



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIONES HIDRÁULICAS CON FOCO
EN PREVENCIÓN DE GOLPE DE ARIETE**

POR

PAULO IGNACIO MUÑOZ MOLINA

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Oscar Farías Fuentes

Profesor Co - guía:
Ing. Andrés Escalona Inzunza

Diciembre 2023
Concepción (Chile)

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	ii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Nomenclatura	vii
Resumen	ix
Abstract	x
Agradecimientos.....	xi
1 Introducción	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Hipótesis	2
1.4 Objetivos.....	4
1.5 Alcances del proyecto.....	4
1.6 Metodología.....	5
1.6.1 Etapa 1: Guía para seleccionar un sistema de protección.	5
1.6.2 Etapa 2: Evaluación del caso de estudio.	5
2 Descripción del golpe de ariete	7
2.1 Conceptos generales	7
2.1.1 Definición de golpe de ariete	7
2.1.2 Origen de un golpe de ariete	8
2.1.3 Efectos del golpe de ariete en sistemas hidráulicos	9
2.1.4 Dispositivos de protección utilizados en la industria.....	11
2.2 Ecuaciones constitutivas de un golpe de ariete	14
2.2.1 Método de resolución de ecuaciones: Método de las Características	15
2.3 Software para el cálculo de golpe de ariete	18
2.3.1 Software Allievi	18
3 Dimensionamiento de un sistema de protección	19
3.1 Guía de selección.....	19
3.1.1 Volumen de un estanque amortiguador	20
3.1.2 Presión de hinchado	22

3.1.3 Rango de operación.....	22
3.1.4 Diagrama de flujo para seleccionar un estanque amortiguador	22
3.1.5 Recomendaciones para la instalación y prevención de un golpe de ariete	24
3.2 Caracterización del caso de estudio.....	26
3.2.1 Trazado del sistema de cañerías.....	26
3.2.2 Características del fluido.....	30
3.2.3 Características de bombas.....	30
3.2.4 Estanques de distribución y descarga	33
3.2.5 Sistema de protección de golpe de ariete del caso de estudio.....	35
3.3 Modelación del sistema en Allievi	37
3.3.1 Condiciones iniciales	37
3.3.2 Redimensionamiento del sistema de protección para el caso de estudio.....	38
3.3.3 Configuración de información en el programa	39
3.4 Análisis de resultados	39
3.4.1 Modelación de caso 1: Encendido de bombas	40
3.4.2 Modelación de caso 2: Apagado de bombas.....	40
3.4.3 Modelación de caso 3: Apertura de válvula.....	40
3.4.4 Modelación de caso 4: Cierre de válvula.....	40
3.4.5 Presiones máximas y mínimas	45
4 Conclusiones	47
Referencias	48
Anexo A: Tablas y esquemas.....	52
Anexo B: Formulas y cálculos complementarios.....	58
B.1 Formulas para planilla de cálculo.....	58
B.2 Programa EES para dimensionamiento de un estanque amortiguador.....	64
Anexo C: Consideraciones generales.....	67
C.1 Factor de fricción seleccionado	67
C.2 Modelo estático, rígido y elástico.....	68
C.3 Presión, altura piezométrica y altura total	69
C.4 Oferta económica de Vogt a minera	71
Anexo D: Utilización del software Allievi.....	72

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Válvulas utilizadas para mitigar un transitorio hidráulico.	12
Tabla 2.2: Estanques utilizados para mitigar un transitorio hidráulico.	13
Tabla 3.1. Diámetros tubería de HDPE.	27
Tabla 3.2. Listado de elementos presentes en el sistema de impulsión.	29
Tabla 3.3: Propiedades del agua industrial.	30
Tabla 3.4: Características principales de la bomba y motor.	31
Tabla 3.5: Características de los estanques amortiguadores.	36
Tabla 3.6: Definiciones de los tipos de líneas presentes en el software.	39
Tabla 3.7: Presiones máximas y mínimas de los casos modelados. Sistema sin protección.	46
Tabla 3.8: Presiones máximas en el sistema considerando estanques amortiguadores.	46
Tabla 3.9: Presiones mínimas en el sistema considerando estanques amortiguadores.	46
Tabla B.1: Valores de \emptyset según anclaje de la tubería.	59
Tabla B.2: Tipos de cierre de válvula según tc	60
Tabla B.3: Valor de Coeficiente empírico C	61
Tabla B.4: Valor de coeficiente empírico k	61

Lista de Figuras

Figura 1.1: Ruta del sistema de impulsión.	3
Figura 1.2: Estanques amortiguadores de la minera.	3
Figura 1.3: Cañería de conexión al sistema hidráulico.	3
Figura 1.4: Metodología de trabajo.	6
Figura 2.1: Forma de la onda de presión en un flujo estacionario.	10
Figura 2.2: Forma de la onda de presión en un flujo transitorio.	10
Figura 2.3: Colapso de cañerías por sobrepresión.....	10
Figura 2.4: Esquema espacio tiempo con las líneas características.	17
Figura 2.5: Interfaz de software Allievi.	18
Figura 3.1: Esquema general de una estación de impulsión.	20
Figura 3.2: Proceso de selección de un estanque amortiguador de golpe de ariete.	23
Figura 3.3: Válvulas anticipadoras de onda de presión.....	25
Figura 3.4: Válvula ventosa instalada en la minera.	25
Figura 3.5: Levantamiento topográfico del sistema de impulsión.	26
Figura 3.6: Isométrico de la cañería principal del sistema.	27
Figura 3.7: Conexión del sistema preventivo de golpe de ariete al sistema de impulsión.....	28
Figura 3.8: Conjunto Bomba BAR – Motor.....	31
Figura 3.9: Intersección curva del conjunto de bombas con la curva del sistema.	32
Figura 3.10: Estanque de distribución del sistema.	33
Figura 3.11: Estanque de descarga del sistema.	33
Figura 3.12. Cota de alimentación de la estación de impulsión.	34
Figura 3.13. Cota de descarga de la estación de impulsión.....	34
Figura 3.14: Estanques verticales con compresor instalados en la minera.	35
Figura 3.15: Instalación y componentes de un estanque amortiguador.	35
Figura 3.16: Esquema referencial del estanque amortiguador	36
Figura 3.17: Presión del sistema en régimen estacionario.	38
Figura 3.18: Efecto del encendido de las bombas. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores	41

Figura 3.19: Efecto del apagado de las bombas. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores	42
Figura 3.20: Efecto de apertura rápida de válvula. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores	43
Figura 3.21: Efecto del cierre rápido de válvula. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores	44
Figura A.1. Curva característica de la bomba.	52
Figura A.2. Tabla de características de cañerías de Acero.....	53
Figura A.3. Tabla de características de cañerías de HDPE.....	54
Figura A.4: Plano seccional referencial del estanque amortiguador del caso de estudio.....	55
Figura A.5: Esquema de distribución de tramos para cálculo de pérdidas de carga.	56
Figura A.6: Planilla de cálculo de la pérdida de carga del sistema.	57
Figura B.1: Valores ingresados a software Allievi.	63
Figura C.1: Comparación de resultados según el método de fricción utilizado.....	67
Figura C.2: Líneas de energía total y altura piezométrica.....	70
Figura C.3: Oferta realizada por Vogt a la minera por fabricación e instalación de 3 estanques.	71
Figura C.4: Estimación del ahorro al reducir 1 estanque amortiguador.....	71
Figura D.1: Elementos del sistema hidráulico a modelar en Allievi.....	72
Figura D.2: Sistema a simular en Allievi.	73
Figura D.3: Configuración de cañerías en Allievi.....	73
Figura D.4: Opciones de cálculo en Allievi.	74

Nomenclatura

Variables

Símbolo	Descripción	Unidad
P	Presión	Pa
Q	Caudal	$\frac{m^3}{s}$
T	Temperatura	K
t	Tiempo	s
Δ	Diferencia	
ε	Deformación	mm
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
H	Altura	mca
h	Hora	h
a	Celeridad de la onda de presión	$\frac{m^2}{s}$
A	Área de la tubería	m^2
E	Módulo de elasticidad	$\frac{N}{m^2}$
Re	Número de Reynolds	
v	Velocidad del fluido	$\frac{m^2}{s}$
x	Variable espacial	m
f	Factor de fricción	
h_f	Pérdidas de carga regulares	m
h_s	Pérdidas de carga singulares	m
L	Longitud de la tubería	m

V	Volumen	m^3
R	Radio hidráulico	
K	Módulo de elasticidad del líquido	$\frac{N}{m^2}$
$\frac{\varepsilon}{D}$	Rugosidad relativa	
F	Fuerza	N
m	Masa	kg
I	Momento de inercia	$kg\ m^2$
P_a	Potencia absorbida en el eje de la bomba	kW
T_c	Tiempo de cierre de una válvula	s
y	Variable espacial	m
Z	Cota	m
γ	Peso específico	$\frac{kg\ f}{m^3}$
μ	Viscosidad absoluta	$Pa\ s$
η_b	Rendimiento de la bomba	$\%$
θ	Ángulo	$^\circ$
ω	Velocidad angular	$\frac{rad}{s}$
ν	Viscosidad cinemática	$\frac{m^2}{s}$
ξ	Coefficiente de amortiguamiento	$\frac{s}{N\ s}$
g	Aceleración de gravedad	$\frac{m}{s^2}$
e	Espesor de la tubería	mm
P_{man}	Presión manométrica	Pa
P_{atm}	Presión atmosférica	atm

Resumen

Con 5,9 millones de toneladas de cobre producidas en 2022, Chile se posiciona como el mayor productor de este mineral a nivel mundial. Para su producción, las empresas mineras invierten constantemente en equipos y maquinaria, pero en ocasiones no aplican un análisis de selección íntegro y adquieren equipos innecesarios, lo que se denomina sobredimensionamiento, y se traduce en pérdidas monetarias. De esta manera, en una minera ubicada en la región de O'Higgins, se presenta un caso de estudio correspondiente a un sistema de protección ante un golpe de ariete. El sistema de protección es parte de un sistema de impulsión de agua, fue dimensionado por una empresa externa, y está constituido por 3 estanques amortiguadores o hidroneumáticos de $5 m^3$, cuyo valor total de fabricación e instalación fue de 352.671 USD el año 2014. A raíz de la necesidad de instalar nuevos sistemas de protección en proyectos futuros de la minera, el presente proyecto de título busca entregar una guía para dimensionar los dispositivos de protección de golpe de ariete, y posteriormente, mostrar cómo corroborar la necesidad de estos equipos en un sistema hidráulico.

Un golpe de ariete genera ondas de presión de una magnitud tal, que pueden generar el colapso de las cañerías. Debido a esto, el fenómeno será estudiado mediante la teoría elástica, siendo parte de esta el Método de las Características, el cual resuelve las ecuaciones constitutivas de un golpe de ariete basadas en el balance diferencial de masa y fuerza. Este método es el fundamento de cálculo del software de dominio libre Allievi, y permite evaluar sistemas hidráulicos con estanques amortiguadores mediante modelaciones, a partir del dimensionamiento previo del circuito hidráulico (trabajo realizado en el proyecto de ingeniería mecánica) y del estanque amortiguador.

El desarrollo de este trabajo se divide en dos partes principales. En la primera, se entrega una guía de orientación para seleccionar y dimensionar un estanque amortiguador. La guía incluye un diagrama de flujo con el procedimiento de selección, al igual que un programa EES que calcula el volumen total de un estanque amortiguador. La segunda parte consiste en caracterizar el sistema hidráulico del caso de estudio, redimensionar el sistema de protección aplicando la guía de selección, y finalmente, modelar el sistema en el software Allievi. El redimensionamiento realizado, indica que se requiere estanques amortiguadores que logren satisfacer un volumen total de $14,02 m^3$, lo que concuerda con el dimensionamiento de la empresa externa. Para la modelación, hay 4 situaciones principales que generan un golpe de ariete, y son el encendido – apagado de bombas y apertura – cierre de válvulas, las cuales se modelaron para el sistema hidráulico sin sistema de protección, con el sistema de protección actual, con 2 estanques amortiguadores de $5 m^3$, y finalmente, con un sistema de protección compuesto por solo un estanque amortiguador de $5 m^3$. Los resultados de las modelaciones indican que el sistema con 2 estanques amortiguadores de $5 m^3$ resiste adecuadamente las ondas de presión para todos los casos que generan un golpe de ariete.

Se concluye que, para evitar un sobredimensionamiento, es necesario modelar el sistema hidráulico y así validar el sistema de protección seleccionado, evitando de esta forma gastos innecesarios en la industria minera.

Palabras clave: Golpe de ariete, software Allievi, minería, estanque amortiguador.

Abstract

With 5,9 million tons of copper produced in 2022, Chile stands as the largest producer of this mineral worldwide. For its production, mining companies consistently invest in equipment and machinery. However, at times, they neglect a comprehensive selection analysis and acquire unnecessary equipment, what it calls over – sizing, and it means financial losses. Thus, a case study arises in a mining company located in the O’Higgins region, and its about a water hammer protection system.

The protection system is part of a water pumping system, sized by an external company, and consists of three hydropneumatics tanks of 5 m^3 , with a total manufacturing and installation cost of 352.671 USD in 2014. Due to the need of installing new protection systems in the mining company’s future projects, this thesis project aims to provide a guide for sizing water hammer protection devices and subsequently demonstrate how to verify the necessity of these devices in a hydraulic system.

Water hammer generates pressure waves of such magnitude that can lead to pipe collapse. Therefore, the phenomenon is studied through elastic theory, including the Method of Characteristics, which solves the constitutive equations of water hammer bases on the differential mass and force balance. This method forms the basis for the calculation in the open – source domain software Allievi, enabling the evaluation of hydraulic systems with hydropneumatics tanks through modelling, building upon the preliminary sizing of the hydraulic circuit (done in the mechanical engineering project) and the hydropneumatic tank.

The development of this project is divided into two main parts. In the first part, a guided manual is provided for selecting and sizing a hydropneumatic tank. The guide includes a flowchart with the selection procedure, as well as an Engineering Equation Solver (EES) program that calculates the total volume of a hydropneumatic tank. The second part involves characterizing the hydraulic system of the case study, resizing the protection system using the guide, and finally, modelling the system in Allievi.

The resizing indicates the need of a hydropneumatic tank to satisfy a total volume of $14,02\text{ m}^3$, aligning with the sizing by the external company. For modelling, four main situations that generate a water hammer were considered: pump start – stop and valve open – close events. These were modelled for the hydraulic system without a protection system, with the current protection system, with two 5 m^3 hydropneumatics tanks, and finally, with a protection system consisting of only one 5 m^3 hydropneumatics tank. Results from the simulation indicate that the system with two 5 m^3 hydropneumatics tanks adequately withstands pressure waves for all water hammer – generating cases.

In conclusion, to avoid over – sizing, it is essential to model de hydraulic system and validate the selected protection system, thus preventing unnecessary expenses in the mining industry.

Key words: Water hammer, software Allievi, mining, hydropneumatic tank

Agradecimientos

Quiero agradecer con todo mi ser a mis padres, Paulo y Mariette, por enseñarme el valor del esfuerzo y de la perseverancia, educándome con el ejemplo desde que tengo memoria.

A mi hermana, Maite, que me motivaba a surgir para que estuviera orgulloso de su hermano.

A mis abuelos, Geno, Irma y Ten, entregándome su amor incondicional en cada momento compartido.

A mi polola, Catalina, acompañándome hace más de 5 años, estudiando juntos innumerables veces hasta la madrugada, y brindándonos mutuo apoyo a lo largo de esta etapa.

A mis tíos y tías, en especial Marcos, un distinto que siempre me ofrecía una sonrisa y buenas conversaciones, motivándome a buscar mi mejor versión.

A mis profesores guía y co-guía, Oscar y Andrés, que invirtieron su tiempo en mí en cada horario de consulta.

A mi mentor mecánico, Alonso, enseñándome y guiándome en el camino elegido, con humildad y sabiduría.

Y en especial, agradecer a Dios, siendo un refugio en los momentos donde más lo necesitaba, ayer, hoy y siempre. Gracias por darme la fuerza y energía para ser mejor, protegiéndome y permitiéndome disfrutar de las maravillas que este mundo hermoso y lleno de oportunidades ofrece.

Espero algún día retribuir todo el cariño y la entrega que me han dado. Nuevamente, muchas gracias.

Con cariño, esto es de ustedes, y para ustedes.

1 Introducción

1.1 Contexto

En Chile, la minería tiene un impacto socioeconómico fundamental. En 2022, el sector minero representó aproximadamente el 13,6% del PIB (Producto Interno Bruto), siendo el cobre su producto comercial principal, pues con 5,9 millones de toneladas producidas en 2022 posiciona al país como el mayor productor mundial de este mineral [1].

El sector minero se compone por tres segmentos: pequeña, mediana y gran minería, donde los primeros dos segmentos representan aproximadamente el 1% y 4% de la producción nacional total de cobre, respectivamente. Sin embargo, el problema radica en el rezago tecnológico presente en las faenas de estos sectores [2] incluyendo el área ingenieril, donde se suele acudir a una empresa externa de ingeniería para resolver un problema de mayor complejidad, como resulta ser el dimensionamiento de sistemas hidráulicos.

Es en este escenario que se presenta el caso de una empresa de mediana minería ubicada en la comuna de Requínoa, Región de O'Higgins, la cual recupera cobre y molibdeno desde relaves antiguos de un tranque de relaves que se encuentra en sus instalaciones. Para esto, se le inyecta agua a alta presión al tranque de relaves, lo que genera una pulpa que posteriormente es procesada para extraer los minerales mencionados.

Para satisfacer la demanda de agua requerida para realizar la inyección a alta presión en el tranque, la minera cuenta con un sistema de impulsión que transporta agua desde un estanque de alimentación hasta uno de descarga mediante bombas centrífugas. La ruta del sistema se muestra en la Figura 1.1, cuya línea principal consiste en una tubería de HDPE de 32", 4182 m de largo, y con cotas de alimentación y de descarga de 683 y 724,6 msnm, respectivamente (altura estática de 41,38 m).

Para dimensionar un sistema de protección ante un golpe de ariete, además de contar con los conocimientos en el área hidráulica y de mecánica de fluidos, es necesario conocer el sistema hidráulico en detalle. Actualmente ya se conoce el comportamiento del sistema de impulsión de agua en régimen estacionario [3], por lo que el presente informe abordará el estudio del sistema de impulsión de agua desde la perspectiva de un régimen transitorio.

1.2 Descripción del problema

El caso de estudio corresponde a un sistema de protección ante un eventual golpe de ariete compuesto por tres estanques hidroneumáticos, como se muestran en las figuras 1.2 y 1.3, cuya función es amortiguar la onda de sobrepresión generada por el transitorio hidráulico, más conocido por golpe de ariete. Este sistema de protección es parte del sistema de impulsión, y fue dimensionado por una empresa externa a la minera.

Según la nueva gerencia de ingeniería de la minera, basados en su experiencia en terreno, es probable que el sistema de protección ante un transitorio hidráulico se encuentre sobredimensionado, pero afirman que a la fecha no se cuenta con las herramientas ni el tiempo para ellos mismos poder realizar tal dimensionamiento, ejemplificando mediante este caso el rezago en el sector comentado anteriormente.

La evaluación del caso surge ante la necesidad de seguir instalando sistemas de protección ante un golpe de ariete en otros puntos de la minera, y se espera que su estudio sirva como punto de partida para crear una guía que oriente la selección de mecanismos o dispositivos que puedan mitigar el golpe de ariete, sin la necesidad de externalizar el problema.

1.3 Hipótesis

Desarrollar una guía que oriente la selección de un sistema de protección ante la presencia de un golpe de ariete, herramienta que se espera en el futuro facilite la toma de decisión a los profesionales del área ingenieril de cualquier industria que pueda presentar este fenómeno en sus instalaciones.

Posteriormente, aplicando la guía de selección, evaluar técnicamente el sistema de impulsión en régimen transitorio, obteniendo la presión del fluido en diferentes puntos del sistema ante distintas condiciones de operación mediante la modelación del sistema en el software de dominio libre Allievi, para luego poder concluir si las posibles presiones máximas y mínimas justifican el sistema de protección ante un golpe de ariete seleccionado.



Figura 1.1: Ruta del sistema de impulsión.

Fuente: [3]



Figura 1.2: Estancos amortiguadores de la minera.

[Fuente: Foto capturada por el autor]



Figura 1.3: Cañería de conexión al sistema hidráulico.

[Fuente: Foto capturada por el autor]

1.4 Objetivos

Objetivos Generales

Evaluar un sistema de impulsión para suministrar agua en un proceso de relave en minera desde la perspectiva de prevención de golpe de ariete y proponer una metodología que oriente en la selección de sistemas de protección para distintas situaciones presentadas en la industria minera.

Objetivos Específicos

A continuación, se muestran los puntos que se desarrollarán para el proyecto:

- Identificar los problemas asociados al golpe de ariete en sistemas de transporte de fluidos en minería.
- Determinar las ecuaciones y condiciones que gobiernan el fenómeno de un transitorio hidráulico.
- Proponer una metodología para abordar los problemas de golpe de ariete en la industria minera.
- Caracterizar el sistema hidráulico del caso de estudio desde el punto de vista de su diseño y operación.
- Evaluar el comportamiento del sistema existente ante diferentes escenarios de golpe de ariete.

1.5 Alcances del proyecto

El alcance del presente proyecto corresponde al estudio del fenómeno de golpe de ariete en un sistema de impulsión de una empresa minera de mediana escala, correspondiente al caso de estudio. Se describirán los procedimientos de cálculo y prevención de este fenómeno, dejando a disposición un documento que guíe la selección de un sistema de protección ante circunstancias en las que se presente el fenómeno de golpe de ariete en sistemas hidráulicos de la industria minera. Estos resultados buscan apoyar a los segmentos mineros de pequeña y mediana escala.

1.6 Metodología

La metodología de trabajo se llevará a cabo en dos etapas, las cuales se describen a continuación.

1.6.1 Etapa 1: Guía para seleccionar un sistema de protección.

El proyecto comienza con el desarrollo de una guía para seleccionar un dispositivo de protección ante un golpe de ariete, denominado estanque amortiguador. A partir de la literatura técnica y mediante un diagrama de flujo, se describirá el procedimiento a seguir para seleccionar un sistema de protección, dejando a disposición de la comunidad ingenieril que estudie el fenómeno del golpe de ariete, un programa EES capaz de dimensionar el volumen total de un estanque amortiguador.

1.6.2 Etapa 2: Evaluación del caso de estudio.

.La segunda etapa tiene como fin el levantamiento de información respecto al golpe de ariete en sistemas de impulsión de fuentes tales como papers, patentes, investigaciones en terreno, libros, entre otros.

La caracterización del caso de estudio se realizará un plano con el trazado del sistema de impulsión (cotas y distancias), identificando los componentes del sistema de prevención de golpe de ariete instalado en la minera tales como presiones y flujos del sistema, equipos, válvulas y accesorios para conocer la pérdida de carga asociada al sistema, y otros elementos con sus respectivas características.

Luego de la caracterización del sistema, se dimensionará un sistema de protección nuevo para el sistema del caso de estudio, según lo expuesto en la primera etapa del trabajo. Posteriormente, se establecerán las condiciones iniciales del sistema, y mediante su modelación en el software libre Allievi, conocer gráficamente el comportamiento en régimen estacionario y transitorio.

Para evaluar el sistema en régimen transitorio, se evaluarán 4 casos: 1) Encendido de bombas, 2) Apagado de bombas, 3) Apertura repentina de válvula 4) Cierre repentino de válvula. Cada caso se evaluará gráficamente por medio de envolventes de presión el sistema sin protección, con la protección actual, y con un sistema de protección propuesto que será señalado en el dimensionamiento del dispositivo de protección.

Finalmente, se evaluará si los dispositivos de protección instalados son necesarios para el caso crítico de operación obtenido, dejando el desarrollo como registro para estudios futuros en la industria minera.

En la Figura 1.4, se muestra de manera esquematizada la metodología de trabajo:



Figura 1.4: Metodología de trabajo. Fuente: [Elaboración propia].

2 Descripción del golpe de ariete

Para cumplir su función, las líneas hidráulicas se dimensionan en condiciones de flujo estacionario o permanente. Sin embargo, una vez el sistema se encuentra en funcionamiento, se hace inminente la presencia de regímenes de transición entre regímenes estacionarios. Cada partida o detención de una bomba, apertura o cierre de válvulas, genera una variación en la velocidad y presión en cada punto del sistema [4].

Los regímenes de transición tienen distintas duraciones dependiendo de la operación que se esté efectuando. Por ejemplo, el llenado y vaciado de una línea puede tener una duración de horas, hasta días incluso dependiendo del sistema, pero el arranque o la detención de una bomba tiene una duración de segundos o minutos. Son estos últimos sucesos de poca duración los que generan el fenómeno conocido como golpe de ariete.

A continuación, se darán a conocer los puntos que permiten comprender más en detalle el concepto de golpe de ariete y sus características, que tipos de transitorios existen, su origen, el impacto que causa su presencia, los dispositivos que protegen al sistema una vez que se genera este fenómeno, las ecuaciones que rigen su comportamiento y los modelos matemáticos que permiten resolver estas ecuaciones, entre otros aspectos relevantes para su entendimiento.

2.1 Conceptos generales

2.1.1 Definición de golpe de ariete

Un transitorio hidráulico se define como la anomalía que se produce en un flujo cuando las condiciones que establecen el movimiento del fluido varían en el tiempo. Estos se clasifican en función de la rapidez con la que se producen, y de manera particular, cuando un transitorio es generado en un tiempo menor al tiempo crítico (detalle en Anexo B.1), este genera en el sistema las máximas sobrepresiones posibles [5]. Estos tipos de transitorios se denominan golpe de ariete.

Si bien un líquido es considerado universalmente un fluido incompresible, resulta que estos presentan una ligera elasticidad, lo que origina que cuando una bomba que se encuentra en operación se detiene o se cierra una válvula abruptamente, las partículas del fluido que estaba siendo transportado, y que ahora se encuentran detenidas, comienzan a ser empujadas por las precedentes a estas, pues estos aún se encuentran en movimiento. Como es de esperar, esta secuencia produce variaciones en la inercia del fluido, las cuales se transmiten como ondas de sobrepresión en el interior de las cañerías [6].

Los efectos del golpe de ariete ocurren constantemente en la vida cotidiana, solo que el común de la gente no es consciente de aquello. Por ejemplo, el simple hecho de cerrar la llave de la ducha generará

una onda de sobrepresión, lo que puede incluso romper la cañería si es que la presión es lo suficientemente alta.

Generalmente, los parámetros que afectan la incidencia y forma de la onda producida por el golpe de ariete son la presión en la línea, la velocidad del flujo y el caudal del flujo en cuestión.

De la misma manera, hay otras variables que podrían afectar la forma de la onda de presión como el comportamiento viscoelástico de la pared interior de la cañería, fugas y la fricción con la cañería que disipa la energía del transitorio hidráulico.

2.1.2 Origen de un golpe de ariete

El origen de este fenómeno hidráulico radica en cualquier cambio repentino de la velocidad o presión en el fluido o en los límites del sistema presurizado.

En terreno, las principales fuentes de variación de presión o velocidad vienen dadas por las siguientes operaciones:

a) Apertura o cierre de una válvula

La función de las válvulas en un sistema hidráulico es fundamental, pues ellas permiten regular el caudal, evitan la inversión del sentido del flujo, reducen las sobrepresiones y eventuales excesos para no alterar ni dañar el funcionamiento del sistema, y son en estas interacciones con el fluido donde se producen variaciones en la presión.

b) Encendido o apagado de una bomba:

Es importante saber que muchas veces las bombas no se encuentran operando de manera continua, y se utilizan en determinados intervalos de tiempo durante una jornada, dependiendo de la demanda que se necesite satisfacer. En ocasiones, el funcionamiento de las bombas se ve interrumpido por alguna falla como una interrupción en el suministro eléctrico, un reboso en la capacidad de los estanques o la detección de alguna perturbación en la línea que conlleve a una detención de la impulsión.

Cuando en una impulsión ocurre una detención brusca de las bombas, la presión cae rápidamente propagándose aguas abajo una onda de presión. Para proteger un sistema de impulsión ante el fenómeno de golpe de ariete, se debe controlar fundamentalmente la caída de presión.

De manera ilustrativa, en la Figura 2.1 se muestra la forma en que fluctúa una onda de presión en un flujo en régimen estacionario, donde se observa un movimiento sinusoidal (continuo y constante), exento de perturbaciones significativas. Por otro lado, en la Figura 2.2 se muestra la forma de onda de la presión en un régimen transitorio, representando un comportamiento inestable antes de encontrar el equilibrio.

2.1.3 Efectos del golpe de ariete en sistemas hidráulicos

Los efectos de este fenómeno son variables, y se pueden ver reflejados físicamente de las siguientes maneras:

a) Fugas y pérdidas de fluido

El hecho que se generen vibraciones y movimientos oscilatorios en las tuberías puede producir grietas y afectar a las uniones apernadas en caso de que estas no se encuentren ajustadas adecuadamente, llevando en algunas ocasiones a la pérdida de fluido que se encuentra siendo transportado y a daño en la estructura del sistema.

b) Separación de la columna de agua

Uno de los efectos comúnmente conocidos que produce este fenómeno es la separación de la columna de agua debido a la presión inferior a la presión atmosférica. Este espacio entre columnas de agua forma una bolsa (de aire o de vapor según el caso) que colapsa cuando aumenta la presión, lo que puede verse reflejado en daños en el revestimiento interno de la tubería, fatiga del material, y hasta rupturas en la línea.

c) Rupturas de tuberías

Cuando el flujo es detenido de manera repentina, la energía cinética del agua se transforma en energía de presión. Esta energía de presión viaja a través de la tubería en forma de onda. Si esta presión repentina producida por el transitorio supera la resistencia estructural de la tubería o los puntos de unión, se puede llegar a la ruptura de la tubería y en consecuencia la detención del proceso de transporte.

d) Fatiga de tuberías

Una interacción periódica del material con la onda de choque del transitorio paulatinamente genera un deterioro de la tubería, reduciendo la vida útil de esta y haciéndola propensa a fallas por fatiga. Estos impactos por lo general suelen producirse en puntos tales como válvulas de retención, punto donde se forman bolsas de vapor o de aire y en los cambios de perfil de las tuberías. El análisis y la disipación del golpe de ariete puede resultar en un trabajo complejo debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones.

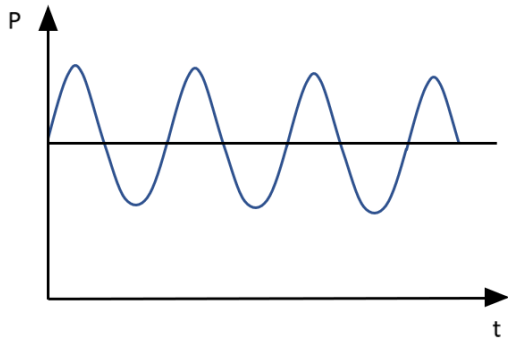


Figura 2.1: Forma de la onda de presión en un flujo estacionario.

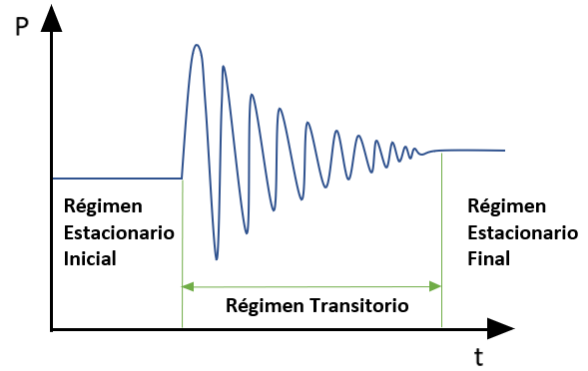


Figura 2.2: Forma de la onda de presión en un flujo transitorio.

En la Figura 2.3 se muestran algunos casos en donde la cañería colapsa por sobrepresión:



Figura 2.3: Colapso de cañerías por sobrepresión. Fuente: [23]

2.1.4 Dispositivos de protección utilizados en la industria

La función principal de los mecanismos disponibles en la actualidad es mitigar o disminuir el impacto de los transitorios hidráulicos en los sistemas de tuberías, brindando protección a los equipos y componentes del sistema ante fluctuaciones bruscas de presión [5].

Por otro lado, algunas medidas de protección que pueden utilizarse son:

- Usar tuberías y accesorios de gran diámetro y espesor que soporten satisfactoriamente las diferencias de presiones producidas por los transitorios
- Inducir los transitorios de maneras más controlada, por ejemplo, realizar el cierre de las válvulas lentamente al igual que la detención de las bombas.
- Disponer de dispositivos de protección que controlen un golpe de ariete.

Generalmente, esta última medida resulta ser empleada dada sus contribuciones al sistema, pues la primera resulta en un costo económico mayor si se trata de largos tramos, y la segunda resulta ser propensa a errores.

Es por esto que el ingeniero que dimensiona las líneas debe entender el comportamiento físico de los transitorios hidráulicos, al igual que los medios para su control y contar con las herramientas necesarias para realizar un análisis para cada caso particular

En la industria, si bien las válvulas logran mitigar en parte la onda de presión ante un golpe de ariete, muchas veces se ven sobrepasadas por la magnitud de esta, haciendo necesario disponer de dispositivos que logren brindar una protección adecuada, como lo son los estanques.

Luego, en las tablas 2.1 y 2.2 se adjuntan y describen los tipos de válvulas [37] [38] y estanques [23] [39] [40] utilizados en la industria como mecanismo de protección, respectivamente [11].

Tabla 2.1: Válvulas utilizadas para mitigar un transitorio hidráulico.






<i>Tipo</i>	<i>Atributos principales</i>	<i>Imagen</i>
Check (de retención o anti-retorno)	<p>Restringe el flujo en una sola dirección y sentido.</p> <p>Suelen ir después de las bombas para evitar el vaciado de las líneas ante una detención. Suelen utilizarse válvulas check wafer, ball, spring, entre otros tipos.</p>	
De seguridad	<p>Diseñada para eliminar fluido cuando la presión supera el límite establecido. Se abren completamente de forma inmediata</p>	
De Alivio	<p>Permite reducir la presión ante una eventual alza de esta en el sistema.</p> <p>Si bien desempeñan funciones similares que las de seguridad, se diferencian en que las de alivio se abren de forma gradual.</p>	
Ventosa	<p>Permite la expulsión de aire acumulado dentro del sistema, o en casos en que la presión interior sea menos que la atmosférica, permite su entrada.</p>	
Anticipadora de onda	<p>Reducen el impacto de una sobrepresión generado, protegiendo así a las bombas.</p>	

Tabla 2.2: Estanques utilizados para mitigar un transitorio hidráulico.

<i>Tipo</i>	<i>Atributos principales</i>	<i>Imagen</i>
Torre de oscilación (o chimeneas de equilibrio)	Abierto en su parte superior, y aseguran la entrada de agua a la tubería en periodos de depresión, y reciben el agua de estas cuando hay sobrepresiones. Efectiva para pequeñas alturas y altos caudales, como en sistemas de aguas residuales.	
Unidireccionales	Permite la inyección de volúmenes de agua al sistema de impulsión cuando se detecta una depresión del transitorio, evitando vacíos y separación de la columna líquida.	
Amortiguadores con compresor	A medida que varía la presión del fluido, el volumen del aire presurizado se contrae y expande según corresponda, aliviando las presiones en la tubería, amortiguando así la onda de presión del golpe de ariete. Se conecta a un compresor que presuriza el interior.	

2.2 Ecuaciones constitutivas de un golpe de ariete

Las ecuaciones que definen a un sistema hidráulico en régimen estacionario permiten dimensionar las cañerías de un sistema [3].

Un estado transitorio se analiza resolviendo las ecuaciones de las variables dependientes, que son la velocidad $V(x,t)$ y presión $P(x,t)$, las cuales dependen de las variables independientes x y t , que representan la componente espacial y temporal, respectivamente, bajo ciertas condiciones iniciales dadas. Alternativamente, el sistema puede resolverse encontrando las incógnitas de un flujo Q en un tiempo (t), y la altura de impulsión H en una distancia (x) [5].

Cabe destacar que las ecuaciones que definen a un sistema hidráulico en régimen estacionario fueron estudiadas en el proyecto de ingeniería mecánica, destacando su utilidad para dimensionar las cañerías de un sistema [3]. Para este proyecto, en cambio, es de particular interés conocer las ecuaciones que definen la onda de presión generada por un golpe de ariete.

Las ecuaciones constitutivas que rigen un golpe de ariete se basan en los balances diferenciales de masa y fuerza planteados por la teoría del modelo elástico. En la literatura técnica [5], se encuentra el desarrollo previo para obtener estas ecuaciones. Las ecuaciones (1) y (2) corresponden a las ecuaciones del modelo elástico simplificado, y permiten seguir la evolución del transitorio hidráulico.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2D} V|V| = 0 \quad (2)$$

En la Ecuación (1), el término $\frac{\partial H}{\partial t}$ representa la tasa de cambio temporal de la altura del flujo, y el término $\frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$, representa la propagación de las ondas en el flujo a lo largo de la tubería y como estas influyen en el cambio espacial del flujo conducido.

En la Ecuación (2), el término $\frac{\partial V}{\partial t}$ corresponde a la aceleración local, el término $g \frac{\partial H}{\partial x}$ representa la aceleración convectiva la cual es proporcional a la variación de la velocidad en un punto del fluido, y el último término, $\frac{f}{2D} V|V|$, representa las pérdidas por fricción en la dirección del flujo.

Para poder utilizar correctamente las ecuaciones de continuidad y momento, es necesario tener en consideración los siguientes supuestos:

- El fluido es homogéneo
- Fluido y pared de la tubería tienen un comportamiento elástico – lineal
- El flujo es unidimensional
- Se utiliza la velocidad media
- Las pérdidas por fricción se calculan como en estado estacionario
- Las tuberías se encuentran siempre llenas de fluido

2.2.1 Método de resolución de ecuaciones: Método de las Características

Varios métodos han sido desarrollados para describir el comportamiento de un flujo transitorio en los sistemas hidráulicos, los cuales van desde ecuaciones con resultados aproximados a soluciones numéricas de las ecuaciones no lineales de Navier – Stokes. Algunos de los que fueron más utilizados son el método aritmético [7], gráfico [15], de perturbación [16], los lineales [12], y el Implícito por Diferencias Finitas [5].

En la actualidad, uno de los más utilizado y aceptado por la comunidad ingenieril es el *Método de las Características (MoC)* [10], ya que cuenta con soporte para condiciones de contorno complejas, fricción y modelos de cavitación en forma de vapor. Gran parte de los softwares de licencia pagada (AFT Impulse, Allievi, WANDA, entre otros) utilizan este método para sus cálculos. Su fiabilidad radica en la capacidad de transformar las ecuaciones diferenciales parciales de continuidad y momento en cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias que se resuelven numéricamente utilizando técnicas de diferencias finitas [17].

El MoC funciona en una malla computacional espacio (x) – tiempo (t) cuya forma viene dada por el criterio de estabilidad de Courant, más conocido como Número de Courant [12], expresado por:

$$C_n = \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta x} \quad (3)$$

Con:

a: celeridad o velocidad de onda

Δt : paso de tiempo

Δx : longitud del subtramo

En general, el método entrega un resultado numérico exacto cuando $C_n = 1$. En sistemas complejos, es difícil que sea igual a la unidad, por lo que se suele recurrir a la modificación de la celeridad en un rango máximo de $\pm 15\%$ [12].

Luego, de las ecuaciones básicas (1) y (2), se tiene la solución aproximada dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \pm \frac{gA}{a} \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA} Q|Q| = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \pm a \quad (5)$$

Las ecuaciones (4) y (5) representan al mismo sistema formado por las ecuaciones básicas, donde la ecuación (4) es válida sobre las líneas características formadas por la ecuación (5).

Ahora, se definen las ecuaciones características C^+ y C^- como las líneas en las que se propagan las ondas de presión en dirección aguas arriba y abajo, respectivamente, de la forma:

$$C^+: Q_P^{t+\Delta t} - Q_L^t + \frac{g \cdot A}{a} (H_P^{t+\Delta t} - H_L^t) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_L^t |Q_L^t| = 0 \quad (6)$$

$$C^-: Q_P^{t+\Delta t} - Q_R^t - \frac{g \cdot A}{a} (H_P^{t+\Delta t} - H_R^t) + \frac{f \Delta t}{2DA} Q_R^t |Q_R^t| = 0 \quad (7)$$

Con:

$Q_P^{t+\Delta t}$: caudal en el nodo P e instante $t + \Delta t$.

$H_P^{t+\Delta t}$: cota piezométrica en el nodo P e instante $t + \Delta t$.

$H_L^t, Q_L^t, H_R^t, Q_R^t$: variables de estado conocidas en los nodos L y R, en el instante anterior t.

En la Figura 2.4 se observa la malla computacional espacio tiempo con las líneas características, los nodos, las variables conocidas y las que se buscan obtener:

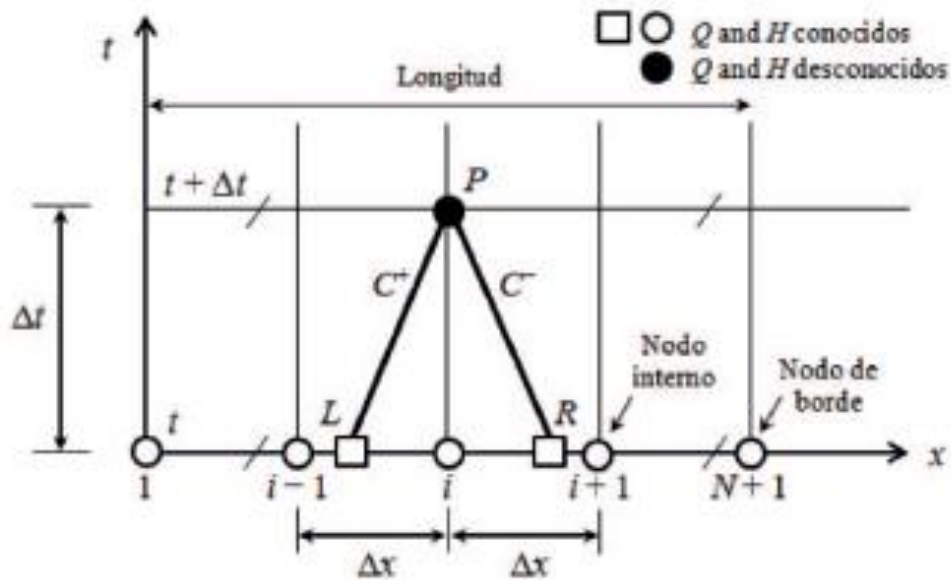


Figura 2.4: Esquema espacio tiempo con las líneas características. Fuente: [25]

Las ecuaciones permiten conocer la altura piezométrica y caudal (y por ende también la velocidad) en el punto i de la tubería y en el instante $t + \Delta t$, a partir de los valores de H y Q de los puntos $i-1$ e $i+1$ en el instante t .

El sistema se puede resolver para todos los puntos de cálculos con excepción de sus extremos (nodos 1 y $N+1$), donde falta una de las dos ecuaciones. En estos puntos, donde la tubería se conecta con otro elemento del sistema (depósitos, bombas, válvulas y equipos de protección), la ecuación que falta se sustituye por la ecuación o conjunto de ecuaciones que representan el comportamiento de dicho elemento, o también denominadas, condiciones de contorno [17].

2.3 Software para el cálculo de golpe de ariete

2.3.1 Software Allievi

El software Allievi fue desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia [18] y es uno de los pocos softwares de dominio libre a nivel mundial que permiten calcular transitorios en sistemas hidráulicos.

Se basa en el Método de las Características como fundamento de cálculo, y es utilizado para estudiar la onda de presión generada por un golpe de ariete en plantas de hidroelectricidad [19], tratamiento de aguas [20], llenado y vaciado de cañerías [21], proyectos de abastecimiento de agua en zonas rurales [22], entre otros.

la Figura 2.5 muestra la interfaz del programa, y su función principal es conocer el comportamiento de la onda de presión producto de la perturbación configurada por el usuario (por ejemplo, el cierre de una válvula), mostrando las distancias y momentos en el que se registran los puntos altos y bajos de presión mediante simulaciones y envolventes de presión.

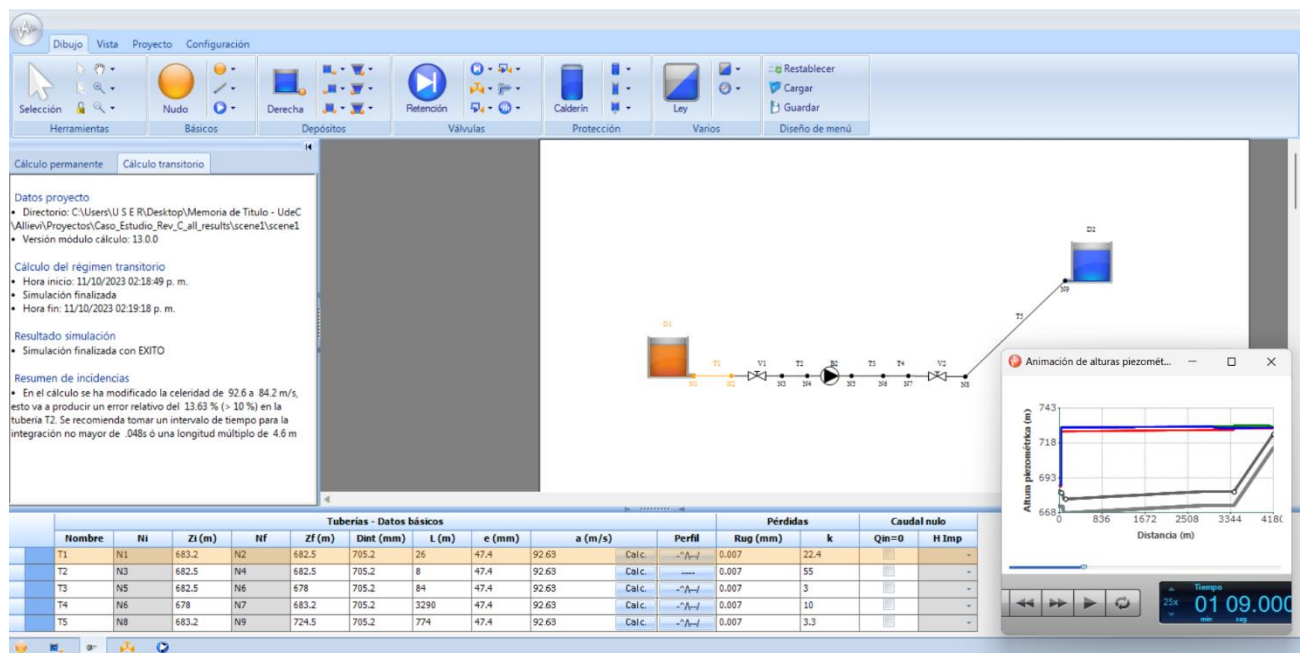


Figura 2.5: Interfaz de software Allievi. Fuente: [18].

El programa permite programar el encendido y apagado de las bombas en el sistema modelado según el tiempo configurado por el usuario, el porcentaje de apertura de las válvulas, y también el tiempo en el que estas se abren o cierran según el caso a estudiar.

3 Dimensionamiento de un sistema de protección

Seleccionar un dispositivo que logre mitigar la onda de presión generada por un golpe de ariete requiere caracterizar el sistema, plantear las condiciones iniciales de operación, conocer la presión del sistema en régimen permanente, modelar el sistema para los casos que dan origen a un golpe de ariete para finalmente, dimensionar un dispositivo que logre satisfacer las condiciones límites de presión.

Un sistema de protección debe ser capaz de resistir las alzas y disminuciones de presión si es que el sistema por sí solo no es capaz de soportarlo. En ocasiones, el uso de válvulas específicas (ventosa, anticipadoras de onda (SAV), de alivio, de seguridad, entre otras) son suficiente para controlar la onda de presión, por lo que es importante realizar una modelación para saber que dispositivo de protección es el adecuado.

En la mayoría de los casos, el elemento que garantiza la protección de un sistema hidráulico es un estanque amortiguador (o calderín) junto al sector de las bombas, pues cuando estas se detienen, el estanque introduce agua a la impulsión (no aire), esto debido a la expansión en su interior, producto de la presurización en la que este se encuentra [23].

Los estanques aumentan los rangos de sobrepresión y depresión del sistema, es por esto que las dimensiones de un estanque deben ser seleccionadas apropiadamente.

Así, en base a los aportes de autores como Chaudry [5], Wylie [12] y Thorley [27], manuales técnicos de softwares como Bentley Hammer [11], Allievi [18] y AFT Impulse [26], catálogos de dispositivos de protección como los que entrega Vogt [23] y trabajos realizados con casos reales [28], se mostrará como seleccionar adecuadamente un estanque amortiguador para un sistema hidráulico. Adicionalmente, en el Anexo B se adjunta un programa EES que permitirá dimensionar el volumen de un estanque amortiguador para trabajos futuros.

3.1 Guía de selección

En la literatura técnica existen distintos métodos para el dimensionamiento de un estanque amortiguador, pero todos coinciden en que el primer paso es determinar el volumen inicial de aire V_0 en el estanque en condiciones de régimen estacionario.

La Figura 3.1 indica esquemáticamente como se denominan las distintas alturas para comprender las ecuaciones que permitirán calcular el volumen total de un estanque amortiguador.

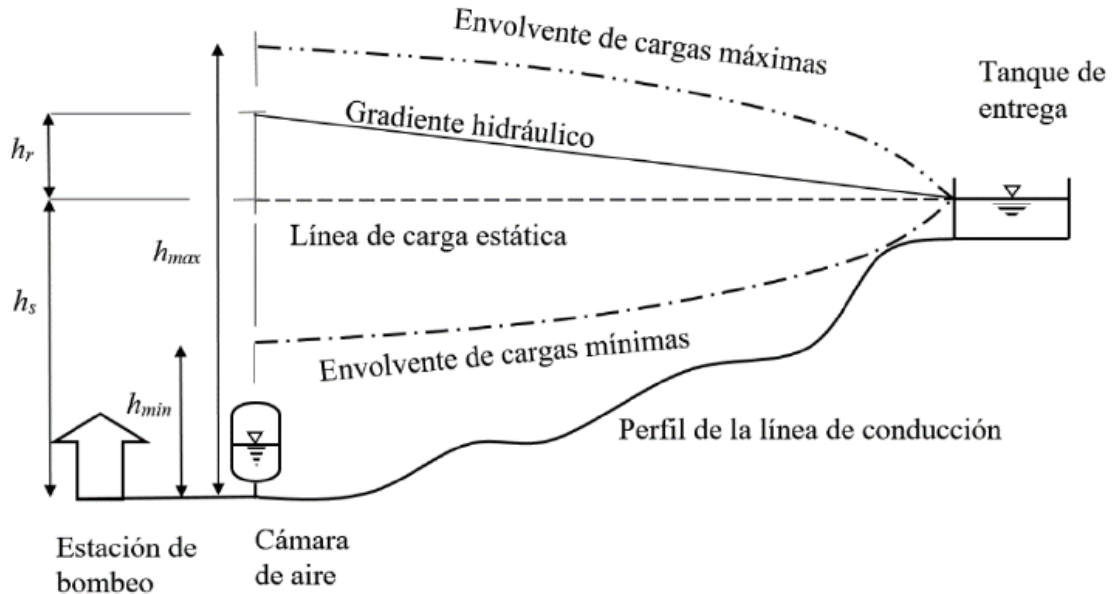


Figura 3.1: Esquema general de una estación de impulsión. Fuente: [28]

3.1.1 Volumen de un estanque amortiguador

Se describirán 2 formas de calcular el volumen inicial de aire: 1) Es un método simple planteado por Stephenson [29] y Autrique-Rodal [30], donde utilizando la Ley de Boyle para representar la expansión de aire, se determina V_0 de la forma:

$$\frac{g \cdot A \cdot H_s \cdot V_0}{L \cdot Q_0^2} = \frac{H_{\min}}{H_s \cdot \left(1 - \frac{H_{\min}}{H_s}\right)^2} \quad (8)$$

Con H_s : altura estática absoluta (altura estática h_s + presión atm), H_{\min} : presión absoluta mínima permisible en el punto de conexión de la cámara (carga mínima admisible al inicio de la conducción h_{\min} + presión atm), Q_0 : caudal inicial en $\frac{m^3}{s}$, V_0 : volumen inicial de aire en m^3 , A: área de la sección transversal en m^2 y L: el largo de la línea de cañería en m .

Este método no considera las pérdidas de carga en la conducción, por lo que entregará un valor más conservador que el real.

Al utilizar la Ley de Boyle, la expansión de aire es representada como un proceso politrópico con un valor del coeficiente $\eta = 1$ (proceso isotérmico). Los valores de η para el diseño de estanques amortiguadores varían entre 1 y 1,4.

El método 2) es el propuesto por Carmona [31], y considera la fricción por medio del factor de fricción f de Darcy-Weisbach. Carmona basa su método en preestablecer una solución periódica amortiguada en el tiempo t para un caudal $Q(t)$:

$$Q = Q_0 e^{-\beta t} \cos\left(\frac{\pi}{2t^*} t\right) \quad (9)$$

Donde Q_0 es el caudal inicial [m^3] y β un parámetro de amortiguamiento que se define como:

$$\beta = \frac{-f \cdot Q_0}{2D \cdot A} \quad (10)$$

El término t^* corresponde al instante del volumen máximo en el interior de la cámara, y se conoce como:

$$t^* \cdot e^{-\beta t^*} = \frac{\pi \cdot L \cdot Q_0}{2g \cdot A \cdot (H_s - H_{\min})} \quad (11)$$

Luego, el volumen inicial de aire V_0 :

$$V_0 = \frac{\frac{g \cdot A \cdot (H_s - H_{\min})}{L} - \beta \cdot Q_0}{\left(\beta^2 + \left(\frac{\pi}{2t^*}\right)^2\right) \left(\left(\frac{H_0}{H_{\min}}\right)^{\frac{1}{\eta}} - 1\right)} \quad (12)$$

Con H_0 : presión necesaria para impulsar el fluido considerando las pérdidas ($h_s + h_r$ + presión atm).

Para ambos métodos, una vez se establece el volumen inicial, el volumen máximo V_{\max} que ocupará el aire dentro del estanque amortiguador, viene dado por la expresión:

$$V_{\max} = V_0 \cdot \left(\frac{H_0}{H_{\min}}\right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (13)$$

Para el método 1), como no considera las pérdidas de carga, se debe utilizar H_s en lugar de H_0 .

Finalmente, el volumen total del estanque amortiguador V_{tot} debe considerar un factor de seguridad f_s , el cual varía entre 1,2 y 1,25. Luego, se tiene que:

$$V_{tot} = f_s \cdot V_{\max} \quad (14)$$

3.1.2 Presión de hinchado

Corresponde a la presión de la masa de aire que se encuentra dentro del estanque amortiguador previo al inicio de su operación.

La presión de hinchado se puede conocer de la siguiente manera:

$$P_h \cdot V_{tot} = P_0 \cdot V_0 \quad (15)$$

Con:

P_h : presión de hinchado del estanque amortiguador en bar

P_0 : presión inicial de aire en condiciones de régimen estacionario en bar

V_{tot} : volumen total del estanque amortiguador en m^3

V_0 : volumen del aire al interior del estanque amortiguador en régimen estacionario m^3

3.1.3 Rango de operación

Una columna de agua de 70% y 30% de aire corresponde a la condición de equilibrio de un estanque amortiguador. Si tras un transitorio hidráulico el nivel de agua varía por sobre 80%, el sistema de control instalado en el estanque da la orden de inyección de aire, para que vuelva al nivel de equilibrio. Por otro lado, si el nivel de agua en el estanque es menor al 40%, el sistema da la orden de descargar aire del estanque hasta llegar a un nivel de agua del 70% del estanque.

Cabe destacar que, a mayor volumen del estanque amortiguador, mayor será la presión máxima y mínima del sistema.

3.1.4 Diagrama de flujo para seleccionar un estanque amortiguador

Dimensionar un equipo de protección requiere cumplir con ciertos pasos previos, y son los que se seguirán para modelar el sistema del caso de estudio. En la Figura 3.2, se adjunta el diagrama de flujo con los pasos a seguir para seleccionar adecuadamente un estanque amortiguador para la protección del sistema ante un golpe de ariete:

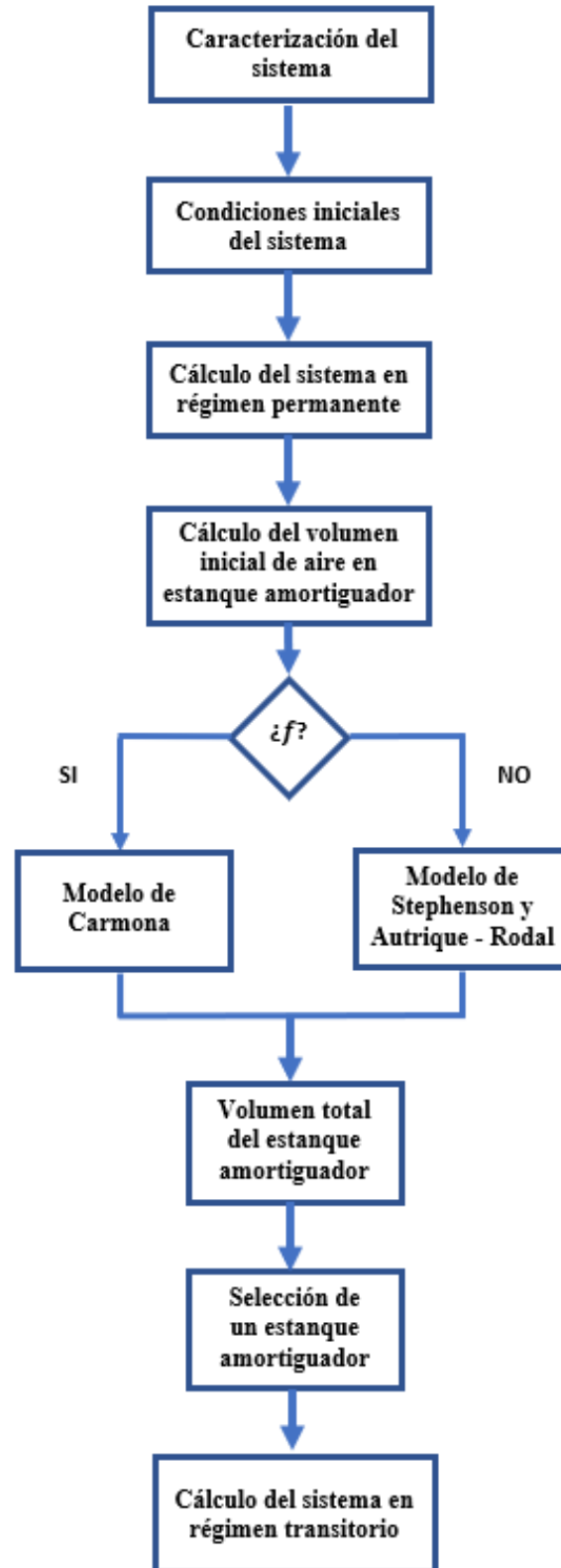


Figura 3.2: Proceso de selección de un estanque amortiguador de golpe de ariete. Fuente: [Elaboración propia]

3.1.5 Recomendaciones para la instalación y prevención de un golpe de ariete

Algunos puntos importantes a considerar al momento de realizar la configuración del sistema hidráulico desde la perspectiva de prevención de un golpe de ariete son:

i. Cierre y apertura de válvulas

Para el caso de cierre de válvulas, el tiempo de cierre debe ser mayor al tiempo crítico. En caso de no conocer este último, se recomienda un cierre lento que dure al menos 60 s, por lo que es importante capacitar al personal de operaciones explicándole este detalle a la hora de realizar la maniobra de cierre y apertura.

ii. Espesor de cañería

Si bien aumentar el espesor de cañerías permite que el sistema tenga una mayor resistencia ante un golpe de ariete, representa una de las opciones de mayor costo en la industria, pues significa más material a lo largo de toda la línea de impulsión. Luego, se recomienda aumentar espesor de cañería solo en tramos cortos y solo si representa un beneficio económico.

iii. Ubicación de los estanques amortiguadores

Normalmente los estanques amortiguadores se instalan junto a la estación de bombeo, pues esto les permite actuar rápidamente sobre la onda de presión producto de un paro repentino de las bombas.

iv. Instalación de válvulas anticipadoras de onda de presión

Corresponde a válvulas automáticas que se ubican junto a las bombas, y se abren rápidamente ante la detención de una bomba, reduciendo el impacto de la sobrepresión producida, protegiendo así al equipo de impulsión. En la Figura 3.3, se observa la disposición de estas válvulas en un sistema hidráulico.

v. Instalación de válvulas ventosas

Se ubican en los puntos altos locales para eliminar el aire atrapado en la línea de impulsión que puede quedar durante el llenado de la línea, evitando así puntos de vacío y amortiguando parte de las eventuales ondas de depresión en el sistema. En la Figura 3.4, se muestran las válvulas ventosas del caso de estudio del capítulo anterior y la disposición de estas en la línea.

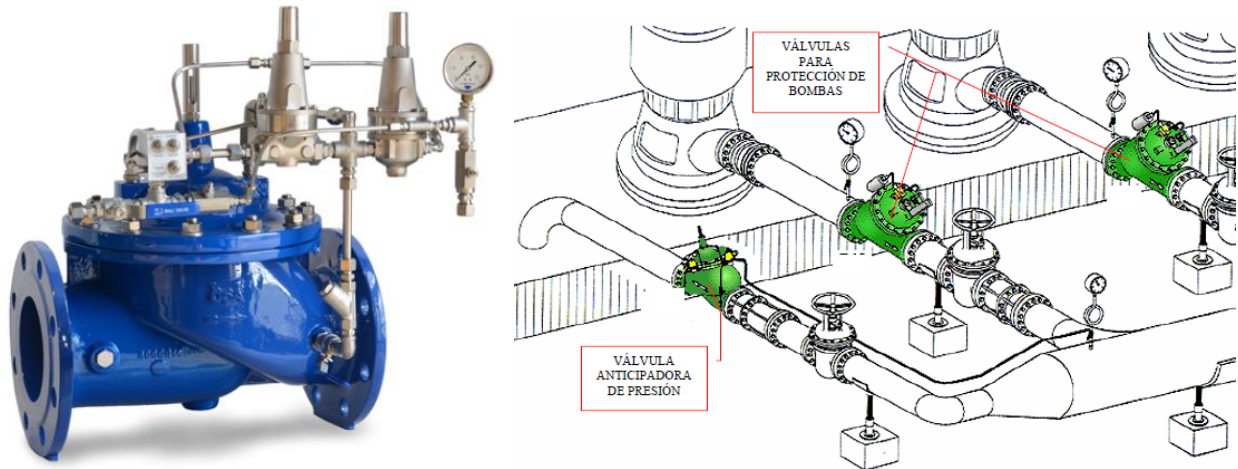


Figura 3.3: Válvulas anticipadoras de onda de presión. Fuente: [32].



Figura 3.4: Válvula ventosa instalada en la minera. Fuente: [Foto capturada por el autor].

3.2 Caracterización del caso de estudio

3.2.1 Trazado del sistema de cañerías

En la Figura 3.5 se puede observar la vista aérea del sector en el que se realizará el desarrollo, donde PR – MA considera como punto de referencia al muro de contención A del embalse denominado “Colihues”, PR – TQ01 toma como punto de referencia al tranque Cauquenes, las letras N y E se refieren a las coordenadas Norte y Este, respectivamente, y Z representa la altura en metros sobre el nivel del mar.



Figura 3.5: Levantamiento topográfico del sistema de impulsión. Fuente: [3].

Las alturas geodésicas del levantamiento topográfico corresponden a puntos de referencia seleccionados por conveniencia, y estos son establecidos para poder compararlos con otros puntos dependiendo del sector. Para este caso, el punto de referencia más cercano a la cota de alimentación de la estación tiene una altura geodésica de 683, 2 msnm. De la misma manera, el punto de referencia más cercano a la cota de descarga es de 735,9 msnm.

El sistema hidráulico transporta el agua por medio de una tubería principal de HDPE DN800 PN10, cuyo isométrico se muestra en la Figura 3.6 y cuyas características se adjuntan en la Tabla 3.1:

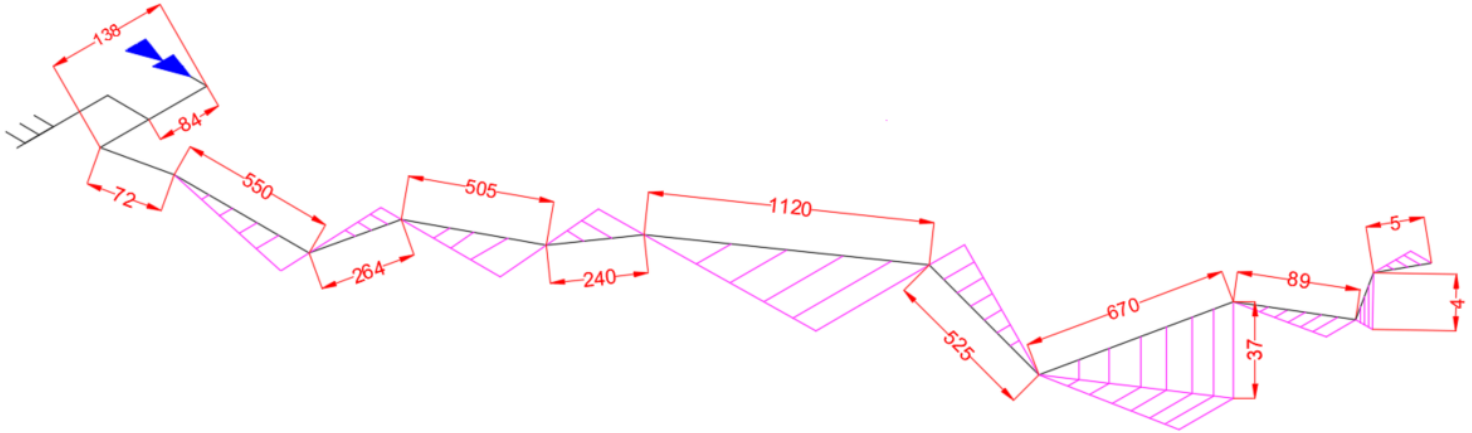


Figura 3.6: Isométrico de la cañería principal del sistema. Fuente: [Elaboración propia].

Tabla 3.1. Diámetros tubería de HDPE.

<i>DN [mm]</i>	<i>DN [pulg]</i>	<i>Espesor [mm]</i>	$\Phi_{interior}$ [mm]	<i>Largo [m]</i>
800	32	47,4	705,2	4182

Para los cálculos, se utilizarán los valores de los diámetros interiores, los cuales fueron calculados a partir de las tablas adjuntas en el Anexo A.

En la Figura 3.7 se muestra la conexión del sistema de protección de golpe de ariete al sistema de impulsión. Las flechas azules indican la dirección del fluido a través de las cañerías, las cuales se dirigen al estanque de descarga. Por otro lado, las flechas naranjas se asocian con los estanques amortiguadores ante un eventual caso de sobrepresión.

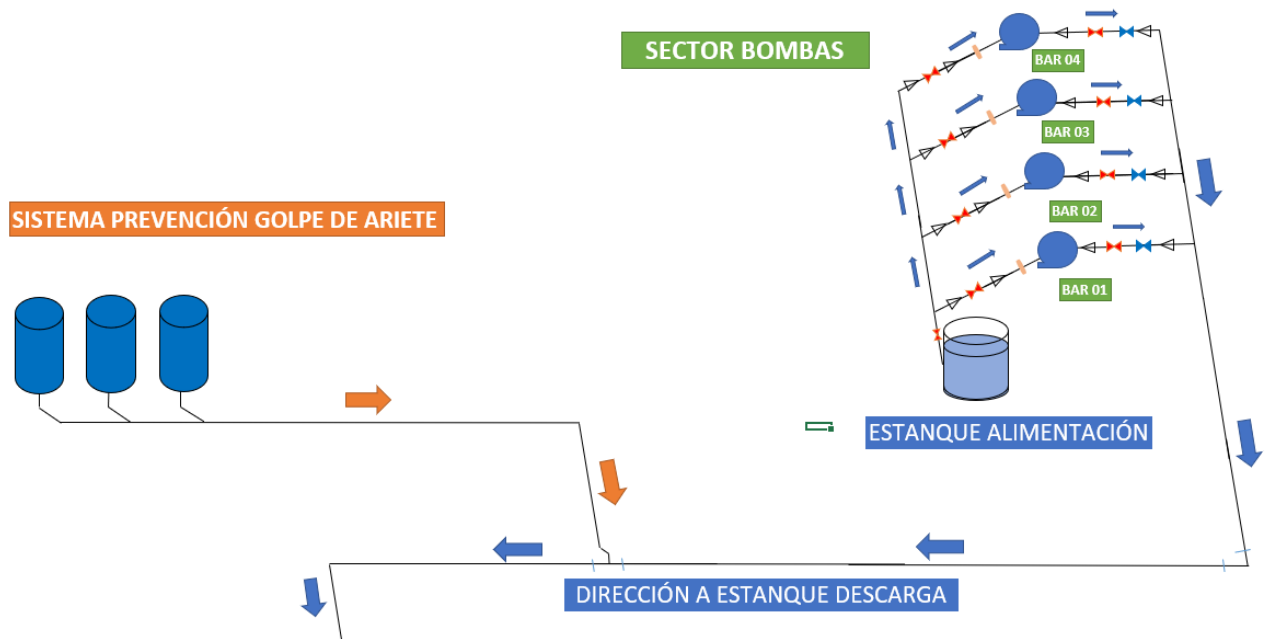


Figura 3.7: Conexión del sistema preventivo de golpe de ariete al sistema de impulsión.

Fuente: [Elaboración propia].

Cabe destacar que en el sector de bombas las 4 líneas son cañerías son de acero, para luego pasar a ser una sola línea principal de HDPE.

Para el sistema de estudio, en la Tabla 3.2 se presenta los largos de cañerías y los accesorios correspondientes:

Tabla 3.2. Listado de elementos presentes en el sistema de impulsión.

<i>Ítem</i>	<i>Largo [m]</i>	<i>Diámetro [pulg]</i>	<i>Cantidad [un]</i>
Cañería Acero PN16	40,1	32	-
Cañería Acero PN10	14,1	16	-
Cañería Acero PN10	3,2	12	-
Cañería Acero PN10	4,2	10	-
HDPE PE100	4.182	32	-
Codo 60 ° Acero	-	32	4
Codo 30 ° Acero	-	10	4
Codo 90° HDPE	-	32	5
Codo 60 ° HDPE	-	32	3
Codo 45° HDPE	-	32	6
Codo 30 ° HDPE	-	32	5
Tee HDPE	-	32	4
Reducción 12" x 10"	-	12 x 10	4
Reducción 16" x 12"	-	16 x 12	4
Expansión 16" x 32"	-	16 x 32	4
Expansión 10" x 16"	-	10 x 16	4
Junta de expansión	-	12	4
Junta de expansión	-	10	4
Junta de expansión	-	32	26
Válvula Ventosa	-	6	14
Válvula Mariposa	-	32	1
Válvula Mariposa	-	16	3
Válvula Check	-	32	16
Válvula Check	-	16	6
Válvula de Alivio	-	6	18
Válvula de Compuerta	-	32	4

Dichos componentes serán cruciales para el cálculo de la pérdida de carga que experimenta el sistema, valores relevantes en la modelación del sistema en el software Allievi, cuyo funcionamiento será explicado en este informe más adelante.

3.2.2 Características del fluido

En la Tabla 3.3, se muestran las propiedades del agua industrial que es transportada en el sistema de impulsión:

Tabla 3.3: Propiedades del agua industrial

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
Densidad	997	$\frac{kg}{m^3}$
Viscosidad dinámica	1,005 (20°C)	<i>cP</i>
pH	9	-
Dureza total (CaCO ₃)	800 – 1200	<i>ppm</i>
Alcalinidad F (CaCO ₃)	0 – 10	<i>ppm</i>
Alcalinidad M (CaCO ₃)	100	<i>ppm</i>
Conductividad	1150 – 2450	$\mu S/cm$
Temperatura	20 – 25	<i>C°</i>

3.2.3 Características de bombas

Para el desarrollo del trabajo existen 4 bombas Fluintek modelo HS – 250 – 480, denominadas bombas BAR, las cuales se muestran en la Figura 3.8, y cuya curva característica se adjunta en la Figura A.1 del Anexo A. Corresponde a una bomba centrífuga horizontal de carcasa partida axialmente y un motor Weg modelo W50 a 50 Hz accionado con un variador de frecuencia, equipos cuyas características se adjuntan en la Tabla 3.4. Cabe destacar que, en condiciones de funcionamiento normal, solo operan 3 bombas BAR en paralelo y la cuarta es utilizada solamente en caso de que una de las anteriores no funcione con normalidad.



Figura 3.8: Conjunto Bomba BAR – Motor. [Fuente: Foto capturada por el autor].

Tabla 3.4: Características principales de la bomba y motor.

<i>Nombre</i>	<i>RPM Motor</i>	<i>RPM Bomba</i>	<i>HP/Volt Motor</i>	<i>Frame Bomba</i>	<i>I.Corr. Nom[A]</i>	ϕ_{Motor} [in]	$\phi_{Eje\ bomba}$ [mm]	<i>Bushing Motor-bba</i>
BAR	1483	1450	400 /575	5009/10	371	3 5/8	75	Acople Falk 1100T10D

Luego, se requiere conocer el punto de operación del sistema considerando las 3 bombas en paralelo. Agregar bombas aumenta la capacidad del sistema, donde se tendrá un flujo volumétrico mayor, lo que genera una carga mayor, produciendo que cada bomba impulse menos flujo [35].

Para definir el punto de operación del sistema, en la Figura 3.9, se muestra la intersección entre la curva del conjunto de bombas del caso de estudio y la curva del sistema:

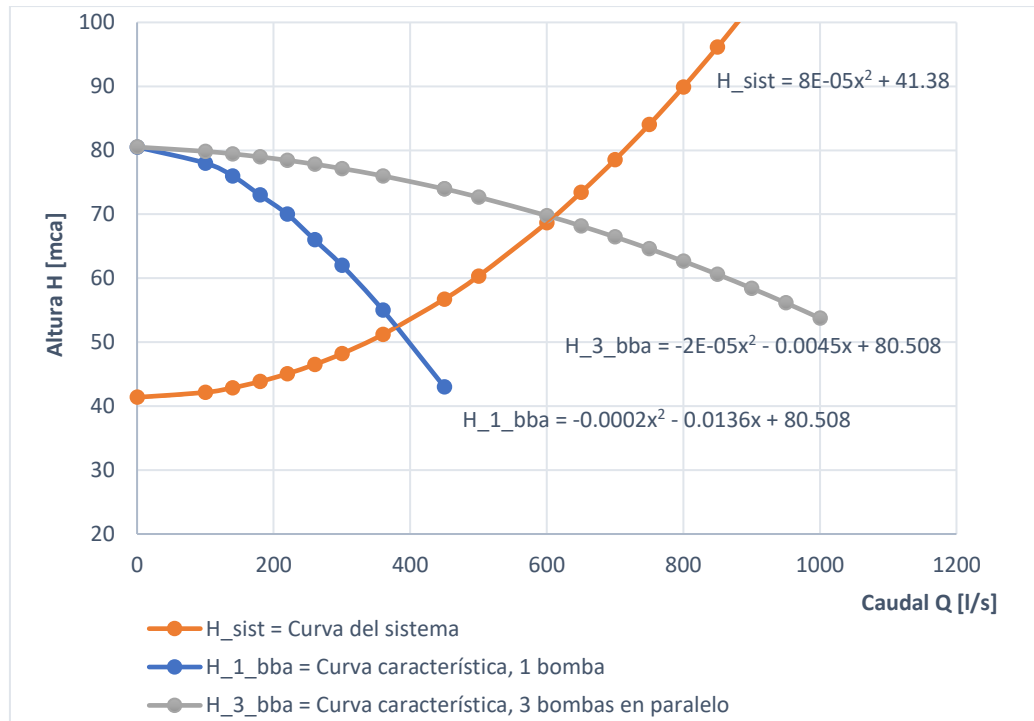


Figura 3.9: Intersección curva del conjunto de bombas con la curva del sistema. Fuente: [Elaboración propia].

El caudal y la altura se pueden conocer resolviendo el sistema de ecuaciones. Alternativamente, las ecuaciones que definen el caudal y altura que aportan bombas iguales en paralelo viene dado por:

$$H = A + \frac{B}{n} \cdot Q_{bba} + \frac{C}{n^2} \cdot (Q_{bba})^2 \quad (16)$$

$$Q_{bba,1} = Q_{bba,2} = Q_{bba,n} = \frac{Q_{tot}}{n} \quad (17)$$

Para el caso de estudio, el punto de operación viene de la intersección entre la curva de la bomba con la curva del sistema, lo que se muestra en la Figura 3.9. Luego, con $n=3$:

$$H = 80,508 - \frac{0.0045}{3} \cdot Q_{bba} - \frac{0.00002}{3^2} \cdot Q_{bba}^2$$

$$H = 41,38 - 5,55654 \cdot 10^{-19} \cdot Q_{bba} + 0.00008 \cdot Q_{bba}^2$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones, se tiene que la altura H y el caudal Q de operación son:

$$H = 70,51 \text{ [mca]}$$

$$Q_{tot} = 603,4 \left[\frac{l}{s} \right]$$

3.2.4 Estanques de distribución y descarga

En las figuras 3.10 y 3.11 se muestran los estanques de distribución y descarga del sistema de impulsión, respectivamente.



Figura 3.10: Estanque de distribución del sistema.
Fuente: [Foto capturada por el autor].



Figura 3.11: Estanque de descarga del sistema.
Fuente: [Foto capturada por el autor].

El estanque de distribución tiene un diámetro de 3640 mm , una altura de pelo de agua de 4400 mm , el center-line de la cañería de alimentación está a 700 mm de la base del estanque y una capacidad de $45,79\text{ m}^3$.

El estanque de descarga tiene un diámetro de 5340 mm y una altura de pelo de agua de 4400 mm , esto es una capacidad de $98,54\text{ m}^3$.

Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran las cotas de succión y descarga, respectivamente, de la estación de impulsión de agua industrial de la minera, medidas en metros sobre el nivel del mar:



Figura 3.12. Cota de alimentación de la estación de impulsión. Fuente: [Foto capturada por el autor].



Figura 3.13. Cota de descarga de la estación de impulsión. Fuente: [Foto capturada por el autor].

3.2.5 Sistema de protección de golpe de ariete del caso de estudio

Para prevenir el fenómeno transitorio en la minera, y tal como se comentó en el capítulo anterior, a 85 m de la descarga de las bombas, fueron instalados tres estanques hidroneumáticos con compresor de 5000 litros, como se muestra en la Figura 3.14 y cuya configuración se adjunta en la Figura 3.15. Estos fueron fabricados según las reglas para la construcción de recipientes a presión de la norma ASME VIII, Div. I.



Figura 3.14: Estanques verticales con compresor instalados en la minera.

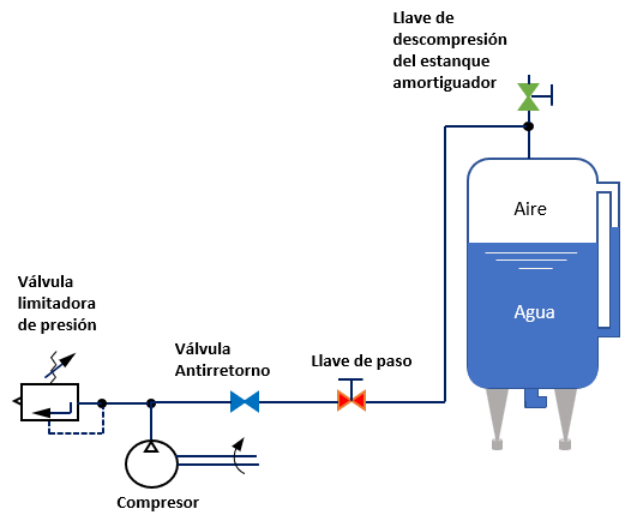


Figura 3.15: Instalación y componentes de un estanque amortiguador.

Cuando el sistema se encuentra operando en régimen estacionario, el aire dentro del calderín se encuentra a la misma presión del agua que está siendo impulsada, por lo que no existe flujo entre el estanque amortiguador y la línea de impulsión.

Al existir una diferencia de presión entre ambos, el estanque inyecta agua a la línea de impulsión que permite mitigar las depresiones del transitorio. El volumen de aire dentro del estanque se expande, lo que hace que la presión interior del estanque disminuya. Por otro lado, cuando la presión en la línea de impulsión aumenta, se genera un flujo hacia el estanque amortiguador, comprimiendo el volumen de aire del estanque y amortiguando así las sobrepresiones producidas.

Cada uno de los estanques amortiguadores marca Vogt [23] presenta las características que se muestran en la Tabla 3.5 y que corresponden al esquema presente en la Figura 3.16:

Tabla 3.5: Características de los estanques amortiguadores.

<i>Modelo</i>	<i>Volumen (L)</i>	<i>Presión (bar)</i>	<i>ØD (mm)</i>	<i>DN (mm)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>Peso (kg)</i>
HVG 5000 VC - 16	5000	12	1500	250 (10")	4000	1850

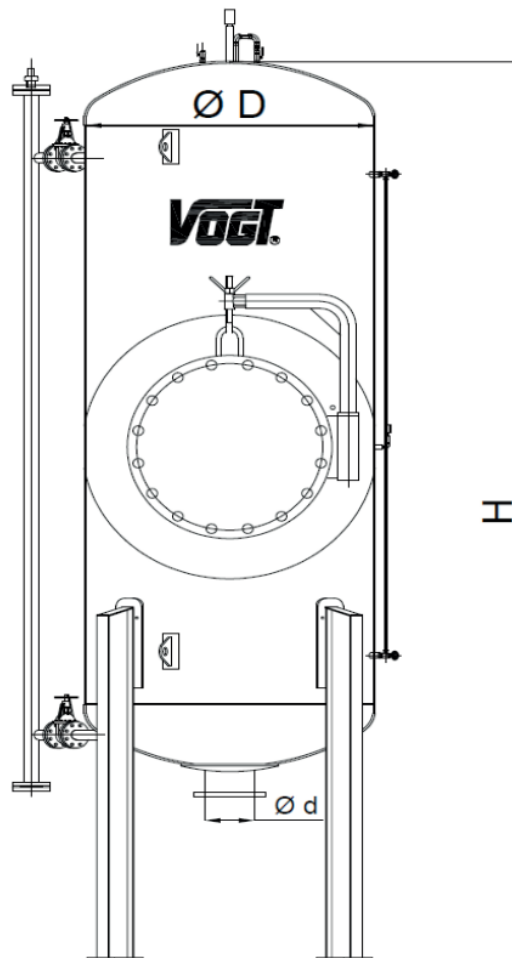


Figura 3.16: Esquema referencial del estanque amortiguador. Fuente: [23]

3.3 Modelación del sistema en Allievi

3.3.1 Condiciones iniciales

Para lo modelación del sistema, se consideran las siguientes condiciones iniciales:

Condiciones Generales

- Inicio de simulación: $t = 0$ s; Término de simulación: $t = 300$ s.
- 3 bombas centrífugas en paralelo impulsan el fluido a $284 \frac{L}{s}$ y 64 mca, cada una.
- Estanque de alimentación y descarga con llenado constante.
- Cañería principal no presenta ramificaciones.
- Presión inicial del sistema según se muestra en la Figura 3.16 ($P_{mín} = 4,4$ mca; $P_{máx} = 44,92$ mca).

Caso 1: Encendido de bombas

- Encendido de bombas en $t = 0$ s
- Duración del encendido de bombas: 300 s

Caso 2: Apagado de bombas

- Detención de bombas en $t = 30$ s
- Duración del apagado de bombas: 7 s

Caso 3: Apertura de válvula

- Válvula Mariposa maniobrible ubicada a los 3374 m de la línea de conducción, con tiempo de apertura igual a 15 s, menor al tiempo crítico $t_c = 28.16$ s (calculado en Anexo B).
- Porcentaje apertura de válvula = 100 %
- Apertura de válvula en $t = 30$ s

Caso 4: Cierre de válvula

- Válvula Mariposa maniobrible ubicada a los 3374 m de la línea de conducción, con tiempo de cierre igual a 15 s, menor al tiempo crítico $t_c = 28.16$ s (calculado en Anexo B).
- Porcentaje cierre de válvula = 100 %
- Cierre de válvula en $t = 30$ s

La Figura 3.17 muestra la presión que se genera en el sistema en régimen estacionario, donde al principio presenta un alza debido al encendido de la bomba, luego se mantiene constante por el largo recorrido de la cañería sin una diferencia de altura significativa, y luego el sistema pierde presión por la subida que debe vencer (41,38 mca).

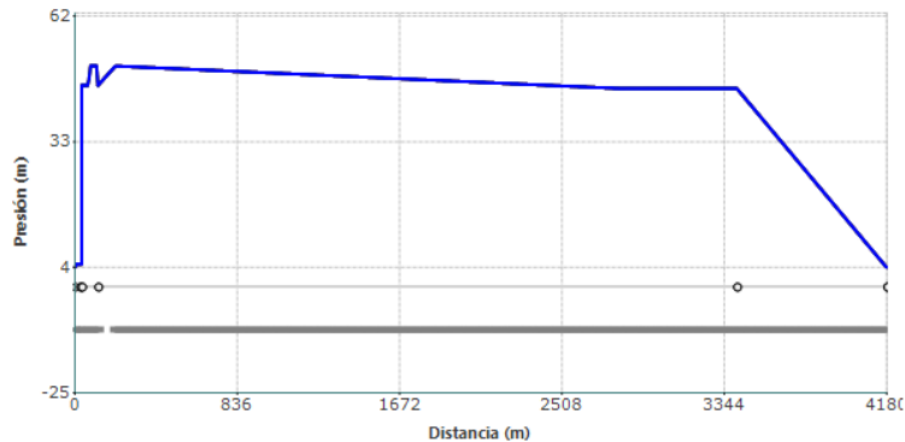


Figura 3.17: Presión del sistema en régimen estacionario.

3.3.2 Redimensionamiento del sistema de protección para el caso de estudio

Para este caso, el volumen total del estanque amortiguador se calcula utilizando el programa EES desarrollado en la guía de selección, adjunto en la parte B.2 del Anexo B.





Considerando el volumen total del estanque dimensionado según el método de Carmona, y utilizando un factor de seguridad de 1,2, el volumen correspondiente al estanque amortiguador es de $14,02 \text{ m}^3$ a una presión de hinchado de 0,56 bar.

El volumen obtenido por el programa justifica que se hayan seleccionado 3 estanques amortiguadores de 5000 L como sistema de protección. Luego, la selección de estos estanques se corroborará mediante la modelación del sistema, indicando si estos resultan ser necesarios para resistir la presión generada por un golpe de ariete.

3.3.3 Configuración de información en el programa

En la Tabla 3.6, se describen las líneas que representan el comportamiento y los valores de la onda de presión de acuerdo con la configuración realizada.

Tabla 3.6: Definiciones de los tipos de líneas presentes en el software.

<i>Tipo de línea</i>	<i>Definición</i>
	Presión permanente
	Presión mínima registrada (depresión)
	Presión máxima registrada (sobrepresión)
	Presión igual a -10,33 mca

Estas presiones muestran los rangos de las fluctuaciones de presión y permite ver en qué zona fluctúa la presión permanente o estacionaria, también si es que eventualmente supera la presión nominal de la cañería, o si la depresión registrada cruza la presión de vacío, lo que significaría un colapso de la cañería.

3.4 Análisis de resultados

Los casos que provocan un golpe de ariete corresponden a los de *encendido – apagado de bombas* y *apertura – cierre de válvulas*. Cada uno de los 4 casos que dan lugar a dichas condiciones, serán estudiados mediante su modelación en el software Allievi.

Allievi permite analizar el sistema mediante gráficos de envolventes, tanto de la altura piezométrica como de presión. La altura piezométrica es una medida de la energía total de un fluido por unidad de peso, compuesta por la altura geométrica más la presión. En cambio, la presión alude específicamente a la fuerza ejercida por el fluido en un punto determinado.

Para este proyecto, se analizarán los gráficos de presiones manométricas para los 4 casos en que el sistema se encuentre operando *sin un sistema de protección*, con el *sistema de protección actual (3 estanques amortiguadores de 5 m³)*, *sistema con 2 estanques amortiguadores de 5 m³* y *un sistema con solo 1 estanque amortiguador de 5 m³*, obteniendo un total de 16 gráficos en un tiempo de simulación de 300 s.

En cuanto a las presiones admisibles, se tiene que la presión máxima que resiste la cañería viene dada su presión nominal [33], la cual es de clase 10, correspondiente a 10 bar (102 mca). Por otro lado, la presión mínima que resiste la cañería viene del cálculo de la presión crítica de vacío admisible, correspondiente a -7 mca, cuya fórmula se encuentra en el Anexo B.

3.4.1 Modelación de caso 1: Encendido de bombas

Para el caso de encendido de las bombas sin protección (Figura 3.18 a), las ondas de presión no superan en ningún momento los límites admisibles del sistema. Luego, en las figuras 3.18 b, c y d, se observa como estas ondas son amortiguadas de mejor manera a medida que se incorporan los estanques amortiguadores.

3.4.2 Modelación de caso 2: Apagado de bombas

El segundo caso corresponde al apagado de la bomba en un tiempo de parada de 7 s, menor al tiempo de apagado propuesto por Mendiluce (11 s), con tal de obtener las mayores ondas de presión, cuya fórmula y cálculo se adjunta en el Anexo B. En la Figura 3.19 a, se muestra el sistema sin protección, donde la onda de presión supera a la presión crítica de vacío admisible, por lo que es necesario instalar un sistema de protección. Al instalar 1 estanque amortiguador, como se muestra en la Figura 3.19 b, la onda de presión sigue superando la presión de vacío admisible, y es a partir de la instalación de 2 estanques amortiguadores que la onda de presión logra ser amortiguada dentro del rango admisible, según los valores obtenidos de la Figura 3.19 c y d.

3.4.3 Modelación de caso 3: Apertura de válvula

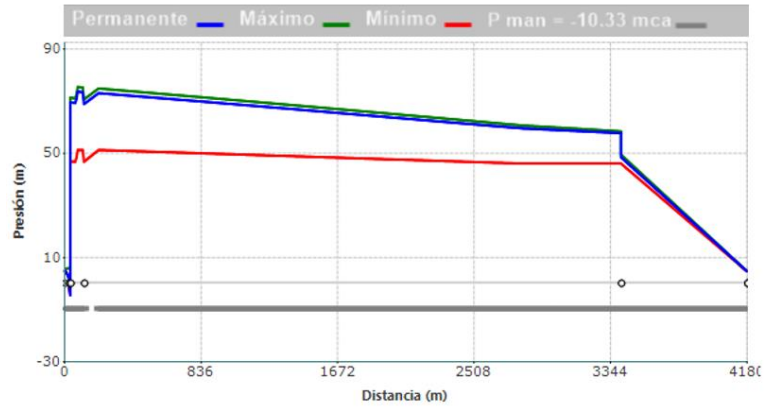
El tercer caso corresponde a la apertura de una válvula reguladora de manera rápida (15 s, tiempo menor al tiempo crítico $t_c = 28.16$ s), obteniéndose así las mayores ondas de presión.

En la Figura 3.20 a, se muestra el sistema sin protección, cuyas ondas de presión alcanzan los 140,58 y -12,79 mca, lo cual supera los límites admisibles del sistema. Al instalar 1 estanque amortiguador las ondas de presión alcanzan los 100,22 y -9,14 mca, por lo tanto, el sistema sigue sin poder amortiguar adecuadamente las ondas, según la Figura 3.20 b. Luego, es a partir de la instalación de 2 estanques amortiguadores que las ondas se encuentran dentro del rango admisible, según los valores obtenidos de las figuras 3.20 c y d.

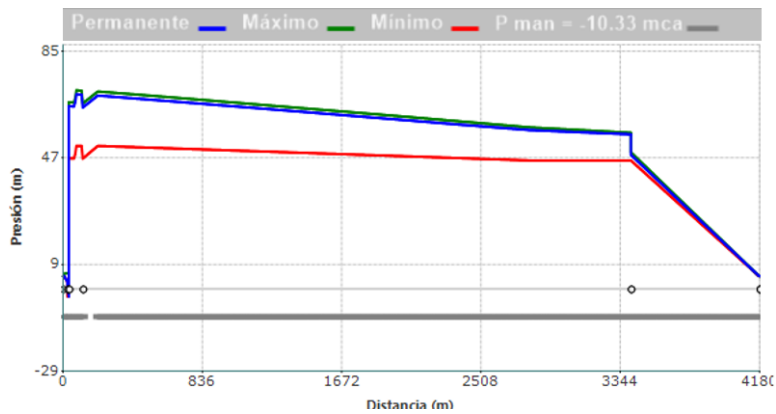
3.4.4 Modelación de caso 4: Cierre de válvula

El cuarto y último caso, corresponde al cierre de válvula en un tiempo de 15 s, donde en un sistema sin protección las ondas de presión superan los límites admisibles, alcanzando los 139,76 y -116,27 mca, de acuerdo con los valores obtenidos de la Figura 3.21 a. La instalación de 1 estanque amortiguador, como se muestra en la Figura 3.21 b, no logra amortiguar adecuadamente las ondas, en cambio, a partir de la instalación de 2 estanques amortiguadores las ondas de presión fluctúan en un rango de presión admisible, de acuerdo con las figuras 21.c y d.

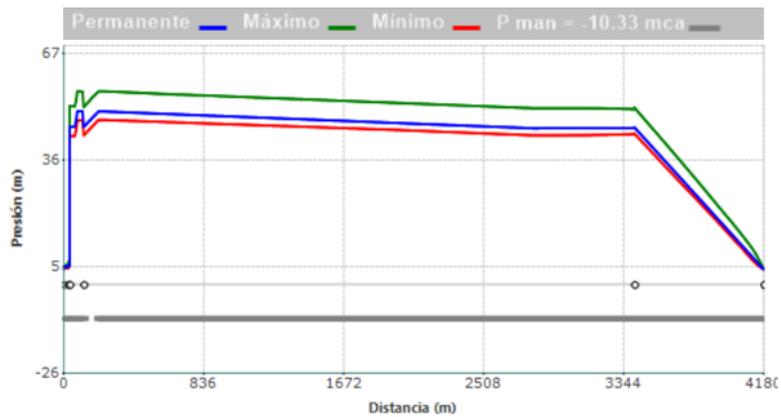
a)



b)



c)



d)

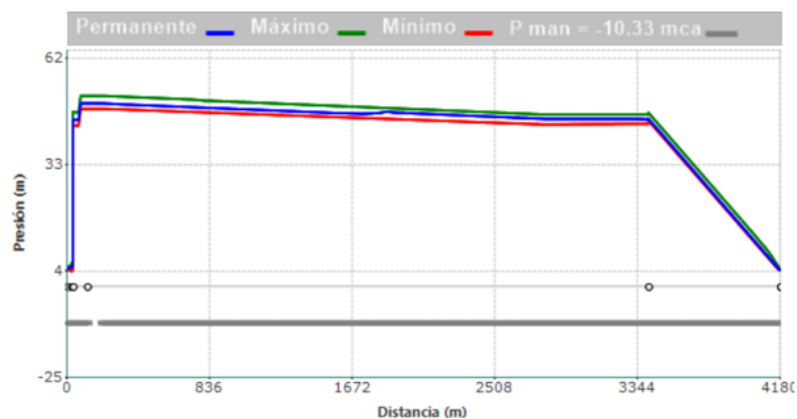
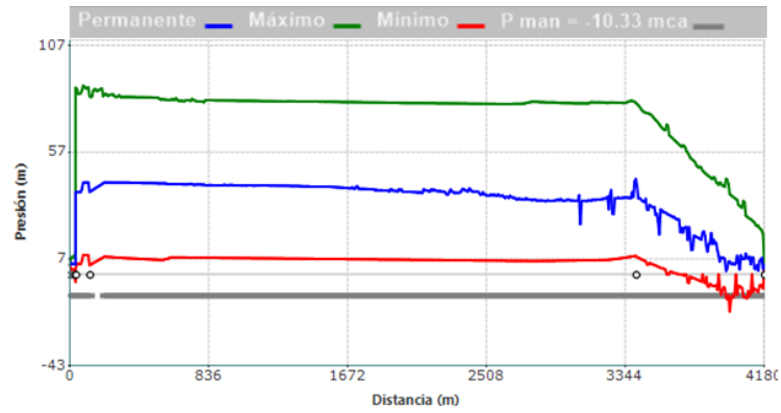
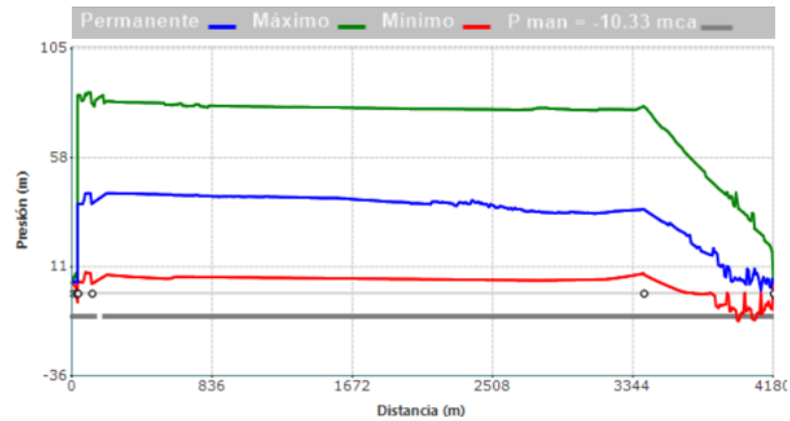


Figura 3.18: Efecto del encendido de las bombas. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores

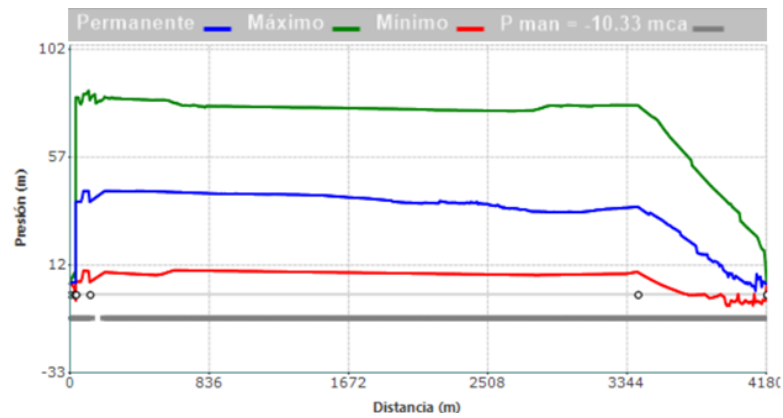
a)



b)



c)



d)

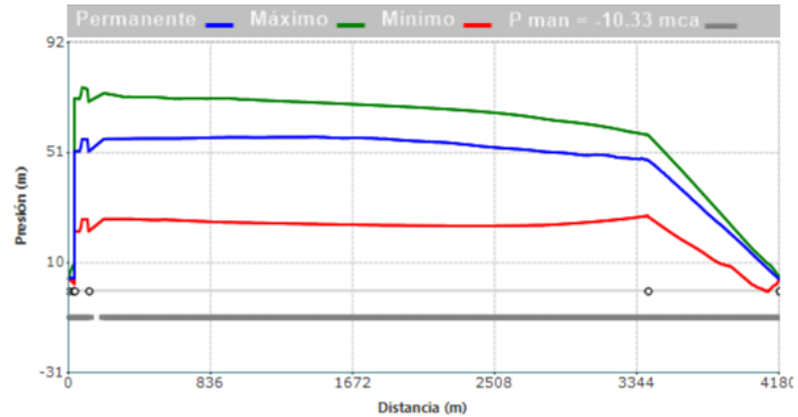
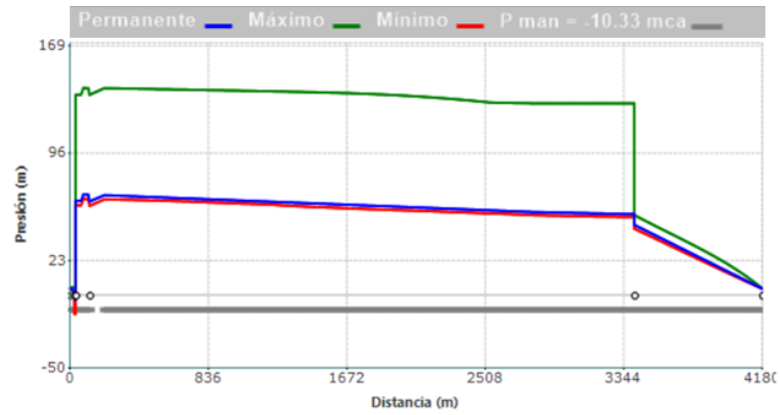
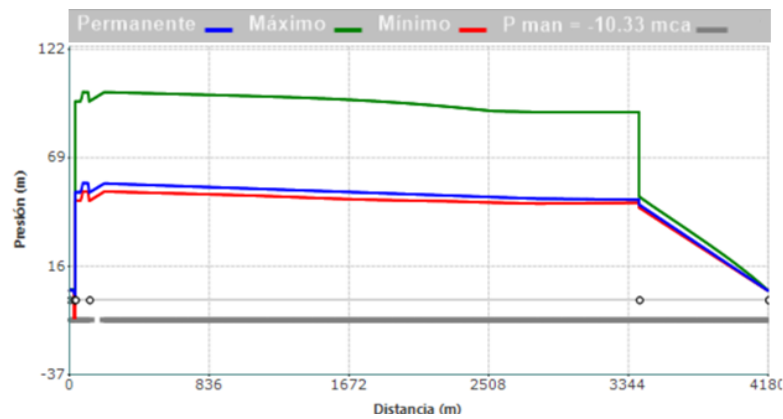


Figura 3.19: Efecto del apagado de las bombas. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores

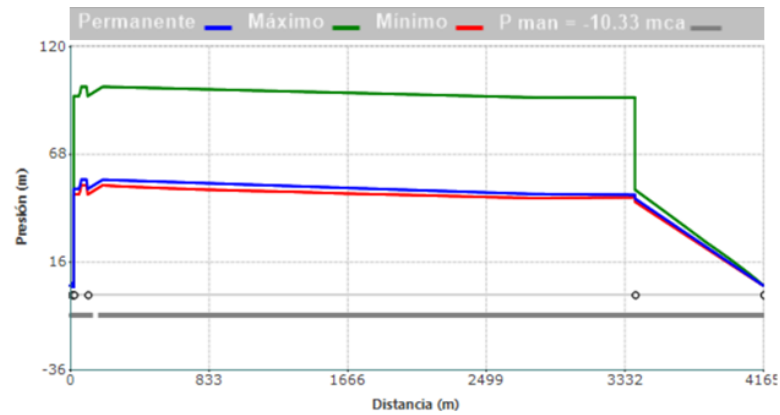
a)



b)



c)



d)

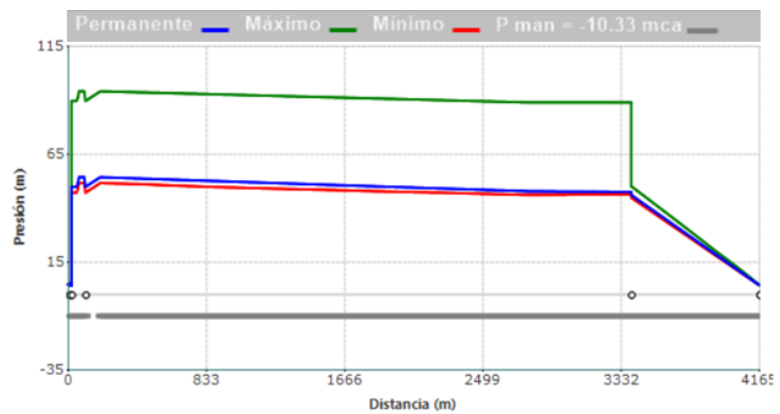
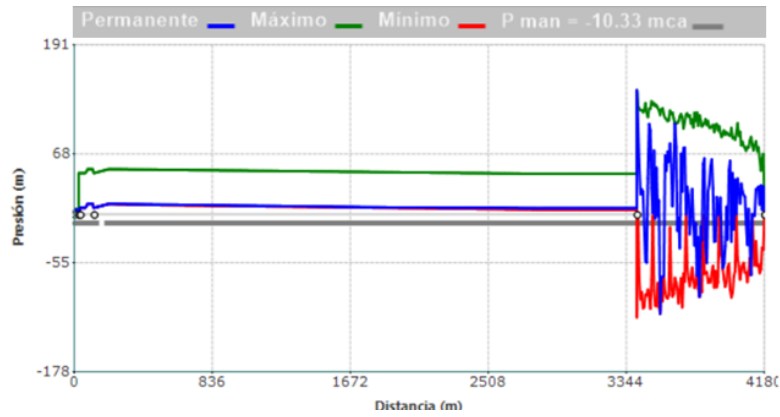
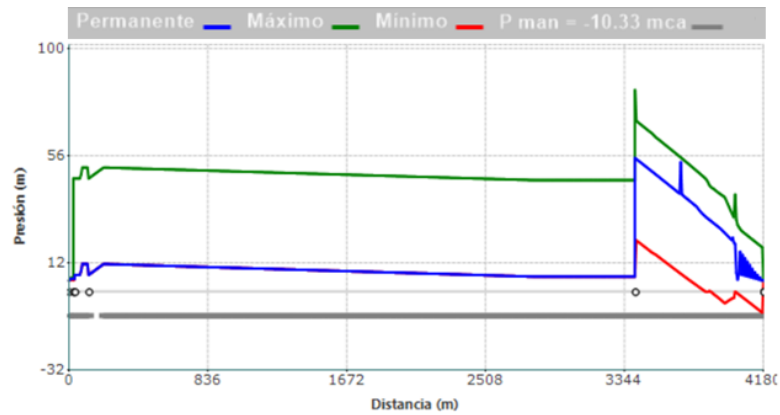


Figura 3.20: Efecto de apertura rápida de válvula. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores

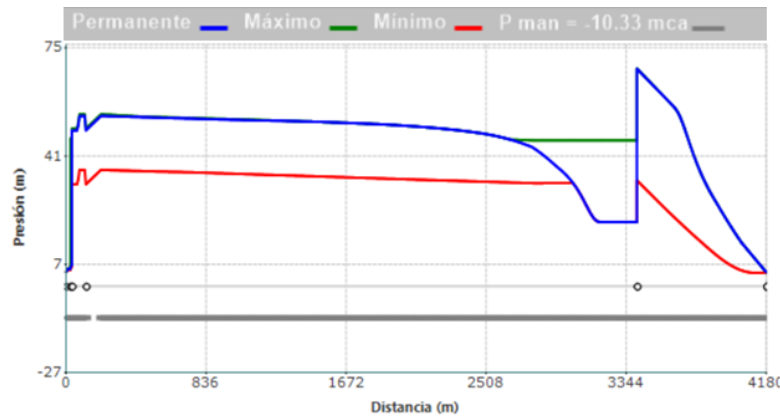
a)



b)



c)



d)

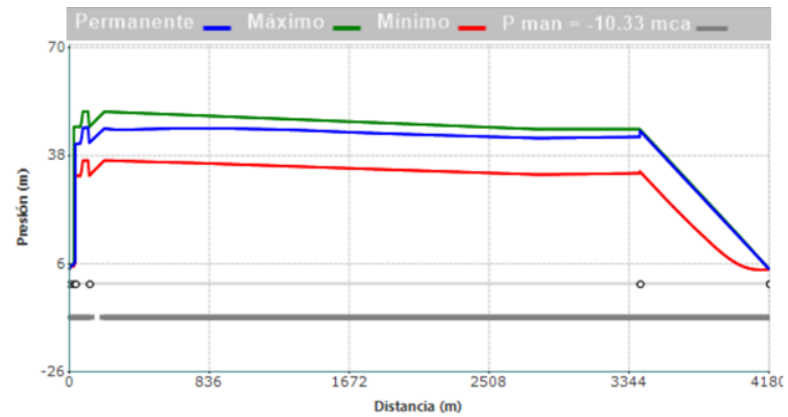


Figura 3.21: Efecto del cierre rápido de válvula. a) Sistema sin protección, b) Sistema con 1 estanque amortiguador, c) Sistema con 2 estanques amortiguadores, d) Sistema con 3 estanques amortiguadores

3.4.5 Presiones máximas y mínimas

Los cálculos que involucren la presión de un fluido deben realizarse utilizando una presión de referencia, y es conveniente que esta sea la presión atmosférica [35]. La presión indicada en la medición de un flujo se denomina presión manométrica, y resulta de la diferencia de la presión absoluta con la atmosférica. Presiones absolutas menores a 10,33 mca corresponden a presiones de vacío, y sabiendo que una presión absoluta es siempre positiva, el denominado *vacío perfecto* ($P_{abs} = 0$) es la presión más baja posible y se da cuando $-P_{atm} = P_{man}$ [35]. Algunas de las modelaciones del sistema indican presiones menores que -10,33 mca, lo que no es posible en la realidad por lo comentado anteriormente, y se interpreta que en la práctica estas colapsarían por superar el límite de presión de vacío admisible de las cañerías. Las presiones máximas y mínimas se obtienen tras el cierre de una válvula de manera rápida, alcanzando los valores de 139,76 y -116,27 mca, respectivamente. Estas logran ser amortiguadas dentro de los límites admisibles de presión (102 y -7 mca) a partir de la instalación de 2 estanques amortiguadores. Ahora, se puede observar que el impacto es menor cuando el sistema se encuentra con la protección actual, lo que genera menor fatiga en las cañerías y accesorios del sistema, y a la vez un aumento de su vida útil. Su estudio excede los objetivos de este informe, pero complementaría al caso de estudio, por lo que se recomienda su evaluación.

Algunos de los gráficos a simple vista son similares, como en la apertura rápida de válvula, esto sucede ya que el sistema logra estabilizarse en un tiempo menor al de simulación, y a medida que se agregan estanques, mayor es la amortiguación de las ondas de presión. También, se desprende de los gráficos que las sobrepresiones producidas por un golpe de ariete no son equivalentes de manera simétrica o energética con las depresiones, pues en las primeras actúan los esfuerzos de compresión sobre el fluido, en cambio, en las segundas actúan los esfuerzos de tracción.

A continuación, en la Tabla 3.7, se muestran las presiones máximas y mínimas de los casos modelados, sin un sistema de protección. Luego, las presiones máximas y mínimas de los 4 casos con estanques amortiguadores se muestran en las tablas 3.8 y 3.9, respectivamente.

Tabla 3.7: Presiones máximas y mínimas de los casos modelados. Sistema sin protección.

<i>Caso</i>	<i>Descripción</i>	<i>Presión máx [mca]</i>	<i>Presión mín [mca]</i>
1	Encendido de las bombas	76,74	-2,46
2	Apagado de las bombas	88	-15,47 *
3	Apertura de válvula mariposa	126,71 +	-12,01 *
4	Cierre de válvula mariposa	139,76 +	-116,27 *

Tabla 3.8: Presiones máximas en el sistema considerando estanques amortiguadores.

<i>Caso</i>	<i>Presión máx [mca]. 1 estanque amortiguador</i>	<i>Presión máx [mca]. 2 estanques amortiguadores</i>	<i>Presión máx [mca]. 3 estanques amortiguadores</i>
1	70,47	52,5	48,74
2	83,06	79,62	74,89
3	104,21 +	98,3	91,45
4	84,9	66,24	53,4

Tabla 3.9: Presiones mínimas en el sistema considerando estanques amortiguadores.

<i>Caso</i>	<i>Presión mín [mca]. 1 estanque amortiguador</i>	<i>Presión mín [mca]. 2 estanques amortiguadores</i>	<i>Presión mín [mca]. 3 estanques amortiguadores</i>
1	-1,86	4,44	4,05
2	-11,42 *	-4,11	-0,67
3	-9,98 *	5,24	4,60
4	-8,77 *	5,80	4,72

Nota: Aquellos valores acompañados de un (*), superan la presión crítica de vacío admisible de la cañería (-7 mca), y los que cuentan con un (+), superan la presión máxima admisible (102 mca).

4 Conclusiones

El principal problema asociado a un golpe de ariete es su efecto destructivo en las líneas de cañerías y accesorios, llegando al punto de generar rupturas si es que estos no son capaces de resistir por sí solas las ondas de presión producidas. Ante tal riesgo, es fundamental disponer de una guía para el dimensionamiento y selección de un sistema de protección.

La guía de selección desarrollada en este trabajo es simple, pero efectiva, pues permite dimensionar un dispositivo de protección, denominado estanque amortiguador o hidroneumático, por medio de un diagrama de flujo y un programa EES. El dimensionamiento comienza con la caracterización del sistema, y en conjunto con las condiciones iniciales de operación, se puede calcular el sistema en régimen permanente, donde se obtienen los valores de altura y presión para dimensionar un estanque amortiguador. Luego, estas dimensiones deben ser ingresadas en el software de cálculo hidráulico Allievi, donde se modela el sistema hidráulico según los casos que provocan un golpe de ariete. La teoría elástica plantea las ecuaciones constitutivas que describen el comportamiento de un golpe de ariete y que pueden ser resueltas mediante diversos métodos, siendo el más utilizado el Método de las Características, el cual corresponde al fundamento de cálculo de Allievi.

Los resultados de las modelaciones indican que el sistema no resistiría un golpe de ariete sin un sistema de protección. Al considerar la instalación de 1 estanque amortiguador, este logra amortiguar adecuadamente las ondas de presión para el encendido de bombas, mas no en los demás casos, donde las ondas de presión superan los límites admisibles del sistema. Por otro lado, los 2 estanques amortiguadores mantienen a las ondas de presión dentro de los límites admisibles para todos los casos que generan un golpe de ariete, al igual que cuando se cuenta con 3 estanques amortiguadores, con la diferencia que al tener 3 estanques se acota el rango de presiones máximas y mínimas. Así, se concluye que el sistema de protección actual de la minera se encuentra sobredimensionado.

Lo anterior indica que, para una mayor precisión en los resultados, el dimensionamiento de un estanque amortiguador debe ir acompañado de la modelación del sistema para evitar un sobredimensionamiento. Es tal su importancia, que si esto hubiese sido aplicado para el caso de estudio, se estima que la minera habría ahorrado 108.873 USD (según la oferta económica de Vogt en el año 2014, adjunta en Anexo C), al mismo tiempo que se garantizaba la seguridad del sistema hidráulico ante un golpe de ariete .

Finalmente, de manera complementaria, se recomienda evaluar la variación en la vida útil de los elementos hidráulicos al aumentar el número de estanques amortiguadores al sistema, y para trabajos futuros, desarrollar una aplicación interactiva para la industria a partir de la guía de selección, utilizando la evaluación del caso de estudio como muestra de la utilidad que esta representaría.

Referencias

- [1] Statista. (2023, 30 agosto). Copper Production by Country 2022. <https://www.statista.com/statistics/264626/copper-production-by-country/#:~:text=As%20Chile%20is%20the%20world's,Desert%20in%20Chile's%20Antofagasta%20Region.>

- [2] Ministerio de Minería. (2022). Innovación y desarrollo tecnológico para la pequeña minería metálica y no metálica. Santiago. https://www.dipres.gob.cl/597/articles-285553_doc_pdf1.pdf

- [3] Muñoz, P. (2023). Estudio técnico - económico de un sistema de impulsión existente en régimen estacionario. Proyecto de ingeniería mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Concepción.

- [4] Méndez, O. (2017). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento (Fenómenos transitorios en líneas de conducción). https://www.academia.edu/34181597/Libro11_Fenomenos_Transitorios_en_Lineas_de_Conduccion

- [5] Chaudhry, H., (1987), Applied hydraulic transients. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York.

- [6] Abreu, Cabrera, E., & Espert, V. B. (2012). Transitorios hidráulicos. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.

- [7] Joukowski, N. papel para Politécnica Soc. Moscú, primavera de 1898, traducción al inglés por O. Simin. Proc. AWWA, 1904

- [8] Tapia, F. (2018). Simulación numérica por el método de elementos finitos del transiente hidráulico en sistemas de transporte de fluidos monofásicos a largas distancias. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/159297>

- [9] Navarro, F. (2019). Modelización de transitorios hidráulicos. Resolución numérica del golpe de ariete. <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/190061>

- [10] Abdeldayem, O.M.; Ferràs, D.; van der Zwan, S.; Kennedy, M. Analysis of Unsteady Friction Models Used in Engineering Software for Water Hammer Analysis: Implementation Case in WANDA. Water 2021, 13, 495. <https://doi.org/10.3390/w13040495>

- [11] BENTLEY SYSTEMS, - "Bentley HAMMER V8i User's Guide". —, 2009.
- [12] Wylie, E.B.; Streeter, V.L., (1993), Fluid transients in systems. Prentice Hall. Englewood Cliffs. New York
- [13] Parmakian, J., (1955), Waterhammer analysis. Prentice Hall Inc. New York.
- [14] Fok, A.,(1987), "Una contribución al análisis de las pérdidas de energía en transitoria Pipe Flow", Ph.D. Tesis, Universidad de Ottawa
- [15] Wood, DJ, Dorsch, RG, y Lightner, C. (1966). "Análisis de la onda-Plan de flujo no estacionario en conductos cerrados." Diario de la División Hidráulica, ASCE, 92, 83.
- [16] Walski, TM y laúdes, TL (1994) "transitorios hidráulicos causan problemas de baja presión." Revista de la American Water Works Association, 75 (2).
- [17] Streeter, V.L.; Wylie, E.B., (1967), Hydraulic Transients. Mc Graw Hill Book Co. Inc. New York.
- [18] Allievi. (s.f). Manual técnico Allievi. Obtenido de <http://www.allievi.net/allievi-es.php>
- [19] Lupa, S., Gagnon, M., Muntean, S., & Abdul-Nour, G. (2022). Investigation of water hammer overpressure in the hydraulic passages of hydropower plants equipped with Francis turbines. IOP conference series, 1079(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1079/1/012003>
- [20] Faria, Í. M., & Kellner, E. (2021). Desenvolvimento de modelo computacional para simulação de transiente hidráulico em linhas de recalque. Revista DAE, 69(233), 27-36. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.075>
- [21] Sedó, A. M. R., Arrué, P., García-Serra, J., Espert, V. B., & Biel, F. (2018). Modelo de llenado de grandes conducciones. Ingeniería del agua, 22(4), 239. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.9642>
- [22] Londoño, M. A. C., Grisales, D. E., & Martínez, J. C. Q. (2017). Diseño y evaluación del comportamiento de un amortiguador supresor de sobrecarga para abastecimientos de agua rurales (Design and Evaluation of the behavior of an overload suppressor for rural water supplies). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3112912>

- [23] Catálogo VOGT | Estanques Golpe de Ariete. (2023). Vogt. <https://www.vogt.cl/catalogos-vogt/es/Catalogo-Estanques-Golpe-de-Ariete.pdf>
- [24] Abreu, J., Cabrera, E., Iglesias, P., & Izquierdo, J. (1995). El golpe de ariete en tuberías de impulsión. comentarios a las expresiones de Mendiluce. *Ingeniería del agua*, 2(2). <https://doi.org/10.4995/ia.1995.2676>
- [25] Twyman, J. 2017. Water hammer analysis in a water distribution system. *Ingeniería del agua*, 21(2), 87-102. <https://doi.org/10.4995/ia.2017.6389>
- [26] Inženjering, N. (2017). AFT Impulse TM User's Guide AFT Impulse Version 4.0 Waterhammer Modeling in Piping Systems Applied Flow Technology. www.academia.edu. https://www.academia.edu/34761468/AFT_Impulse_TM_Users_Guide_AFT_Impulse_version_4_0_Waterhammer_Modeling_in_Piping_Systems_Applied_Flow_Technology
- [27] A. R. D. Thorley, "Fluid transients in pipeline systems: a guide to the control and suppression of fluid transients in liquids in closed conduits". 2nd ed., London, Professional Engineering Publishing, 2004.
- [28] Huerta, A. S., & Canales, E. A. R. (2017). Consideraciones para el Diseño de Cámaras de aire como medio de control del transitorio hidráulico en sistemas de bombeo (Design considerations for air chambers as control devices of hydraulic transients in pumping systems). Social Science Research Network. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3109091>
- [29] D. Stephenson, "Simple guide for design of air vessels for water hammer protection of pumping lines", *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, pp. 792-797, 2002.
- [30] R. Autrique y E. Rodal. "Cámaras de aire en acueductos: las gráficas adimensionales para diseño vistas a través de experimentos de laboratorio", XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Lima, Perú, 2016.
- [31] R. Carmona, A. Sánchez y J. Zarco, "Método simplificado para el predimensionamiento de cámaras de aire", XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Córdoba, Argentina, 2002.
- [32] Luis E. Perez, Adolfo G. (2005). Estudio de Transitorios: Golpe de Ariete. https://cms.fi.uba.ar/uploads/institutos_golpe_ariete_b44b61e9b5.pdf
- [33] Méndez, R. R. (2016b). ASME B31.3 EN ESPAÑOL TUBERÍAS DE PROCESO. <https://www.academia.edu/>

- [34] SHAMES, I. H. (1998). MECANICA DE FLUIDOS (3a. ed.). SANTAFE DE BOGOTA: MCGRAW-HILL INTERAMERICANA
- [35] MOTT, R. L. (2006). MECANICA DE FLUIDOS (6a. ed., 1a. reimp.). MEXICO: PEARSON EDUCACION.
- [36] CATALOGO DE PRODUCTOS PECC TEHMCO S.A. (2011, 24 enero). Issuu. https://issuu.com/rockoicm/docs/catalogo_final_tehmco
- [37] BERMAD (2021). BERMAD Minería Water Solutions. https://www.mapa.gob.es/images/es/ponencia_4_tcm30-561850.pdf
- [38] ICOM Compresors (2023). Productos ICOM. <https://icomcompressors.com/productos/?lang=es>
- [39] EMASESA (2011). Chimenea de equilibrio. <https://www.flickr.com/photos/emasesa>
- [40] BERMAD (2021). Soluciones anti-golpe de ariete para la protección de estaciones de bombeo (2021). https://www.mapa.gob.es/images/es/ponencia_4_tcm30-561850.pdf

Anexo A: Tablas y esquemas

HS250-480

Bomba Estación de Re-impulsión N° 1

1450 r/min

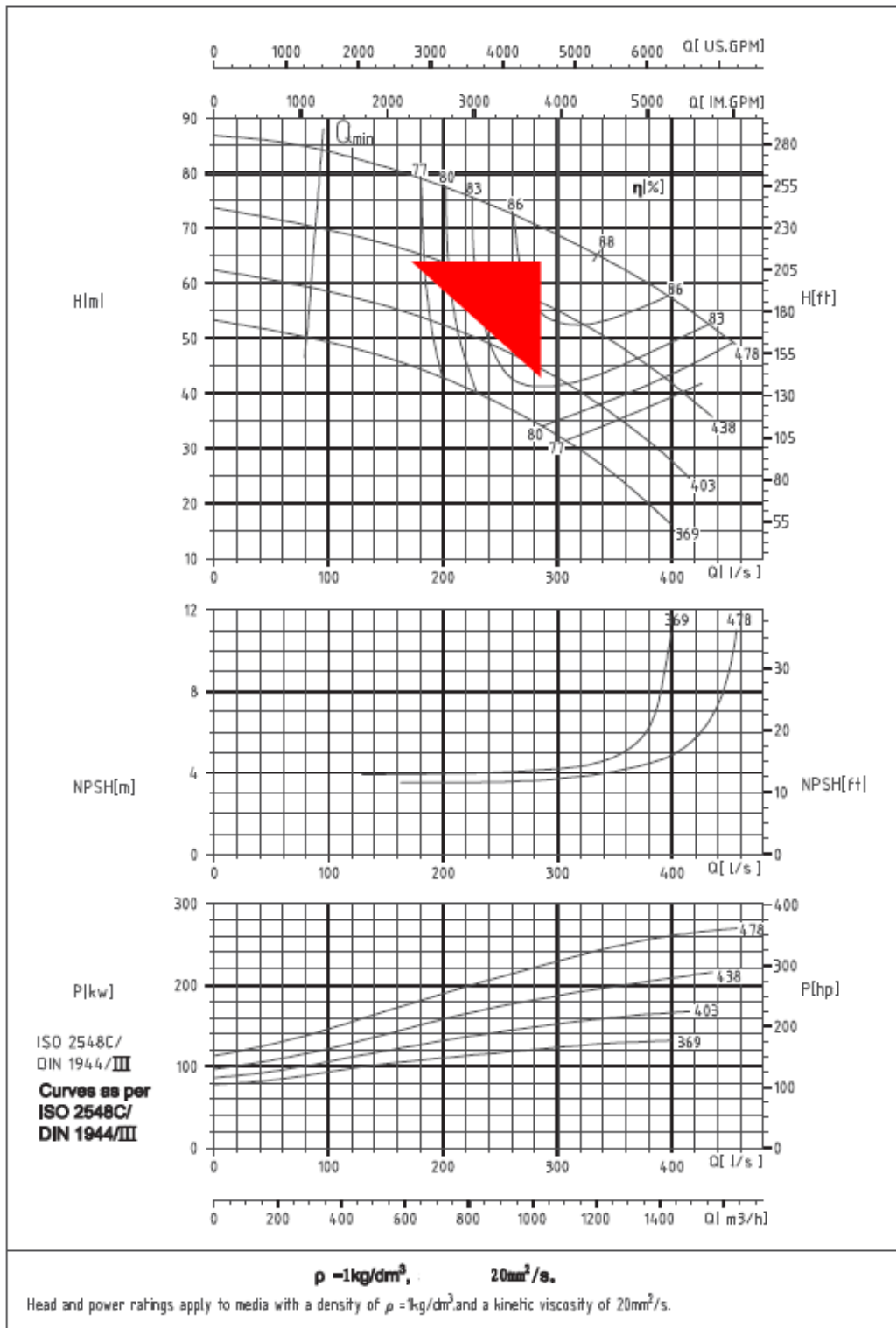


Figura A.1. Curva característica de la bomba. Fuente: [3]

Cañerías de Acero

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Externo (mm)	ISO R65 Ser.Liv.II		ASTMA 795/A53 Sch 10/Gr.B	ASTMA 53 Sch 20/Gr.B	ASTMA 53/106 Sch 40/Gr.B	ASTMA 53 STD/Gr.B	ASTMA 53/106 Sch 80/Gr.B	
1/2	21,34	A 2,00	C 700	2,11		2,77	700	3,73	850
		B 0,950	D 49,2	0,998		1,266	49,2	1,619	59,8
3/4	26,67	2,30	700	2,11	700	2,87	700	3,91	850
		1,380	49,2	1,275	49,2	1,683	49,2	2,193	59,8
1	33,40	2,60	700	2,77	700	3,38	700	4,55	850
		1,980	49,2	2,089	49,2	2,498	49,2	3,282	59,8
1 1/4	42,16	2,60	700	2,77	1000	3,56	1300	4,85	1900
		2,540	49,2	2,687	70,3	3,382	91,4	4,459	133,6
1 1/2	48,10	2,90	700	2,77	1000	3,68	1300	5,08	1900
		3,230	49,2	3,107	70,3	4,044	91,4	5,403	133,6
2	60,32	2,90	700	2,77	1000	3,91	2500	5,54	2500
		4,080	49,2	3,925	70,3	5,436	175,8	7,473	175,8
2 1/2	73,02	3,20	700	3,05	1000	5,16	2500	7,01	2500
		5,710	49,2	5,254	70,3	8,620	175,8	11,400	175,8
3	88,90	3,20	700	3,05	1000	5,49	2500	7,62	2500
		6,720	49,2	6,446	70,3	11,278	175,8	15,252	175,8
4	114,30	3,60	700	3,05	1200	6,02	2210	8,56	2800
		9,750	49,2	8,352	84,4	16,055	155,4	22,290	196,9
5	141,30			3,40	1200	6,55	1950	9,52	2800
				11,562	84,4	27,754	137,1	30,921	196,9
6	168,27			3,40	1000	6,35	1190	10,97	2740
				13,622	70,3	25,340	83,7	45,512	192,7
8	219,07			4,78	800	6,35	1220	12,70	2430
				19,939	56,3	33,272	85,8	64,584	170,9
10	273,05			4,78	700	6,35	980	15,06	2320
				27,825	49,2	41,723	68,9	95,723	163,2
12	323,85			4,57		6,35	820	17,45	1940
				36,009		49,669	57,7	131,703	136,4
14	355,60			6,35		7,92	940	19,05	2250
				54,624		67,972	66,1	157,877	158,2
16	406,40			6,35		7,92	820	21,41	2220
				62,570		77,912	57,7	203,112	156,1
18	457,20			6,35		7,92	730	23,80	2190
				70,516		87,837	51,3	254,150	154,0
20	508,00			6,35		9,52	790	26,19	2170
				70,516		116,957	55,6	310,843	152,6
22	558,80			6,35		9,52	720	28,57	
				86,408		128,876	50,6	373,190	
24	609,60			6,35		9,52	660	30,94	2130
				94,354		140,795	46,4	441,043	149,8
26	660,40			7,92		12,70	810		
				127,373		202,165	57,0		
28	711,20			7,92		12,70			
				137,283		218,438			
30	762,00			7,92		12,70	700		
				147,208		234,360	49,2		
32	812,80			7,92		12,70	660		
				157,133		250,282	46,4		
34	863,60			7,92		12,70			
				184,066		266,203			
36	914,40			7,92		12,70	580		
				176,923		282,125	40,8		

(*) Cañerías ISO 1/2" tienen exterior de 76.1 mm. Nota: Cada celda de datos contiene 4 datos. Donde:

A	C
B	D

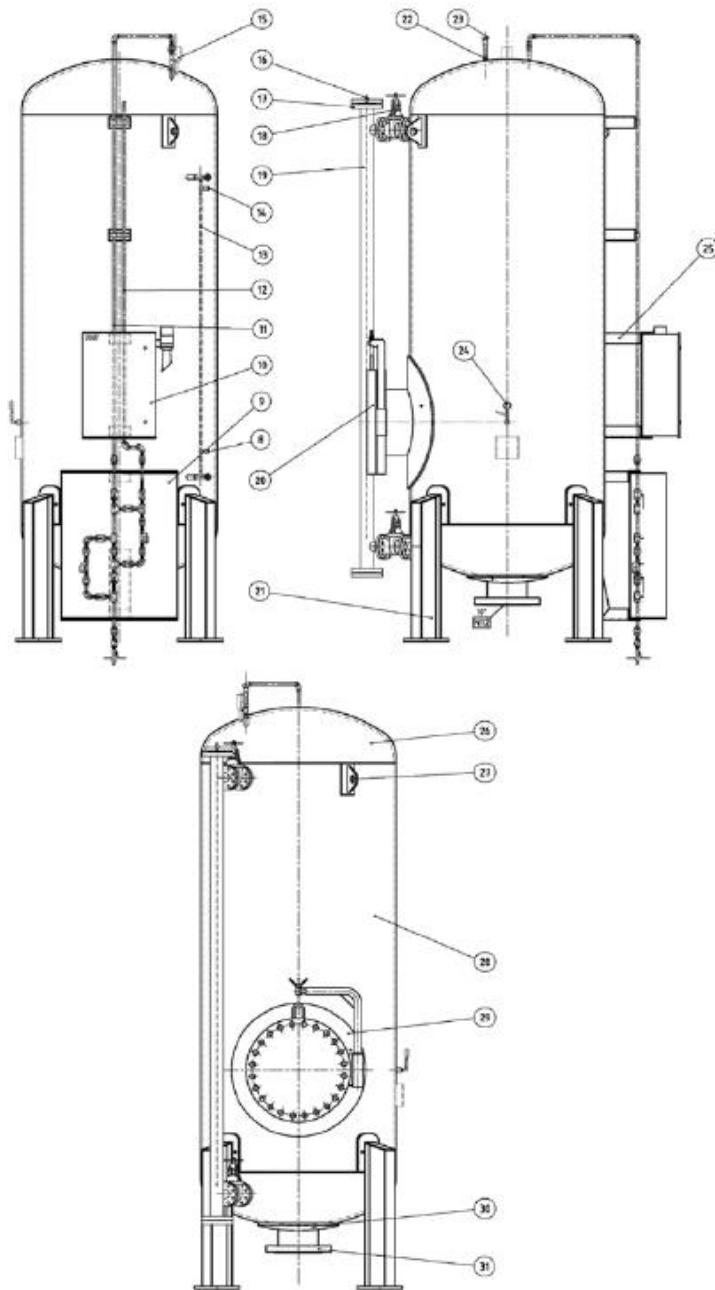
A: Espesor de Cañerías expresado en milímetros (mm) C: Presión de trabajo (de prueba) expresada en PSI (lb/pulg.2)
 B: Peso por metro de cañería expresada en kg/m D: Presión de trabajo (de prueba) expresada en kg/cm²

Figura A.2. Tabla de características de cañerías de Acero. Fuente: [3]

Cañerías de HDPE

DN	3) DN (equiv)	3) Relación estandar de dimensión (SDR)																	
		SDR 41 (S20)		SDR 33 (S16)		SDR 26 (S12,5)		SDR 21 (S10)		SDR 17 (S8)		SDR 13,6 (S6,3)		SDR 11 (S5)		SDR 9 (S4)		SDR 7,4 (S3,2)	
		1) Presión Nominal (PN)																	
		PN4		PN5		PN6		PN8		PN10		PN12,5		PN16		PN20		PN25	
mm	pulg	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m	e min mm	Peso Prom kg/m
16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	0,09	2,3	0,10
20	1/2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	0,12	2,3	0,13	3,0	0,16
25	3/4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	0,15	2,3	0,17	3,0	0,21	3,5	0,24
32	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	0,19	2,4	0,23	3,0	0,28	3,6	0,33	4,4	0,39
40	1 1/4	-	-	-	-	-	-	2,0	0,25	2,4	0,29	3,0	0,36	3,7	0,43	4,5	0,51	5,5	0,61
50	1 1/2	-	-	-	-	2,0	0,31	2,4	0,37	3,0	0,45	3,7	0,55	4,6	0,67	5,6	0,79	6,9	0,94
63	2	-	-	-	-	2,5	0,49	3,0	0,58	3,8	0,72	4,7	0,88	5,8	1,06	7,1	1,27	8,6	1,48
75	2 1/2	-	-	-	-	2,9	0,67	3,6	0,83	4,5	1,02	5,6	1,24	6,8	1,48	8,4	1,78	10,3	2,12
90	3	-	-	-	-	3,5	0,98	4,3	1,19	5,4	1,47	6,7	1,78	8,2	2,14	10,1	2,57	12,3	3,03
110	4	-	-	-	-	4,2	1,44	5,3	1,78	6,6	2,18	8,1	2,64	10,0	3,18	12,3	3,82	15,1	4,54
125	5	-	-	-	-	4,8	1,85	6,0	2,28	7,4	2,78	9,2	3,40	11,4	4,12	14,0	4,94	17,1	5,84
140	5 1/2	-	-	-	-	5,4	2,34	6,7	2,86	8,3	3,49	10,3	4,26	12,7	5,13	15,7	6,18	19,2	7,34
160	6	-	-	-	-	6,2	3,06	7,7	3,74	9,5	4,56	11,8	5,56	14,6	6,74	17,9	8,05	21,9	9,56
180	7	-	-	-	-	6,9	3,81	8,6	4,71	10,7	5,77	13,3	7,06	16,4	8,52	20,1	10,19	24,6	12,08
200	8	-	-	-	-	7,7	4,73	9,6	5,83	11,9	7,12	14,7	8,65	18,2	10,50	22,4	12,60	27,4	14,94
225	9	-	-	-	-	8,6	5,94	10,8	7,37	13,4	9,03	16,6	10,99	20,5	13,30	25,2	15,95	30,8	18,89
250	10	-	-	-	-	9,6	7,37	11,9	9,02	14,8	11,06	18,4	13,54	22,7	16,35	27,9	19,60	34,2	23,32
280	11	-	-	-	-	10,7	9,19	13,4	11,38	16,6	13,90	20,6	16,96	25,4	20,50	31,3	24,64	38,3	29,24
315	12	7,7	7,57	9,7	9,45	12,1	11,70	15,0	14,30	18,7	17,60	23,2	21,50	28,6	25,95	35,2	31,16	43,1	37,01
355	14	8,7	9,63	10,9	11,95	13,6	14,79	16,9	18,16	21,1	22,40	26,1	27,25	32,2	32,94	39,7	39,58	48,5	46,93
400	16	9,8	12,20	12,3	15,22	15,3	18,75	19,1	23,16	23,7	28,31	29,4	34,56	36,3	41,82	44,7	50,21	54,7	59,60
450	18	11,0	15,38	13,8	19,17	17,2	23,71	21,5	29,28	26,7	35,87	33,1	43,78	40,9	52,96	50,3	63,57	61,5	75,40
500	20	12,3	19,15	15,3	23,64	19,1	29,25	23,9	36,13	29,7	44,32	36,8	54,02	45,4	65,34	55,8	78,33	-	-
560	22	13,7	23,85	17,2	29,75	21,4	36,67	26,7	45,22	33,2	55,52	41,2	67,77	50,8	81,86	62,5	98,28	-	-
630	24	15,4	30,17	19,3	37,53	24,1	46,46	30,0	57,12	37,4	70,32	46,3	85,66	57,2	103,97	70,3	124,37	-	-
710	28	17,4	38,45	21,8	47,78	27,2	59,15	33,9	72,85	42,1	89,37	52,2	109,00	64,5	131,97	79,3	158,33	-	-
800	32	19,6	48,76	24,5	60,52	30,6	74,91	38,1	92,34	47,4	113,32	58,8	138,26	72,6	167,36	89,3	200,89	-	-
900	36	22,0	61,50	27,6	76,66	34,4	95,13	42,9	116,83	53,3	143,35	66,2	175,16	81,7	211,85	-	-	-	-
1000	40	24,5	76,15	30,6	94,00	38,2	116,91	47,7	144,34	59,3	177,16	72,5	213,34	90,2	260,09	-	-	-	-
1200	48	29,4	109,63	36,7	135,83	45,9	168,39	57,2	207,76	67,9	244,03	88,2	311,08	-	-	-	-	-	-
1400	54	34,3	149,18	42,9	185,15	53,5	229,03	66,7	282,49	82,4	344,68	102,9	423,24	-	-	-	-	-	-
1600	64	39,2	194,82	49,0	241,63	61,2	299,43	76,2	368,91	94,1	449,89	117,6	552,83	-	-	-	-	-	-
1800	70	43,8	244,72	54,5	302,56	69,1	380,25	85,7	466,60	105,9	569,33	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	78	48,3	301,45	60,6	373,72	76,9	469,88	95,2	576,01	117,6	702,55	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura A.3. Tabla de características de cañerías de HDPE. Fuente: [3]



Nº	Descripción	Cant.
1	Válvula retención 1/2" [NPT] 300 [lbs]	1
2	Niple tuerca 1/2" [NPT]	24
3	Unión americana 1/2" [NPT] clase 3000	9
4	Tee 1/2" NPT clase 3000	5
5	Válvula bola 1/2" [NPT] 2000 [lbs] WOG	7
6	Codo 90º 1/2" [NPT]	7
7	Válvula con actuador eléctrico 1/2" [NPT]	2
8	Sensor de nivel 1/2" [NPT] LS2	1
9	Caja control de válvulas 800x1000x250	1
10	Caja de traspaso 500x700x250	1
11	Cañería entrada línea nitrógeno Sch40	1
12	Cañería salida línea nitrógeno Sch40	1
13	Visor de nivel 1/2" [NPT] largo 2000 [mm]	1
14	Sensor de nivel 1/2" [NPT] LS1	1
15	Válvula de alivio 1" [NPT]	1
16	Sensor de nivel (LS)	1
17	Flange 3" clase 300 [lbs]	4
18	Válvula compuerta 2" clase 300 [lbs]	2
19	Cañería 3" Sch80	1
20	Manhole 18" clase 300 [lbs]	1
21	Patas estanque viga IPN 200	4
22	Válvula rompedora de vacío 1" [NPT]	1
23	Silenciador	1
24	Mánometro $\phi 4 \times 1/2$ [gas] 0-40 [bar]	1
25	Soporte canal 150x75x5	6
26	Cabezal torisférico 20 [mm] esp.	2
27	Cánamos	2
28	Manto ϕ 1300 [mm] int.16 [mm] esp.	1
29	Poncho refuerzo manhole 16 [mm] esp.	1
30	Poncho refuerzo conexión 20 [mm] esp.	1
31	Conexión flange 10" clase 300 [lbs]	1

Figura A.4: Plano seccional referencial del estanque amortiguador del caso de estudio. Fuente: [23]

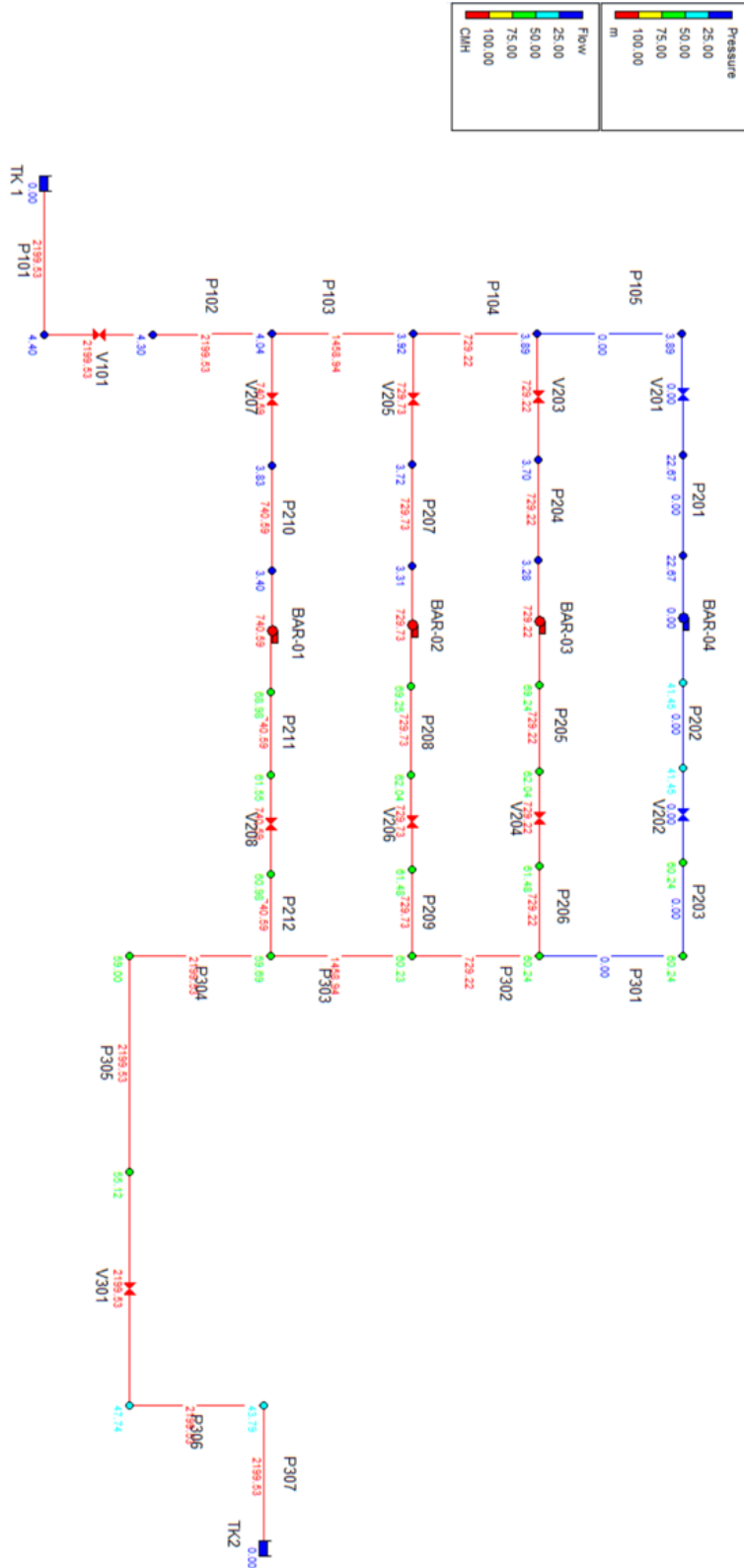


Figura A.5: Esquema de distribución de tramos para cálculo de pérdidas de carga.

Reservorio 1		Elevación succión bomba [msnm]	Elevación rebalse [msnm]	Altura descarga [m]	Altura estática Epanet [m]										
Reservorio 0		683.754	687.554												
Línea 1	Material	Diámetro interior [mm]	Rugosidad [mm]	Largo total [m]	Codo 90 [un]	Codo 60 [un]	Codo 45 [un]	Codo 30 [un]	Reducción [un]	Expansión [un]	Tee Flujo directo[un]	Tee Flujo desviado[un]	K total		
P101	Acero	777.84	0.05	1									0		
P102	Acero	777.84	0.05	2.5			1				1		3.04		
P103	Acero	777.84	0.05	4			1				1		3.04		
P104	Acero	777.84	0.05	4			1				1		3.04		
P105	Acero	777.84	0.05	4			1				1		3.04		
Total línea 1													12.16		
Válvula 1	Diámetro interior ["]	Mariposa [un]	De bola [un]	Compuerta [un]	Check [un]	Alivio (como válvula mariposa) [un]	Flujometro (como válvula mariposa) [un]	Ventee (como válvula mariposa) [un]	K total						
V101	32	1							122						
										Total válvula 1	1.22				
Línea 2	Material	Diámetro interior [mm]	Rugosidad [mm]	Largo total [m]	Codo 90 [un]	Codo 60 [un]	Codo 45 [un]	Codo 30 [un]	Reducción [un]	Expansión [un]	Tee Flujo directo[un]	Tee Flujo desviado[un]	K total		
P201	Acero	381	0.05	3									2.48		
P202	Acero	254.46	0.05	15					1		1		6.33		
P203	Acero	381	0.05	2									7.67		
P204	Acero	381	0.05	3						1			2.48		
P205	Acero	254.46	0.05	15					1		1		6.33		
P206	Acero	381	0.05	2									7.67		
P207	Acero	381	0.05	3						1			2.48		
P208	Acero	254.46	0.05	15					1		1		6.33		
P209	Acero	381	0.05	2									7.67		
P210	Acero	381	0.05	3						1			2.48		
P211	Acero	254.46	0.05	15					1		1		6.33		
P212	Acero	381	0.05	2									7.67		
Total línea 2													65.92		
Válvula 2	Diámetro interior ["]	Mariposa [un]	De bola [un]	Compuerta [un]	Check [un]	Alivio (como válvula mariposa) [un]	Flujometro (como válvula mariposa) [un]	Ventee (como válvula mariposa) [un]	K total						
V201	18		1						122						
V202	18		1		1	1			3.46						
V203	18		1						122						
V204	18		1		1	1			3.46						
V205	18		1						122						
V206	18		1		1	1			3.46						
V207	18		1						122						
V208	18		1		1	1			3.46						
										Total válvula 2	18.72				
Línea 3	Material	Diámetro interior [mm]	Rugosidad [mm]	Largo total [m]	Codo 90 [un]	Codo 60 [un]	Codo 45 [un]	Codo 30 [un]	Reducción [un]	Expansión [un]	Tee Flujo directo[un]	Tee Flujo desviado[un]	K total		
P301	Acero	625.8	0.05	4									0		
P302	Acero	625.8	0.05	4									0		
P303	Acero	625.8	0.05	4							1		6.05		
P304	HDPE	705.2	0.007	54.5		2		2				1	3.02		
P305	HDPE	705.2	0.007	3623									0.84		
P306	HDPE	705.2	0.007	1610						1	2		0.99		
P307	HDPE	705.2	0.007	726		3		3					5.4		
Total línea 3													16.3		
Válvula 3	Diámetro interior ["]	Mariposa [un]	De bola [un]	Compuerta [un]	Check [un]	Alivio (como válvula mariposa) [un]	Flujometro (como válvula mariposa) [un]	Ventee (como válvula mariposa) [un]	K total						
V301	32	2			13				59.2						
										Total válvula 3	59.2				
Reservorio 2	Elevación succión bomba [msnm]	Altura estática [msnm]	Altura descarga [msnm]												
Reservorio 2		724.533													
										K total válvulas	79.14				
										K total líneas	94.38				
										Largo total líneas	4207				

Figura A.6: Planilla de cálculo de la pérdida de carga del sistema.

Anexo B: Formulas y cálculos complementarios

B.1 Formulas para planilla de cálculo

a) Sobrepresión de Joukowsky

La primera Ecuación de la onda unidimensional que indica la magnitud del cambio de presión bajo una condición transitoria fue planteada en 1898 por Joukowsky [7] y se define por:

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (18)$$

Donde ΔP es el incremento de presión debido al golpe de ariete, “ a ” es la velocidad de la onda $\left[\frac{m}{s} \right]$, ΔV es el cambio de velocidad del flujo en la línea $\left[\frac{m}{s} \right]$ y ρ es la densidad del fluido $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$.

La densidad del fluido, además se conocerse por $\rho = \frac{m}{V}$, es posible obtenerla de la forma $\rho = \frac{K}{\Delta P} \partial \rho$, lo que será útil al definir otros conceptos asociados al fenómeno transitorio.

a) Ecuación de la velocidad de onda

La velocidad de la onda de presión, o también conocida como celeridad, es una expresión que depende de los siguientes parámetros [5]:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\rho}{k} + \frac{D \cdot \emptyset}{E \cdot e} \right)}} \quad (19)$$

Donde a es la celeridad, D es el diámetro exterior de la tubería, e es su espesor, E es el módulo elástico del material, k es el módulo elástico del líquido y \emptyset es una constante que depende de las propiedades elásticas de la tubería. La Ecuación (2) es válida para tuberías de pared delgada, esto es cuando $\frac{D}{e} > 10$.

En la Tabla B.1 se muestran los valores de \emptyset para las distintas disposiciones de anclaje de la línea.

Tabla B.1: Valores de \emptyset según anclaje de la tubería.

<i>Modo de Sujeción</i>	\emptyset
Anclaje en los extremos y juntas de dilatación en todo lo largo.	1
Anclaje en todo lo largo.	$1 - \mu^2$
Anclaje aguas arriba y válvula cerrada aguas abajo.	$1 - \frac{\mu}{2}$

b) Tiempo crítico o de propagación de la onda

Las máximas sobrepresiones posibles se logran para los casos en que la maniobra de apertura o cierre sea menor que el tiempo que tarda la onda de presión en ir desde el punto de origen de la perturbación hasta el punto donde se refleja y luego volver al origen. Este tiempo se conoce como tiempo crítico.

El tiempo que tarda la onda de presión en ir desde el punto de origen de la perturbación hasta el punto donde se refleja y luego volver al origen se denomina tiempo crítico, y se define por:

$$t_c = \frac{2L}{a} \text{ [s]} \quad (20)$$

Es relevante conocer este valor, pues se considera como parámetro para establecer si el tiempo en el que se cierra una válvula es considerado lento o rápido, según:

Si $t_{cv} \leq t_c$, se considera un tiempo de cierre rápido.

Si $t_{cv} \geq t_c$, se considera un tiempo de cierre lento.

Con t_{cv} el tiempo de cierre de la válvula, en la Tabla B.2 se tiene los tipos de cierre de válvula de acuerdo con el tiempo crítico:

Tabla B.2: Tipos de cierre de válvula según t_c .

<i>Tipo de cierre</i>	<i>Expresión</i>	<i>Descripción</i>
Cierre Instantáneo	$t_c = 0$	Caso teórico
Cierre Rápido	$t_{cv} \leq t_c$	La sobrepresión es la misma que en el cierre instantáneo, y representa el caso real crítico que favorece la presencia de un golpe de ariete.
Cierre Lento	$t_{cv} \geq t_c$	La presión máxima generada no provoca daños en las instalaciones.

c) Tiempo de parada de bombas

Mendiluce [24] propone la siguiente expresión para conocer el tiempo apropiado para la detención de una bomba:

$$T = C + \frac{K \cdot L \cdot v}{g \cdot H_m} \quad (21)$$

Donde:

C y k: coeficientes de ajustes empíricos

g: aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

L: longitud de la conducción [m]

v: velocidad del agua $\left[\frac{m}{s}\right]$

H_m : altura manométrica [mca]

El coeficiente C es función de la pendiente hidráulica (m):

$$m = \frac{H_m}{L} \quad (22)$$

C=1 para pendientes hidráulicas crecientes de hasta el 20%, reduciéndose progresivamente a cero hasta llegar a pendientes del 40%. Las pendientes superiores al 50% indican paradas muy rápidas, por lo que para esos casos se utiliza la fórmula de Allievi para conocer la presión máxima a lo largo de toda la tubería.

Luego, en las tablas B.3 y B.4, los valores de los coeficientes C y k según Mendiluce son:

Tabla B.3: Valor de Coeficiente empírico C.

<i>Valor de C</i>	<i>Condición</i>
1	$\frac{H_m}{L} < 0,2$
0	$\frac{H_m}{L} \geq 0,4$
0,6	$\frac{H_m}{L} = 0,3$

Tabla B.4: Valor de coeficiente empírico k.

<i>Valor de k</i>	<i>Condición</i>
2	$L < 500$
1,75	$L \approx 500$
1,5	$500 < L < 1500$
1,25	$L \approx 1500$
1	$L > 1500$

d) Cálculo de la sobrepresión generada por un golpe de ariete - Formula de Allievi

Allievi [3] propone para este caso que el valor máximo de presión producto de un golpe de ariete viene dado por la expresión:

$$\Delta P = \frac{a \cdot v}{g} \quad (23)$$

Donde:

a : celeridad $\left[\frac{m}{s}\right]$

v : velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$

g : aceleración de gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

e) Presión crítica de vacío admisible de una cañería

Una cañería está diseñada para soportar una presión menor a su presión nominal, y de la misma manera, estas son capaces de resistir hasta cierta presión mínima [36], y de acuerdo con la ISO 4427 e ISO 1167, esta se expresa como:

$$P_{Crít} = \frac{24E \cdot I \cdot f}{(1 - u^2) \cdot D_m^3} \quad (24)$$

Donde:

I : inercia de la pared del fluido [cm]

f : factor de deformación durante el montaje (si def es del 2%, $f = 0,84$)

E : módulo de elasticidad $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$

D_i : diámetro medio [cm]

u : módulo de Poisson (0.4 para HDPE)

De las fórmulas, se obtienen la siguiente planilla de cálculo:

CÁLCULOS GOLPE DE ARIETE

Tubería		HDPE PN10 32"	
L	Longitud	m	4182
n_bba	Número de bombas	un	3
Hg	Altura geométrica	m	41.38
Q	Caudal	l/s	603.4
De	Diámetro exterior	mm	800
Di	Diámetro interior	mm	705.2
v	Velocidad	m/s	1.54
r	Rugosidad HDPE		0.007
u	Módulo de Poisson		0.4
I	Inercia del fluido	cm ³	8.874702
D_m	Diámetro medio	cm	752.6
f_def	Factor de def. durante montaje		0.84

Pérdida de carga continua para tubería			
f	Coeficiente de Darcy - Weisbach		0.00807
h_s	Pérd. Carga Singulares	m/km	13.16709419
h_f	Pérd. Carga Regultares	mca	5.784791338
Hm	Hg + Δh	mca	60.33188553

Valores para ingresar a Allievi			
v	Velocidad del agua	m/s	1.54
e	Espesor	mm	47.4
E	Módulo de elasticidad a largo pla:	kg/m ²	1.40E+08
Kc	K" largo plazo (característicadel material)		71.43
a	Celeridad de onda	m/s	297.01
m	Pendiente hidráulica		0.014
C	Coef. "C" según Mendiluce		1
K	Coef. "K" según Mendiluce		1
T	Tiempo de parada	s	11.88
Tc	Tiempo crítico	s	28.16
Lc	Longitud crítica	m	1764.24
P_crit	Presión crítica de vacío adm.	bar	7.00E-01
	Tipo de conducción		Larga
	Tipo de cierre		Rápido
	Fórmula		Allievi

Figura B.1: Valores ingresados a software Allievi.

B.2 Programa EES para dimensionamiento de un estanque amortiguador

A continuación, se adjunta el programa EES con el que es posible calcular el volumen total de un estanque amortiguador. El volumen utilizado en el caso de estudio es el que entrega el método de

Carmona, donde $V_{tot, Carm} = 14,02 \left[\frac{m^3}{h} \right]$

"Cálculos de golpe de ariete"

{ Unidades de medida }

{ Altura: [m]
 Longitud: [m]
 Caudal: [l/s]
 Diámetro: [mm]
 Rugosidad relativa: adimensional
 Densidad: [kg/m^3]
 Viscosidad dinámica: [Pa*s]
 Presión: [mca]
 Velocidad: [m/s] }

" Tubería "

{Entrada de datos}

L_tub = 4182 {m}
 D_int = 705.2 {mm}
 H_succion = 683.2 { Altura del punto de succion en m.s.n.m }
 H_descarga = 724.5 { Altura del punto de descarga en m.s.n.m }
 n_bba = 3 {Número de bombas}
 Q_bomba_pto_op = 603.4 {Caudal total considerando bombas en paralelo}
 H_bomba_pto_op = 70.51
 Ef_bomba_pto_op = 0.78 { Eficiencia de la bomba }
 Rugosidad_tub = 0.007 {Rugosidad cañería HDPE}
 Densidad_fluido = 997 { Densidad del agua en kg/m^3 }
 Viscosidad_fluido = 0.001 { Viscosidad dinámica del agua en Pa*s }

Rugosidad_relativa = Rugosidad_tub/(D_int)
 H_geometrica = H_descarga - H_succion
 A_tub = pi*(D_int/1000)^2/4 {Área de la sección transversal de la tubería en m^2 }
 Vel_fluido = (Q_bomba_pto_op/1000)/A_tub { Velocidad del fluido }

{ Constantes y variables }

g = 9.81 { Aceleración gravitatoria en m/s^2 }
 P_atm = 10.3 {mca}

" Pérdidas de carga "

{Entrada de datos}

Cantidad_Codo_90= 5
 Cantidad_Codo_60= 7
 Cantidad_Codo_45= 6
 Cantidad_Codo_30= 9
 Cantidad_Reducción= 8
 Cantidad_Expansion= 16
 Cantidad_Tee= 4
 Cantidad_Valvula_check= 22
 Cantidad_Valvula_compuerta= 4
 Cantidad_Valvula_mariposa= 4
 Cantidad_Valvula_alivio= 12
 Cantidad_Valvula_seguridad = 12
 Cantidad_Valvula_ventosa= 14
 Cantidad_Valvula_bola= 0

{Perdidas singulares}

K_Codo_90 =0.81
 K_Codo_60=0.56
 K_Codo_45=0.43
 K_Cod_30=0.28
 K_Reducción= 0.3
 K_Expansión=0.6
 K_Tee=1.80
 K_Valvula_check=2.5
 K_Válvula_compuerta=0.22
 K_Valvula_mariposa=1.22
 K_Valvula_alivio=0.22
 K_Valvula_seguridad=0.22
 K_Valvula_ventosa=1.22
 K_Valvula_bola=0.22

DELTA_P_sing
$$\begin{aligned}
 &= (K_{\text{Codo}_{90}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Codo}_{90}} + K_{\text{Codo}_{60}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Codo}_{60}} + K_{\text{Codo}_{45}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Codo}_{45}} + K_{\text{Codo}_{30}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Codo}_{30}} \\
 &+ K_{\text{Reducción}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Reducción}} + K_{\text{Expansión}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Expansion}} + K_{\text{Valvula_check}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_check}} \\
 &+ K_{\text{Válvula_compuerta}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_compuerta}} + K_{\text{Valvula_mariposa}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_mariposa}} \\
 &+ K_{\text{Valvula_alivio}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_alivio}} + K_{\text{Valvula_ventosa}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_ventosa}} \\
 &+ K_{\text{Valvula_seguridad}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_seguridad}} + K_{\text{Valvula_bola}} \cdot \text{Cantidad}_{\text{Valvula_bola}}) \cdot \\
 &(\text{Vel}_{\text{fluido}}^2) / (2 \cdot g)
 \end{aligned}$$

{Pérdidas regulares}

Re = Densidad_fluido * Vel_fluido * D_int / Viscosidad_fluido {Número de Reynolds }
 f = moodychart(Re, Rugosidad_relativa) {Factor de fricción inicial}

$$\text{DELTA}_{P_reg} = (f \cdot L_{\text{tub}} \cdot \text{Vel}_{\text{fluido}}^2) / (2 \cdot g \cdot D_{\text{int}} \cdot 0.001)$$

{Pérdidas de carga totales}

$$\text{DELTA}_{\text{P_tot}} = \text{DELTA}_{\text{P_reg}} + \text{DELTA}_{\text{P_sing}}$$

$$\text{DELTA}_{\text{P_tot}} = H_{\text{geometrica}} + K \cdot (Q_{\text{bomba_pto_op}})^2$$

$$\text{TDH} = H_{\text{geometrica}} + \text{DELTA}_{\text{P_tot}}$$

"Volumen de estanque amortiguador"

"Método de Stephenson"

{Entrada de datos}

$$H_{\text{min}} = 4.4 + P_{\text{atm}} \quad \text{"carga absoluta mínima posible"}$$

$$H_{\text{s}} = H_{\text{geometrica}} + P_{\text{atm}} \quad \text{"carga estática absoluta"}$$

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{bomba_pto_op}} \cdot 0.001 \quad \text{"caudal total en m}^3\text{/s; pto_op_bba} \cdot \text{nro bba}$$

$$V_{0_Steph} = (H_{\text{min}} \cdot L_{\text{tub}} \cdot (Q_{\text{tot}})^2) / (g \cdot A_{\text{tub}} \cdot ((H_{\text{s}})^2) \cdot (1 - (H_{\text{min}}/H_{\text{s}}))^2) \quad \text{"Volumen inicial segun Stephenson en m}^3\text{"}$$

"Método de Carmona"

{Entrada de datos}

$$\rho = 1.2 \quad \text{"coeficiente politrópico"}$$

$$f_{\text{d}} = f$$

$$H_0 = \text{TDH} + P_{\text{atm}} \quad \text{"mca"}$$

$$f_{\text{s}} = 1.25 \quad \text{"factor de seguridad"}$$

$$\text{Beta} = (-f_{\text{d}} \cdot Q_{\text{tot}}) / (2 \cdot (D_{\text{int}} \cdot 0.001) \cdot A_{\text{tub}})$$

$$t_{\text{vol_max}} \cdot \exp(t_{\text{vol_max}} \cdot (-\text{Beta})) = (\pi \cdot L_{\text{tub}} \cdot Q_{\text{tot}}) / (2 \cdot g \cdot A_{\text{tub}} \cdot (H_{\text{s}} - H_{\text{min}}))$$

$$V_{0_C} = \frac{\text{Beta} \cdot Q_{\text{tot}}}{((\text{Beta}^2) + (\pi / (2 \cdot t_{\text{vol_max}}))^2) \cdot (((H_0/H_{\text{min}})^{(1/\rho)} - 1))} \cdot ((g \cdot A_{\text{tub}} \cdot (H_{\text{s}} - H_{\text{min}}) / L_{\text{tub}}) - 1) \quad \text{"Volumen inicial segun Carmona en m}^3\text{"}$$

$$V_{\text{max_Steph}} = V_{0_Steph} \cdot (H_{\text{s}}/H_{\text{min}})^{(1/\rho)}$$

$$V_{\text{max_Carm}} = V_{0_C} \cdot (H_0/H_{\text{min}})^{(1/\rho)}$$

$$V_{\text{tot_Steph}} = V_{\text{max_Steph}} \cdot f_{\text{s}} \quad \text{"Volumen total del estanque amortiguador segun Stephenson en m}^3\text{"}$$

$$V_{\text{tot_Carm}} = V_{\text{max_Carm}} \cdot f_{\text{s}} \quad \text{"Volumen total del estanque amortiguador segun Carmona en m}^3\text{"}$$

Main							
Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg							
A _{tub} = 0.3906	Betha = -0.00884	Cantidad _{Codo,30} = 9	Cantidad _{Codo,45} = 6	Cantidad _{Codo,60} = 7	Cantidad _{Codo,90} = 5	Cantidad _{Expansion} = 16	
Cantidad _{Reduccion} = 8	Cantidad _{Reg} = 4	Cantidad _{Valvula,alivio} = 12	Cantidad _{Valvula,bola} = 0	Cantidad _{Valvula,check} = 22	Cantidad _{Valvula,compuerta} = 4	Cantidad _{Valvula,mariposa} = 4	
Cantidad _{Valvula,seguridad} = 12	Cantidad _{Valvula,ventosa} = 14	ΔP _{reg} = 5.822	ΔP _{sing} = 13.16	ΔP _{tot} = 18.98	Densidad _{fluido} = 997	D _{int} = 705.2	
E _{bomba,pto,op} = 0.78	f = 0.008071	f _d = 0.008071	f _s = 1.25	g = 9.81	H _g = 70.58	H _{bomba,pto,op} = 70.51	
H _{descarga} = 724.5	H _{geometrica} = 41.3	H _{min} = 14.7	H _s = 51.6	H _{succion} = 683.2	K = -0.0000613	K _{Codo,45} = 0.43	
K _{Codo,60} = 0.56	K _{Codo,90} = 0.81	K _{Codo,30} = 0.28	K _{Expansion} = 0.6	K _{Reduccion} = 0.3	K _{Tee} = 1.8	K _{Valvula,alivio} = 0.22	
K _{Valvula,bola} = 0.22	K _{Valvula,check} = 2.5	K _{Valvula,mariposa} = 1.22	K _{Valvula,seguridad} = 0.22	K _{Valvula,ventosa} = 1.22	K _{Valvula,compuerta} = 0.22	L _{tub} = 4182	
l _{bba} = 3	P _{atm} = 10.3	Q _{bomba,pto,op} = 603.4	Q _{tot} = 0.6034	Re = 1.086E+09	ρ = 1.2	Rugosidad _{relativa} = 0.000009926	
Rugosidad _{tub} = 0.007	TDH = 60.28	t _{vol,max} = 22.9	Vel _{fluido} = 1.545	Viscosidad _{fluido} = 0.001	V _{0,C} = 3.034	V _{0,Steph} = 4.29	
V _{max,Carm} = 11.22	V _{max,Steph} = 12.22	V _{tot,Carm} = 14.02	V _{tot,Steph} = 15.27				

No unit problems were detected.

Anexo C: Consideraciones generales

C.1 Factor de fricción seleccionado

El factor de fricción entre el fluido y las paredes de la tubería es un factor relevante, donde este depende de la velocidad del fluido, la cual tiene un valor variable ante un transitorio hidráulico.

En este marco, es que existen distintos métodos para calcularlo. El método de fricción en estado estacionario considera que el factor f es constante a lo largo del tiempo y se conoce mediante la fórmula de Colebrook-White en estado estacionario. Si se considera un estado cuasi-estacionario, el factor f se actualiza en cada instante, nuevamente de acuerdo con la fórmula de Colebrook-White. Para un caso no estacionario, el factor f corresponde a la suma del factor en estado cuasi-estacionario más el aporte de un componente no estacionario.

En la Figura C.1, se observa la diferencia en los resultados utilizando un método de fricción estacionario (Steady), cuasi-estacionario (Quasi-Steady) y no estacionario (Transient) según el manual técnico del software Bentley HAMMER:

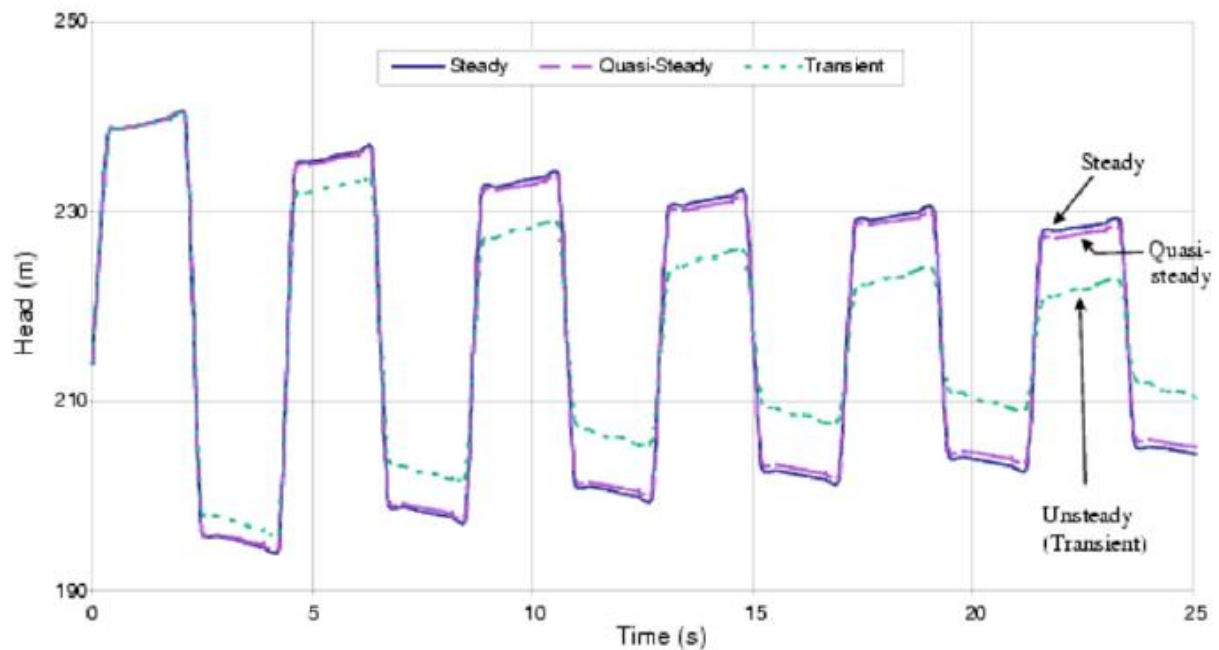


Figura C.1: Comparación de resultados según el método de fricción utilizado. Fuente: [11]

El detalle del cálculo del factor de fricción en estado no estacionario es extenso y excede el objetivo de este proyecto, sin embargo, es importante saber que los estudios indican que cuando se utiliza un factor de fricción obtenido mediante un método estacionario, se generan envolventes de presiones

máximas y mínimas más conservadoras en comparación con las que se obtienen al utilizar modelos de fricción cuasi-estacionario y no transitorio [8] [11].

Considerando lo anterior, los softwares computacionales de cálculo usualmente utilizan el factor de fricción f de Darcy – Weisbach, pues estos resultados son lo suficientemente precisos para el dimensionamiento de sistemas hidráulicos y una correcta selección de un sistema de protección ante un golpe de ariete, además del ahorro de recursos computacionales que representa el reducir la cantidad de iteraciones en el cálculo.

C.2 Modelo estático, rígido y elástico

Según la velocidad de cambio en el flujo, se tienen tres tipos de transitorios [9]:

- Transitorios cuasi-estático o lento

El cambio de la presión y velocidad del flujo se da de manera lenta y se estudia de manera iterativa mediante el Modelo Estático por medio de incrementos finitos. En la práctica no existe un sistema hidráulico totalmente estático, pues su funcionamiento real está asociado a una variable tiempo.

- Transitorios rápidos

Conocidos también como oscilación de masa, la variación de la presión y velocidad del flujo es rápida, y se utiliza el Modelo Rígido para su análisis.

- Transitorios muy rápidos:

Un transitorio que se da de manera muy rápida se conoce como golpe de ariete, donde las fluctuaciones de presión son violentas, asociadas a la elasticidad de la conducción y energía almacenada en el fluido. Para su análisis, se utiliza el modelo elástico, pues su alcance considera la compresibilidad del fluido y la respuesta elástica de la tubería.

Un flujo transitorio se caracteriza por ser un flujo inestable, y para analizar este tipo de fluido, hay que saber que los límites del fluido y del sistema pueden ser elásticos o inelásticos.

La teoría elástica describe el flujo inestable de un fluido compresible en un sistema elástico (estructura se puede expandir y contraer). El método de las características es parte de la teoría elástica.

La teoría inelástica o rígida describe el flujo inestable de un fluido compresible en un sistema rígido, y solo es aplicable para fenómenos transitorios lentos.

C.3 Presión, altura piezométrica y altura total

En ingeniería, es útil representar gráficamente diferentes partes de los términos de altura que contribuyen a la energía mecánica del flujo en una tubería.

Si se mide la altura Z del centro de la cañería a partir de algún nivel de referencia horizontal, entonces esta altura, denominada altura geométrica, más la altura de presión, corresponde a la línea de altura piezométrica para el nivel de referencia utilizado, como se muestra en la Figura C.2.

Entonces, para todo fluido incompresible, se define la altura piezométrica como:

$$H_p = Z + \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (23)$$

Por otro lado, la energía total se define como:

$$H = Z + \frac{v^2}{2g} + \frac{P}{\rho \cdot g} \quad (23)$$

Donde:

Z : altura geométrica

$\frac{P}{\rho \cdot g}$: altura de presión

$\frac{v^2}{2g}$: altura de velocidad

La presión alude específicamente a la fuerza ejercida por el fluido en un punto determinado, la cual se ve afectada por los elementos hidráulicos presentes en la línea como válvulas, codos, reducciones, largo de cañería, entre otros, cuyo impacto se ve reflejado en pérdidas de carga. Este último término corresponde a la caída de presión debido a la fricción entre los elementos hidráulicos y el fluido a lo largo de una distancia L .

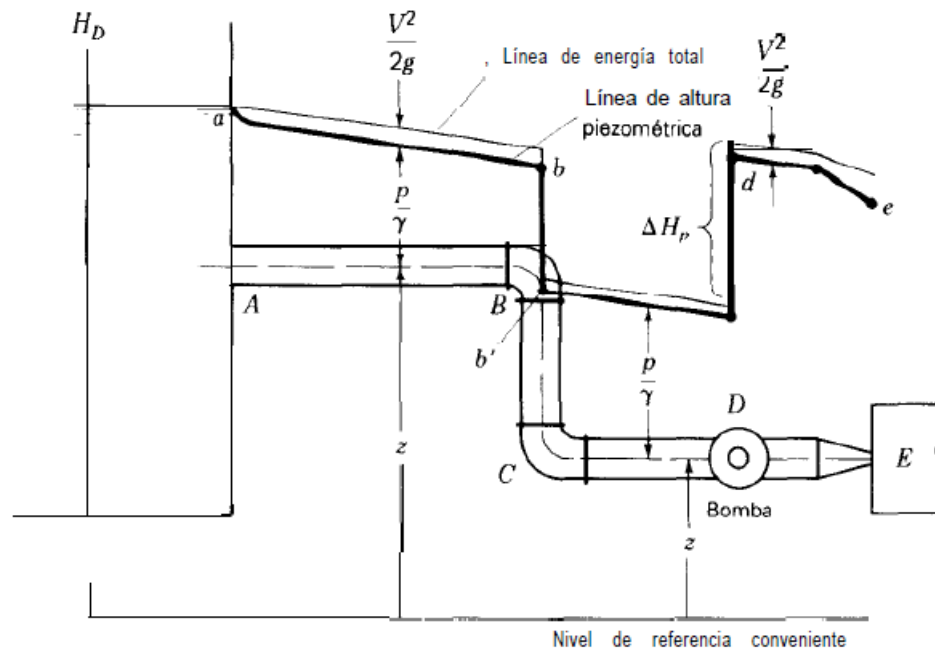


Figura C.2: Líneas de energía total y altura piezométrica. Fuente: [34]

C.4 Oferta económica de Vogt a minera

En la Figura C.3, se muestra la oferta económica realizada por Vogt, donde detalla los costos de instalar los 3 estanques amortiguadores o hidroneumáticos.

PARTIDA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTO TOTAL USD
P01.00	FABRICACIÓN DE ESTANQUES HIDRONEUMÁTICOS, PIPING, ESTRUCTURA METÁLICA, TABLEROS DE FUERZA, ALUMBRADO Y CONTROL		165.516
P01.01	Fabricación de estanques hidroneumáticos	01 gl	75.236
P01.02	Fabricación de piping	01 gl	35.761
P01.03	Fabricación de estructuras metálicas	01 gl	26.281
P01.04	Fabricación de tablero de fuerza y alumbrado	01 gl	4.185
P01.05	Fabricación de tablero de control	01 gl	24.053
P02.00	INSTALACIÓN DE FAENA Y MONTAJE EN TERRENO		185.025
P02.01	Instalación de Faenas	01 gl	23.922
P02.02	Obras civiles	01 gl	90.527
P02.03	Montaje Estanques Hidroneumáticos	01 gl	3.525
P02.04	Montaje Piping agua y aire	01 gl	35.726
P02.05	Suministro y montaje de Compresores	01 gl	7.004
P02.06	Montaje Tableros eléctricos y de control	01 gl	24.321
P03.00	PRUEBA DE RECEPCIÓN		2.130
P03.01	Supervisión y asesoría durante prueba de operación de EAGP	01 gl	2.130

Valor final (USD)

Figura C.3: Oferta realizada por Vogt a la minera por fabricación e instalación de 3 estanques.

Luego, a partir de la oferta económica, en la Figura C.4, se estima el valor instalar de un estanque amortiguador, donde se divide en 3 los ítems de la oferta económica a excepción de la instalación de faenas y las pruebas de operación, pues se considera que un estanque menos no influye en su costo.

Estimación de ahorro

Fabricaciones	Costo total	Ahorro USD
Fabricacion de estanques hidroneumaticos	75236	25078.66667
Fabricacion de piping	35761	11920.33333
Fabricacion de estructuras metalicas	26281	8760.333333
Fabricacion de tablero de fuerza y alumbrado	4185	1395
Fabricación de tablero de control	24053	8017.666667
Instalacion de faenas y montaje en terreno		
Instalacion de faenas	23922	0
Obras civiles	90527	30175.66667
Montaje estanques	3525	1175
Montaje piping agua y aire	35726	11908.66667
Suministro y montaje de compresores	7004	2334.666667
Montaje tableros electricos y de control	24321	8107
Prueba de recepción		
Prueba de operación EAGP	23922	0

Total ahorrado:

Figura C.4: Estimación del ahorro al reducir 1 estanque amortiguador.

Anexo D: Utilización del software Allievi

Si bien anteriormente se comentó sobre el software Allievi, es importante saber su utilidad para este proyecto.

En términos generales, el programa permite modelar sistemas hidráulicos, donde el usuario debe describir el sistema en base a una configuración de elementos hidráulicos tales como estanques de alimentación y descarga, cañerías, bombas, válvulas y elementos de protección ante un golpe de ariete, como se muestran en la Figura D.1.





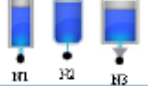
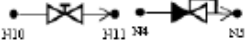



<i>Tipos de Elemento</i>	<i>Representación Gráfica en ALLIEVI</i>
1. <i>Nudos</i>	 Nudo
2. <i>Depósitos</i>	 N16 N17
3. <i>Tuberías</i>	 N14 N15
4. <i>Estaciones de bombeo</i>	 N10 N11
5. <i>Estructuras de Protección</i>	 N1 N2 N3
6. <i>Estructuras de control de caudal</i>	 N10 N11 N4 N5
7. <i>Leyes de caudal (Q) o de altura (H)</i>	 N12 N13
8. <i>Turbinas Francis</i>	 N43 N44
9. <i>Conductos en lámina libre</i>	 Canal N14 N15

Figura D.1: Elementos del sistema hidráulico a modelar en Allievi. Fuente: [18]

Luego, la interfaz permite simplificar la configuración siempre y cuando los tramos estén bien representados de acuerdo con los perfiles, largos y cotas de cañerías y estanques del sistema real.

Si bien el sistema se traduce a un conjunto de válvulas y cañerías como se ve en la D.2, estas representan a todas las del sistema, pues se puede configurar la cota inicial y final de una tubería como se muestra en la Figura D.3, por lo que a simple vista parece un tramo, cuenta con subtramos con largos y cotas específicas.

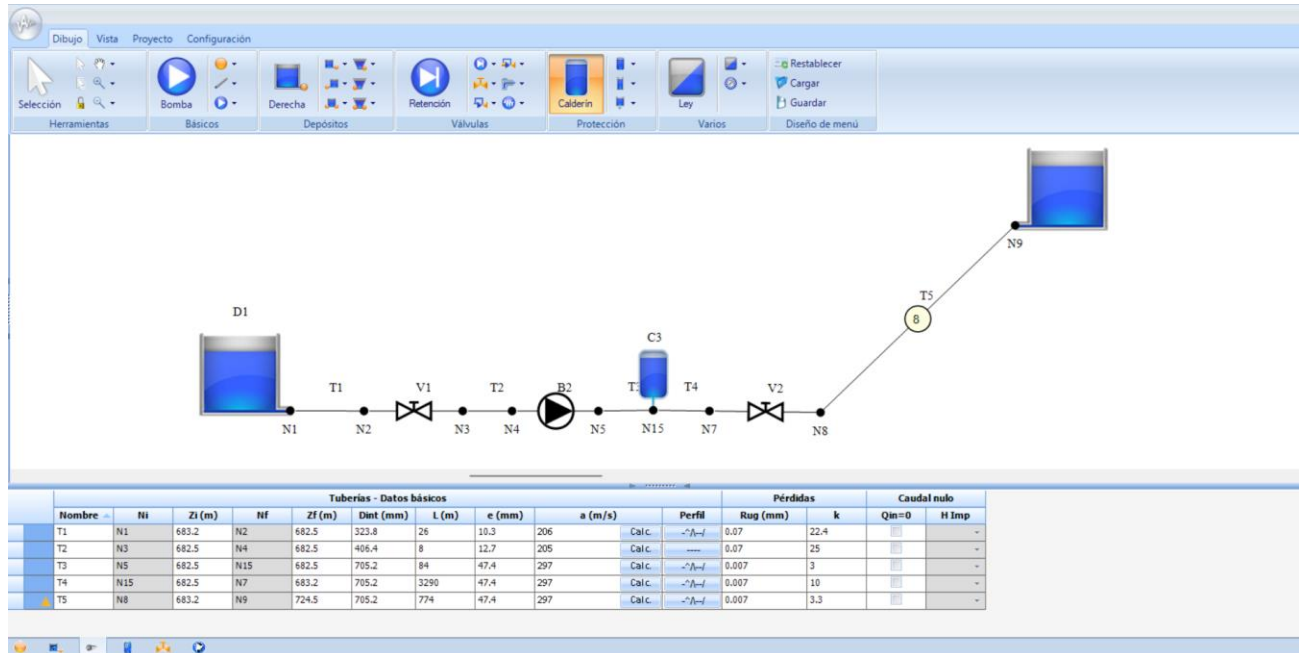


Figura D.2: Sistema a simular en Allievi.

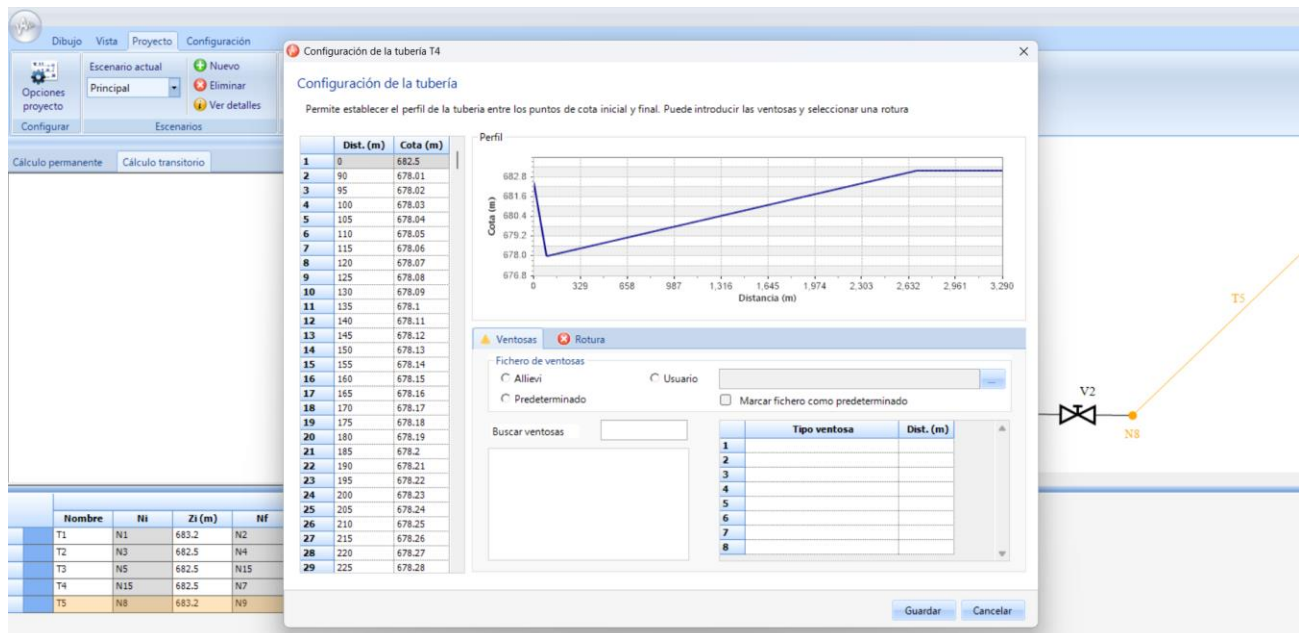


Figura D.3: Configuración de cañerías en Allievi.

Luego se debe configurar las bombas y válvulas, al igual que el sistema de protección a utilizar.

Los valores que son necesarios ingresar en el sistema son la celeridad, el tiempo de parada de bomba y tiempo de cierre, estos se calculan en el Anexo B (Figura B.1), y son los que permitirán conocer la presión máxima y mínima que podría experimentar el sistema.

En la parte superior, como se muestra en la Figura D.4, se encuentra la opción de dibujo, que es donde se realiza la configuración. Al lado, se encuentra la opción de proyecto, la cual permite calcular el sistema en régimen permanente y transitorio.

Primero se calcula la presión del sistema en régimen permanente, y si el software no detecta errores en la configuración, se procede a calcular las presiones del sistema en régimen transitorio.



Figura D.4: Opciones de cálculo en Allievi.

Realizado lo anterior, la opción asistente de resultados permite conocer el comportamiento de la onda de presión a lo largo de todo el sistema, al igual que el momento en que se estabiliza.