



# POSGRADOS

Maestría en

## **RECURSOS HÍDRICOS con Mención en Gestión e Ingeniería de Agua Potable y Saneamiento**

RPC-SE-03-NO.041-2020

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Análisis numérico de transientes hidráulicos en el túnel de carga Pilatón-Sarapullo del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.

Autor(es)

Alex Vinicio Tipán Chancusi

Director:

Ing. Byron Andrés Heredia Hidalgo

QUITO - Ecuador

2023

**Autor(es):**



Alex Vinicio Tipán Chancusi

Ingeniero Civil

Candidato a Magíster en Recursos Hídricos con Mención en Gestión e Ingeniería de Agua Potable y Saneamiento por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

alextipan1580@gmail.com

**Dirigido por:**



Byron Andrés Heredia Hidalgo

Ingeniero Civil

Ingeniería y Gestión de Recursos Hídricos

bheredia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

**Alex Vinicio Tipán Chancusi**

Medios de comunicación tradicionales y alternativos: "no "

## ***DEDICATORIA***

Quiero dedicar principalmente a Dios quien me dio la lucidez para alcanzar este gran logro.

A mis padres quienes por siempre me dieron su apoyo incondicional para seguir luchando día tras día.

A mi esposa, a mis hijos quienes son el motivo por quien siempre luchare para salir adelante.

## ***AGRADECIMIENTO***

Gracias Papito Dios por darme la vida y la salud que es la parte primordial en una persona, gracias por esa maravillosa familia que tengo junto a mí.

A mi madre María Hortensia Chancusi y a mi padre Luis Enrique Tipán por formar y hacerme un hombre de bien, inculcándome buenos valores y seguir siendo un ejemplo de esfuerzo y dedicación.

A mi esposa Liliana Zurita quien estuvo siempre conmigo, dándome ese apoyo para alcanzar este gran objetivo y a mis hijos Jeremy Tipán y Kimberly Tipán quienes son el motor por cual me sigo esforzando todos los días, me dan esas fuerzas para seguir luchando y venciendo todos los obstáculos que se presentan en el camino.

Al Ing. Byron Heredia por su asesoría y colaboración en la elaboración de este proyecto.

# Tabla de Contenido

Resumen .....	9
Abstract .....	10
1. Introducción .....	11
2. Determinación del Problema.....	13
3. Marco teórico referencial.....	15
3.1 Conceptos fundamentales del flujo transitorio .....	15
3.1.1. Período de conducción .....	16
3.1.2. Celeridad de la onda de presión.....	16
3.1.3. Tiempo de perturbación transitoria .....	20
3.1.4. Fórmula de Michaud.....	21
3.1.5. Fórmula de Joukowski .....	21
3.1.6. Fórmula de Allievi .....	22
3.2 Fenómeno transitorio .....	22
3.2.1. Propagación y reflexión de la onda de golpe de ariete.....	22
3.3 Método de las características .....	24
3.4 Dispositivo de control y atenuación del golpe de ariete .....	28
3.5.1. Chimenea de equilibrio .....	28
3.5.2. Válvulas.....	30
4. Materiales y metodología.....	32
4.1 Metodología.....	34
4.2 Dimensiones relevantes del Aprovechamiento Pilatón. ....	36
4.3 Programa computacional Hammer.....	41
4.4 Interfaz y barras de herramientas en Bentley Hammer .....	43
5. Resultados y discusión.....	54
5.1 Rechazo de carga instantáneo .....	54
5.1.1. Con vertederos laterales en el tanque de carga, $Q=13,33 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	54
5.1.2. Con vertederos laterales en el tanque de carga, $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ .....	60
5.1.3. Con vertederos laterales en tanque de carga, $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ .....	65
5.1.4. Sin vertederos laterales en el tanque de carga, $Q=13,33\text{m}^3/\text{s}$ .....	69
5.1.5. Sin vertederos laterales en tanque de carga, $Q=20\text{m}^3/\text{s}$ .....	73

5.1.6. Sin vertederos laterales en el tanque de carga, $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ .....	76
5.2 Aceptación de carga.....	81
5.2.1. Con vertederos laterales en tanque de carga, $Q=40\text{m}^3/\text{s}$ .....	82
5.3 Comparación de resultados de las simulaciones numéricas con datos en el tanque de carga.....	87
6. Conclusiones.....	90
Referencias .....	92

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Ecuaciones y coeficientes de Poisson.....	18
<b>Tabla 2.</b> Propiedades físicas de los materiales .....	19
<b>Tabla 3.</b> Propiedades físicas de algunos líquidos .....	20
<b>Tabla 4.</b> Datos generales del Aprovechamiento Hidroeléctrico Pilatón-Sarapullo .....	37
<b>Tabla 5.</b> Característica de la turbina tipo Francis.....	40
<b>Tabla 6.</b> Resultados obtenidos de la simulación numérica de flujo no permanente .....	56
<b>Tabla 7.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	58
<b>Tabla 8.</b> Valor de cota en el punto más crítico .....	59
<b>Tabla 9.</b> Resultados obtenidos de la simulación.....	61
<b>Tabla 10.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	63
<b>Tabla 11.</b> Nivel en el punto más crítico .....	64
<b>Tabla 12.</b> Resultados obtenidos de la simulación.....	66
<b>Tabla 13.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	68
<b>Tabla 14.</b> Nivel en el punto más crítico .....	69
<b>Tabla 15.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	71
<b>Tabla 16.</b> Nivel en el punto más crítico .....	72
<b>Tabla 17.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	74
<b>Tabla 18.</b> Nivel en el punto más crítico .....	75
<b>Tabla 19.</b> Resultados obtenidos de la simulación.....	77
<b>Tabla 20.</b> Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga .....	78
<b>Tabla 21.</b> Nivel en el punto más crítico .....	80
<b>Tabla 22.</b> Resultados obtenidos de la simulación.....	83
<b>Tabla 23.</b> Resultados obtenidos de las presiones mínimas en el tanque de carga .....	85
<b>Tabla 24.</b> Resultado obtenido del caudal máximo .....	85
<b>Tabla 25.</b> Nivel en el punto más crítico .....	86
<b>Tabla 26.</b> Resumen de resultados de todos los escenarios.....	86

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Eventos causados por el golpe de ariete .....	23
<b>Figura 2.</b> Diagrama espacio-tiempo .....	27
<b>Figura 3.</b> Chimenea de equilibrio .....	29
<b>Figura 4.</b> Áreas vs porcentaje .....	29
<b>Figura 5.</b> Mapa de ubicación a nivel nacional .....	33
<b>Figura 6.</b> Mapa de ubicación a nivel provincial .....	33

<b>Figura 7.</b> <i>Ubicación del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón</i> .....	34
<b>Figura 8.</b> <i>Selección de la turbina en función del caudal y altura</i> .....	39
<b>Figura 9.</b> <i>Gradiente Hidráulico</i> .....	44
<b>Figura 10.</b> <i>Interfaz gráfica de Bentley Hammer</i> .....	46
<b>Figura 11.</b> <i>Propiedades de la tubería</i> .....	47
<b>Figura 12.</b> <i>Ventana de resultado para el transitorio</i> .....	48
<b>Figura 13.</b> <i>Cuadro de resumen del transitorio</i> .....	49
<b>Figura 14.</b> <i>Presión y caudal vs tiempo</i> .....	50
<b>Figura 15.</b> <i>Tabla de tuberías</i> .....	51
<b>Figura 16.</b> <i>Perfil longitudinal de la línea de conducción del Aprovechamiento Pilatón - Sarapullo</i> .....	52
<b>Figura 17.</b> <i>Menú de propiedades para la turbina</i> .....	53
<b>Figura 18.</b> <i>Modelo Hammer</i> .....	54
<b>Figura 19.</b> <i>Resultado del transitorio hidráulico</i> .....	55
<b>Figura 20.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	56
<b>Figura 21.</b> <i>Presión y caudal para un estado transitorio en el tanque de carga</i> .....	58
<b>Figura 22.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	59
<b>Figura 23.</b> <i>Gráfica del transiente hidráulico</i> .....	60
<b>Figura 24.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	61
<b>Figura 25.</b> <i>Presiones máximas en el tanque de carga</i> .....	62
<b>Figura 26.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	63
<b>Figura 27.</b> <i>Gráfica del transiente hidráulico</i> .....	65
<b>Figura 28.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	66
<b>Figura 29.</b> <i>Presiones máximas en el tanque de carga</i> .....	67
<b>Figura 30.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	68
<b>Figura 31.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	70
<b>Figura 32.</b> <i>Presiones máximas en el tanque de carga</i> .....	71
<b>Figura 33.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	72
<b>Figura 34.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	73
<b>Figura 35.</b> <i>Presiones máximas en el tanque de carga</i> .....	74
<b>Figura 36.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	75
<b>Figura 37.</b> <i>Gráfica del transiente hidráulico</i> .....	76
<b>Figura 38.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	76
<b>Figura 39.</b> <i>Presiones máximas en el tanque de carga</i> .....	78
<b>Figura 40.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	80
<b>Figura 41.</b> <i>Gráfica del transiente hidráulico</i> .....	82
<b>Figura 42.</b> <i>Perfil de presiones</i> .....	83
<b>Figura 43.</b> <i>Presiones y caudales en el tanque de carga</i> .....	84
<b>Figura 44.</b> <i>Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo</i> .....	86

# Análisis numérico de transientes hidráulicos en el túnel de carga Pilatón- Sarapullo del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón

Autor(es):

ALEX VINICIO TIPÁN CHANCUSI

## Resumen

---

El sector energético del país se ha ido desarrollando gracias a los proyectos Hidroeléctricos, entre ellos se encuentra la Hidroeléctrica Toachi Pilatón con 254 MW de potencia, localizada entre los límites de Cotopaxi, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas. El presente proyecto estuvo enfocado en las simulaciones de escenarios por el golpe de ariete en el Aprovechamiento Pilatón- Sarapullo, en el que se determinó el comportamiento de las obras hidráulicas de interés, ya que es indispensable tener en cuenta las causas, efectos y parámetros característicos de los transitorios hidráulicos. La metodología aplicada para este proyecto de análisis del flujo no permanente para conductos a presión, se realizó a través de un modelamiento en el programa computacional Hammer.

Los escenarios considerados para la simulación fueron: rechazo de carga instantáneo y aceptación de carga para diferentes caudales de interés, por lo cual se tomaron en cuenta las siguientes obras hidráulicas: el tanque de carga que se encuentra en la captación, tubería de presión, chimenea de equilibrio y las válvulas que se encuentran en la casa de máquinas. Los ensayos se desarrollaron en diferentes casos de cierre y apertura de válvulas con variación de caudales. Los resultados obtenidos por el software fueron analizados para cada caso y se seleccionó la información necesaria como tanque de carga, niveles de fluctuaciones, presiones máximas y mínimas del sistema. El nivel alcanzado en el tanque de carga evidencia la necesidad de construir una obra hidráulica que permita mitigar daños al sistema del Aprovechamiento Pilatón-Sarapullo.

### **Palabras clave:**

Transitorios hidráulicos; Golpe de ariete; Obras hidráulicas.

## Abstract

---

The energy development of the country is due to the large hydroelectric projects, among them we have the Toachi Pilatón Hydroelectric that will generate 254 MW of power, it is located between the limits of Cotopaxi, Pichincha and Santo Domingo de los Tsáchilas, near the Alóag highway. -Santo Domingo de los Tsáchilas. This project is focused on simulations of water hammer scenarios in the Pilatón-Sarapullo Exploitation, where the behavior of the hydraulic works of interest will be verified. Adequate knowledge about hydraulic transients is important to take into account the causes, effects and characteristic parameters. The methodology applied to this project is the analysis of the non-permanent flow for pressure ducts through modeling in the Hammer computer program.

The scenarios considered for the simulation are: instantaneous load rejection and load acceptance for different flows of interest where the following hydraulic works were taken into account: the load tank located in the catchment, pressure pipe, equilibrium chimney and the valves found in the powerhouse. The tests were carried out in different cases of valve opening and closing with flow rate variation. The results obtained by the software will be analyzed for each case and the necessary information will be selected, such as levels reached in the cargo tank, fluctuation levels, maximum and minimum system pressures. The level reached in the cargo tank shows the need to build a hydraulic work to mitigate damage to the Pilatón-Sarapullo Exploitation system.

**Keywords:**

Hydraulic transients; water hammer; Waterworks.

# 1. Introducción

---

El proyecto Hidroeléctrico Toachi-Pilatón es muy importante para el desarrollo energético del país, se encuentra ubicado al Sur Oeste de Quito en la Provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, cerca de la Vía Alóag-Santo Domingo de los Tsáchilas. La captación del río Pilatón, punto inicial del aprovechamiento hidráulico, está ubicada en el Km 60 de la vía Alóag-Santo Domingo.

El proyecto Toachi-Pilatón comprende dos aprovechamientos en cascada: Pilatón-Sarapullo y Toachi-Alluriquín. El caudal de almacenamiento se capta en el río Pilatón de  $40\text{m}^3/\text{s}$ , por una obra de toma a filo de agua; el segundo aprovechamiento recibe un caudal de  $100\text{m}^3/\text{s}$  y se une al caudal aprovechable del Río Toachi, en el cual actualmente está construida una presa que formará un embalse de regulación.

El aprovechamiento Pilatón-Sarapullo contiene una Chimenea de equilibrio que sirve para disipar las sobrepresiones generadas por flujos transitorios; nuestro objetivo es realizar simulaciones con un software Bentley Hammer para determinar el comportamiento de las sobrepresiones en el túnel de carga Pilatón – Sarapullo.

El funcionamiento de la chimenea de equilibrio se basa en la relación inversa entre su área transversal y el área de la tubería de la conducción. Esta área debe ser lo suficientemente grande para que la oscilación de agua que se produzca en esta estructura, tenga una aceleración despreciable frente al gradiente hidrostático, lo cual se produce por efecto de la gravedad y entonces así, se puede verificar el comportamiento de la chimenea de equilibrio frente a escenarios críticos.

Para el estudio de los transientes, se va a utilizar el software Bentley Hammer, el cual permitirá realizar simulaciones para el golpe de ariete, ocasionados por el cierre instantáneo de válvulas.

El modelo matemático del golpe de ariete, considera la respuesta a la exigencia del material ante variaciones de presión y las características del agua que se conduce,

analizando la propagación de la energía a lo largo de la conducción hasta la casa de máquinas Sarapullo, donde se encuentran las válvulas de control y turbinas tipo Francis (Martínez, 1995).

## 2. Determinación del Problema

El estudio de los transientes hidráulicos es trascendental para un buen diseño de las tuberías en centrales hidroeléctricas, así también los métodos numéricos y gráficos que se han desarrollado por Allievi, ayudan a predecir con exactitud el fenómeno, en la actualidad se cuenta con programas que permiten desarrollar de una manera fácil y eficaz los cálculos relacionados con los transitorios hidráulicos. El correcto funcionamiento y protección de la infraestructura del túnel de carga Pilatón-Sarapullo frente una eventualidad, como el golpe de ariete, depende de un adecuado análisis en cada uno de los escenarios, utilizando el software Bentley Hammer.

Este trabajo pretende dar solución a los problemas del golpe de ariete que se tendrían en todo el sistema del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, especialmente en los puntos críticos como son: la captación, tanque de carga y la chimenea de equilibrio; dicho análisis se realizará en los escenarios de rechazo de carga instantáneo y aceptación de carga. En la casa de máquinas Sarapullo se han dispuesto válvulas de regulación que deben ser controladas de una manera adecuada para evitar daños en el sistema debido al golpe de ariete; el cierre instantáneo de la válvula mariposa puede provocar daños en el sistema de conducción por las sobrepresiones.

### **Objetivo general**

Realizar la simulación numérica de transientes producidos por el rápido cierre de una válvula al ingreso de las turbinas en el túnel de carga Pilatón – Sarapullo del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón.

### **Objetivos específicos**

1. Plantear el modelo numérico en el software Hammer, necesario para el análisis del golpe de ariete en el túnel de carga Pilatón – Sarapullo.

2. Determinar puntos críticos de presiones máximas y mínimas del sistema a causa de transientes, mediante un software denominado Hammer.
3. Analizar el comportamiento de la tubería de conducción para transientes hidráulicos.
4. Verificar el comportamiento de la Chimenea de equilibrio bajo el escenario del cierre repentino de una válvula en la tubería.

## 3. Marco teórico referencial

---

Las centrales hidroeléctricas son obras civiles construidas con el fin de aprovechar los grandes volúmenes de agua que tienen los ríos y así generar energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a los generadores que se encuentran en la denominada casa de máquinas. Una Hidroeléctrica está estructurada por una captación, desarenador, tanque de sumergencia, túnel de presión, chimenea de equilibrio, casa de máquinas y descarga del flujo (Lozada, 2010).

La captación del río Pilatón se ubica al borde del carretero Aloag-Santo Domingo Km 60, continua con el túnel de carga a presión de 5.884 metros de longitud, chimenea de equilibrio superior, tubería de presión de unos 100 metros de longitud, casa de máquinas subterránea Sarapullo ubicada cerca de la confluencia del río Sarapullo con el río Toachi, que estará equipada con 3 turbinas Francis cuya potencia instalada será de 49 MW, chimenea de equilibrio inferior y túnel de descarga de unos 500 metros de longitud, una subestación exterior con un transformador de elevación 60 MVA - 13.8/230 KV, el cual se conectará a través de una nueva línea de transmisión Sarapullo – Alluriquín en 230 KV.

Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía potencial gravitacional de un cauce natural, que se encuentra en una topografía con desnivel, para luego transformarla en energía cinética, consecutivamente el agua viaja a través de canales o tuberías hasta llegar a las turbinas, donde es transformada en energía mecánica, las mismas que transmiten la energía a un generador que es el encargado de transformarla a energía eléctrica (Parmakian, 1955).

### 3.1 Conceptos fundamentales del flujo transitorio

En la siguiente estructuración, presentaremos los conceptos y parámetros fundamentales para la comprensión del flujo transitorio.

### 3.1.1. Período de conducción

El período de conducción está dado por el tiempo de viaje de ida y retorno de la onda de presión, entre la localización de la perturbación transitoria y el sitio de reflexión, siendo ésta el inicio y fin de la tubería; el período de conducción se representa como se muestra a continuación (Collazos & Laverde, 2018):

$$T = \frac{2 * L}{a} \quad (\text{Ecuación 3.1})$$

Donde:

T: período de conducción [s]

L: longitud de conducción [m]

a: celeridad de la onda [m/s]

Esta fórmula se utiliza para el cálculo de sobrepresiones y depresiones en un sistema para cierre gradual.

### 3.1.2. Celeridad de la onda de presión

Se conoce como celeridad de la onda de presión, a la velocidad con la que se transporta la onda de presión en el interior de una tubería, al existir una alteración en el caudal del sistema. Depende de la geometría y propiedades elásticas del material, de igual manera las propiedades elásticas del fluido (Granell & Lafuente, 2010).

La celeridad de la onda se expresa de la siguiente manera:

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} * \left( \frac{1}{K} + \frac{D * c_1}{e * E_a} \right)}} \quad (\text{ecuación 3.2})$$

Donde:

a= celeridad de onda [m/s]

$\gamma$ = peso específico del agua [ $\text{N}/\text{m}^3$ ]

g= aceleración de la gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ]

D= diámetro interno del conducto (mm)

$c_1$  = coeficiente adimensional que depende de las propiedades elásticas del Conducto

$K$  = módulo de elasticidad del material del conducto [kg/cm<sup>2</sup>]

$e$  = espesor de conducto (mm)

$E_a$  = módulo de elasticidad del material [kg/cm<sup>2</sup>]

$c_1$  = es un coeficiente adimensional que se determina con las relaciones siguientes:

$\mu$  = *coeficiente de Poisson del material*

**Tabla 1.**

*Ecuaciones y coeficientes de Poisson*

Tuberías empotradas en un extremo sin juntas de expansión.	$c_1 = \frac{5}{4} - \mu$	<i>ecuación 3.3</i>
Para tuberías empotradas y con restricción del movimiento longitudinal en sentido del flujo	$c_1 = 1 - \mu^2$	<i>ecuación 3.4</i>
Para tuberías con juntas de expansión.	$c_1 = 1 - \frac{\mu}{2}$	<i>ecuación 3.5</i>

Podemos utilizar ecuaciones para determinar la celeridad de onda en conductos como: hierro dúctil, acero, plástico, asbesto cemento (Montes & Sabogal, 2019).

- Para túneles circulares

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} * (\frac{1}{K} + \frac{1}{G})}} \quad (\text{ecuación 3.6})$$

Donde:

a= celeridad de onda [m/s]

$\gamma$ = peso específico del agua [N/m<sup>3</sup>]

g= aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>]

K= módulo de elasticidad del material del conducto [kg/cm<sup>2</sup>]

G= módulo de rigidez del material de las paredes del túnel [kg/cm<sup>2</sup>]

- Para túneles blindados

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{\gamma}{g} * \left(\frac{1}{K} + \frac{D * c_2}{e * E_a}\right)}} \quad (\text{ecuación 3.7})$$

$$c_2 = \frac{e * E_a}{G * D + e * E_a} \quad (\text{ecuación 3.8})$$

Donde:

a= celeridad de onda [m/s]

$\gamma$ = peso específico del agua [ $N/m^3$ ]

g= aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

D= diámetro interno del conducto [mm]

e= espesor del blindaje [mm]

$c_2$ =coeficiente adimensional que depende de las características del blindaje

K= módulo de elasticidad volumétrico - agua [ $kg/cm^2$ ]

G= módulo de rigidez del material del blindaje [ $kg/cm^2$ ]

Para determinar la celeridad de la onda dentro de la tubería hay que considerar la geometría y el material, así como las propiedades elásticas del flujo (Jinping & Jiandong, 2010).

En la presente tabla se mencionará el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson para cada material.

**Tabla 2.**

*Propiedades físicas de los materiales*

Material	Módulo de Young Ea (GPa)	Coefficiente de Poisson $\mu$
Acero	207	0.30
Hierro fundido	90	0.25
Hierro dúctil	172	0.28

Hormigón	20 a 30	0.15
Concreto reforzado	30 a 60	0.25
Fibrocemento	24	0.30
PVC (20 °C)	3.3	0.45
Polietileno	0.8	0.46
Poliestireno	5.0	0.40
Fibra de vidrio	50.0	0.35
Granito (roca)	50	0.28

*Nota:* Módulo de elasticidad y coeficiente de poisson de los materiales

**Tabla 3.**

*Propiedades físicas de algunos líquidos*

Líquido	Temperatura °C	Módulo de volumen de Elasticidad (GPa)	Densidad (Kg/m3)
Agua dulce	20	2.19	998
Agua Salada	15	2.27	1025
Aceites minerales	25	1.5 a 1.9	860-890
Queroseno	20	1.3	800
Metanol	20	1.0	790

### 3.1.3. Tiempo de perturbación transitoria

Se hace referencia a las maniobras que se realiza en válvulas, bombas o dispositivos que forman parte de una conducción y estas generan un cambio brusco o gradual en el caudal del sistema provocando el golpe de ariete (Choon, Aik, & Hin, 2012).

Cierre instantáneo o rápido  $t_c < \frac{2*L}{a}$

Cierre gradual o lento  $t_c \geq \frac{2*L}{a}$

Cierre instantáneo  $t_c = 0$  caso teórico

Cierre rápido. – permite el corte instantáneo de un fluido en casos de emergencia; la sobrepresión alcanza un valor máximo en la válvula que se cierra.

Cierre lento. – No causa daños en las instalaciones y es seleccionado para la operación de los sistemas hidroeléctricos como son: turbinas y válvulas.

### 3.1.4. Fórmula de Michaud

A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de sobrepresiones para un cierre lento (Kodura, 2016).

$$\Delta H = \frac{2L * V_0}{g * t_c} \quad \text{ecuación 3.9}$$

Donde:

$\Delta H$ = variación de la presión [m]

$g$ = aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$V_0$ = velocidad medio del flujo [m/s]

$L$ = longitud de tubería [m]

$t_c$ = tiempo de duración de perturbación transitoria [s]

### 3.1.5. Fórmula de Joukowski

A continuación, se presenta la fórmula para el cálculo de variación de presión (sobrepresión o depresión) en el sistema, en un tiempo de cierre instantáneo.

$$\Delta H = \frac{a * \Delta v}{g} \quad \text{ecuación 3.10}$$

Donde:

$\Delta H$ = variación de la presión [m]

$g$ = aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$\Delta v$ = variación de velocidad [m/s]

$a$ = celeridad de onda [m/s]

### 3.1.6. Fórmula de Allievi

Se presenta la fórmula para el cálculo de sobrepresiones y depresiones para un cierre gradual.

$$\Delta H = \frac{H_o}{2} (C^2 \pm C\sqrt{4 + C^2}) \quad \text{ecuación 3.11}$$

$$C = \frac{L * V_o}{g * H_o * t_c} \quad \text{ecuación 3.12}$$

$\pm C\sqrt{4 + C^2}$  hace referencia a variación de carga piezométrica, el signo (+) a sobrepresiones y (-) a depresiones.

## 3.2 Fenómeno transitorio

### 3.2.1. Propagación y reflexión de la onda de golpe de ariete

El fenómeno del golpe de ariete producido por el cierre instantáneo de una válvula o compuerta aguas abajo, puede traer graves consecuencias a un sistema y está acompañado por una serie de ondas de presión positivas y negativas, que viajan a través de un túnel de carga hasta que la fricción vaya atenuando a las ondas y volverlas nulas; este sistema de conducción deberá estar en la capacidad de soportar las sobrepresiones que se generen en la tubería (Rubio & Brigades, 1995).

Cuando una válvula se cierra en un sistema de flujo a presión, inmediatamente la carga de presión aumenta aguas arriba en el punto de la salida del depósito, provocando un pulso de sobrepresiones que se propaga en las dos direcciones del flujo, si la maniobra de la válvula es muy rápida, la onda de presión puede generar una burbuja de vapor aguas abajo.

A continuación, se va a clasificar los eventos de cierre de válvulas de acuerdo a un tiempo en que la compuerta tarda en cerrarse.

V = Velocidad del fluido

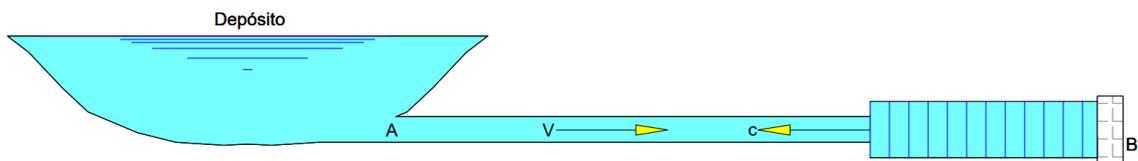
c = Velocidad de la onda de presión

L = Longitud de la tubería.

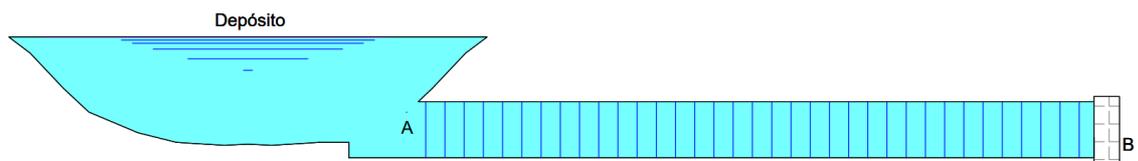
**Figura 1.** *Eventos causados por el golpe de ariete*



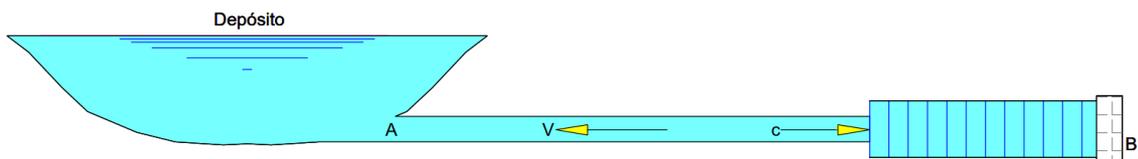
El flujo se encuentra en estado permanente, en el instante  $t=0$  antes del movimiento de válvula.



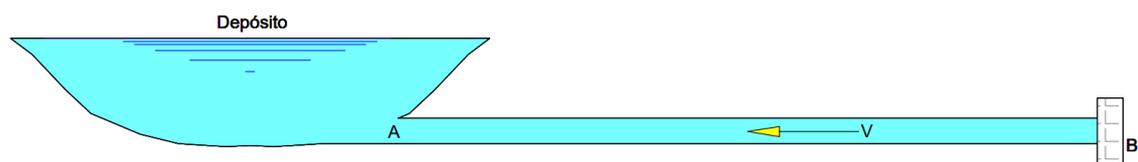
En esta etapa existe un cierre instantáneo de la válvula, produciendo una onda de presión que se propaga con un a cierta velocidad aguas arriba, las paredes de la tubería se dilatan.



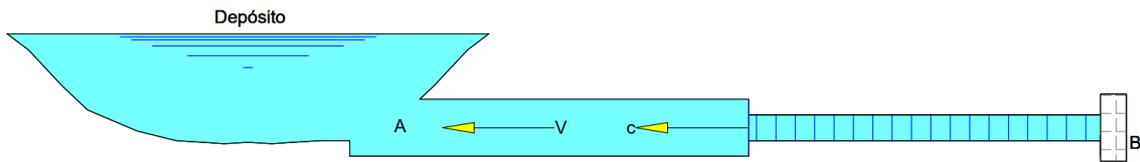
Al cabo del tiempo  $t=L/a$  la onda ha llegado al embalse, todo el fluido se encuentra comprimido y en reposo, la tubería está dilatada.



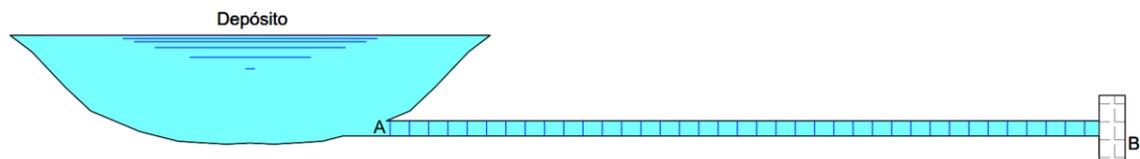
Se forma una onda de alivio que viaja hacia la válvula; así también existe un flujo que se dirige al embalse y finalmente las paredes de la tubería vuelven a su estado inicial.



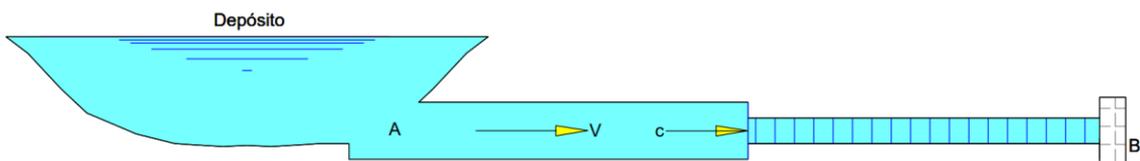
En una fase de  $t=2L/c$  la onda alcanza la sección de la válvula; el fluido se encuentra en una situación normal con la presión estática y las paredes de la tubería se encuentran en su estado normal; todo el volumen contenido en la tubería se dirige hacia arriba con cierta velocidad.



Se ha reflejado la onda, formando una frecuencia de presión negativa que se propaga hacia el embalse; en esta instancia la tubería se encuentra contraída y dilatada.



La onda es ahora de depresión; el fluido se encuentra en reposo y toda la tubería se encuentra con las paredes contraídas, en un tiempo de  $t=3L/c$ .



A la válvula se dirige una onda de presión positiva se observa que existe un flujo en dirección a la válvula, en este caso las paredes de la tubería vuelven a su estado original.



La onda llega a la válvula; las paredes de la tubería se encuentran en su estado normal y con velocidad positiva. Este ciclo se repite indefinidamente para un tiempo de  $t=4L/a$ .

### 3.3 Método de las características

Este método se caracteriza por permitir una resolución numérica, con condiciones de borde impuestas para cada problema (Twyman, 2017).

El software Bentley Hammer utiliza el método para la resolución de ecuaciones que gobiernan el flujo de tubería inestable (Pérez & Guitelman, 2005).

A continuación, se muestran dos ecuaciones de Saint Venant en donde se realiza el procedimiento:

$$H = Z + \frac{p}{\gamma} \quad \text{ó} \quad p = \gamma * (H - Z)$$

$$\frac{\partial p}{\partial l} = \gamma * \left( \frac{\partial H}{\partial l} - \frac{\partial Z}{\partial l} \right) = \rho * g \left( \frac{\partial H}{\partial l} - \frac{\partial Z}{\partial l} \right)$$

- Primera ecuación de Saint Venant

$$\frac{\partial p}{\partial l} \left( Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2 * g} \right) = -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - f \frac{U * |U|}{2 * g * D} \rightarrow \text{origen de la ecuación}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial l} + \frac{1}{\rho * g} \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{U \partial U}{g \partial l} + \frac{1 \partial U}{g \partial t} + f \frac{U * |U|}{2 * g * D} = 0$$

$$\frac{\partial Z}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial l} - \frac{\partial Z}{\partial l} + \frac{U \partial U}{g \partial l} + \frac{1 \partial U}{g \partial t} + f \frac{U * |U|}{2 * g * D} = 0 \rightarrow \text{reemplazo}$$

$$g * \frac{\partial H}{\partial l} + U \frac{\partial U}{g \partial l} + \frac{\partial U}{\partial t} + f \frac{U * |U|}{2 * D} = 0 \rightarrow \text{multiplicamos por } g$$

- Segunda ecuación de Saint Venant

$$\rho * \frac{\partial U}{\partial l} + \frac{1}{c^2} \left( U \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) = 0 \rightarrow \text{origen de la ecuación}$$

$$\rho * \frac{\partial U}{\partial l} + \frac{U \partial p}{c^2 \partial l} + \frac{1 \partial p}{c^2 \partial t} = 0$$

$$c^2 * \rho \frac{\partial U}{\partial l} + U \frac{\partial p}{g \partial l} + \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \rightarrow \text{multiplicamos por } c^2$$

$$c^2 * \rho \frac{\partial U}{\partial l} + U * \rho * g \left( \frac{\partial H}{\partial l} - \frac{\partial Z}{\partial l} \right) - \rho * g \left( \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{\partial Z}{\partial t} \right) = 0 \rightarrow \text{reemplazando}$$

Donde:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = 0; \frac{\partial Z}{\partial l} = -\text{sen}\theta$$

$$c^2 * \rho \frac{\partial U}{\partial l} + \rho * g * U \frac{\partial H}{\partial l} + \rho * g * U \text{sen}\theta + \rho * g \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \rightarrow \text{reemplazando}$$

∴ reemplazando

$$\frac{c^2 \partial U}{g \partial l} + U \frac{\partial H}{\partial l} + \frac{\partial H}{\partial t} + U \text{sen}\theta = 0 \rightarrow \text{ecuación}$$

(L1 y L2) son ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales en “U” y en “H” en función de “l” y “t”, no responden a ningún término general, pero sí se pueden resolver aplicando el método de las características y adecuarlas a una solución en diferencias finitas en el software (Abreu, 1995).

Las ecuaciones L1 y L2 contienen dos incógnitas: “U” y “H”. Además, estas ecuaciones se pueden relacionar a partir de un multiplicador desconocido:

$$L = L1 + \lambda * L2$$

“λ” son valores, reales y distintos, que dan un par de ecuaciones en “U” y “H” que conservan el significado físico dado por las ecuaciones de L1 y L2.

- Se calcula L para determinar los valores de λ

$$L = \left[ \frac{\partial H}{\partial l} (U + \lambda * g) + \frac{\partial H}{\partial t} \right] + \lambda \left[ \frac{\partial U}{\partial l} (U + \frac{c^2}{g * \lambda}) + \frac{\partial U}{\partial t} \right] + U \text{sen} \theta + \lambda * f \frac{U * |U|}{2 * D} = 0$$

Donde:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial l} * \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial H}{\partial t} \quad \vee \quad \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial U}{\partial l} * \frac{\partial l}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial t}$$

Deduciendo:

$$\frac{\partial l}{\partial t} = U + \lambda * g$$

$$\frac{\partial l}{\partial t} = U + \frac{c^2}{\lambda * g}$$

$$\therefore U + \lambda * g = U + \frac{c^2}{\lambda * g}$$

$$\lambda = \pm \frac{c}{g}$$

Los valores obtenidos de “λ” son números reales, transforman las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales a ecuaciones diferenciales ordinarias, es decir:

- Para  $c^+$

$$\frac{dH}{dt} + \frac{c}{g} * \frac{dU}{dt} + U * \text{sen} \theta + \frac{c * f * U * |U|}{2 * g * D} = 0$$

$$\frac{dl}{dt} = U + c$$

- Para  $c^-$

$$\frac{dH}{dt} - \frac{c}{g} * \frac{dU}{dt} + U * \text{sen} \theta - \frac{c * f * U * |U|}{2 * g * D} = 0$$

$$\frac{dl}{dt} = U - c$$

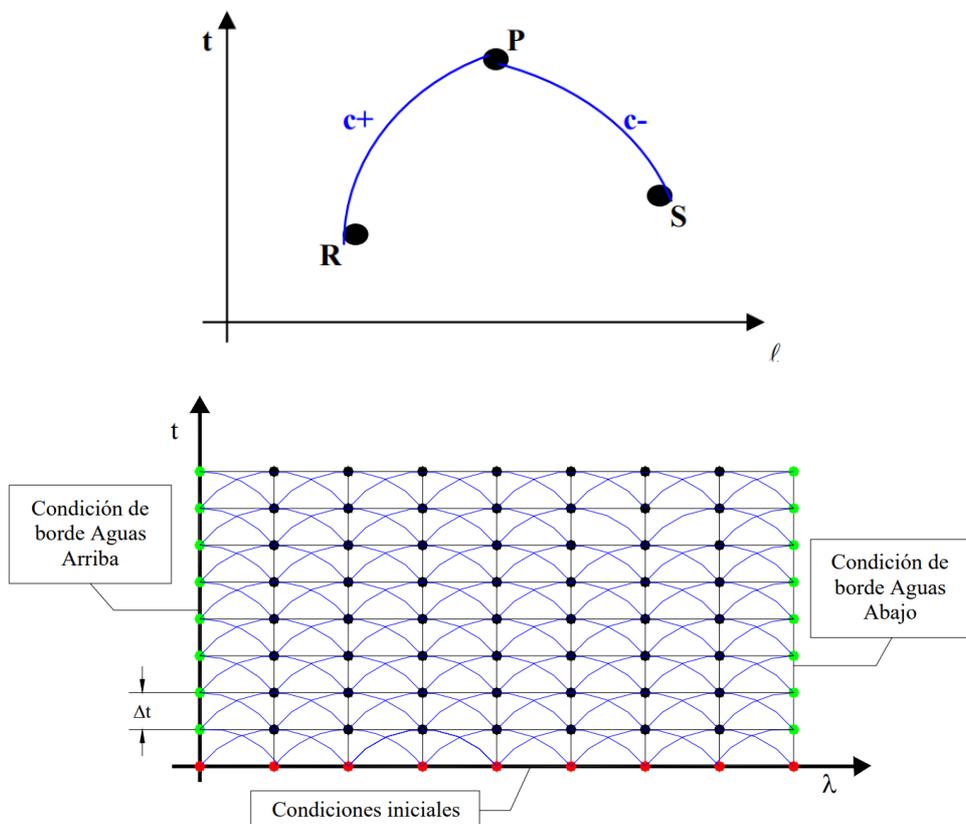
A estos sistemas de ecuaciones se los puede representar mediante una gráfica espacio vs tiempo. La carga piezométrica y la velocidad se puede notar en los extremos de las curvas, en los puntos “R” y “S”; de igual manera en la intersección de las curvas se localiza en punto P donde las ecuaciones características son válidas y se puede determinar el valor de la carga piezométrica como también el valor de la velocidad en el plano espacio vs tiempo.

De las curvas características partiendo de las condiciones de borde podemos encontrar nuevas intersecciones en cada una de las curvas y obtener valores de carga piezométrica y velocidad para tiempos diferentes (Dekam, 2009).

Se ha determinado que la celeridad de la onda de presión es mayor que la velocidad en los conductos.

**Figura 2.**

*Diagrama espacio-tiempo*



*Nota:* Curvas características. Fuente: (Perez, 2005)

## 3.4 Dispositivo de control y atenuación del golpe de ariete

### 3.5.1. Chimenea de equilibrio

Se le conoce como torre o pozo generalmente de sección circular, es un dispositivo de alivio que ayuda a disipar el efecto de golpe de ariete y es de mucha utilidad en las centrales hidroeléctricas ya que estas, son usualmente abiertas con una cubierta parcial, consiguiendo que en ese punto actúe la presión atmosférica.

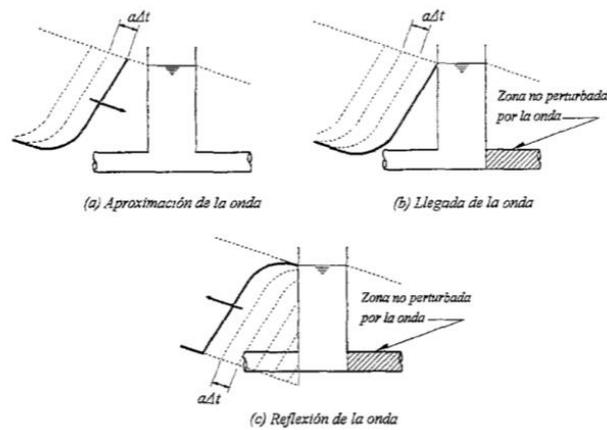
La función de la chimenea de equilibrio es recibir las sobrepresiones causadas por el cierre o apertura de una válvula, por lo que la onda de presión ingresa en ella elevando el fluido por el ducto hasta que haya una sobreelevación (Montes & Sabogal, 2019).

La relación en la que se basa una chimenea de equilibrio es su área transversal ( $A_{CH}$ ) y el área de la tubería de la conducción ( $A_T$ ); la expresión  $A_T/A_{CH}$  debe ser lo suficientemente grande, para que la vibración del líquido que se produzca en este sistema tenga una aceleración insignificante frente al gradiente hidrostático debido a la gravedad (Tullis, 1989).

El golpe de ariete generado por un cierre de válvula se disipará en la chimenea de equilibrio y se reflejará completamente en esta estructura, así protegerá el resto de la conducción como se observa en la figura 3.

**Figura 3.**

*Chimenea de equilibrio*



*Nota:* Comportamiento de una chimenea de equilibrio ante una onda depresiva.

Fuente: (Aburto,2001)

La relación que se interpreta entre el área de la chimenea de equilibrio y la línea de impulsión se determina con el criterio de Mosonyi y Seth, en la que se plantea la grafica  $A_T/A_{CH}$  vs el porcentaje de reflexión de las ondas (S) para los pozos simples sin orificio restringido.

**Figura 4.**

*Áreas vs porcentaje*



Nota: gráfica de la relación de áreas vs porcentaje de reflexión de ondas. Fuente: (Aburto,2001)

La gráfica que se presenta es de tipo exponencial a la que se refiere a los mayores valores del área transversal para la chimenea; mientras menor es el coeficiente de reflexión de onda, por lo tanto, la gráfica muestra una información de porcentaje al 90% en donde la relación  $A_T/A_{CH}$  no debe ser menor de 16.

A continuación, se presentan las ventajas y desventajas de una chimenea de equilibrio.

Ventajas:

- Se requiere de un mantenimiento mínimo para este tipo de estructuras hidráulicas debido a su accesibilidad.
- La infraestructura de la conducción que se encuentra aguas abajo de la chimenea estará protegida por los efectos del golpe de ariete, por lo tanto, no existe la necesidad de otros dispositivos secundarios.

Desventajas:

- En la chimenea de equilibrio la corona debe encontrarse por encima del nivel de la cota piezométrica para el caudal máximo en el punto que se instale.
- Aparición de fuertes fluctuaciones aguas arriba de la chimenea, incluso superiores a las que aparecerían si no hubiese chimenea.

### 3.5.2. Válvulas

Las válvulas utilizan para controlar y regular distintos parámetros de operación en acueductos, impulsiones, redes de agua y demás fluidos; en las cuales se determinan la apertura y cierre de la misma, donde la dirección del flujo es controlada por una válvula, siendo esta indispensable para el sistema.

Válvula de bola: esta válvula tiene una amplia gama de aplicaciones prácticas, el diámetro para este tipo de válvula se da en el Sistema internacional, en ella no se tienen

obstrucciones y tiene un buen rendimiento de sellado como puede ser utilizado para vacío y alta presión.

Válvulas mariposa: son utilizadas para grandes volúmenes donde garantizan incluso en los tiempos de respuesta más cortos, elevada funcionalidad y seguros en los cierres como en las aperturas (Kodura, 2016).

Válvulas anticipadoras de onda: este tipo de válvula entra en funcionamiento cuando ocurre una parada inesperada en el sistema o cuando se presenta algún cambio súbito en la dirección del agua en la que se podría minimizar las sobrepresiones generadas en el sistema.

Válvulas de alivio: esta válvula tiene la capacidad de mitigar las sobrepresiones y actúa cuando la presión en el sistema excede un cierto valor y la manera apropiada para aliviar presiones generadas es mediante la salida de caudales (Perotti & Parrondo, 2006).

## 4. Materiales y metodología

---

El proyecto hidroeléctrico Toachi-Pilatón, está ubicado al noroccidente de la provincia de Pichincha, en las estribaciones de la cordillera de los Andes, al sur oeste de la ciudad de Quito, en los límites de las provincias de Pichincha, Santo Domingo de los Tsáchilas y Cotopaxi, comunicado por la carretera Alóag-Santo Domingo (E20) siendo esta, una importante arteria vial del país que conecta la Sierra con la Costa. Los ríos Pilatón y Toachi tienen un caudal medio anual de 28.5 m<sup>3</sup>/s y 41.30m<sup>3</sup>/s respectivamente, de los cuales se ha considerado aprovechar su caudal para producir 254, 4 MW de potencia.

El proyecto comprende dos aprovechamientos en cascada: Pilatón-Sarapullo y Toachi-Alluriquín. El aprovechamiento Pilatón- Sarapullo está conformado por las siguientes obras hidráulicas: el azud vertedero, obras de toma, desarenador de cuatro cámaras, tubería de presión de sección circular que direcciona un caudal hasta la casa de máquinas Sarapullo, en el cual se encuentran alojadas las tres turbinas tipo Francis de unos 16 MW de potencia cada una y que aprovechan una caída bruta de alrededor 140 m para un caudal de diseño de 40 m<sup>3</sup>/s.

En la zona de influencia del proyecto se encuentran las comunidades de La Esperie, Mirabad y Pampas Argentinas en la parroquia Manuel Cornejo Astorga del cantón Mejía pertenecientes a la provincia de Pichincha. En la parroquia Alluriquín se encuentran las comunidades de Unión del Toachi y La Libertad que pertenecen al cantón Santo Domingo de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas y finalmente las comunidades de Palo Quemado, Praderas del Toachi en la parroquia Palo Quemado del cantón Sigchos en la provincia de Cotopaxi.

**Figura 5.**

*Mapa de ubicación del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón a nivel nacional*



*Nota:* Ecuador esta conformado por veinte y cuatro provincias y 221 cantones.

Fuente: (CELEC,2010)

**Figura 6.**

*Mapa de ubicación a nivel provincial*



*Nota:* De acuerdo a la división provincial el proyecto se encuentra en las Provincias de Cotopaxi, Pichincha y Santo Domingo. Fuente: (CELEC EP,2010)

**Figura 7.**

*Ubicación del proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón*



*Nota:* Vista Satelital del Proyecto Hidroeléctrico Toachi Pilatón con el programa  
Google Earth

## 4.1 Metodología

El objetivo principal de este trabajo de titulación, es realizar el análisis de transientes en el sistema del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo establecido para un rechazo de carga instantáneo y aceptación de carga para los caudales de  $13,33\text{m}^3/\text{s}$ ,  $20\text{m}^3/\text{s}$  y  $40\text{m}^3/\text{s}$  respectivamente, siendo el caudal de  $40\text{m}^3/\text{s}$  el más crítico para realizar el análisis en el software Bentley Hammer, en el cual se observarán los fenómenos que se dan por los transientes hidráulicos.

El golpe de ariete considera la respuesta de la exigencia del material de los túneles ante la presencia de los cambios de presión que se generan en un sistema de conducción, por lo que se pretende analizar la propagación de la energía a lo largo de la conducción. En el Aprovechamiento Pilatón – Sarapullo se encuentra la chimenea de equilibrio, cuya función es mitigar los efectos del golpe de ariete, de esta manera impedir el efecto que se produce en el momento que se haga un cierre brusco de una válvula que se encuentra

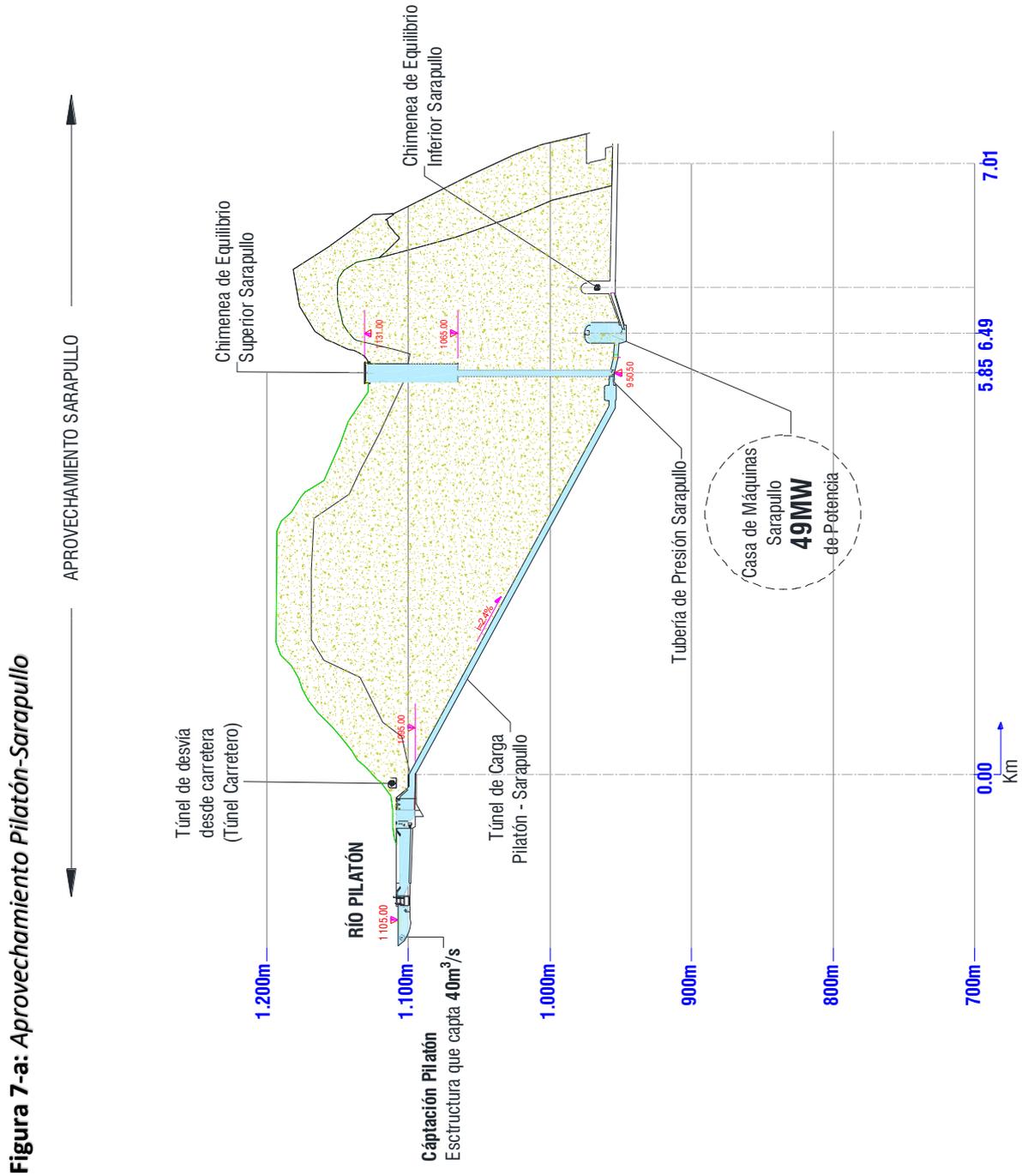
en la Casa de máquinas Sarapullo o que modifique la velocidad del fluido que transita por la tubería.

Es importante definir por medio de métodos matemáticos e investigativos, las estructuras que se afectarían en caso que el sistema funcione en condiciones críticas y su comportamiento frente a un golpe de ariete. Se realizará un análisis del régimen no permanente mediante un modelo matemático en condiciones iniciales para la simulación del transitorio hidráulico.

La simulación de flujo transitorio en Hammer, tiene la finalidad de explicar con claridad la ocurrencia del fenómeno de golpe de ariete en un sistema de conducción, para su caso más crítico, que consiste en una parada accidental o cierre de válvula. Estas maniobras asociadas a la operación de las válvulas pueden generar sobrepresiones, depresiones y fallas mecánicas en los dispositivos que forman parte de una válvula o turbina, la magnitud de estas presiones no es posible establecerlas de manera estricta, pues dependen en gran proporción de la configuración de los sistemas de funcionamiento y sus características sobre todo de la longitud de la conducción Pilatón - Sarapullo.

El método numérico que se utiliza para la resolución del sistema de ecuaciones es denominado de “integración numérica”, que a su vez se sustenta en la metodología de diferencias finitas ya que son ecuaciones diferenciales homogéneas (modelo rígido). A diferencia del modelo elástico para flujo transitorio en donde se consideran las propiedades mecánicas del agua y del medio (tuberías conducciones), el diferencial de tiempo no juega un papel importante en la convergencia del método numérico, ya que el término que asocia a la celeridad de onda en el sistema se anula, por tanto, mientras más pequeño es, se tendrá una mayor precisión en el cálculo de las sobrepresiones para todos los instantes.

## 4.2 Dimensiones relevantes del Aprovechamiento Pilatón.



Tramo de análisis: Ciénaga Pilatón y Casa de Máquinas Sarapullo

A continuación, se presentan las dimensiones más relevantes del aprovechamiento Pilatón - Sarapullo:

**Tabla 4.**

*Datos generales del Aprovechamiento Hidroeléctrico Pilatón-Sarapullo*

<b>Hidrología río Pilatón</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Área de drenaje	km <sup>2</sup>	521.00
Caudal medio	m <sup>3</sup> /s	28.50
Caudal 90%	m <sup>3</sup> /s	10.10
Caudal ecológico	m <sup>3</sup> /s	2.85
Caudal crecida 500 años	m <sup>3</sup> /s	478.00
Caudal crecida 25 años	m <sup>3</sup> /s	332.00
<b>Caudales de Diseño</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Captación, conducción y equipos	m <sup>3</sup> /s	40
Azud de captación	m <sup>3</sup> /s	480
<b>Captación Pilatón</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Nivel normal de operación	msnm	1105
Nivel cresta del vertedero	msnm	1100
Nivel puente sobre compuertas	msnm	1108
Nivel solera rejilla	msnm	1103.4
Compuertas plana Ingreso desarenador	N°	4
BxH	mxm	4.0x1.6
Número cámaras desarenador	N°	4

N° compuertas de limpieza	N°	8
<b>Túnel de carga</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Tipo: de presión revestido de hormigón		
Diámetro interior	m	3.8
Longitud	m	5912.95
Pendiente media	%	2.36
<b>Tubería a presión</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Diámetro interior	m	3.00
Longitud	m	103.00
Diámetro interior ramales	m	1.75
Longitud ramales	m	Turbina 1 L=25 Turbina 2 L=22 Turbina 3 L=31
<b>Chimenea de equilibrio superior</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Tipo: pozo vertical, revestida de hormigón		
<b>Pozo inferior</b>		
Diámetro interior	m	3.5
Entre los niveles	msnm	948 a 1065
<b>Pozo superior</b>		
Diámetro interior	m	12
Entre los niveles	msnm	1065 a 1129
<b>Casa de máquinas</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
Tipo: Subterránea		

Alto máximo	m	30.92
Ancho	m	14.00
Longitud	m	49.50
Nivel eje rodete turbinas	msnm	952.80
Nivel piso principal	msnm	962.30

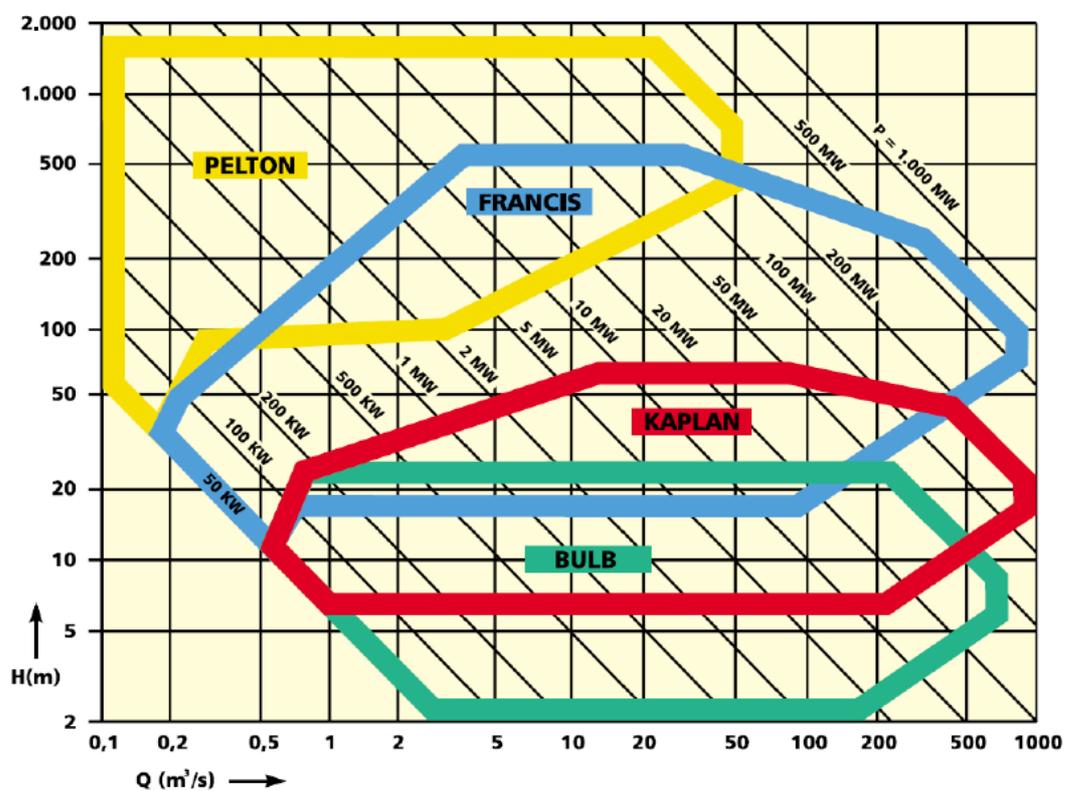
*Nota:* Datos para la simulación de la Hidroeléctrica Toachi Pilatón. Fuente: (CELEC EP,2010)

### Equipamiento mecánico

Las características del caudal, altura e información técnica, son datos importantes para determinar el tipo de turbina hidráulica; el tipo de turbinas instaladas en el Aprovechamiento Pilatón Sarapullo son de tipo Francis de eje vertical como se observa en la figura 8.

**Figura 8.**

*Selección de la turbina en función del caudal y altura*



*Nota:* Tipos de turbina según la necesidad. Fuente: (LOMBARDI,2009)

**Tabla 5.**

*Características de la turbina tipo Francis*

Datos de la turbina		
Velocidad de rotación	rpm	450

*Nota:* Datos importantes para la simulación. Fuente: (CELEC EP,2008)

### Potencia instalada

La potencia instalada en la central Hidroeléctrica Toachi – Pilatón se determinó de la siguiente manera:

$$P_i = \gamma * Q_{max} * H * \eta$$

Donde:

$$Q_{max} = \text{caudal} - \text{turbina}$$

$$H = \text{altura}$$

$$\eta = \text{eficiencia de la turbina } 0.90$$

$$g = 9.806 \text{ m/s}^2$$

$$\gamma = \text{peso específico del agua}$$

$$P_i = \gamma * Q_{max} * H * \eta$$

$$P_i = \frac{1000kg}{m^3} * \frac{9.806m}{s^2} * \frac{40m^3}{s} * 138.39m * 0.9$$

$$P_i = 9806 \frac{N}{m^3} * \frac{40m^3}{s} * 138.39m * 0.9$$

$$P_i = 48853884.24 \frac{N * m}{s}$$

$$P_i = 48853884.24 \frac{J}{s}$$

$$P_i = 48853884.24 \text{ W}$$

$$P_i = 48.85 \text{ MW}$$

## Celeridad

Es la velocidad de propagación de la onda de presión del golpe de ariete que se produce con un fluido que circula a través de un sistema de tubería, esta velocidad depende directamente del módulo de elasticidad del líquido, densidad del fluido, diámetro, espesor y módulo de Young de la tubería.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g} * \left( \frac{1}{K} + \frac{D * c1}{E * e} \right)}}$$

donde:

$$a = \textit{velocidad de onda} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

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

$$D = \textit{diámetro de la tubería} [m]$$

$$e = \textit{espesor de la tubería} [m]$$

$$E = \textit{módulo de Young} \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

$$K = \textit{módulo de volumen de agua} \left[ \frac{Kg}{m^2} \right]$$

$$w = \textit{peso específico del H}_2\text{O} \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$c1 = \textit{módulo de Poisson}$$

## 4.3 Programa computacional Hammer.

La ecuación de continuidad y de momento, son fórmulas diferenciales parciales hiperbólicas casi lineales, que describen el flujo transitorio en conductos cerrados. Aunque se han desarrollado muchos métodos para resolver las ecuaciones y comprender el comportamiento de los transitorios, los resultados se pueden obtener manualmente solo para sistemas de tuberías simples. Resolver las ecuaciones requiere cálculos matemáticos complejos y es un evento que demanda mucho tiempo debido a las iteraciones requeridas para el efecto. El software permite a los usuarios disminuir los

errores y ahorrar tiempo en los cálculos para sistemas de tuberías complejos y condiciones de contorno.

En el presente estudio, se emplea Bentley Hammer que se utiliza para resolver las ecuaciones de continuidad y momento, el cual permite simular el modelo en análisis del Aprovechamiento Pilatón Sarapullo. El software resuelve el método de ecuaciones características, que convierten ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas no lineales en ecuaciones diferenciales ordinarias para sistemas de tuberías grandes y complejos, el uso de Bentley Hammer tiene muchas ventajas, que se mencionan a continuación:

-Dado que el modelo se puede formular y analizar antes de la construcción de los sistemas, se pueden sugerir las precauciones adecuadas para evitar cualquier daño después de la operación de la Central Hidroeléctrica.

-El software Hammer tiene ciertas propiedades que permiten a los usuarios importar dibujos y formar modelos en proyectos existentes.

-Cada elemento se puede analizar uno por uno con los resultados y parámetros necesarios para que un problema se pueda simplificar y resolver rápidamente.

-Dado que el sistema de entrada de datos es simple, se puede modelar una central hidroeléctrica sin miembros faltantes y se pueden aplicar medidas de protección en diferentes escenarios. El software lleva a la comparación de todos los escenarios y alternativas en una ventana.

-Los resultados se pueden observar con representaciones gráficas y animaciones que indican la carga hidráulica, presión, velocidad de la turbina, etc.

Debido a que Hammer tiene muchas ventajas, contribuye a este estudio para analizar la central hidroeléctrica con turbinas para diferentes escenarios, el modelado es simple y los resultados ayudan a encontrar cualquier problema en el sistema analizado; después de validar el modelo en Hammer con datos medidos en campo, se observan casos

críticos para sugerir alguna medida de protección, para que la central hidroeléctrica esté cubierta y protegida de riesgos en el futuro.

## 4.4 Interfaz y barras de herramientas en Bentley Hammer

El software en el que se realizó las simulaciones, utiliza el método de las características para la resolución de las ecuaciones de St-Venant en la que representan los fenómenos transitorios en un sistema de presión.

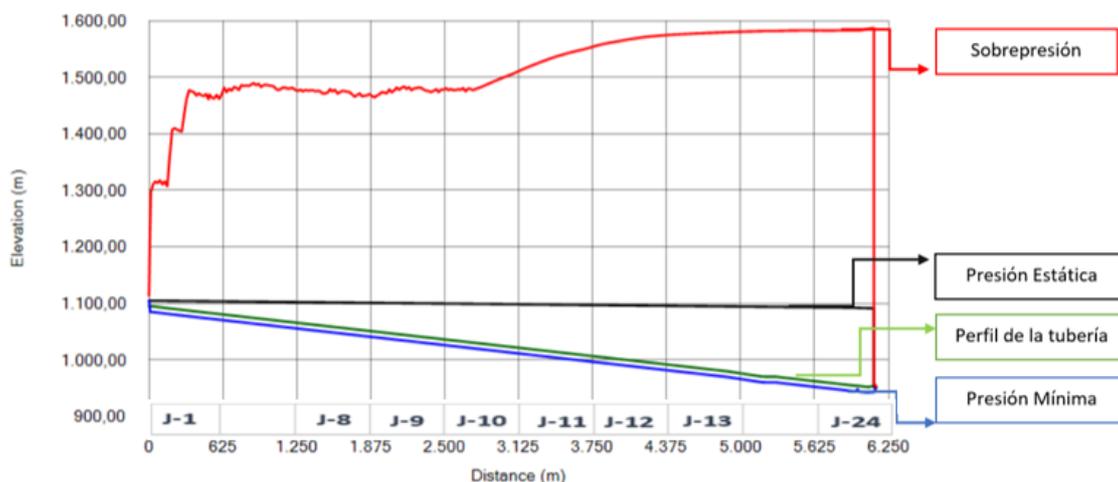
El objetivo general es determinar los niveles máximos y mínimos que se presentan en el tanque de carga del aprovechamiento Pilatón – Sarapullo, debido a las oscilaciones que se presentan en este elemento, durante un evento transitorio.

El Software Bentley Hammer puede esquematizar mediante objetos un sistema de conducción y permite visualizar o representar las obras principales que forman parte del sistema analizado.

El procedimiento de modelamiento se desarrolló mediante escenarios, el cual se sintetiza de la siguiente manera:

- Esquematización del modelo.
- Selección de datos como diámetro, longitud, características de las tuberías, niveles de cada una de las obras hidráulicas y caudales del aprovechamiento Toachi Pilatón.
- Selección de los parámetros para la simulación: intervalos de tiempo para el cierre instantáneo o cierre lento, duración de la simulación en el cual se pueda verificar el transitorio.
- Planteamiento de los escenarios según sea el caso de análisis.
- Calibración del modelo mediante las condiciones iniciales que ofrece el software.
- Simulación y análisis de los resultados obtenidos.

En los escenarios planteados, el primer cálculo que se obtiene en el software es de las condiciones iniciales, donde el sistema se encuentra en un régimen permanente. Con la ayuda del programa Bentley Hammer se pueden obtener valores de presiones máximas y mínimas en una línea de conducción, como se muestra en la Figura 9.

**Figura 9.***Gradiente Hidráulico*

*Nota:* Golpe de ariete y gráfica de presiones.

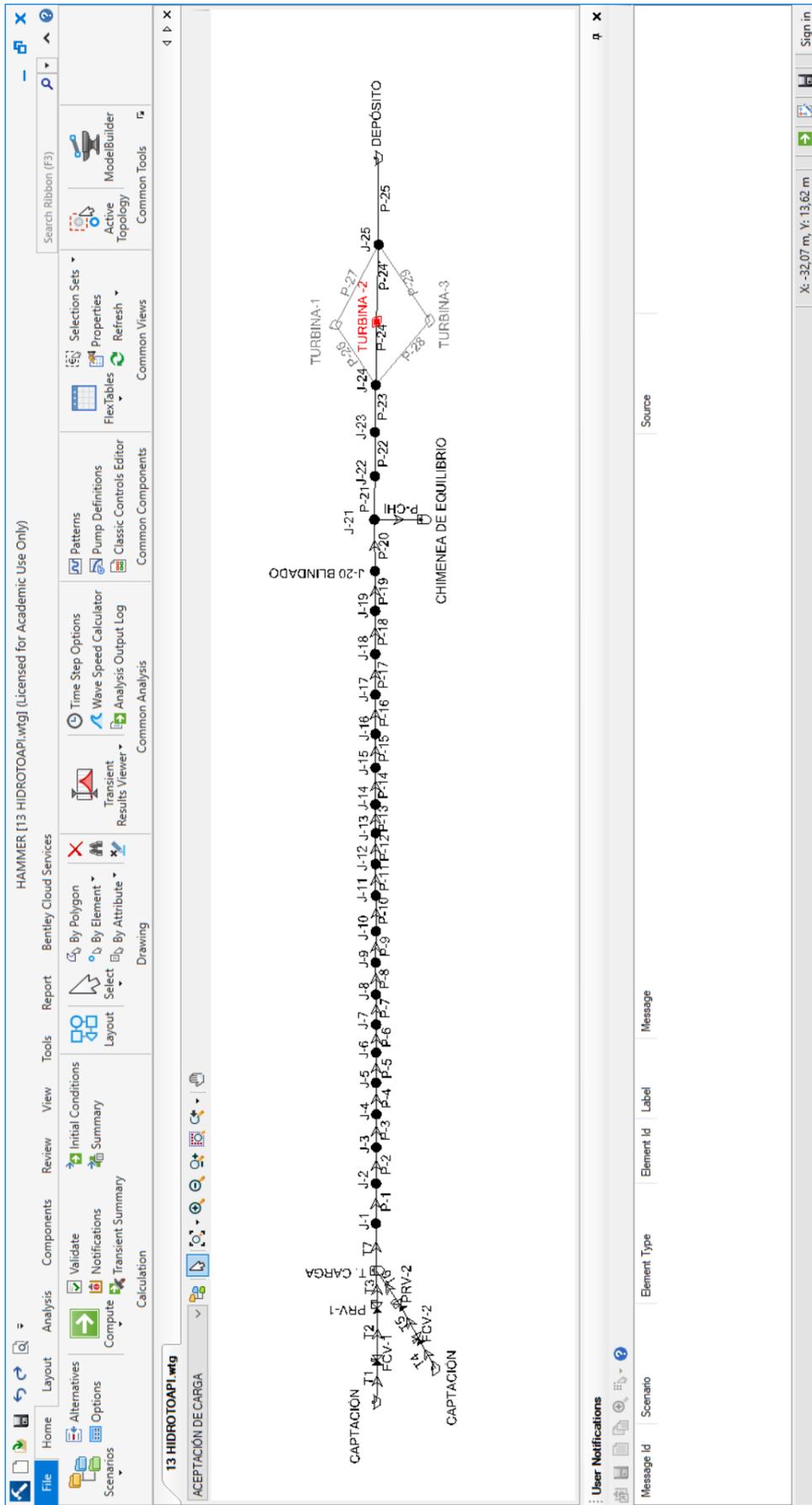
Bentley Hammer tiene una interfaz fácil de usar, donde las barras de herramientas se pueden ajustar según los requisitos del usuario y pueden acceder a las tablas de cada uno de los componentes, reporte de resultados y los accesos directos, como se muestra en la figura 10.

En la interfaz gráfica se consideran todos los elementos que conforman el Aprovechamiento Pilatón Sarapullo, siguiendo el proceso que se muestra a continuación:

- Ingresar los elementos hidráulicos como: captación, válvulas de control, secciones de tubería, chimenea de equilibrio y turbinas.
- Configurar el sistema de unidades, es recomendable trabajar en el sistema internacional para un mejor manejo del modelo hidráulico.
- Ingresar datos en cada uno de los elementos como: tanque de carga, túnel de presión, chimenea de equilibrio superior Sarapullo, válvulas de control.
- En la captación se ubicaron dos válvulas que permitirán controlar el ingreso del caudal de acuerdo al requerimiento de los escenarios para su respectivo análisis.

- El tanque de carga que se encuentra junto al desarenador en la captación Pilatón, es modelado con la opción de surge-tank, cuya herramienta permitirá observar los niveles alcanzados durante el transitorio.
- Ingresar la línea de conducción (túnel de presión) y sus características en cada uno de los tramos de acuerdo a su funcionamiento.
- La chimenea de equilibrio superior Sarapullo fue considerada como un surge-tank, ya que es la encargada de disipar la energía producida por el golpe de ariete y que permitirá observar las variaciones de niveles que se presenten en un evento transitorio.
- En las turbinas que se encuentran en la casa de máquinas Sarapullo, se ingresaron patrones de tiempo y porcentajes de cierre o apertura, estos datos permitirán observar los regímenes no permanentes que se presentarán en cada uno de los escenarios.

Figura 10. Interfaz gráfica de los elementos hidráulicos del aprovechamiento Pilatón - Sarapullo



En la figura 10, se presenta las barras de herramientas que permite realizar modelados de transitorios hidráulicos. La primera barra de herramientas se llama "Archivo", en la cual los usuarios pueden crear o abrir un nuevo proyecto, guardar o imprimir el archivo y usar comandos de exportación o importación.

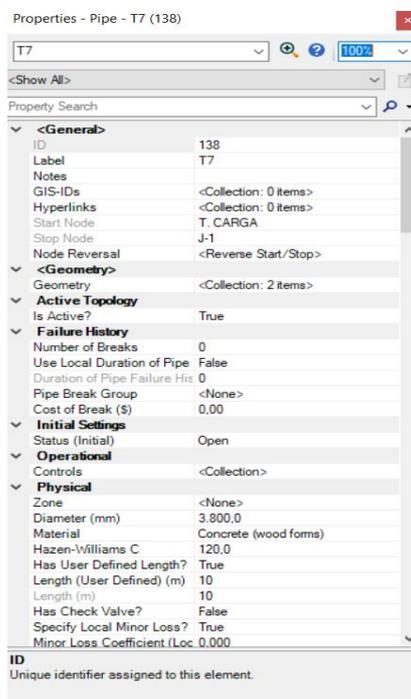
La barra de herramientas "Diseño" incluye todos los miembros como: tubería, unión, válvula y turbina, para un sistema hidroeléctrico, la cual permite desarrollar un modelo mediante el software Bentley Hammer.

Es importante identificar los escenarios, alternativas y las opciones de cálculo mediante la herramienta "Análisis", donde los usuarios pueden comparar los resultados obtenidos en la simulación del escenario en estudio.

En la figura 11, se muestra como se ingresa las propiedades para la tubería como: diámetro en mm, longitud de la tubería, tipo de material para la tubería y el método para el modelado.

**Figura 11.**

*Propiedades de la tubería*

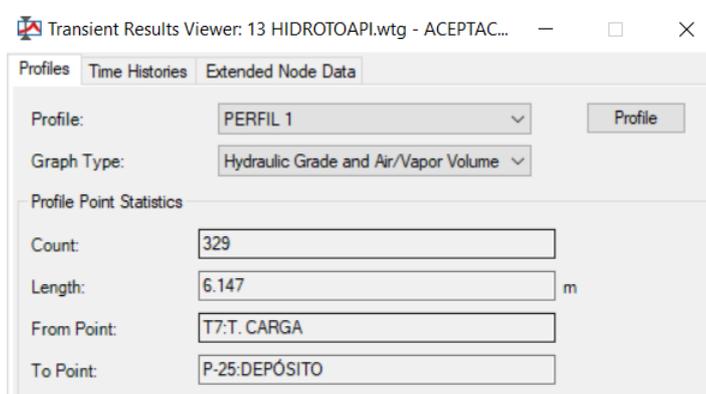


*Nota:* Ventana de opciones para las condiciones iniciales

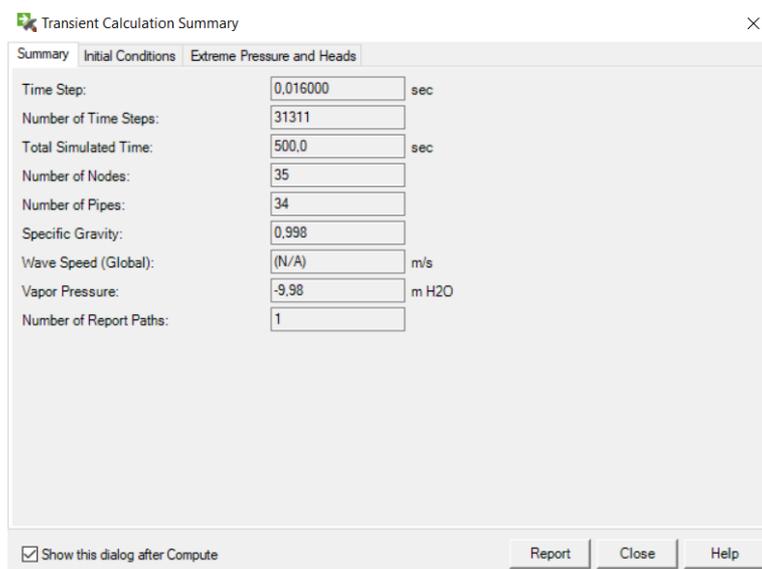
La barra de herramientas de análisis también incluye un visor de resultados transitorios, como se muestra en la figura 12, la cual proporciona representaciones gráficas de los resultados. Los usuarios pueden analizar los resultados del gradiente hidráulico (Figura 16) y de la presión en el perfil mediante un croquis, o visualizar los resultados mediante un gráfico con respecto al tiempo. Además, se puede visualizar las propiedades elementos específicos como la velocidad de la turbina, datos relevantes en los nodos, etc.

### Figura 12.

#### *Ventana de resultado para el transitorio*



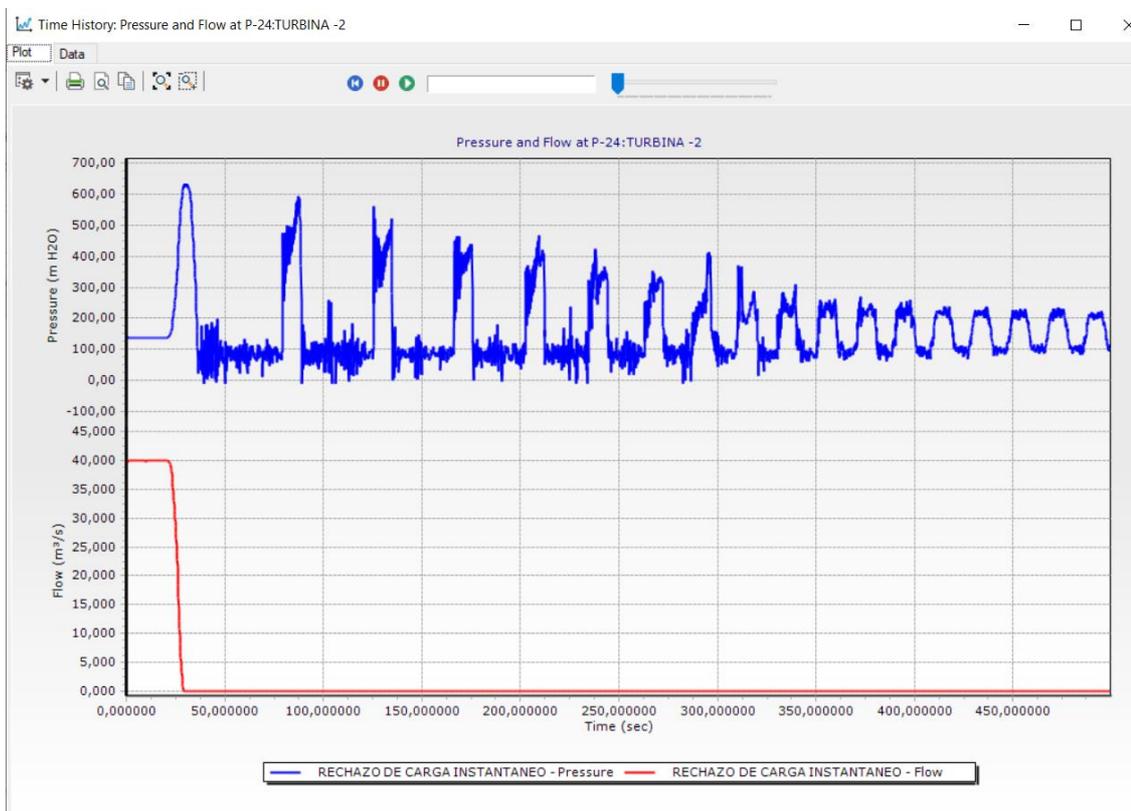
En la figura 13, se puede visualizar el cuadro de resumen de la herramienta de análisis del flujo demandado, suministrado y almacenado, por la cual el cálculo transitorio indica los datos simplificados de las simulaciones, esta ventana se abre automáticamente y permite a los usuarios ver los resultados en el tiempo, período total simulado, resultados de la condición inicial y presiones máxima y mínima en el análisis transitorio.

**Figura 13.***Cuadro de resumen del transitorio*

Parameter	Value	Unit
Time Step:	0,016000	sec
Number of Time Steps:	31311	
Total Simulated Time:	500,0	sec
Number of Nodes:	35	
Number of Pipes:	34	
Specific Gravity:	0,998	
Wave Speed (Global):	(N/A)	m/s
Vapor Pressure:	-9,98	m H2O
Number of Report Paths:	1	

El usuario puede ilustrar gráficos utilizando la herramienta "Visor de resultados transitorios", esta opción permitirá analizar el fenómeno transitorio producido en el sistema, el golpe de ariete y el comportamiento del flujo transitorio, aquí se analiza y se observa diferentes tipos de gráficos como: presión vs tiempo (figura 14), descarga vs tiempo y variación de la gradiente hidráulica a lo largo de la línea de conducción.

Estos gráficos conducen a la comprensión del fenómeno transitorio y determinan los puntos específicos para el análisis, además, proporciona animaciones en los gráficos que permiten a los usuarios abrir diferentes ventanas y analizar los fenómenos presentados en la simulación. En la herramienta "Perfil" hay muchas alternativas diferentes que indican, la gradiente hidráulica, la presión, la velocidad, la presión de vapor para determinadas rutas de flujo, entre otros datos. La opción "Time Histories" indica los gráficos de presión, flujo, gradiente hidráulico vs tiempo para puntos específicos de la modelación hidráulica.

**Figura 14.***Presión y caudal vs tiempo*

En la sección de análisis se puede utilizar la herramienta “Validar”, para revelar errores en los datos de entrada antes de ejecutar los cálculos iniciales o transitorios, una vez completada la validación del modelo, el usuario ejecuta el modelo utilizando las condiciones iniciales de cálculo y los botones de cálculo.

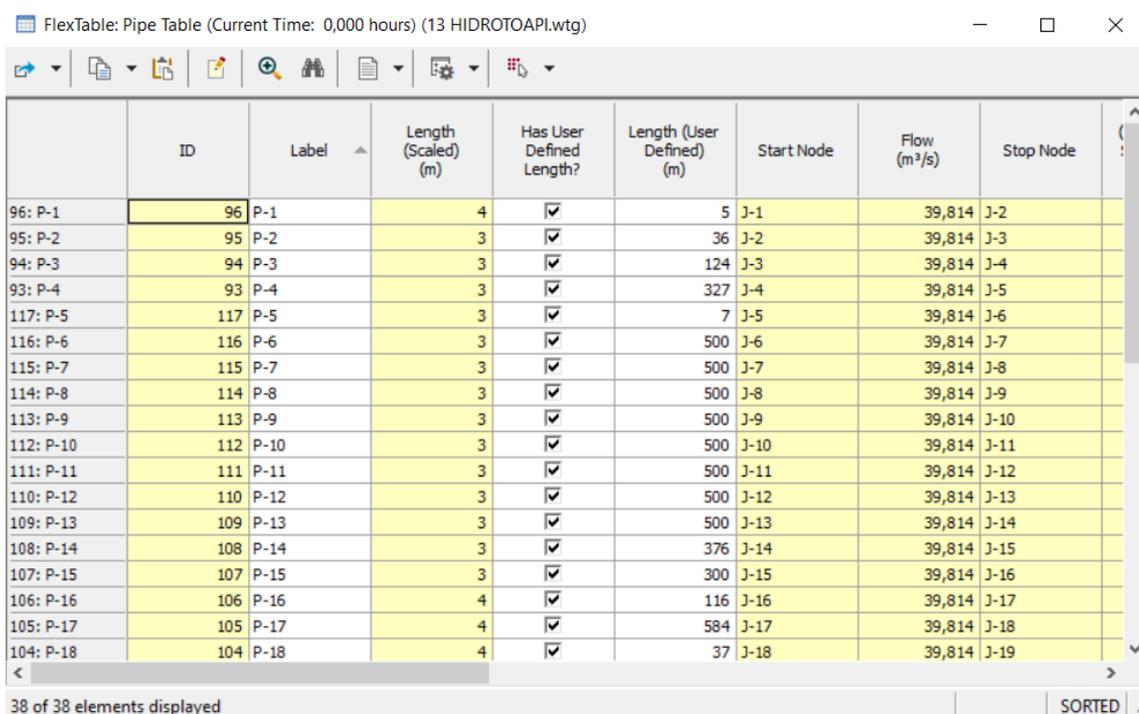
Otra opción de la barra de herramientas es "Componentes", que permite verificar si un elemento está funcionando y muestra el estado de simulación. Los elementos que componen el sistema se pueden separar por secciones y los cambios se realizan para cada uno de los elementos del modelo, utilizando la herramienta "Zonas", la cual se maneja en el modelado de sistemas de suministro de agua y la propiedad de los patrones conduce a regular el cierre o la apertura en las válvulas, compuertas, válvulas reductoras de presión y válvulas de control. Los usuarios pueden definir gráficos de porcentaje de cierre relativo o porcentaje de apertura vs tiempo, para organizar la regla de funcionamiento de las válvulas. Dado que cada tubería tiene pérdidas de carga puntuales o localizadas, los coeficientes se pueden ingresar en el programa como datos

de entrada en la herramienta "Coeficientes de pérdida menor", además tiene una biblioteca de coeficientes de materiales que se encuentran en el software de Bentley Hammer.

La barra de herramienta "Ver" incluye propiedades de gráficos, perfiles y tablas, las cuales indican parámetros y resultados de elementos como tuberías, las columnas de la tabla se pueden ajustar según los requisitos del usuario. Los valores de las propiedades se pueden cambiar o editar en la tabla de análisis, así como se muestra en la figura 15.

**Figura 15.**

*Tabla de tuberías*

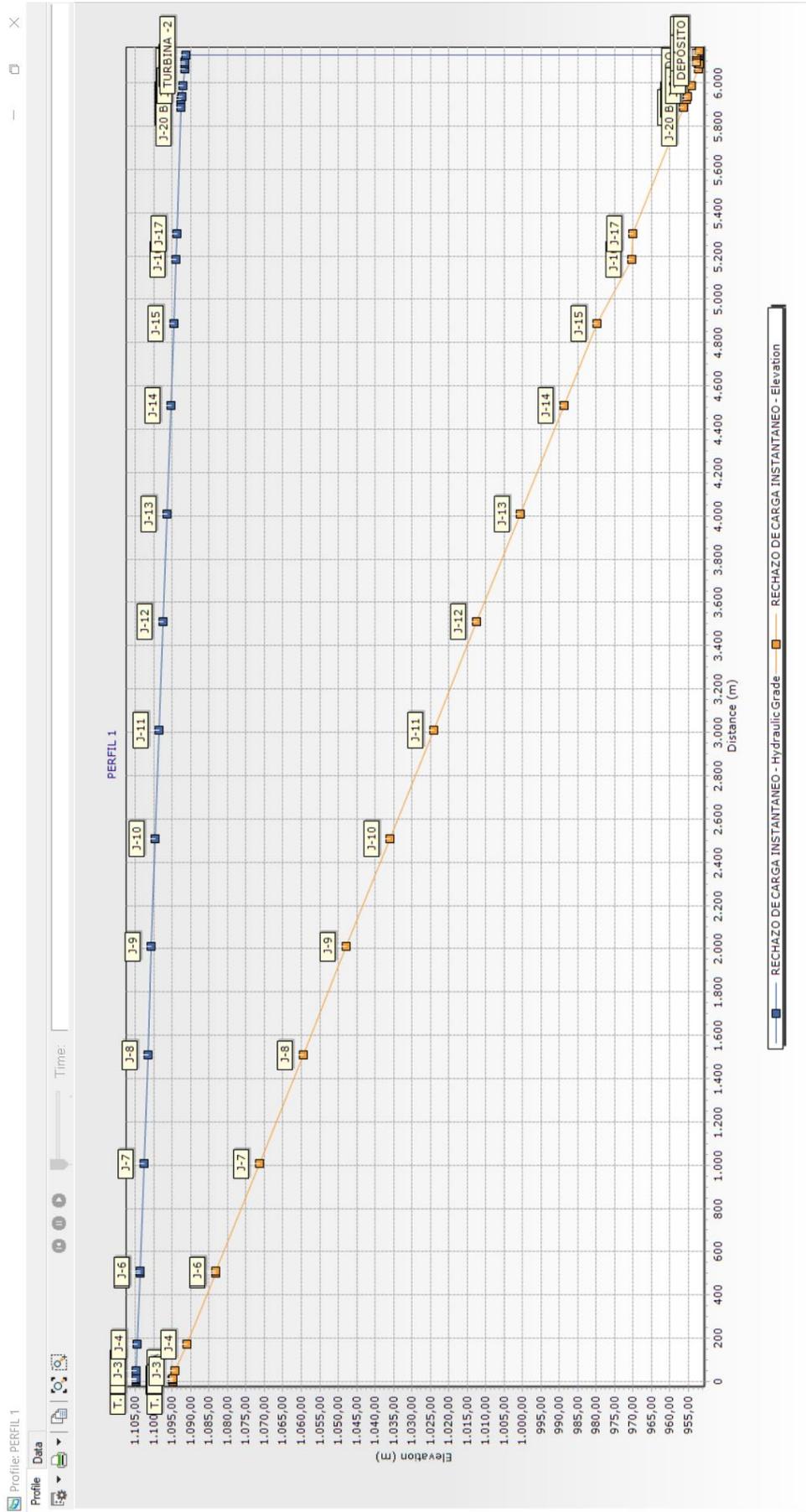


	ID	Label	Length (Scaled) (m)	Has User Defined Length?	Length (User Defined) (m)	Start Node	Flow (m³/s)	Stop Node
96: P-1	96	P-1	4	<input checked="" type="checkbox"/>	5	J-1	39,814	J-2
95: P-2	95	P-2	3	<input checked="" type="checkbox"/>	36	J-2	39,814	J-3
94: P-3	94	P-3	3	<input checked="" type="checkbox"/>	124	J-3	39,814	J-4
93: P-4	93	P-4	3	<input checked="" type="checkbox"/>	327	J-4	39,814	J-5
117: P-5	117	P-5	3	<input checked="" type="checkbox"/>	7	J-5	39,814	J-6
116: P-6	116	P-6	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-6	39,814	J-7
115: P-7	115	P-7	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-7	39,814	J-8
114: P-8	114	P-8	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-8	39,814	J-9
113: P-9	113	P-9	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-9	39,814	J-10
112: P-10	112	P-10	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-10	39,814	J-11
111: P-11	111	P-11	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-11	39,814	J-12
110: P-12	110	P-12	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-12	39,814	J-13
109: P-13	109	P-13	3	<input checked="" type="checkbox"/>	500	J-13	39,814	J-14
108: P-14	108	P-14	3	<input checked="" type="checkbox"/>	376	J-14	39,814	J-15
107: P-15	107	P-15	3	<input checked="" type="checkbox"/>	300	J-15	39,814	J-16
106: P-16	106	P-16	4	<input checked="" type="checkbox"/>	116	J-16	39,814	J-17
105: P-17	105	P-17	4	<input checked="" type="checkbox"/>	584	J-17	39,814	J-18
104: P-18	104	P-18	4	<input checked="" type="checkbox"/>	37	J-18	39,814	J-19

38 of 38 elements displayed | SORTED

Con el fin de examinar la gradiente hidráulica y la presión en diferentes puntos del modelo, el usuario debe formar un perfil y decidir qué elementos se incluirán en el mismo, para ello se ayuda de herramientas en las que se pueda visualizar la esquematización de los elementos del modelado en elevación. En los perfiles generados, el eje horizontal indica la distancia y el eje vertical muestra la elevación de los elementos pertenecientes al sistema; los usuarios pueden seleccionar todos los puntos del modelo para tener una idea general de la diferencia entre la línea de rasante hidráulica y los elementos del sistema como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Perfil longitudinal de la línea de conducción del Aprovechamiento Pilatón - Sarapullo

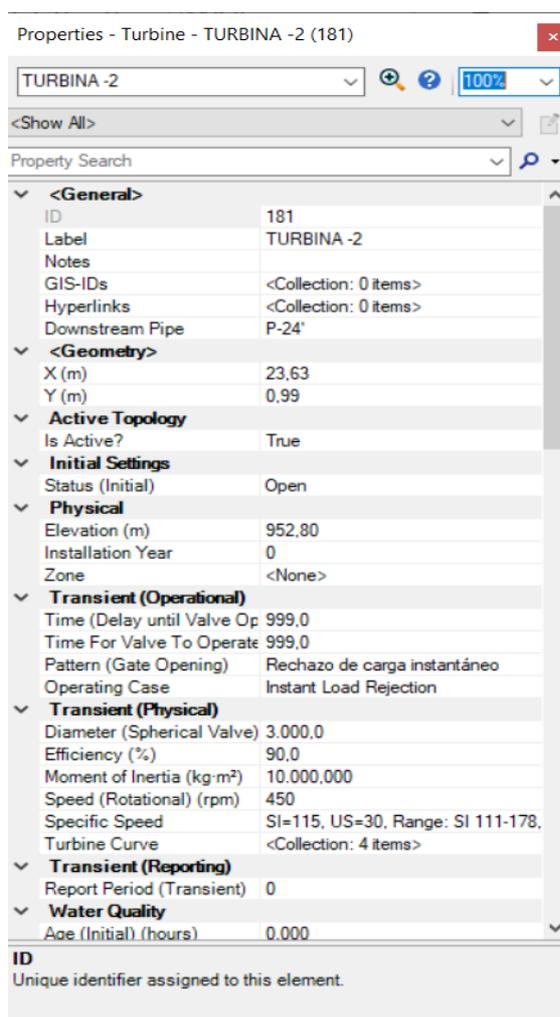


Nota: Elevación de los elementos en el sistema

En el menú de "Propiedades", se ingresan los valores y características del elemento para posteriormente simular en software Bentley Hammer, donde el usuario puede ver los datos de entrada, resultados del análisis transitorio, condiciones iniciales, etiquetas, etc. Además de eso, se pueden cambiar o ingresar muchas variables para un solo elemento seleccionado.

**Figura 17.**

*Menú de propiedades para la turbina*



## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Rechazo de carga instantáneo

#### 5.1.1. Con vertederos laterales en el tanque de carga, $Q=13,33$ m<sup>3</sup>/s

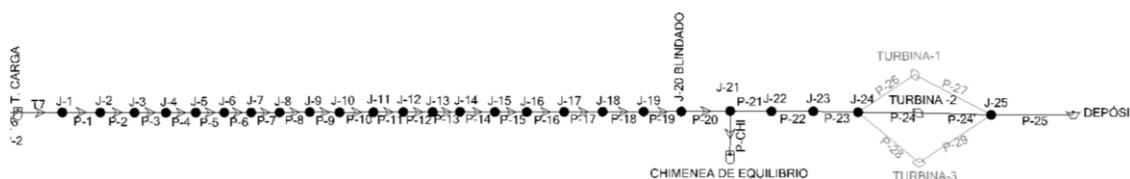
Con la simulación numérica de cada uno de los fenómenos transitorios del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, se busca comprobar el funcionamiento de las obras hidráulicas, a través de la cual se verificará la presión máxima admisible del material de la tubería con la envolvente de presiones máximas.

Se recopilan datos de entrada para el modelamiento en Hammer y se incluyen todos los componentes como se muestra en la figura 18.

El flujo se transporta desde el tanque de carga que tiene una elevación de la superficie de agua de 1.105 m por un túnel de presión, la chimenea de equilibrio se conecta mediante un túnel de carga de hormigón formando parte del sistema. La elevación de la superficie del agua en estado estable de la chimenea de equilibrio superior correspondiente es de 1092,16 m. y en la casa de máquinas la tubería forzada está separada por tres ramales a través de la cual se distribuirá el líquido a las tres turbinas, luego la tubería forzada de acero transmite el agua a la turbina cuya elevación central es de 952,80 m. y finalmente el agua llega al nivel de descarga a una elevación de 952,82 m.

**Figura 18.**

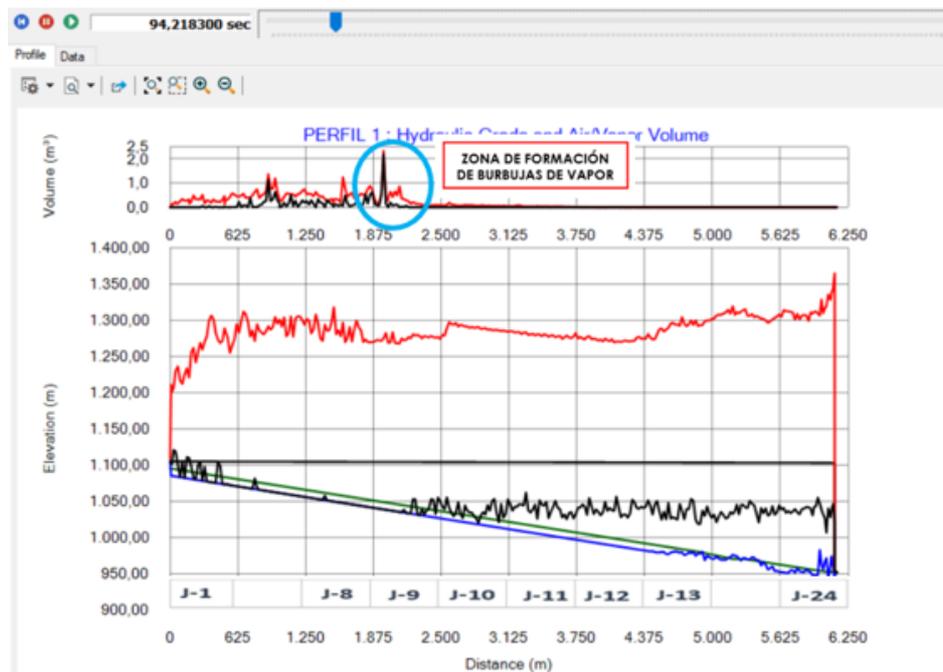
*Modelo Hammer*



Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 1</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: 13,33 m <sup>3</sup> /s
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 19.**

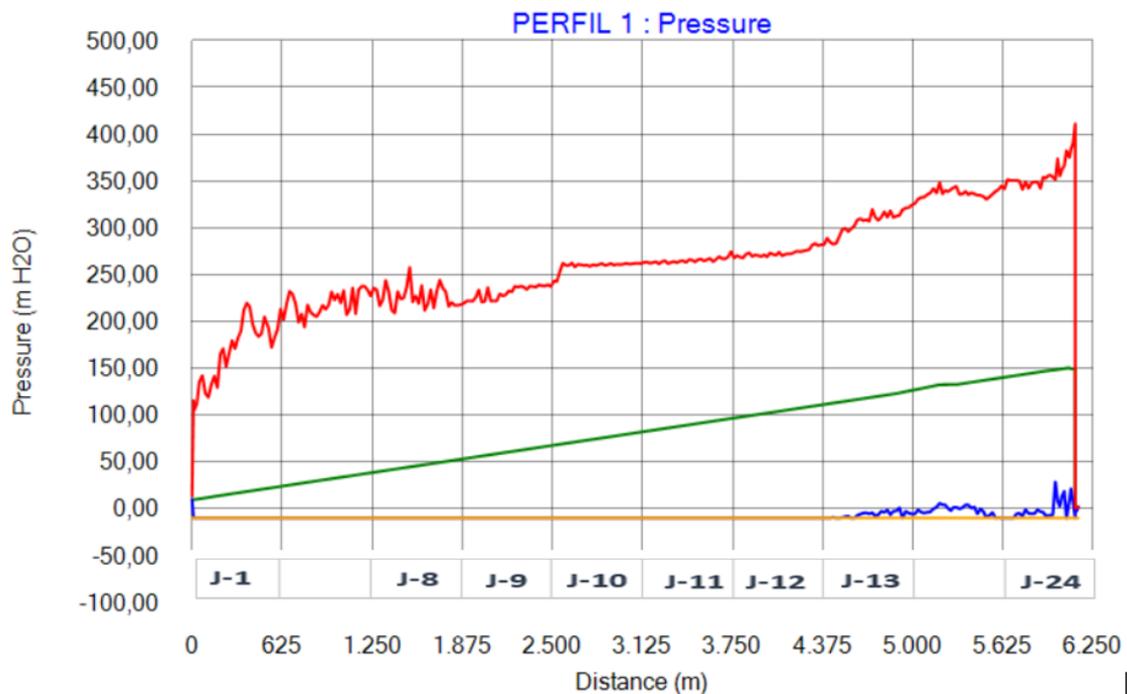
*Resultado del transitorio hidráulico para el escenario Nº1*



*Nota:* Gradiente hidráulico (inicial, mínimo y máximo) y elevaciones para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 20.**

*Perfil de presiones para el escenario N°1*



*Nota:* Presiones (máxima, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Tabla 6.**

*Resultados obtenidos de las envolventes máximas y mínimas*

Nombre	Abscisa	Distancia (m)	Presión mínima (m H2O)	Presión máxima (m H2O)	Presión inicial (m H2O)	Presión (m H2O)	Aire/Vapor Volumen Máximo (m3)	Presión de vapor (m H2O)
T7:T. CARGA	0+000	0	9,88	13,55	9,87	10,43	0	-9,98
T7:J-1	0+10	10	-9,98	115,53	9,74	6,98	0,1	-9,98
P-4:J-5	0+502	502	-9,98	205	21,33	0,53	0,5	-9,98
P-9:J-10	2+510	2.510	-9,98	243,03	67,86	21,25	0,1	-9,98
P-14:J-15	4+886	4.886	-2,3	312,51	122,98	62,3	0	-9,98
P-19:J-20BLINDADO	5+935	5.935	-6,93	355,35	147,32	90,27	0	-9,98
P-20:J-21	5+989	5.989	28,54	351,45	148,27	85,73	0	-9,98
P-23:J-24	6+097	6.097	21,19	383,78	149,51	81,8	0	-9,98
P-24:J-24	6+097	6.097	21,19	383,78	149,51	81,8	0	-9,98
P-24:TURBINA - 2	6+127	6.127	-9,98	411	149,49	76,41	0	-9,98

*Nota:* Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción para el escenario N°1

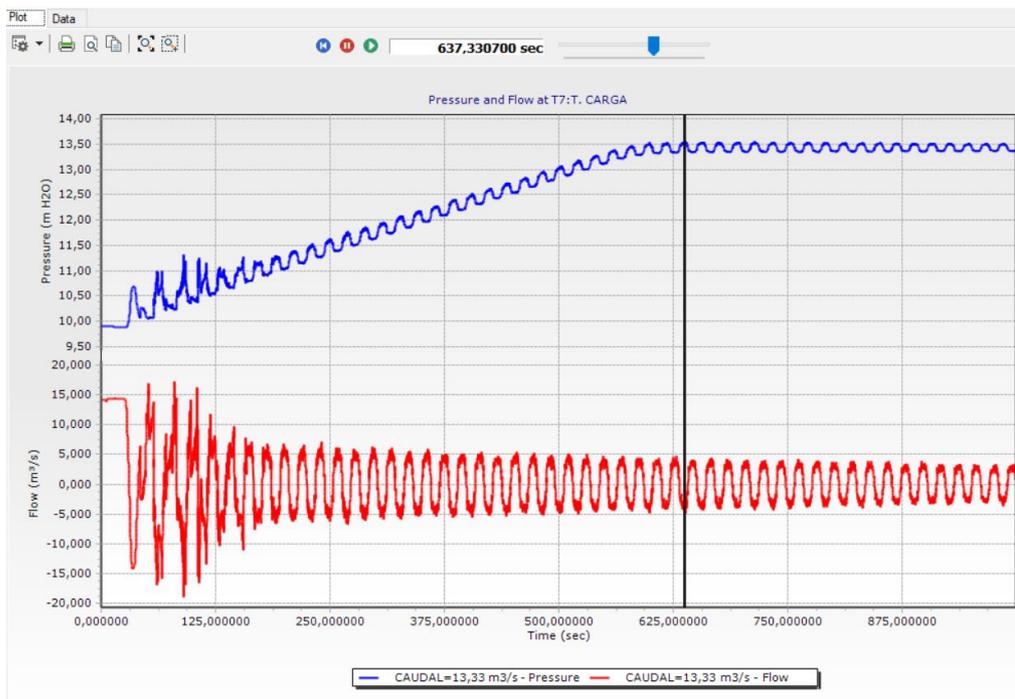
En la figura 20, en el primer escenario se presenta el resultado de las presiones resultantes, para un rechazo de carga instantáneo, la simulación del transitorio hidráulico para este caso se lo realizó en un tiempo  $t=16,67$  minutos, en este período se analizan los efectos producidos por el golpe de ariete, y se determinó una sobrepresión máxima de 411 m en la turbina y una presión mínima de -9.98m; en un tiempo de 94,21 segundos se evidencia una zona de formación de burbujas de vapor que se encuentra en la abscisa 1968m (figura 19), sabiendo que puede ser perjudicial para el sistema, teniendo un volumen de vapor que asciende a 2300 litros, encontrándose aguas abajo del tanque de carga .

La Chimenea de Equilibrio Superior Sarapullo cumple con la función de disipar las presiones generadas por el golpe de ariete generado por un rechazo de carga instantáneo, debido a un cierre inesperado de las válvulas que se encuentran en la Casa de máquinas Sarapullo, en la figura 19 se observa una zona crítica de formación de burbujas de vapor aguas arriba de la chimenea, así también las envolventes de sobrepresiones máximas y mínimas (figura 20).

En la tabla 6, se encuentra consolidada la información reportada por el software Bentley Hammer para los principales elementos hidráulicos que se hallan en el sistema del Aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, en la cual se refleja el comportamiento de presión a través del tiempo cuando sucede el fenómeno transitorio.

**Figura 21.**

*Presión y caudal para un estado transitorio en el tanque de carga*



**Tabla 7.**

*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

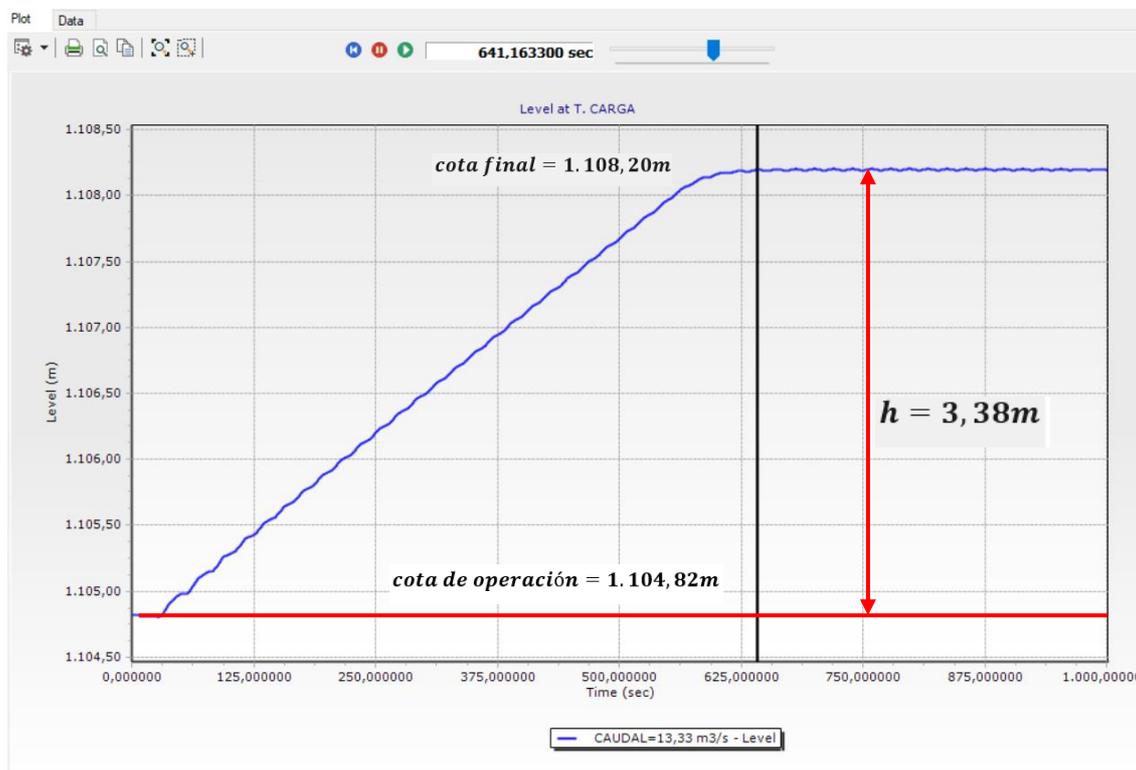
Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
637,49	13,50	-3,062
637,65	13,50	-3,209
637,81	13,54	-4,403
<b>637,97</b>	<b>13,56</b>	<b>-4,922</b>
638,13	13,54	-4,341
638,29	13,51	-3,537
638,45	13,51	-3,467
638,61	13,50	-3,008
638,77	13,51	-3,461
638,93	13,50	-3,035

Los resultados de la simulación numérica muestran una presión máxima en el tanque de carga de 13.56 m en un tiempo de  $t=637.97$  segundos como se muestra en la figura 21. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos; en efecto la variación de la presión y caudal se visualiza a lo largo de la sección longitudinal

en la línea de color azul, que muestra los valores máximo y mínimo de las presiones y los caudales.

**Figura 22.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 8.**

*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

Tiempo (seg)	Cota (m)
640,80	1.108,19
640,96	1.108,19
<b>641,12</b>	<b>1.108,20</b>
641,28	1.108,20
641,44	1.108,20
641,60	1.108,20
641,76	1.108,20
641,92	1.108,20
642,08	1.108,20

Para el escenario uno, con un caudal de 13.33 m<sup>3</sup>/s, en el software Bentley Hammer se observa que el agua alcanza un nivel de 1.108,20 m en el tanque de carga en un tiempo

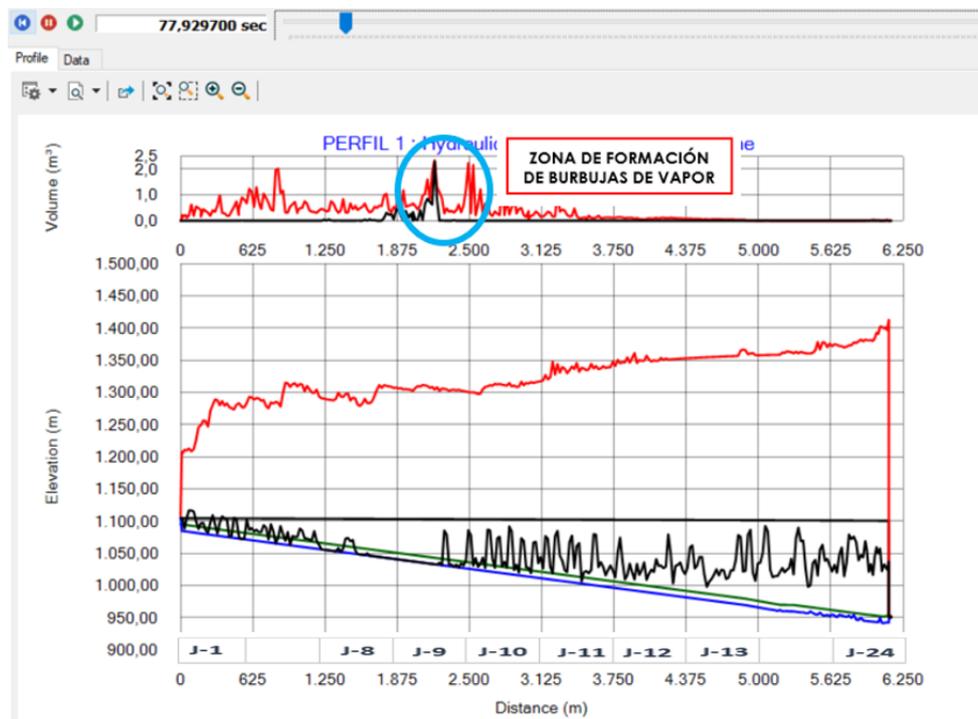
de  $t = 641.12$ , y el nivel de operación se encuentra en la cota  $1.104,82$  m (figura 22). Al término de la simulación del transitorio, en un tiempo de  $t = 16,67$  minutos, se determina un volumen de desbordamiento de  $5078.37$  m<sup>3</sup>, este sobrevientado se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga, supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, provocando que el agua rebose sobre la misma inundando toda el área del tanque de carga.

### 5.1.2. Con vertederos laterales en el tanque de carga, $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 2</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: $20 \text{ m}^3/\text{s}$
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 23.**

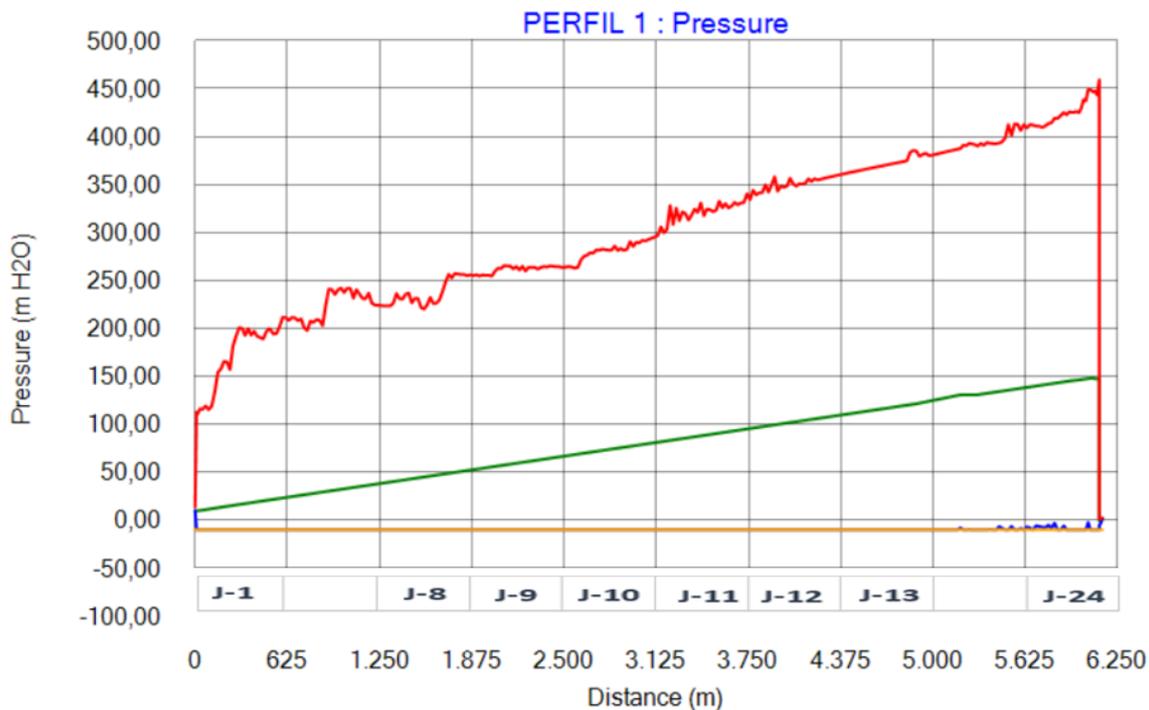
*Gráfica del transiente hidráulico para el escenario Nº2*



*Nota:* Gradiente hidráulico (inicial, mínimo y máximo) y elevaciones para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 24.**

*Perfil de presiones*



*Nota:* Presiones (máxima, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Tabla 9.**

*Resultados obtenidos de la simulación*

Nombre	Abscisa	Distancia (m)	Presión mínima (m H2O)	Presión máxima (m H2O)	Presión inicial (m H2O)	Presión (m H2O)	Aire/Vapor Volumen Máximo (m3)	Presión de vapor (m H2O)
T7:T. CARGA	0+000	0	9,88	13,89	9,87	10,68	0	-9,98
P-4:J-5	0+502	502	-9,98	199,75	21,16	-5,05	0,2	-9,98
P-9:J-10	2+510	2.510	-9,98	263,86	67,03	42,76	0,8	-9,98
P-14:J-15	4+886	4.886	-9,98	385,04	121,37	43,15	0	-9,98
P-19:J-20BLINDADO	5+935	5.935	-9,98	425,36	145,35	101,06	0	-9,98
P-20:J-21	5+989	5.989	-9,98	424,99	146,26	62,61	0	-9,98
P-23:J-24	6+097	6.097	-9,98	447,63	147,40	77,17	0	-9,98
P-24:J-24	6+097	6.097	-9,98	447,63	147,40	77,17	0	-9,98
P-24:TURBINA - 2	6+127	6.127	-9,98	459,1	147,35	84,24	0	-9,98

*Nota:* Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción para el escenario N°2

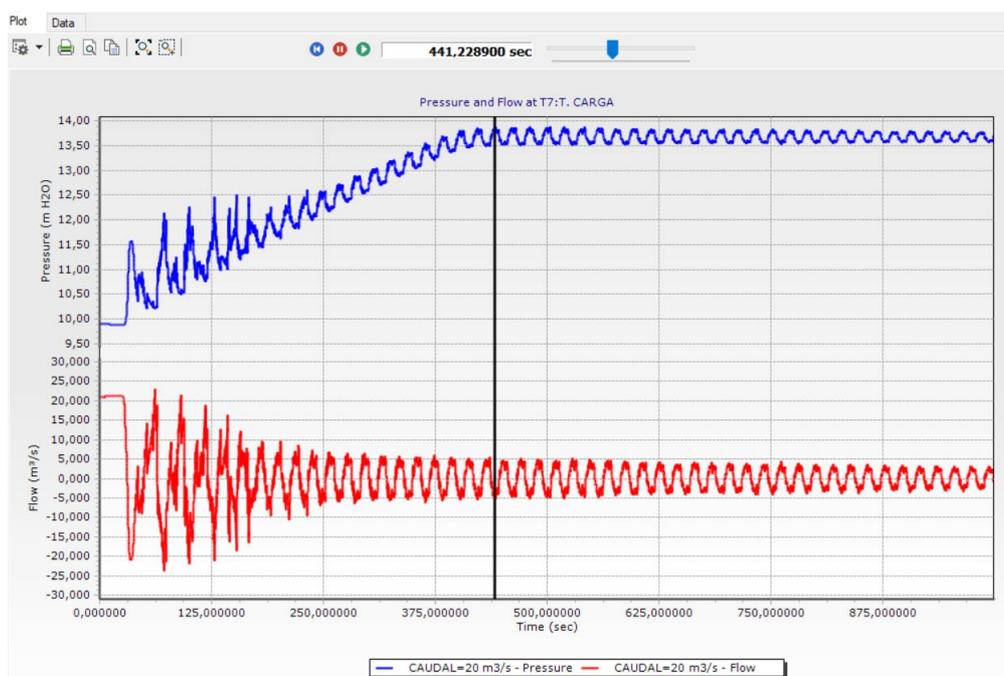
En el segundo escenario (figura 24), se presenta el resultado de las presiones resultantes para un rechazo de carga instantáneo, la simulación del transitorio hidráulico para este caso se lo realizó en un tiempo  $t=16,67$  minutos, en este período se analizan los efectos producidos por el golpe de ariete y se determina una sobrepresión máxima de 459,1 m y una presión mínima de -9.98m. En un tiempo de 77,92 segundos se evidencia una zona de formación de burbujas de vapor que se encuentra en la abscisa 2198 m (figura 23), la cual puede ser perjudicial para el sistema que tiene un volumen de vapor que asciende a 2300 litros y se encuentra aguas abajo del tanque de carga.

La Chimenea de Equilibrio Superior Sarapullo cumple con la función de disipar el golpe de ariete generado por un rechazo de carga instantáneo, debido al cierre de las válvulas, donde se observa una zona crítica de formación de burbujas de vapor aguas arriba de la chimenea, así como también las envolventes de sobrepresiones máximas y mínimas (figura 23).

En la tabla 9, se encuentra consolidada la información reportada por el software Bentley Hammer para los principales elementos hidráulicos que se encuentran en el sistema del Aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, allí se refleja el comportamiento de presión a través del tiempo, cuando sucede el fenómeno transitorio.

### Figura 25.

#### *Presiones máximas en el tanque de carga*



**Tabla 10.**

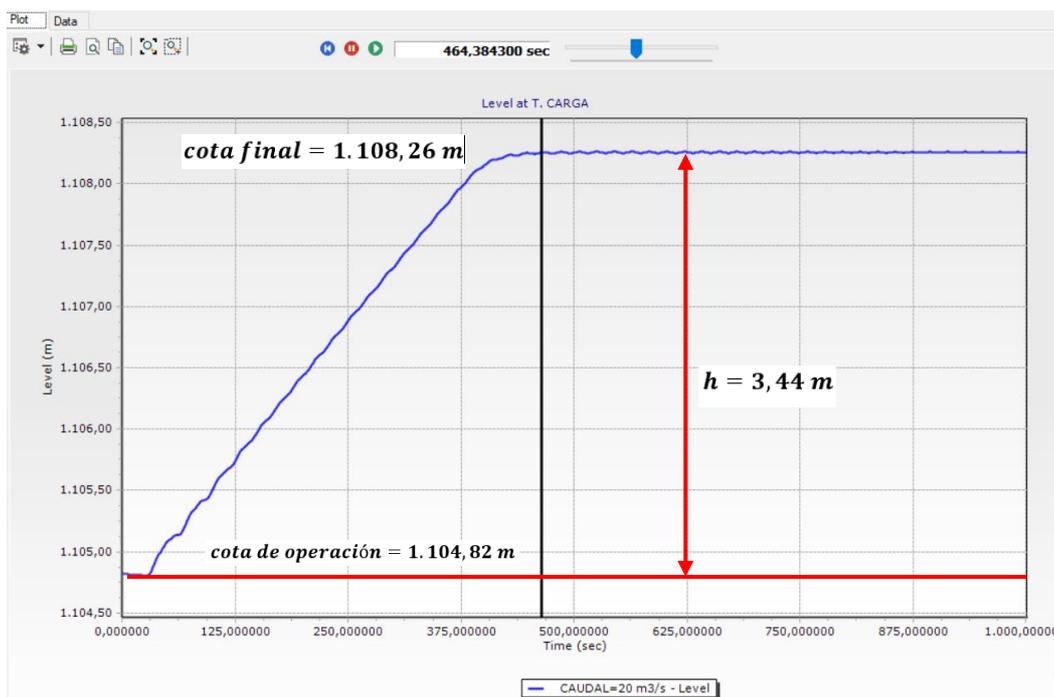
*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
440,750	13,81	-3,969
440,910	13,82	-4,227
<b>441,069</b>	<b>13,86</b>	<b>-5,046</b>
441,229	13,86	-5,067
441,389	13,81	-4,085
441,548	13,82	-4,148
441,708	13,84	-4,616
441,868	13,81	-4,034
442,027	13,87	-5,31
442,187	13,84	-4,599

Los resultados de la simulación numérica, muestran una presión máxima en el tanque de carga de 13.86 m en un tiempo de  $t=441,07$  segundos, como se observa en la figura 25. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos. La variación de la presión y el caudal se visualiza a lo largo de la sección longitudinal en la línea de color azul, que muestra el valor máximo y mínimo de las presiones y los caudales.

**Figura 26.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 11.**

*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

Tiempo (seg)	Cota (m)
463,840	1.108,25
464,000	1.108,25
464,160	1.108,25
464,320	1.108,25
<b>464,480</b>	<b>1.108,26</b>
464,640	1.108,26
464,800	1.108,26
464,960	1.108,26
465,120	1.108,26
465,280	1.108,26

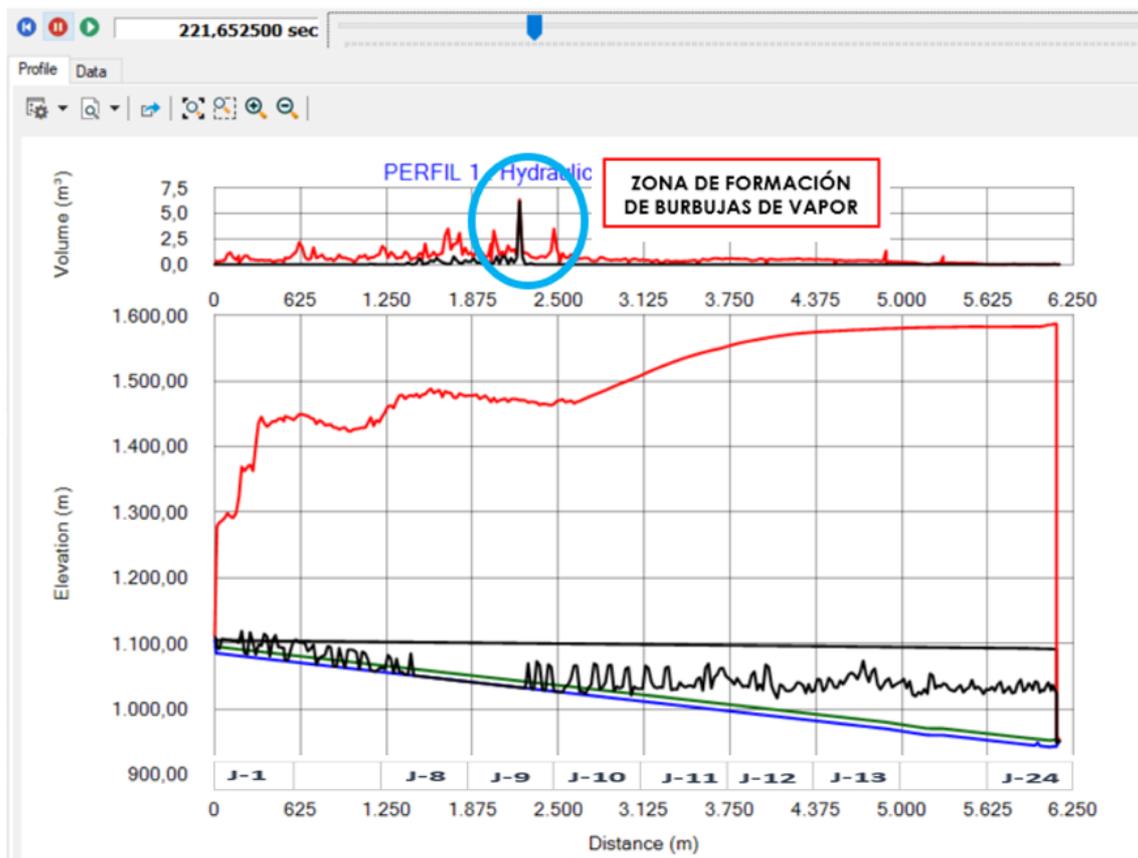
Del análisis realizado para el escenario dos, con un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s en el tanque de carga del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo se observa que, el agua del tanque de carga alcanza un nivel de 1.108,26 m en un tiempo de  $t= 641.12$  segundos, y el nivel normal de operación que se encuentra en la cota 1.104,82 m (figura 26). Al término de la simulación del transitorio en un tiempo de  $t=16,67$  minutos, se determina un volumen de desbordamiento de 10934,44 m<sup>3</sup>, este sobrevertido se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, el agua rebosa sobre la misma provocando inundaciones en toda el área del tanque de carga.

### 5.1.3. Con vertederos laterales en tanque de carga, $Q=40\text{m}^3/\text{s}$

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 3</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: $40\text{ m}^3/\text{s}$
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 27.**

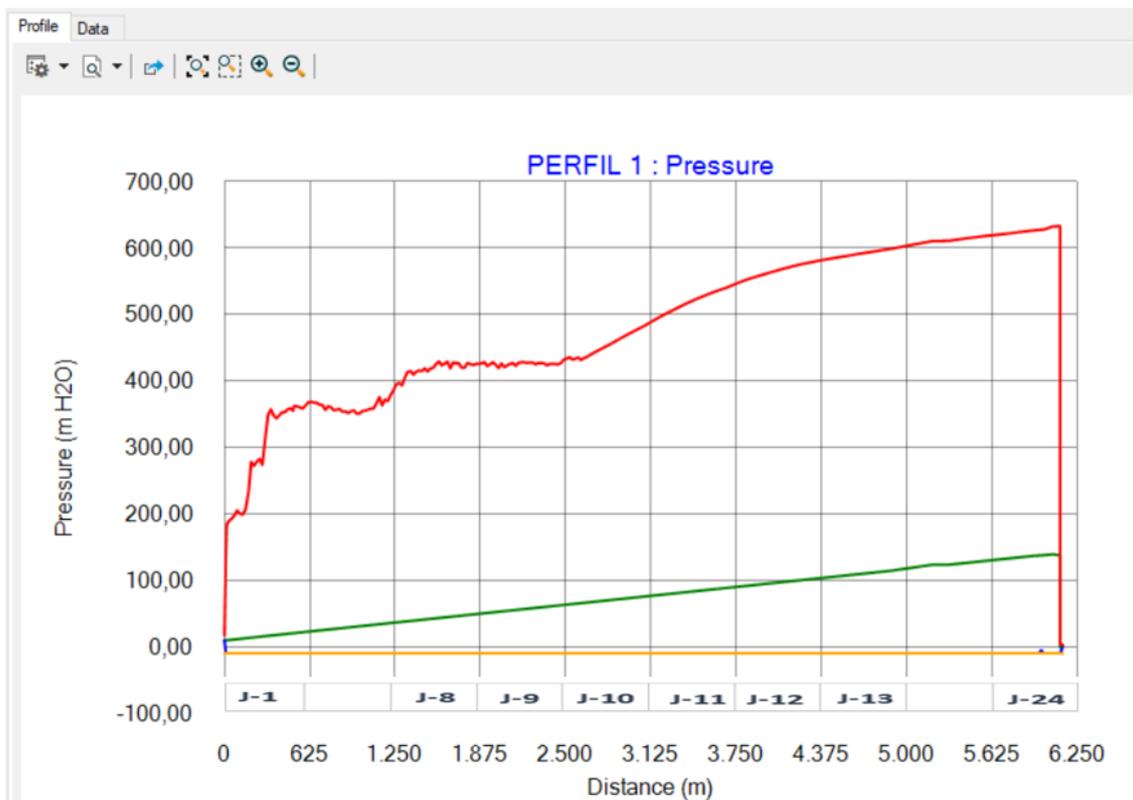
*Gráfica del transiente hidráulico para el escenario Nº3*



*Nota:* Gradiente hidráulico (inicial, mínimo y máximo) y elevaciones para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 28.**

*Perfil de presiones*



*Nota:* Presiones (máxima, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Tabla 12.** Resultados obtenidos de la simulación

Nombre	Abscisa	Distancia (m)	Presión mínima (m H2O)	Presión máxima (m H2O)	Presión inicial (m H2O)	Presión (m H2O)	Aire/Vapor Volumen Máximo (m3)	Presión de vapor (m H2O)
T7:T. CARGA	0+000	0	9,89	16,95	9,87	13,1	0	-9,98
P-4:J-5	0+502	502	-9,98	355,02	20,45	9,46	0,3	-9,98
P-9:J-10	2+510	2.510	-9,98	433,74	63,45	-9,98	0,8	-9,98
P-14:J-15	4+886	4.886	-9,98	598,81	114,39	51,37	1,3	-9,98
P-19:J-20 BLINDADO	5+935	5.935	-9,98	626,5	136,83	169,14	0	-9,98
P-20:J-21	5+989	5.989	-5,24	627,83	137,53	75,25	0	-9,98
P-23:J-24	6+097	6.097	-9,98	632,46	138,25	-4,28	0	-9,98
P-24:J-24	6+097	6.097	-9,98	632,46	138,25	-4,28	0	-9,98
P-24:TURBINA - 2	6+127	6.127	-9,98	632,99	138,09	192,04	0	-9,98

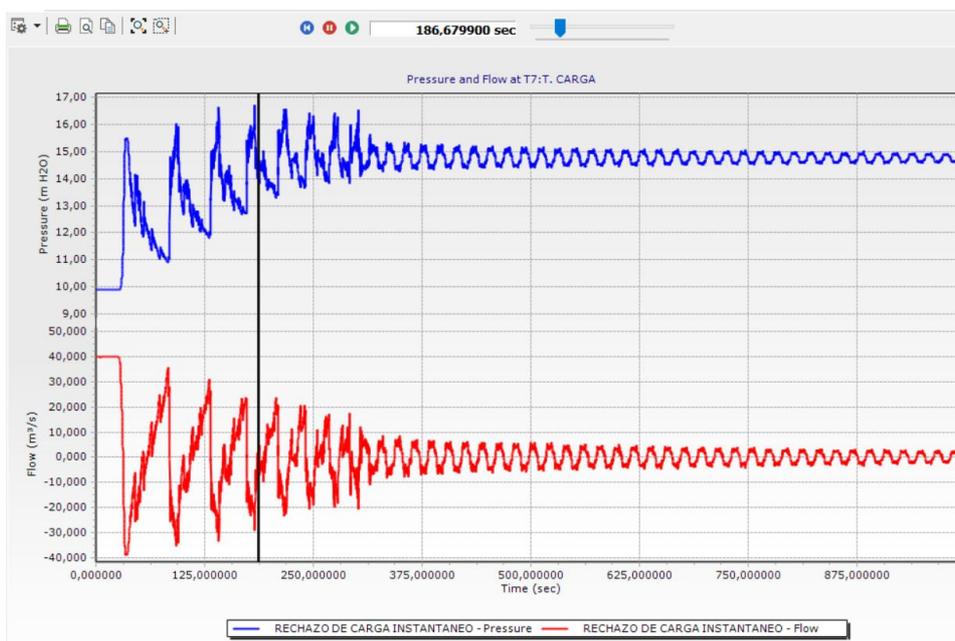
*Nota:* Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción para el escenario N°3

En la figura 28, se presenta el resultado de las presiones resultantes en el tercer escenario para un rechazo de carga instantáneo, la simulación del transitorio hidráulico para este caso se lo realizó en un tiempo  $t=16,67$  minutos, en este período se analizaron los efectos producidos por el golpe de ariete y se determinó una sobrepresión máxima de 632,99 m y una presión mínima de -9.98m. En un tiempo de 221,65 segundos, se evidencia una zona de formación de burbujas de vapor que se encuentra en la abscisa 2218 m (figura 27), la cual puede ser perjudicial para el sistema que tiene un volumen de vapor que asciende a 6400 litros y que se encuentra aguas abajo del tanque de carga. La Chimenea de Equilibrio Superior Sarapullo, cumple con la función de disipar el golpe de ariete generado por un rechazo de carga instantáneo debido al cierre de las válvulas, donde se observa una zona crítica de formación de vapor aguas arriba de la chimenea, así como las envolventes de sobrepresiones máximas y mínimas (figura 27).

En la tabla 12, se encuentra consolidada la información reportada por el software Bentley Hammer para los principales elementos hidráulicos que se encuentran en el sistema del Aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, en donde se refleja el comportamiento de presión a través del tiempo cuando sucede el fenómeno transitorio.

### Figura 29.

#### *Presiones máximas en el tanque de carga*



**Tabla 13.**

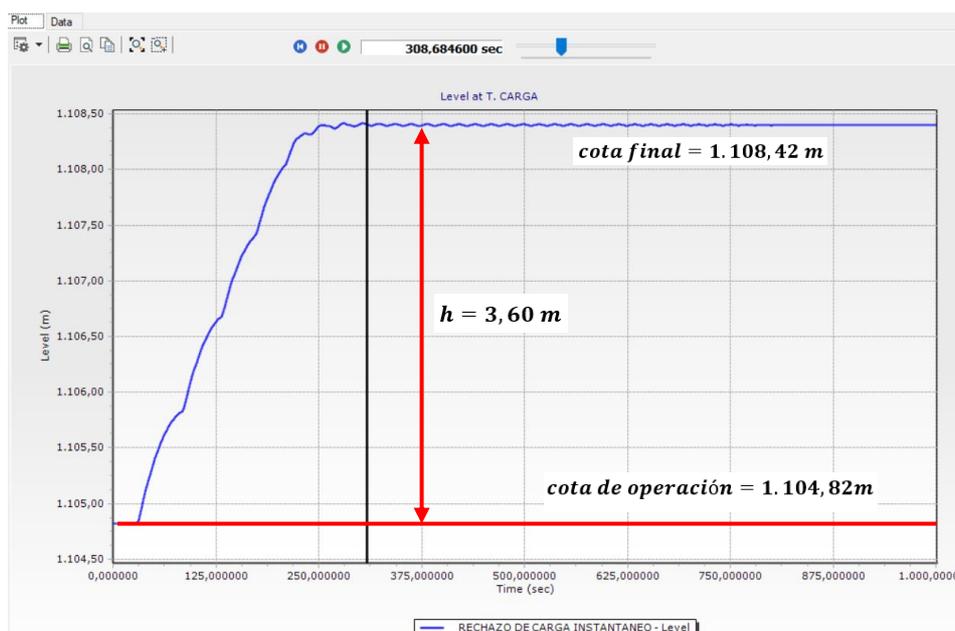
*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
181,41	15,71	-20,24
181,57	15,87	-21,71
181,73	15,81	-21,23
181,89	15,8	-20,99
<b>182,05</b>	<b>15,99</b>	<b>-22,71</b>
182,21	15,96	-22,53
182,37	15,81	-21,12
182,53	16,08	-23,39
182,69	16,73	-29,02
182,85	15,72	-20,39
183,01	15,28	-15,85

Los resultados de la simulación numérica muestran una presión máxima en el tanque de carga de 15,99 m en un tiempo de  $t=182,05$  segundos, como se observa en la figura 29. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos. Las variaciones de presión y caudal, se visualizan a lo largo de la sección longitudinal en la línea de color azul, que muestra el valor máximo y mínimo.

**Figura 30.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 14.**

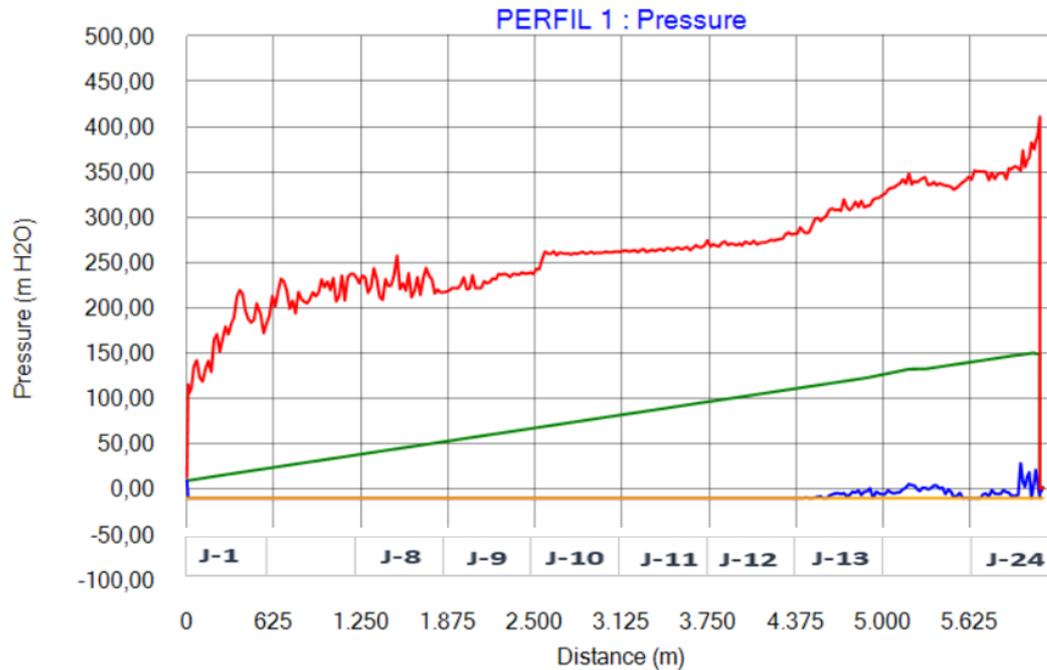
*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

<b>Tiempo (seg)</b>	<b>Cota (m)</b>
302,24	1.108,41
302,40	1.108,41
<b>302,56</b>	<b>1.108,42</b>
302,72	1.108,42
302,88	1.108,42
303,04	1.108,42
303,20	1.108,42
303,36	1.108,42
303,52	1.108,42
303,68	1.108,42
303,84	1.108,42

Para el escenario tres, con un caudal de 40 m<sup>3</sup>/s en el software Bentley Hammer, se observa en el tanque de carga del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, que el agua alcanza un nivel de 1.108,42 m en un tiempo de t= 302,56 segundos, y el nivel de operación se encuentra en la cota 1.104,82 m (figura 30). Al término de la simulación del transitorio en un tiempo de t=16,67 minutos, se determina un volumen de desbordamiento de 27793,29 m<sup>3</sup>, este sobrevertido se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, el agua rebosa sobre la misma provocando inundaciones en toda el área del tanque de carga.

#### 5.1.4. Sin vertederos laterales en el tanque de carga, Q=13,33m<sup>3</sup>/s

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 4</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: 13,33 m <sup>3</sup> /s
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

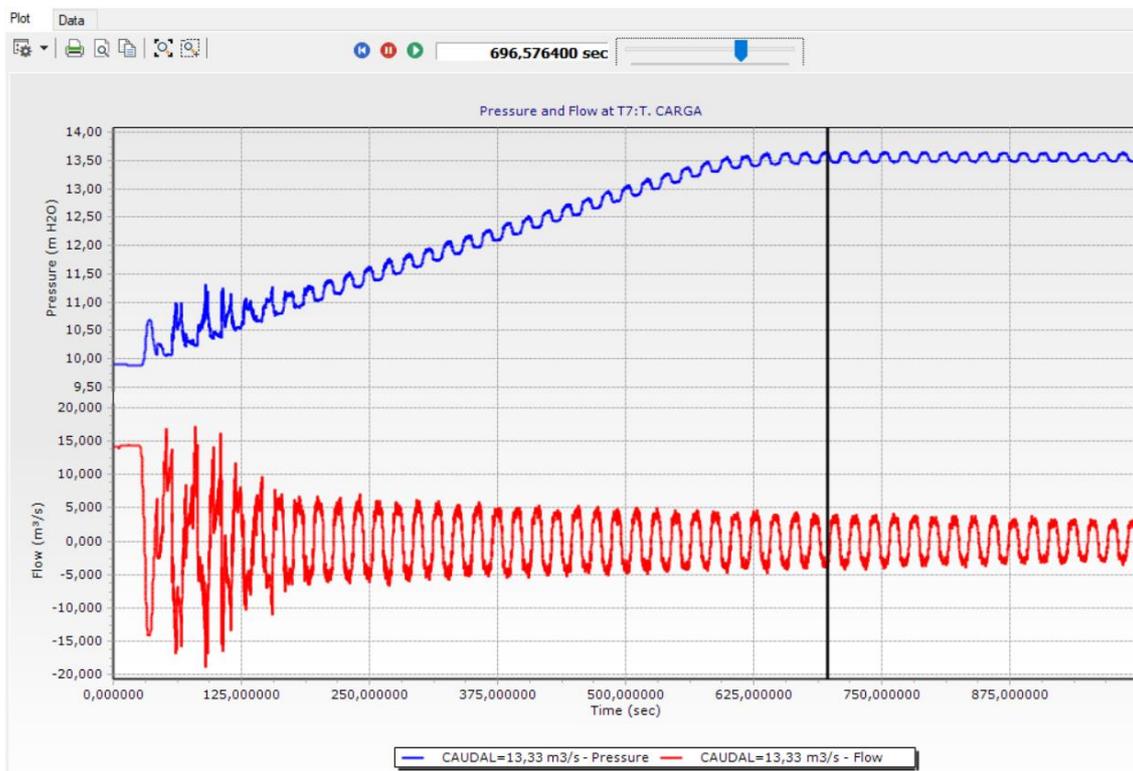
**Figura 31.***Perfil de presiones*

*Nota:* Presiones (máximo, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

En la figura 31, se presenta el resultado de las presiones resultantes en el cuarto escenario para un rechazo de carga instantáneo; la simulación del transitorio hidráulico para este caso se lo realizó en un tiempo  $t=16,67$  minutos, en este período se analizaron los efectos producidos por el golpe de ariete y se determinó una sobrepresión máxima de 411 m valor igual al escenario 1.

**Figura 32.**

*Presiones máximas en el tanque de carga*



**Tabla 15.**

*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

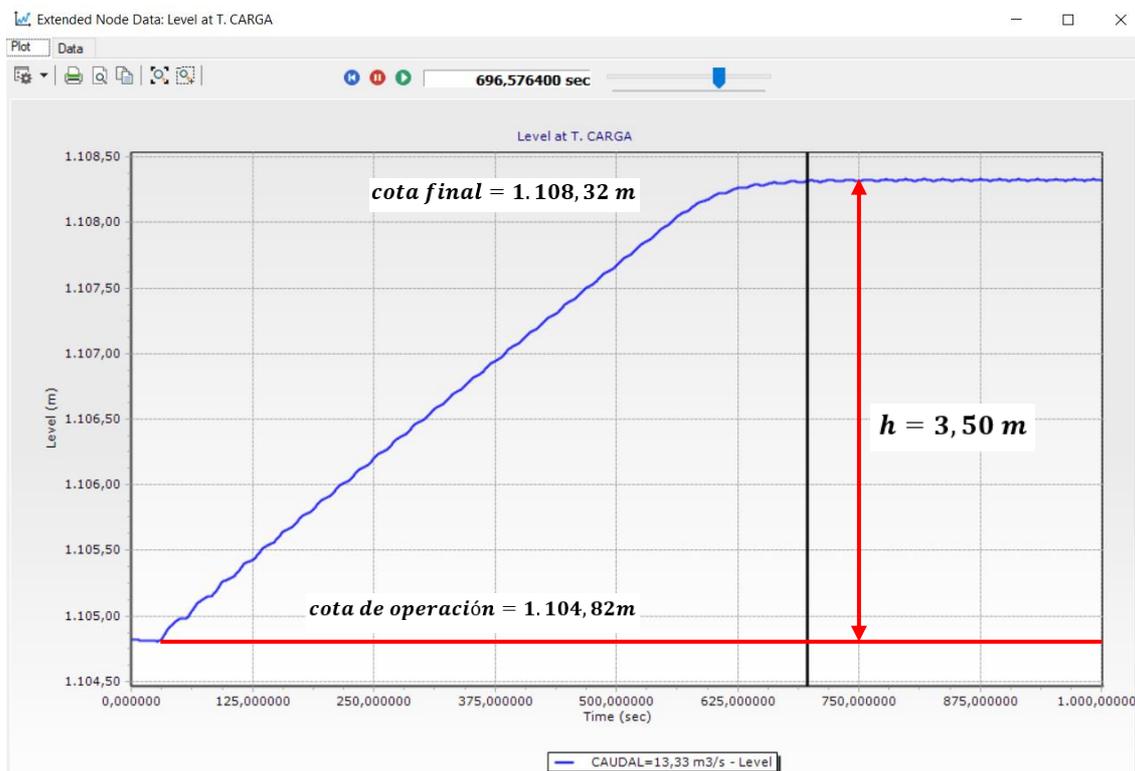
Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
696,42	13,63	-3,40
696,58	13,63	-3,30
<b>696,74</b>	<b>13,65</b>	<b>-3,95</b>
696,90	13,64	-3,73
697,06	13,63	-3,41
697,22	13,65	-3,93
697,37	13,64	-3,45
697,53	13,62	-3,01
697,69	13,62	-2,87
697,85	13,63	-3,25
698,01	13,62	-2,84

Los resultados de la simulación numérica muestran una presión máxima en el tanque de carga de 13.65 m en un tiempo de  $t=696,74$  segundos, como se observa en la figura 32. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos. La

variación de la presión y el caudal se visualiza a lo largo de la sección longitudinal en la línea de color azul, donde se puede determinar los valores máximo y mínimo de las presiones y los caudales

**Figura 33.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 16.**

*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

Tiempo (seg)	Cota (m)
696,80	1.108,31
696,96	1.108,31
697,12	1.108,31
<b>697,28</b>	<b>1.108,32</b>
697,44	1.108,32
697,60	1.108,32
697,76	1.108,32
697,92	1.108,32
698,08	1.108,32
698,24	1.108,32
698,40	1.108,32

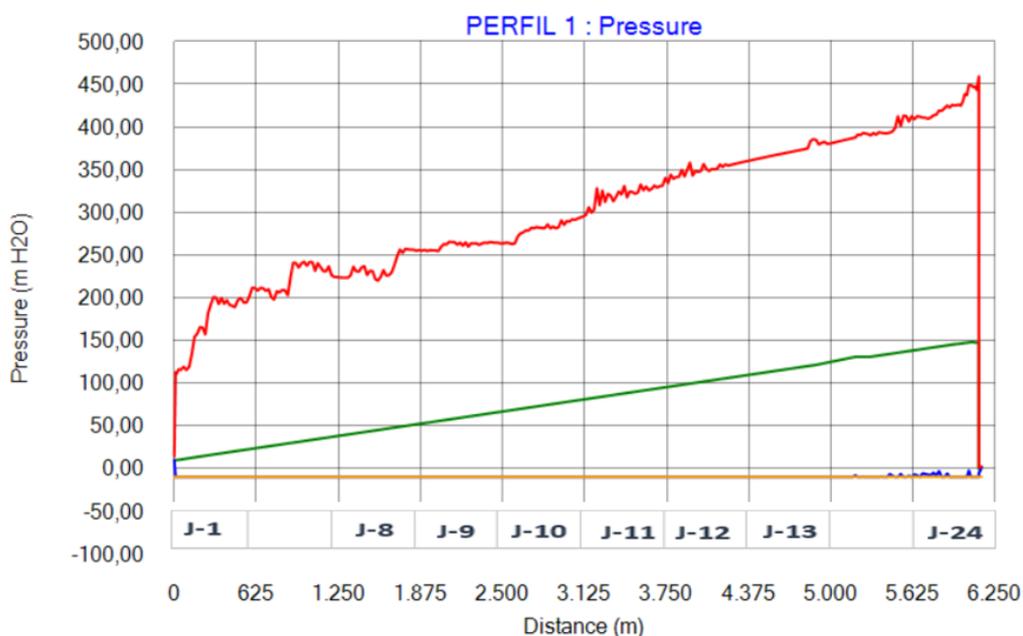
Del análisis realizado para el escenario cuatro con un caudal de 13,33 m<sup>3</sup>/s en el software Bentley Hammer, se observa que el agua del tanque de carga, alcanza un nivel de 1.108,42 m en un tiempo de t= 697,28 segundos, y el nivel normal de operación se encuentra en la cota 1.104,82 m (figura 33). Al término de la simulación del transitorio en un tiempo de t=16,67 minutos se determinó un volumen de desbordamiento de 4792,68 m<sup>3</sup>, este sobrevertido se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga, supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, el agua rebosa sobre la misma provocando inundaciones en toda el área de la captación.

### 5.1.5. Sin vertederos laterales en tanque de carga, Q=20m<sup>3</sup>/s

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 5</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: 20 m <sup>3</sup> /s
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 34.**

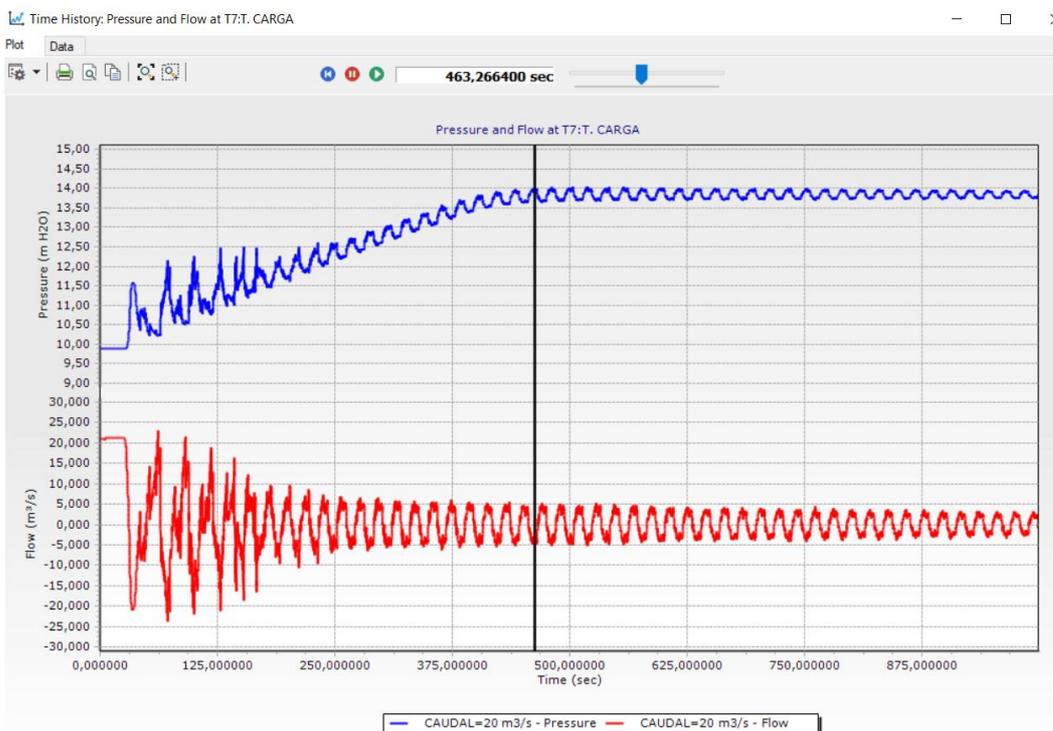
*Perfil de presiones*



*Nota:* Presiones (máxima, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 35.**

*Presiones máximas en el tanque de carga*



**Tabla 17.**

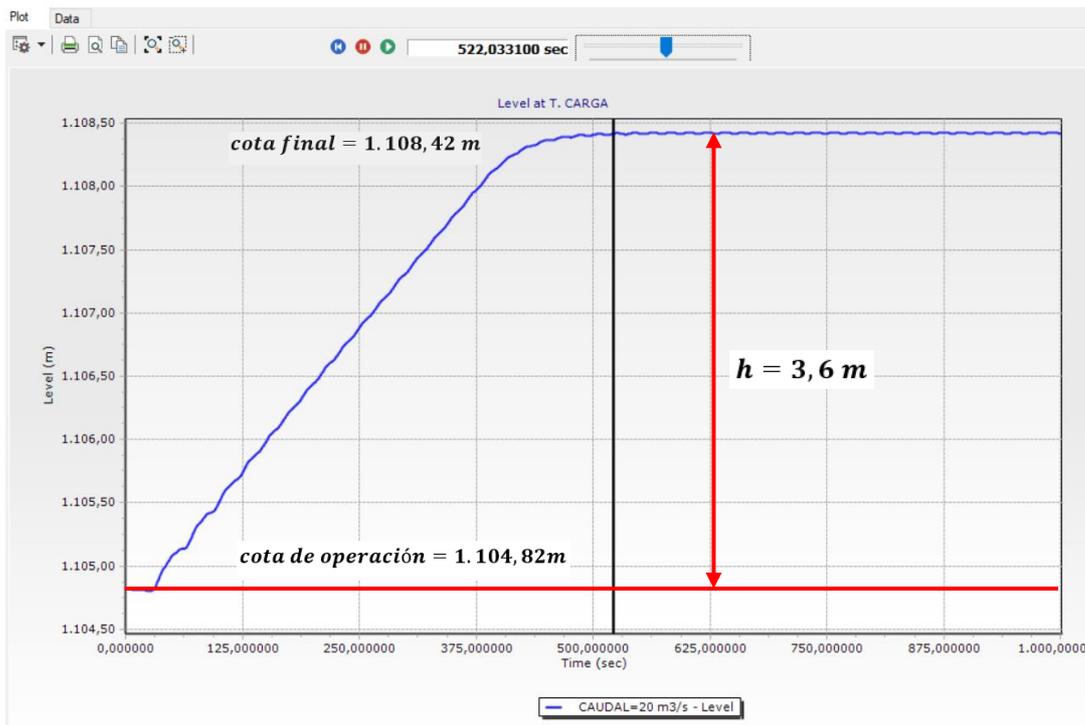
*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
463,59	13,97	-4,52
463,75	13,92	-3,26
<b>463,91</b>	<b>13,98</b>	<b>-4,69</b>
464,06	13,93	-3,54
464,22	13,98	-4,75
464,38	13,97	-4,44
464,54	13,94	-3,76
464,70	13,98	-4,66
464,86	13,94	-3,71

Los resultados de la simulación numérica muestran una presión máxima en el tanque de carga de 13.98 m en un tiempo de  $t=463,91,07$  segundos, como se muestra en la figura 35. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos. La variación de la presión y el caudal se visualiza a lo largo de la sección longitudinal en la línea de color azul en la figura 35, en la cual podemos determinar los valores máximo y mínimo de las presiones y los caudales.

**Figura 36.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 18.**

*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

Tiempo (seg)	Cota (m)
521,76	1.108,42
521,92	1.108,42
<b>522,08</b>	<b>1.108,42</b>
522,24	1.108,42
522,40	1.108,42
522,56	1.108,42
522,72	1.108,42
522,88	1.108,42
523,04	1.108,42
523,20	1.108,42

En el escenario cinco, con un caudal de 20 m<sup>3</sup>/s en el tanque de carga del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, se observa que el agua del tanque de carga alcanza un nivel de 1.108,42 m en un tiempo de t= 522,08 segundos, y el nivel normal de operación se encuentra en la cota 1.104,82 m (figura 36). Al término de la simulación del transitorio en un tiempo de t=16,67 minutos se determinó un volumen de

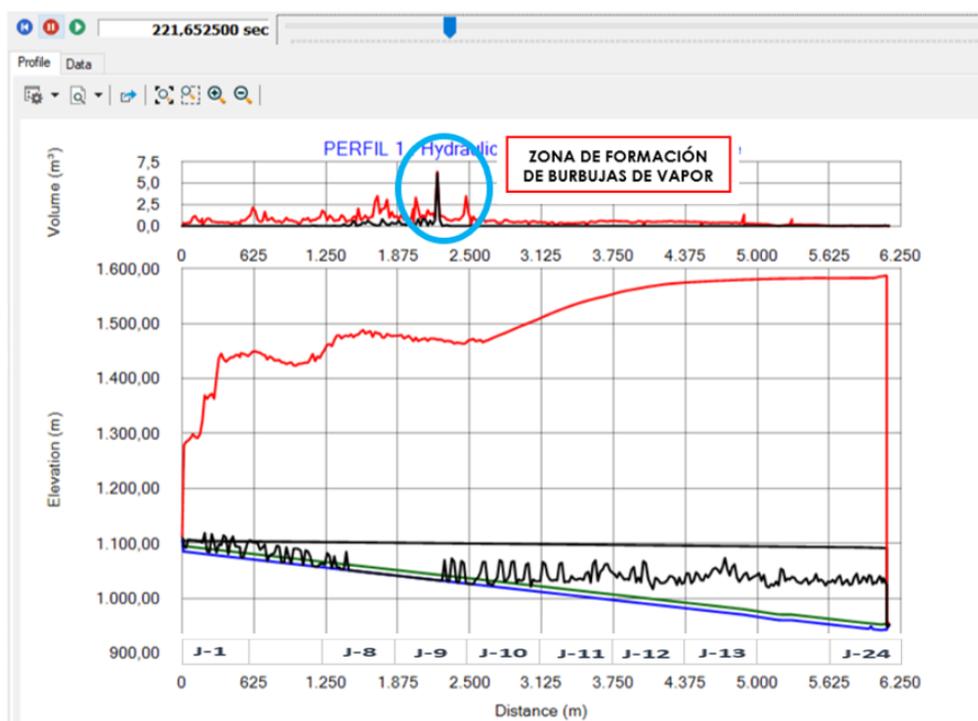
desbordamiento de 10539,21 m<sup>3</sup>, este sobrevertido se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, el agua rebosa sobre la misma provocando inundaciones en toda el área del tanque de carga.

### 5.1.6. Sin vertederos laterales en el tanque de carga, Q=40m<sup>3</sup>/s

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 6</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: 40 m <sup>3</sup> /s
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 37.**

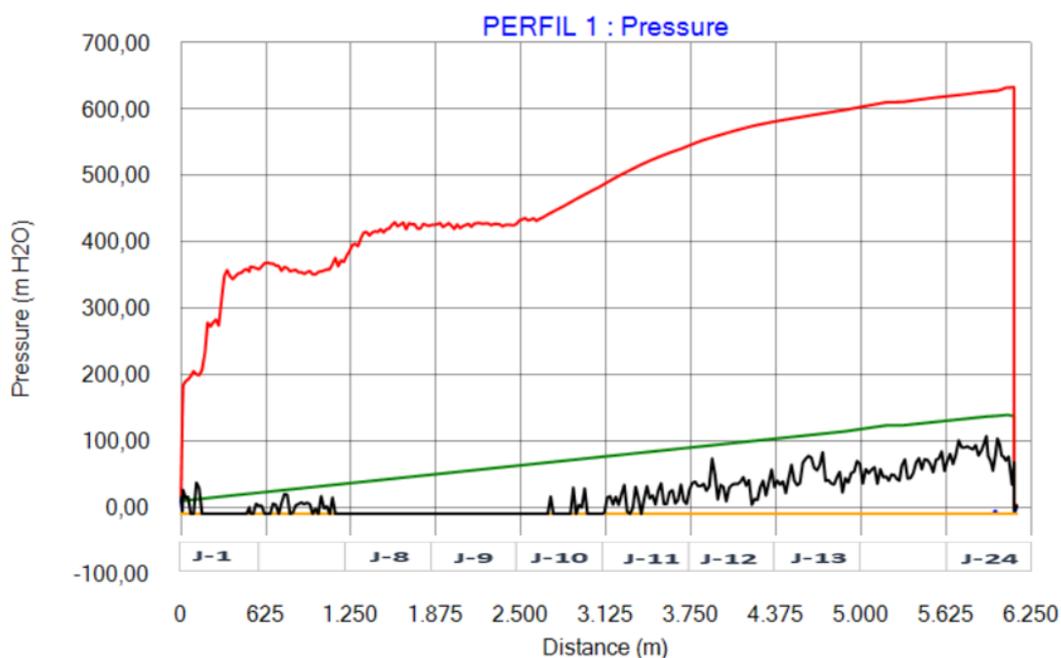
*Gráfica del transiente hidráulico para el escenario N°6*



*Nota:* Gradiente hidráulico (inicial, mínimo y máximo) y elevaciones para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 38.**

*Perfil de presiones*



Nota: Presiones (máxima, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Tabla 19.**

*Resultados obtenidos de la simulación*

Nombre	Abscisa	Distancia (m)	Presión mínima (m H2O)	Presión máxima (m H2O)	Presión inicial (m H2O)	Presión (m H2O)	Aire/Vapor Volumen Máximo (m3)	Presión de vapor (m H2O)
T7:T. CARGA	0+000	0	9,89	16,95	9,87	15	0	-9,98
P-4:J-5	0+502	502	-9,98	355,02	20,45	9,53	0,3	-9,98
P-9:J-10	2+510	2.510	-9,98	433,74	63,45	-9,65	0,8	-9,98
P-14:J-15	4+886	4.886	-9,98	598,81	114,39	63,57	1,3	-9,98
P-19:J-20 BLINDADO	5+935	5.935	-9,98	626,5	136,83	81,64	0	-9,98
P-20:J-21	5+989	5.989	-5,24	627,83	137,53	86,12	0	-9,98
P-23:J-24	6+097	6.097	-9,98	632,46	138,25	83,85	0	-9,98
P-24:J-24	6+097	6.097	-9,98	632,46	138,25	83,85	0	-9,98
P-24:TURBINA -2	6+127	6.127	-9,98	632,99	138,09	71,18	0	-9,98

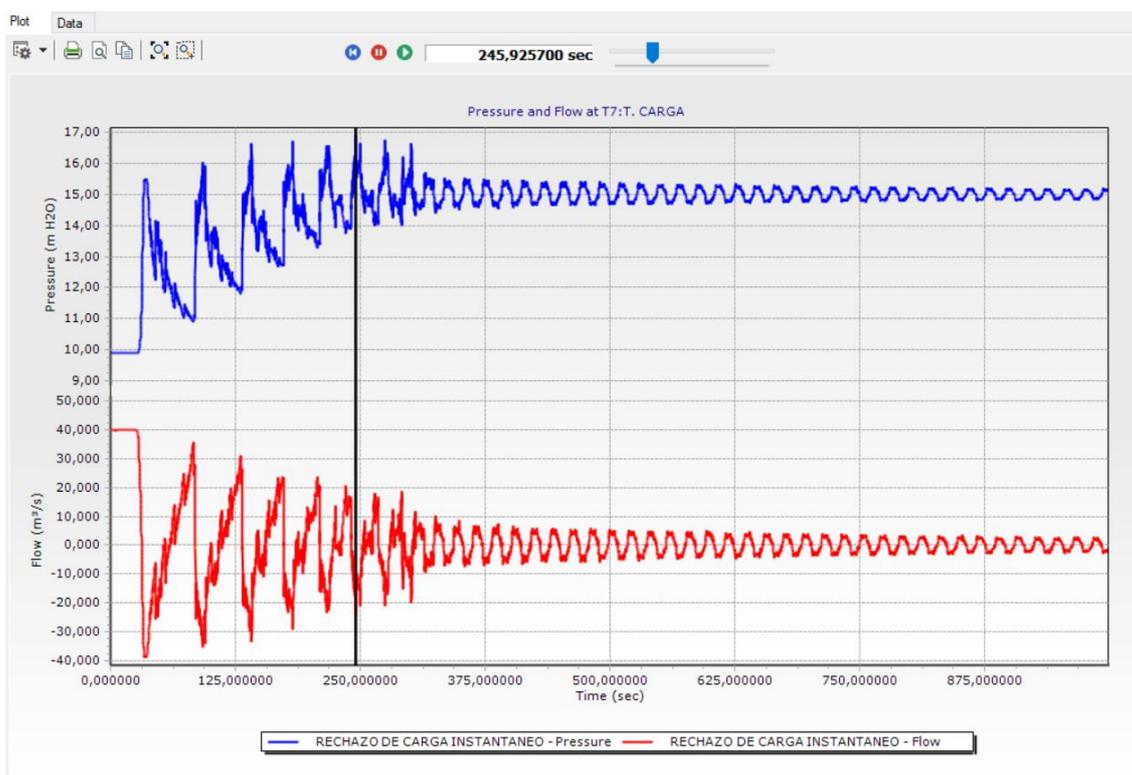
Nota: Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción para el escenario N°6

En la figura 38, se presenta el resultado de las presiones resultantes en el sexto escenario para un rechazo de carga instantáneo, la simulación del transitorio hidráulico para este caso se lo realizó en un tiempo  $t=16,67$  minutos, en este período se analizaron los efectos producidos por el golpe de ariete y se determinó una sobrepresión máxima de

632,99 m y una presión mínima de -9.98m. En un tiempo de 221,65 segundos se evidencia una zona de formación de burbujas de vapor que se encuentra en la abscisa 2218 m (figura 37), la cual puede ser perjudicial para el sistema que tiene un volumen de vapor que asciende a 6400 litros y que se encuentra aguas abajo del tanque de carga. La Chimenea de Equilibrio Superior Sarapullo cumple con la función de disipar el golpe de ariete generado por un rechazo de carga instantáneo, debido al cierre de las válvulas, donde se observa una zona crítica de formación de vapor aguas arriba de la chimenea, así como también las envolventes de sobrepresiones máximas y mínimas. En la tabla 19, se encuentra consolidada la información reportada por el software Bentley Hammer para los principales elementos hidráulicos que se encuentran en el sistema del Aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, en la cual se refleja el comportamiento de presión a través del tiempo cuando sucede el fenómeno transitorio.

**Figura 39.**

*Presiones máximas en el tanque de carga*



**Tabla 20.**

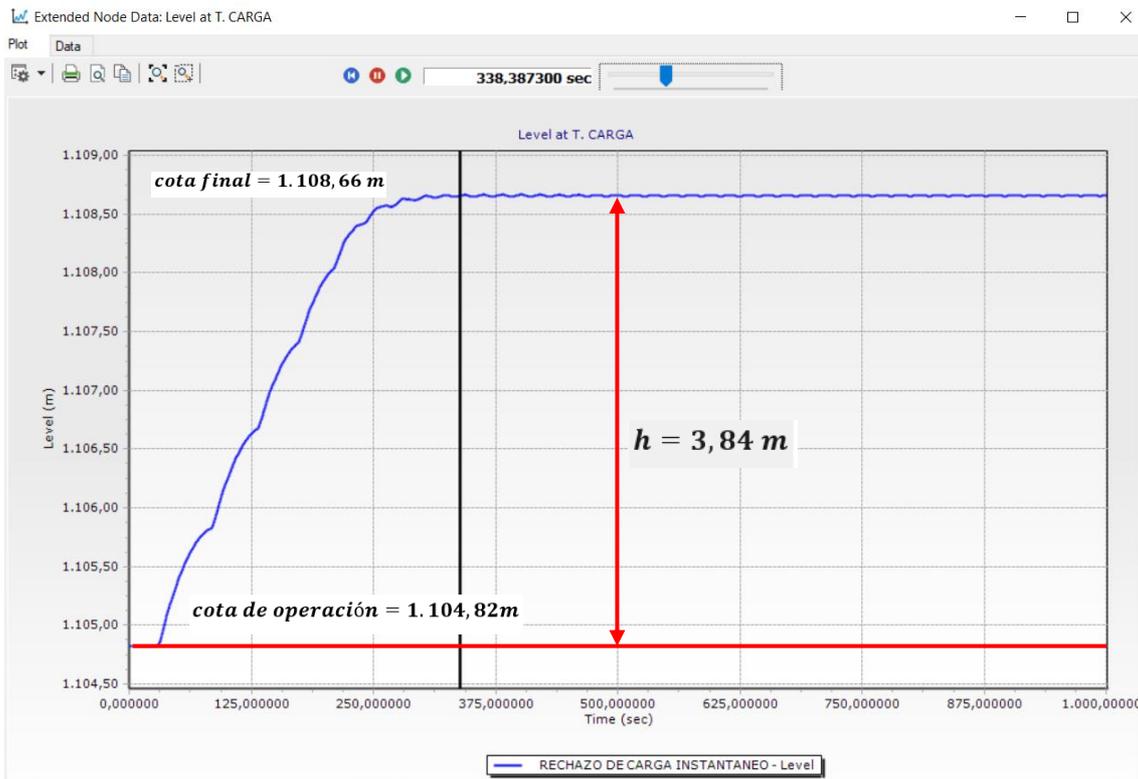
*Resultados obtenidos de las presiones máximas en el tanque de carga*

Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal (m3/s)
244,65	16,1	-16,39
244,81	16,25	-17,64
244,97	15,95	-14,78
<b>245,13</b>	<b>16,88</b>	<b>-23,75</b>
245,29	16,27	-18,06
245,45	16,13	-16,62
245,61	16,01	-15,35
245,77	15,67	-11,46
245,93	15,62	-10,89
246,09	15,54	-9,89
246,25	15,66	-11,00

Los resultados de la simulación numérica muestran una presión máxima en el tanque de carga de 16,88 m en un tiempo de  $t=245,13$  segundos, como se muestra en la figura 39. El tiempo de simulación para el rechazo de carga instantáneo es de  $t = 9$  segundos. La variación de la presión y caudal se visualiza a lo largo de la sección longitudinal en la línea de color azul, donde podemos determinar el valor máximo y mínimo de las presiones y los caudales.

**Figura 40.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 21.**

*Valor de cota en el punto más crítico del tanque de carga*

Tiempo (seg)	Cota (m)
337,60	1.108,65
337,76	1.108,65
337,92	1.108,65
338,08	1.108,65
338,24	1.108,65
<b>338,40</b>	<b>1.108,66</b>
338,56	1.108,66
338,72	1.108,66
338,88	1.108,66
339,04	1.108,66
339,20	1.108,66

Del análisis realizado para el escenario seis con un caudal de 40 m<sup>3</sup>/s en el software Bentley Hammer, en el tanque de carga del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo, se observa que el agua alcanza un nivel de 1.108,66 m en un tiempo de t= 338,40 segundos, y el nivel normal de operación del tanque de carga que se encuentra en la cota 1.104,82

m (figura 40). Al término de la simulación del transitorio en un tiempo de  $t=16,67$  minutos se determina un volumen de desbordamiento de 27080,12 m<sup>3</sup>; este sobrevertido se produce cuando el nivel del agua en el tanque de carga supera la cota de la coronación del elemento hidráulico en mención, el agua rebosa sobre la misma provocando inundaciones en toda el área del tanque de carga.

## 5.2 Aceptación de carga

En este escenario, la turbina se cierra en estado inicial y entra en funcionamiento con apertura de la válvula mariposa, luego gira con una pequeña cantidad de descarga hasta que la frecuencia de la turbina alcanza la frecuencia de la red. Una vez que se satisface la igualdad de frecuencia entre la red, la turbina y el generador, la red eléctrica comienza a tomar la energía eléctrica del generador con la ayuda de un interruptor en la conexión. Finalmente, el controlador comienza a abrir la compuerta desde aproximadamente un 5%-10% hasta el porcentaje de apertura total requerido.

En el software HAMMER, se supone que la turbina funciona a velocidad sin carga, que es justo antes de satisfacer la igualdad de frecuencia entre la red y la turbina. Por lo tanto, la turbina no genera energía eléctrica; el programa Bentley Hammer asume que la red está conectada a la salida del generador cuando comienza la simulación.

El caso de aceptación de carga es menos severo que los casos de rechazo de carga instantáneo, como se lo analizó anteriormente. Sin embargo, dado que existe la posibilidad de que se formen presiones negativas en el sistema, se debe verificar los puntos críticos para proteger la línea de conducción. Si la presión cae por debajo de la elevación de la tubería forzada, puede ocurrir cavitación y separación de columnas de agua en la tubería y los componentes pueden sufrir daños por estos fenómenos. Por consiguiente, se realizó la simulación para ver el comportamiento del sistema en el caso de aceptación de carga.

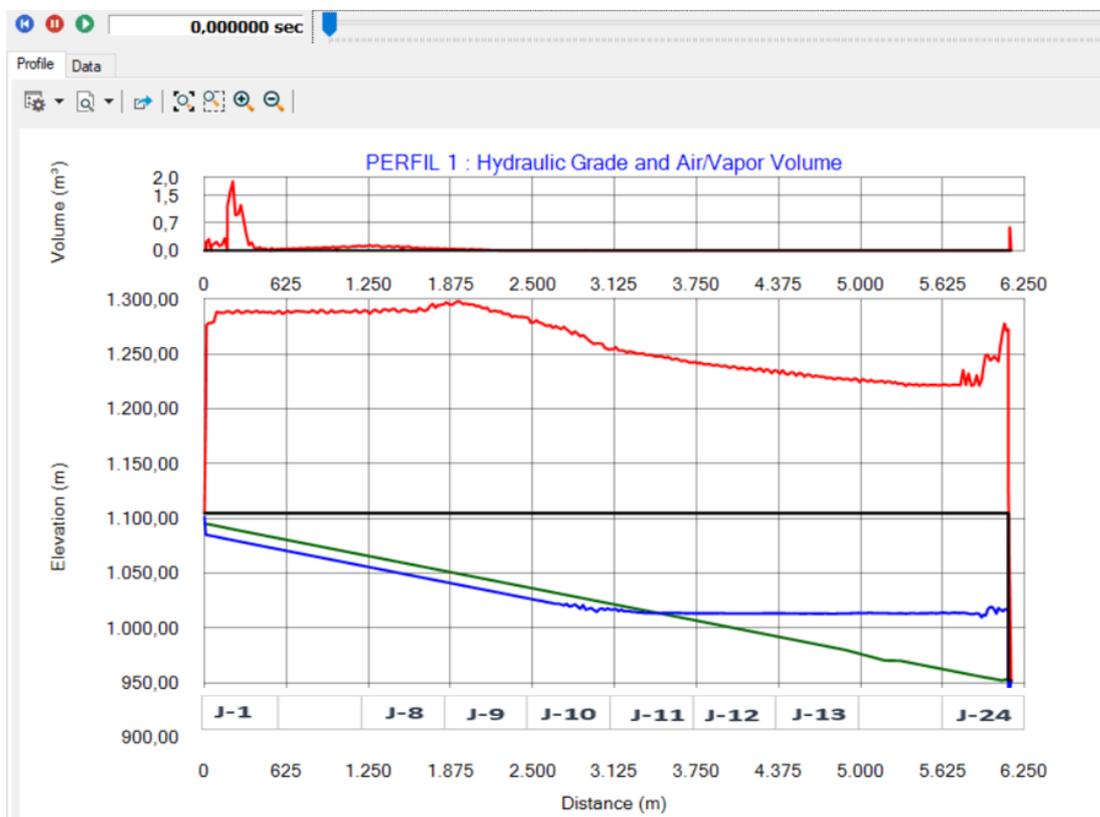
Después de completar las simulaciones y el análisis para un caudal de 40 m<sup>3</sup>/s y una altura neta de 140 m, el tiempo de apertura más crítico en la compuerta se determinó en 10 segundos. La figura 42 muestra las variaciones de presión y descarga de diferentes casos. Dado que la reducción de presión es más significativa en el caso de apertura de 5 segundos, debe verificarse si la carga piezométrica está por debajo de la elevación de la tubería.

### 5.2.1. Con vertederos laterales en tanque de carga, $Q=40\text{m}^3/\text{s}$

Análisis de flujo no permanente
<b>Escenario N.º 7</b>
Tiempo de cierre de válvula: 9.0 segundos
Caudal: $40\text{ m}^3/\text{s}$
Cota captación: 1.094,91
Cota descarga: 952,80

**Figura 41.**

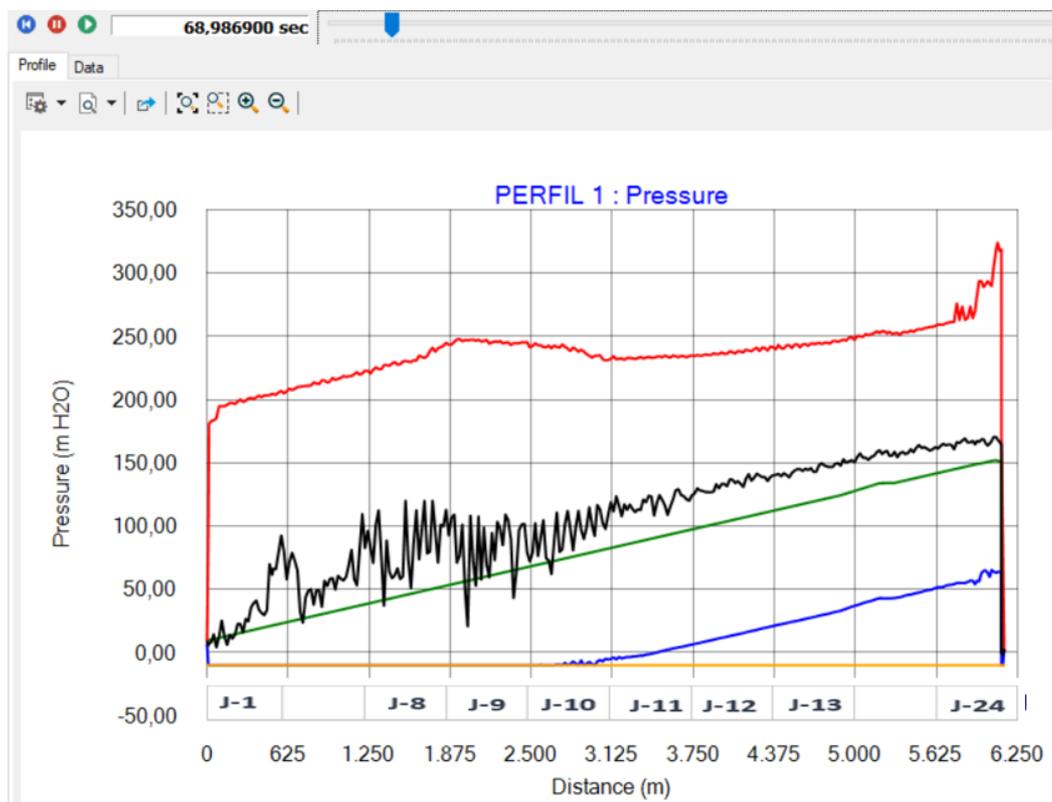
*Gráfica del transiente hidráulico*



*Nota:* Gradiente hidráulico (inicial, mínimo y máximo) y elevaciones para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Figura 42.**

*Perfil de presiones*



*Nota:* Presiones (máximo, mínima e inicial) para el estado transitorio a lo largo del sistema.

**Tabla 22.**

*Resultados obtenidos de la simulación*

Nombre	Abscisa	Distancia (m)	Presión mínima (m H2O)	Presión máxima (m H2O)	Presión inicial (m H2O)	Presión (m H2O)	Aire/Vapor Volumen Máximo (m3)	Presión de vapor (m H2O)
T7:T. CARGA	0+000	0	6,47	9,91	9,87	9,87	0	-9,98
P-4:J-5	0+502	502	-9,98	204,82	21,48	21,48	0	-9,98
P-9:J-10	2+510	2.510	-9,98	242,52	68,63	68,63	0	-9,98
P-14:J-15	4+886	4.886	33,12	246,73	124,48	124,48	0	-9,98
P-19:J-20 BLINDADO	5+935	5.935	56,7	281,15	149,15	149,15	0	-9,98
P-20:J-21	5+989	5.989	64,77	289,19	150,14	150,14	0	-9,98
P-23:J-24	6+097	6.097	63,99	324,28	151,48	151,48	0	-9,98
P-24:J-24	6+097	6.097	63,99	324,28	151,48	151,48	0	-9,98
P-24:TURBINA - 2	6+127	6.127	62,58	319,09	151,48	151,48	0	-9,98

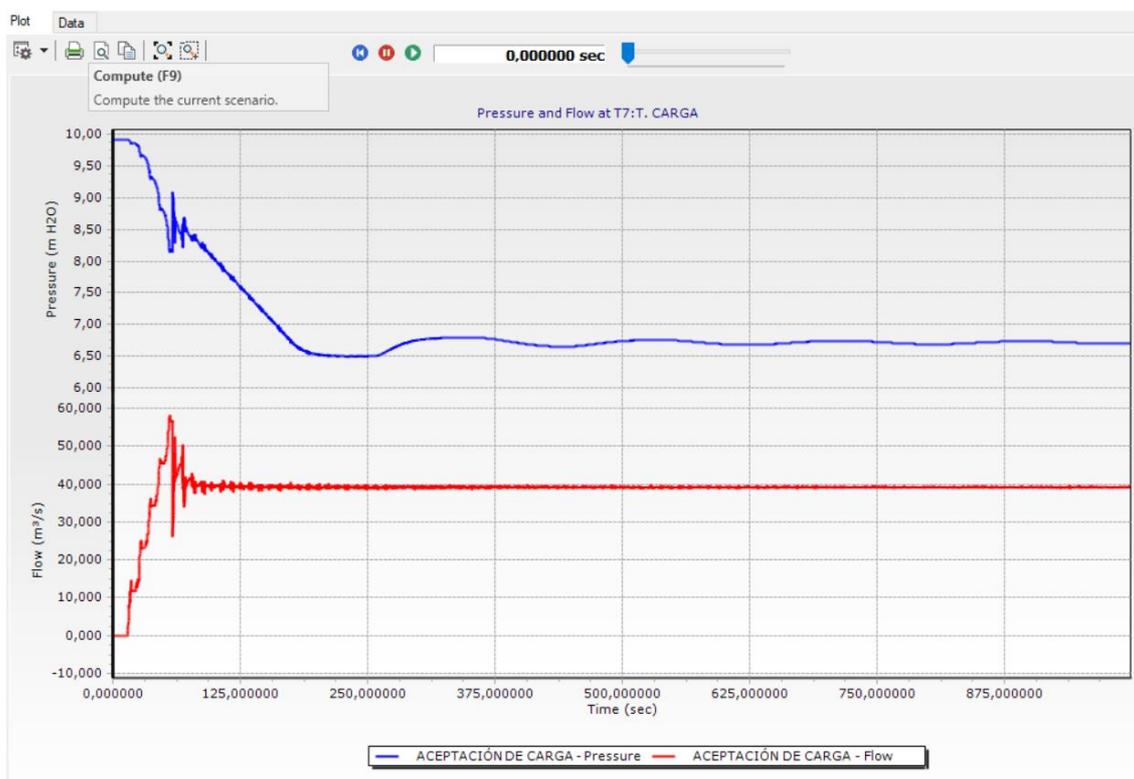
*Nota:* Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción

Si la regla de apertura es rápida, el valor de la presión disminuye ligeramente. La descarga está determinada por el patrón de la apertura de válvula en un tiempo de  $t=20$  segundos. La presión mínima es de 6.47m y la presión máxima es de 324,28 m en un tiempo de simulación de  $t=16,67$  minutos. Como resultado, la aceptación de la carga debe realizarse durante cierto período, si no hay una situación de emergencia.

La gradiente hidráulica se verifica para determinar la seguridad del sistema ante presiones negativas. La figura 41 muestra el cambio de carga piezométrica a lo largo de la tubería forzada desde el tanque de carga hasta el nivel de descarga. Dado que la altura piezométrica o HGL nunca cae por debajo del eje de la tubería, se determina que no hay posibilidad de formación de cavitación o separación de columnas en el caso de aceptación de carga. Las alturas piezométrica en cualquier punto están por encima de la elevación de la tubería forzada, la mayor variación de carga ocurre entonces en la entrada de la turbina, donde la altura piezométrica máxima es ligeramente mayor que los valores iniciales debido a que la aceptación de carga no aumenta la presión en el sistema.

**Figura 43.**

*Presiones y caudales en el tanque de carga*



**Tabla 23.**

*Resultados obtenidos de las presiones mínimas en el tanque de carga*

Tiempo (seg)	Presión mínima (mH2O)	Caudal (m3/s)
<b>220,37</b>	<b>6,49</b>	<b>39,58</b>
220,53	6,51	38,73
220,69	6,49	39,82
220,85	6,5	38,88
221,01	6,51	38,66

**Tabla 24.**

*Resultado obtenido del caudal máximo*

Tiempo (seg)	Presión (mH2O)	Caudal máximo (m3/s)
55,732502	8,17	57,739
<b>55,892193</b>	<b>8,14</b>	<b>58,215</b>
56,051888	8,16	57,639
56,211578	8,19	56,78
56,371269	8,2	56,623
56,53096	8,19	56,711

Respecto a la simulación en el escenario de aceptación de carga, la metodología es la misma que en los casos anteriores. En primer lugar, todos los resultados de las simulaciones de presión y descarga se exportan a un gráfico (figura 43) y el caso más crítico se determina analizando los puntos de presión mínima con un valor de 6,49 m. Luego, se investiga el escenario desfavorable para comprobar la presión negativa en el sistema. Las simulaciones se realizan para un caudal de 40 m<sup>3</sup>/s y una altura neta en la turbina de 140 m.

La turbina no funciona en las condiciones iniciales y las pérdidas menores en la turbina no se calculan mediante un programa Bentley Hammer, por lo tanto, la cantidad de presión inicial es mayor que en otros casos.

**Figura 44.**

*Nivel en el tanque de carga con respecto al tiempo*



**Tabla 25.**

*Nivel en el punto más crítico*

Tiempo (seg)	Cota (m)
246,40	1.101,42
246,56	1.101,42
<b>246,72</b>	<b>1.101,41</b>
246,88	1.101,41
247,04	1.101,41

En el tanque de carga se puede observar cómo es el proceso de vaciado ante un escenario de aceptación de carga. La apertura de válvula permite el ingreso de caudal para que la turbina entre en funcionamiento para generar energía eléctrica desde la cota 1.104,82 m, siendo éste el punto inicial del proceso de descarga y llegando a la cota 1.101,41, en este punto podemos observar hasta que instancia puede descargarse el depósito en un tiempo de  $t=246,72$  segundos.

### 5.3 Comparación de resultados de las simulaciones numéricas con datos en el tanque de carga.

A continuación, se realizará un análisis de las simulaciones de los escenarios considerados:

**Con vertederos:** en estos escenarios se propuso la construcción de dos vertederos junto al tanque de carga de longitud  $L=36\text{m}$ , de igual forma los stop logs para los escenarios propuestos estarían siendo considerados como vertederos laterales con una longitud de  $L=32\text{m}$ , este análisis se tomó a partir de la necesidad de evacuar el caudal ante un fenómeno transitorio generado por un rechazo de carga instantáneo, en el cual se observa un volumen de desbordamiento que estaría superando el nivel de operación; provocando inundaciones en toda el área de la captación Pilatón. Se determinó, además, la existencia de una zona de burbujas de vapor que se encuentra aguas arriba de la Chimenea de Equilibrio Superior Sarapullo, esta última tiene la función de disipar la energía que protege al sistema del aprovechamiento Pilatón-Sarapullo.

El escenario más crítico para el análisis del sistema, sería cuando se aproveche un caudal de  $40\text{m}^3/\text{s}$ , en esta instancia alcanzaría una cota de  $1.108,42\text{m}$  sobre el nivel de la plataforma que se encuentra en la cota  $1.108,00\text{m}$ .

La construcción de estos vertederos evitaría la inundación del área donde se encuentra construida la captación actualmente.

**Sin vertederos:** la simulación para estos escenarios corresponde a las condiciones actuales verificadas in situ sin ningún vertedero en la Captación Pilatón. En el escenario seis se visualiza claramente la cota alcanzada de  $1.108,66\text{m}$ , en el cual no se considera ninguna obra hidráulica que permita mitigar el fenómeno de los transitorios hidráulicos.

**Tabla 26.**

*Resumen de resultados de los niveles de agua alcanzados*

Descripción	Con Vertedero			Sin Vertedero		
	Q=13,33 m <sup>3</sup> /s Escenario 1	Q=20m <sup>3</sup> /s Escenario 2	Q=40m <sup>3</sup> /s Escenario 3	Q=13,33 m <sup>3</sup> /s Escenario 4	Q=20m <sup>3</sup> /s Escenario 5	Q=40m <sup>3</sup> /s Escenario 6
Tiempo (seg.)	641,12	464,480022	302,56	697,28	522,08	338,40
Cota	1.108,20	1.108,26	<b>1.108,42</b>	1.108,32	1.108,42	<b>1.108,66</b>

Dentro del análisis realizado en el escenario tres, en el que se considera la construcción de vertederos laterales, se determinó un nivel de agua de 1.108,42 durante el escenario de rechazo de carga instantáneo.

Para el escenario seis, análisis sin vertederos (construcción in situ), se determinó un nivel de agua de 1.108,66 durante el rechazo de carga instantáneo.

**Tabla 27.**

*Presiones máximas y mínimas en la línea de conducción*

Abscisa	Presiones máximas			Presiones mínimas		
	Q=13,33 m <sup>3</sup> /s Escenario 1	Q=20m <sup>3</sup> /s Escenario 2	Q=40m <sup>3</sup> /s Escenario 3	Q=13,33 m <sup>3</sup> /s Escenario 1	Q=20m <sup>3</sup> /s Escenario 2	Q=40m <sup>3</sup> /s Escenario 3
6+127	411 m H <sub>2</sub> O	459,1 m H <sub>2</sub> O	632,99 m H <sub>2</sub> O	-9.98 m H <sub>2</sub> O	-9.98 m H <sub>2</sub> O	-9.98 m H <sub>2</sub> O

En la tabla 27 se realizó el análisis bajo condiciones de fenómenos transitorios o flujo no permanente, donde se determinaron envolventes máximas y mínimas de presión, por lo que el escenario número tres se considera el más crítico con una presión máxima de 632,99 m para un caudal de 40m<sup>3</sup>/s.

En los escenarios analizados es importante mencionar el riesgo de cavitación, ya que la aparición de la fase gaseosa ocurre cuando la presión cae por debajo en las zonas donde se forman burbujas de vapor, este fenómeno se puede evidenciar en la figura 19.

El valor de -9.98 es una de las presiones mínimas que se determinaron en los escenarios donde se hace referencia la formación de burbujas de vapor, esto debido a que la energía no es suficiente para mantener las moléculas unidas, provocando que se separen unas de otras y apareciendo de esta manera las burbujas de vapor.

## 6. Conclusiones

- El presente trabajo tuvo el objetivo de desarrollar un modelo matemático en el Software Bentley Hammer para los transitorios hidráulicos de la central Hidroeléctrica Toachi Pilatón, este modelo numérico puede predecir los parámetros del transitorios con una precisión satisfactoria. Se han aplicado al modelo validado, varias combinaciones de patrones de cierre y apertura de válvulas para conocer cada uno de los fenómenos.
- Un método de resolución de flujo transitorio general y que cuenta con gran utilidad y difusión continua, es el método elástico, el cual es característico por utilizar varios artificios y simplificaciones matemáticas para linealizar las ecuaciones fundamentales de flujo transitorio.
- En el escenario tres, se consideró la construcción de vertederos laterales, donde se determinó-que la sobrepresión producida en el túnel de carga alcanza su valor máximo cerca de la válvula que se cierra, con un valor de 632,99 m y un valor mínimo de presión de 9.98m, estas presiones generadas por el golpe de ariete se localizaron en la abscisa 6+127.
- Las sobrepresiones y depresiones pueden originar el fallo en el túnel de carga al sobrepasar los rangos admisibles de trabajo por la pérdida de energía del sistema, causando un fenómeno de vaporización del fluido, cavitación y deformación del sistema de conducción del aprovechamiento Pilatón Sarapullo. Las sobrepresiones pueden originar el fallo de las tuberías al sobrepasar los rangos admisibles de trabajo.
- En el escenario número tres, se determinó que las presiones transitorias bajas o negativas pueden ser perjudiciales para la línea de conducción, debido a la formación de burbujas de vapor que se observa en la abscisa 2+218 aguas abajo del tanque de carga.
- La Chimenea de equilibrio superior Sarapullo, estaría cumpliendo su funcionalidad de mitigar los efectos ante un eventual golpe de ariete producido por un rechazo de carga instantáneo. En el modelado hidráulico se evidencia la

existencia de fluctuaciones mínimas en la chimenea; así como la formación de burbujas de vapor aguas arriba de este elemento hidráulico.

- El caso más crítico evidenciado es el escenario número seis en condiciones actuales in situ, ya que, el fenómeno por el golpe de ariete requiere construir obras hidráulicas con vertederos en el sentido norte y sur del tanque de carga con una longitud de  $L=68\text{m}$  y tomando en cuenta la longitud de los stop logs que funcionarían también como vertederos, esto permitirá evacuar el flujo ante un rechazo de carga instantáneo de la Central Sarapullo.
- Esta obra hidráulica de descarga, debe constar de un vertedero con una cresta que se encuentre en la cota 1107,30 m y que permita evacuar el caudal rápidamente, con esto se mitigaría los efectos perjudiciales al sistema.
- Con la construcción de la obra hidráulica se evitará problemas de inundación en infraestructuras cercanas a la captación y aguas abajo, así como también posibles paralizaciones en la central Hidroeléctrica. En los escenarios analizados se puede visualizar problemas de masas de aire que pueden afectar al sistema.
- Las obras hidráulicas a construir, deberán garantizar una descarga de flujo de manera controlada y segura, evitando el rechazo de carga que se pueda presentar en la casa de máquinas Sarapullo; por lo que se recomienda construir canales de derivación que conduzcan el caudal de excedencia aguas abajo a la captación o hasta el curso natural del río Pilatón.

## Referencias

- Abreu, J. (1995). *Transitorios y oscilaciones en sistemas hidráulicos a presión* (1 ed.). España: Imprenta Sichert.
- Aburto, M. (2001). *Transitorios Hidraulicos en plantas de Bombeo* (Vol. 1). México. CELEC, EP. (2008). *Hidrotoapi*. Obtenido de <https://www.celec.gob.ec/hidrotoapi/images/esquema-g.jpg>
- Choon, T., Aik, L., & Hin, T. (2012). Investigation of Water Hammer Effect Through Pipeline System. *CORE*, 6.
- Collazos, A., & Laverde, J. (2018). Diseño y construcción de una almanera (Dispositivo de protección para disipar el golpe de ariete). Bogotá, Colombia.
- Dekam, E. (2009). Pressure Transient in networks, simulation and analysis. Tripoli.
- González, J., & Bernal, J. (2015). Análisis teórico experimental del fenómeno del golpe de ariete por el cierre rápido de una válvula en tuberías. Bogotá, Colombia.
- Granell, J., & Lafuente, R. (Febrero de 2010). Análisis matemático del Golpe de Ariete. *Revista de Obras Públicas*, 12.
- Jinping, L., & Jiandong, W. P. (2010). CFD Numerical Simulacion of water hammer in pipeline based on the Navier-Stokes equation. *ECCOMAS CFD*, 12.
- Kodura, A. (23 de MAYO de 2016). An Analysis of the Impact of Valve Closure Time on the Course of Water. *DE GRUYTER*, 11.
- Lozada, J. (Septiembre de 2010). Análisi del flujo no permanente en tuberías de presión para aprovechamientos hidroeléctricos. Quito, Ecuador.
- Martínez, F. (January de 1995). *ResearchGate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/316637231\\_Chimeneas\\_de\\_equilibrio\\_El\\_problema\\_de\\_la\\_estabilidad\\_hidraulica\\_en\\_las\\_Centrales](https://www.researchgate.net/publication/316637231_Chimeneas_de_equilibrio_El_problema_de_la_estabilidad_hidraulica_en_las_Centrales)
- Montes, K., & Sabogal, L. (16 de Noviembre de 2019). Investigación y análisis hidráulico del golpe de ariete en la conducción y llegada a la PCH de Santa Ana. Bogotá, Colombia
- Parmakian, J. (1955). *Waterhammer*. New York: Dover Publications.
- Peréz, L., & Guitelman, A. (2005). Estudios de transitorios: Golpe de ariete.
- Perotti, R., & Parrondo, J. (2006). Simulación teórica de las oscilaciones de flujo en centrales de bombeo con chimeneas de equilibrio. *Iberoamericana*, 1.
- Rubio, R., & Brigades, V. (1995). Fenómeno transitorio del golpe de ariete. Buenos Aires.
- Soria, M., & Peña, P. (Julio de 2017). Análisi del flujo no permanente en una conducción de lata carga con ramificaciones. Quito, Ecuador.
- Tullis, P. (1989). *Hydraulics of pipelines*. Canada: A Wiley-Interscience Publication.
- Twyman. (2017). Water hammer analysis in a water distribution system. *Ingeniería del agua*, 16