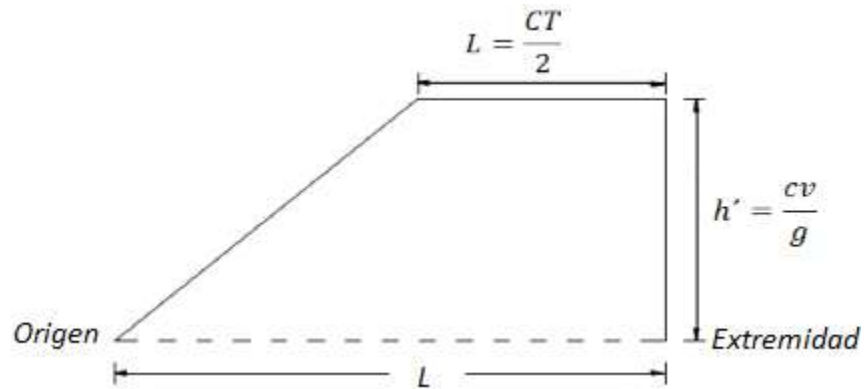
La sobrepresión máxima en la válvula se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$h'_{max} = \Delta h = \frac{cv}{g} \quad \text{Ecuación 30}$$

A lo largo de la tubería la sobrepresión se distribuye conforme se observa en la figura 7.

Ilustración 7. Distribución de la sobrepresión máxima en cierre rápido

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (Azevedo & Acosta, 1975)

- **Cierre Lento**

La sobrepresión máxima en la válvula se puede calcular a través de la siguiente ecuación la cual considera la proporción de la velocidad con T/t_c

$$h'_{max} = \Delta h = \frac{cvt}{gt_c} \quad \text{Ecuación 31}$$

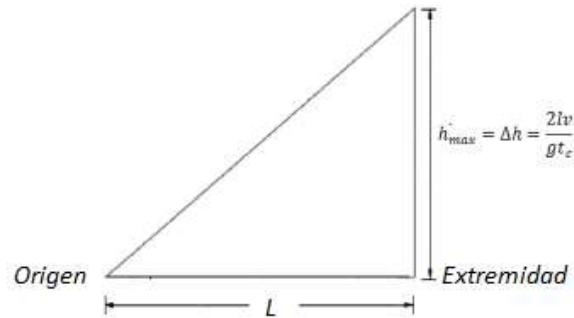
Remplazando la ecuación 30 en la ecuación 24 se obtiene lo siguiente.

$$h'_{max} = \Delta h = \frac{2LV}{gt_c} \quad \text{Ecuación 32}$$

A lo largo de la tubería la sobrepresión se distribuye conforme se observa en la figura 8.

Ilustración 8. Distribución de la sobrepresión máxima en cierre lento.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (Azevedo & Acosta, 1975)

La ecuación anterior también puede ser aplicada para la determinación del cierre a ser adoptado para que no se sobrepase un valor de sobrepresión límite establecido. Esta fórmula arroja valores superiores obtenidos experimentalmente, pero sin embargo se sigue usando por su sencillez y por resultar segura en el diseño.

2.5 VALVULA SOLENOIDE

Es un instrumento accionado eléctricamente, empleado para controlar el flujo de líquidos o gases en posición completamente abierta o cerrada, tomando en cuenta para su óptimo funcionamiento las presiones, temperaturas, la viscosidad del fluido y la adaptabilidad de los materiales usados en la construcción de la válvula involucradas en el proceso en el que será acoplada. La válvula de solenoide cierra por gravedad, por presión o por acción de un resorte; abre por el movimiento de un émbolo operado por la acción magnética de una bobina energizada eléctricamente, o viceversa.

Una válvula de solenoide consiste de dos partes accionantes distintas, pero integrales: un solenoide (bobina eléctrica) y el cuerpo de la válvula fabricado en bronce, latón, acero inoxidable o PVC, dependiendo del fluido a utilizar es el material de la válvula.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Ilustración 9. Válvula solenoide.



Fuente: (Danfoss)

2.5.1 TIPOS DE VÁLVULAS DE SOLENOIDE

Las válvulas solenoide pueden dividirse de manera general, en dos tipos:

- acción directa.
- Operadas por piloto.

También por su construcción, las válvulas solenoide pueden ser:

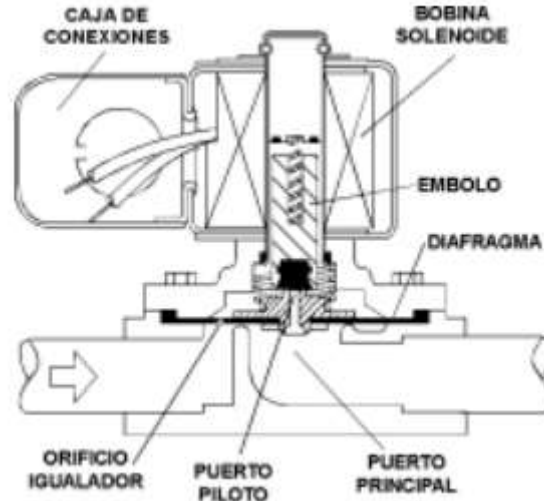
- Normalmente cerradas (NC)
- Normalmente abiertas (NA)

Para el sistema hidroneumático se utiliza una electroválvula operada por piloto.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

2.5.2 OPERADAS POR PILOTO

Ilustración 10. Válvula de solenoide de dos vías, normalmente cerrada, operada por piloto con diafragma.



Fuente: (Valvula Solenoide)

Las válvulas de solenoide operadas por piloto, utilizan una combinación de la bobina solenoide y la presión de la línea; estas requieren un diferencial mínimo de presión de apertura entre la entrada y la salida (aproximadamente 0.5 psi o más), para abrir el puerto principal y mantener al pistón o al diafragma en posición abierta.

Cuando la bobina es energizada, el émbolo es accionado hacia el centro de la bobina, abriendo el orificio piloto. Cuando este orificio se abre, la presión atrapada arriba del diafragma se libera a través del orificio piloto, creando así un desbalance de presión a través del diafragma; la presión abajo ahora es mayor que la presión arriba, forzándolo a subir y abrir el puerto principal. Cuando se desenergiza la bobina solenoide, el émbolo cae y la aguja cierra el orificio piloto, luego, las presiones de arriba y abajo del diafragma se igualan nuevamente, y el diafragma cae cerrando el puerto principal. En algunos diseños de válvulas de solenoide operadas por piloto, se usa un piloto en lugar de diafragma, para cerrar el puerto principal.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

2.5.2.1 FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SOLENOIDE OPERADA POR PILOTO CON DIAFRAGMA NC.

Tensión desconectada de la bobina (cerrada): Al desconectar la tensión, el embolo se desplaza hacia abajo, contra el puerto piloto. La presión se acumula sobre el diafragma a través del orificio de igualador. El diafragma cierra el puerto principal en cuanto la presión sobre el mismo iguala la presión de entrada. La válvula permanece cerrada mientras la tensión se mantiene desconectada.

Tensión conectada a la bobina (abierto): Al aplicar tensión a la bobina, el puerto piloto se abre. Dado que el orificio piloto es más grande que el orificio de igualador, la presión acumulada sobre el diafragma cae y este libera el puerto principal. La válvula permanece abierta mientras se mantiene la presión diferencial mínima necesaria y la bobina continúa recibiendo tensión.

2.5.2.2 FUNCIONAMIENTO DE LA VÁLVULA DE SOLENOIDE OPERADA POR PILOTO CON DIAFRAGMA NA.

Tensión desconectada de la bobina (abierto): Al desconectar la tensión, el embolo se desplaza hacia arriba, contra el puerto piloto. La presión se acumula sobre el diafragma a través del orificio de igualador. El diafragma cierra el puerto principal en cuanto la presión sobre el mismo iguala la presión de entrada. La válvula permanece cerrada mientras la tensión se mantiene desconectada.

Tensión conectada a la bobina (abierto): Al aplicar tensión a la bobina, el puerto piloto se abre. Dado que el orificio piloto es más grande que el orificio de igualador, la presión acumulada sobre el diafragma cae y este libera el puerto principal. La válvula permanece

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

abierta mientras se mantiene la presión diferencial mínima necesaria y la bobina continúa recibiendo tensión.

2.3. Marco normativo

El golpe de ariete, también conocido como onda de choque hidráulico, es un fenómeno que puede ocurrir en sistemas de tuberías cuando se produce un cambio repentino en el flujo de agua, generando presiones transitorias que pueden dañar las tuberías y los equipos asociados. Para prevenir y mitigar este fenómeno, es necesario cumplir con las normativas y estándares establecidos en el área de sistemas de agua. A continuación, se presentan algunas normativas relevantes:

NORMA ISO 17025: Esta norma por la cual se van a regir las practicas a realizar en el laboratorio para el estudio del golpe de ariete, esta norma regirá parámetros y calibraciones del sistema.

Norma ISO 5167: Esta norma especifica los requisitos para la medición de flujo mediante dispositivos de presión diferencial, como orificios, toberas y venturis, utilizados en sistemas de tuberías. Cumplir con esta norma garantiza una medición precisa del flujo, lo que contribuye a prevenir el golpe de ariete al mantener un flujo estable en el sistema.

Norma ANSI/AWWA C700: Esta norma de la American Water Works Association (Denver, 2019) establece los criterios y métodos para la evaluación de la susceptibilidad al golpe de ariete en sistemas de distribución de agua. Cumplir con esta norma ayuda a identificar y mitigar los riesgos asociados con el golpe de ariete en sistemas de agua potable.

Norma ASTM D2774: Esta norma de la American Society for Testing and Materials (ASTM) describe los métodos para la medición del golpe de ariete en sistemas de tuberías. Cumplir con esta norma facilita la evaluación y el control del golpe de ariete en sistemas de tuberías, contribuyendo a la protección de las infraestructuras y equipos.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

Es importante tener en cuenta que el cumplimiento de estas normativas y estándares es fundamental para garantizar la seguridad y eficiencia de los sistemas de agua y tuberías, así como para prevenir daños causados por el golpe de ariete. Además, es recomendable consultar las normativas locales y regionales aplicables, así como buscar asesoramiento especializado en el diseño y operación de sistemas de agua para prevenir y mitigar el golpe de ariete de manera efectiva.

Este marco normativo proporciona una base sólida para abordar el fenómeno del golpe de ariete en sistemas de tuberías, asegurando el cumplimiento de normativas y estándares reconocidos internacionalmente.

3. METODOLOGÍA

3.1. Enfoque y alcance de la investigación

En la metodología propuesta para el desarrollo de este proyecto, se plantea una investigación experimental, la cual tendrá un enfoque cuantitativo. Para obtener la magnitud de este fenómeno se realiza por medio del ensayo en un módulo académico y posteriormente se contrasta con los valores y resultados obtenidos de manera analítica. Estos valores llevan a determinar las causas y efectos presentes en estos sistemas hidráulicos.

El objetivo de este módulo académico al momento de finalizado su ensamblaje y pruebas, permita obtener datos generando ondas de presión, y con esto estudiar variables como la presión, velocidad, energía de presión, energía de velocidad por estrangulamiento rápido de un fluido en movimiento.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

3.2.Población y muestra

Definición de la población

La alternativa de solución para el estudio del golpe de ariete se realizará a través del sistema hidroneumático recreando las diferentes formas de producir el fenómeno y se evaluará su magnitud.

3.2.1. Cálculo y selección de la muestra

Realizar la compra de los materiales adecuados y necesarios para después revisarlos y ensamblarlos de la forma correcta de acuerdo con las características de selección. Ubicar el sistema hidroneumático en el lugar asignado en el laboratorio de mecánica de fluidos.

3.3.Instrumento(s)

Comparar los datos arrojados en las pruebas con la válvula solenoide versus datos experimentales y teóricos encontrados en libro y en internet, para verificar que estos estén dentro del margen de error aceptado y que pueda servir para el aprendizaje adecuado.

3.4.Descripción de procedimientos

Etapa 1. Recopilación de la información.

Realizar la recopilación de información de distintas fuentes como libros, artículos de revistas científicas, proyectos de grado y páginas que brinden conceptos útiles que sean de gran ayuda, aplicaciones, variables, normas y equipos, que fueron necesarios para el estudio del golpe de ariete. Toda esta información se va a usar como punto de partida y soporte para la

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

adquirir los equipos adecuados, además brinda conocimiento de las características y condiciones técnicas del estudio del golpe de ariete.

Etapa 2. Implementación del sistema hidroneumático.

Realizar la compra de los materiales adecuados y necesarios para después revisarlos y ensamblarlos de la forma correcta de acuerdo con las características de selección. Ubicar el sistema hidroneumático en el lugar asignado en el laboratorio de mecánica de fluidos.

Etapa 3. Puesta a punto del banco y realización de pruebas.

Realizar ajustes finales y pruebas para verificar que el sistema esté funcionando de manera óptima y se pueda estudiar el fenómeno de golpe de ariete.

Etapa 4. Revisión y comparación de datos.

Comparar los datos arrojados en las pruebas con datos experimentales y teóricos encontrados en libro y en internet, para verificar que estos estén dentro del margen de error aceptado y que pueda servir para el aprendizaje adecuado.

Etapa 5. Realización del manual de operación.

Realizar un manual de operación en el cual se encuentren las normas de seguridad, así como los pasos y reglas a seguir para el buen uso y funcionamiento el banco en cada prueba.

Etapa 6. Realización del manual de mantenimiento.

Realizar un manual de mantenimiento que indique los procedimientos a seguir al momento en que una pieza del banco falle o al momento de realizar el desarme de alguna pieza de este para limpieza o cambio.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

3.5. Análisis de información

En el estudio del fenómeno del golpe de ariete dentro de un sistema hidroneumático, es fundamental contar con herramientas que permitan el procesamiento eficiente de los datos experimentales y su posterior análisis. Para este propósito, se ha seleccionado MATLAB, una plataforma robusta de cálculo numérico y análisis de datos, que ofrece un conjunto de funcionalidades adecuadas para las necesidades específicas del estudio. A continuación, se detalla el proceso completo de cómo se procesará y analizará la información recolectada, describiendo cada etapa y las técnicas utilizadas.

3.5.1 Recolección y Almacenamiento de Datos

La primera etapa del análisis implica la recolección de datos experimentales provenientes de sensores de presión y otros dispositivos de adquisición de datos que estarán conectados al sistema de tuberías en el que se estudia el golpe de ariete. Para este propósito, se utilizará la capacidad de integración de MATLAB con hardware externo, específicamente con sensores que capturen variables como la presión y el caudal. Los dispositivos, como tarjetas Arduino o sistemas de adquisición de datos (DAQ), permiten la captura continua de los datos durante los experimentos.

El flujo de datos será automatizado a través de MATLAB, almacenando la información en matrices o tablas estructuradas. Este formato es conveniente para el posterior análisis, permitiendo organizar grandes volúmenes de datos en un formato accesible y procesable.

3.5.2. Procesamiento de Datos

Una vez recolectados los datos, el siguiente paso es el procesamiento, que consiste en la limpieza y estructuración de la información. En estudios experimentales, es común que los datos crudos contengan valores atípicos o inconsistencias debido a errores en las

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

mediciones o ruidos externos en los sensores. MATLAB ofrece herramientas avanzadas de filtrado y depuración que permiten eliminar estos errores y normalizar los datos para asegurar la precisión en el análisis posterior.

Se utilizarán funciones de MATLAB como `rmoutliers` para identificar y eliminar valores atípicos, además de filtros de suavización que reduzcan el impacto de ruidos en las mediciones de presión y caudal. Este proceso es esencial para garantizar que los datos finales reflejen con precisión el comportamiento real del sistema y no estén sesgados por errores de medición.

3.5.3. Aplicación de Análisis Cuantitativo

Una vez que los datos estén limpios y preparados, se procederá a realizar el análisis cuantitativo del fenómeno del golpe de ariete. Este proceso implica aplicar fórmulas matemáticas avanzadas que describen el comportamiento de las ondas de presión que se generan cuando el flujo de un fluido se detiene abruptamente dentro de una tubería.

MATLAB permite manejar grandes volúmenes de datos y realizar operaciones numéricas complejas con gran eficiencia. Se utilizarán sus funciones de álgebra lineal y cálculos matriciales para aplicar las ecuaciones de conservación de energía y momentum que gobiernan el golpe de ariete. Entre las variables que se analizarán están:

Presión: La variación de la presión a lo largo del sistema de tuberías.

Caudal: La magnitud del caudal y su comportamiento dinámico ante el cierre de válvulas.

A través de estas funciones, se podrá simular el fenómeno y obtener resultados cuantitativos que describan con precisión las características de las ondas de presión.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

3.5.4 Visualización de Datos

Una parte crucial del análisis es la visualización de los datos obtenidos. MATLAB proporciona herramientas de visualización de alto nivel que permiten generar gráficos en dos y tres dimensiones. En este estudio, se utilizarán gráficos de series temporales para mostrar la variación de la presión y el caudal en función del tiempo.

Estas visualizaciones permitirán identificar patrones en el comportamiento del fluido, como la formación de ondas de presión y su amortiguación a lo largo del tiempo. Además, es posible identificar anomalías en el sistema que no serían visibles a simple vista al observar los datos brutos. Por ejemplo, el comportamiento de las ondas reflejadas en la tubería o picos de presión que puedan causar daños en el sistema hidráulico.

Entre los tipos de gráficos que se generarán están:

- Gráficos de líneas para representar la variación de la presión a lo largo del tiempo.
- Mapas que muestren la distribución de presión y caudal en diferentes puntos del sistema.

3.5.5. Codificación Personalizada

Un aspecto destacado de MATLAB es su capacidad para crear scripts y funciones personalizadas que permiten automatizar tareas específicas dentro del análisis. En este estudio, se desarrollarán scripts que automatizarán el análisis comparativo entre los datos experimentales y los modelos teóricos que describen el golpe de ariete.

Los scripts también servirán para realizar cálculos adicionales, como la comparación entre diferentes escenarios de cierre de válvulas y sus efectos sobre el sistema. Esta capacidad de codificación personalizada es esencial para ajustar el análisis a las necesidades particulares del proyecto y optimizar el flujo de trabajo al momento de realizar el análisis de datos.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

3.5.6. Aplicación de Medidas Estadísticas

Además del análisis cuantitativo, será necesario aplicar medidas estadísticas para validar los resultados obtenidos y comparar los datos experimentales con los modelos teóricos. MATLAB ofrece un conjunto completo de herramientas estadísticas, como el análisis de varianza (ANOVA), que permitirá evaluar si existen diferencias significativas entre las mediciones experimentales y las predicciones teóricas.

También se calcularán medidas de error, como el error cuadrático medio (MSE), para cuantificar la precisión del modelo teórico en la predicción de las variaciones de presión y caudal. Estas medidas estadísticas serán esenciales para determinar la validez del modelo utilizado y para ajustar el diseño experimental en función de los resultados.

3.5.7. Análisis Comparativo y Conclusiones

Finalmente, se realizará un análisis comparativo entre los datos experimentales obtenidos y los resultados teóricos predichos por los modelos hidráulicos. Este análisis es crucial para evaluar la precisión de los modelos utilizados y para identificar cualquier discrepancia entre la teoría y la práctica.

Si se encuentran diferencias significativas entre los datos teóricos y experimentales, será necesario ajustar el modelo o investigar posibles fuentes de error en el experimento. El análisis estadístico ayudará a determinar la magnitud de estas discrepancias y a formular conclusiones sólidas sobre el comportamiento del sistema bajo estudio.

3.6.1 Análisis de consideraciones éticas

Dentro del proyecto que estoy desarrollando en el contexto de la investigación sobre el fenómeno del golpe de ariete, es fundamental aplicar las consideraciones éticas definidas

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

por la Universidad Uniminuto de Bogotá y por la comunidad científica en general. Estas consideraciones no solo garantizan la integridad del proceso investigativo, sino también la protección de las organizaciones y la población involucrada de manera directa o indirecta. A continuación, se describen las principales formas en que se implementarán dichas consideraciones éticas.

3.6.1.1 Cumplimiento de los Principios Éticos Universitarios

La Universidad Uniminuto establece un conjunto de principios éticos que guían la investigación, incluyendo la honestidad académica, la responsabilidad social y el respeto por los derechos humanos. En este sentido, dentro del proyecto:

Honestidad Académica: Se garantizará que todos los datos utilizados en el análisis sean obtenidos de manera legítima y transparente. Cualquier referencia a estudios previos, modelos teóricos o datos externos será adecuadamente citada y referenciada, evitando cualquier forma de plagio o manipulación de la información.

Responsabilidad Social: El impacto potencial de los resultados del proyecto será evaluado en términos de su contribución al bienestar de las organizaciones involucradas. La información será utilizada para mejorar procesos industriales, minimizando riesgos que puedan afectar a la comunidad o al medio ambiente.

Transparencia: Los resultados y conclusiones se comunicarán de forma clara, sin omitir ni alterar información relevante que pueda ser crucial para la toma de decisiones en el contexto de la industria hidroneumática.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

3.6.1.2 Protección de las Organizaciones

En la investigación, es crucial garantizar la confidencialidad y el consentimiento informado de cualquier organización que proporcione datos o permita la recolección de información relevante para el estudio. Para ello:

Confidencialidad de Datos: Se protegerá la información sensible proporcionada por las organizaciones que participen o colaboren en el proyecto. Los datos que pudieran ser utilizados para análisis se anonimizarán, evitando que cualquier información privada o estratégica quede expuesta a terceros.

Consentimiento Informado: Si se requiere la intervención o el uso de instalaciones de alguna organización, se gestionará un consentimiento previo. Las organizaciones serán informadas detalladamente del objetivo del estudio, del uso de los datos recolectados y de los posibles resultados o implicaciones que podrían derivarse del mismo.

Uso Ético de Resultados: Los hallazgos de la investigación no se utilizarán para afectar negativamente a las organizaciones involucradas ni para generar conflictos de intereses. La ética en la divulgación de resultados será una prioridad, asegurando que los datos se empleen exclusivamente para los fines del estudio y la mejora de los procesos evaluados.

3.6.1.3 Consideraciones para la Población Objeto de Investigación

Aunque el estudio está más enfocado en un sistema físico como es el golpe de ariete en un sistema hidroneumático, es importante que cualquier intervención indirecta que afecte a personas sea manejada con especial atención a las implicaciones éticas. Algunas de las formas en que se tendrán en cuenta estas consideraciones incluyen:

Respeto por la Dignidad Humana: Si el estudio en algún momento involucra a personas, como técnicos o empleados de las organizaciones participantes, se garantizará que su

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

integridad y derechos no sean vulnerados. Se evitará cualquier práctica que pueda poner en riesgo la salud física o emocional de los involucrados.

No Maleficencia y Beneficencia: Se aplicará el principio de no maleficencia, evitando que los procedimientos y análisis causen daño a las personas o entidades involucradas. Al mismo tiempo, se buscará generar beneficios tangibles, como la mejora en la seguridad o eficiencia de los sistemas evaluados.

Justicia y Equidad: Se garantizará que cualquier intervención o análisis distribuya equitativamente los beneficios de la investigación. No se beneficiará a un grupo o entidad a expensas de otro, respetando la justicia en la aplicación de los resultados.

3.6.1.4 Cumplimiento de Normas Internacionales y de la Comunidad Científica

Además de las políticas éticas universitarias, la comunidad científica en general ha establecido directrices éticas que también serán aplicadas en este proyecto. Esto incluye la ética de la investigación aplicada a la ingeniería y la ciencia, así como la responsabilidad ambiental:

Sostenibilidad y Responsabilidad Ambiental: Como el estudio aborda un fenómeno relacionado con sistemas hidráulicos, es fundamental garantizar que las intervenciones y experimentos no perjudiquen el entorno ni generen un impacto ambiental negativo. Se considerarán buenas prácticas de sostenibilidad, y los resultados del estudio podrán aportar a la mejora de la eficiencia en el uso del agua y la energía.

Divulgación Responsable de Resultados: En concordancia con la ética científica, los resultados obtenidos serán divulgados de manera justa, evitando cualquier sesgo que pueda tergiversar las conclusiones. Además, se buscará la publicación en foros o revistas académicas que promuevan el acceso libre al conocimiento, siempre protegiendo la propiedad intelectual.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

3.6.1.5 Cumplimiento de la Normativa de Propiedad Intelectual

El uso de datos y tecnología en la investigación, como el software MATLAB y el hardware Arduino, está sujeto a normativas de propiedad intelectual. En este sentido:

Se respetarán las licencias de software y hardware utilizados durante el proyecto.

Se dará el debido reconocimiento a los autores de modelos y herramientas utilizadas en el estudio.

3.6.1.6 Revisión Ética del Proyecto

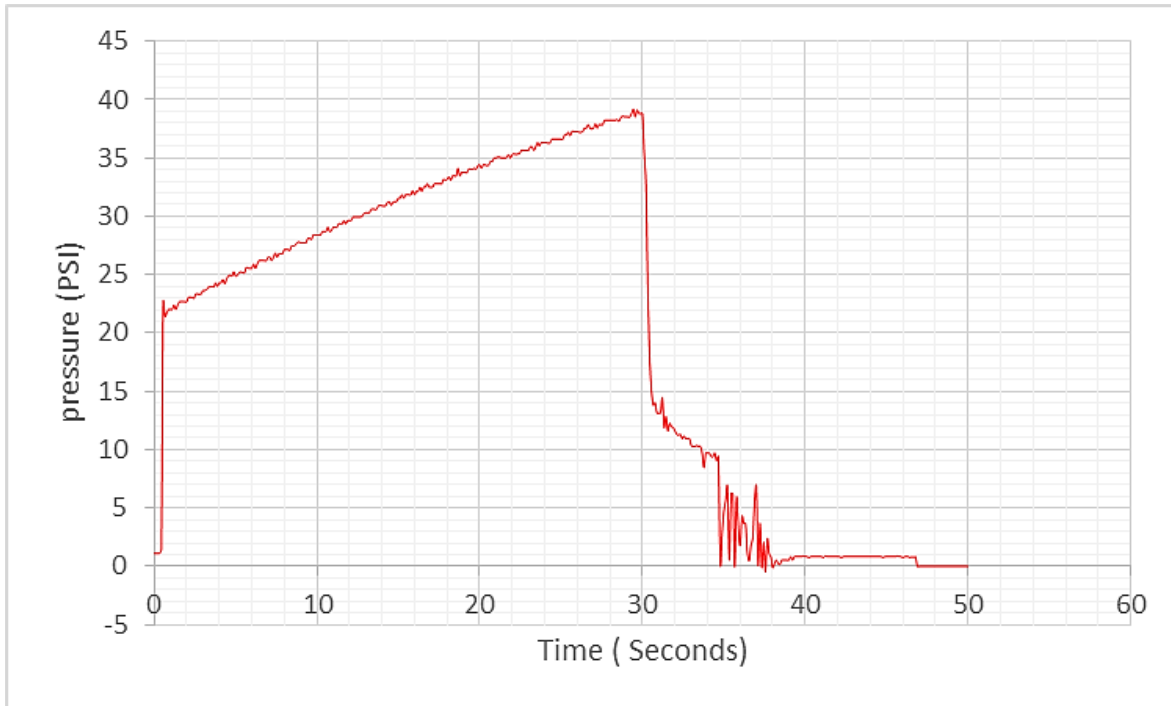
Finalmente, la investigación será sometida a una revisión ética por parte de los comités de investigación de la Universidad Uniminuto. Esto asegurará que se cumple con todos los estándares exigidos tanto a nivel institucional como a nivel de la comunidad científica.

4. RESULTADOS

4.1 GOLPE DE ARIETE POR APAGADO DE UNA BOMBA.

Ilustración 11. Grafica golpe de ariete por apagado de una bomba.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO



Fuente: (Autores)

Tabla 6. Datos Relevantes del golpe de ariete por apagado de una bomba.

Presión descarga (psi)	Presión Máxima pos apagado (psi)	Presión mínima (psi)	Presión estabilización (psi)	Caudal (l/s)
38.812	6.848	-0.044	0.836	0.62

Fuente: (Autores)

$$Error\% = \frac{x_{experimental} - x_{teorico}}{x_{experimental}} * 100$$

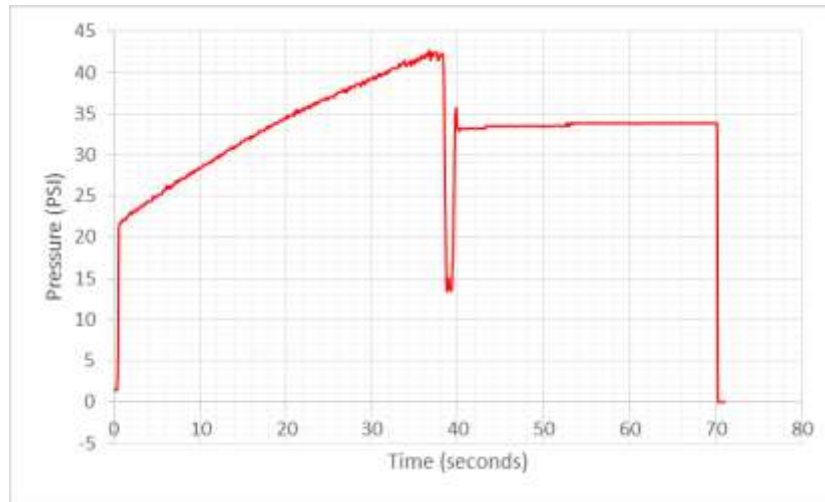
$$Error\% = \frac{6.892 - 4.33}{6.892} * 100$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

$$Error\% = 37.17 \%$$

4.2 GOLPE DE ARIETE POR SWITCHEO.

Ilustración 12. Grafica golpe de ariete por switcheo con una bomba funcionando.



Fuente: (Autores)

Tabla 7. Datos Relevantes del golpe de ariete por switcheo con una bomba funcionando.

Presión descarga (psi)	Presión antes del cierre (psi)	Presión Máxima pos cierre (psi)	Presión mínima (psi)	Presión estabilización (psi)	Caudal (l/s)
40.132	13.519	35.733	32.874	33.827	0.183

Fuente: (Autores)

$$Error\% = \frac{x_{experimental} - x_{teorico}}{x_{experimental}} * 100$$

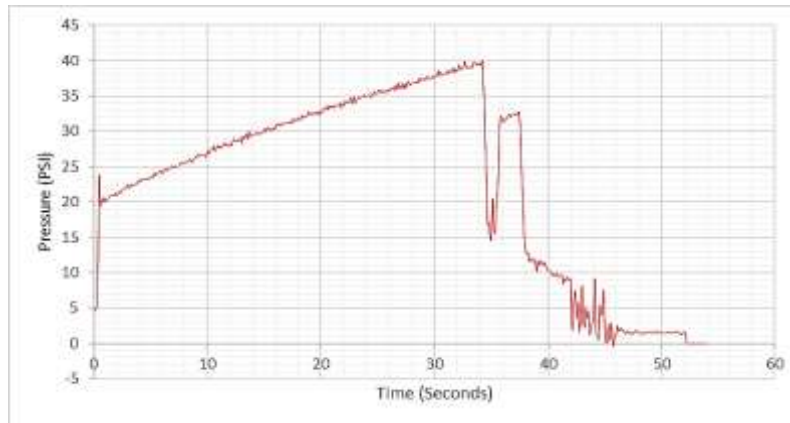
$$Error\% = \frac{|2.859 - 4.33|}{2.859} * 100$$

$$Error\% = 51.45 \%$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

4.3 GOLPE_ARIETE_B1_SWITCH+OFF_PMAX

Ilustración 13. Grafica golpe de ariete switch+off_pmax.



Fuente: (Autores)

Tabla 8. Datos relevantes del golpe de ariete switch+off_pmax.

Presión descarga (psi)	Presiones producidas por Switcheo			Presiones producidas por apagado de la bomba.				Caudal (l/s)
	Presión pre cierre (psi)	Presión Máxima (psi)	Presión mínima (psi)	Presión pre apagado(p si)	Presión máxima(psi)	Presión mínima(psi)	Presión estabilización (psi)	
40.059	14.619	20.484	15.572	32.727	9.194	-0.044	1.496	0.7074

$$Error\% = \frac{x_{experimental} - x_{teorico}}{x_{experimental}} * 100$$

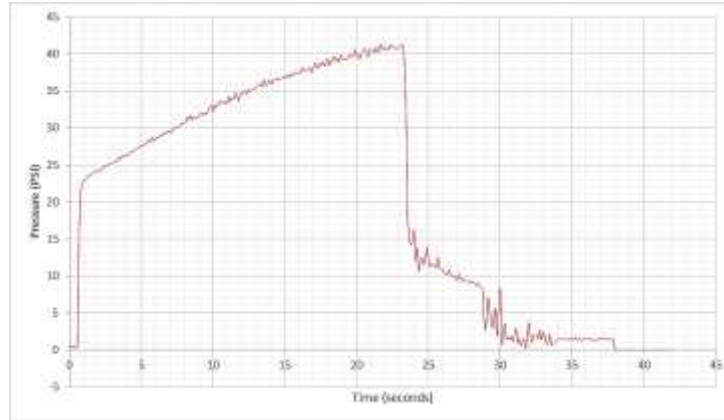
$$Error\% = \frac{6.892 - 4.33}{6.892} * 100$$

$$Error\% = 37.17 \%$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

4.4. GOLPE DE ARIETE POR APAGADO DEL CONJUNTO DE BOMBAS.

Ilustración 14. Grafica golpe de ariete por apagado del conjunto de bombas.



Fuente: (Autores)

Tabla 9. Datos Relevantes del golpe de ariete por apagado del conjunto de bombas.

Presión descarga (psi)	Presión Máxima pos apagado (psi)	Presión mínima (psi)	Presión estabilización (psi)	Caudal (l/s)
41.232	8.167	0.176	1.422	0.7184

Fuente: (Autores)

$$Error\% = \frac{x_{experimental} - x_{teorico}}{x_{experimental}} * 100$$

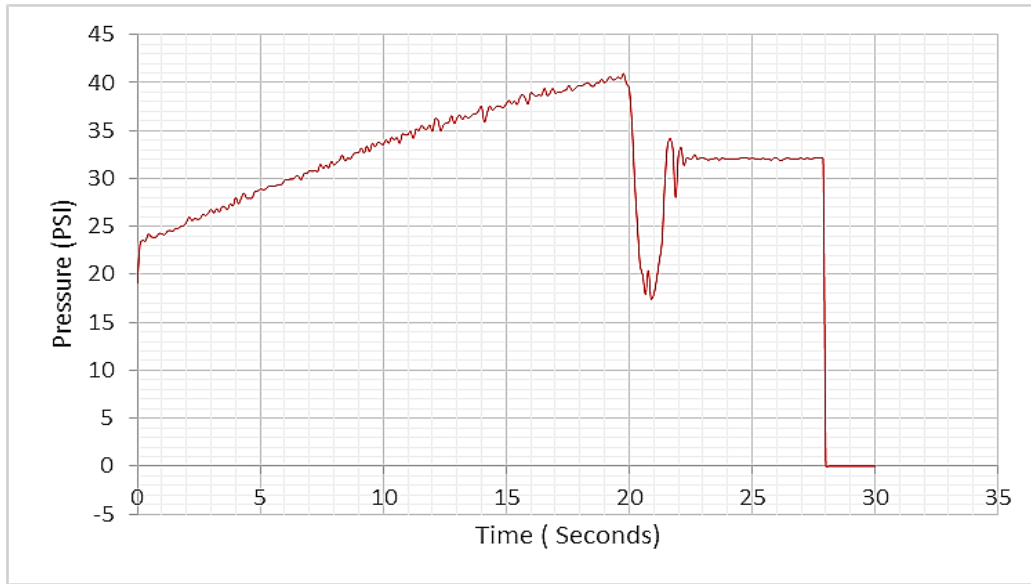
$$Error\% = \frac{7.991 - 2.08}{7.991} * 100$$

$$Error\% = 73.97\%$$

4.5 GOLPE DE ARIETE POR SWITCHEO DEL CONJUNTO DE BOMBAS.

Ilustración 15. Grafica golpe de ariete por switcheo del conjunto de bombas.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



Fuente: (Autores)

Tabla 10. Datos relevantes del golpe de ariete por switcheo del conjunto de bombas.

Presión descarga (psi)	Presión pre cierre (psi)	Presión Máxima pos cierre (psi)	Presión mínima (psi)	Presión estabilización (psi)	Caudal (l/s)
40.938	17.918	34.194	28.035	32.067	0.2482

Fuente: (Autores)

$$Error\% = \frac{x_{experimental} - x_{teorico}}{x_{experimental}} * 100$$

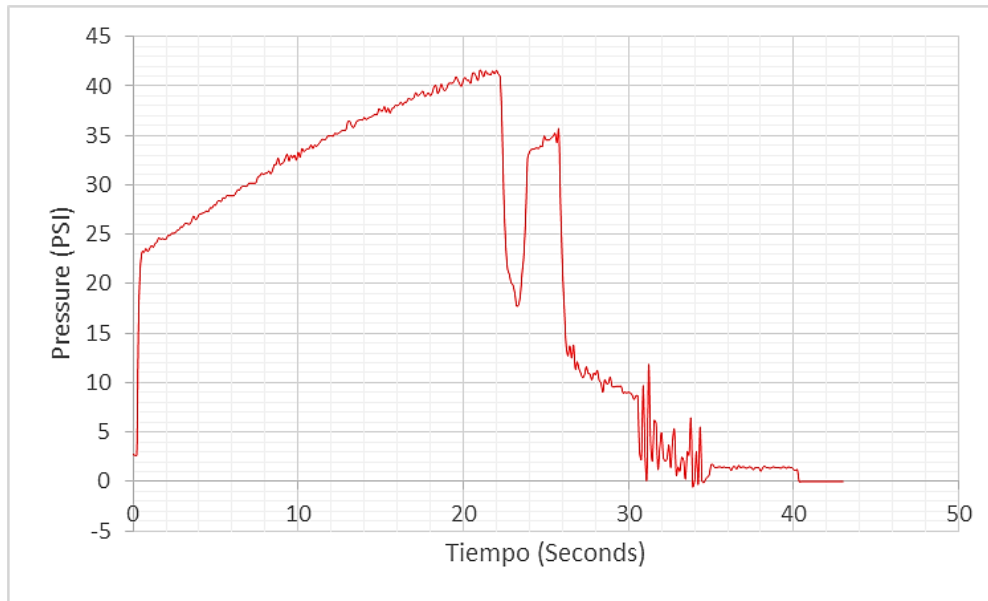
$$Error\% = \frac{6.159 - 2.08}{6.159} * 100$$

$$Error\% = 66.23 \%$$

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

4.6 GOLPE ARIETE SWITCH+OFF PMAX DOS BOMBAS

Ilustración 16. Grafica golpe ariete switch+off pmax dos bombas.



Fuente: (Autores)

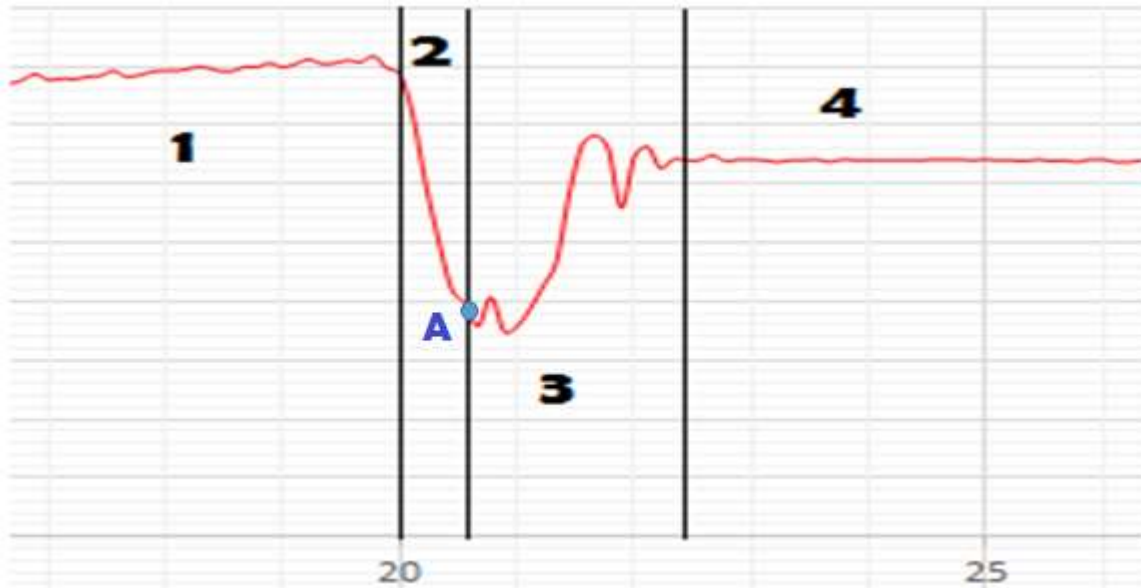
Tabla 11. Datos Relevantes del golpe ariete switch+off pmax dos bombas.

Presión descarga (psi)	Presiones producidas por Switcheo			Presiones producidas por apagado de la bomba.				Caudal (l/s)
	Presión pre cierre (psi)	Presión Máxima (psi)	Presión mínima (psi)	Presión pre apagado (psi)	Presión máxima (psi)	Presión mínima (psi)	Presión estabilización (psi)	
40.938	17.771	35.587	32.654	27.742	11.833	-0.484	1.422	0.8509

Fuente: (Autores)

Ilustración 17. Etapas del golpe de ariete producido por apertura y cierre de una válvula

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO



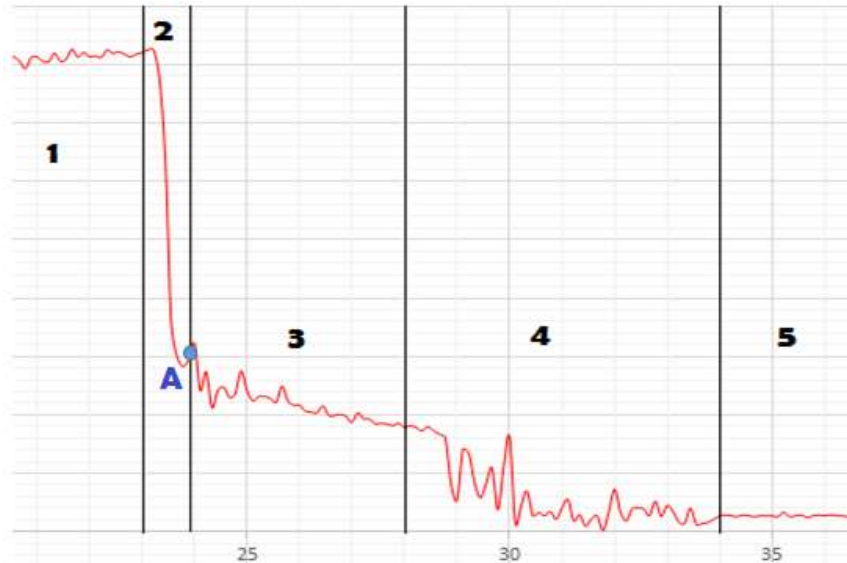
Fuente: (Autores)

- **Zona 1 Precarga del sistema:** En esta zona el sistema está presurizándose hasta alcanzar la presión previamente establecida, en nuestro sistema es 40 psi.
- **Zona 2 Apertura válvula solenoide:** Posteriormente el sistema alcanza la presión deseada se realiza la apertura de la válvula solenoide cabe resaltar que las bombas siguen en operación, como se evidencia en la figura se produce una caída de presión.
- **Zona 3 Golpe de ariete:** En el punto A se produce el cierre de la válvula solenoide produciendo una alteración violenta de energía cinética en energía de presión como se evidencia en la figura donde podemos distinguir tres picos de presión donde el líquido en este caso experimenta esfuerzos de compresión y expansión antes de llegar a estabilizarse.
- **Zona 4 Estabilización del sistema:** En esta zona toda la energía de presión ha sido disipada por las paredes de la tubería por ejemplo en forma de vibración, y las bombas

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO

sigues en funcionamiento impulsando liquido lo que ayuda a estabilizar y comenzar de nuevo con el proceso de precarga del sistema.

Ilustración 18. Etapas del golpe de ariete producido por apagado de bombas.



Fuente: (Autores)

- **Zona 1 Precarga del sistema:** En esta zona el sistema está presurizándose hasta alcanzar la presión previamente establecida, en nuestro sistema es 40 psi
- **Zona 2 Apertura válvula solenoide:** Posteriormente el sistema alcanza la presión deseada se realiza la apertura de la válvula solenoide cabe resaltar que las bombas siguen en operación, como se evidencia en la figura se produce una caída de presión.
- **Zona 3 Transición:** Luego de la caída de presión en el punto A se procede a simular una parada abrupta de las bombas, en esta zona el fluido experimenta una reducción súbita en su velocidad.
- **Zona 4 Golpe de ariete:** Al existir una alteración brusca en la velocidad del fluido la presión comienza a disminuir por debajo de la presión atmosférica seguido a esto fluido sigue circulando intentando recuperar la energía proporcionada por las bombas lo que produce compresiones y expansiones súbitas como se muestra en la figura.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO

- **Zona 5 Estabilización del sistema:** En esta zona toda la energía de presión ha sido disipada por las paredes de la tubería por ejemplo en forma de vibración.

5. CONCLUSIONES

1. La prueba de “switchero electroválvula” que genero mayor delta de presión y por ende un golpe de ariete mayor fue en la que se utilizaron dos bombas con una magnitud de 6,159 psi y un caudal de prueba de 0,2482 l/s
2. La prueba de “apagado de bomba” que genero mayor delta de presión y por ende un golpe de ariete mayor fue en la que se utilizaron dos bombas con una magnitud de presión máxima de apagado de 8,167 psi y presión mínima de apagado de 0,176 psi un caudal de prueba de 0,7184 l/s
3. La prueba de “switchero + apagado de bomba” que genero mayor delta de presión y por ende un golpe de ariete mayor fue en la que se utilizaron dos bombas con una magnitud de delta de presión en el swicheo de 5,351 psi, presión máxima de apagado de 11,833 psi, presión mínima de apagado de -0,484 psi
4. Para las pruebas de vacío no se tiene un error calculado dado que el análisis teórico se realizó para generar golpe de ariete por medio de una apertura o cierre de válvula.
5. Los cálculos teóricos se utilizaron valores nominales, con lo cual se diferencian notoriamente de los valores de puesta en funcionamiento del equipo.
6. Dato a destacar es el delta de presión producido en el apagado de bombas es (12.317 psi) considerablemente mayor al delta de presión producido por la apertura y cierre de una válvula (6,159 psi) con dos bombas en funcionamiento, fenómeno que el sistema presenta al tratar de recuperarse del súbito cambio de la velocidad del fluido, por lo tanto, a mayor presión proporcionada por las bombas el fenómeno del golpe de ariete será mayor en magnitud y más destructivo por lo cual es uno de los datos críticos al momento de diseñar sistemas hidráulicos industriales.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA
HIDRONEUMATICO

6. Recomendaciones

1. El modulo para el estudio del fenómeno del golpe de ariete funciona a voltaje de 110 V.
2. Al momento de hacer el switcheo de la electroválvula para generar el golpe de ariete se recomienda realizarlo de manera pausado para que la tarjeta arduino uno pueda recopilar toda la información arrojada por el sensor.
3. El banco se puede adecuar para hacer el estudio del fenómeno de cavitación.
4. Se recomienda a manera de innovar y actualizar cada vez más los equipos en pro de un mejoramiento, implementar dispositivos como controladores lógicos programables (PLC) el cual brindara una lectura más eficaz en tiempo de respuesta real a comparación de la tarjeta arduino uno usada para este modelo.
5. Sería idóneo para una mayor visibilidad del fenómeno extender la longitud de la tubería para apreciar en mayor magnitud el golpe de ariete por switcheo de una electroválvula.

7. Referencias

Rodriguez Calderon, W., & Pallares Muñoz, M. R. (3 de Diciembre de 2007). *Universidad nacional de colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/18909/1/14850-44708-1-PB.pdf>

Arenas Arce, L. (2014). *Universidad Tecnologica de Colombia*. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4970>

Azevedo, N., & Acosta, A. (1975). *Teoría del Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en Ingeniería Hidraulica*.

Bombon Lascano, E. P. (2016). *Repositorio Digital Universidad de Ambato*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23073>

Brunone, B. G. (2010). Water hammer: Practical solutions. *Journal of Hydraulic Engineering*, . 136(3), 139-147.

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO.

- ÇENGEL, Y. A., & CIMBALA, J. M. (s.f.). *MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y aplicaciones*. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Danfoss. (s.f.). *Danfoss Engineering tomorrow*. Recuperado el 21 de mayo de 2017, de http://files.danfoss.com/technicalinfo/dila/04/IC.PD.100.C9.05_EV220A_6-50_RJA.pdf
- Dennis J Iussi. (2008). *Researchgate*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2016, de https://www.researchgate.net/figure/277151442_fig1_Figura-24-Equilibrio-de-fuerzas-para-la-teoria-de-columna-rigida-de-agua
- Denver, W. H. (2019). *American Water Works Association*. Obtenido de American Water Works Association.
- EVANS. (s.f.). Recuperado el 12 de abril de 2017, de <http://www.evans.com.mx/PDF.ashx?CodigoArticulo=EQTH-025HE&IdLenguaje=1&ImprimirGrafica=N>
- Ghidaoui, M. S. (2005). Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D., & Axworth A review of water hammer theory and practice. *Applied Mechanics Reviews*. 58(1),49-76.
- Gonzalez Casas, F., Zamudio Huertas, E., & Garcia Ubaque, C. A. (18 de Agosto de 2015). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/viewFile/10381/11738>
- Gonzalez Martinez, J. D., & Bernal Restrepo, J. H. (19 de Agosto de 2015). *Porticus Repositorio Institucional*. Obtenido de <http://porticus.usantotomas.edu.co:8080/handle/11634/563>
- Hunt, B. (2020). Water hammer: The classic transients. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 11(3).
- IMCOSA Importaciones Cortes, S.A. de C.V. (s.f.). Recuperado el 21 de mayo de 2017, de <http://www.imcosamex.com/nueva/wp-content/uploads/2013/07/funcionan-valvulas-solenoides.pdf>
- Ingenieria Rural*. (s.f.). Recuperado el 26 de abril de 2017, de <http://www.ingenieriarural.com/Hidraulica/Temas/TablaRugosidadAbsolutaMateriales.pdf>
- Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidroeléctricas*. Madrid, España: Ediciones del Castillo S.A.
- Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ª ed.). México: Pearson Prentice Hall.
- NTC 1500, N. T. (s.f.). (E. p. (ICONTEC), Editor) Recuperado el 5 de abril de 2017, de <https://es.slideshare.net/farnebar70/ntc-1500-cdigo-colombiano-de-fontanera>

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO.

Perez Carmona, R. (2001). *Diseño de instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones* (3 ed.). ECOE EDICIONES.

Piñero, A. (2014). El Fenómeno del Golpe de Ariete: Causas, Efectos y Prevención. Recuperado el 24 de Enero de 2018

Quiroga Mendez, J. E., Sierra Gallo, C. A., & Biancha Gutierrez, G. E. (5 de Noviembre de 2013). *Revista Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas UIS*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/3454>

R.G, A. J. (1994). *Transitorios y Oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. México.

Sousa, J. R. (2018). Water hammer control in long pipelines using a pressure management strategy. *Urban Water Journal*, . 15(9), 859-870.

Rodriguez Calderon, W., & Pallares Muñoz, M. R. (3 de Diciembre de 2007). *Universidad nacional de colombia*. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/18909/1/14850-44708-1-PB.pdf>

Arenas Arce, L. (2014). *Universidad Tecnológica de Colombia*. Obtenido de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/handle/11059/4970>

Azevedo, N., & Acosta, A. (1975). *Teoría del Golpe de Ariete y sus Aplicaciones en Ingeniería Hidráulica*.

Bombon Lascano, E. P. (2016). *Repositorio Digital Universidad de Ambato*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/23073>

Dennis J lussi. (2008). *Researchgate*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2016, de https://www.researchgate.net/figure/277151442_fig1_Figura-24-Equilibrio-de-fuerzas-para-la-teoria-de-columna-rigida-de-agua

Fernando, G. N. (2008). *E-archivo*. Recuperado el 2008, de E-archivo: <http://hdl.handle.net/10016/5389>

Gonzalez Casas, F., Zamudio Huertas, E., & Garcia Ubaque, C. A. (18 de Agosto de 2015). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/viewFile/10381/11738>

Gonzalez Martinez, J. D., & Bernal Restrepo, J. H. (19 de Agosto de 2015). *Porticus Repositorio Institucional*. Obtenido de <http://porticus.usantotomas.edu.co:8080/handle/11634/563>

Gutierrez, H. (29 de Marzo de 2013). *La roca madre hg*. Recuperado el 07 de Noviembre de 2016, de <http://larocamadrehg.blogspot.com.co/2013/03/golpe-de-ariete-o-pulso-de-zhukowski.html>, "proceso del 20golpe de ariete con llave de paso"

INGENIERIA DE FLUIDOS. (s.f.). Recuperado el 10 de enero de 2017, de <https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMÁTICO.

Mataix, C. (1986). *Mecánica de fluidos y máquinas hidroeléctricas*. Madrid, España: Ediciones del Castillo S.A.

Mendez, M. V. (1997). *Tuberías a presión en sistemas de abastecimiento de agua*. Caracas, Venezuela.

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ª ed.). México: Pearson Prentice Hall.

Quiroga Mendez, J. E., Sierra Gallo, C. A., & Biancha Gutierrez, G. E. (5 de Noviembre de 2013). *Revista Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas UIS*. Recuperado el 01 de Noviembre de 2016, de <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/3454>

R.G, A. J. (1994). *Transitorios y Oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. México.

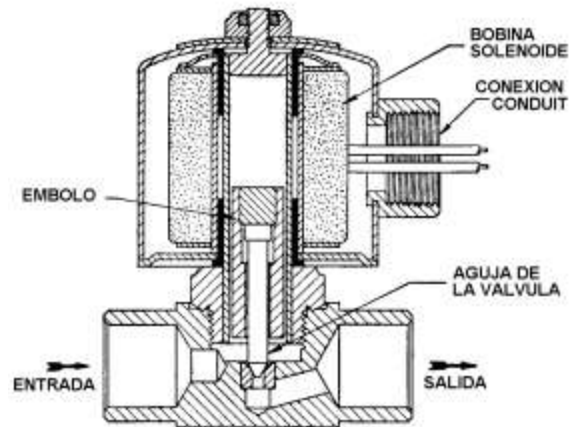
Streeter, V. L. (2000). *Mecánica de Fluidos* (9ª ed.). Bogotá: MCGRAW-HILL.

Anexos

ANEXO A. VALVULAS SOLENOIDES DE ACCIÓN DIRECTA Y ACCION INDIRECTA

VALVULA SOLENOIDE DE ACCIÓN DIRECTA

Ilustración 19. Válvula de solenoide típica de acción directa.



Fuente: (Valvula Solenoide)

El solenoide de acción directa, se maneja en válvulas con baja capacidad y conexiones de tamaño pequeño. El émbolo está acoplado mecánicamente a la aguja de la válvula. Al energizar la bobina, el émbolo sube al centro de la misma, subiendo la aguja. La operación de este tipo de válvula depende únicamente de la potencia del solenoide, para un diferencial de presión definido, el tamaño de su conexión está restringido por el tamaño de la bobina. No es común en sistemas de altas presiones, debido a la necesidad de una bobina de gran tamaño para contra-actuar el gran diferencial de presión. Este tipo de válvula opera desde una presión diferencial de cero, hasta su Diferencial Máximo de Presión de Apertura independientemente de la presión en la línea. Para conservarla abierta, no se requiere caída de presión a través de la válvula.

FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS ACCIÓN DIRECTA NC.

Bobina con tensión desconectada (válvula cerrada): Cuando se desconecta la tensión de la bobina, el embolo de la válvula desciende y presiona contra el orificio de la válvula por acción del muelle de cierre o la presión del medio. La válvula permanecerá cerrada mientras que la bobina no reciba tensión. Bobina con tensión conectada (válvula abierta): Cuando la bobina recibe tensión, el embolo asciende y libera el paso a través del orificio de la válvula. La válvula permanecerá abierta y permitirá el paso a través de ella mientras que la bobina reciba tensión.

Nota: Mientras más grande es el diferencial de presión entre la entrada y la salida, más difícil es abrir la válvula.

FUNCIONAMIENTO DE LAS VÁLVULAS ACCIÓN DIRECTA NA.

Bobina con tensión desconectada (válvula abierta): Cuando la bobina no recibe tensión, el orificio de la válvula se abre por acción del embolo, liberando el paso a través del orificio. La válvula permanecerá abierta mientras que la tensión de alimentación continúe desconectada.

Bobina con tensión conectada (válvula cerrada): Cuando la bobina recibe tensión, el embolo desciende y la aguja de la válvula presiona contra el orificio de la válvula cerrando el paso del orificio. La válvula permanecerá cerrada mientras que la bobina reciba tensión.

ANEXO B. VALORES DEL FACTOR DE PROYECCIÓN DE VARIACIÓN EN LA DEMANDA DE REDES

Tabla 12. factor de proyección de variación en la demanda de redes.

Valor de kp	Consumo en (<i>l/dia</i>)
10	<50.000
9	50.001<K<100.000
8	>100.001

Fuente: Método de dotaciones gaceta oficial 4044 norma sanitaria

ANEXO C

Tabla 13. Evaluación de consumo

Industrias	80 litros/trabajador
Comercio, mercancías secas, casas de abastos, peluquerías y pescaderías	20 litros/ m^2 mínimo 400 litros/día
Mercados	15 litros / m^2
Viviendas	200 litros/ habitante /día a 250 litros/ habitante/día
Universidades	50 litros / persona/ día
Internados	250 litros / persona/día
Hoteles (a)	500 litros/ habitación / día
Hoteles (b)	250 litros/ cama/ día
Oficinas	90 litros / persona/ día
Cuarteles	350 litros/ persona/ día
Restaurantes	4 litros/ día / comida
Hospitales	600 litros / personas/día
Prisiones	600 litros/ personas/ día
Lavanderías	48 litros /kg de ropa
W.C públicos	50 litros/ hora

Fuente: (NTC 1500, s.f.)

ANEXO D

Tabla 14. Presiones Estandarizadas Para Sistemas Hidroneumáticos

CAPACIDAD (psi)
Capacidad en 20 – 40 psi
Capacidad en 30 – 50 psi
Capacidad en 40 – 60 psi

Fuente: (Tanque Hidroneumatico Hydro-MAC[®] Horizontal 25 Litros)

ANEXO E

Tabla 15. Ciclos De Encendidos Recomendados (Para Motores De Superficie No Sumergidos)

Numero de ciclos por hora	T(minutos)	HP(potencia)
50	1.2	1 a 3
33	1.8	3 a 5
30	2	5 a 7.5
20	3	7.5 a 15
15	4	15 a 30
10	6	>30

Fuente: (Perez Carmona, 2001)

ANEXO F

Tabla 16.Rango de presiones y factor función de las presiones de pérdida

Rango de presiones en psi	Factor (F)
20 a 40	2.73
30 a 50	3.23
40 a 60	3.74

Fuente: (Perez Carmona, 2001)

ANEXO G

Tabla 17. Selección bomba por rango de presión

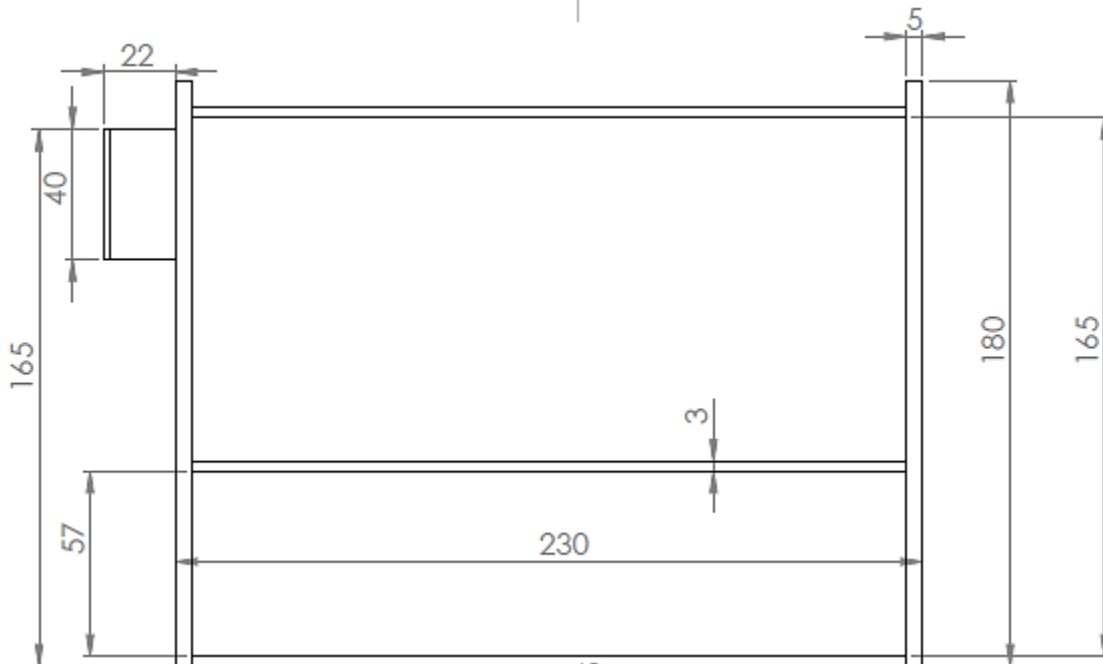
Modelo	Rango de presión - psi				Monofásicos
	20- 40 Gal/min	30- 50 Gal/min	40- 60 Gal/min	60- 80 Gal/min	
JS1-1/2 HF -15P	14	13	-	-	
JS1-1/2 HF - 42	14	13	-	-	
JS1-3/4 HF – 42	16	15	14	-	
JS1-1.0 HF – 42	20	19	18	-	
JS1-3/4 HF – 82	16	15	14	-	
JS1-1.0 HF - 82	20	19	18	-	

Fuente: (Perez Carmona, 2001)

ANEXO H PROCEDIMIENTO DE MONTAJE DEL SISTEMA HIDRONEUMATICO.

Para el procedimiento de montaje del módulo se realizó la estructura del banco con lamina tipo **Coll Roll calibre 16** con soportes al interior de su esqueleto de tubo de 1" cuadrado el cual le da mayor resistencia y estabilidad a la estructura, se realizó bajo las siguientes medidas indicadas a continuación:

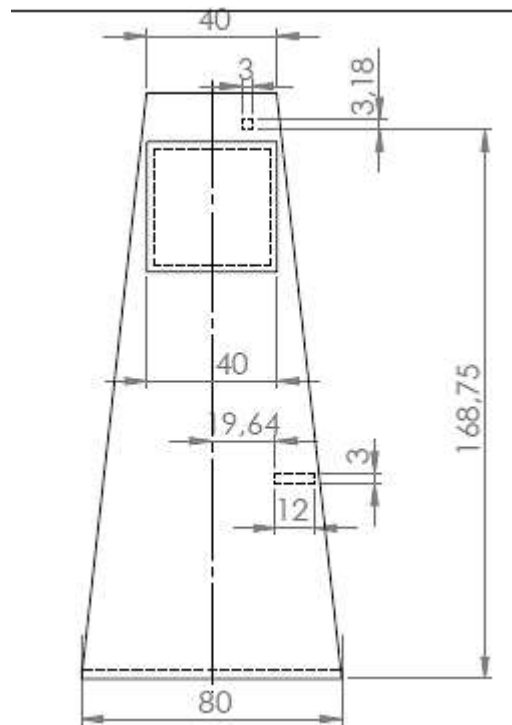
Figura 1. Plano estructura del módulo vista frontal



Fuente: (Autores)

Figura 2. Plano estructura del módulo vista lateral derecha

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO.



Fuente: (Autores)

Teniendo el soporte en donde se iban a montar los equipos para conformar el modulo total para el estudio del golpe de ariete, se continuo con la instalación de las bombas de 0,5 HP y sus respectivas válvulas anti-retorno para la protección de golpe de ariete.

ANEXO I. CODIGO DE ADQUISICION DE DATOS.

Desarrollo del código en lengua C en Matlab para adquisición de datos y posteriormente graficar y guardar un registro en Microsoft office Excel.

```
clc

close all

clear          % <----- No es necesario all en el clear

delete(instrfind({'Port'},{'COM7'}));

ar=arduino('COM7');

Fs=9; %frecuencia de muestreo

N=900; %tamaño del vector

y=zeros(N,1); %vector

t=linspace(0, (N-1)/Fs,N); %<-----Cambie Aqui la forma de t, la puse transpuesta

h1=line(nan,nan,'Color','r','Linewidth',2);

ylim([-5 60])

xlim([0 (N/Fs)])

grid

Stop=1;

uicontrol('Style','Pushbutton','String','Parar','Callback','Stop=0;')

tic

cont=0;

while Stop && cont<length(y)
```

ESTUDIO DEL MODELO DE GOLPE DE ARIETE MEDIANTE UN SISTEMA HIDRONEUMATICO.

```
if toc > 1/Fs

    tic

    cont=cont+1; %<---no desplazarse

    y(cont)=analogRead(ar,0)*5/1023; %<---- cambie el sentido de inicio

    y(cont)=-15+15*y(cont);    %<--- valor de presion

    set(11,'XData',t,'YData',y)

    ylabel('Presion [PSI]')

    xlabel('Tiempo (s)')

    title('Golpe_Ariete_Switch+Off_PMax_Dos_Bombas')

    drawnow

end

end

Variable_Matlab=[t,y];

xlswrite('Golpe_Ariete_Switch+Off_PMax_Dos_Bombas.xlsx',Variable_Matlab,'hoja1','A2');
```