

# Universidad Nacional de Ingeniería

## Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

### **Mejora de la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera basado en el diseño de un algoritmo evolutivo**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecatrónico.

Elaborado por  
José Feliciano Mamani Pinazo

 [0009-0004-8267-7396](https://orcid.org/0009-0004-8267-7396)

Asesor  
Ing. Daniel Leonardo Barrera Esparta

 [0000-0003-3465-788X](https://orcid.org/0000-0003-3465-788X)

LIMA – PERÚ

2023

## ***Dedicatoria***

A Dios por todas las bendiciones que he recibido en mi vida, a mi familia por ser el apoyo incondicional y la fuerza para no rendirme nunca, a mis amigos por ser el soporte en todo este trayecto y muy en especial a mis seres queridos que hoy no están presentes en este mundo y que son mi guía para seguir haciendo camino al andar.

## Resumen

Los sistemas de bombeo de agua recuperada en unidades mineras presentan riesgo de fallas ante un evento de golpe de ariete. Esto genera una limitada disponibilidad del agua recuperada que es empleada en los procesos mineros. Los efectos del golpe de ariete se manifiestan como fallas en las tuberías y equipos presentes en la línea de impulsión, por eso es prioritario el aseguramiento de la integridad del sistema de bombeo mediante una adecuada selección de válvulas de seguridad que mitiguen el golpe de ariete.

La presente investigación comprende el diseño un algoritmo evolutivo para la adecuada selección de válvulas de seguridad y su mejora en la protección contra el golpe de ariete en sistemas de bombeo de agua recuperada en unidades mineras. Se inicia con la recopilación de datos para el desarrollo de un modelo hidráulico y una selección inicial de válvulas de seguridad. Seguidamente, se realiza el diseño del algoritmo evolutivo y su evaluación para encontrar parámetros optimizados de las válvulas de seguridad. Finalmente se realiza la comparación de la protección del sistema del sistema de bombeo, ante la simulación de un golpe de ariete, en dos escenarios: sistema de bombeo con selección inicial de válvulas de seguridad y sistema de bombeo con selección optimizada de válvulas de seguridad a través del algoritmo evolutivo.

Palabras clave: sistema de bombeo, golpe de ariete, modelo hidráulico, válvulas de seguridad, algoritmo evolutivo.

## **Abstract**

Recovered water pumping systems in mining units present a risk of failure in water hammer event. This generates limited availability of recovered water that is used in mining processes. The effects of water hammer manifest as failures in pipes and the equipment in the impulsion line, for this reason it is a priority to ensure the integrity of the pumping system through an adequate selection of safety valves that mitigate water hammer effects.

The current research includes design of an evolutionary algorithm for adequate selection of safety valves and their improvement in the protection against water hammer in recovered water pumping systems in mining units. It begins with the collection of data for the development of a hydraulic model and initial selection of safety valves is also included. Next, the design of the evolutionary algorithm and its evaluation are carried out to find optimized parameters for safety valves. Finally, comparison of the pumping system protection is made, before the simulation of a water hammer event, in two scenarios: pumping system with initial selection of safety valves and pumping system with optimized selection of safety valves. through the evolutionary algorithm.

Key words: pumping system, water hammer, hydraulic model, safety valves, evolutionary algorithm.

# Índice

	Pág.
Resumen .....	iii
Abstract.....	iv
Prólogo .....	v
Índice .....	vii
Lista de tablas.....	x
Lista de figuras.....	xi
Capítulo I. Introducción .....	1
1.1    Generalidades .....	1
1.2    Descripción del problema de investigación.....	3
1.3    Objetivos del estudio .....	6
1.3.1    Objetivo general.....	6
1.4    Antecedentes investigativos .....	6
1.4.1    Antecedentes internacionales .....	6
1.4.2    Antecedentes nacionales .....	9
1.4.3    Antecedente local.....	12
Capítulo II. Marco teórico y conceptual.....	14
2.1    Marco teórico .....	14
2.1.1    Sistemas de bombeo .....	14
2.1.2    Golpe de ariete .....	17
2.1.3    Equipos de seguridad o protección contra el golpe de ariete.....	21
2.1.4    Algoritmos evolutivos .....	26
2.2    Marco conceptual .....	32
Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables .....	33
3.1    Hipótesis general .....	33
3.2    Operacionalización de variables .....	33
Capítulo IV. Metodología de la investigación .....	34

4.1	Tipo y diseño de la investigación .....	34
4.2	Unidad de análisis .....	35
4.3	Matriz de consistencia .....	37
Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación.....		38
5.1	Metodología del diseño.....	38
5.2	Datos de estudio hidráulico en régimen permanente .....	40
5.2.1	Esquema del sistema de bombeo .....	40
5.2.2	Datos de nodos del sistema hidráulico.....	42
5.2.3	Datos de tuberías del sistema hidráulico .....	42
5.2.4	Datos de bombas del sistema hidráulico.....	45
5.3	Datos de selección inicial de válvulas de seguridad .....	46
5.3.1	Consideraciones iniciales.....	46
5.3.2	Datos de válvulas anticipadoras de onda.....	48
5.3.3	Datos de válvulas ventosas .....	51
5.4	Desarrollo de modelo hidráulico para análisis en régimen transitorio 55	
5.4.1	Datos de nodos .....	55
5.4.2	Datos de tuberías.....	57
5.4.3	Datos de bombas .....	60
5.4.4	Datos de válvulas de seguridad .....	63
5.4.5	Esquema de modelo hidráulico final .....	65
5.4.6	Evento de golpe de ariete .....	68
5.5	Diseño de algoritmo evolutivo.....	69
5.5.1	Flujograma .....	69
5.5.2	Ingreso de parámetros .....	70
5.5.3	Generación de población inicial .....	70
5.5.4	Evaluación de función objetivo.....	73
5.5.5	Selección, cruce y mutación .....	74
5.5.6	Criterio de término.....	76

5.5.7	Reemplazo de individuos .....	76
Capítulo VI.	Análisis y discusión de resultados.....	77
6.1	Introducción .....	77
6.2	Parámetros para inicialización del algoritmo evolutivo .....	77
6.3	Evaluación de escenario 1.....	78
6.3.1	Selección inicial de válvulas de seguridad .....	78
6.3.2	Resultados .....	80
6.4	Evaluación de escenario 2.....	82
6.4.1	Selección óptima de válvulas de seguridad mediante algoritmo evolutivo.....	82
6.4.2	Resultados .....	87
6.5	Comparación de escenarios .....	91
6.6	Análisis de resultados obtenidos .....	91
6.7	Validación de la hipótesis .....	92
6.7.1	Indicadores de la variable independiente.....	92
6.7.2	Indicadores de la variable dependiente.....	94
Conclusiones	.....	96
Recomendaciones	.....	98
Referencias bibliográficas	.....	99
Anexos	.....	101

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Perú en el ranking mundial de producción minera .....	1
Tabla 2: Operacionalización de variables .....	33
Tabla 3: Matriz de consistencia lógica .....	37
Tabla 4: Datos recopilados de tuberías de acero al carbono .....	43
Tabla 5: Datos de fabricante de tuberías de HDPE .....	44
Tabla 6: Coeficiente de Hazen Williams .....	45
Tabla 7: Datos de selección inicial de válvulas anticipadoras de onda .....	51
Tabla 8: Resumen de selección inicial de válvulas ventosas .....	54
Tabla 9: Resumen de velocidades de onda .....	59
Tabla 10: Parámetros de selección inicial de válvulas de seguridad .....	79
Tabla 11: Valores de presiones para el nodo de análisis del escenario 1 ...	81
Tabla 12: Parámetros de selección realizada por algoritmo evolutivo .....	83
Tabla 13: Valores de convergencia del algoritmo evolutivo .....	86
Tabla 14: Parámetros y valores de función objetivo para escenario 2 .....	88
Tabla 15: Parámetros óptimos para escenario 2 .....	89
Tabla 16: Valores de presiones para el nodo de análisis del escenario 2 ...	90
Tabla 17: Comparación de valores de presiones de escenarios 1 y 2 .....	91
Tabla 18: Valores promedio de las soluciones de las cinco iteraciones del algoritmo evolutivo .....	93
Tabla 19: Valores de desviación estándar de las soluciones de las cinco iteraciones del algoritmo evolutivo .....	94
Tabla 20: Valores de diferencia de presión máxima y mínima .....	95

## Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Esquema de uso de agua en el sector minero.....	2
Figura 2: Esquema general de una estación de bombeo horizontal .....	15
Figura 3: Esquema general de una estación de bombeo con bombas de eje vertical .....	16
Figura 4: Ilustración genérica del punto de operación de una bomba.....	17
Figura 5: Diagrama de cuerpo libre para la deducción de la ecuación de movimiento .....	18
Figura 6: Volumen de control para la deducción de la ecuación de continuidad .....	19
Figura 7: Válvula anticipadora de onda Bermad Modelo 735 .....	22
Figura 8: Onda de presión en un sistema de bombeo sin protección de válvula anticipadora de onda .....	23
Figura 9: Onda de presión en un sistema de bombeo con protección de válvula anticipadora de onda .....	23
Figura 10: Válvula ventosa Bermad modelo C70.....	24
Figura 11: Comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo sin protección de válvulas ventosas .....	25
Figura 12: Comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo con protección de válvulas ventosas .....	26
Figura 13: Flujograma del esquema general de un algoritmo evolutivo.....	28
Figura 14: Esquema de la unidad de análisis .....	36
Figura 15: Flujograma del desarrollo del trabajo de investigación .....	39
Figura 16: Esquema del sistema de bombeo de agua recuperada.....	41
Figura 17: Sistema de tuberías considerado para la selección inicial de válvulas ventosas.....	48
Figura 18: Selección de tamaño de válvula anticipadora de onda .....	50
Figura 19: Perfil longitudinal de tubería .....	52
Figura 20: Ingreso de datos de operación de bombas.....	53
Figura 21: Diagrama de selección inicial de válvulas ventosas realizada por software Bermad Air .....	54
Figura 22: Representación gráfica de los tipos de nodos .....	56

Figura 23: Simplificación gráfica de las bombas de cada barcaza.....	56
Figura 24: Representación gráfica del conjunto de tuberías del sistema de bombeo .....	58
Figura 25: Herramienta de cálculo de velocidad de onda .....	59
Figura 26: Parámetros de tuberías del sistema de bombeo .....	60
Figura 27: Herramienta de cálculo de inercia de conjunto motor-bomba.....	62
Figura 28: Parámetros de bombas del sistema hidráulico .....	62
Figura 29: Parámetros para una válvula anticipadora de onda.....	64
Figura 30: Parámetros para una válvula ventosa.....	65
Figura 31: Modelo hidráulico final del sistema de bombeo .....	67
Figura 32: Cambios en los nodos de las bombas del sistema hidráulico.....	68
Figura 33: Flujograma de algoritmo evolutivo .....	69
Figura 34: Proceso de cruce de algoritmo evolutivo .....	75
Figura 35: Gráfica de la envolvente de presiones del sistema de bombeo para el escenario 1.....	80
Figura 36: Gráfica de la envolvente de presiones y valor de diseño del sistema de bombeo para el escenario 1.....	81
Figura 37: Convergencia de la primera iteración del algoritmo evolutivo.....	84
Figura 38: Convergencia de la segunda iteración del algoritmo evolutivo ...	84
Figura 39: Convergencia de la tercera iteración del algoritmo evolutivo.....	85
Figura 40: Convergencia de la cuarta iteración del algoritmo evolutivo .....	85
Figura 41: Convergencia de la quinta iteración del algoritmo evolutivo .....	86
Figura 42: Gráfica de la envolvente de presiones del sistema de bombeo para el escenario 2.....	89
Figura 43: Gráfica de la envolvente de presiones y valores de diseño del sistema de bombeo para el escenario 2 .....	90

## **Prólogo**

El aporte de la investigación consiste en el análisis de soluciones óptimas en la selección de válvulas de seguridad para la mejora de la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso en una unidad minera.

La presente investigación se ha estructurado en seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo I, se desarrollan las generalidades y la descripción del problema de investigación, se define el objetivo del trabajo de suficiencia y se presentan los antecedentes investigativos más relevantes.

En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico donde se describen los sistemas de bombeo, se presenta el fenómeno del golpe de ariete y los equipos de protección que se emplean para mitigarlo, resaltando la función de las válvulas de seguridad. Finalmente, se describen los algoritmos evolutivos con especial énfasis en los algoritmos genéticos. Adicionalmente, se desarrolla el marco conceptual empleado en la presente investigación.

En el capítulo III, se presenta el planteamiento de la hipótesis y se muestra la tabla de operacionalización de variables de la investigación.

En el capítulo IV, se define la metodología de la presente investigación, se definen su tipo y diseño, se presenta la unidad de análisis y finalmente, se desarrolla la matriz lógica de consistencia.

En el capítulo V, se desarrolla el trabajo de investigación como sigue: primero, se recopilan los datos del estudio de régimen permanente; segundo, se realiza la selección inicial de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete; tercero, se desarrolla el modelo hidráulico para realizar el análisis de régimen transitorio (análisis de golpe de ariete) y finalmente, se realiza el diseño del algoritmo evolutivo para la optimización de las soluciones de protección del sistema de bombeo ante el golpe de ariete.

En el capítulo VI, se presentan el análisis y la discusión de los resultados, desarrollando los análisis de golpe de ariete aplicado al modelo hidráulico del sistema de bombeo. La validación de la hipótesis se realiza mediante la comparación de la protección del sistema de bombeo con la selección inicial y optimizada de las válvulas de seguridad.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, las referencias bibliográficas y anexos empleados en la presente investigación.

## Capítulo I. Introducción

### 1.1 Generalidades

La minería en el Perú se ubica como uno de los principales medios de producción en la economía nacional. Según cifras del Ministerio de Energía y Minas (MINEM), el sector minero aporta el 10% del PBI nacional y las exportaciones de sus productos representan el 62% del total nacional. Además, en el año 2022 las inversiones mineras alcanzaron un valor aproximado de 5360 millones de dólares. El Perú es uno de los principales productores de minerales a nivel mundial, en la tabla 1 se muestra la estadística de la minería peruana comparada a nivel mundial en el año 2021.

**Tabla 1**

*Perú en el ranking mundial de producción minera*

Producto	Und.	2021	Porcentaje participación mundial	Ranking mundial
<b>Cobre</b>	TM	2 299 277	11%	2
<b>Plata</b>	kgf	3 309 647	14%	3
<b>Zinc</b>	TM	1 532 043	10%	3
<b>Oro</b>	grf	96 585 647	4%	8
<b>Plomo</b>	TM	264 124	5%	4
<b>Molibdeno</b>	TM	34 148	10%	4
<b>Hierro</b>	TM	12 149 274	1%	14
<b>Estaño</b>	TM	26 995	7%	6

Fuente: OSINERGMIN (2021) Observatorio Energético Minero

## **Prólogo**

El aporte de la investigación consiste en el análisis de soluciones óptimas en la selección de válvulas de seguridad para la mejora de la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso en una unidad minera.

La presente investigación se ha estructurado en seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el capítulo I, se desarrollan las generalidades y la descripción del problema de investigación, se define el objetivo del trabajo de suficiencia y se presentan los antecedentes investigativos más relevantes.

En el capítulo II, se desarrolla el marco teórico donde se describen los sistemas de bombeo, se presenta el fenómeno del golpe de ariete y los equipos de protección que se emplean para mitigarlo, resaltando la función de las válvulas de seguridad. Finalmente, se describen los algoritmos evolutivos con especial énfasis en los algoritmos genéticos. Adicionalmente, se desarrolla el marco conceptual empleado en la presente investigación.

En el capítulo III, se presenta el planteamiento de la hipótesis y se muestra la tabla de operacionalización de variables de la investigación.

En el capítulo IV, se define la metodología de la presente investigación, se definen su tipo y diseño, se presenta la unidad de análisis y finalmente, se desarrolla la matriz lógica de consistencia.

En el capítulo V, se desarrolla el trabajo de investigación como sigue: primero, se recopilan los datos del estudio de régimen permanente; segundo, se realiza la selección inicial de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete; tercero, se desarrolla el modelo hidráulico para realizar el análisis de régimen transitorio (análisis de golpe de ariete) y finalmente, se realiza el diseño del algoritmo evolutivo para la optimización de las soluciones de protección del sistema de bombeo ante el golpe de ariete.

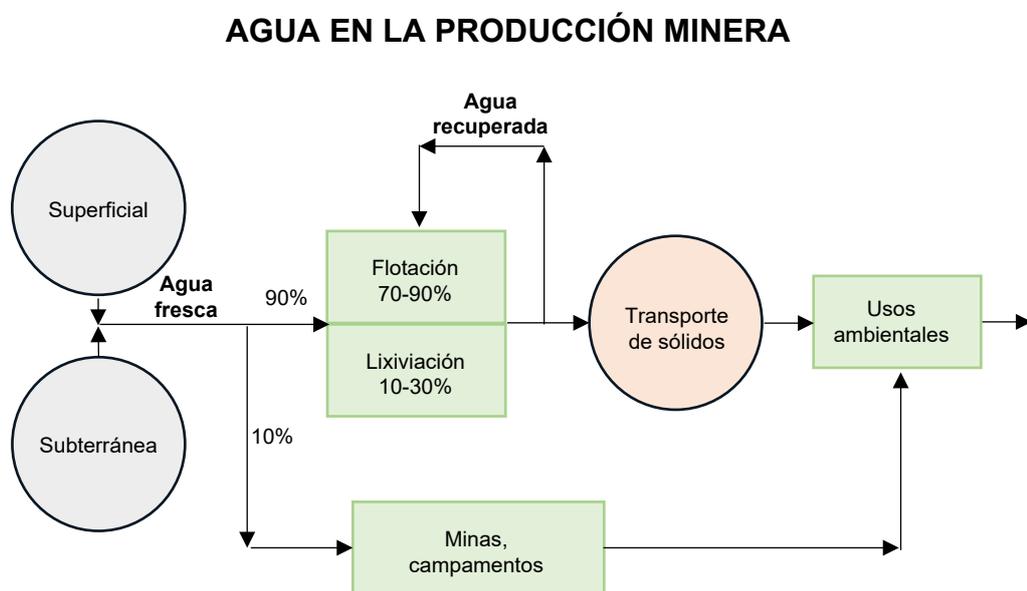
En el capítulo VI, se presentan el análisis y la discusión de los resultados, desarrollando los análisis de golpe de ariete aplicado al modelo hidráulico del sistema de bombeo. La validación de la hipótesis se realiza mediante la comparación de la protección del sistema de bombeo con la selección inicial y optimizada de las válvulas de seguridad.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones, las referencias bibliográficas y anexos empleados en la presente investigación.

Las operaciones mineras dependen del tipo de mineral a extraer, pero un recurso empleado en todas ellas de manera extendida es el agua. En la figura 1 se presenta un esquema del uso del agua en la producción minera (De Piérola, J., 2017).

**Figura 1**

*Esquema de uso de agua en el sector minero*



**Fuente:** De Piérola, J. (2017) El agua y su uso en minería y agricultura en el Perú, una primera aproximación

De la figura anterior, se observa que el agua es un recurso vital para los procesos mineros y es imprescindible que se emplee de manera eficiente. Por eso, cada vez se emplea mayor cantidad de agua recuperada para su ejecución.

El agua recuperada es impulsada por sistemas de bombeo de gran capacidad y almacenada en reservorios, que posteriormente se reutiliza en el procesamiento de minerales. Uno de los problemas más importantes que afrontan dichos sistemas es el fenómeno de golpe de ariete. El golpe de ariete genera daños en los equipos presentes en la línea del sistema de bombeo y también en las tuberías asociadas cuando se sobrepasan los valores de diseño. La integridad del sistema se involucra de manera peligrosa, con probabilidad de su inoperatividad, afectando de manera primordial la disponibilidad del agua recuperada para continuar con las operaciones mineras.

Para solucionar esta problemática se deberá mitigar este fenómeno mediante la instalación de una variedad de equipos de protección o seguridad para evitar fallas temporales o permanentes. Dentro de este tipo de equipos de protección se encuentran las válvulas de seguridad. Por tal motivo, el presente trabajo plantea el aseguramiento de la integridad del sistema de bombeo de agua recuperada mediante una adecuada selección de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete que sea asistida por un algoritmo evolutivo que optimice los parámetros de selección de dichas válvulas y encontrar soluciones que aminoren los efectos de dicho fenómeno.

## **1.2 Descripción del problema de investigación**

En el Perú, la gran minería emplea agua recuperada para sus procesos productivos. Un ejemplo se muestra en el Informe Anual 2017 de la empresa

Southern (SPCC, 2017), que indica que el 71% del consumo total del agua para sus operaciones tiene como origen el agua recuperada. En consecuencia, la limitada disponibilidad de este recurso representa un problema de suma importancia para la ejecución de dichas operaciones.

Un diseño inadecuado de los sistemas de bombeo para la impulsión de agua recuperada impacta negativamente la disponibilidad continua del recurso hídrico. Cuando se realiza el análisis transitorio hidráulico del sistema, es crítico el análisis del fenómeno de golpe de ariete, mediante el cual se determinan los tipos de válvulas de seguridad que serán instaladas en el sistema de bombeo. La realización de estudios representa una problemática importante en cuanto a su impacto sobre la integridad de los sistemas de bombeo de agua y el aseguramiento de su tiempo de vida útil, el cual posee un impacto económico significativo para las operaciones de las unidades mineras.

Una selección inadecuada de los equipos de protección contra el golpe de ariete genera desprotección en las líneas de impulsión de agua recuperada. Ello, en consecuencia, genera la inhabilitación de la línea para operar hasta que sean reemplazados todos los equipos y materiales dañados. Este evento representa una problemática en el diseño de los equipos de protección como las válvulas de seguridad.

El golpe de ariete causa daños en todo el sistema de bombeo. Este evento ocasiona ondas de presión positivas y negativas en todo el sistema.

Las sobrepresiones generan ruptura de tuberías y daños en los equipos, presentes a lo largo de la línea de impulsión, cuando la presión máxima supera el valor de presión de diseño de las tuberías. Asimismo, las presiones negativas causan colapso de tuberías cuando la presión mínima supera el límite de capacidad de presión negativa de las mismas. Todo lo mencionado corresponde a una problemática en el diseño de sistemas de bombeo (Wan, W. & Zhang, B., 2019).

Además, el fenómeno del golpe de ariete genera sobrecostos en los proyectos. De acuerdo con (Moghaddas, S. & Samani, H., 2016), una selección no optimizada de equipos de protección contra los efectos del golpe de ariete representa un sobrecosto de 30% en la procura de dichos equipos. Ello representa una problemática a nivel económico que impacta negativamente en las operaciones mineras.

En ese sentido la formulación del problema en la presente investigación es:

¿En qué medida el golpe de ariete afecta negativamente la integridad de un sistema de bombeo de agua recuperada en una unidad minera?

### **1.3 Objetivos del estudio**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Mejorar la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera basado en el diseño de un algoritmo evolutivo.

### **1.4 Antecedentes investigativos**

A continuación, se citan algunos antecedentes relacionados al tema de investigación, realizados en los ámbitos internacional, nacional y local.

#### **1.4.1 Antecedentes internacionales**

En el trabajo de investigación de Tejas, M. & Vipul, N. (2021) **“Revisiting the performance of evolutionary algorithms”**, los autores plantean como objetivo de la investigación evaluar el desempeño de diferentes categorías de algoritmos evolutivos como: algoritmos genéticos, optimización por enjambre de partículas, evolución diferencial, entre otros, para utilizarlos como base para el desarrollo de algoritmos nuevos o híbridos. Estos algoritmos se aplicaron para resolver diversos problemas como funciones de prueba y problemas reales de optimización, incluyendo problemas con o sin restricciones, dichas funciones y problemas provienen de la base de datos del Congreso sobre Computación Evolutiva de la IEEE. La metodología empleada en la investigación es el establecimiento de métricas de desempeño y atributos de los algoritmos evolutivos; las métricas se dividen en tres grupos: de eficiencia, de fiabilidad y de calidad de las soluciones;

algunos de los doce atributos clasificados dentro de estos grupos son los siguientes: convergencia a un valor óptimo, ratio de convergencia, ratio de éxito, precisión: valores promedio y de desviación estándar de las soluciones, espacio de exploración, entre otros. Como resultado se obtiene una tabla de comparación del desempeño de los algoritmos evolutivos en las tres métricas y los doce atributos, evidenciando que cada algoritmo proporciona una solución capaz de ser aplicado en diversos problemas pero no a todos ellos. De esta forma, una de las conclusiones más relevantes que establecen los autores es que las métricas de desempeño desarrolladas sirven como una plataforma común para investigar el desempeño de nuevos algoritmos evolutivos propuestos.

En el trabajo de investigación de Yazdi, J. & Hokmabadi, A. (2018) **“Optimal Size and Placement of Water Hammer Protective Devices in Water Conveyance Pipelines”**, los autores plantean como objetivo seleccionar las características y la ubicación de equipos de protección contra el golpe de ariete. Para lograr el objetivo, el autor emplea como primera etapa de la investigación el desarrollo de un meta-modelo que represente el comportamiento de las ecuaciones del golpe de ariete y como segunda etapa desarrolla un algoritmo de optimización. En la etapa del modelado se evalúan tres opciones: una red neuronal artificial (ANN), una regresión de soporte de vectores (SVR) y un sistema de inferencia adaptativo neuro-difuso (ANFIS). En la etapa de optimización se desarrolla un algoritmo de evolución diferencial (DE) para ser aplicado en funciones objetivo simple y múltiple. De acuerdo a

los resultados, en la etapa de modelamiento, la capacidad de generalización de los modelos establece el siguiente orden de menor a mayor capacidad: SVR, ANFIS y ANN; de esta manera el modelo basado en ANN es el que se emplea para la etapa de optimización. Como conclusión, los resultados de la etapa de optimización muestran que el diseño basado en una función multiobjetivo reduce un 30% de costo de equipos en protección contra golpe de ariete, mientras que el diseño basado en una función objetivo simple, sólo reduce un 12.5% dicho costo.

En el trabajo de investigación de Mahmood, S. (2018) **“The steady-transient optimization of water transmission pipelines with consideration of water-hammer control devices: a case study”**, el autor propone como objetivo el diseño de un modelo de optimización para la selección adecuada de diámetro, espesor y material de tuberías, además de la selección de la posición y las características de los equipos de protección adecuado contra el golpe de ariete. El algoritmo de optimización empleado es un algoritmo genético auto-adaptativo y la función objetivo a evaluar es la minimización de costos y mantener las presiones del sistema en los rangos permitidos. El caso de estudio analizado es una línea de transmisión de 4 m<sup>3</sup>/s de capacidad y una longitud de 8070 m, ubicada en la ciudad de Irán. El autor concluye que, empleando el algoritmo de optimización, se reduce un 10% del costo total de tuberías y equipos de protección contra el golpe de ariete, comparado con los resultados de la compañía encargada de la realización del diseño del sistema.

En el trabajo de investigación de Hyunjun, K. & Jisung, H. (2017) “**The Optimization of Design Parameters for Surge Relief Valve for Pipeline Systems**”, el objetivo de los autores comprende el cálculo de los valores óptimos para el diseño de válvulas de alivio de sobrepresión (SRV) para minimizar la diferencia entre la presión máxima y mínima del sistema en un evento de golpe de ariete. La metodología empleada es el análisis numérico de los efectos del transitorio hidráulico (golpe de ariete) y la posterior optimización empleando un algoritmo genético. La función objetivo a evaluar es la minimización de la diferencia entre presión máxima y mínima alcanzada durante el evento del transitorio. Los valores considerados en la optimización son: coeficiente de válvula, presión de seteo y tiempos de apertura y cierre de la SRV. El sistema hidráulico considerado por el autor consiste de una línea de gravedad de 250 m con dos reservorios (al inicio y al final de la línea) de 80 y 60 m de altura y una SRV instalada en paralelo con una válvula de corte, al ingreso del reservorio final. El autor concluye que existe una variación significativa (alrededor de 135 m.c.a.) entre la diferencia de presiones máxima y mínima cuando el sistema integra una SRV comparado con el sistema sin SRV, el cual es un sistema desprotegido contra los efectos del golpe de ariete.

#### **1.4.2 Antecedentes nacionales**

En la tesis de Carhuapoma, J. & Chahuayo, A. (2019) “**Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable en la Rinconada de Pamplona Alta, aplicando EPANET y algoritmos genéticos para la localización de válvulas reductoras de presión**”, el objetivo comprende el

desarrollo del diseño de un sistema de abastecimiento de agua potable y la localización automática de válvulas reductoras de presión. La metodología empleada para alcanzar el objetivo se desarrolla en dos etapas: en primera instancia, el diseño del sistema de abastecimiento de agua empleando el software EPANET para realizar cálculos hidráulicos y en segunda instancia, el desarrollo de un algoritmo genético multiobjetivo para la ubicación adecuada de válvulas reductoras de presión. Los autores concluyen que mediante la aplicación del algoritmo genético de optimización planteado las velocidades de flujo en el sistema son menores a 0.6 m/s, además las presiones estáticas en los nodos se mantuvieron menores a 50 m.c.a. y las presiones dinámicas mayores a 10 m.c.a., cumpliendo así con el reglamento de elaboración de proyectos de agua potable y alcantarillado para habilitaciones urbanas de Lima Metropolitana y Callao de SEDAPAL.

En la tesis de Flores, I. (2019) **“Aplicación del algoritmo genético para el cálculo del diámetro de las tuberías de una red de distribución de agua potable en el distrito de Tarapoto 2018”**, el objetivo comprende el desarrollo de un modelo de algoritmo genético para la mejora del proceso de cálculo del diámetro de tuberías, con el fin de reducir las fugas de agua en el distrito de Tarapoto. Para lograr el objetivo, el autor realiza las siguientes etapas: recopilación de datos de redes de distribución de parte de la Empresa Municipal de Servicios de Agua Potable de San Martín (EMAPA San Martín); seguidamente, se desarrollan dos motores de cálculo empleando dos métodos: método del gradiente y el algoritmo genético. Para la validación de

la hipótesis se plantea la comparación de los dos motores de cálculo. Como conclusión, el algoritmo genético logró una reducción del costo de adquisición de tuberías en un 82.03% y el tiempo de cálculo en un 99.5% en comparación con el método del gradiente.

En el trabajo de investigación de Twyman, J. (2018) **“Golpe de ariete en una red de distribución de agua”**, el objetivo es la aplicación del método de las características (MC) para modelar un evento de golpe de ariete generado por el cierre de una válvula en una red de distribución de agua. El método empleado por el autor es la discretización en tiempo y espacio aplicada a cada tubería del sistema, se discretiza en intervalos de tiempo comunes ( $\Delta t$ ) para todo el sistema y se asignan intervalos de longitud ( $\Delta x$ ) para cada tubería del sistema, todo ello para lograr su adecuación al MC. El sistema a ser evaluado está comprendido por un estanque con altura de agua  $H=70\text{m}$ , 45 tuberías de longitudes y diámetros diferentes y una válvula mariposa en uno de los extremos de la red. Se consideran dos escenarios de análisis: en el primero, la válvula mariposa se cierra en 10 segundos; en el segundo, la válvula mariposa se cierra en 1 segundo. Como conclusión, la red de distribución de agua analizada presentó presiones máximas considerables en el orden de los 160 m.c.a., para el segundo escenario de análisis.

En la tesis de Enríquez, W. (2015) **“Análisis de golpe de ariete para reducir la sobrepresión en el sistema de bombeo del tanque TK-007 al cajón LA003B de la presa de relaves de SMCV”**, el objetivo comprende el análisis del golpe de ariete en las válvulas para flushing y la selección

adecuada de válvulas de protección en una línea de transporte de fluido en el área de relaves de la empresa Sociedad Minera Cerro Verde (SMCV). El autor se basa en la siguiente metodología, en una primera etapa realiza un estudio hidráulico en análisis permanente para determinar las presiones y velocidades presentes en el sistema; en una segunda etapa desarrolla un análisis hidráulico transitorio para la verificación de presiones que superen el límite establecido por las clases de presión de las tuberías y equipos del sistema. Los resultados de la investigación concluyen que en un evento de golpe de ariete la presión máxima alcanzada en las válvulas para flushing están alrededor de 369 psig, siendo un valor superior al que soportan dichas válvulas (285 psig). Al realizar un nuevo análisis transitorio, considerando en el sistema una válvula de alivio de presión, la presión máxima alcanzada en las válvulas para flushing es de 144 psig, valor inferior al límite de 285 psig. De esta manera el autor concluye que la instalación de una válvula de alivio reduce la sobrepresión causada por un evento de golpe de ariete.

#### **1.4.3 Antecedente local**

En la tesis de Céspedes, J. (2014) **“Diseño de un sistema de bombeo automático de agua recuperada de relaves mineros”**, el autor plantea el objetivo de diseñar la ingeniería de un sistema de bombeo de agua recuperada de 1242 m<sup>3</sup>/h de capacidad que posee tres etapas: una barcaza que impulsa agua de la presa de relaves, una estación booster intermedia y un tanque de recepción. El autor incluye en el diseño general un sistema de protección contra el fenómeno de golpe de ariete que consiste de válvulas

anticipadoras de onda y válvulas de venteo de aire (ventosas). La selección de estas válvulas se realizó en coordinación con el fabricante de válvulas Bermad. De acuerdo al análisis transitorio realizado, los tamaños seleccionados de la válvulas de seguridad fueron los siguientes: válvulas anticipadoras de onda de 6 pulgadas y válvulas ventosas de 4 pulgadas.

## Capítulo II. Marco teórico y conceptual

### 2.1 Marco teórico

#### 2.1.1 Sistemas de bombeo

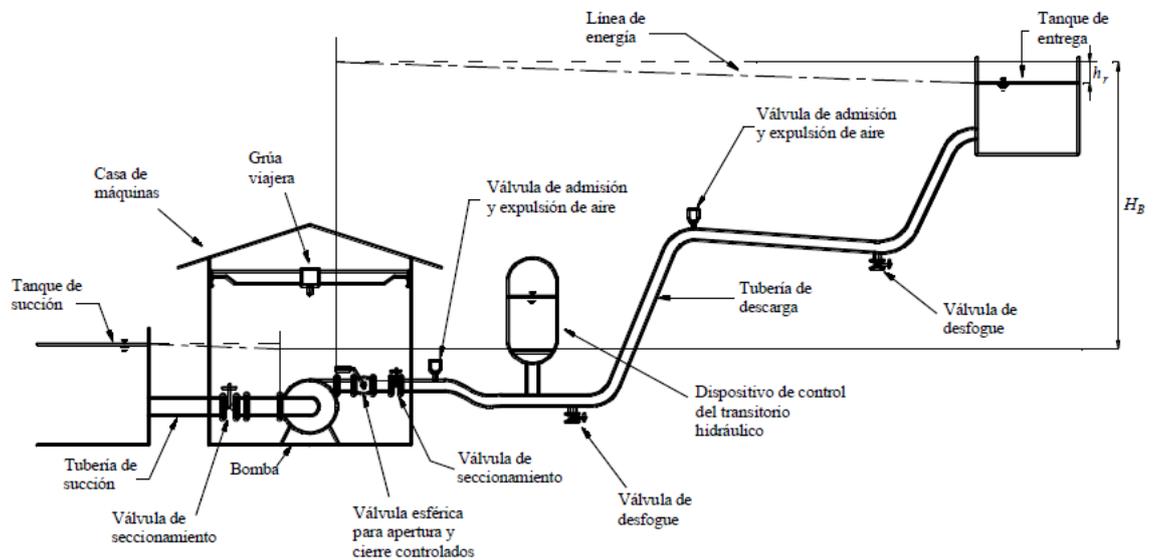
De acuerdo con (Blanco, E. & Velarde, S., 1994) “**Sistemas de bombeo**”, los sistemas de bombeo comprenden una serie de elementos que logran el transporte de fluidos sujetos a condiciones de diseño (caudal y presión) en variedad de procesos y sistemas de diferentes tipos de industria.

#### Componentes principales

Para identificar los componentes principales en los sistemas de bombeo, se debe considerar el tipo de instalación. Como indica (Cafaggi, A. & Rodal, E., 2011) “**Sistemas de bombeo**”, existen dos tipos de instalación: horizontal y vertical. La instalación de tipo horizontal y sus principales componentes se muestran en la figura 2.

**Figura 2**

*Esquema general de una estación de bombeo horizontal*



**Fuente:** Cafaggi, A. & Rodal, E. (2011) Sistemas de bombeo

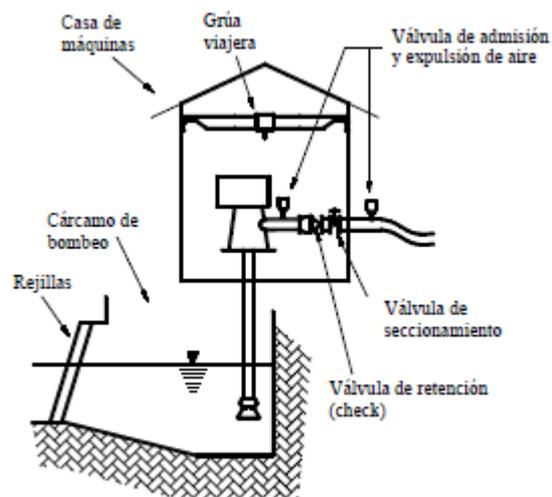
Los principales componentes se enlistan a continuación:

- Tanque y tubería de succión
- Casa de máquinas: que contiene a la bomba, válvulas de control, válvulas de retención (check), válvulas de seccionamiento o corte, entre otros.
- Tubería de descarga
- Dispositivos de control o protección del transitorio hidráulico como: cámara de aire, válvula de admisión y expulsión de aire
- Válvula de drenaje o desfogue
- Tanque de recepción o entrega

En una instalación de tipo vertical, los elementos que lo diferencian respecto a una instalación del tipo horizontal comprenden lo relacionado a la succión; para la descarga se consideran los mismos componentes. Estos componentes se visualizan en la figura 3.

**Figura 3**

*Esquema general de una estación de bombeo con bombas de eje vertical*



**Fuente:** Cafaggi, A. & Rodal, E. (2011) Sistemas de bombeo

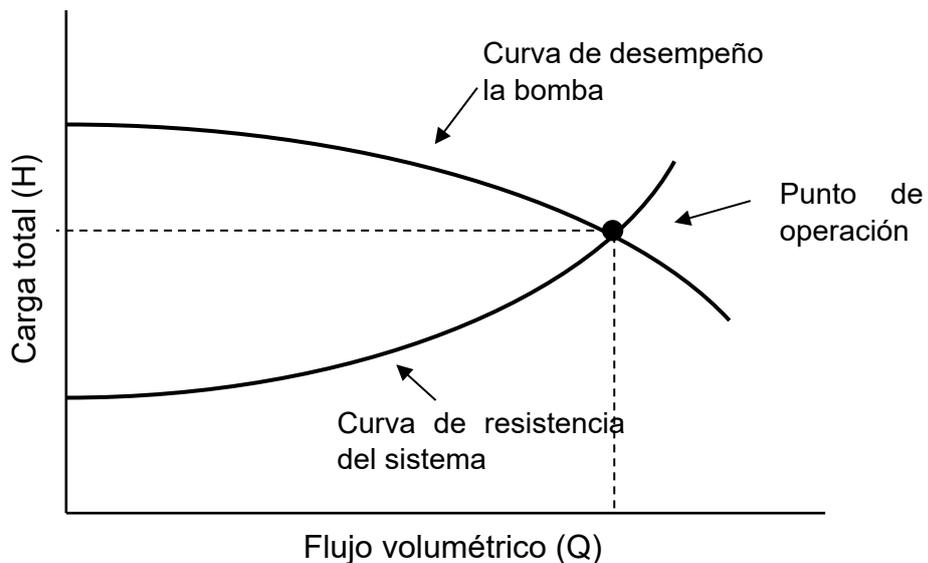
- Rejillas de seguridad: para evitar el ingreso de objetos o cuerpos extraños que dañen al sistema.
- Pozo de succión o cárcamo de bombeo.
- Válvulas de seccionamiento o corte
- Válvula de retención (check)

## Punto de operación de bomba

En el libro de (Mott, R., 2006) “**Mecánica de fluidos**”, se define el punto de operación de una bomba como el flujo volumétrico que impulsa contra una carga total para un sistema dado. Para lograr la identificación de dicho punto se superponen la curva de resistencia del sistema y la curva de desempeño de la bomba. En la figura 4 se muestra un ejemplo de la ubicación del punto de operación de una bomba.

**Figura 4**

*Ilustración genérica del punto de operación de una bomba*



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.2 Golpe de ariete

(Abreu, J. & Guarga, R., 1995) “**Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión**”, define al golpe de ariete como un transitorio hidráulico muy rápido en el que las variaciones de presión son muy

apreciables y la energía, almacenada en el fluido y el sistema de tuberías, varían de manera significativa.

### Ecuaciones del golpe de ariete

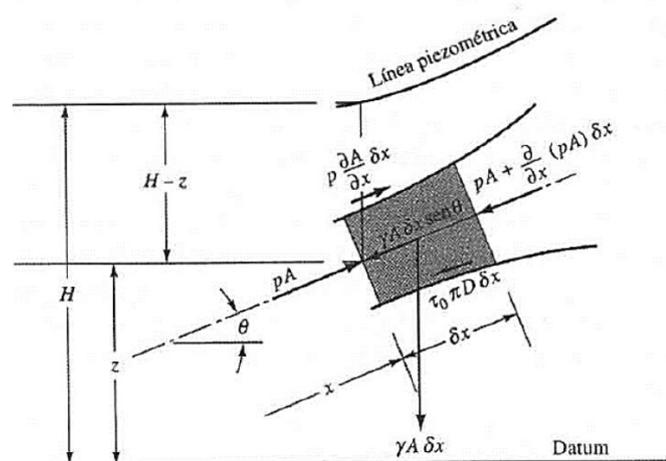
Para determinar las ecuaciones que modelan el golpe de ariete, de acuerdo con (Abreu, J. & Cabrera, E., 1995) “**El golpe de ariete en tuberías de impulsión. Comentarios a las expresiones de Mendiluce**”, se realizan balances de cantidad de movimiento y de materia.

### Balance de cantidad de movimiento

Considerando el diagrama de cuerpo libre de un elemento del fluido como se muestra en la figura 5.

**Figura 5**

*Diagrama de cuerpo libre para la deducción de la ecuación de movimiento*



**Fuente:** Streeter, V. & Wylie, E. (2016) Mecánica de Fluidos

Aplicando la segunda ley de Newton en la dirección axial, se deduce la ecuación 1:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g \operatorname{sen} \theta + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (1)$$

, donde las variables denotan:

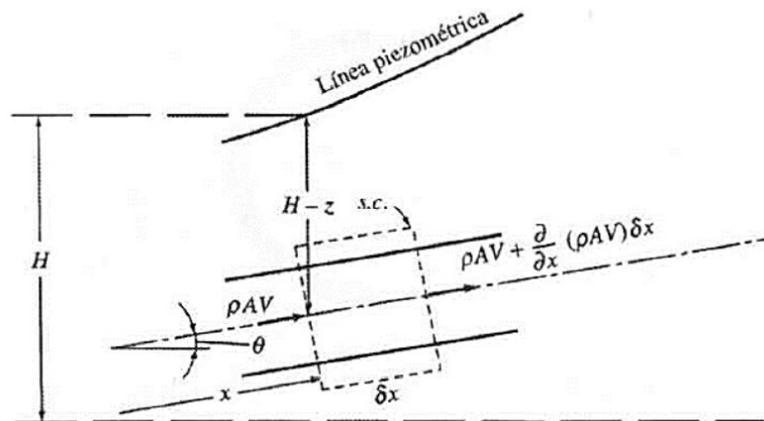
V: velocidad; t: tiempo; x: variable espacial considerada;  $\rho$ : densidad del agua; p: presión; g: aceleración de la gravedad;  $\theta$ : pendiente de la tubería.

### Balance de materia o continuidad

Se considera el volumen de control de la figura 6.

**Figura 6**

*Volumen de control para la deducción de la ecuación de continuidad*



Fuente: Streeter, V. & Wylie, E. (2016) Mecánica de Fluidos

Aplicando la ecuación de continuidad para flujo no permanente, se deduce la ecuación 2.:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

, donde las variables denotan:

V: velocidad; t: tiempo; x: variable espacial considerada;  $\rho$ : densidad del agua; p: presión; g: aceleración de la gravedad;  $\theta$ : pendiente de la tubería; a: celeridad de propagación de perturbaciones a lo largo de la tubería.

A través de consideraciones y simplificaciones tales como: despreciar el peso del fluido y los términos convectivos, la utilización de las variables H y Q (altura piezométrica y caudal, respectivamente), se determinan las ecuaciones 3 y 4:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0 \quad (3)$$

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

Se añade la variable A: área de sección transversal de la tubería.

### **Efectos del golpe de ariete**

Según (Ortiz, G., 2006) **“El golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable”**, el golpe de ariete causa los siguientes daños en sistemas hidráulicos:

**Falla en equipos y accesorios:** equipos como bombas, válvulas, entre otros, están diseñados para soportar un valor de presión máximo y durante un evento de golpe de ariete se alcanzan valores que, de sobrepasar dicho límite, generan desperfectos temporales o permanentes.

**Ruptura de tuberías:** es la situación más desfavorable que se presenta en un evento de golpe de ariete, cuando las sobrepresiones superan el valor de diseño de las tuberías. Se requiere atención inmediata debido a la interrupción del suministro de fluido hasta el reemplazo de los materiales dañados.

### **2.1.3 Equipos de seguridad o protección contra el golpe de ariete**

De acuerdo con (Boulos, P. & Karney, B., 2005) “**Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems**” y (Bermad, 2007) “**Abastecimiento de agua. Válvulas de control hidráulico**”, se describen a continuación algunos equipos de protección contra el golpe de ariete y sus consideraciones de selección.

#### **Válvula anticipadora de onda**

La válvula anticipadora de onda es de operación hidráulica y operada por diafragma, se instala en derivación del manifold de descarga de la estación de bombeo. Cuenta con un circuito de control hidráulico accionado por dos pilotos: de alta y baja presión. En la figura 7 se muestra un modelo de la marca Bermad.

**Figura 7**

*Válvula anticipadora de onda Bermad Modelo 735*

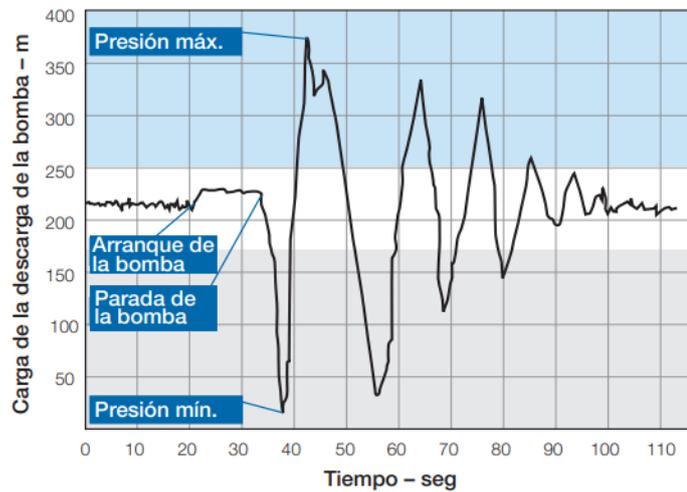


**Fuente:** Fabricante de válvulas Bermad

Una válvula anticipadora de onda presenta un funcionamiento similar al de una válvula de alivio de presión, es decir, libera una presión alta del sistema cuando se sobrepasa un valor prefijado (función del piloto de alta presión). Además, se activa para que se realice su respectiva apertura en caso de una presión baja (presión medida en una ubicación específica) en previsión de la siguiente sobrepresión de la onda (función del piloto de baja presión). Cuando se activa la válvula, completa un ciclo basado en los tiempos de apertura y cierre. En las figuras 8 y 9 se muestran las gráficas de una onda de presión durante un evento de golpe de ariete originado por una parada repentina de la bomba, y se muestran en dos escenarios: el sistema de bombeo sin protección de una válvula anticipadora de onda y el sistema de bombeo con protección incluyendo dicha válvula.

**Figura 8**

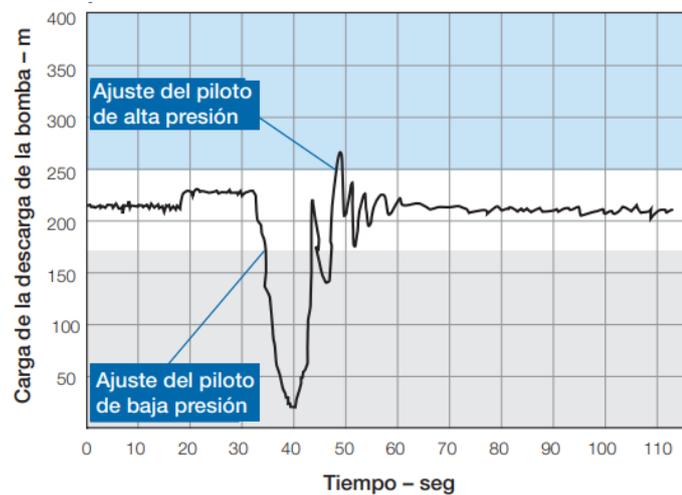
*Onda de presión en un sistema de bombeo sin protección de válvula anticipadora de onda*



**Fuente:** Bermad (2007) Abastecimiento de agua

**Figura 9**

*Onda de presión en un sistema de bombeo con protección de válvula anticipadora de onda*



**Fuente:** Bermad (2007) Abastecimiento de agua

### **Variables de selección para una válvula anticipadora de onda**

Las variables principales para realizar la selección de una válvula anticipadora de onda son:

- Tamaño y ubicación
- Coeficiente de caudal
- Puntos de seteo de presión alta y baja
- Tiempos de apertura y cierre

### **Válvula ventosa o de admisión y liberación de aire**

Las válvulas ventosas son equipos que permiten el control de aire en tuberías, purgan el aire durante el llenado de una tubería, durante la operación del sistema descargan las bolsas de aire acumuladas y admite aire durante el vaciado de una tubería. Proporcionan protección contra la acumulación de aire, generación de vacío y eventos de golpe de ariete. En la figura 10 se muestra una válvula ventosa de la marca Bermad.

**Figura 10**

*Válvula ventosa Bermad modelo C70*

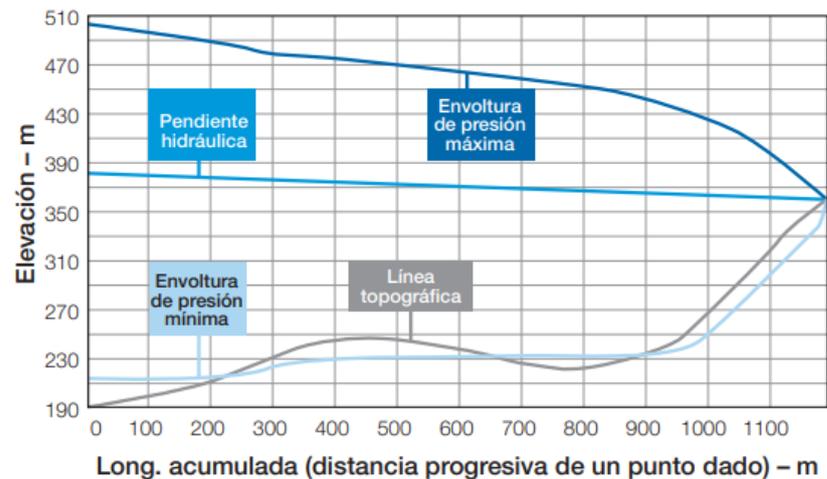


**Fuente:** Fabricante de válvulas Bermad

Las válvulas de admisión o liberación de aire se instalan en puntos altos de una tubería para evitar una presión baja mediante la admisión de aire en la tubería cuando la presión de la línea cae por debajo de las condiciones atmosféricas. El aire se expulsa cuando la presión de la línea excede la presión atmosférica. En las figuras 11 y 12 se observan dos escenarios: primero, el comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo cuando no incluye válvulas ventosas y segundo, cuando sí las incluye.

**Figura 11**

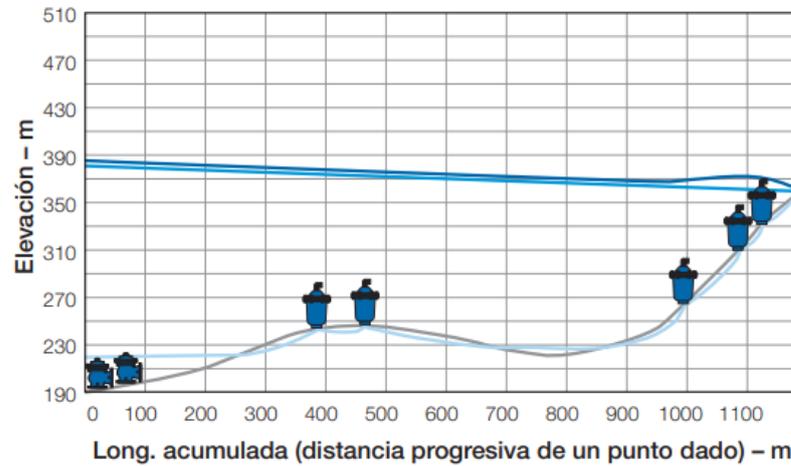
*Comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo sin protección de válvulas ventosas*



**Fuente:** Bermad (2007) Abastecimiento de agua

**Figura 12**

*Comportamiento hidráulico de un sistema de bombeo con protección de válvulas ventosas*



**Fuente:** Bermad (2007) Abastecimiento de agua

## **Variables de selección para una válvula ventosa**

Las variables principales para realizar la selección de una válvula ventosa son:

- Tamaño y ubicación
- Diámetro de ingreso y salida de aire

### **2.1.4 Algoritmos evolutivos**

Según (Araujo, L. & Cervigón, C., 2009) **“Algoritmos Evolutivos. Un enfoque práctico”**, se definen los algoritmos evolutivos y se presenta un esquema de los mismos.

Los algoritmos evolutivos (AE) son técnicas de búsqueda y optimización de soluciones basadas en la teoría de la evolución y selección

de las especies. Presentan características de dos tipos de búsqueda: aleatoria y dirigida. De forma aleatoria logran acceder a cualquier región del espacio de búsqueda de soluciones y de forma dirigida, exploran el espacio de soluciones de forma más eficiente que otros métodos aleatorios.

### **Esquema general de un algoritmo evolutivo**

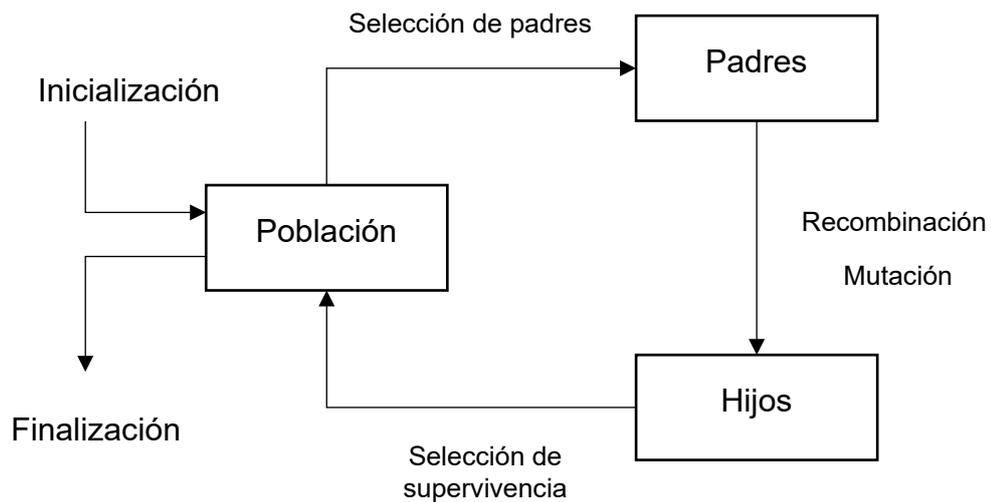
- La forma de representación de soluciones potenciales se denomina individuos. A su vez, el conjunto de todos los individuos forma la población de trabajo del algoritmo.
- La modificación de la composición de la población a través de iteraciones del algoritmo, se denominan generaciones.
- En cada generación se realizan tres procesos: selección, reproducción y evaluación.
- El proceso de selección es aquel en el que aumenta la probabilidad de que un individuo con mejor adaptación permanezca en la población y participe en el proceso posterior de reproducción.
- En el proceso de reproducción, mediante operaciones conocidas como operadores genéticos (recombinación, mutación) se genera la aparición de nuevos individuos, a partir de la población anterior. De esta manera, los mejores individuos generan los mejores valores de la función de adaptación del algoritmo. Es importante que el algoritmo evolutivo cuente con una componente aleatoria, para que los individuos con inferior adaptación, con menor probabilidad, sobrevivan y participen también en el proceso de reproducción.

- En la etapa de evaluación, se comparan los mejores valores de la función de adaptación del algoritmo para seleccionar los mejores individuos que participarán en la próxima generación.

En la figura 13 se muestra el flujograma de un esquema general de un algoritmo evolutivo.

**Figura 13**

*Flujograma del esquema general de un algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Eiben, A. & Smith, J. (2003) Introduction to Evolutionary Computing

## Optimización

(Simon, D., 2013) “**Evolutionary optimization algorithms**”, establece dos tipos de problemas de optimización que son resueltos con algoritmos evolutivos: sin restricciones y con restricciones.

## Sin restricciones

Los problemas de optimización sin restricciones se denotan matemáticamente como un problema de minimización o maximización, ambos tipos de problemas se expresan de la siguiente manera:

$$\min_x f(x) \Leftrightarrow \max_x [-f(x)]$$

$$\max_x f(x) \Leftrightarrow \min_x [-f(x)]$$

, donde la función  $f(x)$  se denomina función objetivo y el vector  $x$  es la variable independiente o variable de decisión. Los elementos de la variable  $x$  son denominados características de la solución y su número de elementos determina la dimensión del problema de optimización.

## Con restricciones

Los problemas de optimización con restricciones se denotan matemáticamente de la siguiente forma:

$$\min_x f(x) \text{ o } \max_x f(x) \text{ tal que } g_i(x) \leq 0 \text{ para } i \in [1, m]$$

$$\text{y } h_j(x) = 0 \text{ para } j \in [1, p],$$

, donde el problema incluye  $(m + p)$  restricciones,  $m$  de las cuales son restricciones de desigualdad y  $p$ , son restricciones de igualdad.

## Algoritmos genéticos

De acuerdo con (Simon, D., 2013) “**Evolutionary optimization algorithms**”, los algoritmos genéticos simulan cada una de las siguientes características de la selección natural:

- Un sistema biológico incluye una población de individuos, muchos de los cuales presentan la habilidad de reproducirse.
- Los individuos presentan un tiempo de vida finito.
- Existe variación en la población.
- Las habilidades de supervivencia y reproducción están correlacionadas positivamente.

Se crea una población de soluciones candidatas, es decir, individuos. Algunas soluciones son buenas y otras no, las cuales se calificarán como “mejores” y “peores”, respectivamente. Los mejores individuos (que generan mejores valores de adaptación) presentan una probabilidad más alta para reproducirse, mientras que los peores individuos (que generan peores valores de adaptación) presentan una baja probabilidad. Los padres engendran hijos y abandonan la población para ser ocupada por su descendencia. A medida que avanzan las generaciones, la población se adapta mejor, encontrando soluciones al problema de optimización.

## **Estructura de un algoritmo genético**

Según (Xinjie, Y. & Mitsuo, G., 2010) “**Introduction to Evolutionary Algorithms**”, se describe la estructura de un algoritmo genético como sigue:

### **Fase 1: Inicialización**

**Paso 1.1:** Asignar los parámetros del algoritmo como: probabilidad de recombinación, probabilidad de mutación, tamaño de la población, etc.

**Paso 1.2:** Generar el tamaño de la población y evaluar sus valores de adaptación.

**Fase 2:** Bucle principal. Repetir los pasos siguientes hasta que se cumpla un criterio de término.

**Paso 2.1:** Seleccionar los individuos de la población actual para generar el mating pool.

**Paso 2.2:** Seleccionar, aleatoriamente sin reemplazo, dos individuos del mating pool para efectuar operaciones de recombinación y mutación. Insertar el individuo hijo en la nueva población. Repetir este paso hasta que se genere una nueva población del mismo tamaño de la inicial.

**Paso 2.3:** Evaluar el valor de adaptación para los nuevos individuos de la nueva población.

**Paso 2.4:** Reemplazar la población actual con la nueva población.

**Fase 3:** Presentar los individuos finales como resultado del algoritmo genético.

## 2.2 Marco conceptual

- **Transitorio:** flujo de un fluido cuando las variables de velocidad, presión y sección varían en el tiempo de un punto a otro de su recorrido.
- **Anticipadora:** válvula de seguridad o protección contra el golpe de ariete, cuyas funciones son anticipar la onda de presión y liberar la sobrepresión generada para mantenerla en niveles seguros.
- **Ventosa:** válvula de seguridad o protección contra el golpe de ariete, cuyas funciones son admitir ingreso de aire a la tubería cuando es menor a la presión atmosférica y expulsar aire cuando la presión en la tubería es mayor a la presión atmosférica.
- **Individuo:** es uno de los elementos de un conjunto de posibles soluciones (población) que resuelven un problema de optimización.
- **Mutación:** operador genético que genera nueva información modificando de manera aleatoria parte de los valores de un individuo para poder explorar con mayor amplitud el espacio de soluciones de un problema de optimización.

## Capítulo III. Hipótesis y operacionalización de variables

### 3.1 Hipótesis general

El diseño de un algoritmo evolutivo aplicado a la selección de válvulas de seguridad mejorará significativamente la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera.

### 3.2 Operacionalización de variables

En la tabla 2 se muestra la operacionalización de variables del presente trabajo.

**Tabla 2**

*Operacionalización de variables*

VARIABLES	INDICADORES
<b>Variable independiente:</b> algoritmo evolutivo aplicado a la selección de válvulas de seguridad.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ratio de convergencia de algoritmo (número de generaciones del algoritmo evolutivo).</li><li>• Media de valores de soluciones encontradas: coeficiente de caudal, tiempos de apertura y cierre, tamaños de orificios (adimensional, s, mm).</li><li>• Desviación estándar de valores de soluciones encontradas: coeficiente de caudal, tiempos de apertura y cierre, tamaños de orificios (adimensional, s, mm).</li></ul>
<b>Variable dependiente:</b> protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diferencia entre presión máxima y mínima en metros de columna de agua (m.c.a.).</li></ul>

Fuente: Elaboración propia

## Capítulo IV. Metodología de la investigación

### 4.1 Tipo y diseño de la investigación

- **Enfoque de investigación:**

La presente investigación presenta un enfoque de tipo cuantitativo porque de las siete características epistemológicas, cinco de ellas son cuantitativas y se describen a continuación:

Según la percepción de la realidad, la investigación es objetiva, debido a que se basa en procedimientos que emplean datos numéricos y algoritmos para lograr la validación de la hipótesis planteada.

Desde el punto de vista del razonamiento, la investigación es deductiva porque desarrolla la solución de un caso particular a partir de la observación de un caso de estudio general.

Según la finalidad, la investigación plantea una comprobación basada en la experimentación de algoritmos evolutivos y el análisis posterior de sus resultados para la validación de la hipótesis.

La investigación está orientada al resultado porque se centra en la obtención de valores para la selección de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete.

De acuerdo con el principio de verdad, la investigación es particular porque desarrolla un algoritmo evolutivo específico para una selección de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete para un sistema de bombeo específico.

- **Alcance de la investigación:**

El alcance de la investigación es del tipo correlacional, porque se recopilan los datos obtenidos del algoritmo evolutivo y posteriormente se analiza la influencia y la medida de ésta, en la mitigación del golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de mina.

- **Diseño de la investigación:**

El diseño de la investigación es del tipo experimental, porque se centra en el diseño y la posterior evaluación de un algoritmo evolutivo para obtener soluciones óptimas en la selección de válvulas de seguridad, que mitiguen el golpe de ariete generado en el sistema de bombeo mencionado.

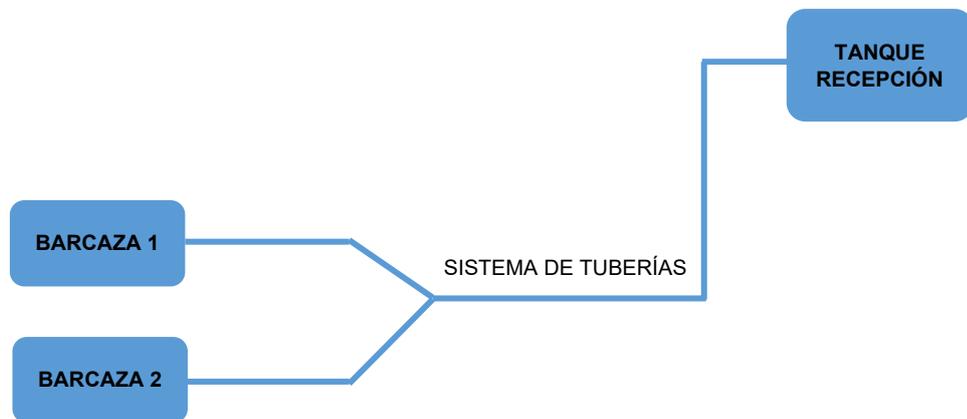
## **4.2 Unidad de análisis**

La investigación utiliza como unidad de análisis un sistema de bombeo de agua recuperada de una poza de relaves de una empresa minera ubicada en el distrito de San Marcos, provincia de Huari en la región Áncash. El sistema de bombeo opera con un flujo volumétrico de 15300 m<sup>3</sup>/h de agua recuperada desde una presa de relaves hasta un tanque de descarga. Asimismo, el sistema de bombeo está conformado por 4 barcazas y cada una de ellas cuenta con 4 bombas que operan a 1020 m<sup>3</sup>/h. La configuración del sistema de bombeo es la siguiente: dos barcazas descargan, independientemente, a un manifold correspondiente y se empalman en una tee tipo pantalón, a partir de la cual está instalada una tubería hasta la descarga en el tanque de recepción. Se aplica la misma configuración para

las otras dos barcazas, de tal forma que dos tuberías en paralelo descargan el caudal de operación en el tanque de recepción. El análisis de la investigación se desarrollará solamente para un par de barcazas, por lo tanto, la capacidad de bombeo analizada es de 8160 m<sup>3</sup>/h. El esquema de la unidad de análisis se visualiza en la figura 14.

**Figura 14**

*Esquema de la unidad de análisis*



**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3 Matriz de consistencia

A continuación, en la tabla 3 se muestra la matriz de consistencia del presente trabajo.

**Tabla 3**

*Matriz de consistencia lógica*

Título: Mejora de la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera basado en el diseño de un algoritmo evolutivo

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TECNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOPIACIÓN DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿En qué medida el golpe de ariete afecta negativamente la integridad de un sistema de bombeo de agua recuperada en una unidad minera?</p>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Mejorar la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera basado en el diseño de un algoritmo evolutivo.</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>El diseño de un algoritmo evolutivo aplicado a la selección de válvulas de seguridad mejorará significativamente la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera.</p>	<p>Protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada de proceso de unidad minera.</p>	<p>Algoritmo evolutivo aplicado a la selección de válvulas de seguridad.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ratio de convergencia de algoritmo (número de generaciones del algoritmo evolutivo)</li> <li>- Media de valores de soluciones encontradas: coeficiente de caudal (adimensional), tiempos de apertura y cierre (s), tamaños de orificios (mm).</li> <li>- Desviación estándar de valores de soluciones encontradas: coeficiente de caudal (adimensional), tiempos de apertura y cierre (s), tamaños de orificios (mm).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recopilación de información del estudio de régimen permanente del sistema hidráulico.</li> <li>- Recopilación de selección inicial de válvulas de seguridad o protección previo al análisis de golpe de ariete.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia

## **Capítulo V. Desarrollo del trabajo de investigación**

### **5.1 Metodología del diseño**

El desarrollo de la investigación se ha dividido en tres etapas: recopilación de datos, procesamiento de la información y análisis de la información, tal como se muestra en la figura 15.

En la primera etapa, se recopilaron los datos del estudio hidráulico en régimen permanente y los datos de la selección inicial de las válvulas de seguridad, de acuerdo con los formatos desarrollados.

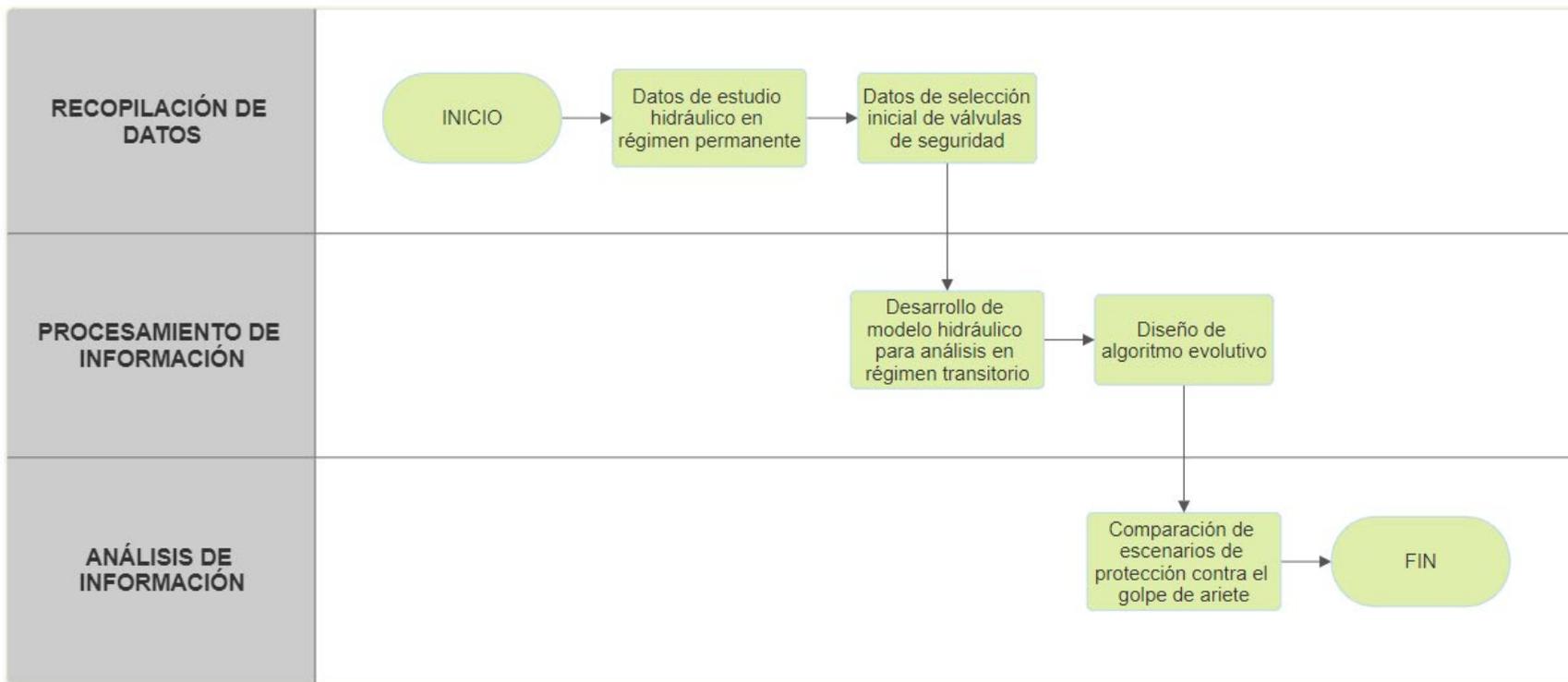
En la segunda etapa, se realizó el desarrollo del modelo hidráulico para el posterior análisis en régimen transitorio (análisis de golpe de ariete), adicionalmente se diseñó el algoritmo evolutivo para la obtención de soluciones posibles al problema de optimización de selección de válvulas de seguridad.

En la tercera etapa, se realizó la comparación de dos escenarios: primero, el sistema de bombeo equipado con la selección inicial de válvulas de seguridad y segundo, el sistema de bombeo equipado con la selección óptima de válvulas de seguridad realizada por el algoritmo evolutivo.

**Figura 15**

*Flujograma del desarrollo del trabajo de investigación*

**FLUJOGRAMA DEL DISEÑO DE UN ALGORITMO EVOLUTIVO PARA LA MEJORA DE LA PROTECCIÓN CONTRA EL GOLPE DE ARIETE DE UN SISTEMA DE BOMBEO DE AGUA RECUPERADA DE UNIDAD MINERA**



**Fuente:** Elaboración propia

## **5.2 Datos de estudio hidráulico en régimen permanente**

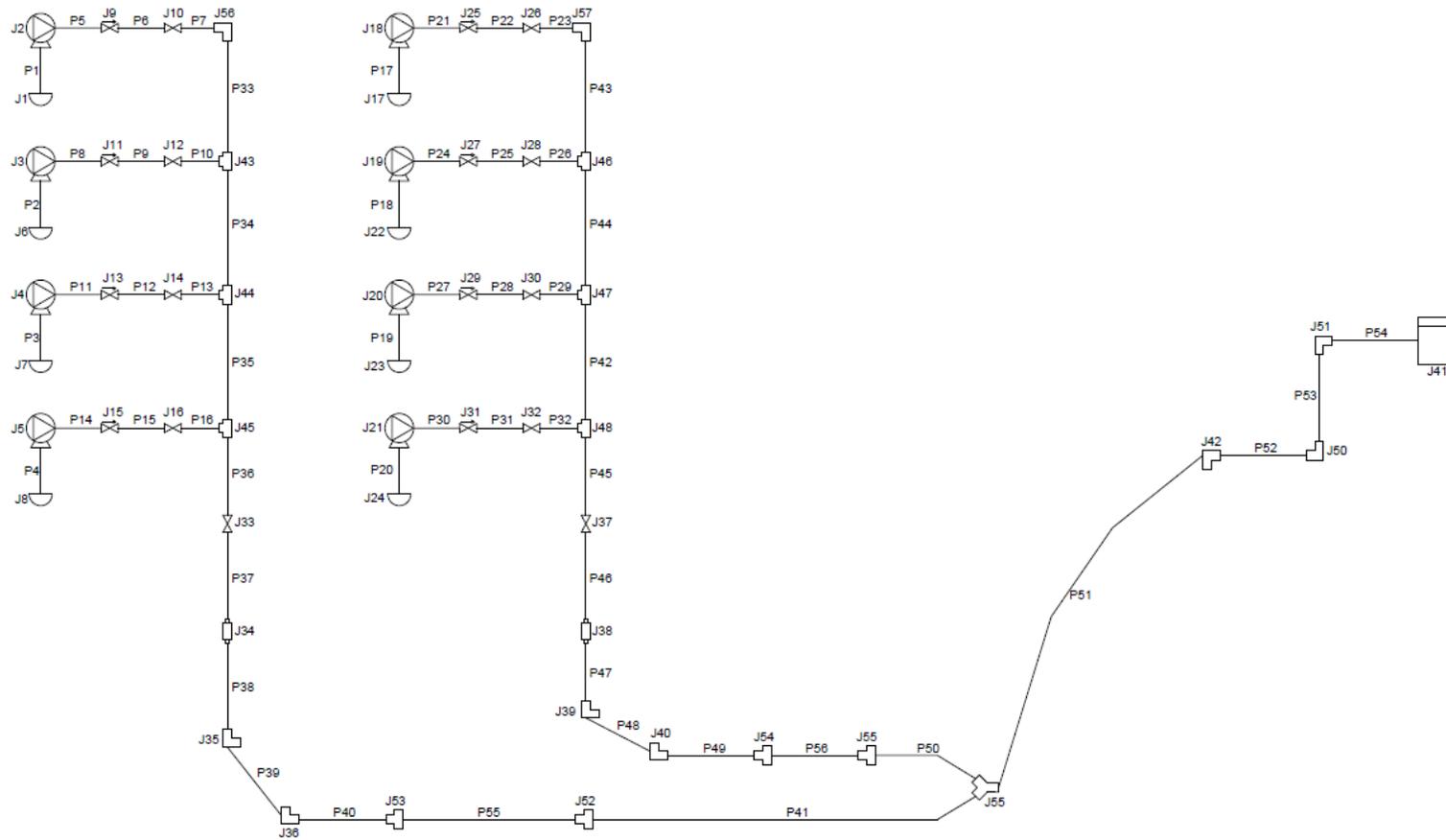
El análisis en régimen permanente del sistema hidráulico, considerado en la unidad de análisis, fue realizado por una empresa consultora de ingeniería y se utilizó como base para desarrollar el modelo hidráulico y posterior análisis en régimen transitorio (análisis de golpe de ariete).

### **5.2.1 Esquema del sistema de bombeo**

De acuerdo con los datos, el esquema del sistema de bombeo de agua recuperada considerado en la unidad de análisis se muestra en la figura 16. En la figura se consideran nodos los elementos con nomenclatura J y tuberías los elementos con nomenclatura P.

**Figura 16**

*Esquema del sistema de bombeo de agua recuperada*



Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2 Datos de nodos del sistema hidráulico

Del estudio en régimen permanente se recopilaban los datos de los nodos que componen el sistema de bombeo y se ordenaron en el anexo 1.

Los datos de las columnas de la tabla son los siguientes:

- **ID:** es el identificador de cada nodo del sistema bombeo.
- **Nodo:** describe el nodo e indica el tipo de elemento que representa dentro del sistema de bombeo.
- **Elevación:** es la ubicación en altura de los nodos del sistema de bombeo, en unidades de metros sobre el nivel del mar (msnm).

### 5.2.3 Datos de tuberías del sistema hidráulico

Se recopilaban los datos de las tuberías que componen el sistema de bombeo y se ordenaron en el anexo 1. Los datos de las columnas de la tabla son los siguientes:

- **ID:** es el identificador de cada tubería del sistema bombeo.
- **Cédula:** es un valor adimensional que representa el grosor de pared correspondiente a cada tubería.
- **Material de tubería:** es el tipo de material de fabricación de la tubería.
- **Nodo 1:** es el nodo donde inicia una tubería (la identificación de los nodos se visualiza en el anexo 1).
- **Nodo 2:** es el nodo donde finaliza una tubería (la identificación de los nodos se visualiza en el anexo 1).
- **Longitud de tubería:** en unidades de metros (m).

- **Diámetro nominal de tubería:** en unidades de milímetros (mm).
- **Diámetro interno de tubería:** en unidades de milímetros (mm). Estos datos fueron recopilados de fabricantes de tuberías que consideran datos estandarizados. En la tabla 4 se muestran los datos recopilados del fabricante de tuberías Tubacero S.A. (tuberías de acero al carbono), a excepción de los datos de la máxima presión de operación admisible (P), que se calcularon empleando la ecuación 5 (fórmula de Barlow):

$$P = \frac{2S(0.72)t}{D}, \quad (5)$$

donde: S es el valor del mínimo esfuerzo elástico (para el caso del material acero al carbono A53 grado B es aproximadamente 241.3 MPa); 0.72 es un valor de diseño para tuberías que transportan líquidos; t es el espesor de pared de la tubería en mm y D es el diámetro externo de la tubería en mm.

**Tabla 4**

*Datos recopilados de tuberías de acero al carbono*

Material de tubería	Norma de diseño	Diámetro nominal (mm)	Diámetro externo (mm)	Cédula	Espesor de pared (mm)	Diámetro interno (mm)	Máxima presión de operación admisible (KPa)
Acero al carbono ASTM A53 Gr. B	ANSI B-36.10	500	508	30	12.7	482.60	8687
Acero al carbono ASTM A53 Gr. B	ANSI B-36.10	750	762	STD	9.52	742.96	4341
Acero al carbono ASTM A53 Gr. B	ANSI B-36.10	900	914.4	20	12.7	889.00	4826
Acero al carbono ASTM A53 Gr. B	ANSI B-36.10	1050	1066.8	STD	9.52	1047.76	3101

**Fuente:** Elaboración propia

En la tabla 5 se muestran los datos recopilados del fabricante Ferguson Industrial para tuberías de polietileno de alta densidad HDPE (por sus siglas en inglés, High Density Polyethylene).

**Tabla 5**

*Datos de fabricante de tuberías de HDPE*

Material de tubería	Designación	Diámetro nominal (mm)	Cédula	Espesor mínimo de pared (mm)	Diámetro interno (mm)	Máxima presión de operación admisible (KPa)
HDPE	PE4710	900	SDR9	101.6	699.00	3446
HDPE	PE4710	900	SDR11	83.13	738.15	2758

Fuente: Elaboración propia

- **Rugosidad de material:** es el valor del coeficiente de Hazen-Williams ( $C_h$ ), rugosidad asignada al material de cada tubería. Es adimensional. Los valores fueron recopilados de literatura técnica y se visualizan en la tabla 6.

**Tabla 6***Coefficiente de Hazen Williams*

Tipo de tubería	C <sub>h</sub>	
	Promedio para tubería nueva y limpia	Valor de diseño
Acero, hierro dúctil o hierro fundido con cemento aplicado en forma centrífuga o revestimiento bituminoso	150	140
Plástico, cobre, latón, vidrio	140	130
Acero, hierro fundido, sin revestir	130	100
Concreto	120	100
Acero corrugado	60	60

Fuente: Mott, R. (2006) Mecánica de fluidos

**5.2.4 Datos de bombas del sistema hidráulico**

Se recopilaron los datos de las bombas consideradas en el diseño del sistema hidráulico y se ordenaron en el anexo 1. Los datos de las columnas de la tabla son los siguientes:

- **Nombre de bomba:** es la designación para identificar cada bomba del sistema hidráulico.
- **Elevación:** es la ubicación en altura de las bombas del sistema hidráulico, en unidades de metros sobre el nivel del mar (msnm).
- **Eficiencia:** es la eficiencia del conjunto motor bomba, se expresa en porcentaje (%).
- **Ratio de velocidad:** valor de reducción de la velocidad de giro de la bomba.

- **Nivel de succión:** es la ubicación en altura del nivel de succión del espejo de agua, en unidades de metros sobre el nivel del mar (msnm).
- **Altura de bombeo nominal:** altura dinámica de operación de bombeo, en unidades de metros de columna de agua (mca).
- **Caudal nominal:** caudal de operación de bombeo, en unidades de metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ).
- **Velocidad nominal:** en unidades de revoluciones por minuto (rpm).

Adicionalmente, en el anexo 2 se visualizan las especificaciones técnicas en detalle de las bombas, brindadas por el fabricante de estas.

### **5.3 Datos de selección inicial de válvulas de seguridad**

Para desarrollar el modelo hidráulico y el posterior análisis de régimen transitorio (análisis de golpe de ariete) se realizó una selección inicial de válvulas de seguridad (anticipadoras de onda y ventosas) contra el mencionado efecto, con la finalidad de ser incluidos en un análisis transitorio posterior.

#### **5.3.1 Consideraciones iniciales**

El sistema de bombeo considerado en la unidad de análisis, como se describió en el capítulo IV, consta de dos barcazas (compuestas de cuatro bombas cada una) unidas simétricamente en una tee.

Para la selección inicial de las válvulas de seguridad se consideraron los productos de la marca Bermad, debido a la disponibilidad de información

técnica de los mismos, mostrada en el anexo 3. Además, se realizaron las siguientes consideraciones:

### **Válvulas anticipadoras de onda**

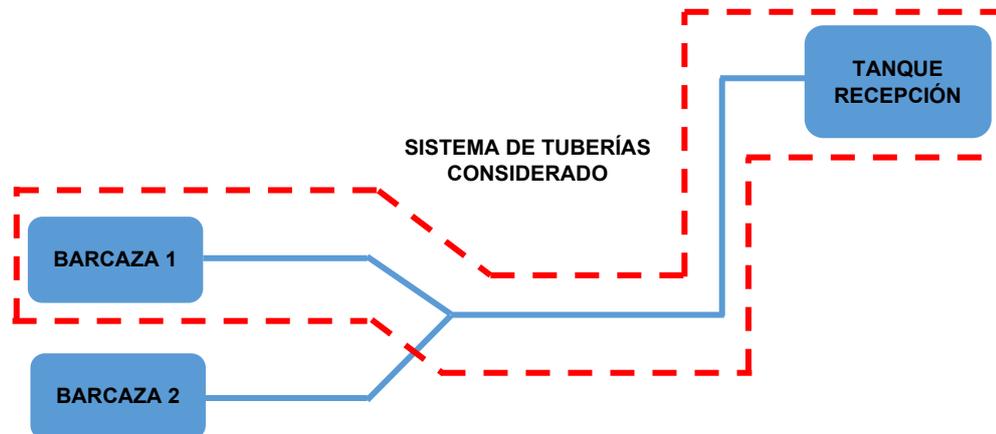
Los datos de operación considerados en la selección corresponden sólo a una de las barcazas, debido a que ambas operan con los mismos valores. Las válvulas anticipadoras de onda seleccionadas en la primera barcaza se replican en la segunda.

### **Válvulas ventosas**

El sistema de tuberías se considera sólo desde una de las barcazas hasta el tanque de recepción debido a la limitación del software empleado para evaluar sistemas de tuberías conectados en ramas a un punto común. Por ello, el sistema considerado para la selección inicial de las válvulas se visualiza en la figura 17 (en líneas rojas discontinuas). Además, al no poder incluir todo el sistema de bombeo con las dos barcazas, no se considera el ingreso del caudal impulsado por la segunda barcaza (situación que no afecta la selección inicial de las válvulas ventosas).

**Figura 17**

*Sistema de tuberías considerado para la selección inicial de válvulas ventosas*



**Fuente:** Elaboración propia

De manera similar al caso de las anticipadoras de onda, la selección de válvulas ventosas en la rama de tuberías de la barcaza 1 se replica para la rama de tuberías de la barcaza 2 hasta la unión de ambas líneas en la tee.

### **5.3.2 Datos de válvulas anticipadoras de onda**

Para obtener los datos de la selección inicial de las válvulas anticipadoras de onda se empleó el software Bermad Sizing versión 2021. Los datos de ingreso al software son los siguientes:

- **Diámetro interno de tubería principal:** referido al manifold de descarga de las bombas de una barcaza, se expresa en milímetros (mm).
- **Presión de diseño de tubería principal:** referido al manifold de descarga de las bombas de una barcaza, se expresa en metros de columna de agua (mca).

- **Flujo nominal:** flujo en el manifold de descarga de una barcaza, se expresa en metros cúbicos por hora ( $m^3/h$ ).
- **Presión de alivio:** valor de presión que es establecido en la válvula anticipadora de onda para liberar presión cuando se supera dicho límite. Es el valor de seteo del piloto de alta presión. Se expresa en metros de columna de agua (mca) y su valor es 10 mca mayor a la presión dinámica de bombeo nominal (valor recomendado por el fabricante Bermad).
- **Presión aguas abajo:** valor de presión de salida de la válvula anticipadora de onda, se expresa en metros de columna de agua (mca). Como la salida es a descarga libre, esta presión es 0 mca.

Los datos fueron ingresados al software mencionado para obtener el tamaño de válvula considerado en el estudio de golpe de ariete inicial. Esta selección se muestra en la figura 18.

**Figura 18**

*Selección de tamaño de válvula anticipadora de onda*

The screenshot displays the Bermad Sizing software interface for a surge anticipating valve. It is divided into several sections:

- Valve Data:** Series 700, Type EN, Application Surge Anticipating (35), Control Loop 2 Way, Body Material Ductile Iron, Plug Flat, Pattern Y.
- Pipe Data:** Main Pipe Nominal Diameter (selected), Main Pipe Specific ID 889 mm, Main Pipe Pressure Rating 25 bar.
- Operation Data:** Q - Flow Rate 4080 m³/h, P1 - Relief Pressure 172.6 m, P2 - Downstream Pressure 0 m.
- Results:** V - Main Pipe Flow Velocity 1.8 m/s.
- Main Pipe Notes:** A text input field.
- Valve Size Comparison Table:**

Ø - Valve Size	Single Valve		Multiple Valves		
	Required	Choked Flow	Required	Choked Flow	
12" (DN300)	3736.5	6610	1868.2	4571	m³/h
	14.7	26.0	10.6	25.9	m/s
Flow Stem Opening	6.4	16.7	1.1	13.3	Turns
- Notes:** Consider Flow Stem Assembly.
- Sizing Evaluation (Single):** A gauge showing the valve is **Optimal** with a reading of **-86** % From optimal.

**Fuente:** Software Bermad Sizing versión 2021

Los datos de selección de las válvulas anticipadoras de onda se ordenaron en la tabla 7. La cantidad y el tamaño de las válvulas requeridos son calculados por el software. El modelo empleado es la serie 700 de la marca Bermad. Los datos de valor de coeficiente de caudal, tiempos de apertura y cierre de válvula se recopilaron del anexo 3 (datos brindados por el fabricante de válvulas Bermad). Los tiempos de apertura y cierre considerados inicialmente para la válvula anticipadora de onda son 2 y 40 segundos, respectivamente.

**Tabla 7***Datos de selección inicial de válvulas anticipadoras de onda*

<b>Ubicación de válvula</b>	Manifold de barcaza
<b>Diámetro interno de tubería principal (mm)</b>	889
<b>Presión de diseño de tubería principal (bar)</b>	25
<b>Flujo nominal (m<sup>3</sup>/h)</b>	4080
<b>Presión de alivio (mca)</b>	172.6
<b>Presión aguas abajo (mca)</b>	0
<b>Cantidad de válvulas</b>	1
<b>Tamaño de válvula (mm)</b>	300
<b>Kv</b>	1819
<b>Tiempo de apertura (s)</b>	2
<b>Tiempo de cierre (s)</b>	40

**Fuente:** Elaboración propia

### 5.3.3 Datos de válvulas ventosas

Para seleccionar las válvulas de admisión o expulsión de aire (ventosas) se empleó el software Bermad Air versión 2015. Para realizar la selección, adicionalmente a los datos de operación, se requirió la recopilación de los datos del perfil longitudinal de tubería.

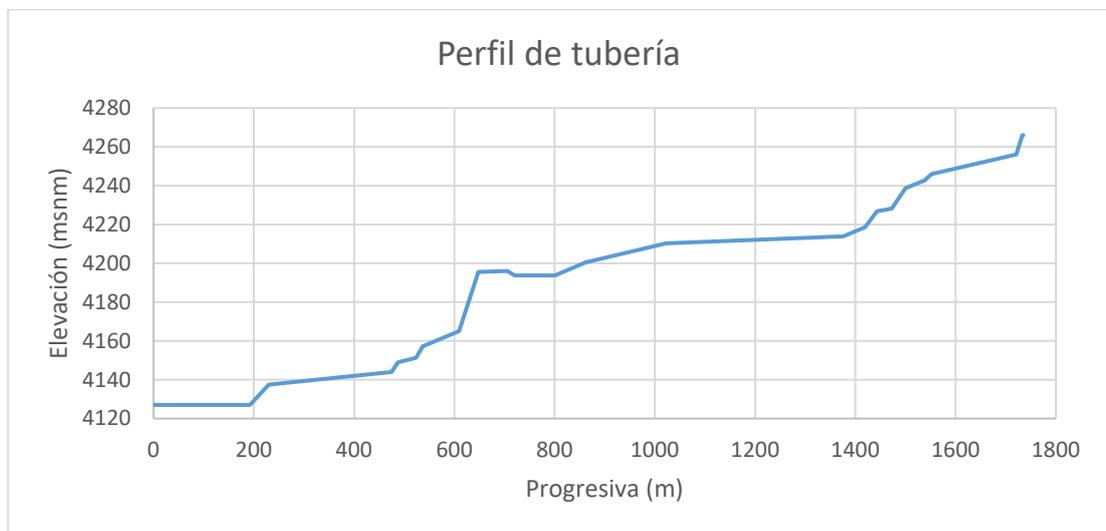
## Perfil longitudinal de tubería

El perfil longitudinal del sistema de tuberías fue recopilado del informe realizado por la empresa consultora de ingeniería. Los datos se muestran en el anexo 4.

Con dichos datos se procedió a elaborar su representación gráfica (considerando las condiciones descritas previamente en la sección 5.3.1). El perfil longitudinal del sistema de tuberías está representado en un diagrama de progresiva de tubería en el eje horizontal (m) y elevación en el eje vertical (msnm). Se visualiza en la figura 19.

**Figura 19**

*Perfil longitudinal de tubería*



**Fuente:** Elaboración propia

## Selección inicial de válvulas ventosas

Los datos del perfil de tubería y condiciones de operación de las bombas fueron ingresados al software Bermad Air versión 2015 para realizar la selección inicial de las válvulas ventosas.

Respecto a los datos de operación de bombeo (considerando las condiciones descritas previamente en la sección 5.3.1) se ingresaron los datos de operación de 4 bombas, los datos de operación de cada bomba son los siguientes: caudal de 1020 m<sup>3</sup>/h y altura dinámica de bombeo de 162.6 mca. En la figura 20 se visualiza el ingreso de los datos de operación de las bombas al software.

**Figura 20**

*Ingreso de datos de operación de bombas*

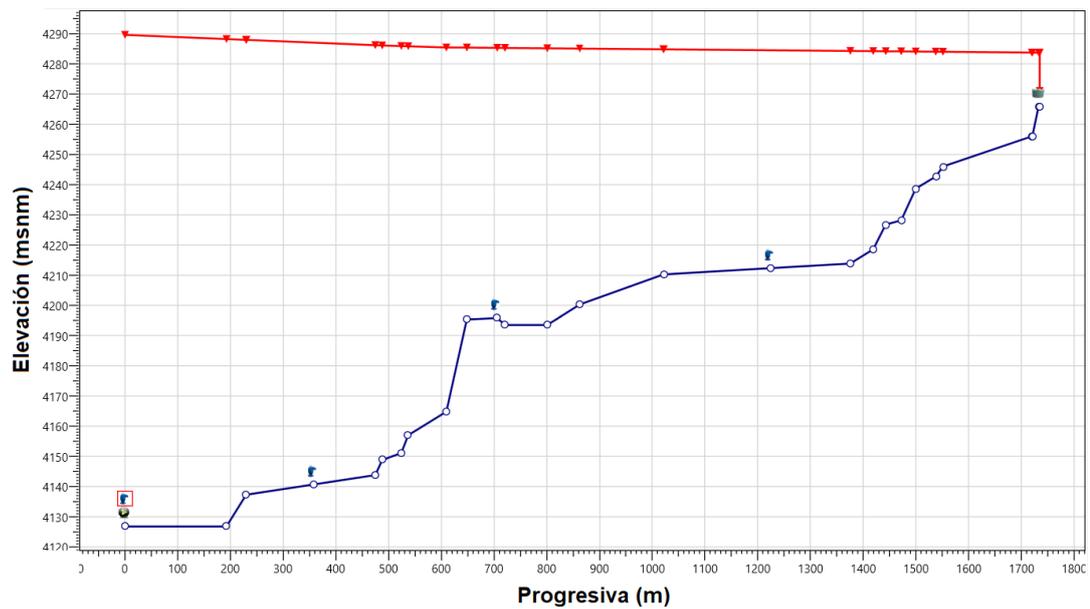
Number of Pump Units	4	
Total Flow Rate	4080	[m3/hr]
Minimum Flow Rate	0	[m3/hr]
Pump Pressure	162.6	[w.c.m]
Check valve position in relation to pump?	Same or Below	▼
Metal Only	True	▼

**Fuente:** Software Bermad Air versión 2015

Después de ejecutar la simulación del análisis de venteo de aire en el sistema de tuberías se obtuvo el diagrama con la selección de las válvulas correspondientes. Ello se visualiza en la figura 21.

**Figura 21**

*Diagrama de selección inicial de válvulas ventosas realizada por software Bermad Air*



**Fuente:** Software Bermad Air versión 2015

Adicionalmente, el software empleado muestra un resumen del tamaño de las válvulas ventosas consideradas para el análisis de golpe de ariete inicial. El modelo de válvula empleado para el análisis es Bermad C70 (datos en el anexo 3). La selección de válvulas ventosas se muestra en la tabla 8.

**Tabla 8**

*Resumen de selección inicial de válvulas ventosas*

Ítem	Ubicación progresiva (m)	Ubicación elevación (m)	Tamaño válvula (mm)	Diámetro orificio ingreso/salida (mm)
1	0	4127	80	80
2	358.7	4140.9	200	200
3	705.6	4196	150	150
4	1223.9	4212.4	150	150

**Fuente:** Elaboración propia

Las válvulas ventosas seleccionadas 1 y 2 que están ubicadas en la línea de impulsión de la barcaza 1 se replican para la línea de la barcaza 2. Las válvulas 3 y 4 no se replican, debido que se encuentran ubicadas posterior a la unión de las líneas de ambas barcazas.

#### **5.4 Desarrollo de modelo hidráulico para análisis en régimen transitorio**

Una vez concluida la recopilación de datos se requirió la elaboración de un modelo hidráulico para el posterior análisis de régimen transitorio (análisis de golpe de ariete), para ello se empleó el software KyPipe Surge versión 2012. Para la elaboración del mencionado modelo hidráulico, se utilizaron los datos de nodos, tuberías y bombas, recopilados en la etapa anterior.

##### **5.4.1 Datos de nodos**

La representación gráfica de los nodos (empleada en el software) que representan a las bombas, las válvulas anticipadoras de onda, las válvulas ventosas y el tanque de recepción se visualizan en la figura 22.

**Figura 22**

*Representación gráfica de los tipos de nodos*

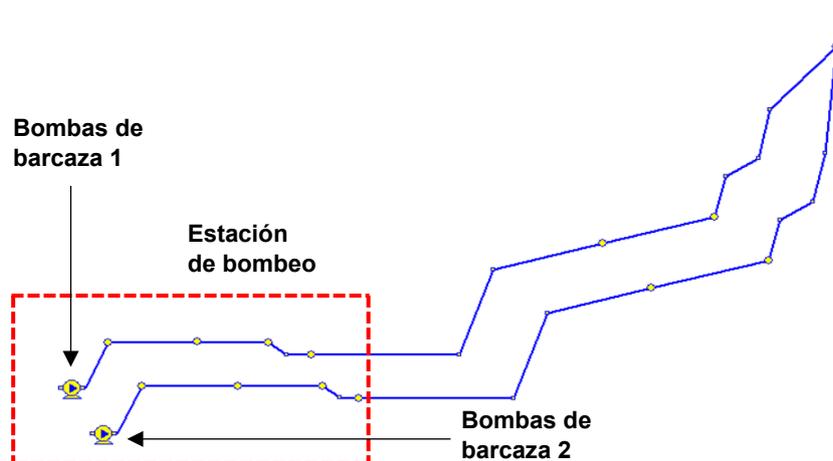
Bomba	
Válvula anticipadora de onda	
Válvula ventosa	
Tanque de recepción	

**Fuente:** Elaboración propia

Los nodos correspondientes a la estación de bombeo se simplificaron para ejecutar un adecuado análisis de golpe de ariete. Las cuatro bombas de cada barcaza se reemplazaron por una que comprende el conjunto de operación. Esta simplificación se visualiza en la figura 23.

**Figura 23**

*Simplificación gráfica de las bombas de cada barcaza*



**Fuente:** Elaboración propia

Para nodos que no son bombas, ni válvulas de seguridad, ni el tanque de recepción, el parámetro a ingresar al software (recopilado en la etapa anterior) es la elevación.

Para el nodo que representa el tanque de recepción, además de la elevación, el parámetro adicional a ingresar es el nivel de agua (recopilado en la etapa anterior).

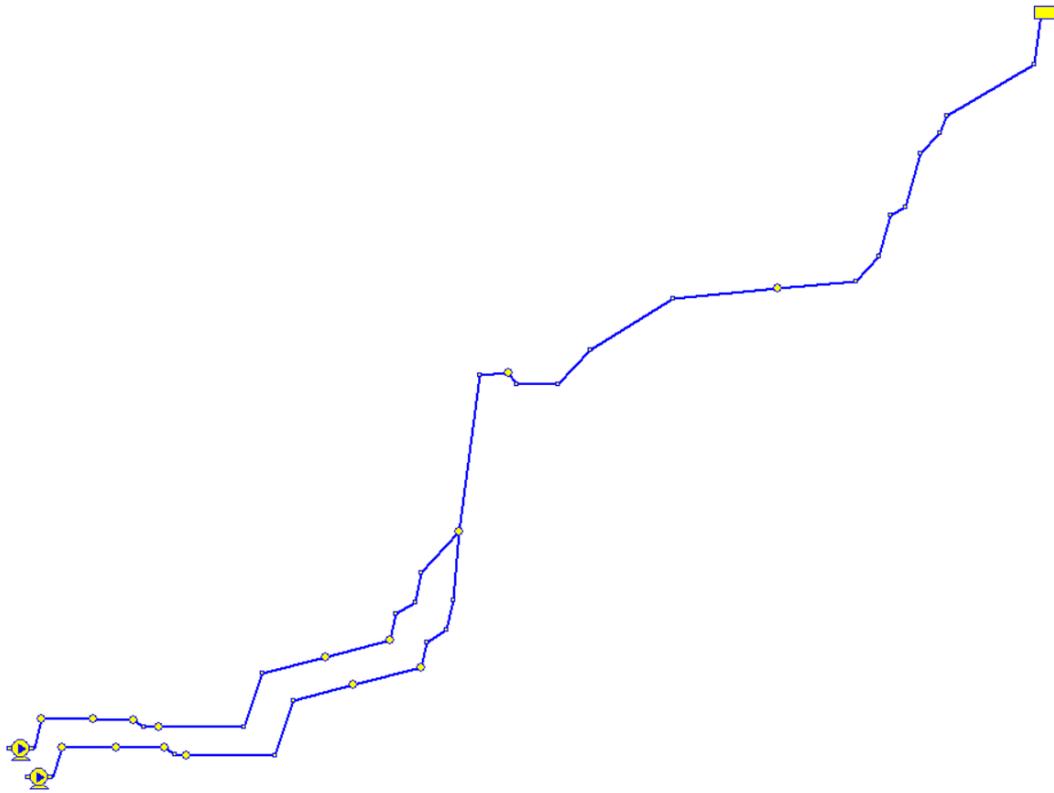
Para los nodos que representan bombas y válvulas de seguridad los parámetros a ser ingresados en el software se describen en las secciones posteriores.

#### **5.4.2 Datos de tuberías**

Se consideraron las tuberías correspondientes al perfil longitudinal de la línea tal como se muestran en la figura 24. Para el modelo hidráulico se adicionaron las tuberías correspondientes desde la barcaza 2 hasta la posterior unión con la línea de la barcaza 1 en la tee.

**Figura 24**

*Representación gráfica del conjunto de tuberías del sistema de bombeo*



**Fuente:** Software KYPipe versión 2012

Los parámetros ingresados al software y que fueron obtenidos en la etapa de recopilación de datos son los siguientes: longitud de tubería, diámetro interno de tubería, material de tubería, coeficiente de rugosidad, máxima presión de operación permitida, nodos inicial y final de tubería.

El parámetro adicional requerido por el software y que no se obtuvo en la etapa de recopilación de datos es el siguiente:

- **Velocidad de onda:** calculada para cada tipo y tamaño de tubería, se empleó la herramienta “Wave speed in Circular Pipes” del software

KyPipe Surge versión 2012, esta herramienta se muestra en la figura 25.

**Figura 25**

*Herramienta de cálculo de velocidad de onda*

**Fuente:** Software KYPipe versión 2012

Como resultado de los cálculos realizados por el software se muestra la tabla 9 que resume los valores de velocidad de onda.

**Tabla 9**

*Resumen de velocidades de onda*

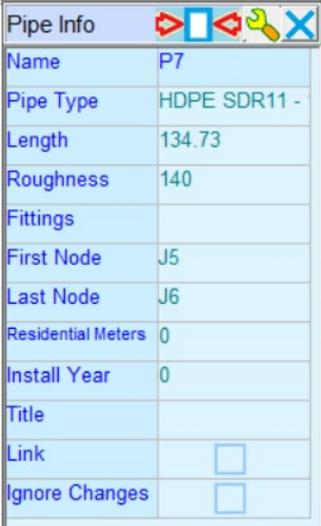
Material de tubería	Diámetro nominal de tubería (mm)	Máxima presión de operación permitida (KPa)	Velocidad de onda (m/s)
Acero al carbono	500	8687	1193.1
Acero al carbono	900	4826	1120.5
Acero al carbono	1050	3101	1004.3
HDPE SDR 9	900	3446	415.0
HDPE SDR11	900	2758	381.8

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 26 se visualiza un ejemplo de la tabla de parámetros requeridos para cierta tubería del sistema de bombeo.

**Figura 26**

*Parámetros de tuberías del sistema de bombeo*



Pipe Info	
Name	P7
Pipe Type	HDPE SDR11 -
Length	134.73
Roughness	140
Fittings	
First Node	J5
Last Node	J6
Residential Meters	0
Install Year	0
Title	
Link	<input type="checkbox"/>
Ignore Changes	<input type="checkbox"/>

**Fuente:** Software KYPipe versión 2012

### **5.4.3 Datos de bombas**

Los parámetros obtenidos en la etapa de recopilación de datos y empleados en esta etapa son los siguientes: elevación, eficiencia, ratio de velocidad, nivel de succión, altura dinámica de bombeo nominal, caudal de bombeo nominal.

Los parámetros adicionales requeridos por el software que no se obtuvieron en la etapa de recopilación de datos y que están relacionados a la selección de una válvula check para cada bomba, son los siguientes:

- **Coeficiente de caudal de válvula check:** se emplearon los datos de una válvula marca Bermad y como la ubicación de esta válvula es aguas abajo de cada bomba en una tubería de 500 mm, entonces se seleccionó una válvula de tamaño DN 500, cuyo coeficiente de caudal (de acuerdo con el anexo 3) es 3300.
- **Tiempo de cierre de válvula check:** es el tiempo que demora una válvula check en cerrar ante un evento de retorno de flujo como el caso del golpe de ariete. El tiempo de cierre para el modelo de válvula considerada está en el rango de 0.5-1 segundos (de acuerdo con el anexo 3). Se consideró el tiempo de cierre de 1 segundo.

Finalmente, el parámetro de la bomba adicional requerido es el siguiente:

- **Inercia del conjunto motor-bomba:** para calcularlo se empleó la herramienta “Inertia – Specific Speed” del software KyPipe Surge versión 2012, dicha herramienta se visualiza en la figura 27. El valor calculado para los datos considerados de las bombas es 242.41 Nm<sup>2</sup>.

**Figura 27**

Herramienta de cálculo de inercia de conjunto motor-bomba

**FORMULAE**

Pump Power

$$P_{kW} = \frac{\gamma Q_{cms} H_m}{1000 \eta}$$

Inertia for fairly old pumps

$$I_{Nm^2} = 0.36964 \times \left[ \frac{P_{kW}}{(N/1000)^3} \right]^{0.9556}$$

Inertia for small, light wt pumps

$$I_{Nm^2} = 0.33423 \times \left[ \frac{P_{kW}}{(N/1000)^3} \right]^{0.844}$$

Motor Inertia

$$I_{Nm^2} = 0.0422 \times \left[ \frac{P_{kW}}{(N/1000)} \right]^{1.48}$$

Specific Speed

$$Spc.Speed = \frac{N \sqrt{Q_{cms}}}{H_m^{3/4}}$$

Pump File	Spe.Speed-Eng	SpeSpeed-SI
1	1270	25
2	7600	147
3	13500	261
4	3725	72
5	4409	85
6	5203	101
7	6792	131
8	8764	169

Fuente: Software KYPipe versión 2012

En la figura 28 se muestra la tabla de parámetros requeridos para las bombas del sistema hidráulico.

**Figura 28**

Parámetros de bombas del sistema hidráulico

Parameter	Value
Elevation	4128
Title	
Parallel	4 Parallel
Check Valve	<input checked="" type="checkbox"/>
Non-Reopening Che	<input type="checkbox"/>
Bypass Line	<input type="checkbox"/>
CV Time	1
CV Resistance	3300
Efficiency %	80
Speed Ratio	1
Grade	4127
File# (1-20)	1
Rated Head	162.6
Rated Flow	1020
Rated Speed	1780
Inertia	242.41

Fuente: Software KYPipe versión 2012

#### 5.4.4 Datos de válvulas de seguridad

##### Válvulas anticipadoras de onda

Los parámetros obtenidos en la etapa de recopilación de datos y empleados en esta etapa son los siguientes: elevación y coeficiente de caudal de salida.

Los parámetros adicionales requeridos por el software y que no se obtuvieron en la etapa de recopilación de datos son los siguientes:

- **Coefficiente de caudal de entrada:** se considera un valor de 0 para simular que no existe ingreso de fluido por la válvula anticipadora de onda, debido a que solo permite la descarga de fluido.
- **Tipo de válvula:** las válvulas anticipadoras de la marca Bermad (marca empleada en la presente investigación) son de tipo globo.
- **Presión de seteo del piloto de alta presión:** el fabricante de válvulas Bermad recomienda que la presión seteada sea 10 mca mayor a la presión de bombeo nominal. El valor considerado es 172.6 mca.
- **Presión de seteo del piloto de baja presión:** el fabricante de válvulas Bermad recomienda que la presión seteada sea el 50% de la diferencia de altura geométrica entre la estación de bombeo y el tanque de recepción. El valor considerado es 69 mca.
- **Tiempos de apertura de los pilotos de alta y baja presión:** corresponde al tiempo de apertura de la válvula anticipadora de onda. El valor, de acuerdo con la selección inicial, es 2 segundos.

- **Tiempos de cierre de los pilotos de alta y baja presión:** corresponde al tiempo de cierre de la válvula anticipadora de onda. El valor, de acuerdo con la selección inicial, es 40 segundos.

Todos los parámetros descritos anteriormente son los mismos para las dos válvulas, cada una ubicada en el respectivo manifold de la barcaza correspondiente.

En la figura 29 se muestra la tabla de parámetros requeridos para las válvulas anticipadoras de onda.

**Figura 29**

*Parámetros para una válvula anticipadora de onda*

Node Info	
Node Type	Hydraulically Actuated
Name	HydSAV-1
Elevation	4128
Title	
On/Off	
Inflow Resistance	0
Outflow Resistance	1819
Sensing Node	
Valve Type	Globe
Low Prs Pilot Hd	69
LPP Open Time	2
LPP Close Time	40
High Prs Pilot Hd	172.6
HPP Open Time	2
HPP Close Time	40

**Fuente:** Software KYPipe versión 2012

### Válvulas ventosas

Los parámetros obtenidos en la etapa de recopilación de datos y empleados en esta etapa son la elevación, diámetros de orificios de entrada y salida de aire.

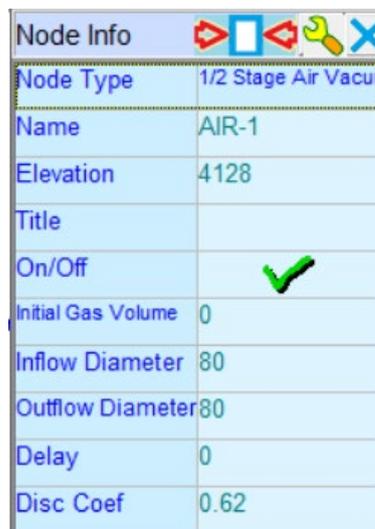
El parámetro adicional requerido por el software y que no se obtuvo en la etapa de recopilación de datos es el siguiente:

- **Coeficiente de descarga de aire:** valor de diseño de válvulas de aire.  
Se considera el valor de 0.62 (de acuerdo con el anexo 3).

En la figura 30 se visualiza la tabla de parámetros requeridos para una válvula ventosa.

**Figura 30**

*Parámetros para una válvula ventosa*



Node Info	
Node Type	1/2 Stage Air Vacuum
Name	AIR-1
Elevation	4128
Title	
On/Off	<input checked="" type="checkbox"/>
Initial Gas Volume	0
Inflow Diameter	80
Outflow Diameter	80
Delay	0
Disc Coef	0.62

Fuente: Software KYPipe versión 2012

#### 5.4.5 Esquema de modelo hidráulico final

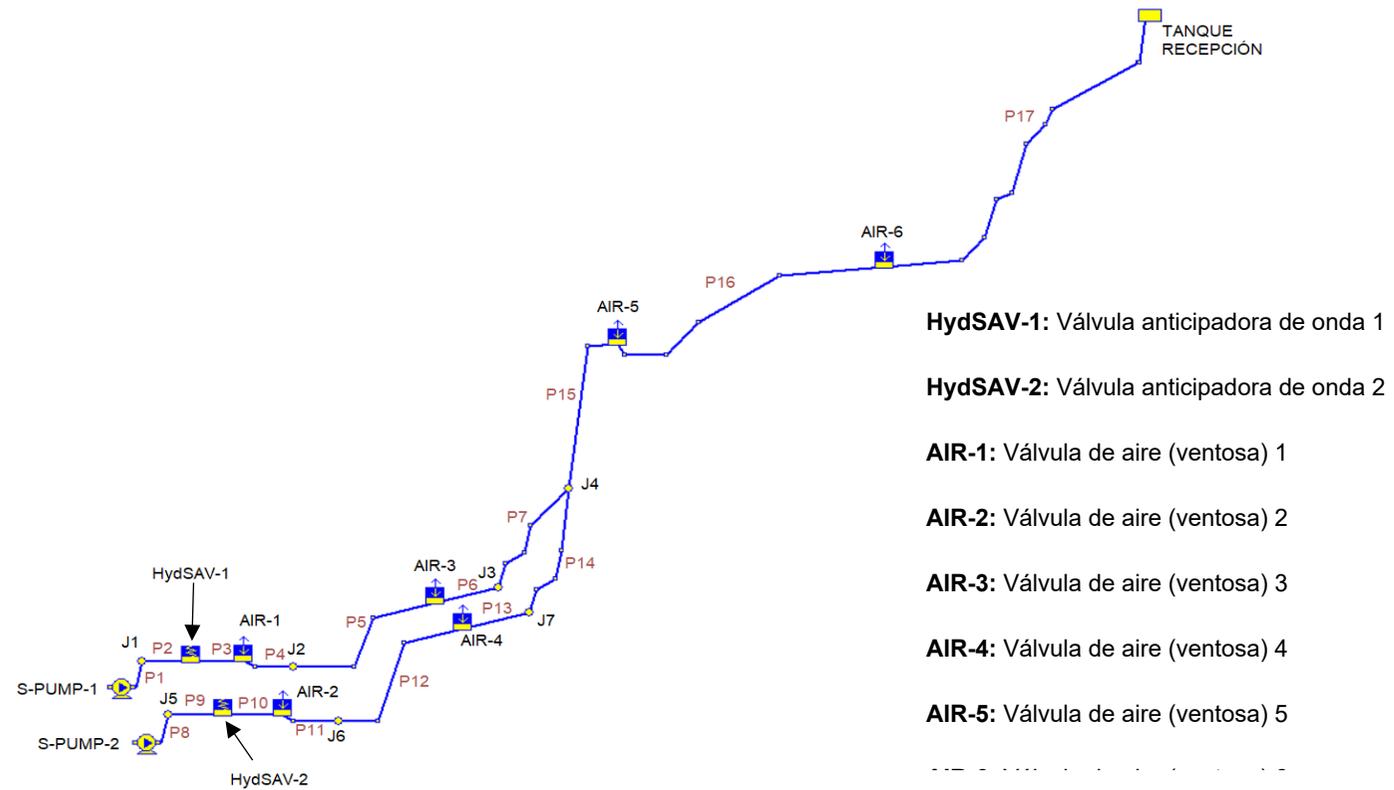
Se realizó un arreglo y simplificación de los nodos y tuberías del estudio hidráulico permanente para realizar un adecuado análisis transitorio. Las cuatro bombas de cada barcaza son simplificadas en una sola respectivamente; las bombas 5, 6, 7 y 8 se agrupan en el nodo S-PUMP-1 y

las bombas 1, 2, 3 y 4 se agrupan en el nodo S-PUMP-2. Las tuberías de descarga de cada bomba se simplifican en una sola de descarga para cada conjunto. Los datos en detalle de los nodos y tuberías del modelo hidráulico final se muestran en las tablas del anexo 5.

Con los datos nuevos de nodos, tuberías y las consideraciones de las secciones 5.4.1 a 5.4.4 se elabora el modelo hidráulico final del sistema de bombeo considerado en la unidad de análisis, este se visualiza en la figura 31.

**Figura 31**

*Modelo hidráulico final del sistema de bombeo*



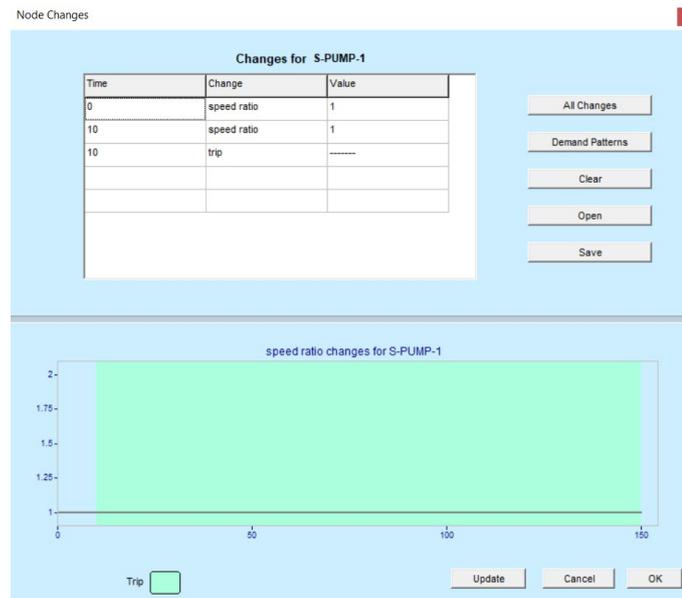
**Fuente:** Software KYPipe versión 2012

### 5.4.6 Evento de golpe de ariete

El evento de golpe de ariete considerado es el generado por un corte de energía intempestivo, los parámetros de configuración de los nodos de las estaciones de bombeo comprenden el comportamiento de las bombas a través del tiempo hasta que ocurre una parada repentina. Se establece el tiempo de simulación en 150 segundos y el tiempo en el que ocurre el corte de energía repentino es a los 10 segundos de iniciada la simulación. Los valores ingresados al software se visualizan en la figura 32.

**Figura 32**

*Cambios en los nodos de las bombas del sistema hidráulico*



**Fuente:** Elaboración propia

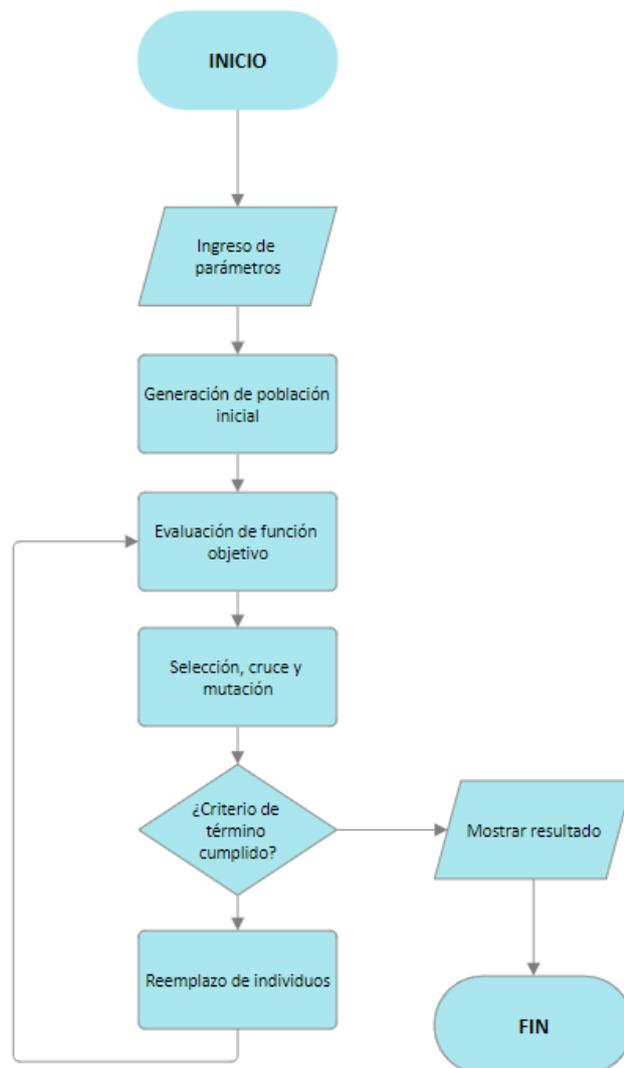
## 5.5 Diseño de algoritmo evolutivo

### 5.5.1 Flujograma

Para desarrollar la codificación del algoritmo evolutivo se empleó el software Matlab versión 2023 y se realizó previamente un flujograma que se visualiza en la figura 33 que comprende los procesos del algoritmo.

**Figura 33**

*Flujograma de algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

### 5.5.2 Ingreso de parámetros

Los parámetros de ingreso al algoritmo fueron los siguientes:

- **Número de individuos:** es la cantidad de soluciones posibles para el problema de optimización de selección de válvulas de seguridad.
- **Número de variables:** es la cantidad de parámetros (genes) de cada individuo del problema de optimización. Se consideran las siguientes siete variables:
  - Valor de coeficiente de caudal anticipadora de onda
  - Tiempo de apertura de válvula anticipadora de onda
  - Tiempo de cierre de válvula anticipadora de onda
  - Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 1 y 2.
  - Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 3 y 4.
  - Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 5.
  - Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 6.
- **Probabilidad de mutación:** es el valor de probabilidad de cambio de valor en el intervalo de búsqueda de las soluciones posibles al problema de optimización.
- **Número de iteraciones máximas:** es el número de iteraciones máximas de ejecución del algoritmo evolutivo.

### 5.5.3 Generación de población inicial

La población inicial se generó aleatoriamente en los intervalos de búsqueda (restricciones) que acotan los valores a ser considerados como

soluciones del problema de optimización. Se generaron valores aleatorios para cada variable de selección de válvulas de seguridad que fueron procesados posteriormente por el algoritmo.

### **Intervalos de búsqueda**

Los intervalos de búsqueda son restricciones que permiten acotar y reducir el tiempo de ejecución del algoritmo para hallar soluciones posibles en un rango establecido.

Los parámetros de las válvulas de seguridad dependen del tamaño de estas (tablas del anexo 3). El rango de tamaños adecuado para las válvulas anticipadoras de onda y las válvulas de aire se considera así: el límite inferior es el tamaño considerado en la selección inicial y el límite superior es el tamaño máximo disponible en el modelo correspondiente de la marca Bermad. Por lo tanto, los parámetros de las válvulas de seguridad tendrán los límites de acuerdo con el tamaño establecido. A continuación, se detallan los intervalos para cada variable de selección de las válvulas de seguridad (todos los valores indicados se muestran en las tablas del anexo 3).

- **Valor de coeficiente de caudal anticipadora de onda:** el límite inferior es 1819 (corresponde a un tamaño de válvula DN 300). El límite superior es 2805 que corresponde al tamaño máximo de la serie 700 de la válvula Bermad (DN 600). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [1819; 2805].

- **Tiempo de apertura de válvula anticipadora de onda:** el límite inferior es 2 segundos (corresponde a un tamaño de válvula DN 300). El límite superior es 5 segundos que corresponde al tiempo máximo de apertura de la serie 700 de la válvula Bermad (DN 600). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [2; 5] s.
- **Tiempo de cierre de válvula anticipadora de onda:** el límite inferior es 40 segundos (corresponde a un tamaño de válvula DN 300). El límite superior es 80 segundos que corresponde al tiempo máximo de cierre de la serie 700 de la válvula Bermad (DN 600). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [40; 80] s.
- **Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 1 y 2:** el límite inferior es 80 milímetros (corresponde a un tamaño de válvula 3"). El límite superior es 250 milímetros que corresponde al tamaño máximo de orificio de ingreso/salida de aire del modelo de válvula Bermad C70 (corresponde a un tamaño de válvula 10"). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [80; 250] mm.
- **Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 3 y 4:** el límite inferior es 200 milímetros (corresponde a un tamaño de válvula 8"). El límite superior es 250 milímetros que corresponde al tamaño máximo de orificio de ingreso/salida de aire del modelo de válvula Bermad C70 (corresponde a un tamaño de válvula 10"). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [200; 250] mm.
- **Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 5:** el límite inferior es 150 milímetros (corresponde a un tamaño de válvula 6"). El límite superior es 250 milímetros que corresponde al tamaño máximo de orificio de ingreso/salida de aire del modelo de válvula Bermad C70 (corresponde a un tamaño de válvula 10"). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [150; 250] mm.

superior es 150 milímetros que corresponde al tamaño máximo de orificio de ingreso/salida de aire del modelo de válvula Bermad C70 (corresponde a un tamaño de válvula 10"). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [150; 250] mm.

- **Diámetro de orificio ingreso/salida válvula de aire 6:** el límite inferior es 150 milímetros (corresponde a un tamaño de válvula 6"). El límite superior es 150 milímetros que corresponde al tamaño máximo de orificio de ingreso/salida de aire del modelo de válvula Bermad C70 (corresponde a un tamaño de válvula 10"). Por lo tanto, el intervalo de búsqueda es [150; 250] mm.

#### 5.5.4 Evaluación de función objetivo

El problema de optimización se basa en minimizar la función objetivo siguiente:

$$\Delta H = H_{\text{máx}} - H_{\text{mín}}$$

, donde los valores de  $H_{\text{máx}}$  y  $H_{\text{mín}}$  son aquellos que representan las presiones máxima y mínima (respectivamente) alcanzadas durante un evento de golpe de ariete para los nodos del sistema de bombeo.

La evaluación de la función objetivo se realizó de la siguiente manera:

1. Los genes de los individuos obtenidos de la población inicial se ingresaron a los parámetros respectivos de la tabla de configuración de las válvulas de seguridad en el software KyPipe Surge.

2. Se ejecutó la simulación del evento de golpe de ariete para cada individuo y se obtuvieron las presiones máximas ( $H_{m\acute{a}x}$ ) y mínimas ( $H_{m\acute{i}n}$ ) en los nodos del sistema de bombeo.
3. Se restaron los valores de  $H_{m\acute{a}x}$  y  $H_{m\acute{i}n}$  para obtener el valor de la función objetivo asociado a cada individuo.

#### **5.5.5 Selección, cruce y mutación**

El proceso de selección de individuos se realizó por torneo, emparejando aleatoriamente el total de individuos de la población y comparando los valores de la función objetivo asociados a cada par. De estos se seleccionaron los individuos con el menor valor de la función objetivo, quedando el 50% elegido para ser padres y proceder con los operadores genéticos de cruce y mutación.

El proceso de cruce se realizó con toda la población de padres para obtener una población nueva de dos hijos combinando dos métodos: interpolación de valor de cierto gen de los padres y cruce de genes en un punto aleatorio. Se desarrollaron los siguientes pasos:

- Se eligieron dos padres aleatoriamente, obtenidos del proceso de selección.
- Se eligió aleatoriamente uno de los genes de los individuos (padres) para ser interpolados entre los límites establecidos por los valores respectivos de sus padres. Esto se muestra en las ecuaciones 6 y 7:

$$V_{h1} = \beta(V_{p1}) + (1 - \beta)(V_{p2}) \quad (6)$$

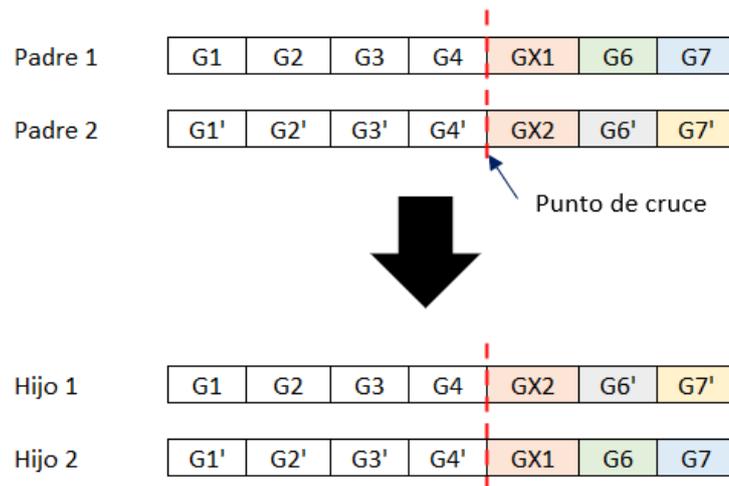
$$V_{h2} = (1 - \beta)(V_{p1}) + \beta(V_{p2}) \quad (7)$$

donde  $V_{h1}$  y  $V_{h2}$  son los valores de cierto gen del hijo 1 y 2, respectivamente;  $V_{p1}$  y  $V_{p2}$  son los valores del gen del padre 1 y 2, respectivamente y  $\beta$  es un número aleatorio entre  $[0;1]$ .

- Finalmente se realiza el cruce de los genes de los padres (generando 2 hijos) a la derecha del valor establecido para el punto de cruce (valor aleatorio establecido en el paso anterior). Este paso se visualiza en la figura 34.

**Figura 34**

Proceso de cruce de algoritmo evolutivo



GX1 y GX2: genes interpolados en el paso anterior

**Fuente:** Elaboración propia

El proceso de mutación se realizó con la población de hijos y representa un cambio aleatorio de algún valor en los genes de algunos individuos, siguiendo la ecuación 8:

$$Valor_{mutado} = \gamma(I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}) + I_{m\acute{i}n} \quad (8)$$

donde  $I_{m\acute{i}n}$  e  $I_{m\acute{a}x}$  representan los valores mínimo y máximo de los intervalos de búsqueda para cada gen de los individuos, respectivamente y  $\gamma$  es un número aleatorio entre [0;1].

### **5.5.6 Criterio de término**

El criterio de término elegido para la finalización de la ejecución del bucle principal del algoritmo evolutivo fue el número máximo de iteraciones. Este número de iteraciones representa la cantidad de generaciones en las que se desarrollaron las operaciones de selección, cruce y mutación de los individuos de acuerdo con los valores de la función objetivo asociados a cada uno.

### **5.5.7 Reemplazo de individuos**

Para obtener la población a ser procesada en una nueva generación se unieron las matrices de las poblaciones de padres y de los hijos posterior a los procesos de cruce y mutación, obteniendo como resultado una matriz con valores de función objetivo menores que la generación previa.

## **Capítulo VI. Análisis y discusión de resultados**

### **6.1 Introducción**

El análisis de la selección de las válvulas de seguridad (anticipadoras de onda y ventosas) se realiza mediante la evaluación y comparación de la protección contra el golpe de ariete que dichos equipos aportan al sistema de bombeo. Dicha protección se verifica mediante el análisis en régimen transitorio (análisis de golpe de ariete) que es ejecutado en el modelo hidráulico final. Para ello se desarrollan dos escenarios para la obtención de resultados. El escenario 1 presenta el sistema de bombeo equipado con una selección inicial de válvulas de seguridad. Por otro lado, el escenario 2 presenta el sistema de bombeo equipado con la selección de válvulas de seguridad y sus parámetros optimizados por el algoritmo evolutivo desarrollado en el capítulo V. Previamente se exponen los parámetros considerados para la inicialización del algoritmo evolutivo.

### **6.2 Parámetros para inicialización del algoritmo evolutivo**

Con la finalidad de establecer las mismas condiciones previas a la ejecución del algoritmo evolutivo para los dos escenarios planteados y obtener soluciones al problema de optimización, se requirió establecer parámetros para su inicialización. Estos se enlistan a continuación:

- Número de individuos: 100
- Número de variables: 7 (número de variables descrito en la sección 5.5.2)

- Probabilidad de mutación: 10%
- Número de iteraciones máximas: 120

La probabilidad de mutación se estableció en ese valor para mantener un bajo ratio de cambio en los genes de los individuos pero que a la vez permita la búsqueda de soluciones en el intervalo correspondiente a cada variable.

### **6.3 Evaluación de escenario 1**

#### **6.3.1 Selección inicial de válvulas de seguridad**

Los parámetros de la selección inicial de las válvulas de seguridad realizadas en el capítulo V se resumen en la tabla 10.

Estos valores son ingresados en la tabla de parámetros de las válvulas de seguridad del modelo hidráulico desarrollado en el capítulo anterior con la finalidad de ejecutar la simulación de un evento de golpe de ariete.

**Tabla 10**

*Parámetros de selección inicial de válvulas de seguridad*

Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6
Coeficiente de caudal (Kv)	Tiempo de apertura de válvula (s)	Tiempo de cierre de válvula (s)	Diámetro de ingreso/salida de aire (mm)			
1819	2	40	80	200	150	150

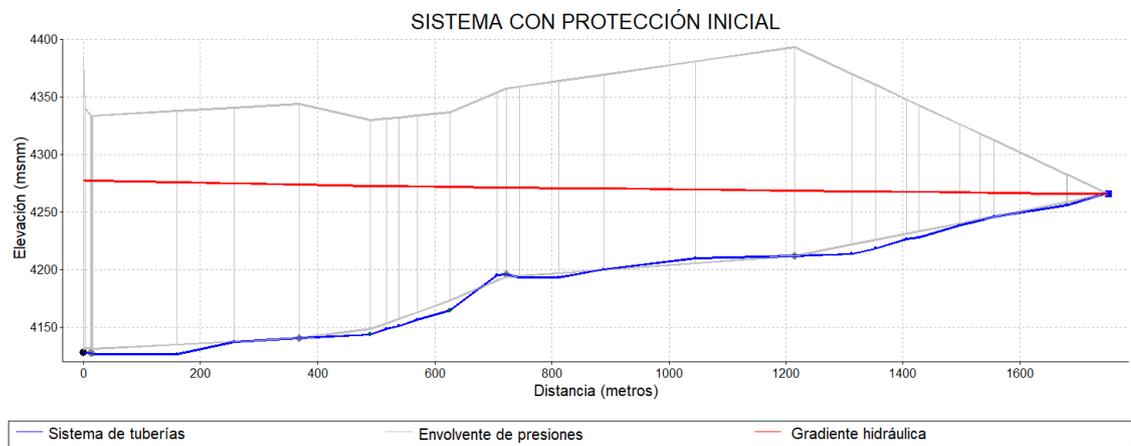
Fuente: Elaboración propia

### 6.3.2 Resultados

Al ejecutar la simulación del evento de golpe de ariete se obtiene la gráfica de la envolvente de presiones, que muestra el comportamiento de la presión a lo largo de todo el sistema de bombeo durante el tiempo de simulación. Esto se visualiza en la figura 35.

**Figura 35**

*Gráfica de la envolvente de presiones del sistema de bombeo para el escenario 1*

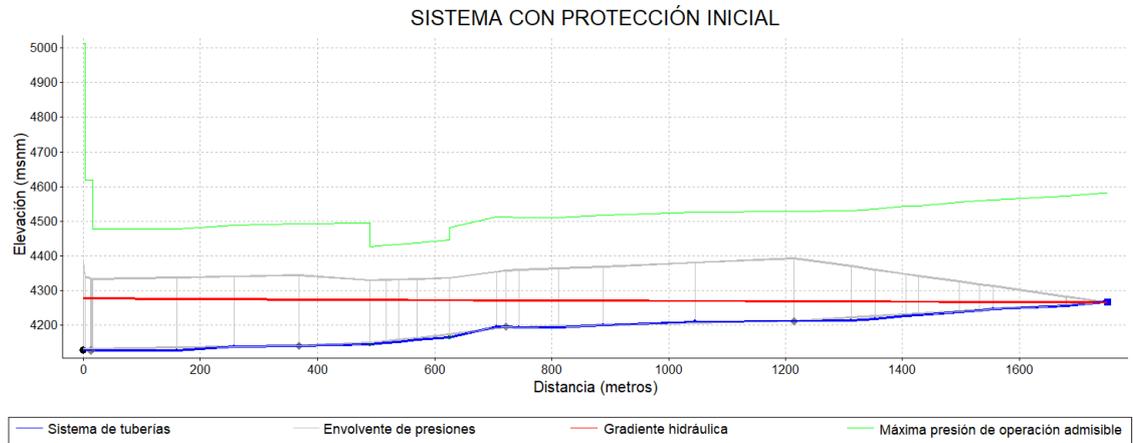


**Fuente:** Elaboración propia

Se verificó que los valores de la envolvente de presión desarrollada en la simulación no sobrepasaran los valores de diseño de las tuberías. Esto se puede comprobar en la figura 36.

**Figura 36**

Gráfica de la envolvente de presiones y valor de diseño del sistema de bombeo para el escenario 1



Fuente: Elaboración propia

El nodo de análisis del modelo hidráulico es el conjunto de bombas de las barcasas, debido a que representa los componentes más importantes del sistema. Para este análisis se considera el nodo S-PUMP-1 (conjunto de bombas de la barcaza 1). Los valores registrados por el software para las presiones mínima y máxima del nodo de análisis durante el evento de golpe de ariete se resumen en la tabla 11.

**Tabla 11**

Valores de presiones para el nodo de análisis del escenario 1

Escenario	Nodo analizado	Presión máxima (mca)	Presión mínima (mca)	Diferencia de presión máxima y mínima (mca)
Escenario 1	S-PUMP-1	256.2	3.1	253.1

Fuente: Elaboración propia

## **6.4 Evaluación de escenario 2**

### **6.4.1 Selección óptima de válvulas de seguridad mediante algoritmo evolutivo**

Se ejecutó el algoritmo evolutivo cinco veces para obtener los valores de las soluciones posibles (individuos) que optimicen la función objetivo planteada, el resumen se detalla en la tabla 12.

**Tabla 12***Parámetros de selección realizada por algoritmo evolutivo*

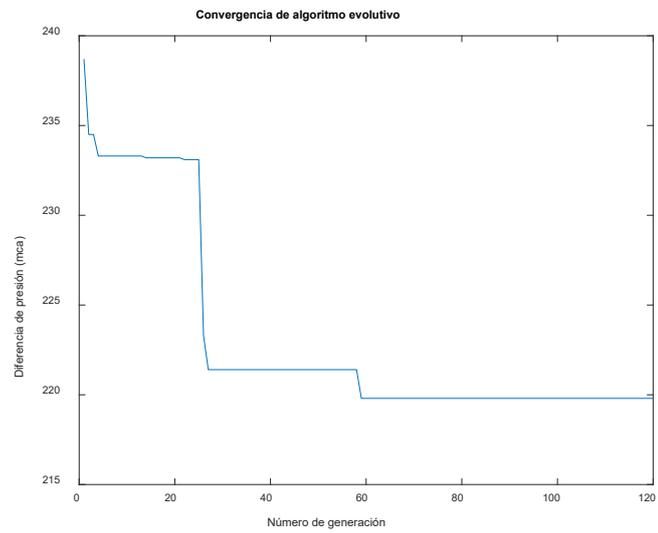
N° Iteración	Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6
	Coefficiente de caudal (Kv)	Tiempo de apertura de válvula (s)	Tiempo de cierre de válvula (s)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)
1	2764	5	53	86	228	152	239
2	2756	5	53	83	228	154	238
3	2756	5	54	85	227	151	237
4	2805	5	52	86	228	151	238
5	2798	5	53	85	232	150	239

**Fuente:** Elaboración propia

Adicionalmente, se obtienen las gráficas de convergencia del algoritmo (en las 5 iteraciones) que se muestran en las figuras 37 a 41.

**Figura 37**

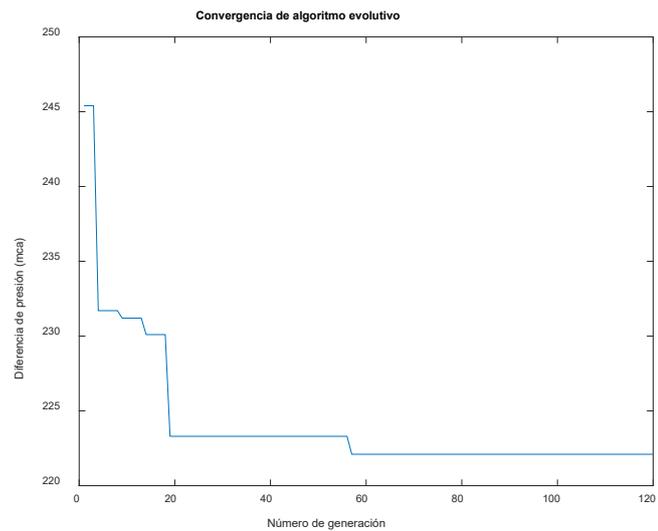
*Convergencia de la primera iteración del algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 38**

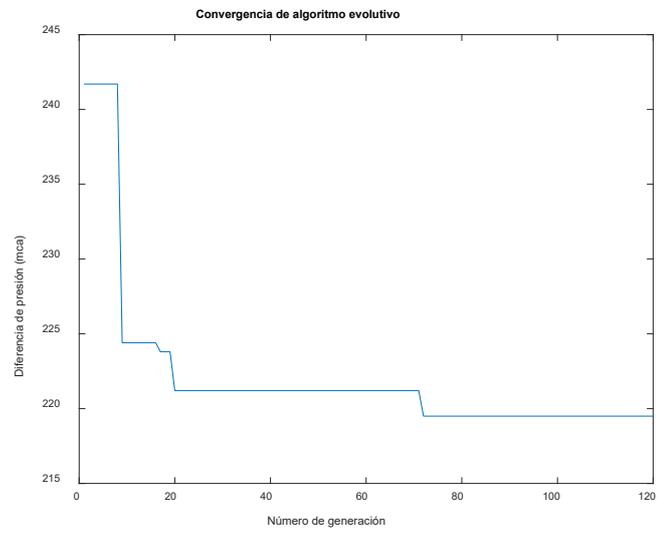
*Convergencia de la segunda iteración del algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 39**

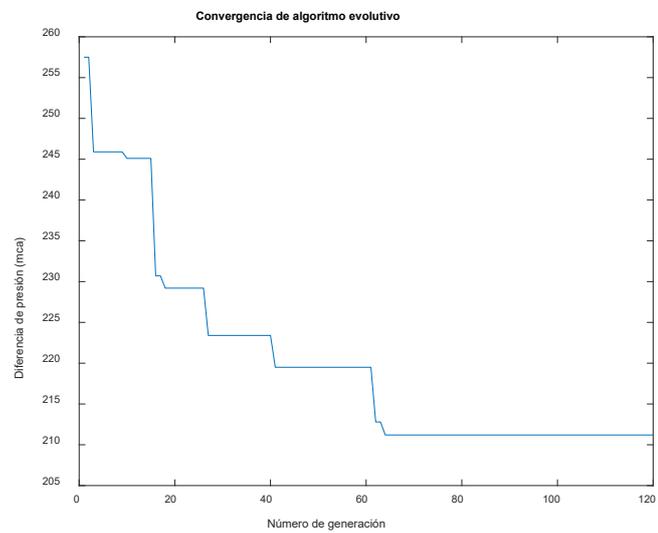
*Convergencia de la tercera iteración del algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 40**

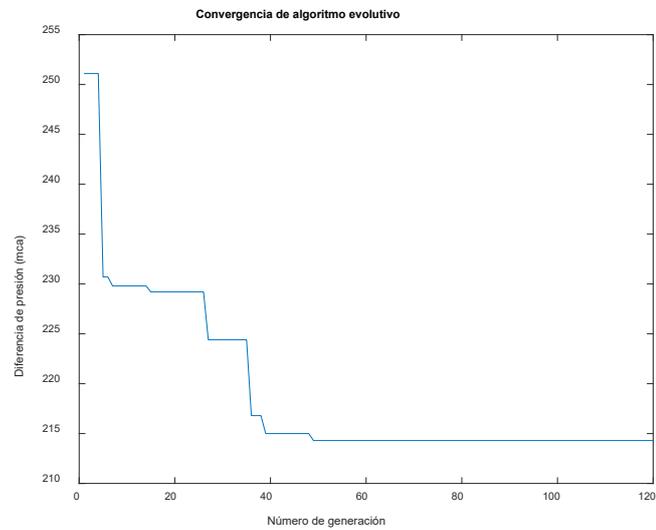
*Convergencia de la cuarta iteración del algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 41**

*Convergencia de la quinta iteración del algoritmo evolutivo*



**Fuente:** Elaboración propia

De las figuras anteriores se obtiene el valor aproximado de convergencia del algoritmo evolutivo en las cinco iteraciones y se resume en la tabla 13.

**Tabla 13**

*Valores de convergencia del algoritmo evolutivo*

<b>N° iteración</b>	<b>N° generación de convergencia</b>
1	59
2	57
3	72
4	64
5	49

**Fuente:** Elaboración propia

Para elegir la solución optimizada se ingresan los valores de la tabla 12 en la tabla de configuración de las válvulas de seguridad en el modelo hidráulico y se ejecuta la simulación del evento de golpe de ariete para cada

conjunto de valores. Se realizan los análisis para el nodo S-PUMP-1 considerado en el escenario 1.

#### **6.4.2 Resultados**

Realizada la simulación del evento de golpe de ariete para cada conjunto de valores de las soluciones posibles, se obtienen los valores de la diferencia de presiones máxima y mínima (función objetivo), esto se resume en la tabla 14.

**Tabla 14***Parámetros y valores de función objetivo para escenario 2*

N° iteración	Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6	Función objetivo
	Coeficiente de caudal (Kv)	Tiempo de apertura de válvula (s)	Tiempo de cierre de válvula (s)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diámetro de orificio de ingreso/salida de aire (mm)	Diferencia de presiones máxima y mínima (mca)
1	2764	5	53	86	228	152	239	221.1
2	2756	5	53	83	228	154	238	221.4
3	2756	5	54	85	227	151	237	221.8
4	2805	5	52	86	228	151	238	211.8
5	2798	5	53	85	232	150	239	214.3

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se observa que la mejor solución que minimiza la función objetivo se obtiene en la iteración 4 del algoritmo. Por lo tanto, se eligen estos parámetros de selección de las válvulas de seguridad y se resumen en la tabla 15.

**Tabla 15**

*Parámetros óptimos para escenario 2*

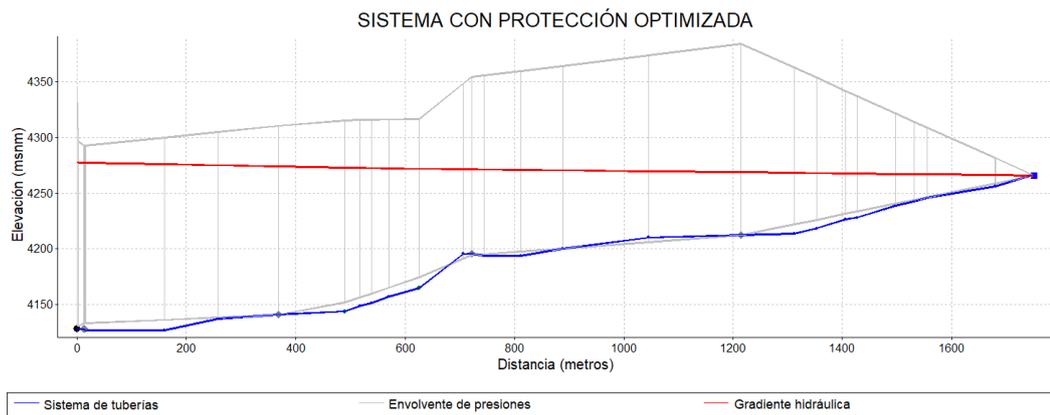
Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6
Coefficient e de caudal (Kv)	Tiempo de apertura de válvula (s)	Tiempo de cierre de válvula (s)	Diámetro de ingreso/salida de aire (mm)			
2805	5	52	86	228	151	238

Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la envolvente de presiones, para el sistema hidráulico equipado con las válvulas y los parámetros de la tabla anterior, se visualiza en la figura 42.

**Figura 42**

*Gráfica de la envolvente de presiones del sistema de bombeo para el escenario 2*

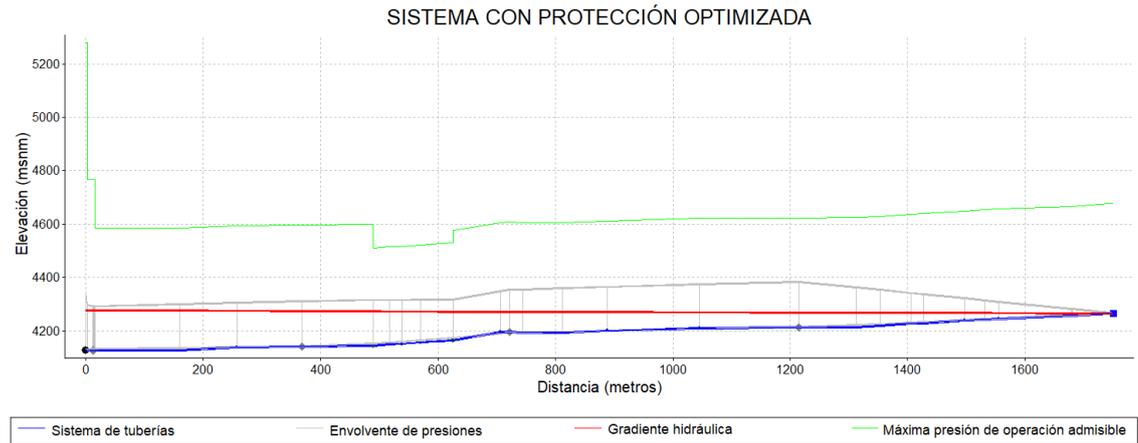


Fuente: Elaboración propia

Además, se verificó que los valores de la envolvente de presiones desarrollada en este escenario no sobrepasasen los valores de diseño de las tuberías, ello se visualiza en la figura 43.

**Figura 43**

*Gráfica de la envolvente de presiones y valores de diseño del sistema de bombeo para el escenario 2*



**Fuente:** Elaboración propia

Los valores registrados de presiones mínima y máxima para el punto de análisis se resumen en la tabla 16.

**Tabla 16**

*Valores de presiones para el nodo de análisis del escenario 2*

Escenario	Nodo analizado	Presión máxima (mca)	Presión mínima (mca)	Diferencia de presión (mca)
Escenario 2	S-PUMP-1	215.3	3.5	211.8

**Fuente:** Elaboración propia

## 6.5 Comparación de escenarios

Se resumen en la tabla 17 los datos obtenidos de la simulación del evento de golpe de ariete para la selección inicial de válvulas de seguridad (Escenario 1) y la selección optimizada realizada por el algoritmo evolutivo (Escenario 2).

Tabla 17

*Comparación de valores de presiones de escenarios 1 y 2*

Escenario	Nodo analizado	Presión máxima (mca)	Presión mínima (mca)	Diferencia de presión (mca)
Escenario 1	S-PUMP-1	256.2	3.1	253.1
Escenario 2	S-PUMP-1	215.3	3.5	211.8

Fuente: Elaboración propia

Si se comparan los valores de diferencias de presiones de ambos escenarios, se obtiene una mejora del 16.32% de reducción de dicha diferencia en el escenario 2 respecto al escenario 1.

## 6.6 Análisis de resultados obtenidos

De acuerdo con los resultados obtenidos de las secciones 6.2, 6.3 y 6.4 se observa que los parámetros seleccionados para las válvulas de seguridad, optimizadas mediante el algoritmo evolutivo, difieren de los considerados en la selección inicial.

El parámetro de valor de coeficiente de caudal aumentó de 1819 a 2805, indicando que la válvula de seguridad optimizada es de mayor capacidad de caudal (Kv) que la seleccionada inicialmente.

El parámetro de tiempo de apertura de válvula optimizada aumentó de 2 a 5 segundos, indicando que la válvula se apertura en mayor tiempo comparado con la seleccionada inicialmente.

El tiempo de cierre de válvula optimizada aumentó de 40 a 52 segundos, indicando que la válvula seleccionada por el algoritmo cierra en mayor tiempo que la seleccionada inicialmente.

La mejora de la protección contra el golpe de ariete mediante la selección de las válvulas de seguridad realizada por el algoritmo evolutivo muestra la disminución de la diferencia de presiones máxima y mínima para el punto de análisis, esta mejora es aproximadamente 16.32%. La obtención de dicha mejora evidencia que el algoritmo evolutivo permite una adecuada selección de válvulas de seguridad contra el golpe de ariete.

## **6.7 Validación de la hipótesis**

A continuación, se muestra el resumen del desempeño de los indicadores considerados en la investigación para las variables independiente y dependiente.

### **6.7.1 Indicadores de la variable independiente**

#### **Convergencia de algoritmo evolutivo**

De las cinco iteraciones ejecutadas en el algoritmo evolutivo diseñado para la obtención de soluciones al problema de optimización, el valor de

convergencia del algoritmo evolutivo asociado a la mejor solución es aproximadamente: 64 generaciones.

### Promedio de valores de soluciones

Los valores promedio de las cinco iteraciones realizadas en el algoritmo evolutivo se resumen en la tabla 18.

**Tabla 18**

*Valores promedio de las soluciones de las cinco iteraciones del algoritmo evolutivo*

Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6
Valor promedio de coeficiente de caudal (Kv)	Valor promedio de tiempo de apertura (s)	Valor promedio de tiempo de cierre (s)	Valor promedio de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Valor promedio de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Valor promedio de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Valor promedio de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)
2776	5	53	85	229	152	238

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se observa que los valores promedio de los parámetros de selección de las válvulas de seguridad presentan una baja diferencia respecto al valor mínimo optimizado por el algoritmo evolutivo diseñado, a excepción del valor de coeficiente de caudal debido al rango de valores de las cinco iteraciones.

### Desviación estándar de valores de soluciones

Los valores de la desviación estándar de las cinco iteraciones realizadas en el algoritmo evolutivo se resumen en la tabla 19.

**Tabla 19**

*Valores de desviación estándar de las soluciones de las cinco iteraciones del algoritmo evolutivo*

Válvulas anticipadoras de onda 1 y 2			Válvulas de aire 1 y 2	Válvulas de aire 3 y 4	Válvula de aire 5	Válvula de aire 6
Desv. estándar de coeficiente de caudal (Kv)	Desv. estándar de tiempo de apertura (s)	Desv. estándar de tiempo de cierre (s)	Desv. estándar de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Desv. estándar de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Desv. estándar de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)	Desv. estándar de diámetro de ingreso/salida de aire (mm)
23.8	0.0	0.7	1.2	1.9	1.5	0.8

Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior se observa que los valores de los parámetros de selección de las válvulas de seguridad obtenidos en las iteraciones consideradas presentan una baja dispersión respecto al valor promedio optimizado por el algoritmo evolutivo.

### **6.7.2 Indicadores de la variable dependiente**

#### **Diferencia de presión**

El valor considerado como indicador de la protección contra el golpe de ariete es la diferencia de presión. En la tabla 20 se muestran los valores para los escenarios considerados:

- Escenario 1: Sistema de bombeo equipado con selección inicial de válvulas de seguridad
- Escenario 2: Sistema de bombeo equipado con selección optimizada mediante algoritmo evolutivo.

**Tabla 20**

*Valores de diferencia de presión máxima y mínima*

<b>Escenario</b>	<b>Diferencia de presión (mca)</b>
Escenario 1	253.1
Escenario 2	211.8

**Fuente:** Elaboración propia

La diferencia porcentual de presión se redujo en un 16.32% del escenario 2 con respecto al escenario 1.

Por lo tanto, en base a la validación de los indicadores, se concluye que la hipótesis general es positiva.

## Conclusiones

El diseño de un algoritmo evolutivo para la selección de válvulas de seguridad mejoró la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada reduciendo la diferencia de presiones máxima y mínima en un 16.32%. Esto representa la protección de la integridad del sistema hidráulico ante eventos como el golpe de ariete mediante equipos como las válvulas de seguridad, que aseguran la continua operatividad del sistema y la consecuente disponibilidad de agua recuperada para las operaciones mineras correspondientes.

Los indicadores de desempeño del algoritmo evolutivo concluyen lo siguiente:

- La convergencia del algoritmo se estableció en el número de 64 generaciones, concluyendo que el algoritmo diseñado es adecuado para obtener soluciones al problema de optimización planteado.
- Los valores promedio para los parámetros de las válvulas de seguridad corresponden para las válvulas anticipadoras de onda: 2776 para el coeficiente de caudal, 5 y 53 s para el tiempo de apertura y cierre de las válvulas, respectivamente. Respecto a los diámetros de ingreso y salida de las válvulas ventosas: 85 mm, para las válvulas 1 y 2; 229 mm, para las válvulas 3 y 4; 152 mm, para la válvula 5 y 238 mm, para la válvula 6.
- Los valores de la desviación estándar para los parámetros de las válvulas de seguridad corresponden para las válvulas anticipadoras de onda: 23.8 para el coeficiente de caudal, 0.0 y 0.7 s para el tiempo de apertura y cierre de las válvulas, respectivamente. Respecto a los diámetros de ingreso y salida de las válvulas ventosas: 1.2 mm, para las válvulas 1 y 2; 1.9 mm, para las válvulas 3 y 4; 1.5 mm, para la válvula 5 y 0.8 mm, para la válvula 6.

El indicador de la protección contra el golpe de ariete en el sistema de bombeo de agua recuperada corresponde a la diferencia de presiones máxima y mínima registradas durante un evento de régimen transitorio. La reducción de dicho indicador comparando los escenarios descritos logró reducir su valor en 16.32%, concluyendo que la selección de válvulas realizada por el algoritmo evolutivo mejora la protección en el sistema hidráulico.

Por lo tanto, en base a las conclusiones previas y a los indicadores considerados para las variables independiente y dependiente se concluye que la hipótesis es positiva, debido a que se mejora significativamente la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada en una unidad minera.

## Recomendaciones

El diseño de un algoritmo evolutivo que mejora la protección contra el golpe de ariete en un sistema de bombeo de agua recuperada es un método de optimización para obtener valores mínimos en los parámetros de válvulas de seguridad. Se recomienda que los equipos de seguridad del sistema hidráulico de análisis comprendan las válvulas con los parámetros optimizados y obtenidos por la ejecución del algoritmo evolutivo diseñado en la presente investigación.

Se recomienda para futuras investigaciones que la evaluación de la función objetivo para un sistema de ecuaciones diferenciales que comprenden el fenómeno de golpe de ariete, realizar un modelado mediante el empleo de redes neuronales, que minimicen el tiempo de simulación e intercambio de datos entre el modelo hidráulico y el algoritmo evolutivo.

El sujeto de estudio considerado en la presente investigación comprende un sistema de impulsión de agua recuperada. En las operaciones mineras se utilizan diversos tipos de sistemas de transporte de fluido. En futuras investigaciones se recomienda analizar el comportamiento del fenómeno de golpe ariete en un sistema de transporte de agua por gravedad y que abarque el evento transitorio generado por el cierre rápido de válvulas de aislamiento equipadas en el sistema hidráulico. Adicionalmente, se recomienda que el diseño del algoritmo evolutivo sea extendido a sistemas de impulsión de fluidos diferente al agua recuperada para evaluar su eficacia.

## Referencias bibliográficas

- Abreu, J., & Cabrera, E. (1995). El golpe de ariete en tuberías de impulsión. Comentarios a las expresiones de Mendiluce. *Ingeniería del agua*.
- Abreu, J., & Guarga, R. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión*. España.
- Araujo, L., & Cervigón, C. (2009). *Algoritmos Evolutivos. Un enfoque práctico*. México.
- Bermad. (2007). *Abastecimiento de agua. Válvulas de control hidráulico*. Israel.
- Blanco, E., & Velarde, S. (1994). *Sistemas de bombeo*. Gijón.
- Boulos, P., & Karney, B. (2005). Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems. *American Water Works Association*.
- Cafaggi, A., & Rodal, E. (2011). *Sistemas de bombeo*. México.
- Carhuapoma, J., & Chahuayo, A. (2019). *Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable en la Rinconada de Pamplona Alta, aplicando EPANET y algoritmos genéticos para la localización de válvulas reductoras de presión*. Lima.
- Céspedes, J. (2014). *Diseño de un sistema de bombeo automático de agua recuperada de relaves mineros*. Lima.
- De Piérola, J. (2017). *El agua y su uso en minería y agricultura en el Perú, una primera aproximación*. Lima.
- Eiben, A., & Smith, J. (2003). *Introduction to Evolutionary Computing*. UK.
- Enríquez, W. (2015). *Análisis del golpe de ariete para reducir la sobrepresión en el sistema de bombeo del tanque TK-007 al cajón LA003B de la presa de relaves de SMCV*. Huancayo.
- Flores, I. (2019). *Aplicación del algoritmo genético para el cálculo del diámetro de las tuberías de una red de distribución de agua potable en el distrito de Tarapoto 2018*. Tarapoto.

- Hyunjun, K., & Jisung, H. (2017). The Optimization of Design Parameters for Surge Relief Valve for Pipeline Systems. *Applied Mathematics and Computer Science*.
- Mahmood, S. (2018). The steady-transient optimization of water transmission pipelines with consideration of water-hammer control devices: a case study. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*.
- Moghaddas, S., & Samani, H. (2016). Transient Protection Optimization of Pipelines Using Air-chamber. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. México.
- Ortiz, G. (2006). *El golpe de ariete en sistemas de abastecimiento de agua potable*. Guatemala.
- Simon, D. (2013). *Evolutionary optimization algorithms*. USA.
- SPCC. (2017). *Informe Anual*.
- Streeter, V., & Wylie, E. (2000). *Mecánica de Fluidos*. Colombia.
- Tejas, V. V. (2021). Revisiting the performance of evolutionary algorithms. *Expert systems with applications*.
- Twyman, J. (2018). Golpe de ariete en una red de distribución de agua. *PAIDEIA XXI*.
- Wan, W., & Zhang, B. (2019). Investigation on Water Hammer Control of Centrifugal Pumps in Water Supply Systems. *Energies*.
- Xinjie, Y., & Mitsuo, G. (2010). *Introduction to Evolutionary Algorithms*. UK.
- Yazdi, J., & Hokmabadi, A. (2018). Optimal Size and Placement of Water Hammer Protective Devices in Water Conveyance Pipelines. *Water Resources Management*.

## **Anexos**

<b>Anexo 1:</b> Datos para elaboración de modelo hidráulico .....	1
<b>Anexo 2:</b> Datos de operación de las bombas del sistema hidráulico .....	6
<b>Anexo 3:</b> Parámetros de válvulas Bermad .....	7
<b>Anexo 4:</b> Perfil longitudinal de líneas de impulsión .....	9
<b>Anexo 5:</b> Configuración del modelo hidráulico final .....	10

## Anexo 1: Datos para elaboración de modelo hidráulico

En la tabla siguiente se muestran los datos recopilados en el estudio de régimen permanente de los nodos del sistema de bombeo analizado.

ID	Nodo	Elevación (msnm)	ID	Nodo	Elevación (msnm)
J1	Nivel de agua	4127	J30	Válvula	4128
J2	Bomba-1	4128	J31	Válvula check	4128
J3	Bomba-2	4128	J32	Válvula	4128
J4	Bomba-3	4128	J33	Válvula	4128
J5	Bomba-4	4128	J34	Flujómetro	4128
J6	Nivel de agua	4127	J35	Codo	4128
J7	Nivel de agua	4127	J36	Codo	4127
J8	Nivel de agua	4127	J37	Válvula	4128
J9	Válvula check	4128	J38	Flujómetro	4128
J10	Válvula	4128	J39	Codo	4128
J11	Válvula check	4128	J40	Codo	4127
J12	Válvula	4128	J41	Tanque recepción	4266
J13	Válvula check	4128	J42	Codo	4256
J14	Válvula	4128	J43	Tee	4128
J15	Válvula check	4128	J44	Tee	4128
J16	Válvula	4128	J45	Tee	4128
J17	Nivel de agua	4127	J46	Tee	4128
J18	Bomba-5	4128	J47	Tee	4128
J19	Bomba-6	4128	J48	Tee	4128
J20	Bomba-7	4128	J49	Tee	4165
J21	Bomba-8	4128	J50	Codo	4256
J22	Nivel de agua	4127	J51	Codo	4256
J23	Nivel de agua	4127	J52	Cambio de área	4144
J24	Nivel de agua	4127	J53	Cambio de área	4127
J25	Válvula check	4128	J54	Cambio de área	4127
J26	Válvula	4128	J55	Cambio de área	4144
J27	Válvula check	4128	J56	Codo	4128
J28	Válvula	4128	J57	Codo	4128
J29	Válvula check	4128			

En la tabla siguiente se visualizan los datos recopilados en el estudio de régimen permanente de las tuberías del sistema de bombeo analizado.

ID	Cédula	Material de tubería	Nodo 1	Nodo 2	Longitud (m)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro interno (mm)	Rugosidad
P1	STD	Acero al carbono	J1	J2	2.6	750	742.96	130
P2	STD	Acero al carbono	J6	J3	2.6	750	742.96	130
P3	STD	Acero al carbono	J7	J4	2.6	750	742.96	130
P4	STD	Acero al carbono	J8	J5	2.6	750	742.96	130
P5	Sch 30	Acero al carbono	J2	J9	1.8	500	482.60	130
P6	Sch 30	Acero al carbono	J9	J10	0.71	500	482.60	130
P7	Sch 30	Acero al carbono	J10	J56	1	500	482.60	130
P8	Sch 30	Acero al carbono	J3	J11	1.8	500	482.60	130
P9	Sch 30	Acero al carbono	J11	J12	0.71	500	482.60	130
P10	Sch 30	Acero al carbono	J12	J43	1	500	482.60	130
P11	Sch 30	Acero al carbono	J4	J13	1.8	500	482.60	130
P12	Sch 30	Acero al carbono	J13	J14	0.71	500	482.60	130
P13	Sch 30	Acero al carbono	J14	J44	1	500	482.60	130
P14	Sch 30	Acero al carbono	J5	J15	1.8	500	482.60	130
P15	Sch 30	Acero al carbono	J15	J16	0.71	500	482.60	130
P16	Sch 30	Acero al carbono	J16	J45	1	500	482.60	130
P17	STD	Acero al carbono	J17	J18	2.6	750	742.96	130
P18	STD	Acero al carbono	J22	J19	2.6	750	742.96	130
P19	STD	Acero al carbono	J23	J20	2.6	750	742.96	130
P20	STD	Acero al carbono	J24	J21	2.6	750	742.96	130

<b>P21</b>	Sch 30	Acero al carbono	J18	J25	1.8	500	482.60	130
<b>P22</b>	Sch 30	Acero al carbono	J25	J26	0.71	500	482.60	130
<b>P23</b>	Sch 30	Acero al carbono	J26	J57	1	500	482.60	130
<b>P24</b>	Sch 30	Acero al carbono	J19	J27	1.8	500	482.60	130
<b>P25</b>	Sch 30	Acero al carbono	J27	J28	0.71	500	482.60	130
<b>P26</b>	Sch 30	Acero al carbono	J28	J46	1	500	482.60	130
<b>P27</b>	Sch 30	Acero al carbono	J20	J29	1.8	500	482.60	130
<b>P28</b>	Sch 30	Acero al carbono	J29	J30	0.71	500	482.60	130
<b>P29</b>	Sch 30	Acero al carbono	J30	J47	1	500	482.60	130
<b>P30</b>	Sch 30	Acero al carbono	J21	J31	1.8	500	482.60	130
<b>P31</b>	Sch 30	Acero al carbono	J31	J32	0.71	500	482.60	130
<b>P32</b>	Sch 30	Acero al carbono	J32	J48	1	500	482.60	130
<b>P33</b>	Sch 20	Acero al carbono	J56	J43	2.235	900	889.00	130
<b>P34</b>	Sch 20	Acero al carbono	J43	J44	2.235	900	889.00	130
<b>P35</b>	Sch 20	Acero al carbono	J44	J45	2.235	900	889.00	130
<b>P36</b>	Sch 20	Acero al carbono	J45	J33	2.92	900	889.00	130
<b>P37</b>	Sch 20	Acero al carbono	J33	J34	2.42	900	889.00	130
<b>P38</b>	Sch 20	Acero al carbono	J34	J35	1.15	900	889.00	130
<b>P39</b>	Sch 20	Acero al carbono	J35	J36	1.5	900	889.00	130
<b>P40</b>	Sch 20	Acero al carbono	J36	J53	1	900	889.00	130
<b>P41</b>	SDR11	HDPE	J52	J49	134.73	900	738.15	140
<b>P42</b>	Sch 20	Acero al carbono	J47	J48	2.235	900	889.00	130
<b>P43</b>	Sch 20	Acero al carbono	J57	J46	2.235	900	889.00	130
<b>P44</b>	Sch 20	Acero al carbono	J46	J47	2.235	900	889.00	130
<b>P45</b>	Sch 20	Acero al carbono	J48	J37	2.92	900	889.00	130
<b>P46</b>	Sch 20	Acero al carbono	J37	J38	2.42	900	889.00	130
<b>P47</b>	Sch 20	Acero al carbono	J38	J39	1.15	900	889.00	130

<b>P48</b>	Sch 20	Acero al carbono	J39	J40	1.5	900	889.00	130
<b>P49</b>	Sch 20	Acero al carbono	J40	J54	1	900	889.00	130
<b>P50</b>	SDR11	HDPE	J55	J49	134.73	900	738.15	140
<b>P51</b>	STD	Acero al carbono	J49	J42	1110.72	1050	1047.76	130
<b>P52</b>	STD	Acero al carbono	J42	J50	1	1050	1047.76	130
<b>P53</b>	STD	Acero al carbono	J50	J51	12	1050	1047.76	130
<b>P54</b>	STD	Acero al carbono	J51	J41	2	1050	1047.76	130
<b>P55</b>	SDR9	HDPE	J53	J52	474.51	900	699.00	140
<b>P56</b>	SDR9	HDPE	J54	J55	474.51	900	699.00	140

En la tabla siguiente se muestran los datos recopilados de las bombas consideradas en el estudio de régimen permanente para el sistema hidráulico.

Índice	Nombre	Elevación (msnm)	Eficiencia (%)	Ratio de velocidad	Nivel de succión (msnm)	Altura de bombeo nominal (mca)	Caudal nominal (m3/h)	Velocidad nominal (rpm)
1	BOMBA-1	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
2	BOMBA-2	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
3	BOMBA-3	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
4	BOMBA-4	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
5	BOMBA-5	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
6	BOMBA-6	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
7	BOMBA-7	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780
8	BOMBA-8	4128	80	1	4127	162.6	1020	1780

## Anexo 2: Datos de operación de las bombas del sistema hidráulico

En la tabla siguiente se muestran los datos de operación de las bombas consideradas para el sistema de bombeo.



### 1. Pump Specifications

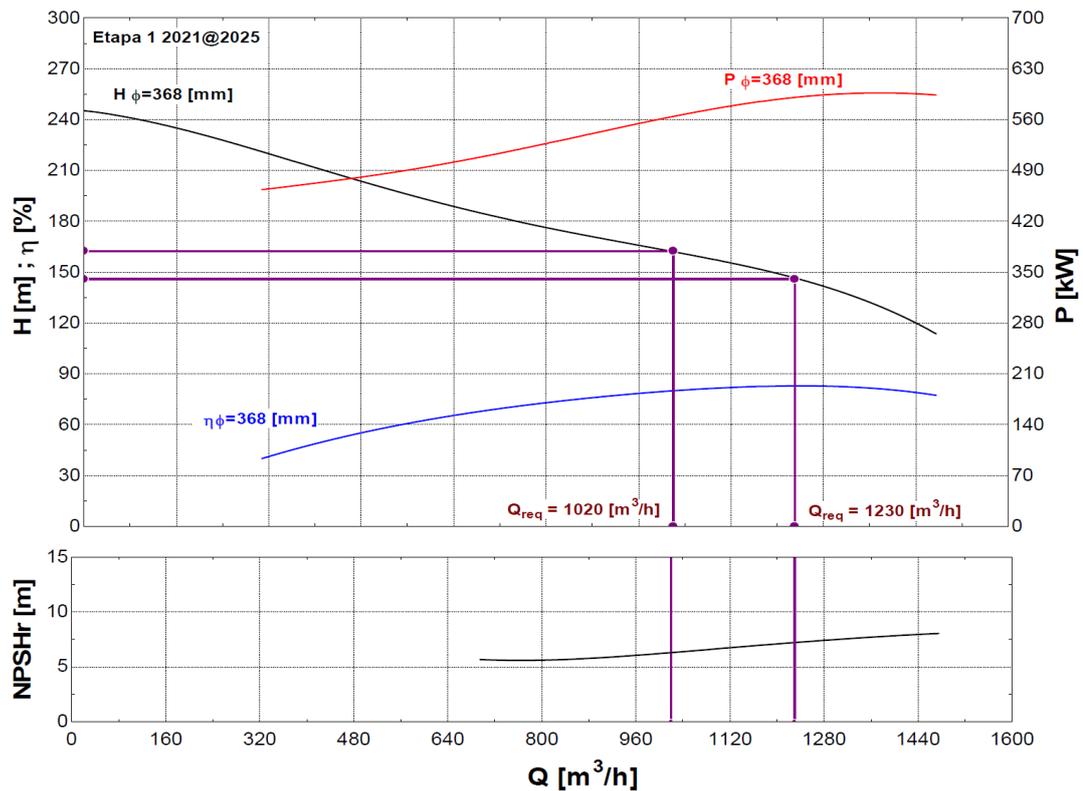
Type	VTP	Stage Number	4
Model	VTP 1250C 4E	Impeller Diameter 1st Stage	368 [mm]
Impeller Type	CLOSED	Impeller Diameter Other Stage	368 [mm]

### 2. Operating Conditions

Flow Rate [Q]	= 1020 [m <sup>3</sup> /h]	Speed [n]	= 1780 [rpm]	Efficiency [η]	= 80 [%]
Head [H]	= 162.6 [m]	Power [P]	= 564.5 [kW]	NPSH Required	NPSHr = 6.3 [m]
Min. Hydraulic Flow [Qmin]	= 310 [m <sup>3</sup> /h]	Pumped Liquid	Agua recuperada	Solid Size (fluid)	- [μm]
Shut off Head [Hmax]	= 244.4 [m]	Relative Density	1	% Susp. Solids	- (by wtg)
Power Maximum [Pmax]	= 594 [kW]	Kinematic Viscosity	- [mm <sup>2</sup> /s]	Max. Solid Size (pump)	- [mm]

### 3. Pump Performance Curve

Performance Curve Number 11102-171006-E7



### Anexo 3: Parámetros de válvulas Bermad

En la tabla siguiente se muestran los datos proporcionados por el fabricante de válvulas Bermad para anticipadoras de onda y check.

#### Datos de Válvulas de Control (Serie 700)



Kv	700								
Serie	700								
mm	50	80	100	150	200	250	300	350	400-600
inch	2"	3"	4"	6"	8"	10"	12"	14"ES	16"/20"ES/24"ES
Kv (Válvula check)	62	130	200	540	905	1480	2140	2140	3300
85% Kv (Válvula anticipadora de onda)	53	111	170	459	769	1258	1819	1819	2805

Tiempo de apertura de válvula		
	Tamaño	Tiempo (s)
Válvula anticipadora de onda	2"-6"	1
	8"-12"	2-3
	Mayor a 12"	3-5

Tiempo de cierre de válvula		
	Tamaño	Tiempo (s)
Válvula anticipadora de onda	2"-6"	20-30
	8"-12"	40-50
	Mayor a 12"	60-80

Tiempo de reacción	
	Tiempo (s)
Válvula check	0.5-1

En la tabla 6 se muestran los datos proporcionados por el fabricante de válvulas Bermad para válvulas de aire.

Tabla 6. Datos de válvulas de aire

**Datos de Válvulas de Aire**



Modelo	Tamaño	Diámetro de ingreso / salida de aire
C70	inch	mm
	2"	50
	3"	80
	4"	100
	6"	150
	8"	200
10"	250	
Coefficiente de descarga	0.62	

Fuente: Fabricante de válvulas Bermad

#### Anexo 4: Perfil longitudinal de líneas de impulsión

En la tabla siguiente se muestran los datos recopilados del perfil longitudinal de la línea de impulsión.

<b>Nombre</b>	<b>Progresiva</b>	<b>Elevación</b>
1	0	4127
2	192.36	4127
3	229.78	4137.5
4	474.51	4144
5	487.61	4149
6	523.78	4151.3
7	536.87	4157.2
8	609.24	4165
9	647.96	4195.5
10	705.63	4196
11	720.27	4193.7
12	800.53	4193.7
13	862.2	4200.5
14	1021.91	4210.3
15	1376.02	4213.9
16	1419.38	4218.6
17	1443.1	4226.8
18	1472.4	4228.2
19	1500.01	4238.7
20	1537.98	4242.7
21	1551.64	4246
22	1719.96	4256
23	1720.96	4256
24	1732.96	4266
25	1734.96	4266

## Anexo 5: Configuración del modelo hidráulico final

En la tabla siguiente se muestra el arreglo de nodos del modelo hidráulico final que será utilizado para los análisis de golpe de ariete.

ID	Nodo	Elevación (msnm)
S-PUMP-1	Conjunto de bombas 5, 6, 7 y 8	4128
J1	Nodo 1	4128
HydSAV-1	Válvula anticipadora de onda 1	4128
AIR-1	Válvula de aire 1	4128
J2	Nodo 2	4127
AIR-3	Válvula de aire 3	4140.9
J3	Nodo 3	4144
J4	Nodo 4	4165
S-PUMP-2	Conjunto de bombas 1, 2, 3 y 4	4128
J5	Nodo 5	4128
HydSAV-2	Válvula anticipadora de onda 2	4128
AIR-2	Válvula de aire 2	4128
J6	Nodo 6	4127
AIR-4	Válvula de aire 4	4140.9
J7	Nodo 7	4144
AIR-5	Válvula de aire 5	4196
AIR-6	Válvula de aire 6	4212.4
TANQUE-RECEPCION	Tanque de recepción	4266

En la tabla siguiente se muestra el arreglo de tuberías del modelo hidráulico final que será utilizado para los análisis de golpe de ariete.

ID	Cédula	Material de tubería	Nodo 1	Nodo 2	Longitud (m)	Diámetro nominal (mm)	Diámetro interno (mm)	Rugosidad
P1	Sch 30	Acero al carbono	S-PUMP-1	J1	3.51	500	482.6	130
P2	Sch 20	Acero al carbono	J1	HydSAV-1	8.84	900	889	130
P3	Sch 20	Acero al carbono	HydSAV-1	AIR-1	1	900	889	130
P4	Sch 20	Acero al carbono	AIR-1	J2	2.5	900	889	130
P5	SDR9	HDPE	J2	AIR-3	352.15	900	699	140
P6	SDR9	HDPE	AIR-3	J3	122.37	900	699	140
P7	SDR11	HDPE	J3	J4	134.73	900	738.15	140
P8	Sch 30	Acero al carbono	S-PUMP-1	J5	3.51	500	482.6	130
P9	Sch 20	Acero al carbono	J5	HydSAV-2	8.84	900	889	130
P10	Sch 20	Acero al carbono	HydSAV-2	AIR-2	1	900	889	130
P11	Sch 20	Acero al carbono	AIR-2	J6	2.5	900	889	130
P12	SDR9	HDPE	J6	AIR-4	352.15	900	699	140
P13	SDR9	HDPE	AIR-4	J7	122.37	900	699	140
P14	SDR11	HDPE	J7	J4	134.73	900	738.15	140
P15	STD	Acero al carbono	J4	AIR-5	96.39	1050	1047.76	130
P16	STD	Acero al carbono	AIR-5	AIR-6	493.34	1050	1047.76	130
P17	STD	Acero al carbono	AIR-6	TANQUE-RECEPCION	536	1050	1047.76	130