



**UNIVERSIDAD  
CENTRAL DE  
CHILE**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL EN OBRAS  
CIVILES**

**CÁLCULO Y VERIFICACIÓN DEL TAMAÑO DE  
DEPÓSITO HIDRONEUMÁTICO EN  
INSTALACIÓN DE BOMBEO DE AGUA HACIA  
EL CANAL PENCAHUE.**

PROFESOR GUÍA

GONZÁLEZ ORTEGA, JUAN ALBERTO

ÁNGEL RUBIO PÉREZ

DICIEMBRE 2018. SANTIAGO - CHILE

# DEDICATORIA

A mi madre, por darme la vida y la educación necesaria para ser la persona que ahora mismo soy, y estoy orgulloso de ser. Por ser un apoyo incondicional en cualquier situación y por preocuparse de mí más de lo que yo mismo lo hago.

A mi padre, por esforzarse tanto por proporcionarme lo necesario para que no me faltase de nada. Por ser un referente, que me ha enseñado su forma de pensar y de vivir, lo cual admiro y tomo como referencia para las decisiones que tomo en mi vida.

A ambos, porque gracias a su esfuerzo, trabajo y dedicación, me encuentro hoy aquí, viviendo una experiencia que nunca olvidaré, y no sería posible sin su ayuda.

A mi hermano, por ser un amigo, alguien en quien confiar, un compañero de vida, y por saber que siempre podré contar con él para lo que necesite.

# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por apoyarme en cada momento desde la distancia, que, aunque me encuentre a 10760 Km de mi casa, no hay día que no se preocupen por mí, me apoyen en todo lo necesario y me animen para continuar con mi trabajo.

A mis amigos, tanto los de toda la vida como los que he conocido aquí, por acompañarme en los buenos y malos momentos, y por vivir conmigo las aventuras y experiencias que me han hecho crecer como persona.

A mi profesor guía, Ing. Juan Alberto González Ortega, por la ayuda en esta tesis, y a Ing. Kim Hauser Vavra, por su ayuda y apoyo técnico en este estudio, y sobre todo por su paciencia conmigo.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>i</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>ii</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO .....</b>	<b>1</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>8</b>
<i>Objetivo principal .....</i>	<i>8</i>
<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>8</i>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
<b>TEXTO (CAPÍTULOS).....</b>	<b>12</b>
<i>Capítulo 1. Metodología.....</i>	<i>12</i>
<i>Capítulo 2. Marco teórico.....</i>	<i>15</i>
2.1 Introducción.....	15
2.2 Conceptos básicos de la hidráulica.....	16

2.2.1 Clasificación de los tipos de flujos. ....	16
2.2.2. Presión y ecuación fundamental de la hidrostática: .....	18
2.2.3. Caudal .....	18
2.2.4. Ecuación de continuidad .....	20
2.2.5. Ecuación de la energía o de Bernoulli. ....	21
2.2.6. Línea de altura geométrica y piezométrica. ....	24
2.2.7. Número de Reynolds. ....	27
2.2.8. Pérdidas de carga. ....	28
2.2.9 Bombas hidráulicas.....	29
<i>Capítulo 3. Fenómenos transitorios. ....</i>	<i>31</i>
3.1 Introducción.....	31
3.2 Estudio del golpe de ariete.....	34
3.2.1 Introducción.....	34
3.2.2 Jukowsky .....	35
3.2.3. Separación de la columna de agua y cavitación. ....	36
3.2.4. Casos susceptibles de sufrir eventos transitorios. ....	39
3.2.5. Elementos de protección ante transitorios.....	39
4.1. Consideraciones previas. ....	41
4.2. Simulación del sistema sin protección en el software. ....	42
4.3. Implementación del elemento de seguridad en el modelo. ....	55
<i>Capítulo 5. Análisis de resultados.....</i>	<i>63</i>

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>LISTADO DE TABLAS E ILUSTRACIONES .....</b>	<b>82</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>85</b>

# RESUMEN

Dentro de una estación de bombeo hidráulico, durante los cambios de velocidad del fluido en la conducción, se producen una serie de fenómenos que pueden poner en riesgo la instalación, los llamados transitorios hidráulicos. Se producen ante los cambios repentinos en el sistema, que resultan en variaciones de presión dentro del mismo, pudiendo sobrecargar la instalación, y si no se tienen en cuenta a la hora de diseñar el sistema, pueden provocar roturas y fallos.

Por los motivos mencionados, se debe tener en cuenta y analizar estos efectos en cada diseño de sistemas hidráulicos a presión, así como buscar soluciones, elementos de protección ante transitorios, y dimensionar los elementos del sistema para que sean capaces de soportar las presiones críticas (tanto máximas como mínimas) que se puedan producir.

El presente proyecto de título tiene como finalidad evaluar estos efectos dentro del proyecto realizado por el Departamento de Obras Hidráulicas del Gobierno de Chile, en el que se pretende crear una estación de bombeo de agua hacia el Canal de Péncahue, provincia de Talca, región de Maule.

El sistema deberá impulsar agua desde el Río Claro, hacia el canal Péncahue en momentos de demanda hídrica para riego. La instalación constará de un grupo impulsor de 8 bombas, que impulsarán agua por dos líneas simétricas, hacia el canal.

En esta tesis se aborda la verificación de los componentes de protección ante eventos transitorios que se podrían producir en el sistema, analizando la instalación sin estos sistemas, y después simulando la instalación con los elementos de protección previstos en el proyecto, para comprobar su validez, y contemplar alternativas si las hubiese.

Para el estudio de estos eventos, se recurrirá a la ayuda del software Bentley Hammer, un programa computacional de análisis que permite modelar sistemas hidráulicos y estipular sus condiciones de funcionamiento. Una vez realizado el modelo, el software se encarga de calcular los efectos de los fenómenos transitorios, y permite analizarlos y obtener los datos que se deseen. Esta herramienta simplifica mucho el trabajo de estudio y permite obtener datos precisos en los puntos que se deseen.

# ABSTRACT

During the operation of a water pumping station, may occur certain phenomena that can risk the plant, they are called hydraulic transients. They are produced by sudden changes in the system, that involve pressure changes in the system. This pressure changes can overload the system, and if they aren't taken them into account at the time we design the system, they could make the system fail or break.

Due that types of phenomena, these effects should be considered and analyzed in every design of pressured hydraulic systems, and find solutions, protective elements against that phenomena and give the right characteristics and dimensions to the system elements to ensure that they could resist to the hydraulic transients if they occur.

This thesis pretends evaluate the mentioned effects of hydraulic transients that could affect to the project made by the *Departamento de Obras Hidráulicas del Gobierno de Chile* (Hydraulic division of the Chilean Government). This project consists on the creation of one water pumping station that could pump water from the Claro River to the Pencahue Channel, in the Talca province, Maule region.

The station should pump water from the river to the channel in moments when the water is needed for irrigation. The plant will be composed of 8 water pumps, which will deliver water to 2 symmetric pipe lines to the channel.

The purpose of this thesis is to verify the protective elements against hydraulic transients, analyzing the system with and without that elements, and then adding the elements to check if they are enough to protect the plant in case it could suffer the pressure variations caused by transients.

For the study of transients, in stead of manual calculations, the system could be modeled in a specialized software, like Bentley Hammer. This software is a very powerful tool that can be used to model pumping systems in order to calculate and analyze transients in closed conducts. Once the system is modeled, the software can show precise data of pressure in every point of the installation, which is very useful to analyze the effects of transients in the points of the installation desired to study.

# OBJETIVOS

## Objetivo principal

El objetivo principal de esta tesis es estudiar los fenómenos transitorios que ocurren en la impulsión de agua desde el Rio Claro hasta el Canal Pencahue, así como validar los elementos de protección ante estos eventos (Depósito hidroneumático) considerados en el diseño del proyecto.

## Objetivos específicos

- Describir y simular el sistema de impulsión y sus componentes principales.
- Determinar la diferencia que habría entre el sistema sin elementos de protección y con ellos.
- Describir la aplicación informática a utilizar.
- Definir un modelo de operación y falla.
- Analizar los fenómenos transitorios.
- Comentar los resultados y generar las recomendaciones para validar o mejorar el diseño actual.

# INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural valioso y bastante escaso, de gran utilidad y necesario para la vida. En ciertas zonas en las que no es demasiado abundante es de crucial importancia hacer una gestión y uso responsable de este recurso, así como crear planes e instalaciones que permitan aprovecharlo de una forma eficiente y sustentable.

Hoy en día, el aprovechamiento de este recurso fundamental es más importante que nunca, sobre todo en zonas donde por la escasez o ausencia de cauces naturales y la falta de precipitaciones hace que el agua sea un bien escaso, por lo que conviene aprovecharlo al máximo.

En la actualidad, existen sistemas para gestionar el agua, como el conocimiento técnico para crear canales, embalses, presas, bombeos de agua que permitan transportar el agua, etc.

Uno de los grandes propósitos de los sistemas de aprovechamiento de agua es el de asegurar el riego de plantaciones, debido a la necesidad de aumentar la productividad de los cultivos.

El aumento en la demanda de alimentos de un mundo en el que la población crece exponencialmente, así como la desertificación y limitación de las zonas de cultivos, hace necesaria la instalación de sistemas de regadío para asegurar la producción, aumentar el rendimiento y suplir la demanda de alimentos.

Una de las mejores alternativas para crear sistemas de riego son los sistemas de bombeo por impulsión. La gran cualidad de los sistemas de impulsión es que permiten trasladar grandes cantidades de agua a necesidad, incluso desde una zona menos elevada a otra con mayor elevación, llevando así agua a donde sin esos sistemas no llegaría.

El proyecto del que trata esta tesis nace de la necesidad de crear un sistema de gestión hídrica, por lo que se creó el canal Pencahue, ubicado en la VII Región del Maule, en la provincia de Talca, con la función de abastecer de agua para el regadío de cultivos de la zona.

Con el propósito de aumentar la seguridad de riego del Sistema Pencahue, se ha decidido construir un bombeo de agua desde el río Claro en el sector del KM27 del canal.

Esta estación de bombeo debe ser capaz de suministrar un caudal de hasta 4,0 m<sup>3</sup>/s en época de sequía o escasez de agua, para así poder mantener los caudales de riego habituales y necesarios.

En los sistemas hidráulicos a presión, existen dos tipos de estado del sistema: El régimen permanente, en el que el caudal es constante, y por tanto las presiones dentro del sistema, por lo que se puede saber en cada instante de tiempo y en cada parte de la instalación la presión de agua que está sufriendo.

El estado que se produce cuando el sistema pasa de un estado permanente a otro se denomina como transitorio, en el que el caudal está variando con el tiempo, lo que provoca cambios en la presión. En este estado se provoca el llamado golpe de ariete. Los efectos hidráulicos transitorios son un efecto importante a tener en cuenta en este tipo de instalaciones ya que pueden ponerla en peligro, tanto las sobrepresiones, como la cavitación y depresiones.

El área de estudio de esta tesis se enfoca en la verificación de los sistemas de sobreprotección del sistema ante eventos hidráulicos transitorios que se puedan producir, normalmente en los cierres rápidos de válvulas, inicio de funcionamiento de las bombas, o parones eventuales de ellas.

Los efectos hidráulicos transitorios son un efecto importante a tener en cuenta en este tipo de instalaciones ya que pueden ponerla en peligro, tanto las sobrepresiones, como la cavitación y depresiones.

En esta tesis se explicará en qué consisten estos efectos, los casos en los que se pueden producir, se estudiarán aplicados al modelo y se propondrán elementos de seguridad que permitan mitigarlos para proteger el sistema de fallas producidas por los efectos de los transitorios.

# TEXTO (CAPÍTULOS)

## Capítulo 1. Metodología

Para analizar los fenómenos transitorios, existen varios softwares en el mercado que se encargan de realizar las simulaciones de estos fenómenos para después arrojar datos que puedan ser analizados.

En este caso, como alternativas se presentan 2 opciones:

- Hammer, de un reconocido desarrollador de software en este ámbito, Bentley. Es necesaria la licencia para la utilización de este programa.

- Allievi, software libre y gratuito, desarrollado por ITA, instituto tecnológico del agua, dentro de la Universitat Politècnica de Valencia.

Haciendo una primera valoración de ambos, se observa que tienen una interfaz parecida, y una metodología de trabajo similar, por lo que este no es un factor que pueda decantar a un software sobre el otro.

La primera diferencia se encuentra en el idioma, mientras que Allievi puede configurarse tanto en inglés, español o portugués, Hammer solo permite utilizar el programa en inglés.

En cuanto a la disponibilidad de tutoriales que sirvan para aprender en el entorno, Hammer dispone de un detallado tutorial por pasos dentro del programa, a través del cual es posible realizar una primera toma de contacto con la interfaz y las funciones.

En cambio, en Allievi no dispone de ningún tutorial dentro del programa, pero sí los hay en video proporcionados por los desarrolladores en la página oficial del programa.

Otra de las diferencias es la cantidad de funciones que puede realizar cada uno. Hammer a simple vista tiene muchas más opciones y funciones que Allievi.

Por estos motivos, a pesar de tener como idioma el inglés y de no ser gratuito, se ha elegido Hammer debido al mayor número de posibilidades que nos ofrece y de su completo tutorial.

Conviene definir bien el software con el que se va a trabajar. Bentley Hammer es un software con interfaz gráfica que permite realizar fácilmente de forma esquemática modelos de redes complejas, compuestas de elementos como tuberías, depósitos, bombas, y elementos de control.

Una de las ventajas que tiene es la posibilidad de importar modelos de otros softwares como WaterGEMS y WaterCad, lo que se traduce en un ahorro de tiempo y de errores de transcripción.

Este software basa sus cálculos en el Método de las Características (MOC, por sus siglas en inglés). A través de esta tipología de cálculo, resuelve las ecuaciones que describen los transitorios hidráulicos.

Hammer posee ciertas capacidades que merece la pena destacar:

- Se pueden introducir condiciones de borde expresadas algebraicamente o en ecuaciones diferenciales basadas en las propiedades físicas, debido a que el método de las características en el que se basa el programa permite implementarlo en los cálculos.
- Es capaz de modelar la cavitación
- El programa estima un intervalo de tiempo para los cálculos óptimo en cada situación para que los cálculos sean precisos y los tiempos de cálculo no se excedan demasiado. Para ello se basa en la longitud de las tuberías y la velocidad de propagación de la onda de presión.

Conocer la forma de trabajo del programa ayuda a modelar el sistema y aplicar las condiciones que se quieren introducir al modelo, así como para analizar los resultados que arroje a la hora de calcular los transitorios.

## Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1 Introducción

La hidráulica es una rama de la física y la ingeniería que se encarga de estudiar las propiedades mecánicas de los fluidos. Todo esto depende de las fuerzas que se interponen con la masa (fuerza) y empuje de la misma.

Si la Física es la ciencia que modela e interpreta todos los fenómenos naturales como, por ejemplo, la caída libre de un cuerpo o movimiento de un péndulo simple, la Mecánica de Fluidos es la parte de la Física que estudia los fenómenos en los que los fluidos participan. Estudia principalmente sus movimientos, y los fenómenos relacionados a él.

La importancia de esta rama de la Física es evidente, ya que el agua y el aire, son los dos fluidos más abundantes en la naturaleza y que además son necesarios para los seres vivos. Entender su comportamiento para manejarlos y conservarlos es, sin duda, un asunto crucial.

Por ello, la necesidad de aprender a manejar el agua ha contribuido a que la Mecánica de Fluidos aplicada a ella, es decir, la hidráulica, se haya desarrollado para crear sistemas que permitan gestionar el valioso recurso.

## 2.2 Conceptos básicos de la hidráulica

Para poder entender los procedimientos llevados a cabo en esta tesis, se deben tener en cuenta los conceptos básicos y ecuaciones que rigen la hidráulica. Para ello, se definirán las ecuaciones para la hidráulica estática y la dinámica.

### 2.2.1 Clasificación de los tipos de flujos.

Para entender con mayor claridad los conceptos, conviene diferenciar los distintos tipos de flujos que se dan dentro de las conducciones, y que se pueden diferenciar según distintos criterios. Algunas clasificaciones de interés se harán en profundidad y otras no relevantes para el estudio y entendimiento de esta tesis se abordarán sin profundizar excesivamente en ellas.

#### 1. Clasificación atendiendo al campo de velocidades.

La **direccionalidad** de un flujo viene dada por el número de componentes de la velocidad no nulas. De uno a tres.

La **dimensionalidad** es el número de coordenadas espaciales de las que depende el campo de velocidades. Puede variar de 0 a 3.

#### 2. Clasificación según su compresibilidad.

- Fluido compresible

- Fluido incompresible. El caso que interesa para este estudio es el de estos fluidos, como el agua.

### 3. Clasificación atendiendo al régimen del flujo.

Los flujos pueden clasificarse atendiendo al régimen que se establece en su movimiento en:

- Flujo ideal (irrotacional no viscoso), en el cual se desprecia el efecto de la viscosidad (se supone viscosidad nula  $\mu = 0$ ), por lo que no existirán esfuerzos cortantes.

- Flujo no ideal. Sea laminar o turbulento, aparecen los esfuerzos cortantes y las tensiones tangenciales, por lo que la viscosidad no se puede anular.

- Flujo laminar. Las partículas se mueven a lo largo de trayectorias uniformes, en capas o láminas, con misma dirección, sentido y magnitud. Se suele dar en conducciones con bajas velocidades de flujo.

- Flujo turbulento. En este tipo de movimiento las partículas se mueven siguiendo trayectorias desordenadas, formando torbellinos. Esto se debe a una alta velocidad en el flujo, ya que existe un fuerte gradiente de velocidad entre el fluido que está en contacto con las paredes de la conducción, cuya velocidad es 0, y el centro de la conducción en la que la velocidad es máxima.

Se puede distinguir entre flujo laminar y turbulento según el número de Reynolds, un parámetro adimensional del que se hablará en el apartado 2.2.7.

### 2.2.2. Presión y ecuación fundamental de la hidrostática:

(1)

Donde:

- $P$ = Compresión existente en el seno de un fluido.
- $\gamma$ = Peso específico del fluido
- $H$ = Distancia desde el punto en el que se quiere conocer la presión hasta la línea de presión de referencia.

Lo que esta ecuación pretende demostrar que, dentro del seno de cualquier fluido, se genera una presión directamente proporcional al peso específico del fluido y a la “profundidad” a la que se encuentre el punto a calcular.

### 2.2.3. Caudal.

Se define como caudal volumétrico al volumen de fluido que atraviesa una sección (superficie) durante una unidad de tiempo. Conceptualmente implica que el caudal volumétrico se puede determinar midiendo el volumen de fluido que ha atravesado la superficie y dividiéndolo por el tiempo que ha tardado en atravesarla. Ello nos dará idea del caudal medio que ha atravesado la superficie durante el tiempo de medición.

Técnicamente se define como la integral a lo largo de la superficie; del vector velocidad del fluido por el diferencial de área:

(2)

Dónde:

- $Q$ = Caudal.
- $\vec{v}$  = Vector de velocidad del fluido.
- $dA$  = Diferencial de área.

En el caso de conducciones, asumiendo ciertas simplificaciones cuando los casos de estudio lo permitan, tales como la perpendicularidad de la velocidad del flujo al área por el que discurre, y asumiendo una velocidad constante para el momento en el que se quiere calcular el caudal, éste se puede determinar por una expresión más simplificada proveniente de la anterior:

(3)

Dónde:

- $Q$ = Caudal.
- $V_{media}$  = Velocidad media del fluido a través de la conducción.

- $S$  = Superficie de la conducción perpendicular a la velocidad del fluido.

Dimensionalmente hablando el caudal tiene unidades de volumen divididas por unidad de tiempo. En el S.I. la unidad de medida del caudal volumétrico es el  $m^3/s$ , aunque también son muy habituales las siguientes: *Litros/segundos (l/s)*, *litros/minuto (l/min o l.p.m)*, *litros/hora (l/h)*,  $m^3/min$  y  $m^3/h$ .

#### 2.2.4. Ecuación de continuidad

Esta ecuación es consecuencia del principio de conservación de la masa aplicada a los fluidos en movimiento, y dice que: la cantidad de fluido que entra por la sección de un conducto es igual a la cantidad de fluido que sale por la otra sección, siempre y cuando no existan aportes o fugas, es decir, que el flujo sea permanente.

(4)

Esta fórmula se puede simplificar asumiendo que para los fluidos incompresibles la densidad ( $\rho$ ) es constante en todos los tramos de la conducción, por lo que:

; con lo que la fórmula se simplifica a:

(5)

Donde:

- Densidad del fluido
- $A$  = Área de la sección de tubería perpendicular al vector velocidad del fluido.
- $V$  = Velocidad del fluido.

#### 2.2.5. Ecuación de la energía o de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli se fundamenta en la Ley de la conservación de la energía, *“la energía ni se crea ni se destruye, sólo se transforma”*.

En todo sistema hidráulico existen tres tipos de energía:

- La energía de velocidad.
- La energía de presión.
- La energía de posición.

La energía de velocidad es considerada a partir de la energía cinética del fluido:

(6)

A su vez, la fórmula del peso es:

(7)

Despejando:

(8)

Por lo que si se sustituye la masa (8) en la ecuación de la energía cinética (6); la ecuación quedará como:

(9)

Si se considera que W es un peso unitario, la ecuación (9) se simplifica a:

(10)

Dónde:

- $E_c$  = Energía que posee el fluido debida a su movimiento.
- $m$  = Masa del fluido.
- $v$  = Velocidad del fluido.
- $g$  = Aceleración de la gravedad.
- $W$  = peso del fluido.

La energía de presión se basa en la ecuación fundamental de la hidrostática (1), de la que se despeja “h” (altura manométrica del fluido)

(11)

La energía de posición corresponde a la energía potencial que el fluido posee por encontrarse a cierta altura. Esta depende del peso y de la altura a la que se encuentre:

(12)

Se vuelve a considerar  $W$  como un peso unitario, por lo que la ecuación se simplifica:

(13)

Dónde:

- $E_p$  = Energía que posee el fluido debido a su altura.
- $Z$  = Cota geométrica del fluido.

Una vez obtenidos todos estos términos, y teniendo en cuenta que la energía se debe conservar en cualquier tramo de la conducción; se obtiene la famosa ecuación de Bernoulli:

(14)

Dónde:

- = Pérdidas de carga o energía entre la sección 1 y la sección 2.

Comúnmente la energía de los sistemas hidráulicos se expresa *en metros de columna de agua*, o simplemente *metros*.

Si se tiene en cuenta la introducción de energía en el sistema a través de algún elemento, por ejemplo, una bomba, debe introducir ese término a la ecuación.

(15)

Dónde:

- $H_b$  = Presión de altura introducida por la bomba al sistema.

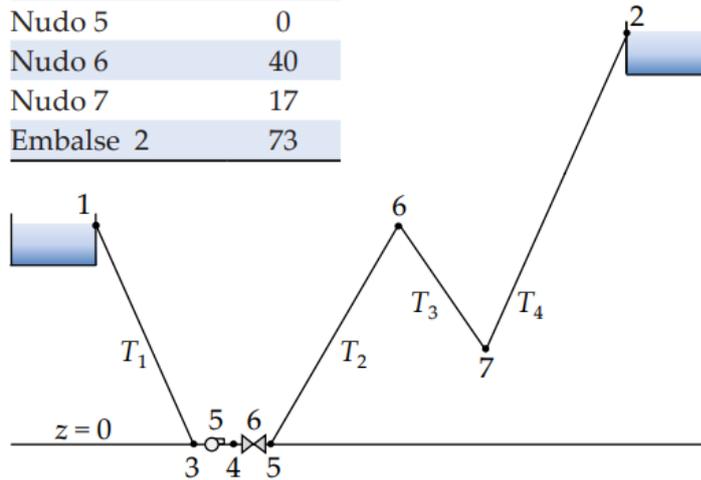
#### 2.2.6. Línea de altura geométrica y piezométrica.

En el transporte de fluidos a presión, ya se ha visto, las tres formas básicas de almacenar la energía hidráulica son: posicional, elástica (o de presión) y cinética. A la suma de las tres formas básicas de energía hidráulica se la denomina trinomio de Bernoulli. Expresada en energía por unidad de peso (unidades de longitud), es:

Así, pues, se estudian los tres modos de almacenar energía que caracterizan el flujo a presión. Y para ello se sigue su evolución a lo largo de una conducción. En primer lugar, contabilizando en cada sección recta el primero de los sumandos ( $z$ ) para así obtener *la línea de altura geométrica*. Como es lógico esa línea coincide con el eje de la conducción.

***Figura 1. Impulsión de perfil irregular***

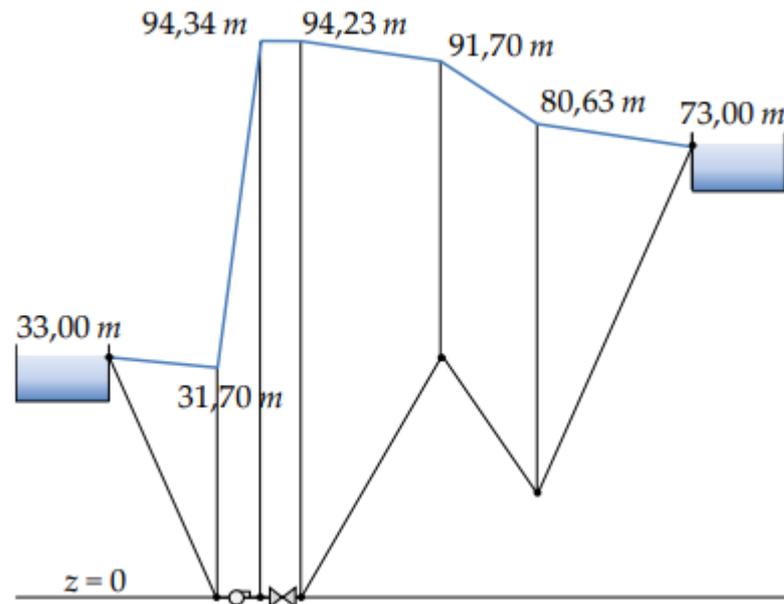
Nudo	Cota (m)
Embalse 1	33
Nudo 3	0
Nudo 4	0
Nudo 5	0
Nudo 6	40
Nudo 7	17
Embalse 2	73



Fuente: Apuntes de mecánica de fluidos. F<sup>co</sup> Javier Arregui, Enrique Cabrera, Ricardo Cobacho.

Y así (figura 1) la línea de altura geométrica del bombeo de una tubería de perfil irregular coincide con su propio trazado. Si en cada sección recta de la tubería, a la altura geométrica se le suma la altura de presión del fluido en su eje, se irá obteniendo la *altura piezométrica* ( $H = z + p/\gamma$ ) de la tubería. Se la denomina de este modo porque es la altura hasta la que ascendería el agua en un piezómetro (tubo vertical) montado en cada una de las secciones rectas de la tubería.

Figura 2. Línea de alturas piezométricas.



Fuente: Apuntes de mecánica de fluidos. F<sup>co</sup> Javier Arregui, Enrique Cabrera, Ricardo Cobacho.

### 2.2.7. Número de Reynolds.

Se trata de un número adimensional, cociente entre las fuerzas de inercia (predominante en el flujo turbulento) y viscosas (predominante en el flujo laminar):

(17)

Dónde:

- $V$  = Velocidad del fluido.
- $L$  = Longitud característica (Diámetro para el caso de tuberías circulares).
- $\nu$  = Viscosidad cinemática.

Los flujos con  $Re \leq 2000$  pueden considerarse flujos laminares, mientras los que tienen un  $Re \geq 4000$  serán turbulentos. Existe una zona de transición para  $2000 \leq Re \leq 4000$  en la que no se puede determinar el tipo del flujo, ya que depende de las influencias externas.

Como se puede observar, una mayor velocidad del flujo puede provocar un régimen turbulento, y a su vez los fluidos con mayor viscosidad cinemática podrán circular a mayores velocidades con menos peligro de crear turbulencia.

#### 2.2.8. Pérdidas de carga.

En los sistemas hidráulicos a presión, se producen pérdidas de energía, ya que, al igual que todos los demás sistemas, no funcionan de manera ideal, por lo que parte de la energía se disipa debido a cambios en el flujo, y mayoritariamente, por fricción. Las pérdidas por fricción son las más importantes a tener en cuenta en una conducción. Esto dependerá de varios factores, tales como el caudal, la velocidad, las dimensiones de la tubería (tanto diámetro como longitud) y el material del que esté compuesto esta conducción, en especial de su rugosidad.

También depende de las características del fluido, pero como en este caso se abordará todo el planteamiento para agua, estas características se mantendrán constantes. Aunque la mayoría de las pérdidas se producen por fricción, existen pérdidas menores en accesorios, como válvulas, cambios de sección, cambios de dirección de la conducción...

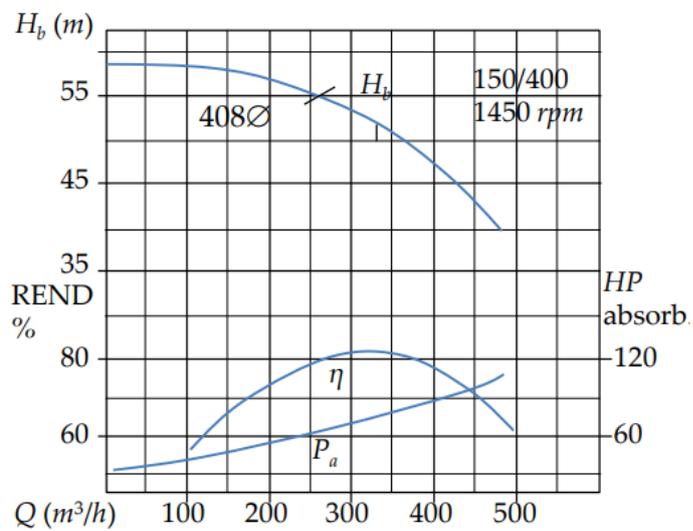
Debido a la naturaleza de este estudio, en el que se simula el sistema en un software, conviene conocer que existen pérdidas de carga en el sistema, pero no profundizar en sus fórmulas.

#### 2.2.9 Bombas hidráulicas.

Las bombas hidráulicas son el elemento que permite añadir energía a una conducción, lo que permite impulsar líquido, agua en la mayoría de los casos, de una cota más baja a una más alta. Estas máquinas convierten la energía mecánica que reciben del motor eléctrico que las arrastra y la transforman en hidráulica. Su comportamiento se puede definir a través de sus dos curvas características más relevantes. De una parte, la que relaciona el caudal con la altura que genera  $H_b = H_b(Q_b)$  y de otra la que, conocido el caudal que trasiega, nos indica cuál es su rendimiento  $\eta = \eta(Q_b)$ .

En la figura 3 se pueden observar estas 2 importantes curvas, para un diámetro de rodete y una velocidad nominal dados, además de la que muestra la potencia absorbida por la bomba.

**Figura 3. Curvas características de una bomba.**



*Fuente: Apuntes de mecánica de fluidos. Fco Javier Arregui, Enrique Cabrera, Ricardo Cobacho.*

Estas curvas tienen una forma determinada:

- Para la curva de altura  $H_b - Q$ :
- Para la curva de rendimiento  $\eta - Q$ :

Estas curvas y gráficos son proporcionadas por los fabricantes de bombas, por lo que son datos ya proporcionados previamente para realizar los cálculos, además de servir para la elección de las bombas.

## Capítulo 3. Fenómenos transitorios.

### 3.1 Introducción

Las instalaciones hidráulicas están sometidas a 2 tipos de estados distintos:

- Régimen permanente. En él, el flujo es invariable con el tiempo. Esto supone que las presiones que se producen en el sistema sean constantes, predecibles y directamente calculables

- Régimen transitorio. Se produce cuando ocurren cambios en el flujo. Esto se da cuando en el sistema se producen cambios en el funcionamiento de ciertos elementos. Lo que caracteriza a este tipo de estado es que se las alteraciones del flujo hacen variar las presiones del sistema, con su consistente riesgo hacia la instalación.

Es este último estado el que se tratará aquí, debido a que en caso de que ocurra, puede ser el más problemático para la instalación, por lo que debemos conocer los casos que pueden producirlo y analizar las distintas alternativas que se plantean para evitar sus efectos, así como conocer su magnitud a través de las simulaciones y los cálculos necesarios para obtener una fiel imagen del sistema en estos casos.

Para la mayoría de los sistemas de transporte de fluidos a presión, las presiones máximas y mínimas se dan principalmente durante los transitorios hidráulicos.

Los transitorios hidráulicos son estados de cambio entre dos situaciones de equilibrio y son causados por perturbaciones que modifican la presión y el caudal en el sistema. Estas perturbaciones incluyen la parada de bombas por corte inesperado de energía (blackout), el arranque de bombas, la apertura o cierre de válvulas, cambios en la demanda, etc. Los cambios de velocidad en la tubería generados por alguno de los eventos anteriormente mencionados se traducen en cambios de presión que se desplazan por todo el sistema de tuberías en forma de ondas y a la velocidad del sonido. Estas ondas de presión, si no son controladas o tenidas en cuenta, pueden producir daños en el sistema.

El estudio de los transitorios hidráulicos, generalmente no recibe la atención que se merece, a pesar de que las presiones positivas y negativas que ocurren durante los transitorios hidráulicos se sobre imponen a las presiones de operación en régimen permanente.

Algunas de las consecuencias frecuentes de este tipo de eventos son:

- Presiones máximas en el sistema, como principal consecuencia.
- Presiones relativas negativas, que, en caso de alcanzar la tensión de vapor del agua, pueden producir condiciones de vacío localizadas, lo que produciría cavitación.
- Vibraciones hidráulicas en la tubería.

**Figura 4. Ejemplo de falla en tubería por sobrepresión.**



*Fuente: "Modeling of hydraulic transients in closed conduits. Thesis by Ali El-Turki"*

**Figura 5. Ejemplo de falla en tubería por presiones negativas.**



*Fuente: <https://ukdnwaterflow.co.uk/pipe-jacking-solution-solves-culvert-collapse/>*

Todos estos efectos se podrán observar y calcular a través del estudio de golpe de ariete, aunque esta tesis se centrará en las presiones máximas y mínimas, por lo que no se considerarán las vibraciones hidráulicas.

## 3.2 Estudio del golpe de ariete

### 3.2.1 Introducción

El objetivo del estudio de golpe de ariete consiste en calcular y conocer las presiones máximas y mínimas en todos los puntos del sistema a lo largo de un determinado periodo de tiempo, ya que estas ondas de presión que ocurren durante los transitorios hidráulicos se van disipando en el tiempo por acción de la fricción de la tubería.

El desplazamiento y superposición de ondas transitorias de presión en sistemas de tuberías causadas por eventos como parada de bombas o cierre de válvulas se debe estudiar mediante modelación matemática. Los dos métodos que se aplican para estudiar estos fenómenos son: uno de base Euleriana y el otro Lagrangiano.

El enfoque Euleriano consiste en resolver las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales de continuidad y momento y actualiza el estado hidráulico del sistema en puntos fijos a medida que el tiempo avanza en incrementos uniformes.

El enfoque Lagrangiano rastrea el movimiento y la transformación de las ondas de presión y actualiza el estado hidráulico del sistema en intervalos fijos o variables ante la ocurrencia de cambios.

Desde el punto de vista matemático es un problema muy complejo, pero existen programas computacionales de modelación hidráulica en régimen no permanente o golpe de ariete que utilizan uno u otro método que nos permiten evitar la resolución matemática. Ambos métodos tienen un nivel de precisión similar, aunque el método Lagrangiano es computacionalmente más eficiente a la hora de estudiar redes extensas de distribución de agua, por lo que actualmente es más efectivo estudiar estos fenómenos a través de estas herramientas

### 3.2.2 Jukowsky

El ingeniero ruso Nikolái Zhukovski (JOUKOWSKI) estableció a principio del siglo pasado la siguiente relación o ecuación:

(18)

Donde:

- $\Delta H$  es el cambio de presión ocurrido como consecuencia de un determinado cambio de velocidad  $\Delta V$  del fluido.
- $C$  es la celeridad de la onda de presión, es decir, la velocidad con la que se desplaza el cambio de presión al resto del sistema.
- $g$  es la aceleración de la gravedad.

El valor de C depende de la densidad del agua, del espesor y diámetro de la tubería, y de los módulos de elasticidad del agua y del material de la tubería. Para materiales rígidos como el acero o el hierro dúctil el valor de C ronda los 1.000 m/s, para materiales plásticos, con más elasticidad como el PVC o el polietileno, alrededor de 300 m/s. La ecuación de Joukowski se encuadra dentro del método de resolución Lagrangiano.

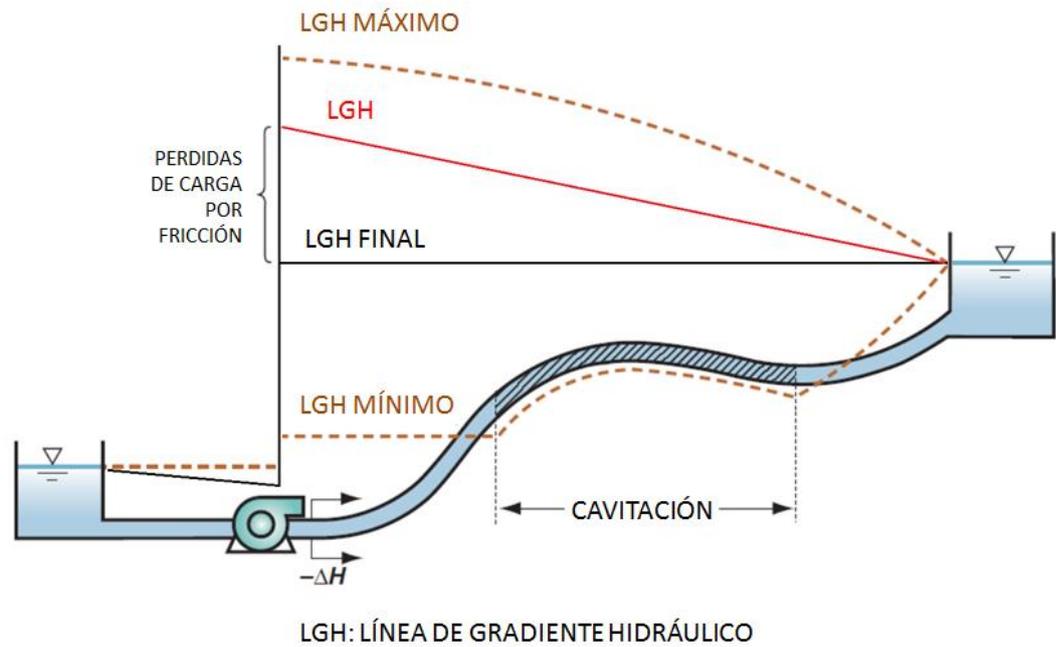
### 3.2.3. Separación de la columna de agua y cavitación.

No solo las altas sobrepresiones son las que preocupan, ya que se pueden producir presiones muy bajas. Cuando ocurre una parada de bomba, por ejemplo, por corte de energía, dependiendo de la geometría de la tubería, la presión puede caer por debajo del valor atmosférico alcanzando la presión de vapor. Cuando en un punto del sistema se alcanza la presión de vapor, se da el efecto de separación de la columna de agua. Se produce una cavidad de vapor, y cuando se vuelve a comprimir, la cavidad de vapor colapsa generando sobre presiones extremadamente elevadas. Por este motivo es de vital importancia evitar que se produzca la separación de la columna de agua.

En la siguiente figura, se observa gráficamente lo que ocurre con las presiones en un transitorio, que se traducen tanto en una sobrepresión positiva como una negativa. En este caso la línea de gradiente hidráulica, también como línea de alturas

piezométricas, se encuentra en su componente negativa bajo la altura geométrica de la tubería, lo que provoca presiones negativas.

**Figura 6. Parada de bomba.**

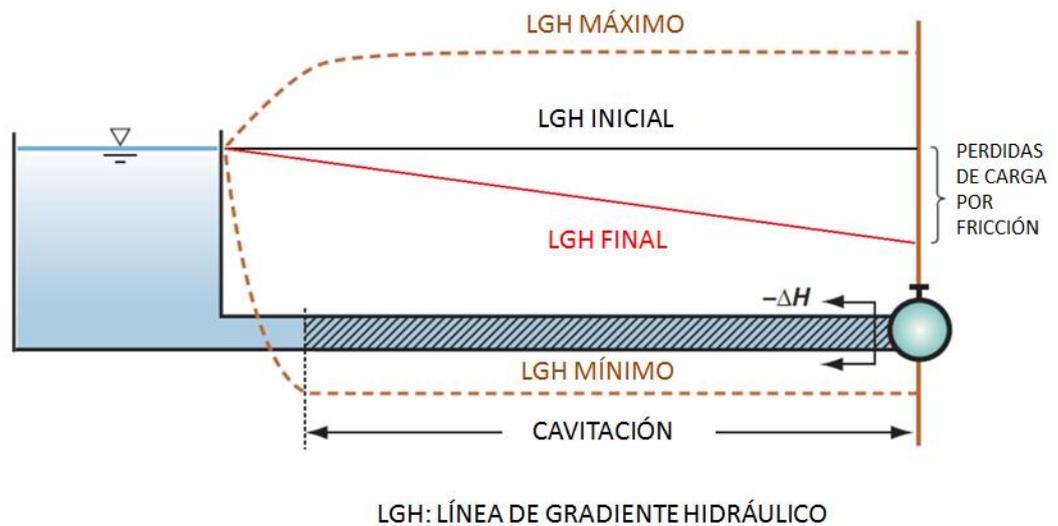


Fuente: <http://eselagua.com/2016/11/08/estudio-de-golpe-de-ariete-esencial-para-el-buen-diseno-de-sistemas-de-transporte-de-fluidos-y-redes-de-tuberias-parte-1/>

En rojo se observa la Línea de Gradiente Hidráulico (LGH), son las presiones del sistema durante su operación continua o en régimen permanente. En negro el LGH final, escenario de presión estática que encontrará el sistema después de disipar por fricción las presiones transitorias (la diferencia entre LGH FINAL y LGH en el eje Y representan las pérdidas de carga de la operación del sistema en régimen permanente).

A continuación, se muestra otro ejemplo de envolventes de presiones para un transitorio hidráulico generado por la operación de una válvula:

**Figura 7. Apertura de válvula.**



Fuente: <http://eselagua.com/2016/11/08/estudio-de-golpe-de-ariete-esencial-para-el-buen-diseno-de-sistemas-de-transporte-de-fluidos-y-redes-de-tuberias-parte-1/>

Ante una apertura abrupta de válvula, la caída de presión aguas arriba de la válvula se propaga hacia la reserva, si la caída de presión alcanza la presión de vapor del líquido, se formará una cavidad de vapor. En el caso de un cierre repentino de válvula, la caída de presión se produce aguas abajo de la válvula y la onda negativa de presión se propaga aguas abajo al resto del sistema.

#### 3.2.4. Casos susceptibles de sufrir eventos transitorios.

Los transitorios se producen cuando ocurren cambios rápidos de velocidad en el fluido. Las causas más comunes son:

- Arranque o parada de una bomba.
- Apertura o cierre de una válvula
- Reventón de una tubería.

En este estudio, se estudiará el caso de la parada repentina de una bomba, ya que es el menos controlable.

#### 3.2.5. Elementos de protección ante transitorios.

Los efectos de los transitorios pueden ser muy perjudiciales, pero por suerte, existen métodos, tanto directos como indirectos para reducirlos e intentar evitarlos.

Algunos de estos métodos son:

- Instalación de volantes de inercia en el eje de la bomba. Aumentar la inercia de la bomba permite que, en caso de corte de suministro, la parada de la bomba sea más lenta, y por tanto la máxima sobrepresión producida en este caso de transitorios sea menor a la que se produciría con una parada instantánea.

- Instalación de válvulas de cierre lento y programado. Como uno de los casos que puede ser susceptible de provocar efectos transitorios es el de un cierre rápido de válvula, un método para evitarlo es instalar este tipo de válvulas que aseguran siempre un cierre lento.
- Instalación de depósitos hidroneumáticos. Este método se considera indirecto, hay que reduce los efectos producidos por el transitorio, pero no intenta evitar estos efectos. Es una de las soluciones más utilizadas, ya que permite suministrar agua al sistema para la sobrepresión negativa, mitigando así el efecto de la cavitación, y puede admitir agua y reducir el impacto de la sobrepresión cuando se comprime el aire que se encuentra en su interior. Existen varios tipos de depósitos: De membrana, sellados, con ventosa, *“hydroball”*...
- Ventosa hidráulica. Este dispositivo utilizado como elemento de protección indirecto, se compone normalmente de 2 orificios y una o varias boyas, que permiten la entrada de aire en caso de presiones negativas para así evitar que se produzca cavitación en las zonas que se aproximan a la tensión de vapor, y también permiten la evacuación del aire de la tubería, algo primordial ya que la acumulación de aire en las tuberías puede multiplicar las presiones en los transitorios, y es un gran peligro.

# Capítulo 4

## 4.1. Consideraciones previas.

Para la realización de este proyecto, se ha considerado que las condiciones para la realización del modelo deben basarse en el proyecto propuesto por el DOH, por lo que la misión será modelar ese sistema y verificarlo.

Como elementos principales del proyecto (Bombas y depósito hidroneumático) se implementarán los propuestos en las cotizaciones. (Cotización bomba **Anexo 1**; cotización depósito hidroneumático **Anexo 2**)

Las dimensiones y materiales de las tuberías se obtendrán de los planos proporcionados por el DOH, en concreto del plano 1 (**Anexo 3**), en el que se evidencia que hay 3 tipos de tuberías, que tienen las siguientes características:

- Tuberías desde la entrada de agua hasta el colector: Tubería de Acero A-53 con diámetro= 16'' (406,4 mm) (Detalle **1.4 de Plano 1**)
- Colector (Manifold): Tubería de Acero A-134 con diámetro = 1000 mm; espesor = 10 mm (Detalle **1.1 de Plano 1**)
- Impulsión principal hasta el canal: Tubería de HDPE PN6 con diámetro = 1000mm (Detalle **1.2 de Plano 1**)

Las cotas se obtienen también desde los siguientes planos:

- Plano 5 (Anexo 4)
- Plano 7 (Anexo 5)

Algunos datos de interés se han obtenido del informe propuesto por el Departamento de Obras Hidráulicas (DOH) (Anexo 6)

Se despreciarán las pérdidas menores en los elementos, y solo se tendrá en cuenta las pérdidas por rozamiento que considere el software.

Se considerará el caudal en el punto de funcionamiento, y no en el de diseño, lo que no supone problemas ya que al ser algo superior al de diseño, se trata de un caso más extremo por lo que se calculará del lado de la seguridad.

Para el cálculo de la velocidad de la onda de presión, al ser la longitud de las tuberías de 16'' despreciable respecto a las demás, se considerará igual a la calculada para el manifold.

## **4.2. Simulación del sistema sin protección en el software.**

Para este proyecto, se ha elegido como método de estudio del sistema su simulación el software especializado en este tipo de cálculo, y antes las 2 alternativas posibles, en el apartado anterior ya se designó Hammer como el programa a utilizar.

Para ello, se aprenderá a utilizar dicho software a través del tutorial que se encuentra dentro del mismo, que, aunque en idioma inglés, es bastante explicativo y propone un ejemplo práctico para seguir como entrenamiento.

Debido a las similitudes entre el modelo a estudiar y el ejemplo del tutorial, se puede seguir con los mismos pasos en el tutorial para la realización del modelo del sistema.

Se debe aclarar que, para simularlo en el software, el modelo será simplificado respecto al real, es decir, se respetarán distancias aproximadas de tuberías, material y dimensiones de estas, bombas y sus características, cotas y elementos significativos como las válvulas check, pero se despreciarán accesorios que no intervienen significativamente en el funcionamiento ante transitorios del sistema. También se simplificará por simetría, ya la impulsión consta de 2 sistemas paralelos idénticos, por lo que sólo modelaremos una parte, que consiste en 4 de las 8 bombas, con sus correspondientes sistemas de tuberías y demás elementos.

El sistema se modelará para el caso más crítico y exigente, cuando el nivel de agua en el Rio Claro es el mínimo (61m) y el nivel de las aguas del canal Pencahue es de 103, m.s.n.m.

Estos valores se han extraído del informe propuesto por el DOH **Inf.Fin-Cap7-14v3** que cita:

“La condición menos favorable corresponde a tener en el río Claro el nivel mínimo de operación permitido (cota 61 m.s.n.m.) y al mismo tiempo en el canal Pencahue la altura máxima permitida para evitar el rebase (cota 103,24 m.s.n.m.)”

Primero, se modelará el sistema sin elementos algunos de protección ante transitorios (Depósito hidroneumático) y más tarde será modelado con el depósito hidroneumático propuesto por la empresa que ofrece las cotizaciones y que realizó el estudio previo, así se comprobará si este elemento de protección es válido para el sistema, o se debe proponer otro.

En primer lugar, se abre el programa para familiarizarse con él. Para este caso, se puede ver que es posible modelar reservas de agua, bombas, tuberías, uniones y válvulas check. Para realizar primer modelo, es lo único que se necesita.

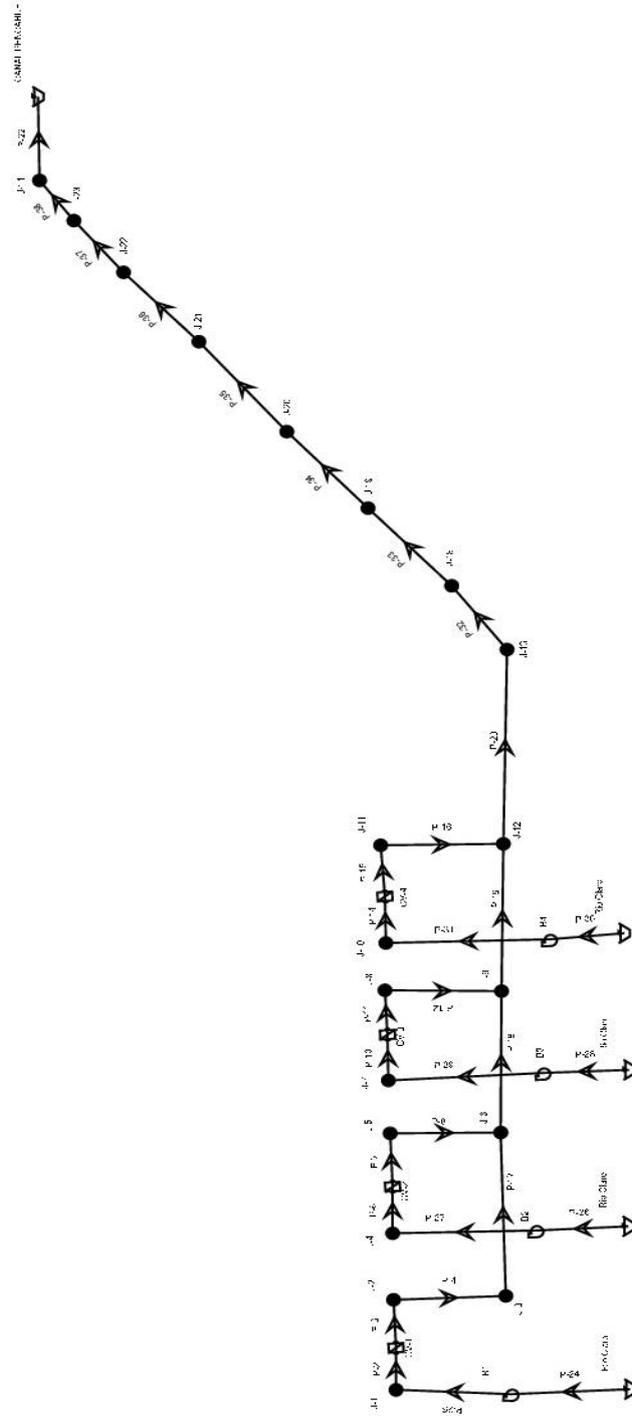
El siguiente paso será configurar el programa. Se designan las unidades de trabajo, como longitudes de las tuberías y cotas en metros, diámetros en milímetros, inercia en , y caudal en .

Posteriormente, se debe dibujar esquemáticamente de forma sencilla el sistema, con cada elemento donde corresponde. Más tarde se le añadirán las características, como cotas, longitudes, propiedades, etc....

Con el dibujo esquemático inicial quedaría algo parecido a esto:

Figura 8. Dibujo esquemático del sistema en el software.

**Scenario: Base**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Se ha respetado la nomenclatura del software para nombrar a los elementos tubería y uniones, pero se han renombrado:

- Las bombas, en orden: B1, B2, B3, B4
- Los depósitos, que simulan los puntos de origen y destino del agua: Rio Claro y Canal Pencahue

Se ha dividido la impulsión principal de HDPE en tramos más pequeños, entre los cuales todos suman la longitud total, debido a que la longitud de todas las tuberías no debe ser muy diferente, ya que el software puede producir errores.

Una vez modelado el sistema, de los planos sobre la instalación, así como de los informes, se obtendrán las dimensiones y materiales de la instalación. De los planos se deducen los diámetros de las tuberías, así como la longitud y sus materiales.

Uno de los primeros pasos que se deben realizar es el de modelar la bomba, a partir de sus curvas Altura-Caudal, curvas de rendimiento y sus datos de inercia.

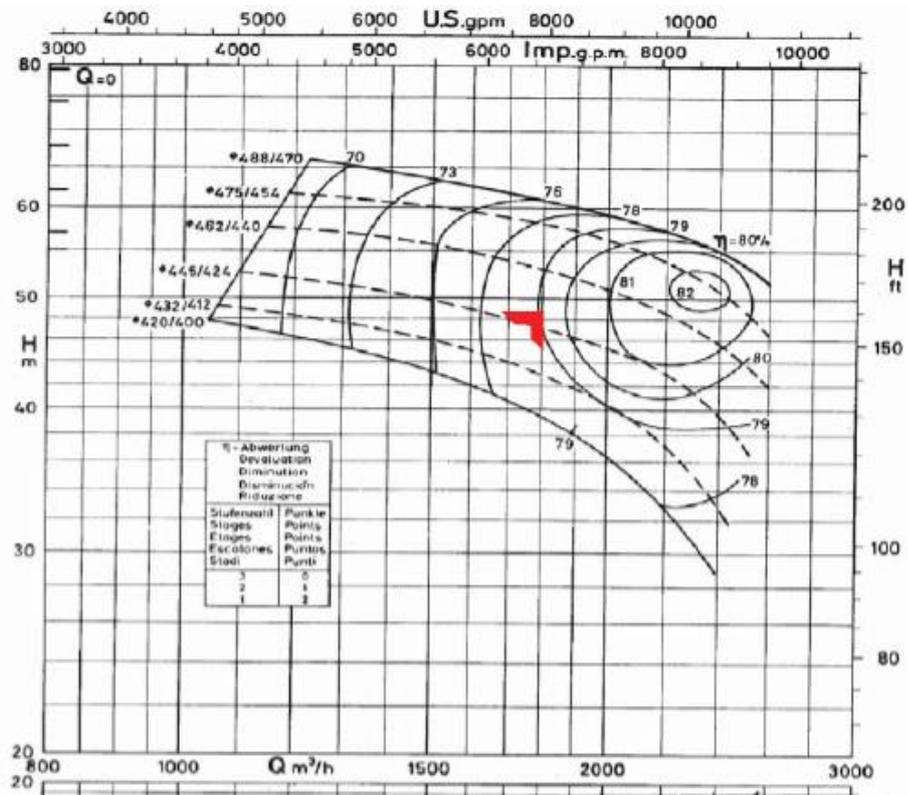
Para ello, dentro de Hammer, hay que dirigirse al menú *Components>Pump definitions*. Haciendo click en el icono de una hoja de papel en blanco (*New*) se crea una nueva definición de bomba.

Una vez aquí, en la pestaña *Head* el programa nos muestra la opción de definir la curva Altura-Caudal de nuestra bomba. Para ello, dentro de *Pump definition type* se elige la opción *Multiple point*, esta opción permite definir la curva a partir de varios

puntos de la bomba, en los que se debe introducir el caudal en cada punto con su correspondiente altura de presión de agua. A partir de la cotización de la bomba del proyecto (DWT B-PUMP B24B/1), en la que aparecen sus curvas características, se extraerán los datos para los siguientes caudales:

- 1300
- 1500
- 1800
- 2000
- 2200

**Figura 9. Curva H-Q para la bomba DWT B-PUMP B24B/1**



Fuente: Cotización KSB bomba DWT B-PUMP B24B/1.

**Figura 10. Relaciones Caudal (L/s) – Presión/altura de agua (m.c.a)**

	Flow (L/s)	Head (m)
1	361	51,80
2	416	50,00
3	500	47,00
4	555	45,00
5	611	43,00
*		

*Fuente: Bentley Hammer.*

A partir de estos datos, el programa calcula la curva de Altura-Caudal. Para crear la curva de rendimientos, se debe seguir la misma lógica y desde la pestaña *Efficiency* introduciendo los datos de rendimiento para los caudales mencionados anteriormente.

**Figura 11. Relaciones Caudal (L/s) – Rendimiento (%)**

	Flow (L/s)	Efficiency (%)
1	361	72,5
2	416	76,0
3	500	79,0
4	555	80,5
5	611	80,5
6	0	0,0
*		

*Fuente: Bentley Hammer.*

Por último, en la pestaña *Transient*, se introducen los datos de inercia del conjunto bomba + motor, ya que no se dispone de ellos, el software permite calcular una inercia aproximada del conjunto a partir de la potencia y la velocidad nominal de

la bomba. Como sí se dispone de esos datos, se introducen al programa y este calcula la inercia que tendrá en cuenta para el estudio de transitorios.

El siguiente paso será introducir en el modelo el resto de los datos, como cotas de las uniones entre tuberías, longitudes de estas tuberías, diámetros y su material.

El programa ofrece una serie materiales, pero no se encuentran entre ellos los materiales a utilizar en la instalación, por lo que se deben crear. Para ello, en la interfaz principal, se debe hacer click en *Components>Engineering libraries* y con el botón *New* se creará una nueva librería con los materiales a utilizar. Se añaden los siguientes materiales:

- Acero A134
- Acero A53
- HDPE

Se deben asignar características a los materiales, para que el software pueda tenerlas en cuenta a la hora de los cálculos.

Para introducir el resto de los datos en el modelo, el software posee una herramienta bastante útil llamada *Flex tables*, en las que permite modificar los datos de cada elemento por categorías.

Primero, se abre la tabla de uniones (*joints*), en la que se deben introducir las cotas de cada punto. Estas se pueden obtener directamente de los planos.

Posteriormente en la tabla de tuberías (*pipes*), se modificará la longitud, el diámetro, el material y la velocidad de la onda de presión.

La velocidad de la onda de presión se deberá calcular en base al material y dimensiones de cada tubería. Para ello se utilizará la fórmula de Allievi, que dice lo siguiente: “La velocidad del frente de se determina según la siguiente fórmula:

(19)

En la que:

a = Velocidad de la onda. Se la conoce como **celeridad**.  
(m/s)

K = Coeficiente característico del material.

D = diámetro medio de la tubería.

e = espesor de la pared de la tubería en la misma unidad que el diámetro.

Los valores usuales del coeficiente K se dan en la siguiente tabla:”

**Figura 12. Valores de K para distintos materiales**

Material	K
Acero	0.5
Hierro dulce	0.5
Fundición de hierro	1
Hormigón armado	5
Fibrocemento	4
Polietileno o PVC	33.3

*Fuente: "Golpe de Ariete. Edmundo Varas B. y Hamil Uribe"*

Se calculará la velocidad de la onda de presión para el manifold y para la tubería de impulsión principal.

- Manifold: El valor de K será = 0,5 debido a que está fabricada de acero.  
= 998,5 m/s; que a la hora de introducir al software se redondeará a 1000 m/s
- Impulsión principal: El valor de K será = 33,3 debido a que está fabricada de Polietileno de Alta Densidad (HDPE)  
= 325 m/s

Con estos cálculos, ya se podrá introducir en la tabla de tuberías todos los datos que exige el programa.

Una vez introducidos todos estos datos en el software, se puede comenzar a realizar simulaciones. Para ello, primero se deben configurar las opciones de simulación.

Primero, desde los ajustes de la bomba, en el apartado *Transient (Operational)*, se debe configurar el tipo de funcionamiento de la bomba para transitorios (*pump type*) como *Shut Down After Time Delay*, lo que significa que la bomba se detiene después del periodo de tiempo estipulado, al que en el apartado *Time (Delay until Shut Down) (sec)* le asignará un valor de 1 segundo. Como diámetro se estipulará un valor de 400 mm, igual al de la tubería de salida de la bomba, y como tipo de válvula para la bomba, en *Pump Valve Type* se elegirá la opción *Check Valve*. Se deben elegir estas mismas opciones para cada una de las 4 bombas que componen la instalación.

**Figura 13. Configuración de la bomba para transitorios.**

☐ <b>Transient (Operational)</b>	
Pump Type (Transient)	Shut Down After Time Delay
Diameter (Pump Valve) (mm)	400,0
Time (Delay until Shut Down) (sec)	1,0
Pump Valve Type	Check Valve

*Fuente: Bentley Hammer.*

También se deben establecer en el programa las opciones para los cálculos de transitorios. Desde el menú *Analysis, Calculation Options*, dentro de la pestaña *Transient Solver* se elige la opción *Base Calculation Options*.

Una vez aquí, el programa ofrece los distintos parámetros que se pueden modificar según las necesidades de cálculo, pudiendo así variarlos en función de la precisión de cálculo que se desee, así como de las condiciones de borde del problema.

Se puede definir el tipo de duración de la simulación, en la opción *Run Duration Type*, en el que se elegirá la opción *Time*.

Una vez definido el tipo de duración como tiempo, se debe especificar tanto el tiempo de duración de la simulación (*Run Duration (Time) (Sec)*); en el que se insertará el valor de 120 segundos, como el intervalo de tiempo (*Time Step Interval (sec)*), para el cual se definirá un valor de 0.001 segundos.

El resto de las opciones se dejarán tal y como el programa las ha definido por defecto.

**Figura 14. Configuración de las opciones de cálculo para transitorios.**

☐ Summary	
Is User Defined Time Step?	True
Time Step Interval (sec)	0,001000
Run Duration Type	Time
Run Duration (Time) (sec)	120,0
Pressure Wave Speed (m/s)	1.250,00
Vapor Pressure (m H2O)	-10
Wave Speed Reduction Factor	1,000
Decrease Time (sec)	0,1
Increase Time (sec)	3,0
Generate Animation Data?	True
Calculate Transient Force?	False
Run Extended CAV?	False
Flow Tolerance (L/s)	0
Round Pipe Head Values?	False
Initialize Transient Run at Time (hours)	0,000
Specify Initial Conditions?	False

*Fuente: Bentley Hammer*

El siguiente paso por realizar es el de crear perfiles, en los que más tarde se podrá realizar el estudio y mostrar sobre ellos los datos obtenidos. Para ello, desde *View- Profiles* se debe crear un nuevo perfil. Haciendo click en *New, Select From Drawing* se elige el punto inicial y final del perfil que se quiere designar. Para este caso, se crearán 4 perfiles, comprendidos cada uno desde la salida de la bomba hasta el canal. El perfil debe quedar como la tabla 9:

**Figura 15. Perfil de la instalación desde una de las bombas hasta el canal Penciahue.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Una vez definidas todas las consideraciones previas y condiciones de simulación, es hora de ejecutar el análisis. Para ello, se debe hacer click en el botón *Compute*. Después de un tiempo necesario para el cálculo, que será dependiente del tiempo de la simulación y de el intervalo de tiempo especificado. Después de este tiempo, aparece un mensaje de resumen de cálculo, así como un informe de errores e informaciones, que pueden ser útiles para corregir parámetros que no sean del

todo compatibles con la simulación. Uno de los errores frecuentes suele ser la falta de precisión de los cálculos debido al intervalo de tiempo propuesto por el usuario, lo que implica que hay que disminuirlo para obtener una mayor precisión y que el software no tenga problemas.

Una vez realizada esta simulación, se guardará el modelo sin protección junto con sus datos correspondientes, que se analizarán en el capítulo 5 correspondiente a resultados.

### 4.3. Implementación del elemento de seguridad en el modelo.

Como el propósito de este estudio es verificar el elemento de protección ante transitorios propuesto en las cotizaciones, en este caso un depósito hidroneumático, además de comparar la situación sin protección ante la situación con este elemento, se debe realizar el modelo que contenga este elemento.

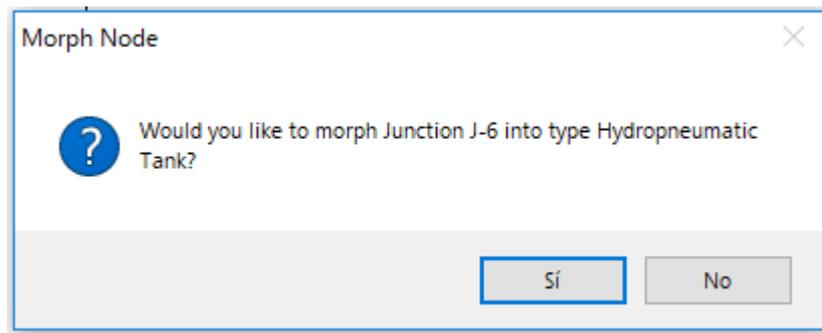
El depósito hidroneumático a añadir será el propuesto inicialmente en el diseño de la instalación, el depósito Koslan Tk-EGA-V6000L-10BAR-A36-Compresor, cuyas características se encuentran en la cotización del mismo ( Anexo 2).

Ya que en la instalación no cambia nada más que la adicción de este elemento se puede añadir al modelo ya existente sin protección, lo que simplifica mucho el trabajo.

Para ello, se realiza una copia del modelo anterior sin protección, al que se renombrará para poder guardarlo y mantener ambas versiones.

En el programa, seleccionando el icono de construcción de tanques hidroneumáticos , solicitará un punto de posicionamiento de este, a lo que se deberá seleccionar la unión que representa el inicio del manifold. El programa preguntará si se desea fusionar la unión con el tanque hidroneumático, a lo que se debe elegir que sí.

**Figura 16. Fijación de tanque hidroneumático a una unión del sistema.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Una vez fijado el depósito hidroneumático al sistema, se deben establecer sus condiciones de funcionamiento, para lo cual se debe acceder a su menú de configuración.

En él, se aprecian las siguientes configuraciones:

**Figura 17. Opciones de configuración de tanques hidroneumáticos.**

<b>Operating Range</b>	
Elevation (Base) (m)	71,50
Operating Range Type	Elevation
HGL (Initial) (m)	171,50
Liquid Volume (Initial) (L)	1.500,0
<b>Operational</b>	
Controls	<Collection>
<b>Physical</b>	
Elevation (m)	71,50
Zone	<None>
Volume (Tank) (L)	6.000,0
Tank Calculation Model	Gas Law Model
Atmospheric Pressure Head (m)	10,33
Treat as Junction?	True
<b>Transient (Physical)</b>	
Hydropneumatic Tank Type	Sealed
Diameter (Tank Inlet Orifice) (mm)	254,0
Ratio of Losses	2,500
Gas Law Exponent	1,200
Has Bladder?	False
Volume of Gas (Initial) (L)	4.500,0
Minor Loss Coefficient (Outflow)	1,000
Elevation Type	Fixed

*Fuente: Bentley Hammer*

Para el caso de este estudio, modificaremos los siguientes valores:

- Cota (*Elevation*): Se configurará una altura de 71.5 metros, igual a la altura del manifold.
- Tipo de cálculo para el tanque (*Tank Calculation Model*): Se selecciona *Gas Law Model* para que el programa calcule las presiones internas según la ley de los gases ideales, ya que la presión más importante será la del aire.
- Tipo de tanque hidroneumático (*Hydropneumatic Tank Type*): Ya que el tanque a utilizar es un tanque sellado, se debe elegir la opción *Sealed*.

- Diámetro de entrada del tanque (*Diameter (Tank inlet orifice)*): Para el diámetro de entrada del tanque, se especifica en la cotización correspondiente al mismo, que su entrada se compone de una tubería de 10'', que convertidas a milímetros sería 254 mm.

- ¿El tanque posee membrana? (*Has Bladder?*): Ya que el depósito propuesto no tiene membrana, a esta pregunta se deberá seleccionar la respuesta NO.

- Presión en metros de columna de agua, definida con el gradiente hidráulico (*HGL*): Aquí se debe indicar la presión inicial del depósito, la cual será la que contenga el aire en su interior. Esta se conoce gracias a la cotización del depósito (**Anexo 2**). En ella se especifica que la presión aportada al depósito en condiciones normales de uso a través del compresor será de 10 Bar. Para transformar esta presión a metros de columna de agua es necesaria una sencilla conversión. Asumiendo que: 1 Bar = 10 m.c.a:

(20)

La presión calculada corresponde a la presión dentro del depósito. Como el programa exige la presión expresada en gradiente hidráulico, para ello se debe sumar la cota o elevación, que en este caso son 71.5 metros, por lo que el *HGL* a introducir será de 171.5 metros.

- Volumen del tanque (*Volume (Tank)*). Según aparece en la cotización de este (**Anexo 2**); el volumen será de 6000 Litros.

- Volumen del líquido inicial. (*Liquid volumen (initial)*) y volumen de aire inicial (*Volume Of Gas (initial)*). Dado que ni en la cotización del depósito ni en los informes especifica un volumen inicial de agua y de aire, se deberán hacer unas cuantas pruebas e hipótesis.

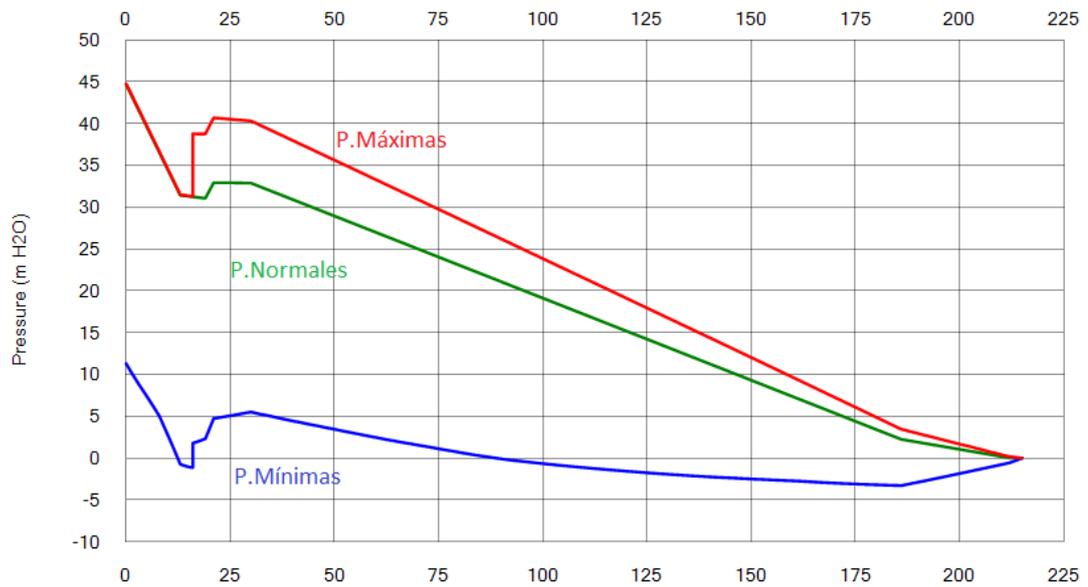
El volumen total del tanque es de 6000 litros, por lo que la suma de los volúmenes de agua y aire. Para estipular un volumen óptimo de ambos fluidos, se harán varias simulaciones en el software y se determinará la más eficiente.

Para ello, se supondrán 3 casos:

- 25 % Aire y 75% de agua, lo que corresponde a 1500 y 4500 Litros respectivamente.
- 50 % Aire y 50% de agua, lo que corresponde a 3000 y 3000 Litros respectivamente.
- 75 % Aire y 25% de agua, lo que corresponde a 4500 y 1500 Litros respectivamente.

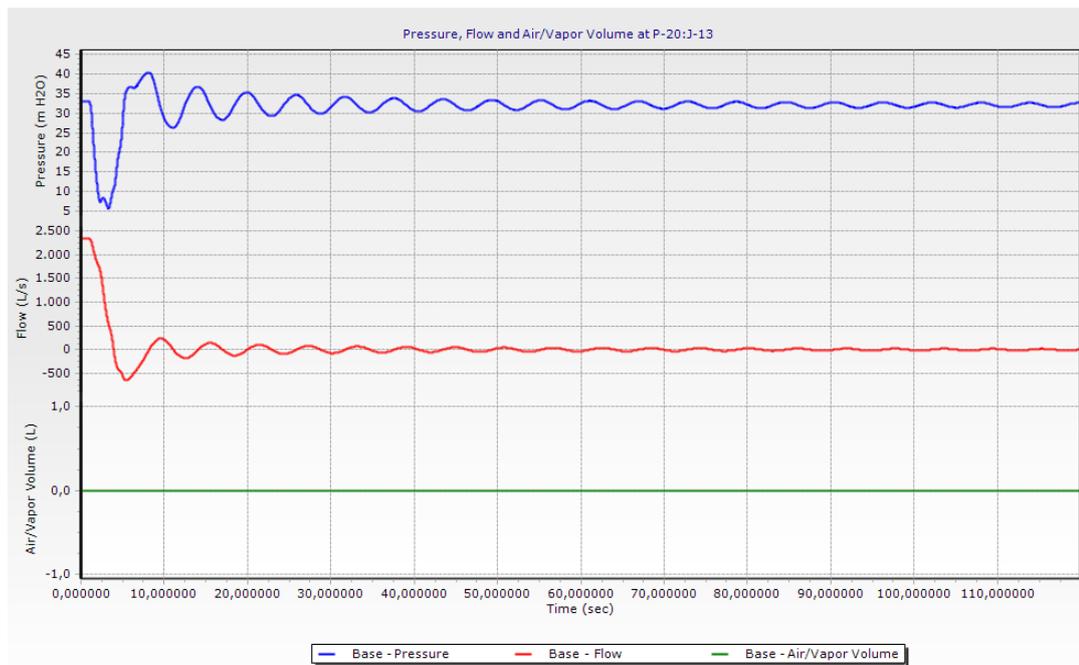
Caso 1. Se introducen las condiciones iniciales con los niveles de aire y agua. Después de realizar la simulación, se obtiene la siguiente gráfica:

**Figura 18. Gráfico de presiones máximas y mínimas para el caso con 1500 L de aire y 4500 L de aire en uno de los perfiles principales de la conducción.**



Fuente: Bentley Hammer.

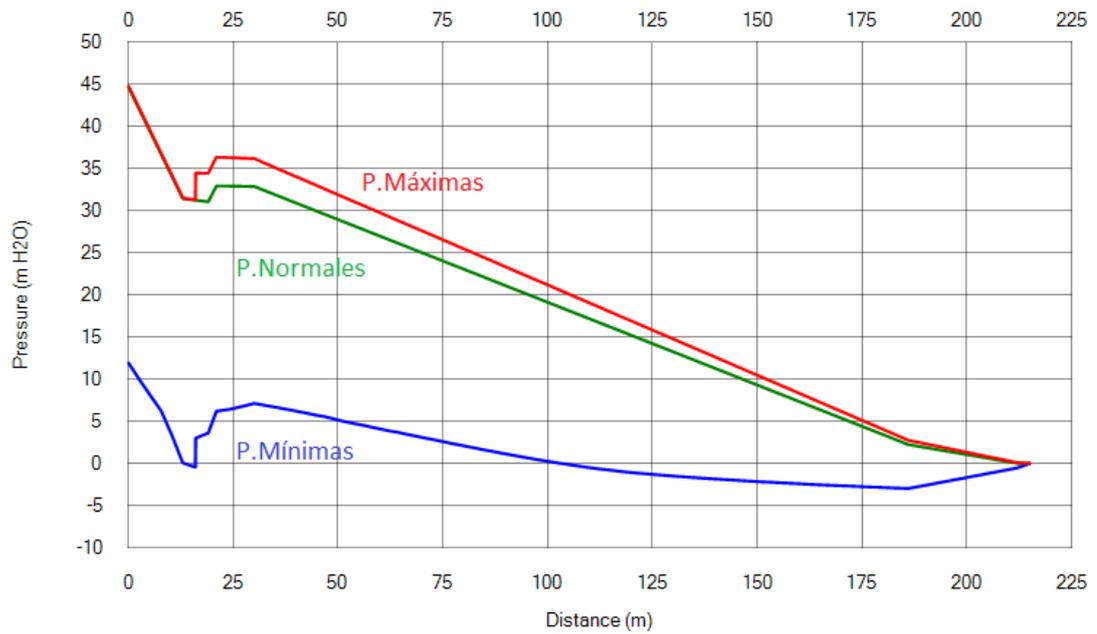
**Figura 19. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el extremo final del manifold.**



Fuente: Bentley Hammer.

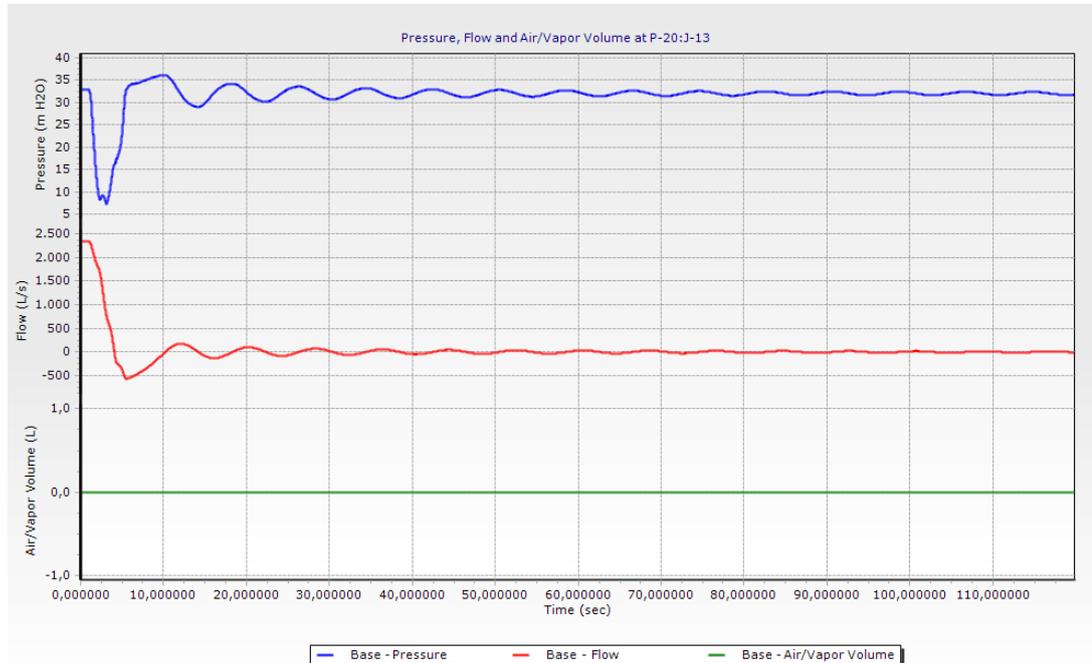
Caso 2. Para este caso, se vuelve a realizar la misma operación que en el anterior, estipulando 3000 litros de aire y 3000 de agua como condiciones iniciales, para los que se obtienen los siguientes resultados:

**Figura 20. Gráfico de presiones máximas y mínimas para el caso con 3000 L de aire y 3000 L de agua en uno de los perfiles principales de la conducción.**



Fuente: Bentley Hammer.

**Figura 21. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el extremo final del manifold.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Caso 3. Para el tercer y último caso se introducen como condiciones los valores de 4500 litros de aire y 1500 de agua. Al ejecutar el análisis, Hammer lanza una advertencia de error, en la cual nos informa de que el volumen de aire calculado es superior a la capacidad del tanque, lo que quiere decir que el tanque ha suministrado más agua de la que tenía inicialmente y se ha vaciado, por lo que esta solución no es válida.

**Figura 22. Mensaje de error en el análisis.**

The maximum and minimum pressure of gas is (0.45E+02 m H2O) and (0.28E+02 m H2O), the maximum and minimum volume of gas are (0.65E+01 m<sup>3</sup>) and (0.43E+01 m<sup>3</sup>). Maximum calculated gas volume (0.65E+01 m<sup>3</sup>) exceeds the volume of the hydropneumatic tank (0.60E+01 m<sup>3</sup>). A larger tank should be used.

*Fuente: Bentley Hammer.*

Se debe elegir entonces entre los 2 primeros casos analizados. A la vista del análisis, con el segundo caso se obtienen menores presiones máximas y presiones mínimas más convenientes que con el primer caso, por lo que como condición inicial se impondrá que el depósito hidroneumático contenga 3000 litros de aire y 3000 litros de agua.

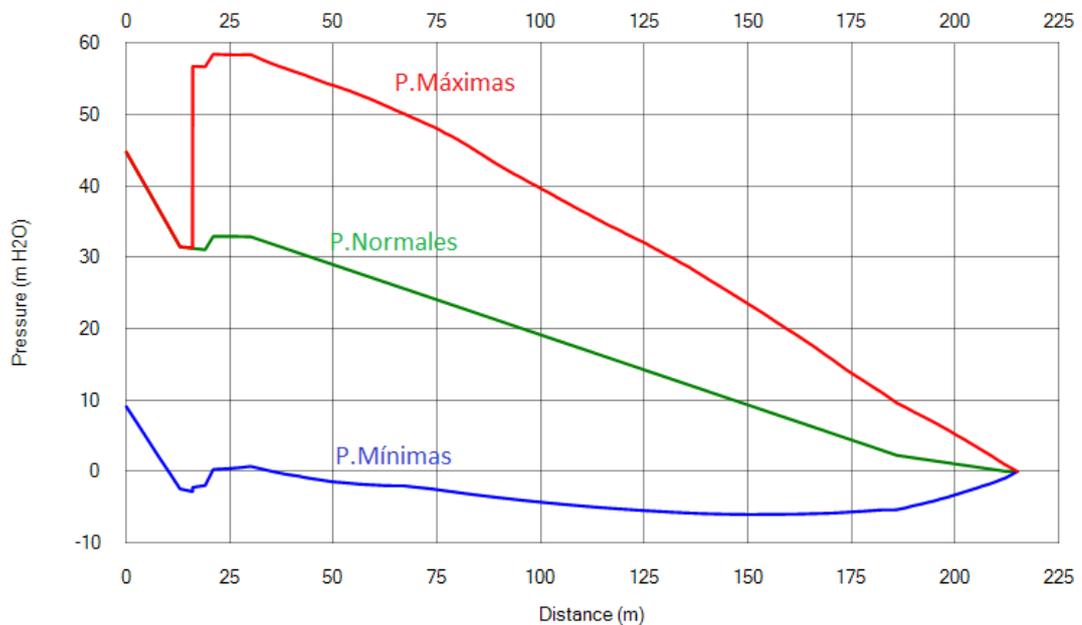
Una vez impuestas todas las condiciones iniciales, se pasará a evaluar los resultados obtenidos para ambos sistemas, con y sin protección.

## Capítulo 5. Análisis de resultados.

En este apartado se pasa a evaluar los resultados obtenidos sobre los 2 sistemas modelados. Este análisis se realizará a partir de las 2 principales herramientas que proporciona el software: Gráfica de presiones máximas y mínimas para la conducción principal, y gráfica de presiones en relación con el tiempo para puntos concretos de la conducción. Para designar estos últimos puntos se considerarán los que puedan ser más críticos.

Se analizará primero el sistema sin sistema de protección alguno, de este análisis se obtienen las siguientes gráficas:

**Figura 23. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Se observa que las presiones máximas rondan peligrosamente los valores de presión de 60 m.c.a. Esto supone un peligro, ya que la tubería de HDPE PN6 soporta un máximo de 60 m.c.a de presión.

En cuanto a las presiones mínimas, la gráfica muestra que se acercan a los -6 m.c.a. Hay que tener estos puntos de peligro en cuenta, ya que se podría producir cavitación al llegar a los -10 m.c.a.

Se buscarán, por tanto, los puntos de mayor peligro tanto por alta presión, como por baja, y así se podrá observar en su gráfica qué ocurre en cada momento en esos puntos con la presión, el caudal, y la relación aire/vapor.

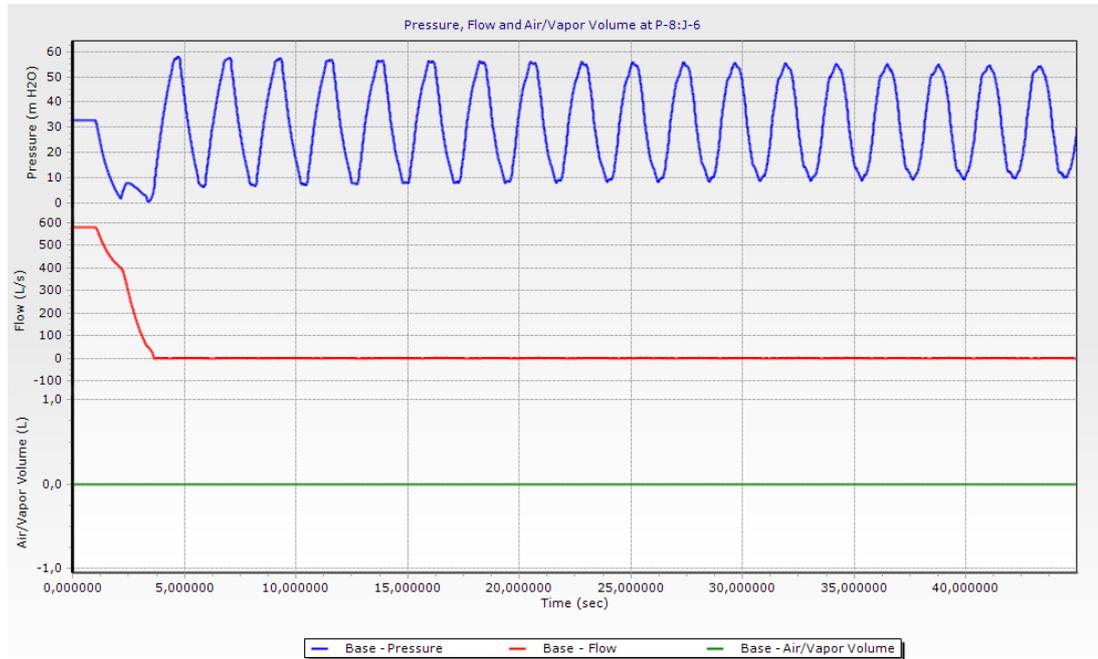
**Figura 24. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción.**

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m H2O)
45	P-8:75%	20	0	58	32	32	0,0	0,0	-10
46	P-8:J-6	21	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
47	P-18:J-6	21	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
48	P-18:16,67%	21	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
49	P-18:33,33%	22	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
50	P-18:50%	23	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
51	P-18:66,67%	23	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
52	P-18:83,33%	24	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
53	P-18:J-9	24	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
54	P-19:J-9	24	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
55	P-19:16,67%	24	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
56	P-19:33,33%	25	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
57	P-19:50%	25	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
58	P-19:66,67%	26	0	58	33	33	0,0	0,0	-10
59	P-19:83,33%	27	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
60	P-19:J-12	27	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
61	P-20:J-12	27	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
62	P-20:16,67%	28	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
63	P-20:33,33%	28	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
64	P-20:50%	28	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
65	P-20:66,67%	29	1	58	33	33	0,0	0,0	-10
66	P-20:83,33%	29	1	58	33	33	0,0	0,0	-10

*Fuente: Bentley Hammer.*

Según esta tabla, el mayor dato de sobrepresión se produce en varias tuberías y puntos por igual, por lo que con analizar uno de ellos se podrá entender lo que pasa en los demás ya que no diferirán mucho del analizado. Por tanto, se analizarán los datos de la tubería 8, en uno de sus extremos (P-8: J-6).

**Figura 25. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-8; J-6.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

En esta gráfica, perteneciente al punto más crítico en cuanto a las presiones máximas, se observa que después de detenerse la bomba, se produce una gran bajada de presión y una posterior subida brusca que provoca un máximo de presión de 58 m.c.a, que se repite cíclicamente.

Se acudirá otra vez a la tabla anterior para encontrar el punto crítico de presión mínima.

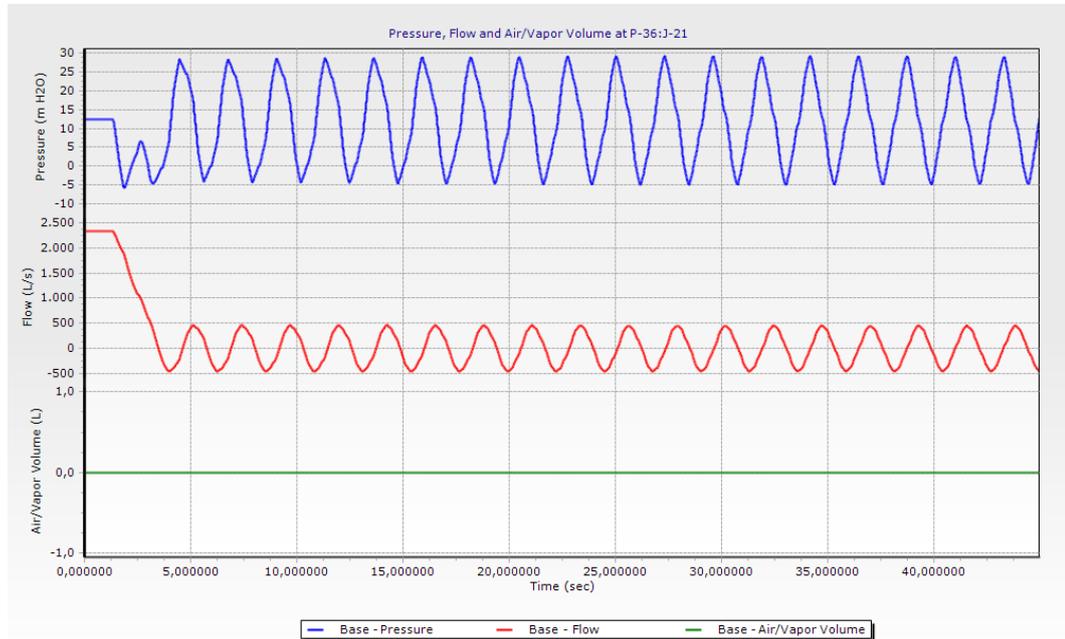
**Figura 26. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción.**

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Vapor Pressure (m H2O)
359	P-36:J-21	134	-6	29	12	12	-10
360	P-36:1,25%	134	-6	29	12	12	-10
361	P-36:2,5%	135	-6	29	12	12	-10
362	P-36:3,75%	135	-6	29	12	12	-10
363	P-36:5%	135	-6	29	12	12	-10
364	P-36:6,25%	136	-6	29	12	12	-10
365	P-36:7,5%	136	-6	28	12	12	-10
366	P-36:8,75%	136	-6	28	12	12	-10
367	P-36:10%	137	-6	28	12	12	-10
368	P-36:11,25%	137	-6	28	12	12	-10
369	P-36:12,5%	137	-6	28	12	12	-10
370	P-36:13,75%	138	-6	28	12	12	-10
371	P-36:15%	138	-6	28	12	12	-10
372	P-36:16,25%	138	-6	28	12	12	-10
373	P-36:17,5%	139	-6	28	12	12	-10
374	P-36:18,75%	139	-6	28	12	12	-10
375	P-36:20%	139	-6	27	11	11	-10
376	P-36:21,25%	140	-6	27	11	11	-10
377	P-36:22,5%	140	-6	27	11	11	-10
378	P-36:23,75%	140	-6	27	11	11	-10
379	P-36:25%	140	-6	27	11	11	-10
380	P-36:26,25%	141	-6	27	11	11	-10
381	P-36:27,5%	141	-6	27	11	11	-10
382	P-36:28,75%	141	-6	27	11	11	-10
383	P-36:30%	142	-6	27	11	11	-10
384	P-36:31,25%	142	-6	26	11	11	-10
385	P-36:32,5%	142	-6	26	11	11	-10
386	P-36:33,75%	143	-6	26	11	11	-10
387	P-36:35%	143	-6	26	11	11	-10
388	P-36:36,25%	143	-6	26	11	11	-10

*Fuente: Bentley Hammer.*

Aquí se observa que el punto crítico en cuanto a presiones mínimas se encuentra en la tubería 36, por lo que se analizará por ejemplo el punto *P-36: J21*

**Figura 27. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-36: J21**



*Fuente: Bentley Hammer.*

En esta gráfica es posible ver que después del apagón repentino de la bomba, en este punto la presión cae hasta los -6 m.c.a, y luego, como ocurría en el punto anterior, la presión oscile de manera cíclica.

Lo que se aprecia en esta gráfica, diferente a la del punto anterior, es que el caudal no se estabiliza en cero como ocurría antes, si no que oscila entre 500 y -500 litros por segundo, lo que quiere decir que esa cantidad de agua va oscilando en una dirección y otra. Esto es debido a la proximidad del punto al canal, que, al estar abierto a presión ambiente, puede permitir ciertas oscilaciones como esta, cosa que en el punto anterior no ocurría.

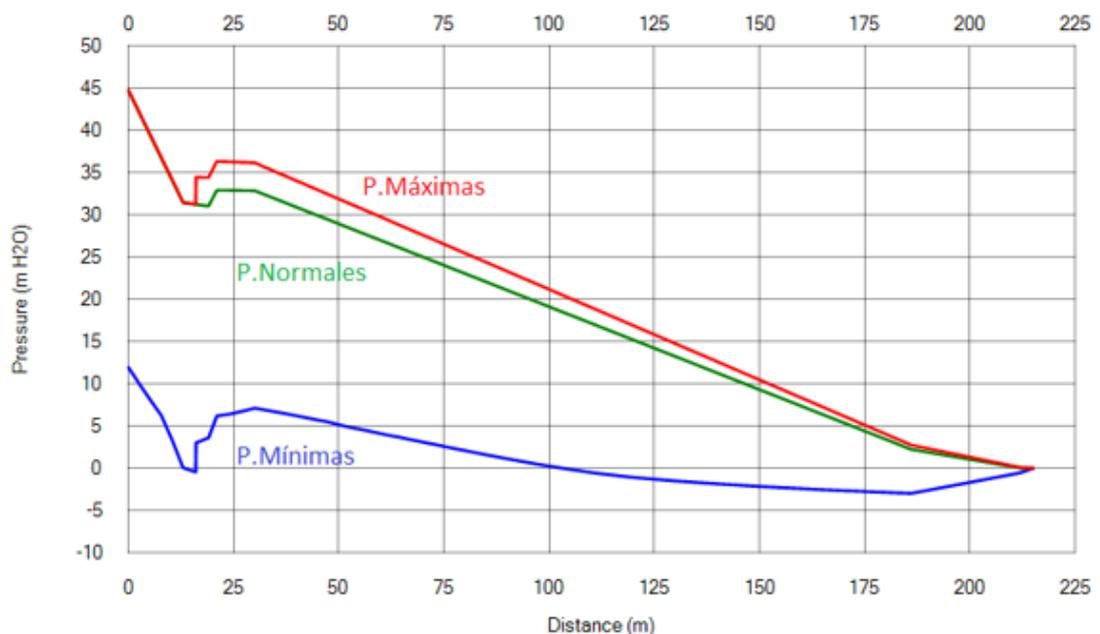
Estos valores máximos y mínimos registrados en el sistema son los que se pretenden reducir añadiendo un depósito hidroneumático a la conducción, ya que se

pueden producir fallas en las tuberías debido a la sobrepresión máxima, y fallas por cavitación debidas a la presión mínima.

La misión del acoplamiento del depósito hidroneumático al sistema es la de reducir estos valores para evitar el mal funcionamiento de la instalación y la posibilidad de fallas. Para ver el efecto que produce el depósito hidroneumático ante los transitorios que se producen por el paro repentino de la bomba, se deben revisar los resultados arrojados por la simulación ejecutada sobre el sistema al que se le ha añadido el depósito hidroneumático.

Al graficar las presiones máximas y mínimas se obtiene:

**Figura 28.** Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal.



*Fuente: Bentley Hammer.*

En esta imagen se observa que el efecto del depósito hidroneumático ha contribuido a reducir las presiones máximas positivas, además de reducir en valor absoluto las presiones negativas al principio de la conducción.

Como se ha hecho con el modelo sin protección, se buscará dentro de la tabla asociada a los datos de la gráfica los valores tanto máximos como mínimos para encontrar los puntos críticos en los que se provoca la máxima sobrepresión y la máxima presión negativa.

**Figura 29. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción.**

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m H2O)
1	P-27:B2	0	12	45	45	45	0,0	0,0	-10
2	P-27:20%	3	10	42	42	42	0,0	0,0	-10
3	P-27:40%	5	8	39	39	39	0,0	0,0	-10
4	P-27:60%	8	6	37	37	37	0,0	0,0	-10
5	P-27:80%	10	3	34	34	34	0,0	0,0	-10
6	P-27:J-4	13	0	31	31	31	0,0	0,0	-10
7	P-6:J-4	13	0	31	31	31	0,0	0,0	-10
8	P-6:CV-2	16	0	31	31	31	0,0	0,0	-10
9	P-7:CV-2	16	3	34	31	31	0,0	0,0	-10
10	P-7:J-5	19	4	34	31	31	0,0	0,0	-10
11	P-8:J-5	19	4	34	31	31	0,0	0,0	-10
12	P-8:J-6	21	6	36	33	33	0,0	0,0	-10
13	P-18:J-6	21	6	36	33	33	0,0	0,0	-10
14	P-18:J-9	24	6	36	33	33	0,0	0,0	-10
15	P-19:J-9	24	6	36	33	33	0,0	0,0	-10
16	P-19:J-12	27	7	36	33	33	0,0	0,0	-10
17	P-20:J-12	27	7	36	33	33	0,0	0,0	-10
18	P-20:J-13	30	7	36	33	33	0,0	0,0	-10

*Fuente: Bentley Hammer.*

En la tabla se aprecia que el máximo valor de presiones positivas se produce en el punto P-27: B2, que corresponde a la salida de la bomba, y corresponde a un valor de 45 m.c.a, que es el valor normal en el régimen permanente de funcionamiento, por lo que no se trata de una sobrepresión provocada por los transitorios. La explicación para la ausencia de los efectos de las sobrepresiones en la salida de la

bomba se debe a que la válvula check se cierra antes de que llegue la onda de sobrepresión positiva, por lo que los puntos que se encuentran antes de esta válvula sólo son afectados por la onda de presión negativa.

Ya que ningún valor supera el de la salida de la bomba, no debe ser una preocupación la sobrepresión positiva, por lo tanto, no será necesario analizarlo.

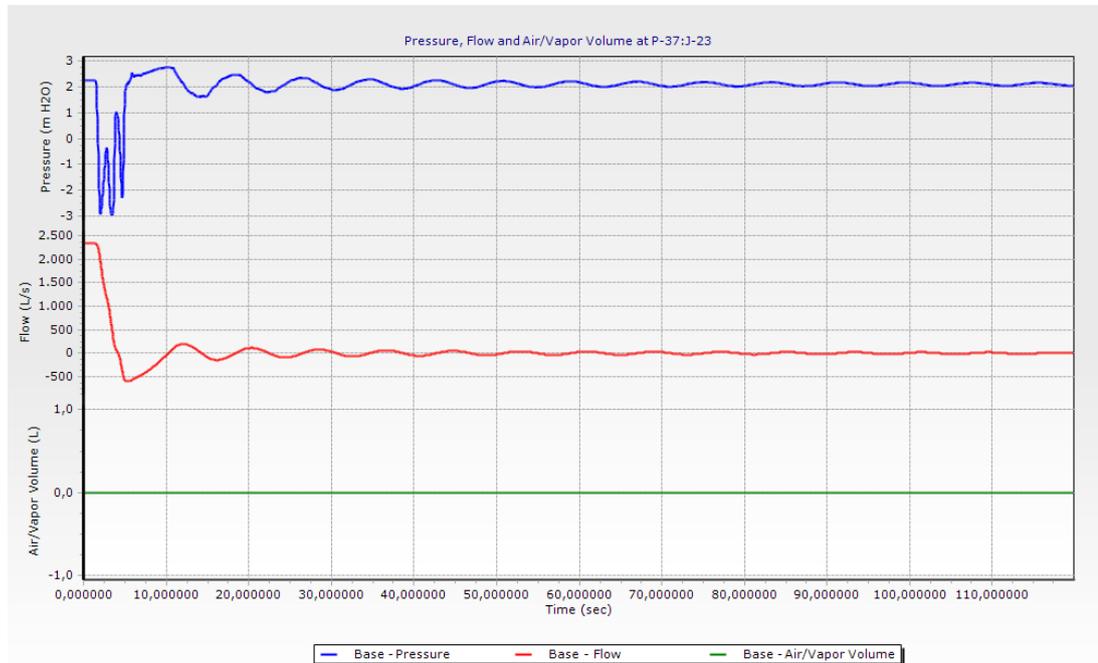
**Figura 30. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción.**

	Point	Distance (m)	Pressure (Minimum) (m H2O)	Pressure (Maximum) (m H2O)	Pressure (Initial) (m H2O)	Pressure (m H2O)	Air/Vapor Volume (L)	Air/Vapor Volume (Maximum) (L)	Vapor Pressure (m H2O)
177	P-37:70,37%	178	-3	4	4	4	0,0	0,0	-10
178	P-37:74,07%	179	-3	4	4	4	0,0	0,0	-10
179	P-37:77,78%	180	-3	4	3	3	0,0	0,0	-10
180	P-37:81,48%	181	-3	4	3	3	0,0	0,0	-10
181	P-37:85,19%	182	-3	4	3	3	0,0	0,0	-10
182	P-37:88,89%	183	-3	3	3	3	0,0	0,0	-10
183	P-37:92,59%	184	-3	3	3	3	0,0	0,0	-10
184	P-37:96,3%	185	-3	3	2	2	0,0	0,0	-10
185	P-37:J-23	186	-3	3	2	2	0,0	0,0	-10
186	P-38:J-23	186	-3	3	2	2	0,0	0,0	-10
187	P-38:3,7%	187	-3	3	2	2	0,0	0,0	-10
188	P-38:7,41%	188	-3	3	2	2	0,0	0,0	-10
189	P-38:11,11%	189	-3	2	2	2	0,0	0,0	-10
190	P-38:14,81%	190	-3	2	2	2	0,0	0,0	-10
191	P-38:18,52%	191	-3	2	2	2	0,0	0,0	-10
192	P-38:22,22%	192	-2	2	2	2	0,0	0,0	-10

*Fuente: Bentley Hammer.*

En cuanto a las presiones negativas, el punto más crítico se produce en P37-J-23, con una presión de -3m.c.a. Este valor no difiere demasiado respecto al valor que se produce en el modelo sin protección, por lo que es digno de análisis y de buscar las razones por las cuales el depósito hidroneumático no corrige esta presión negativa.

**Figura 31. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-37: J23**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Se producen presiones negativas que, aunque de valor menor, siguen siendo indeseables, por lo que se debe buscar la explicación para ello y plantear alternativas, ya que una instalación de esta envergadura debe estar del lado y tener ciertos márgenes de seguridad. Observando el esquema del modelo, se puede apreciar que el punto analizado se encuentra en una de las partes más altas de la impulsión, muy cercana al canal. Se valorará como hipótesis el hecho de que la existencia de estos valores negativos de deba a la lejanía del punto respecto al depósito hidroneumático; lo que provoca que el efecto de aporte de agua desde el depósito hacia la conducción para compensar las presiones negativas no sea efectivo a tales distancias.

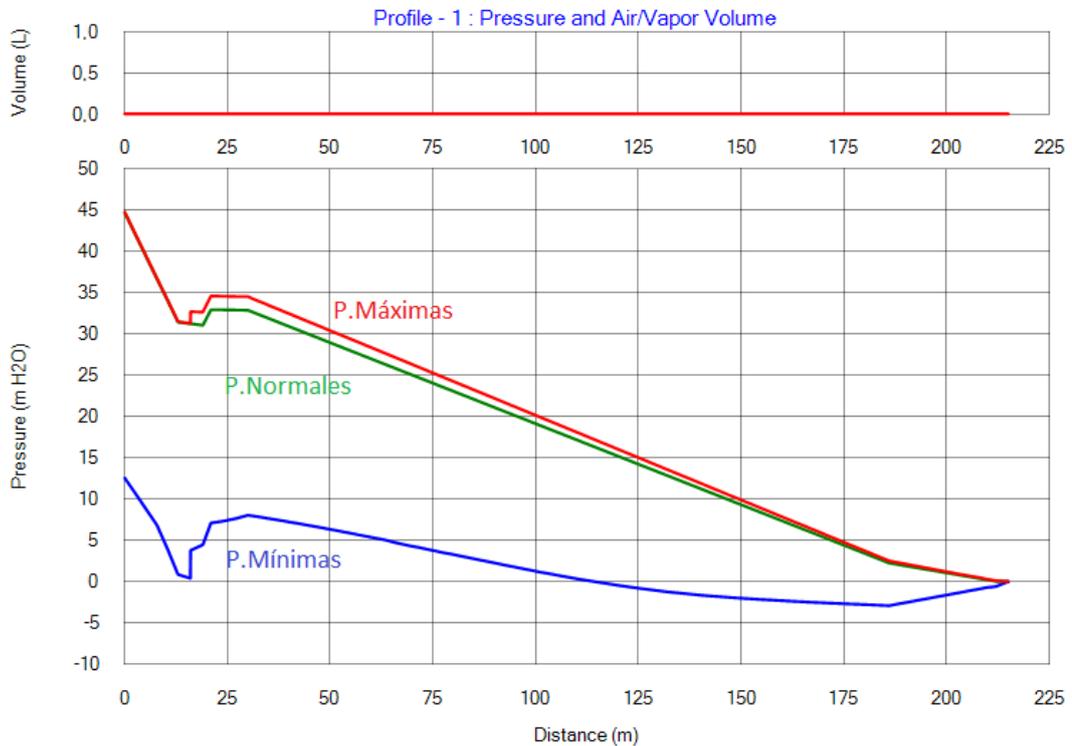
Para solucionar estos problemas, se pueden plantear varias alternativas y crear prototipos que permitan analizar las diferentes opciones que existen de mejorar el sistema actual.

La primera alternativa será modelar un depósito hidroneumático con una capacidad mayor (10000 Litros), manteniendo las proporciones de 50% aire y 50% agua; y un compresor que permita introducir una mayor presión en el (15 Bar).

La segunda alternativa será modelar un prototipo en el que se añada una ventosa hidráulica, un elemento de protección indirecta comentado anteriormente, en el punto de mayor peligro por depresión.

Para el prototipo de la primera alternativa basta con modificar los datos del depósito hidroneumático respecto al modelo que se ha estado utilizando hasta ahora. Una vez modificados los parámetros, se obtiene lo siguiente:

**Figura 32. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal cuando se añade una ventosa hidráulica.**



*Fuente: Bentley Hammer.*

Se observa que a pesar del aumento de tamaño y presión, el efecto del tanque hidroneumático sólo aumenta su eficacia cerca del lugar donde está situado, mientras se sigue presentando el mismo problema de presiones negativas en la parte final de la conducción. Por lo tanto, no es una solución válida.

Para la segunda alternativa, se ha diseñado un prototipo a partir del modelo con protección, y se ha situado una ventosa hidráulica en la unión J23.

Esta será del tipo “Válvula rompedora de vacío”. Para simularla en el programa, se debe hacer click en el botón *Air Valve* , posteriormente se selecciona el punto donde se desea instalar, en este caso, la unión J23.

El programa lanza el siguiente mensaje, al que se debe afirmar *Sí*:

**Figura 33. Mensaje de Hammer**



*Fuente: Bentley Hammer*

Una vez instalada la ventosa, se deben configurar sus parámetros.

**Figura 34. Configuración de parámetros de la ventosa.**

<input type="checkbox"/> <b>Physical</b>	
Elevation (m)	101,50
Zone	<None>
Treat Air Valve as Junction?	True
<input type="checkbox"/> <b>Transient (Operational)</b>	
Air Valve Type	Vacuum Breaker
<input type="checkbox"/> <b>Transient (Physical)</b>	
Air Flow Calculation Method	Orifice Diameter
Diameter (Air Inflow Orifice) (mm)	130,0

*Fuente: Bentley Hammer.*

Como el efecto deseado de la ventosa es el de permitir la entrada de aire al sistema en casos de presiones negativas para evitar el vacío, seleccionaremos el tipo (*Air Valve Type*) válvula rompedora de vacío (*Vacuum breaker*).

La elevación de la válvula ha sido respetada por el programa, y le ha asignado la elevación de la unión J23 a la que pertenece.

En cuanto al diámetro, se debe dimensionar la válvula para conocer este dato.

Para su dimensionamiento, supondremos que para que se compense la presión, en caso de presiones negativas el caudal de aire que deberá entrar será igual al caudal de agua que circula, por lo tanto: .

A partir del caudal de aires se puede dimensionar el orificio de la válvula. En la tabla 26 se encuentran los valores de diámetros para diferentes caudales.

**Figura 35. Tabla de capacidad de ventosas.**

DN	Entrada aire libre l/s	Salida aire l/s
	Para el vaciado	Para el llenado
<b>1" - 25 mm</b>	66	54
<b>2" - 50mm</b>	266	218
<b>3" - 80mm</b>	599	492
<b>4" - 100mm</b>	1.066	875
<b>6" - 150mm</b>	2.397	1.969
<b>8" - 200mm</b>	4.261	3.497
<b>10" - 250mm</b>	6.654	5.453

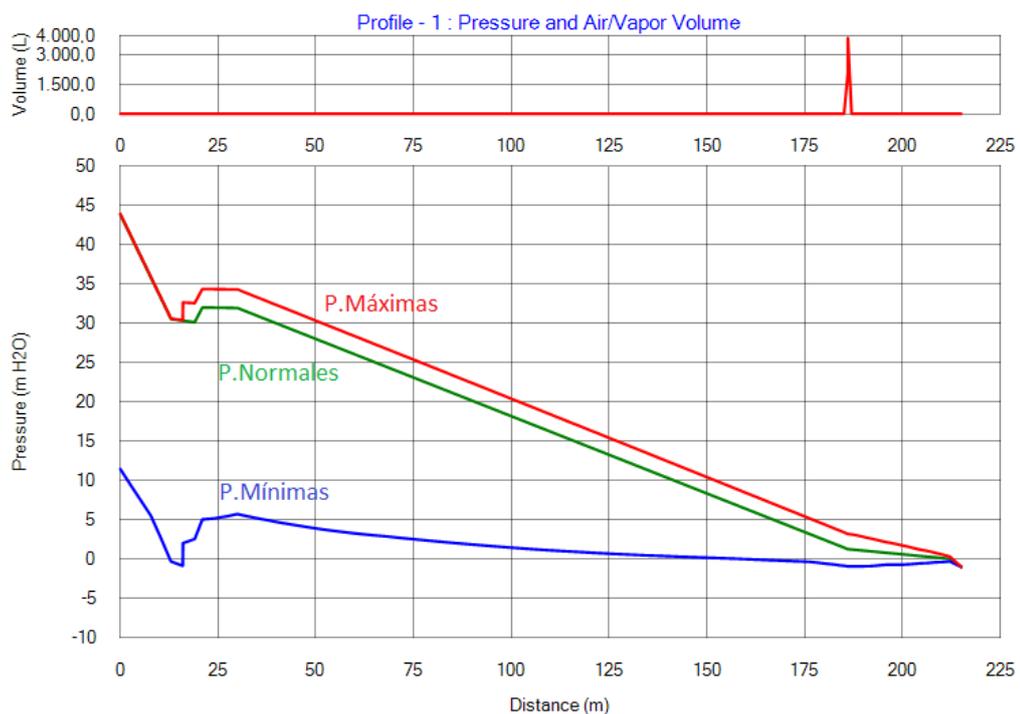
*Fuente:*

*"[https://www.mapa.gob.es/images/es/presentacionventosasmistralross201803\\_tc\\_m30-444636.pdf](https://www.mapa.gob.es/images/es/presentacionventosasmistralross201803_tc_m30-444636.pdf)"*

En el caso de la impulsión a estudiar, el valor más adecuado para las condiciones que se imponen es el orificio de 6'' - 150mm, para un caudal dado de 2397 . Debido a la ínfima diferencia que existe entre ese caudal y el de la instalación, se elegirá ese diámetro.

Una vez introducidas las condiciones de funcionamiento de la ventosa, se ejecuta el análisis de transitorios en el software, de lo que se obtienen los siguientes resultados:

**Figura 36. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal cuando se añade una ventosa hidráulica.**



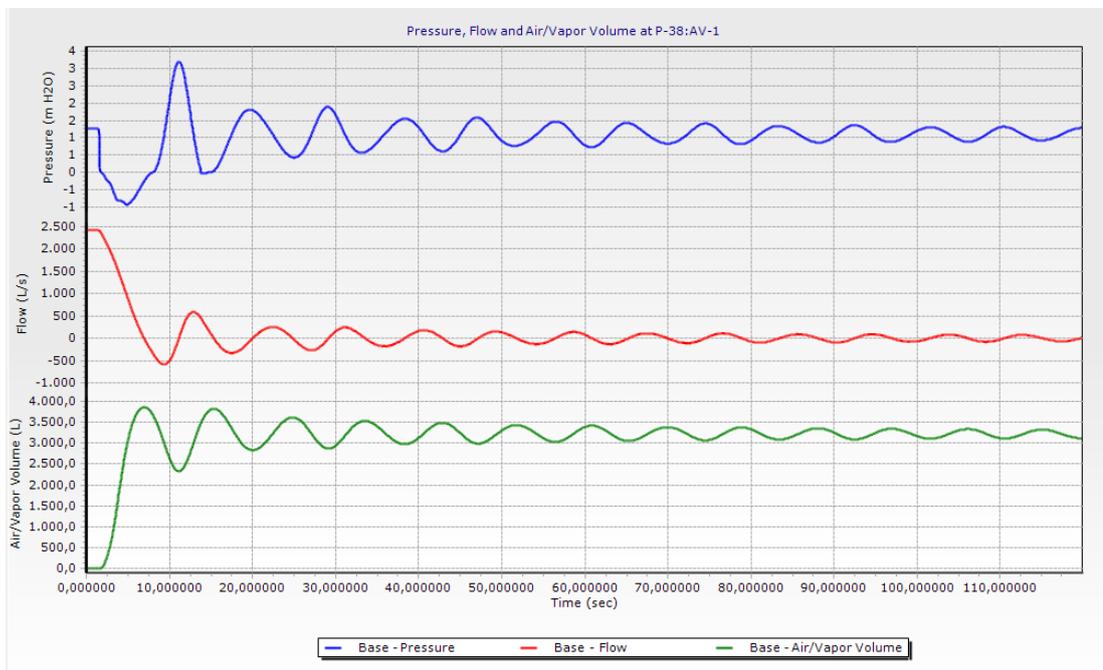
*Fuente: Bentley Hammer.*

Añadiendo la ventosa hidráulica en el punto más crítico de la tubería se han corregido las presiones negativas que se producía, evitando así el peligro de cavitación en el tramo final de la tubería.

En la parte superior de la gráfica, correspondiente a la relación entre presión y aire/vapor de agua, se aprecia una subida súbita en el punto donde está instalada la ventosa, ya que durante la onda de presiones negativas del transitorio, ha permitido la entrada de aire al sistema evitando así la cavitación.

Analizando el punto donde se ha emplazado la válvula, se obtiene la siguiente gráfica:

**Figura 37. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-37: J23**



Fuente: Bentley Hammer.

En esta gráfica se aprecia que no se alcanzan presiones considerables, ni positivas ni negativas, pero sí un gran volumen de aire dentro de la conducción, que deberá ser evacuado después de cada transitorio, aunque debido a su cercanía al canal, no habrá problema en ello. A pesar de ello, esta es una optimización del modelo actual que permite reducir el riesgo de presiones negativas en la última parte de la tubería.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados analizados, se obtienen varias conclusiones:

En primer lugar, analizando el sistema sin ningún tipo de protección, se observa que las presiones alcanzadas no son excesivamente altas, como ocurre en otras conducciones donde las sobrepresiones son muy superiores. Aún así, los valores alcanzados se acercan peligrosamente a los límites de la conducción, por lo que la mejor solución es añadir sistemas de protección ante transitorios.

En este caso, se estudian los transitorios producidos por el paro repentino de las bombas, por lo que lo ideal sería implementar un elemento de seguridad de efecto directo para mitigar las sobrepresiones. El único método de efecto directo para el caso que se estudia es la instalación de un volante de inercia en las bombas, para aumentar su inercia y que el paro sea mas lento, y por tanto las sobrepresiones producidas también.

Las bombas utilizadas en esta instalación son del tipo vertical y sumergidas, por lo que la instalación de volantes de inercia en este tipo de bombas es más complicada e inusual, por su mayor complejidad de instalación respecto a otros tipos de bombas, por lo que no se considerará como una opción.

Por lo tanto, se deberá considerar una solución indirecta. Para ello se ha evaluado la validez del depósito hidroneumático propuesto en la cotización.

A la vista de los resultados, es una solución que reduce las sobrepresiones y las ondas de presión negativas. Realiza una gran labor de amortiguamiento frente a las ondas positivas y negativas cerca de el lugar donde se encuentra, pero las presiones negativas al final de la impulsión no son mitigadas como debería. Por lo tanto, se han planteado 2 alternativas a ese diseño.

La primera, consiste en incrementar el volumen del depósito y la presión que alberga dentro, no ha surgido el efecto esperado, y no ha conseguido mitigar las presiones negativas existentes en el tramo final de la impulsión.

La segunda alternativa, ha demostrado ser válida, ya que reduce las presiones negativas a niveles seguros, aunque a cambio introduce aire en el sistema, lo que necesita de una posterior extracción de este.

En definitiva, aunque el modelo propuesto según los datos registrados en el programa sea válido, dado que los valores de presiones no sobrepasan los límites admisibles, la mejor opción consiste en aumentar la seguridad del sistema con una ventosa hidráulica en uno de los puntos finales de la impulsión, añadiendo un margen de seguridad adicional ante eventos transitorios.

# LISTADO DE TABLAS E ILUSTRACIONES

<b>Figura 1. Impulsión de perfil irregular</b> .....	25
<b>Figura 2. Línea de alturas piezométricas</b> .....	27
<b>Figura 3. Curvas características de una bomba</b> . ....	30
<b>Figura 4. Ejemplo de falla en tubería por sobrepresión</b> . ....	33
<b>Figura 5. Ejemplo de falla en tubería por presiones negativas</b> . ....	33
<b>Figura 6. Parada de bomba</b> .....	37
<b>Figura 7. Apertura de válvula</b> . ....	38
<b>Figura 8. Dibujo esquemático del sistema en el software</b> . ....	45
<b>Figura 9. Curva H-Q para la bomba DWT B-PUMP B24B/1</b> .....	47
<b>Figura 10. Relaciones Caudal (L/s) – Presión/altura de agua (m.c.a)</b> .....	48
<b>Figura 11. Relaciones Caudal (L/s) – Rendimiento (%)</b> .....	48
<b>Figura 12. Valores de K para distintos materiales</b> .....	51
<b>Figura 13. Configuración de la bomba para transitorios</b> .....	52
<b>Figura 14. Configuración de las opciones de cálculo para transitorios</b> .....	53
<b>Figura 15. Perfil de la instalación desde una de las bombas hasta el canal Pencahue</b> . ....	54
<b>Figura 16. Fijación de tanque hidroneumático a una unión del sistema</b> .....	56
<b>Figura 17. Opciones de configuración de tanques hidroneumáticos</b> .....	57

Figura 18. Gráfico de presiones máximas y mínimas para el caso con 1500 L de aire y 4500 L de vapor en uno de los perfiles principales de la conducción. ....	60
Figura 19. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el extremo final del manifold.....	60
Figura 20. Gráfico de presiones máximas y mínimas para el caso con 3000 L de vapor y 3000 L de aire en uno de los perfiles principales de la conducción. ....	61
Figura 21. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el extremo final del manifold.....	62
Figura 22. Mensaje de error en el análisis. ....	62
Figura 23. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal. ....	64
Figura 24. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción. ....	65
Figura 25. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-8; J-6.....	66
Figura 26. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción. ....	67
Figura 27. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-36: J21 .....	68
Figura 28. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal. ....	69
Figura 29. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción. ....	70
Figura 30. Datos de presión sobre el perfil principal de la conducción. ....	71

<b>Figura 31. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-37: J23 .....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 32. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal cuando se añade una ventosa hidráulica. ....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 33. Mensaje de Hammer .....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 34. Configuración de parámetros de la ventosa.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura 35. Tabla de capacidad de ventosas.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 36. Gráfica de presiones máximas y mínimas para un perfil de la conducción principal cuando se añade una ventosa hidráulica. ....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 37. Gráfico de presión, caudal y relación aire/vapor para distintos valores de tiempo en el punto P-37: J23 .....</b>	<b>78</b>

# BIBLIOGRAFÍA

AQUAE. (s.f.). *AQUAE*. Obtenido de <https://www.fundacionaquae.org/wiki-aquae/historia-del-agua/historia-del-agua/>

El-Turki, A. (2013). *Modeling of hydraulic transients in closed conducts*. Fort Collins, Colorado.

Franciso Javier Arregui, R. C. (2017). *Apuntes de mecánica de fluidos*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de Valencia.

Gylanders, R. (s.f.). *UKDN*. Obtenido de <https://ukdnwaterflow.co.uk/pipe-jacking-solution-solves-culvert-collapse/>

Herrero, R. (s.f.). *Es el agua*. Obtenido de <http://eselagua.com/2016/11/08/estudio-de-golpe-de-ariete-esencial-para-el-buen-diseno-de-sistemas-de-transporte-de-fluidos-y-redes-de-tuberias-parte-1/>

INITE. (s.f.). *initelabs*. Obtenido de [http://gc.initelabs.com/recursos/files/r144r/w226w/Problema\\_2/Problema\\_2\\_Hidraulica\\_Ecuaciones.pdf](http://gc.initelabs.com/recursos/files/r144r/w226w/Problema_2/Problema_2_Hidraulica_Ecuaciones.pdf)

Ministerio de Agricultura. (s.f.). Obtenido de [https://www.mapa.gob.es/images/es/presentacionventosasmistralross2018\\_03\\_tcm30-444636.pdf](https://www.mapa.gob.es/images/es/presentacionventosasmistralross2018_03_tcm30-444636.pdf)

Pamline. (s.f.). *Pamline*. Obtenido de <https://www.pamline.es/ventosas-trifuncionales-y-purgadores>

Romero, W. A. (2015). *Análisis de golpe de ariete para reducir la sobrepresión en sistema de bombeo del tanque TK-007 al cajón LA003B de la presa de relavves de SMCV*. Huancayo - Perú.

# ANEXOS





