



# UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Estudio y evaluación de línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay, mediante la aplicación de modelos unidimensionales de flujo.

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

**Autoras:**

Karla Gabriela Lliguisaca Parra

CI: 0107097313

Correo electrónico: [gaby01k97@gmail.com](mailto:gaby01k97@gmail.com)

Jessenia Karina Pacheco Galindo

CI: 0104988597

Correo electrónico: [jessenia.kpg20@gmail.com](mailto:jessenia.kpg20@gmail.com)

**Directora:**

Ing. Verónica Margarita Carrillo Serrano

CI: 0104040480

**Cuenca - Ecuador**

09-marzo-2022



## RESUMEN

El sistema de agua potable de Sinincay construido en el año 1988, abastece aproximadamente a 2530 usuarios en la actualidad, su línea de conducción ha sobrepasado el periodo de diseño presentando deficiencias en su operación y mantenimiento, por ello se ha recopilado información topográfica y de parámetros hidráulicos que permitan verificar su funcionamiento. Se planteó la aplicación de un modelo unidimensional de flujo de manera de establecer las condiciones de funcionamiento actuales y futuras del sistema. La simulación de la línea se realizó en el programa EPANET 2.0.

La línea de conducción funciona a gravedad, el transporte de agua a presión puede generar problemas de fenómenos transitorios hidráulicos, especialmente en casos en los que se tiene la intervención de componentes del sistema que producen cambios momentáneos de las condiciones hidráulicas, por lo cual se realizó un análisis para apertura y cierre de válvula bajo distintos escenarios de tiempo en el modelo computacional ALLIEVI.

Al ser Sinincay considerada un área de expansión urbana y debido al crecimiento poblacional es importante analizar las condiciones hidráulicas de la conducción a futuro, de manera que cubra la demanda de agua requerida por la población actual y de un periodo de análisis de 25 años.

Según el análisis realizado, se deduce que las características geométricas de la línea son óptimas para la operación de la conducción a gravedad, sin embargo, su estado físico impide el funcionamiento adecuado de la misma. Por estas razones se proponen alternativas enfocadas a mejorar la eficiencia hidráulica del sistema, como la instalación de válvulas que permitan el control del flujo y sus tiempos de maniobra. Estas condiciones se plantean con el fin de beneficiar a la población actual y futura de la parroquia.

**Palabras claves:** Sistema de agua potable. Modelo unidimensional de flujo. Fenómenos transitorios. EPANET 2.0. ALLIEVI.



## ABSTRACT

Sinincay's drinking water system was built back in 1988, and it currently supplies approximately 2530 users. Its lines have overpassed the design period for which it was built, therefore, it presents deficiencies in its proper operation and upkeep. For this reason, topographic information and hydraulic parameters were collected in order to verify its proper functions. To prove this the application of a one dimensional model was proposed to show current and future flows. The line simulation it's going to be done in EPANET 2.0.

The driving line works using gravity, therefore the transportation of water by pressure can cause hydraulic transients phenomena problems. This happens specially in cases where there is an intervention of the system's components which can cause momentary changes in the hydraulic conditions. Reason why an analysis of opening and closing of valves under different time scenarios using ALLIEVI computational model was done.

Since Sinincay is considered an urban area that it's quickly expanding due to its population growth it's important to consider the following: The hydraulic conditions of the driving line in a way that water demand covers the necessities of current population as well as an analysis period of 25 years ahead.

As a result of the analysis, it was concluded that the line geometric characteristics' is optimal for the operation of gravitational driving, nevertheless its physical state doesn't allow the proper function of it. For this reason, other alternatives were proposed focusing on the hydraulic system efficiency such as: the installation of valves that regulate flow and maneuver times. These conditions were posed as a way to help the current and future population of Sinincay.

**Keywords:** Drinking water system. One-dimensional flow model. Transient phenomena. EPANET 2.0. ALLEVI.



## ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	6
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
ÍNDICE DE FIGURAS .....	10
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	12
DEDICATORIA .....	17
AGRADECIMIENTO.....	19
1. INTRODUCCIÓN .....	21
1.1.  Problematización .....	22
1.2.  Objetivos .....	24
1.2.1.  Objetivo General .....	24
1.2.2.  Objetivos Específicos .....	24
1.3.  Justificación.....	24
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
2.1.  ESQUEMA HIDROTÉCNICO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE SININCAY 26	
2.1.1.  Captación: Criterios principales y estado actual del proyecto.....	26
2.1.2.  Línea de conducción: Componentes y criterios principales. ....	27
2.2.  PRINCIPALES CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LÍNEAS DE CONDUCCION PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE EN ZONAS DE MONTAÑA .....	30
2.2.1.  Aspectos Teóricos Fundamentales.....	30
2.3.  IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.....	34
2.3.1.  Descripción puntual de los fenómenos transitorios y tipos .....	34
2.3.2.  Análisis de transitorios en líneas de conducción para el transporte de agua. ....	35
2.3.3.  Golpe de Ariete y efectos en sistemas de conducción:.....	39
2.4  DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA PERIODO DE ANÁLISIS .....	44
2.4.1  Periodo de análisis .....	44
2.4.2  Dotación .....	44
2.4.3  Nivel de servicio.....	44
2.4.4  Caudal de diseño.....	45
2.4.5  Velocidad .....	46
2.5  DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	47
2.5.1  Ubicación .....	47
2.5.2  Clima .....	48



2.5.3	Topografía y relieve.....	48
2.6	RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN Y SUS ELEMENTOS.....	49
2.6.1	Catastro de la línea de conducción de Sinincay .....	49
2.6.2	Recopilación de información hidráulica de la línea de conducción de Sinincay. Parámetros actuales de servicio.....	57
2.6.3	Cálculo de parámetros para un periodo de análisis de 25 años.....	60
2.7	MODELACIÓN NUMÉRICA .....	63
2.7.1	Construcción del modelo hidráulico en EPANET .....	63
2.7.2	Construcción del modelo hidráulico en ALLIEVI.....	65
3	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	69
3.1	ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA CONDUCCIÓN .....	69
3.1.1	Cálculo manual de la capacidad hidráulica del sistema de conducción.....	69
3.1.2	Capacidad hidráulica del sistema de conducción mediante el programa EPANET 2.0	71
3.1.3	Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido del sistema de conducción .....	75
3.1.4	Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real del sistema de conducción	78
3.1.5	Modelo unidimensional de flujo para el caudal requerido en el periodo der análisis de 25 años	81
3.2	ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR MANIOBRA DE VÁLVULAS.....	85
3.2.1	Primer escenario: Válvula abierta completamente sin realizar ninguna maniobra. ...	85
3.2.2	Segundo escenario: Cierre de válvula .....	87
3.2.3	Tercer escenario: Apertura de válvula .....	105
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	123
4.1	Conclusiones .....	123
4.2	Recomendaciones.....	126
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	129
6.	ANEXOS .....	132



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Captación directa al río Patamarca de la línea de conducción del sistema de agua potable de Sinincay. Fuente: Los autores. ....	27
Ilustración 2: Línea de conducción a presión. Sistema de abastecimiento de agua potable de Sinincay. Fuente: Los autores.....	28
Ilustración 3: Tanque rompe presiones y desripiador existente en la línea de conducción del Sistema de agua potable de Sinincay. Fuente: Los autores .....	29
Ilustración 6 Compenen de la ecuación de energía con especificaciones en zonas de montaña . Elaboración: Autoras.....	31
Ilustración 7 Secuencia de eventos para un ciclo del cierre súbito de una válvula Fuente:(Streeter & Wylie, 1988). ....	36
Ilustración 8 Secuencia de apertura de una válvula al final de la conducción Fuente:(Comisión Nacional del Agua, n.d.).....	38
Ilustración 9: Detalle de longitud crítica Fuente: (EUITACR, n.d.). Elaboración: Autoras .....	42
Ilustración 10: Ubicación geográfica de la parroquia de Sinincay. Fuente:(Pakariñan, 2015). ....	47
Ilustración 11 Pisos climáticos en la parroquia de Sinincay. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015). ....	48
Ilustración 12: Relieve de la parroquia Sinincay. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015). ....	49
Ilustración 13: Obtención de puntos con GPS Diferencial .....	50
Ilustración 14: Obtención de puntos en la clave de tubería .....	50
Ilustración 15: Levantamiento topográfico de la captación El Salado, Parroquia Sinincay. ....	51
Ilustración 16: Rejilla de la captación El Salado. Parroquia Sinincay. ....	51
Ilustración 17: Tramo de la línea de conducción. ....	52
Ilustración 18: Rotura de tuberías en la línea de conducción de Sinincay. ....	52
Ilustración 19: Desripiador de la línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay. ...	53
Ilustración 20: Anclajes de la línea de conducción. ....	53
Ilustración 21: Rotura de tuberías.....	53
Ilustración 22: Línea de conducción de agua potable .....	54
Ilustración 23: Uniones de tuberías. Línea de conducción .....	54
Ilustración 24: Llegada de la línea de conducción a la planta. Con accesorio de codo alargado.....	54
Ilustración 25: Planta de Tratamiento de Agua Potable de Sinicay .....	55
Ilustración 26 Toma de puntos de la línea de conducción .....	55
Ilustración 27: Leyenda de la tubería. ....	56
Ilustración 28: Toma de puntos en el centro y borde del río. ....	56
Ilustración 29 Levantamiento topográfico final de la línea de conducción Elaboración: Autoras ....	57
Ilustración 30. Pasos generales para construcción del modelo hidráulico en EPANET 2.0. Fuente: Los autores .....	64
Ilustración 31: Modelo hidráulico de la línea de conducción de Sinincay realizado en EPANET 2.0. Nodos de análisis y estructuras de control. Fuente: Las autoras. ....	65
Ilustración 32 Modelo hidráulico de la línea de conducción de Sinincay. Nodos de análisis y estructuras de control. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	68
Ilustración 33 Previsualización del perfil de la línea de conducción Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	68



Ilustración 34: Capacidad de la línea de conducción en el tramo Captación-Desripiador. Simulación realizada en el programa EPANET 2.0.....71

Ilustración 35: Capacidad de la línea de conducción en el tramo Desripiador- PTAP. Simulación realizada en el programa EPANET 2.0.....72

Ilustración 36: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador-PTAP. Actuando bajo el caudal de capacidad del sistema. Realizado en EPANET 2.0. ....73

Ilustración 37: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0.....76

Ilustración 38: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0. Elaboración: Autoras.....77

Ilustración 39: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador-PTAP. Actuando bajo el caudal requerido para la población actual .....77

Ilustración 40: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real actual, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0.....79

Ilustración 41: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0. ....80

Ilustración 42: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador-PTAP. Actuando bajo el caudal real actual. Realizado en EPANET 2.0 .....80

Ilustración 43: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real actual, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0.....82

Ilustración 44: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0.....83

Ilustración 45: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador-PTAP. Actuando bajo el caudal en un periodo de de 25 años. Realizado en EPANET 2.0. Elaboración: Las autoras. ....83



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de sistema de agua potable. Elaboración: Autoras. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015).	22
Tabla 2: Conflictos en el Sistema de Agua Potable de Sinincay. Fuente: (Pakariñan, 2015).	23
Tabla 3: Rugosidad absoluta para tuberías. Fuente: (Rocha, 2007). Elaboración: Autoras	34
Tabla 4: Valores de k para hallar la celeridad con la expresión de Allievi.	40
Tabla 5 Longitud crítica Fuente:(EUITACR, n.d.). Elaboración: Autoras	42
Tabla 6: Tabla de dotaciones. Fuente: (SENAGUA, 2016) Elaboración: Autoras	44
Tabla 7 Niveles de servicio para sistemas de abastecimiento de agua, disposición de excretas y residuos líquidos Fuente: (SENAGUA, 2016). Elaboración: Autoras	44
Tabla 8 Porcentaje de fugas a considerarse en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable. Fuente:(SENAGUA, 2016). Elaboración: Autoras	45
Tabla 9: Límites máximos de velocidad en conductos a presión. Obtenido de: (Norma CO 10.07 - 601, 2010).	47
Tabla 10: Descripción de la tubería de la línea de conducción	56
Tabla 11: Número de medidores por vivienda Fuente. Junta Administradora de Agua Potable	58
Tabla 12 Número promedio de habitantes por vivienda Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC-Censo 2010. Recuperado de: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015). Elaboración: Autoras	58
Tabla 13: Densidad ponderada. Elaboración: Autoras	58
Tabla 14: Cálculo de población actual. Elaboración: Autoras	59
Tabla 15: Cálculo de caudales de servicio requeridos en la actualidad para el abastecimiento de agua potable en la parroquia Sinincay. Elaboración: Autoras	59
Tabla 16: Tasa de crecimiento para los periodos 1990-2001 y 2001-2010. Obtenido de: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015). Elaboración: Autoras	60
Tabla 17: Población actual de servicio del sistema de agua potable de Sinincay y tasa de crecimiento	60
Tabla 18: Proyección poblacional al año 2046 de la parroquia Sinincay, calculado mediante el método aritmético, geométrico, exponencial y el promedio de los mismos	61
Tabla 19: Datos ingresados en el programa EPANET 2.0	64
Tabla 20: Información de las estructuras de control (Embalses) colocados en la simulación de la línea de conducción. Georreferenciación y altura total	64
Tabla 21 Cálculo de la velocidad de onda. Elaboración: Autoras	66
Tabla 22 Datos de ingreso en el software Allievi para la tubería Elaboración: Autoras	66
Tabla 23 Datos de ingreso en el software Allievi para nodos Elaboración: Autoras	67
Tabla 24 Datos de ingreso en el software Allievi para depósitos Elaboración: Autoras	67
Tabla 25: Valor de coeficiente k para cálculo de pérdidas locales. Fuente:(Comisión Nacional del Agua, n.d.). Elaboración: Autoras	67
Tabla 26 Datos de ingreso en el software Allievi para la válvula Elaboración: Autoras	67
Tabla 27: Datos generales del tramo Captación- Desripiador	69
Tabla 28: Cálculo del factor de fricción, pérdidas por fricción y caudal en el tramo captación-desripiador	69
Tabla 29: Datos generales del tramo Desripiador- PTAP	70



Tabla 30: Cálculo del factor de fricción, pérdidas por fricción y caudal en el tramo Desripiador-PTAP.....70

Tabla 31 Resultados en los nodos bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.....88

Tabla 32 Resultados en la tubería bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.....88

Tabla 33 Resultados en la válvula bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.....88

Tabla 34 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 5 segundos. Elaboración: Autoras.....90

Tabla 35 Depresión para un tiempo de cierre de 5 segundos Elaboración: Autoras .....90

Tabla 36 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 10 segundos. Elaboración: Autoras .....94

Tabla 37 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 20 segundos. Elaboración: Autoras .....97

Tabla 38 Comparación entre un cierre lineal de 20 segundos y un cierre en 20 segundos en dos etapas Elaboración: Autoras .....105

Tabla 39: Resultados en los nodos bajo régimen permanente en apertura de válvula. Realizado en ALLIEVI.....106

Tabla 40: Resultados en la válvula bajo régimen permanente en apertura de válvula. Realizado en ALLIEVI.....106

Tabla 41: Sobrepresión máxima en la línea de conducción en apertura de válvula en  $t=5s$ .....107

Tabla 42: Coordenadas.....132



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Proyección poblacional mediante el método aritmético, geométrico, exponencial y el promedio de los mismos.....	62
Figura 2: Línea de gradiente hidráulico de la conducción para un caudal actual en condiciones reales. Elaboración: Autoras.....	74
Figura 3: Línea de gradiente hidráulico de la conducción para un caudal actual requerido. Elaboración: Autoras.....	78
Figura 4: Línea de gradiente hidráulico para el caudal actual real de la línea de conducción. Elaboración: Autoras.....	81
Figura 5: Línea de gradiente hidráulico para el caudal actual futuro en un periodo de 25 años. Elaboración: Autoras.....	84
Figura 6: Envoltentes piezométricas para un escenario de válvula completamente abierta. Fuente: ALLEVI. Elaboración: Autoras.....	86
Figura 7: Caudal para un escenario con válvula completamente abierta Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	87
Figura 8 Cierre lineal de la válvula Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	89
Figura 9 Envoltentes piezométricas para un cierre de 5 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	89
Figura 10 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 5 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras .....	91
Figura 11 Variación del caudal para un cierre de 5 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	92
Figura 12 Cierre lineal de la válvula en 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	93
Figura 13 Envoltentes piezométricas para un cierre de 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	93
Figura 14 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 10 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras .....	94
Figura 15 Variación del caudal para un cierre de 10 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	95
Figura 16 Envoltentes piezométricas para un cierre de 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	96
Figura 17 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 20 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras .....	97
Figura 18 Variación del caudal para un cierre de 20 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	98
Figura 19 Envoltentes piezométricas para un cierre de 90 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	99
Figura 20 Cierre lineal de la válvula en 120 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	99
Figura 21 Envoltentes piezométricas para un cierre de 120 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	100
Figura 22 Figura 17 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 20 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras.....	101
Figura 23 Variación del caudal para un cierre de 120 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	102
Figura 24 Cierre de la válvula en dos etapas. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	103
Figura 25 Envoltentes piezométricas para un cierre en dos etapas Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.....	103
Figura 26 Comparación de envoltentes piezométricas para un cierre de 20 segundos lineal y un cierre de 20 segundos en dos etapas Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....	104
Figura 27: Apertura lineal de la válvula en 5 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras ..	106



Figura 28: Envoltentes piezométricas para una apertura de 5 segundos Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras.....107

Figura 29: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 5 segundos. Fuente:  
ALLIEVI Elaboración: Autoras .....108

Figura 30: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 5  
segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....109

Figura 31: Apertura lineal de la válvula en 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras 110

Figura 32: Envoltentes piezométricas para una apertura de 10 segundos Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras.....110

Figura 33: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 10 segundos. Fuente:  
ALLIEVI Elaboración: Autoras .....111

Figura 34: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 10  
segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....112

Figura 35: Apertura lineal de la válvula en 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras 113

Figura 36: Envoltentes piezométricas para una apertura de 20 segundos Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras.....113

Figura 37: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 20 segundos. Fuente:  
ALLIEVI Elaboración: Autoras .....114

Figura 38: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 20  
segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....115

Figura 39: Apertura lineal de la válvula en 40 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras 116

Figura 40: Envoltentes piezométricas para una apertura de 40 segundos Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras.....116

Figura 41: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 40 segundos. Fuente:  
ALLIEVI Elaboración: Autoras .....117

Figura 42: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 20  
segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....118

Figura 43: Apertura lineal de la válvula en dos instantes de tiempo Fuente: ALLIEVI Elaboración:  
Autoras.....119

Figura 44: Envoltentes piezométricas para una apertura en dos instantes de tiempo. Fuente:  
ALLIEVI Elaboración: Autoras .....119

Figura 45: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura en 2 instantes de tiempo.  
Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....120

Figura 46: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura en dos  
instantes de tiempo. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras .....121

Figura 47: Caudal y porcentaje de apertura de la válvula correspondientes a todos los tiempos de  
análisis: 5, 10, 20, 40 segundos y apertura en 2 etapas. Fuente: ALLIEVI. Elaboración: Autoras. 122

Figura 48: Caudal en los depósitos (Desripiador y PTAP) correspondiente a todos los tiempos de  
análisis: 5, 10, 20, 40 segundos y apertura en 2 etapas. Fuente: ALLIEVI. Elaboración: Autoras. 122



## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Ecuación de la energía	30
Ecuación 2 Ecuación de la energía	32
Ecuación 3 Pérdidas por Darcy-Weisbach	33
Ecuación 4 Colebrook-White	33
Ecuación 5 Número de Reynolds	33
Ecuación 6 Velocidad de propagación Allievi	39
Ecuación 7 Coeficiente que toma en cuenta los módulos de elasticidad	39
Ecuación 8 Periodo de la tubería	40
Ecuación 9 Sobrepresión máxima	41
Ecuación 10 Sobrepresión por golpe de ariete	41
Ecuación 11 Longitud crítica	42
Ecuación 12 Caudal medio diario	45
Ecuación 13 Caudal máximo diario	45
Ecuación 14 Caudal máximo horario	46
Ecuación 15 Población futura. Método aritmético	60
Ecuación 16 Población futura. Método geométrico	61
Ecuación 17 Población futura. Método exponencial	61



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Karla Gabriela Lliguisaca Parra en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio y evaluación de línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay, mediante la aplicación de modelos unidimensionales de flujo", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de marzo de 2022

Karla Gabriela Lliguisaca Parra

C.I: 0107097313



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Karla Gabriela Lliguisaca Parra, autora del trabajo de titulación "Estudio y evaluación de línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay, mediante la aplicación de modelos unidimensionales de flujo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 09 de marzo de 2022

Karla Gabriela Lliguisaca Parra

C.I: 0107097313



## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Jessenia Karina Pacheco Galindo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Estudio y evaluación de línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay, mediante la aplicación de modelos unidimensionales de flujo", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 09 de marzo de 2022

Jessenia Karina Pacheco Galindo

C.I: 0104988597



## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Jessenia Karina Pacheco Galindo, autora del trabajo de titulación "Estudio y evaluación de línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay, mediante la aplicación de modelos unidimensionales de flujo", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 09 de marzo de 2022

---

Jessenia Karina Pacheco Galindo

C.I: 0104988597



## DEDICATORIA

*Este trabajo de titulación dedico a mis padres, Pedro y Teolinda, que han sido mi orgullo y mi pilar fundamental en el transcurso de estos años.*

*A mis hermanas Ana y Fernanda, y a mi hermano Pedro por brindarme su apoyo y por cada día confiar y creer en mí.*

*Dedico a la memoria de mi abuelita Rosa Cordero por su preocupación y cada pregunta que me hacía en los primeros años de esta etapa, la vida no nos permitió seguir juntas, pero le dedico a ella por ser mi inspiración, mi ejemplo y mis ganas de salir adelante.*

*A Mateo, por ser mi apoyo en cada momento de mi vida.*

*A mis tres princesas, mis sobrinas, por llenarme de sonrisas en cada momento.*

Gaby



## DEDICATORIA

*El presente trabajo de titulación quiero dedicarlo a las personas que han estado conmigo durante todo este tiempo, quienes han sido mi pilar. Su comprensión y amor me dieron fuerzas para poder culminar esta etapa tan importante en mi vida.*

*A mis padres Gersson y Carmita quienes con su amor, esfuerzo y apoyo incondicional me han permitido lograr una meta más en mi vida.*

*A mi hermana Daniela y mis hermanos Paúl y Andrés por su cariño y compañía, por darme impulso en los momentos más difíciles y siempre ayudarme a encontrar mi felicidad.*

*A mi abuelita Elsa por su afecto y sabiduría, por compartir conmigo y brindarme fortaleza a lo largo de este proceso con sus consejos y oraciones.*

*A mi sobrino Pedrito, quien con su dulzura ha sido luz para mi desde el momento que llegó a mi vida.*

*A mis ángeles en el cielo, que sé que están orgullosos al verme lograr esta meta.*

Jessy



## AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios por la salud, la vida y permitirme culminar esta etapa tan importante para mí.

Agradezco a mi directora de tesis, Ing. Verónica Carrillo, por su ayuda, enseñanzas y seguimiento para poder culminar este proyecto.

A mis revisores, Ing. Esteban Pacheco e Ing. Felipe Cisneros por su ayuda, disposición y por el tiempo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por permitirme formar en ella, y vivir momentos inolvidables, y a mis profesores por brindarme sus conocimientos para poder cumplir esta meta.

A mi amiga y compañera de tesis, Jessenia, por siempre estar presente, porque a pesar de las adversidades que tuvimos durante estos años, nunca decaímos y siempre estábamos para salir adelante, por haber luchado desde el inicio juntas.

A mi familia, especialmente a mis padres y hermanos, quienes han creído en mí, me han apoyado durante todos estos años que no han sido sencillos, pero gracias por su ayuda, por sus consejos y sus ánimos para poder salir adelante y cumplir este sueño.

A todos mis amigos y amigas que conocí en el transcurso de estos años, especialmente a mi grupo, por compartir varios momentos dentro y fuera de las aulas, por vivir experiencias inolvidables, y por juntos darnos apoyo siempre.

*Gaby*



## AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios por darme el don de la vida y salud, por la fortuna de tener una familia maravillosa quienes son un pilar fundamental y que cada día demostraron creer en mí y mis expectativas, saber comprender mi ausencia y celebrar mis logros con orgullo.

Especialmente quisiera agradecer a mis padres quienes siempre me han inculcado a no darme por vencida y alcanzar mis metas y me han ayudado a mantener una perspectiva real sobre lo que es importante en la vida

A mi hermana Danny por estar siempre para escucharme, aconsejarme y motivarme. A mis hermanos Paúl y Andrés, por formar parte de mi vida con sus locuras.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por la formación brindada durante 10 semestres.

A los docentes que han sido parte de este proceso con su valiosa enseñanza, de manera especial a la ingeniera Verónica Carrillo, directora de este trabajo de titulación, quien con su conocimiento y apoyo permitió el desarrollo del mismo.

De igual manera a los revisores, Ingeniero Esteban Pacheco e Ingeniero Felipe Cisneros por su disposición a ayudarnos en el desarrollo del presente trabajo.

A mi amiga y compañera de trabajo de titulación, Gaby, por su amistad sincera, apoyo, risas y experiencias a lo largo de nuestra vida universitaria y en el presente trabajo, tuve la suerte de coincidir con ella y que el camino fuera más divertido y ligero.

A los amigos de la vida y los que he ido formando a lo largo de la carrera universitaria por acompañarme, compartir conmigo experiencias inolvidables y por su ayuda en momentos difíciles, me llevo gratos recuerdos de cada uno de ellos.

A todas las personas han aportado un grano de arena en distintos ámbitos en el transcurso de la universidad, por las oportunidades brindadas y enseñanzas compartidas.

*Jessy*



## 1. INTRODUCCIÓN

La Junta Administradora de Agua Potable de la parroquia de Sinincay es la encargada de dirigir el sistema de abastecimiento de la zona, suministrando el servicio aproximadamente a 2530 usuarios; parte fundamental del sistema es la línea de conducción de agua cruda, en la cual se enfoca el presente estudio, esta funciona por gravedad ofreciendo ventajas como una operación sencilla, mantenimientos económicos y cambios reducidos de presión (CONAGUA, 2007).

Actualmente, el sistema de agua potable de Sinincay no se encuentra funcionando en condiciones óptimas y la línea de conducción ha sobrepasado su periodo de diseño. Además, al no contar con información de parámetros hidráulicos, se busca realizar una evaluación técnica del funcionamiento actual de la línea de conducción para poder abastecer a un mayor número de habitantes en los próximos años.

La línea de conducción de Sinincay tiene una longitud aproximada de 580 metros, que inician en la obra de toma emplazada en el río Patamarca, aproximadamente a los 45 metros de la toma se cuenta con un desripador precedido de un tanque rompe presiones, además de elementos como: compuertas, deflector, cámaras y anclajes de hormigón encargados de sostener la tubería.

En este estudio se ha realizado un análisis de las condiciones hidráulicas actuales de la línea de conducción, además se analiza los fenómenos transitorios que pueden ocurrir en el sistema para escenarios de apertura y cierre de válvulas. Previo a esto, se ha recopilado información hidráulica y topográfica del sistema.

Se ha usado el modelo computacional EPANET 2.0 para las distintas simulaciones que permitan evaluar las condiciones hidráulicas actuales y las más óptimas para el sistema. Además, se usa el programa de cálculo ALLIEVI el cual permite realizar se análisis de fenómenos transitorios como el golpe ariete en los casos de apertura y cierre de válvulas. Con los resultados de la modelación hidráulica de flujo unidimensional, se analizan alternativas para lograr una conducción de agua potable óptima.



## 1.1. Problematización

A medida que pasa el tiempo, la población en la parroquia de Sinincay aumenta, adicionalmente, considerando las condiciones de diseño del sistema de conducción se establece que la línea de conducción ya ha sobrepasado su periodo de diseño. Por lo tanto, existe la necesidad de conocer las condiciones hidráulicas actuales del sistema, la capacidad de la línea de conducción y el análisis de los problemas que puedan suceder con los fenómenos transitorios.

Según la Organización de las Naciones Unidas, el agua potable es un derecho universal de la humanidad, es por ello que los gobiernos seccionales están en la obligación de garantizar el acceso de este recurso a toda la población, cumpliendo con las condiciones de cantidad, calidad, cobertura y continuidad.

La captación de donde parte la línea de conducción es conocida como captación de El Salado, la cual, alimenta al sistema de agua potable. Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (Pakariñan, 2015) la dotación del servicio de agua presenta conflictos a pesar de que la percepción de calidad del agua es considerada buena.

La Tabla 1 tomada del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Sinincay del año 2015 presenta un resumen del sistema e indica que este sufre daños de roturas, lo que fue comprobado en el momento de la visita al lugar de estudio.

Tabla 1: Resumen de sistema de agua potable. Elaboración: Autoras. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015).

<b>Nombre del Sistema</b>	<b>Sistema de Sinincay</b>
Nombre de las fuentes	El Salado
Estado de la infraestructura	Bueno
Daños que sufre	Roturas
Fecha construcción	1988
Tipo de organización	Junta Administradora
Instituciones de apoyo	ETAPA, Junta Parroquial Cooperación Interinstitucional
Continuidad del servicio	Permanente
Caudal concedido por usuario	25 m <sup>3</sup>
Reglas tarifarias	Tarifa única



Además de los problemas del sistema evidenciados o los daños en la infraestructura, existen otros inconvenientes en la parte organizativa. Los mismos se pueden comprobar en la siguiente tabla.

Tabla 2: Conflictos en el Sistema de Agua Potable de Sinincay. Fuente: (Pakariñan, 2015).

Nombre del Sistema	Sistema de Sinincay
Dispone de medidores	Sí
Conflictos en la organización	Sí
Causas de conflictos	Cambio de tuberías e interés por manejar el sistema a cargo de grupos e instituciones
Quien resuelve los conflictos	Asamblea y directorio, por consenso

A consecuencia del uso y período de diseño excedido de la línea de conducción de Sinincay; los materiales que conforman las estructuras hidráulicas como las válvulas, compuertas, tuberías presentan desgastes y cambios en sus propiedades dificultando el funcionamiento óptimo del sistema. Además, existe información escasa de datos o valores para el análisis del modelo hidráulico, es por ello, se evidencia la necesidad de un levantamiento de información topográfica y recopilación de información hidráulica del sistema de conducción.

Los inconvenientes que los usuarios presentan sobre del sistema son bastante diversos, provocando, según datos del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (Pakariñan, 2015) que la ciudadanía exija incrementos en la tarifa del servicio a cambio de la mejora del mismo. Acotando a esto, es preciso mencionar que la tarifa actualmente es de 1 USD por cada 25 m<sup>3</sup>.

Por todo lo antes expuesto, en el presente proyecto se plantea el desarrollo de un análisis de las condiciones de funcionamiento actuales y una proyección para un periodo de análisis futuro de 25 años que permita establecer puntos críticos a considerar y/o intervenir con el objetivo de optimizar el funcionamiento del sistema de distribución y consecuentemente mejorar el nivel de servicio que se brinda a la parroquia de Sinincay.



## 1.2. Objetivos

El desarrollo del presente proyecto se ha planteado con los siguientes objetivos:

### 1.2.1. Objetivo General

Proponer condiciones de servicio que mejoren la eficiencia del sistema de abastecimiento, fundamentado en los criterios obtenidos en la modelación unidimensional de flujo de la línea de conducción en programas computacionales.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

1. Recopilar datos de condiciones actuales, caudales y catastro de tubería para evaluar la estructura existente.
2. Realizar un análisis de fenómenos transitorios y su influencia en la variación de parámetros hidráulicos en la línea de conducción por apertura y cierre de válvulas mediante softwares como EPANET y ALLIEVI.
3. Plantear alternativas con el fin de lograr condiciones hidráulicas óptimas para un buen funcionamiento de la línea de conducción en un periodo de diseño de 25 años.

## 1.3. Justificación

Al ser una línea de conducción que ha superado su periodo de diseño, transportando agua desde la captación “El Salado” en el río Patamarca hacia la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Sinincay, ha presentado deficiencias en su operación y mantenimiento a lo largo de los años.

La parroquia de Sinincay en la actualidad es considerada según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) como área de expansión urbana de la ciudad de Cuenca. Según los datos informativos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) obtenidos mediante el censo poblacional del 2010, la población de la parroquia es de 15859 habitantes, de los cuales, según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (Pakariñan, 2015) el Sistema de Agua Potable suministraba hasta la fecha de la construcción del PDOT, aproximadamente a 2000 usuarios. Sin embargo, acorde a lo señalado por la Junta Administradora de Agua Potable existe un incremento de aproximadamente 530 usuarios quienes reciben los problemas de la potabilización y distribución del líquido vital.



Debido a estos antecedentes, es importante la obtención de información topográfica y parámetros hidráulicos como velocidades, presiones y caudales actualizados que permitan establecer y verificar el estado de funcionamiento real del sistema de conducción. Estos análisis se realizarán por medio de un modelo hidráulico que permita analizar el dimensionamiento y estado del sistema en mención con el propósito de aportar criterios técnicos fundamentados a la mejora del servicio de abastecimiento de agua potable de la comunidad de Sinincay.

Se debe acotar que la línea de conducción funciona a presión, lo que puede generar problemas importantes de fenómenos transitorios, por ello se busca realizar un análisis hidráulico de los transitorios en la línea de conducción bajo distintos escenarios como apertura y cierre de válvulas, se han justificado las soluciones propuestas.

Debido al incremento poblacional de la parroquia Sinincay, que implica un aumento de demanda de agua potable, se ve la necesidad de tener una cobertura de esta demanda futura adicional. Es por ello que se ha planteado un análisis del funcionamiento de la línea de conducción en un periodo de 25 años.

Partiendo de esta premisa, los problemas presentados en la línea de conducción se han tratado mediante el análisis unidimensional hidráulico, diferente a los tratamientos convencionales. Para la simulación de la red y el análisis de parámetros hidráulicos se ha utilizado el programa EPANET 2.0, posteriormente el análisis de fenómenos transitorios se ha ejecutado en el programa ALLIEVI.

Cabe mencionar que a pesar de los problemas que presenta la red, existe predisposición de la población para aumentar la tarifa en el servicio de agua siempre cuando se implementen las mejoras en el mismo. De la misma manera, se debe aprovechar las potencialidades del sistema, ya que la parroquia al estar ubicada en una zona de páramo y bosque andino presenta buenas características de regulación y rendimiento hidrológico, siendo apto para el abastecimiento de agua.

El requerimiento de un servicio óptimo que cumpla los estándares de cantidad y calidad en el abastecimiento de agua se ha convertido en una necesidad urgente y prioritaria, lo que ha motivado plantear este estudio que busca repotenciar la línea de conducción y mejorar el sistema de abastecimiento general.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. ESQUEMA HIDROTÉCNICO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE SININCAY

El sistema de abastecimiento de agua potable de Sinincay está constituido por un conjunto de estructuras, que permiten dotar de agua tratada a una población:

1. Captación
2. Desripiador
3. Conducción
4. Planta de tratamiento
5. Tanques de reserva
6. Red de distribución

A continuación, se tratarán las estructuras pertinentes al presente trabajo.

#### 2.1.1. Captación: Criterios principales y estado actual del proyecto.

Las obras de captación son un conjunto de estructuras construidas en la fuente que permiten captar un caudal determinado, deben ser proyectadas de manera que se asegure el ingreso de agua al sistema en cualquier época del año, minimizando el ingreso de material al sistema como hojas, ramas, arena, ripio y material flotante.

Los ríos son las fuentes más frecuentes de captación, para el caso del proyecto la fuente de agua cruda es el río Patamarca, se debe tener en cuenta que los caudales y propiedades físico-químicas son variables a escalas estacionales, son más susceptibles a contaminación, implican menores costos operativos pero mayores costos de mantenimiento.

Existen captaciones convencionales y directas, manera en la cual se capta el agua en la parroquia de Sinincay, directamente en la orilla sin ninguna obra en el cauce, lo cual resulta más económico, pero no asegura que en verano se capte el caudal necesario. La toma se orienta perpendicular al flujo a fin de reducir daños durante crecidas del río.



*Ilustración 1: Captación directa al río Patamarca de la línea de conducción del sistema de agua potable de Sinincay.*

*Fuente: Los autores.*

### **2.1.2. Línea de conducción: Componentes y criterios principales.**

La línea de conducción es un conjunto de conductos, obras y accesorios destinados a transportar el agua desde el punto de captación hasta los tanques de almacenamiento o la planta de tratamiento (Tixe, 2004).

Para el presente estudio es importante tomar en cuenta varios factores como la topografía, dado que las tuberías siguen el perfil del terreno y funciona a gravedad, material de la tubería y principalmente el caudal a conducir para evaluar el diámetro de la tubería.

#### **Componentes del sistema de conducción**

El sistema de conducción del proyecto está constituido por tuberías y accesorios integrados permitiendo el transporte de agua utilizando energía hidráulica (Norma CO 10.07 - 601, 2010). . Es necesario el uso de elementos que permitan proteger, drenar, aislar e inspeccionar las tuberías y equipos instalados. (Andrade & Escobar, 2012).

Además de manera particular, el desripador en este sistema ha sido emplazado aproximadamente a 45 metros de la captación en el punto (720070.71 E, 9687412.30 N) y previo a esto un tanque rompe presión.

Se debe considerar que además de agua, se transporta aire y en algunos casos sólidos disueltos y sedimentables, los cuales tienen una influencia muy importante en el desempeño de la conducción y por tanto se evaluarán los siguientes criterios:

- La conducción debe ser diseñada para transportar el máximo caudal de diseño. Sin embargo, se debe verificar su funcionamiento para condiciones externas, fenómenos transitorios (apertura y cierre total de válvulas) los cuales se explicarán más adelante.
- El o los diámetros en función de las pérdidas de carga.
- La línea piezométrica deberá estar por lo menos 5 m por sobre la generatriz superior de la tubería (Norma CO 10.07 - 601, 2010).
- Se debe verificar el diseño para el fenómeno del golpe de ariete.
- Las presiones máximas que pueden darse en una tubería son las siguientes:
  - Condiciones normales de operación: menor a la presión máxima de la tubería.
  - Condiciones de golpe de Ariete: la presión mínima no será menor a la presión atmosférica.



*Ilustración 2: Línea de conducción a presión. Sistema de abastecimiento de agua potable de Sinincay.*

*Fuente: Los autores.*

Además, existen distintos elementos complementarios en un sistema de conducción, en el proyecto de Sinincay podemos encontrar los siguientes:

### **Tanque rompe presiones**

En la línea de conducción de Sinincay podemos encontrar un tanque rompe presiones antes del desripiador, aproximadamente a 45 metros de la captación. En líneas de conducción por gravedad la carga estática es originada por el desnivel existente entre la captación y algunos puntos a lo largo de la línea, lo que puede crear presiones superiores a las presiones máximas soportantes por algunas tuberías, esta estructura está destinada a reducir la presión relativa a cero (presión atmosférica).

### **Desripiadores y desarenadores**

En el sistema de conducción en estudio, el desripiador se encuentra luego del tanque rompe presiones mencionado anteriormente. Es de suma importancia ya que la captación de una fuente superficial, permite el ingreso de material flotante y disuelto en el agua, especialmente en épocas lluviosas, lo cual podría provocar daños u obstrucciones en el sistema. Permite la retención de agua de manera que partículas de arena puedan sedimentarse, por lo tanto, dependerá del tamaño, peso, forma de las partículas y de la viscosidad del líquido (Arocha, 1979).



*Ilustración 3: Tanque rompe presiones y desripiador existente en la línea de conducción del Sistema de agua potable de Sinincay. Fuente: Los autores*



También existen accesorios que no están presentes en la línea de conducción en estudio, sin embargo, su instalación es importante para evitar problemas en el sistema:

### **Válvulas de purga.**

En las líneas de conducción con topografía accidentada como el proyecto de Sinincay ubicado en una zona montañosa, los sedimentos tienden a acumularse en los puntos bajos (Arocha, 1979), por lo que es importante la instalación de una válvula de purga en los puntos más bajos de las tuberías.

### **Ventosas o válvulas de expulsión de aire.**

En zonas montañosas las líneas por gravedad tienden a acumular aire en los puntos altos debido a la baja presión, esta acumulación puede ser desplazada a lo largo de la tubería y provocar golpes en la tubería, similares al golpe de ariete. Esto provoca una reducción del área de flujo del agua y produce un aumento de las pérdidas y una disminución del caudal. Con el fin de evitar este fenómeno se deben colocar válvulas de aire o ventosas en los puntos altos de la tubería para eliminar el aire que se acumula, o para la entrada de aire y evitar el colapso de la tubería. (Arocha, 1979).

## **2.2. PRINCIPALES CRITERIOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE LÍNEAS DE CONDUCCION PARA SISTEMAS DE AGUA POTABLE EN ZONAS DE MONTAÑA**

### **2.2.1. Aspectos Teóricos Fundamentales**

Como es conocido, el dimensionamiento de los sistemas presurizados para conducción y distribución de agua se basa en la ecuación de la energía, la cual describe el comportamiento de un fluido a lo largo de una tubería.

La ecuación general de la energía se describe en dirección del flujo, para un punto de la conducción se tiene:

$$E = Z + \frac{V^2}{2g} + \frac{P}{\gamma}$$

Ecuación 1 Ecuación de la energía

Dónde:

$E$  = carga hidráulica en el punto (m)

$Z$  = cota topográfica (m)

$\frac{V^2}{2g}$  = energía cinética (m) Donde:

$V$  = velocidad del agua (m/s)

$g$  = aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$\frac{P}{\gamma}$  = altura de presión (m) Donde:

$P$  = presión del agua (N/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  = peso específico del agua (N/m<sup>3</sup>)

El primer término de la ecuación corresponde a la energía potencial, el segundo a la energía cinética y el tercer término a la energía de presión. En el caso particular de zonas de montaña adquiere relevancia los componentes referidos a la energía potencial y el componente referido a la energía de presión.

La ecuación anterior considerando dos puntos de la conducción, se detalla en la siguiente ilustración, igualando las energías en los dos puntos.

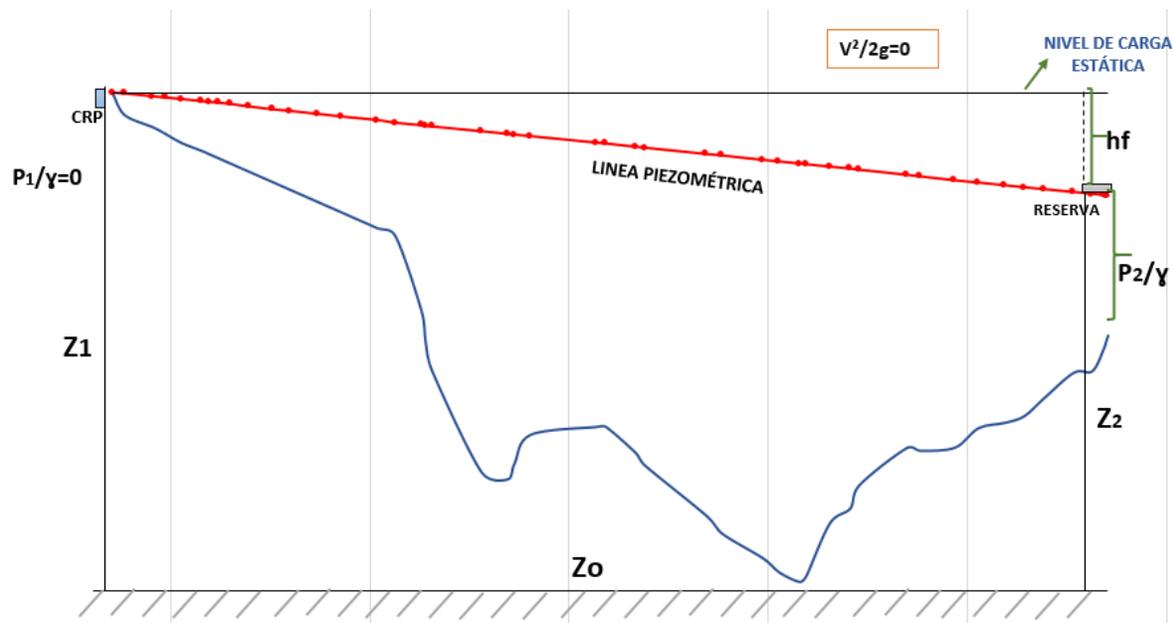


Ilustración 4 Componentes de la ecuación de energía con especificaciones en zonas de montaña. Elaboración: Autoras

El valor de la carga de velocidad es pequeño, por lo que respecto al valor de la carga de presión no es considerable, es por eso que se desprecia la carga de velocidad.



Igualando las energías en los dos puntos de la conducción se tiene.

$$E_{inicial} = E_{final} + ht$$

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + ht$$

Ecuación 2 Ecuación de la energía

Donde:

$ht$  = pérdidas de carga totales (m). Incluye pérdidas locales y de fricción.

Los puntos en cada sección representan diferentes líneas imaginarias y son las siguientes: (Andrade & Escobar, 2012).

- Línea de energía o de alturas totales: Línea que desciende en el sentido del flujo
- Línea de altura geométrica: Línea que representa la energía potencial, corresponde a la unión de las líneas de cotas topográficas.
- Línea de altura piezométrica: Línea que se encuentra por debajo de la línea de altura total, corresponde a la suma de la altura geométrica y la altura de presiones en cada sección de la conducción.

En la línea de conducción pueden existir presiones negativas, y sucede cuando la línea de alturas piezométricas está por debajo de la línea de altura geométrica.

### **Pérdidas de energía por fricción**

Considerando que las pérdidas por fricción son más significativas y representan la variación de la línea de energía en dos puntos de la conducción, no se ha considerado importante analizar las pérdidas locales. Para calcular las pérdidas de energía por fricción en la conducción existen las ecuaciones de Darcy – Weisbach, Hazen Williams y Chezy-Manning.

Para el presente estudio, considerando que la ecuación de Hazen Williams y Chezy Manning tienen sus limitaciones respecto al tipo de fluidos, régimen de flujo y dimensiones del canal o tubería, se ha optado por trabajar con la ecuación de Darcy Weisbach ya que es más acertada y se aplica a todo tipo de líquidos ya sea en régimen turbulento o laminar.



La ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Ecuación 3 Pérdidas por Darcy-Weisbach

Donde:

$f$  =coeficiente de pérdidas

$L$  =longitud (m)

$D$  =diámetro interior de la tubería (m)

$V$  =velocidad media del flujo (m/s)

$hf$  =pérdidas de energía por fricción (m)

El coeficiente de pérdidas depende de las propiedades geométricas, número de Reynolds y de la rugosidad absoluta, para encontrar este factor se resuelve la ecuación de Colebrook-White (SAGARPA, 2007), considerando de manera particular que en los conductos de sistemas de agua potable, generalmente el régimen es turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{k}{3.71D} \right)$$

Ecuación 4 Colebrook-White

$$Re = \frac{V \times D}{\nu}$$

Ecuación 5 Número de Reynolds

Donde:

$Re$  =número de Reynolds

$k$  =rugosidad absoluta

$\nu$  =viscosidad cinemática del fluido

En la siguiente tabla se detalla los valores de la rugosidad absoluta para tuberías.



Tabla 3: Rugosidad absoluta para tuberías. Fuente: (Rocha, 2007). Elaboración: Autoras

Materia	k (m)
Tubos muy lisos sin costura (vidrio, cobre, acero, nuevo con superficie pintada , plástico, etc)	$1,5 \times 10^{-6}$
Fierro forjado	$4,5 \times 10^{-5}$
Acero rolado nuevo	$5 \times 10^{-5}$
Acero laminado, nuevo	$4 \times 10^{-5} - 10^{-4}$
Fierro fundido, nuevo	$2,5 \times 10^{-4}$
Fierro galvanizado	$1,5 \times 10^{-4}$
Fierro fundido, oxidado	$1 \times 10^{-3} - 1,5 \times 10^{-3}$
Acero remachado	$0,9 \times 10^{-4} - 0,9 \times 10^{-3}$
Asbesto cemento, nuevo	$2,5 \times 10^{-5}$
Concreto centrifugado nuevo	$1,6 \times 10^{-4}$
Concreto muy bien terminado, a mano	$10^{-5}$
Concreto liso	$2,5 \times 10^{-5}$
Concreto bien acabado, usado	$2 \times 10^{-4} - 3 \times 10^{-4}$
Concreto sin acabado especial	$10^{-4} - 3 \times 10^{-3}$
Concreto rugoso	$10^{-2}$
Duelas de madera	$1,8 \times 10^{-4} - 9 \times 10^{-4}$

## 2.3. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.

### 2.3.1. Descripción puntual de los fenómenos transitorios y tipos

Los transitorios hidráulicos son fenómenos de variación de presiones en las conducciones a presión (Pérez & Guitelman, 2005). Dentro de estos fenómenos se encuentran los transitorios muy lentos o cuasiestáticos, en los que las variables de flujo cambian muy lentamente en el tiempo, con duraciones de varias horas o hasta días, no es necesario considerar la inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y la tubería (Comisión Nacional del Agua, n.d.). También se encuentran los transitorios lentos, los cuales se relacionan con el movimiento de masa de agua en la conducción, el periodo es de varios minutos u horas y los cambios de las variables son significativos, pero no tanto para considerar las propiedades elásticas del fluido y de la tubería.

Por último, se tiene los transitorios rápidos o golpe de Ariete, que se generan por cambios bruscos de la velocidad en la tubería, puede darse por apertura y cierre de válvulas. Los



cambios bruscos de velocidad generan cambios bruscos de presión lo que crea ondas de presión de periodo muy corto, por las variaciones de presión en este tipo de transitorios resulta necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido.

### **2.3.2. Análisis de transitorios en líneas de conducción para el transporte de agua.**

El trazado de las conducciones a presión se adapta mejor al perfil del terreno, sin embargo, esto puede tener importantes problemas de transitorios hidráulicos. Cualquier operación que se dé, ya sea de manera programada o accidental pueden producir efectos indeseables de exceso o deficiencia de presión en las tuberías. Cada maniobra provocará un efecto transitorio que se desarrollará hasta alcanzar un nuevo punto de equilibrio o un nuevo estado de régimen permanente (Bartolin et al., 2006).

Los fenómenos transitorios pueden causar problemas en la línea de conducción como:

- Sobrepresiones. - Las altas presiones que se producen en el golpe de ariete pueden superar la resistencia de la tubería y provocar su rotura.
- Depresiones. - Al presentarse en el transitorio un vacío que significa una presión inferior a la atmósfera, en la tubería se tendrá una presión menor a la que hay afuera.
- La diferencia de presiones si la tubería no es lo suficientemente rígida puede ocasionar inestabilidad y se colapse la tubería (Comisión Nacional del Agua, n.d.).
- Fatiga del material. - La acción de cargas dinámicas fuertes durante un periodo disminuye la resistencia del material lo que ocasiona la fatiga del material.

El uso de programas como ALLIEVI permite simular transitorios hidráulicos para imitar el funcionamiento del sistema frente a cualquier maniobra ya sea accidental o programada y comprobar la distribución espacio- temporal de las presiones a lo largo de las conducciones con el fin de prever las acciones a realizar en cada maniobra. En el proyecto se analiza la apertura y cierre de una válvula colocada a final de la línea de conducción y se explican a continuación.

### Cierre de una válvula

Si una válvula se cierra rápidamente, se disminuye el flujo a través de la válvula, lo cual hace que se incremente la carga del lado aguas arriba de la válvula, dando inicio a un pulso de alta presión, con lo cual la velocidad del flujo disminuye. La presión aguas abajo de la válvula se reduce y la onda de presión disminuida viaja en el sentido del escurrimiento, disminuyéndose la velocidad del flujo (Streeter & Wylie, 1988).

Si el cierre de la válvula es suficientemente rápido y si la presión permanente original es suficientemente baja, podría formarse una bolsa de vapor de aguas abajo de la válvula, con lo cual la cavidad de vapor puede reducirse y producir una onda de alta presión que se propaga aguas abajo. La siguiente gráfica muestra la secuencia de eventos que se presentan cuando se cierra bruscamente una válvula al final de una tubería.

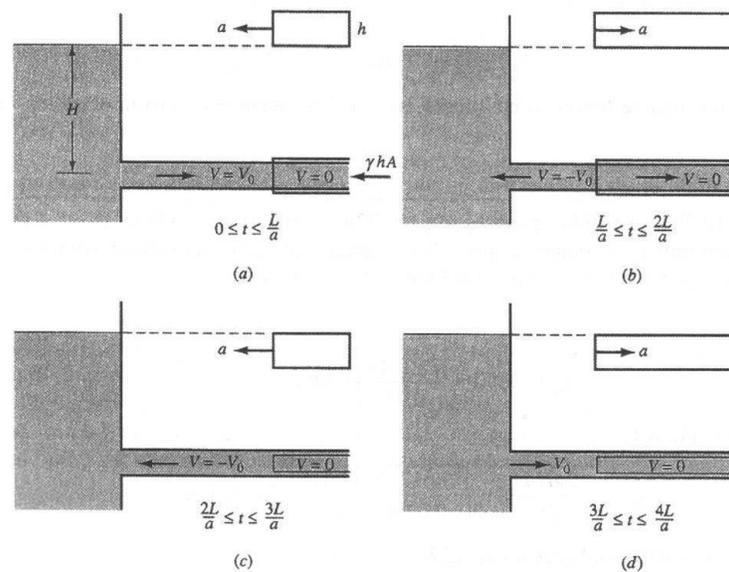


Ilustración 5 Secuencia de eventos para un ciclo del cierre súbito de una válvula Fuente: (Streeter & Wylie, 1988).

En el momento en el que se cierra una válvula ( $t=0$ ), el líquido más cercano a ella se comprime al mismo tiempo que su movimiento se reduce a cero y las paredes del conducto sufren una expansión.

Luego de que se comprime la primera capa, el proceso se repite con la siguiente capa. El líquido en las partes más alejadas aguas arriba de la válvula continúa moviéndose sin que se vea afectada su velocidad hasta que alcance la compresión del líquido que continúa llegando.



La presión que se desarrolla se mueve en dirección aguas arriba como una onda, deteniendo al fluido hasta lograr su reposo (Streeter & Wylie, 1988).

Cuando la onda alcanza el extremo aguas arriba ( $t=L/a$ ) el líquido se encuentra bajo una carga  $h$  y la cantidad de movimiento se ha perdido. En el tiempo " $2L/a$ " la onda ha viajado hasta la válvula y la presión ha vuelto a su valor normal con una velocidad  $V_0$  en todo el conducto en dirección hacia el tanque.

Al permanecer la válvula cerrada no se dispone de líquido que mantenga el escurrimiento a través de ella y por ello se origina una presión negativa ( $-h$ ) hasta que el fluido se frena y queda en reposo. Esta onda de presión baja se propaga en dirección aguas arriba a una velocidad " $a$ ", haciendo que el fluido alcance el reposo.

En el instante " $3L/a$ " después del cierre de la válvula, donde la onda de presión negativa llega al extremo superior de la tubería, el fluido continúa en reposo, sin embargo, a una carga menor que la carga antes del cierre. Se tiene un desbalance ocasionando que la tubería y el líquido regresen a las condiciones normales mientras la onda viaja con velocidad " $a$ ", hacia la válvula.

En el instante en que la onda llega a la válvula, las condiciones vuelven a ser las mismas de las que se tenían en el momento del cierre de la válvula. Este procedimiento se repite cada  $4L/a$  segundos. Si el cierre de la válvula se da en un tiempo menor a  $2L/a$  segundos se considera un cierre rápido, mientras que si se ocasiona en un tiempo mayor se conoce como cierre lento.

### Apertura de una válvula al final de la conducción

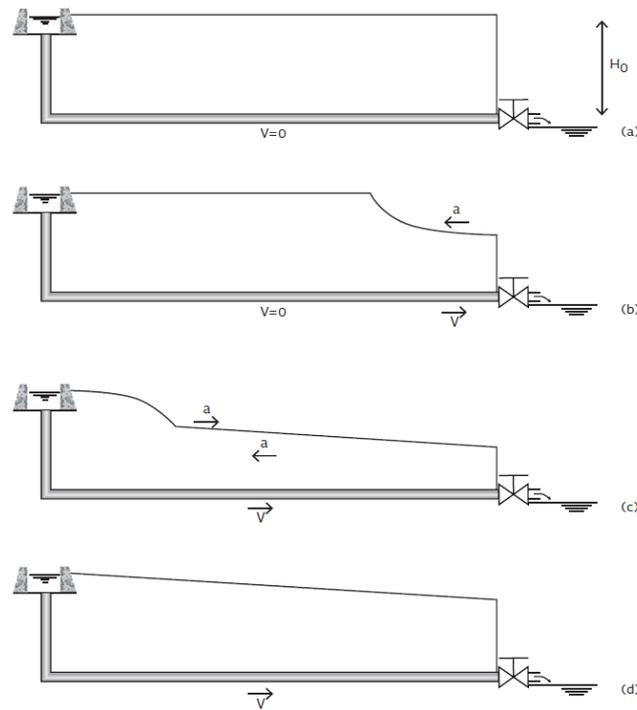


Ilustración 6 Secuencia de apertura de una válvula al final de la conducción Fuente: (Comisión Nacional del Agua, n.d.).

En la Ilustración 6 (literal a) se indica las condiciones iniciales del transitorio, la válvula está cerrada, con una velocidad en la tubería de cero y con presión hidrostática en la tubería.

Según la Comisión Nacional de Agua, al momento que se abre la válvula se empieza a descargar el caudal al final de la tubería; el cual genera depresiones tal como se muestra en la parte b de la ilustración. Luego se reflejan en una onda que tiende a restaurar la carga inicial, como muestra la parte c de la ilustración. Después del instante  $2L/a$ , las ondas que se reflejan desde el tanque llegan a la tubería y neutralizan las depresiones. Cuando el caudal deja de incrementarse, las ondas aumentan la presión hasta un valor que corresponde a un flujo permanente, como indica la parte d de la figura (Comisión Nacional del Agua, n.d.).

Según la Comisión Nacional del Agua, en el Manual de Fenómenos Transitorios en Líneas de Conducción, los transitorios pueden causar problemas tales como el golpe de Ariete.



### 2.3.3. Golpe de Ariete y efectos en sistemas de conducción:

Este fenómeno se puede generar en una tubería cuando se da un frenado o una aceleración en el flujo, como la apertura o cierre de una válvula. (Streeter & Wylie, 1988). Este fenómeno se conoce como “pulso de agua” o “pulso de Joukowski”; se produce por las rápidas fluctuaciones de flujo, o como una respuesta a la variación brusca de velocidad del fluido (Plana Navarro., 2019).

Según Pérez y Guitelman, 2005, se define golpe de ariete a la oscilación de presión por encima o debajo de la normal a raíz de las rápidas fluctuaciones de la velocidad del escurrimiento. Para el estudio del golpe de ariete es necesario detallar ciertos criterios de importancia para su comprensión como son:

#### Velocidad de la onda de presión:

Cuando existe un cambio repentino en las condiciones de flujo en un punto de una tubería a presión, este se propaga con una velocidad la cual depende de la elasticidad del fluido y de la pared de la tubería (Comisión Nacional del Agua, n.d.). Allievi propone una expresión para la velocidad de propagación cuando el fluido es agua (Toledo L., 2009).

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + k \times \frac{D}{e}}}$$

Ecuación 6 Velocidad de propagación Allievi

Donde:

$D$  = diámetro interior de la tubería (m)

$e$  = espesor de la tubería (m)

$k$  = coeficiente que toma en cuenta los módulos de elasticidad

$$k = \frac{10^{10}}{E}$$

Ecuación 7 Coeficiente que toma en cuenta los módulos de elasticidad

$E$  = Módulo de elasticidad del material



La siguiente tabla contiene los valores de módulos de elasticidad con el valor correspondiente de  $k$  para diferentes materiales:

Tabla 4: Valores de  $k$  para hallar la celeridad con la expresión de Allievi.

Material	E	k
Hierro y acero	$2 \times 10^{10}$	0.5
Fierro fundido	$1 \times 10^{10}$	1
Concreto	$2 \times 10^9$	5
Fibro cemento	$1.85 \times 10^9$	5.5 (5-6)
PVC	$3 \times 10^8$	33.3 (20-50)

### Periodo de la tubería:

Según Toledo L., 2009, el periodo de la tubería corresponde al tiempo de duración de la onda de sobrepresión en ir y regresar entre la válvula de cierre y el tanque de carga. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2L}{a}$$

Ecuación 8 Periodo de la tubería

Donde:

$T$  = periodo de la tubería o tiempo máximo de reflexión de la onda de sobrepresión

$L$  = longitud de la tubería

$a$  = celeridad o velocidad de propagación

### Tiempo de cierre

La sobrepresión que se genera depende del tiempo de cierre, el cierre puede ser rápido ( $0 < t_c < 2t_o$ ), en este caso la onda de presión no alcanza a ir al estanque, reflejarse y volver a la válvula, antes de que termine medio ciclo. Luego de este tiempo, los rebotes en forma de depresión hacen que el aumento de presión no sea tan notable. Y cierre lento ( $t_c > 2t_o$ ), en el que la presión máxima es menor que el caso anterior, este caso es más común en la práctica.



Conocido el valor de tiempo de cierre  $t_c$  y el caso en que se encuentra el sistema (cierre lento o cierre rápido), para calcular el golpe de ariete se tienen las siguientes ecuaciones:

### **Sobrepresión en cierre instantáneo total de la válvula**

Se sabe que la sobrepresión sucede cuando la maniobra es rápida, la sobrepresión máxima en el extremo de la línea se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \rho \times a \times v$$

Ecuación 9 Sobrepresión máxima

Donde:

$\Delta P$  = sobrepresión (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = densidad del líquido (Kg/m<sup>3</sup>)

$a$  = celeridad de la onda elástica del fluido en la tubería (m/s)

$v$  = velocidad del líquido

El aumento de presión en metros columna de agua se calcula con la expresión de Allievi, con la cual se calcula el valor máximo del golpe de ariete que se puede producir en una conducción.

$$\Delta H = \frac{a}{g} \times \Delta v$$

Ecuación 10 Sobrepresión por golpe de ariete

Donde:

$\Delta H$  = sobrepresión debida al golpe de ariete (m)

$g$  = aceleración de la gravedad (9.80 m/s<sup>2</sup>)

Se observa que la sobrepresión es independiente de la longitud de la tubería.

### **Longitud crítica**

Si se representa gráficamente las ecuaciones de Allievi y de Michaud, se observa que, si la línea de conducción es lo suficientemente larga, las rectas se intersectan en un punto denominado punto crítico (EUITACR, n.d.). En la expresión de Michaud la longitud del

tramo se conoce como longitud crítica y se obtiene igualando las expresiones de Allievi y Michaud.

$$\frac{2 \times Lc \times v}{g \times Tc} = \frac{a \times v}{g}$$

$$Lc = \frac{a \times Tc}{2}$$

Ecuación 11 Longitud crítica

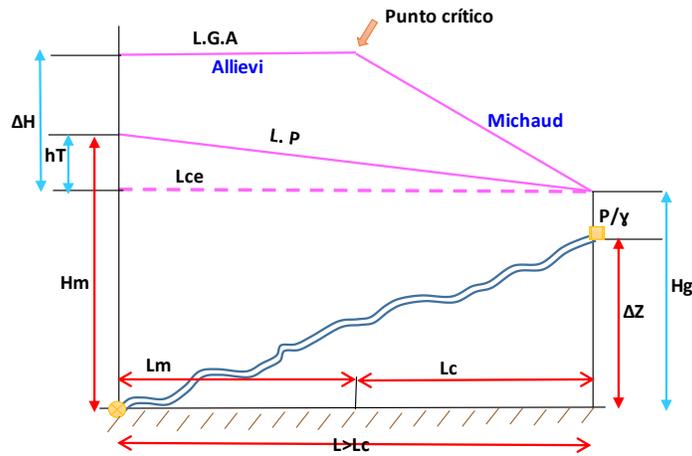


Ilustración 7: Detalle de longitud crítica Fuente: (EUITACR, n.d.). Elaboración: Autoras

Si  $L < L_c$ , se trata de una impulsión o conducción corta, el cual corresponde a un cierre lento, y se calcula el golpe de ariete mediante la expresión de Michaud.

Si  $L > L_c$ , se trata de una impulsión o conducción larga con cierre rápido, donde el golpe de ariete desde la válvula hasta el punto crítico se calcula por la expresión de Allievi, y el resto por Michaud. (EUITACR, n.d.)

Tabla 5 Longitud crítica Fuente:(EUITACR, n.d.). Elaboración: Autoras

$L < L_c$	Impulsión corta	$T > \frac{2L}{a}$	Cierre lento	Michaud	$\Delta h = \pm \frac{2Lv}{gT}$
$L > L_c$	Impulsión larga	$T < \frac{2L}{a}$	Cierre rápido	Allievi	$\Delta h = \pm \frac{av}{g}$



En general el fenómeno ocurre cuando en una tubería se producen variaciones de velocidad y presión. Según (Pérez & Guitelman, 2005), existen diversas maniobras donde se puede producir el fenómeno, entre ellas se el cierre y apertura de válvulas que se profundizan más adelante en el presente estudio.

Toledo, (2009) indica que para reducir el golpe de ariete se puede actuar directamente sobre la fuente que produce la perturbación, lo cual no siempre se puede realizar o disminuir sus efectos una vez que esta se ha producido. Al ser la línea de conducción de Sinincay relativamente pequeña y de operación manual, resultan viables y suficientes los siguientes sistemas de control de golpe de Ariete.

#### **Sistemas de control de golpe de Ariete.**

##### **- Válvulas reductoras de presión**

Son dispositivos que producen en su interior una pérdida de carga constante independientemente del caudal y la presión de entrada. Pueden ser instaladas en líneas de conducción sin inconveniente, ya que no existen limitaciones de presiones de servicio como en el caso de las tuberías de distribución.

La graduación de la válvula puede ser realizada experimentalmente. La reducción de la presión representa una pérdida de energía, la cual es absorbida por la turbulencia ocasionada por el estrangulamiento entre el disco y su asiento (Arocha, 1979).

##### **- Válvulas reguladoras de presión**

Se usan para mantener una presión constante en la descarga independientemente del caudal o presión de entrada. Las válvulas reguladoras de presión son más útiles en redes de distribución que en líneas de conducción.

##### **- Limitar la velocidad de diseño.**

La velocidad de diseño del fluido para sistemas en operación no debe ser mayor a 1.5 m/s para sistemas de riego y distribución de agua potable. Durante el llenado de la tubería, la velocidad no debe ser mayor a 0.3 m/s hasta que todo el aire salga y la presión alcance su valor nominal. Otra forma de reducir el efecto del golpe de ariete, puede ser fabricando tubos con mayor espesor, teniendo en cuenta las sobrepresiones admitidas, así como hacer cierres lentos en válvulas mediante la colocación de volantes de gran diámetro (Toledo L., 2009).



## 2.4 DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA PERIODO DE ANÁLISIS

Debido a la importancia del abastecimiento de agua en la actualidad como en el futuro se establecen criterios para el estudio de la línea de conducción de Sinincay dentro de un periodo de tiempo.

### 2.4.1 Periodo de análisis

En base a la “Norma para Estudio y Diseño de Sistemas de Agua Potable y Disposición de Aguas Residuales para Poblaciones Mayores a 1000 habitantes” (SENAGUA, 2016) para conducciones de asbesto cemento o PVC se indica un periodo de diseño entre 20 – 30 años, por lo que se ha escogido un periodo de análisis de 25 años (año 2046) para la línea de conducción de Sinincay.

### 2.4.2 Dotación

La dotación hace referencia al caudal de agua potable consumido diariamente, en promedio, por cada habitante (SENAGUA, 2016). Para la línea de conducción en base a la población y el clima de la zona se tiene:

Tabla 6: Tabla de dotaciones. Fuente: (SENAGUA, 2016) Elaboración: Autoras

POBLACIÓN	CLIMA	DOTACIÓN MEDIA FUTURA
habitantes		l/hab/día
5000 a 50000	Templado	190-220

Se toma un promedio de los límites del rango que indica la normativa, obteniendo una dotación media de 205 l/hab/día.

### 2.4.3 Nivel de servicio

Según la (SENAGUA, 2016) indica los distintos niveles de servicio para diferentes sistemas de abastecimiento de agua, para el estudio se toma un nivel IIb.

Tabla 7 Niveles de servicio para sistemas de abastecimiento de agua, disposición de excretas y residuos líquidos Fuente: (SENAGUA, 2016). Elaboración: Autoras

NIVEL	SISTEMA	DESCRIPCIÓN
IIb	Agua Potable	Conexiones domiciliarias, con más de un grifo por casa
	Eliminación de residuos líquidos	Sistema de alcantarillado sanitario



### Porcentaje de fugas

Según la normativa CO 10.7 602 el porcentaje de fugas se toma de la siguiente tabla según el nivel de servicio del sistema:

Tabla 8 Porcentaje de fugas a considerarse en el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable.

Fuente:(SENAGUA, 2016). Elaboración: Autoras

Nivel de Servicio	Porcentaje de Fugas
Ia y Ib	20

### 2.4.4 Caudal de diseño

El caudal de diseño representa el necesario para satisfacer la demanda de la población al final del periodo de diseño.

#### Caudal medio diario

El caudal medio se calcula con la siguiente expresión:

$$Qmd = f \times \frac{P \times D}{86400}$$

Ecuación 12 Caudal medio diario

Donde:

$Qm$ : Caudal medio diario (l/s)

$f$ :factor de fugas

$P$ :población al final del periodo de diseño

$D$ :dotación futura (l/hab/día)

#### Caudal máximo diario

El cálculo de este valor se calcula con la ecuación:

$$QMD = KMD \times Qmd$$

Ecuación 13 Caudal máximo diario

Donde:

$QMD$ : Caudal máximo diario (l/s)



*KMD*:Factor de mayoración máximo diario.

El factor de mayoración máximo diario tiene un valor de 1.25 para cualquier nivel de servicio.  
(SENAGUA, 2016)

### **Caudal máximo horario**

El caudal máximo horario se calcula con la siguiente expresión:

$$QMH = KMH \times Qmd$$

Ecuación 14 Caudal  
máximo horario

Donde:

*QMH*: Caudal máximo horario (l/s)

*KMH*:Factor de mayoración máximo horario

El factor de mayoración máximo diario tiene un valor de 3 para cualquier nivel de servicio  
(SENAGUA, 2016).

### **Caudal de captación**

La capacidad de la captación debe ser tal que permita derivar el sistema de agua potable un caudal mínimo a 1.2 veces el caudal máximo diario en el final del periodo de diseño  
(SENAGUA, 2016).

### **Caudal de conducción**

Cuando el sistema no tiene bombeo como es el caso de la línea de conducción de Sinincay, el caudal de diseño de la conducción es 1.1 veces el caudal máximo diario calculado al final del periodo de diseño (SENAGUA, 2016).

## **2.4.5 Velocidad**

### **Velocidad mínima**

La velocidad mínima no debe producir depósitos ni erosiones, en ningún caso será menor de 0,60 m/s (Norma OS.010., 2006).

## Velocidad máxima

Según la (Norma CO 10.07 - 601, 2010) Para conductos a presión de PVC se consideran aceptables los límites de velocidades máximas indicados en la tabla:

Tabla 9: Límites máximos de velocidad en conductos a presión. Obtenido de: (Norma CO 10.07 - 601, 2010).

Material de las paredes	Velocidad máximos (m/s)
Plástico PVC	4.5

## 2.5 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 2.5.1 Ubicación

La parroquia de Sinincay se localiza en el Cantón Cuenca, en la provincia del Azuay, con una latitud de  $-2.83333$  y longitud  $-79^{\circ}$ ; al estar cerca del centro de la ciudad gran parte de su extensión es área de expansión urbana (Pakariñan, 2015).

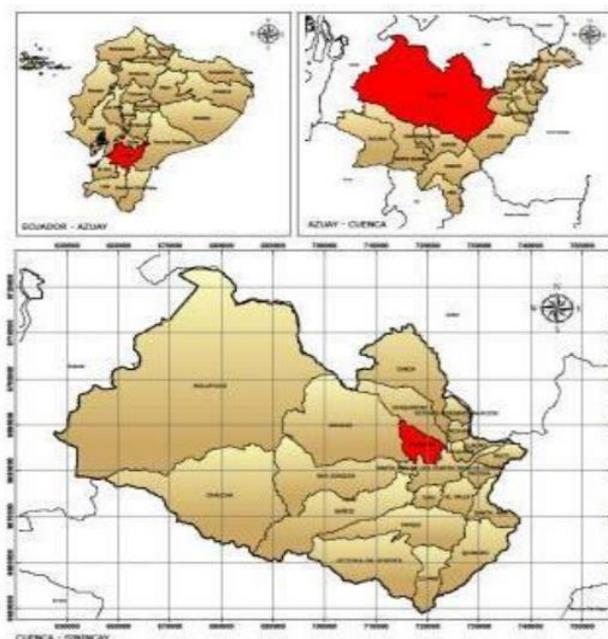


Ilustración 8: Ubicación geográfica de la parroquia de Sinincay. Fuente: (Pakariñan, 2015).

La parroquia de Sinincay se encuentra limitada al norte por la parroquia de Chiquintad, al Sur con parroquias urbanas como Bellavista y El Vecino de la ciudad de Cuenca, al Este limita con la parroquia urbana Hermano Miguel y al Oeste con la parroquia de Sayausí.

## 2.5.2 Clima

En base al PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015) indica que se encontró dos pisos climáticos en la parroquia de Sinincay, los cuales se muestran en la Ilustración 9.

- Frío Andino: Se presenta en el noroeste de la parroquia en zonas desde los 3200 hasta los 4700 msnm, su temperatura varía entre  $1^{\circ}\text{C}$  y  $10^{\circ}\text{C}$ . Se dan altas precipitaciones.
- Templado interandino: Predomina en las zonas donde hay asentamientos de población, desde los 2500 hasta los 3200 msnm.

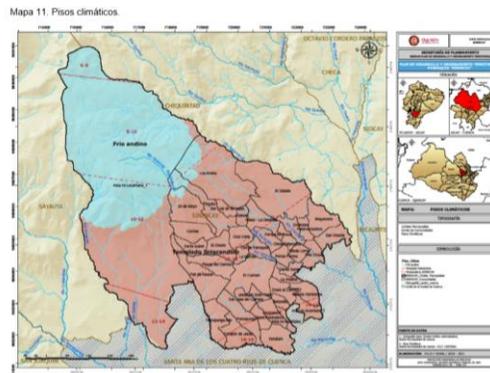


Ilustración 9 Pisos climáticos en la parroquia de Sinincay. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015).

## 2.5.3 Topografía y relieve

El relieve hace referencia al factor modificador del clima de mayor importancia. Los tipos climáticos están relacionados con la altitud relativa, determinada por el relieve.

### Geomorfología

En el Ecuador el mayor rasgo de relieve representa la presencia de la Cordillera de los Andes en la parte central del país, atravesando de norte a sur.

En el cantón Cuenca existe una gran cantidad de relieves, cuyo origen está relacionado con procesos tectónicos como las condiciones morfo climáticas, morfo dinámicas, volcanismos, etc. La geomorfología del sector de Sinincay muestra un relieve escarpado y vertientes cóncavas que ocupan la mayor parte del territorio (Pakariñan, 2015).

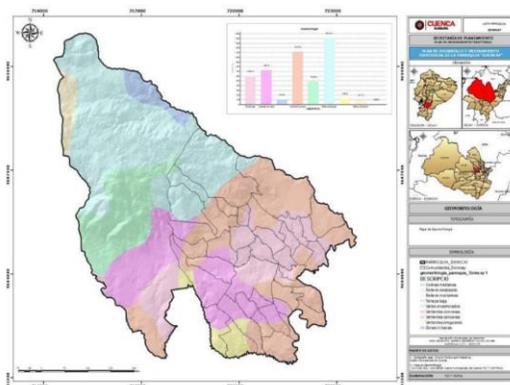


Ilustración 10: Relieve de la parroquia Sinincay. Fuente: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015).

## 2.6 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN Y SUS ELEMENTOS.

### 2.6.1 Catastro de la línea de conducción de Sinincay

La línea de conducción de Sinincay al haber sido construida hace más de 25 años, la Junta de Agua Potable de la parroquia, que es el organismo encargado de su control, no cuenta con información actualizada. En vista de esto, se procedió a realizar varias actividades para recopilar información detallada y necesaria para que el modelo hidráulico se ajuste de forma más cercana a la realidad. Estas actividades se describen a continuación según el tipo de información obtenida:

#### Información topográfica

Se realizaron varias visitas de campo con el fin de identificar y reconocer las condiciones de la línea de conducción, las estructuras hidráulicas que la componen, su funcionamiento, identificar problemas, etc.

Para obtener esta información se realizó un levantamiento topográfico de aproximadamente 600 m de longitud, partiendo desde la captación El Salado, del río Patamarca hasta la planta de tratamiento de Agua Potable.

De manera inicial se obtuvieron varios puntos mediante el uso de GPS diferencial en algunos tramos de la línea de conducción con una duración de 15 minutos por punto, sin embargo, al analizar los resultados se verificó que no eran datos óptimos por el margen de error obtenido

en el momento del levantamiento, ya que no existía la señal adecuada por lo que se captaban pocos satélites.

Debido a esto, se procedió a realizar el levantamiento con la estación total, realizando varios cambios de estación hasta completar la franja de la línea de conducción. De cada punto se obtiene las coordenadas en X, Y y las cotas respectivas.

A continuación, se muestran varias imágenes del proceso de recopilación de información topográfica.

#### **Obtención de puntos con GPS diferencial**



*Ilustración 11: Obtención de puntos con GPS Diferencial*



*Ilustración 12: Obtención de puntos en la clave de tubería*

#### **Obtención de puntos con estación total**

El procedimiento se da inicio con el levantamiento de la captación



Se tomaron puntos de cada lado de la captación, así como las esquinas, anchos y los lados de la compuerta.

Las siguientes imágenes indican la rejilla de la captación, donde se visualiza la acumulación de residuos.



Las siguientes ilustraciones muestran los tramos de tuberías posteriores a la captación.



*Ilustración 15: Tramo de la línea de conducción.*



*Ilustración 16: Rotura de tuberías en la línea de conducción de Sinincay.*

En las imágenes anteriores se observa las roturas de tuberías que existen al inicio de la conducción, lo que ocasiona pérdidas de caudal y parámetros hidráulicos en la línea

Luego de este tramo se encuentra el desripador del sistema, las siguientes imágenes muestran esta estructura hidráulica.



*Ilustración 17: Desripiador de la línea de conducción del Sistema de Agua Potable de Sinincay.*

Cabe recalcar que la compuerta de este sistema no se encuentra en funcionamiento.

La estructura actúa como una cámara rompe presiones, es por esto que para el análisis de las condiciones hidráulicas, se considera que desde este punto parte la línea de conducción a presión.

A continuación, se muestra fotografías de tramos de la línea de conducción que continúan luego del desripiador.



*Ilustración 18: Anclajes de la línea de conducción.*

*Ilustración 19: Rotura de tuberías.*



*Ilustración 20: Línea de conducción de agua potable*



*Ilustración 21: Uniones de tuberías. Línea de conducción*

En las imágenes se pueden observar los anclajes, los cuales deberían estar contruidos con hormigón armado, sin embargo a pesar de las condiciones aún sostienen a la tubería.

A continuación las fotografías indican la llegada de la línea de conducción a la Planta de Tratamiento de Agua Potable con un codo alargado.



*Ilustración 22: Llegada de la línea de conducción a la planta. Con accesorio de codo alargado.*



Cabe mencionar que gran parte de puntos fueron tomados en el camino, porque varios tramos de la línea de conducción siguen su curso por este.



A continuación se muestra la leyenda de las tuberías que componen la línea de conducción



Ilustración 25: Leyenda de la tubería.

<b>Marca:</b>	Plastigama
<b>Material:</b>	PVC
<b>Diámetro:</b>	(200x7.7) mm
<b>Presión:</b>	1 MPa

Tabla 10: Descripción de la tubería de la línea de conducción

Además, se obtuvo información topográfica del borde y el centro del río en algunos tramos.



Ilustración 26: Toma de puntos en el centro y borde del río.

Posteriormente se realizó el procesamiento de datos obteniendo como resultado el siguiente levantamiento topográfico:



*Ilustración 27 Levantamiento topográfico final de la línea de conducción Elaboración: Autoras*

La tabla de información topográfica se encuentra adjunta en Anexos.

### **2.6.2 Recopilación de información hidráulica de la línea de conducción de Sinincay. Parámetros actuales de servicio.**

Según entrevista verbal al operador de la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Sinincay desde hace aproximadamente 10 años, el caudal que se está captando en la actualidad corresponde aproximadamente a 60 l/s. Debido a roturas en las tuberías y fugas, se dan pérdidas de caudal, por lo que al desripiador llega un caudal de 50 l/s, el cual correspondería al caudal actual real de la línea de conducción en las condiciones más favorables. Además, el operador mencionó que de los 50 l/s que llegaría de la conducción (sin considerar las pérdidas), 35 l/s son ingresados a la Planta de Tratamiento y el resto (15 l/s) es desviado hacia el río, debido a la capacidad de la planta.



## Población servida

Para la determinación de la población actual servida la Junta Administradora de Agua Potable de la parroquia facilitó el catastro de medidores del sistema, y suponiendo que existe 1 medidor por vivienda, se obtiene la siguiente información.

Tabla 11: Número de medidores por vivienda Fuente. Junta Administradora de Agua Potable

Sector	N° Medidores (vivienda)
Aliso	82
Chamana	77
Chico Patamarca	145
El Salado	554
Victoria Calzada	90
Mayancela	158
Pampa de Rosas	172
Patamarca Chico	96
Perlaspamba	130
Rosas Loma	150
Centro Parroquial	401
Cruz Calle	78
Galuy	38
Dolorosa	158
Daniel Duran	104
Victoria Hermano Miguel	75
Victoria El Tablón	22
<b>TOTAL</b>	<b>2530</b>

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial se obtiene un número promedio de habitantes por vivienda.

Tabla 12 Número promedio de habitantes por vivienda Fuente: Instituto Nacional de Estadísticas y Censos INEC-Censo 2010. Recuperado de: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015). Elaboración: Autoras

Personas por Hogar	Casos	%
2	662	16.2
3	751	18.3
4	855	20.9

Realizando un promedio ponderado para obtener una densidad por vivienda se obtiene:

Tabla 13: Densidad ponderada. Elaboración: Autoras

<b>Densidad ponderada</b>	<b>3,84</b>	<b>hab/vivienda</b>
---------------------------	-------------	---------------------

Dato utilizado para obtener la población servida actualmente:



Tabla 14: Cálculo de población actual. Elaboración: Autoras

Sector	N° Medidores (vivienda)	Densidad (hab/vivienda)	Población (hab)
Aliso	82	3,84	316
Chamana	77	3,84	296
Chico Patamarca	145	3,84	558
El Salado	554	3,84	2129
Victoria Calzada	90	3,84	346
Mayancela	158	3,84	608
Pampa de Rosas	172	3,84	661
Patamarca Chico	96	3,84	369
Perlaspamba	130	3,84	500
Rosas Loma	150	3,84	577
Centro Parroquial	401	3,84	1541
Cruz Calle	78	3,84	300
Galuy	38	3,84	146
Dolorosa	158	3,84	608
Daniel Duran	104	3,84	400
Victoria Hermano Miguel	75	3,84	289
Victoria El Tablón	22	3,84	85
<b>TOTAL</b>	<b>2530</b>	<b>TOTAL</b>	<b>9729</b>

### Caudal requerido de servicio

Respecto a la población actual servida y a la dotación, se tiene la demanda que el sistema debería estar transportando actualmente. Tomando un porcentaje de fugas del 20%, se tiene la siguiente demanda

Tabla 15: Cálculo de caudales de servicio requeridos en la actualidad para el abastecimiento de agua potable en la parroquia Sinincay. Elaboración: Autoras

<b>Dotación</b>	205	l/hab/día
<b>Porcentaje de fugas</b>	20	%
<b>Qmd=</b>	27,70	l/s
<b>Q.M.D. =</b>	36,01	l/s
<b>Q.M.H. =</b>	55,40	l/s
<b>Q. Captación=</b>	43,21	l/s
<b>Q. Conducción=</b>	39,61	l/s



### 2.6.3 Cálculo de parámetros para un periodo de análisis de 25 años.

Respecto a la población proyectada y a la dotación, se tiene la demanda que el sistema debería estar transportando actualmente. Tomando un porcentaje de fugas del 20%, se tiene la siguiente demanda

#### Tasa de crecimiento

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia Sinincay establece en base a los censos realizados por el INEC, dos tasas de crecimiento.

Tabla 16: Tasa de crecimiento para los periodos 1990-2001 y 2001-2010. Obtenido de: PDOT Sinincay (Pakariñan, 2015).  
Elaboración: Autoras

Periodo	Tasa de crecimiento
1990-2001	-1.59%
2001-2010	2.51%

Para el presente estudio se considera únicamente la tasa de crecimiento positiva, correspondiente al periodo 2001-2010, porque representa un comportamiento poblacional más real.

#### Población proyectada

Se calcula la población para el año 2046 mediante el promedio de las estimaciones con 3 métodos: aritmético, geométrico y exponencial.

Tabla 17: Población actual de servicio del sistema de agua potable de Sinincay y tasa de crecimiento.

Año actual	Población	Tasa de crecimiento anual	
2021	9729	r	2,51%

#### - Método aritmético

$$Pf = Po + r(tf - to)$$

Ecuación 15 Población futura.

Método aritmético



- **Método geométrico**

$$Pf = Pa * (1 + r)^{(tf-to)}$$

Ecuación 16 Población futura.  
Método geométrico

- **Método exponencial**

$$Pf = Pa * e^{r*(tf-to)}$$

Ecuación 17 Población futura.  
Método exponencial

Donde:

$Pf$  = Población futura

$Po$  = Población actual

$r$  =Tasa de crecimiento

$tf$  = Año proyectado

$to$  =Año actual

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 18: Proyección poblacional al año 2046 de la parroquia Sinincay, calculado mediante el método aritmético, geométrico, exponencial y el promedio de los mismos.

Año	Método Aritmético	Método Geométrico	Método Exponencial	Promedio
0	0	0	0	0
2021	9729	9729	9.729	9729
2022	9973	9973	9.976	9974
2023	10217	10224	10.230	10224
2024	10462	10480	10.490	10477
2025	10706	10743	10.757	10735
2026	10950	11013	11.030	10998
2027	11194	11289	11.310	11264
2028	11438	11573	11.598	11536
2029	11683	11863	11.893	11813
2030	11927	12161	12.195	12094
2031	12171	12466	12.505	12381
2032	12415	12779	12.823	12672
2033	12659	13100	13.149	12969
2034	12904	13429	13.483	13272
2035	13148	13766	13.825	13580
2036	13392	14111	14.177	13893
2037	13636	14465	14.537	14213

<b>2038</b>	13880	14828	14.907	14538
<b>2039</b>	14125	15201	15.286	14871
<b>2040</b>	14369	15582	15.674	15208
<b>2041</b>	14613	15973	16.073	15553
<b>2042</b>	14857	16374	16.481	15904
<b>2043</b>	15101	16785	16.900	16262
<b>2044</b>	15346	17206	17.330	16627
<b>2045</b>	15590	17638	17.770	16999
<b>2046</b>	15834	18081	18.222	17379

En la siguiente gráfica se presenta los resultados de las proyecciones realizadas.

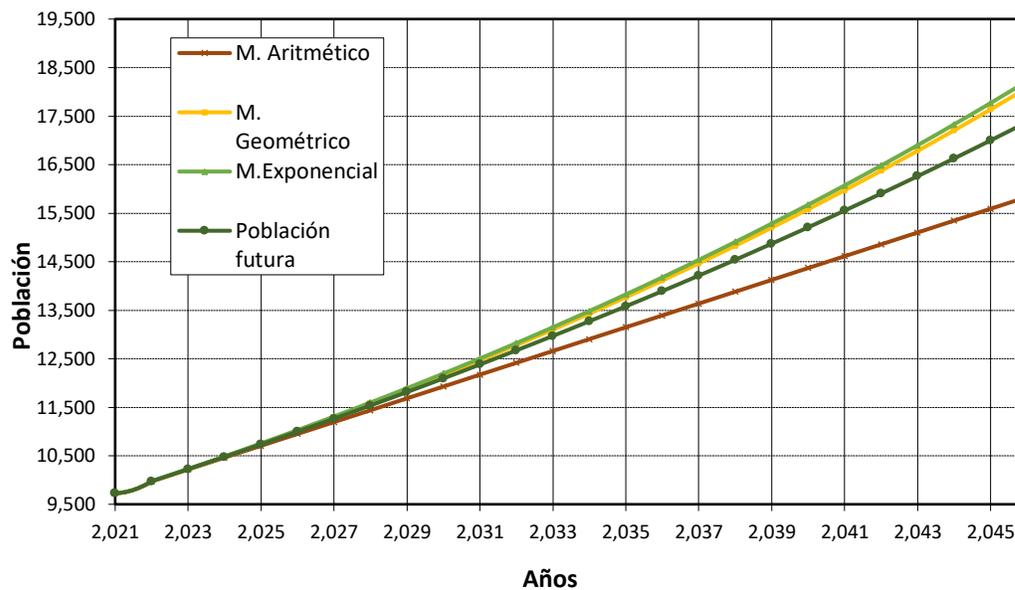


Figura 1: Proyección poblacional mediante el método aritmético, geométrico, exponencial y el promedio de los mismos.

La población de diseño proyectada al año 2046 corresponde a 17379 habitantes.

### Caudal requerido para un periodo de análisis de 25 años

Respecto a la población estimada y a la dotación, se tiene la demanda del sistema en un periodo de 25 años. Tomando un porcentaje de fugas del 20%, se tiene la siguiente demanda

<b>Dotación</b>	205	l/hab/día
<b>Porcentaje de fugas</b>	20	%
<b>Población futura</b>	17379	hab
<b>Q.m.d. =</b>	49.48	l/s
<b>Q.M.D. =</b>	61.85	l/s
<b>Q.M.H. =</b>	148.44	l/s
<b>Q. Captación=</b>	74.22	l/s
<b>Q. Conducción=</b>	68.04	l/s



## 2.7 MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación matemática de sistemas hidráulicos permite simular su funcionamiento, velocidad de flujo, pérdidas unitarias y presiones en distintos escenarios tanto en régimen permanente como transitorio y promueven una mejora en el rendimiento del diseño y eficacia en el suministro de agua, es necesario considerar las simplificaciones e hipótesis realizadas para confeccionar el modelo. En los modelos empleados, las ecuaciones hidráulicas son conocidas y describen los principales parámetros hidráulicos como caudal, velocidad y presión de flujo. El éxito del modelo respecto a su eficiencia depende directamente de un análisis implícito de sensibilidad de los parámetros de entrada usados para generar el modelo (Chuquín et al., 2018).

En conductos a presión es común aplicar modelos de flujo unidimensional, cuya complejidad está directamente relacionada con la importancia de la variable tiempo. El modelo más simple (régimen permanente) no considera la variable tiempo y se basa en la ecuación de energía. El modelo más complejo es el modelo elástico, que considera el golpe de Ariete, planteado a partir de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento y de la ecuación de la conservación de masa. Este modelo se utiliza siempre que las variables evolucionen rápidamente con el tiempo, como una maniobra brusca de una válvula, una rotura en una tubería de la conducción, o una parada o arranque repentino del sistema de bombeo (Bartolin et al., 2006).

### 2.7.1 Construcción del modelo hidráulico en EPANET

EPANET es un programa computacional orientado al análisis del comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en redes de suministro a presión (Rossman, 2017). El programa permite realizar un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los depósitos a lo largo del periodo de simulación en estado estacionario como en estado dinámico.

La línea de conducción está conformada por dos tramos: el primer tramo conformado desde la captación hasta el desripiador y el segundo desde el desripiador hasta la planta de tratamiento de agua potable. La línea trabaja a presión en ambos tramos, por eso serán simulados con el software EPANET 2.0.

El proceso de modelación hidráulica en el programa está representado en el siguiente diagrama de flujo, de manera que se obtenga una simulación exitosa.



Ilustración 28. Pasos generales para construcción del modelo hidráulico en EPANET 2.0. Fuente: Los autores

Para el ingreso de los datos de la línea de conducción se utiliza el software de acceso libre EpaCAD, el cual permite convertir archivos de Autocad (.dxf) a archivos con extensión “.inp” compatible con EPANET. La mayoría de datos se establecen por defecto del programa, sin embargo, es importante para los resultados la definición de los siguientes parámetros:

Tabla 19: Datos ingresados en el programa EPANET 2.0.

<b>Pérdidas</b>	Darcy Weisbach
<b>Diámetro</b>	184.6 mm
<b>Rugosidad</b>	0.0015

Se colocan estructuras de control que simulan la captación a superficie libre en el río Patamarca sometida a presión atmosférica, el desripiador que contiene un tanque rompe presiones y la planta de tratamiento de agua potable al final de la línea, se simulan colocando embalses en los puntos.

Tabla 20: Información de las estructuras de control (Embalses) colocados en la simulación de la línea de conducción. Georreferenciación y altura total.

EMBALSES – EPANET			
Detalle	X	Y	Z
<b>Embalse 1 - Captación</b>	720025	9687428.54	2876.908
<b>Embalse 2 - Desripiador</b>	720070.71	9687412.3	2874.5
<b>Embalse 3 – Llegada PTAP</b>	720573	9687337.4	2857

A continuación, se muestra el modelo hidráulico realizado en EPANET 2.0 con los nodos a analizar y las estructuras de control establecidas.

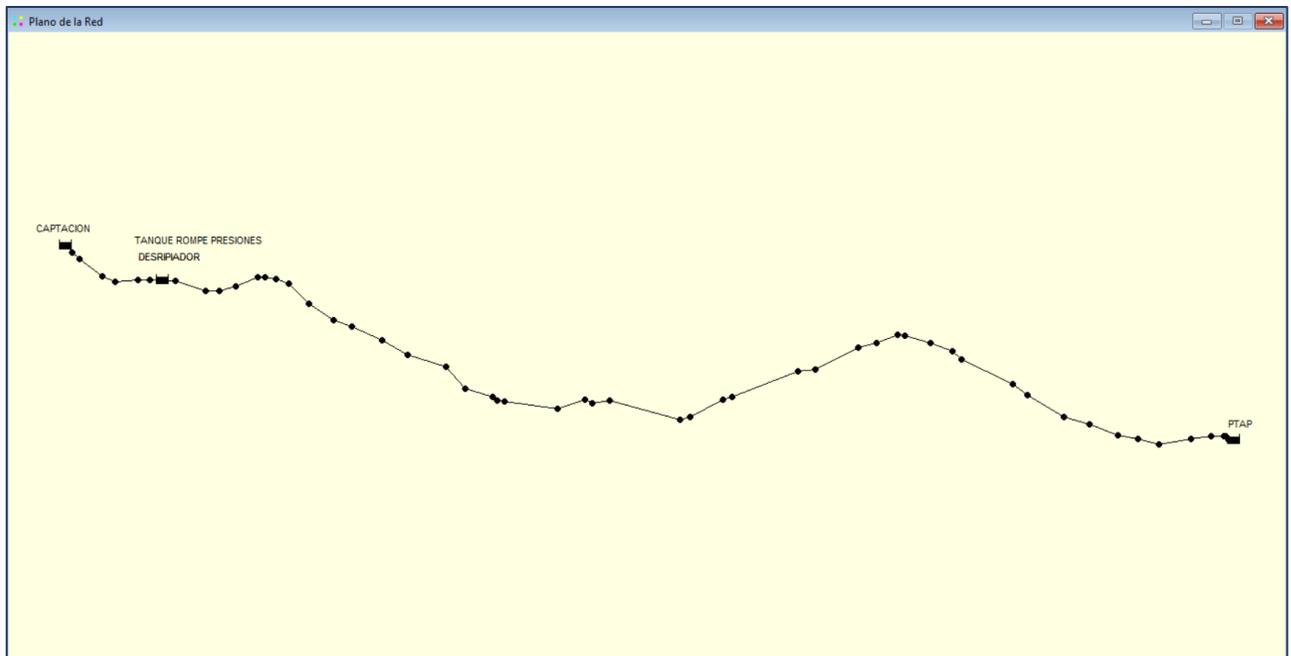


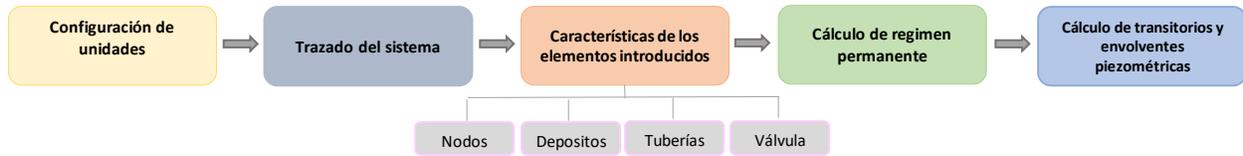
Ilustración 29: Modelo hidráulico de la línea de conducción de Sinincay realizado en EPANET 2.0. Nodos de análisis y estructuras de control. Fuente: Las autoras.

## 2.7.2 Construcción del modelo hidráulico en ALLIEVI.

El programa ALLIEVI permite el análisis y simulación de los transitorios hidráulicos en sistemas de tuberías a presión. Elaborado en el instituto tecnológico del agua de la Universidad Politécnica de Valencia (Bartolin et al., 2006). El programa resuelve las ecuaciones de flujo transitorio aplicando el método de las características a partir de las condiciones de flujo permanente evaluadas por el mismo programa y de las condiciones de contorno que proporcionan diferentes elementos instalados en la red.

Por medio del programa se pueden simular fenómenos transitorios producidos por las maniobras de cierre o apertura de válvulas. El cálculo del régimen permanente a partir del cual se inicia el transitorio, se realiza procesando un transitorio a partir de unas condiciones iniciales cualquiera y supuestos elementos que introducen la perturbación en su posición inicial y sin maniobrar. El régimen permanente se alcanza, cuando no se han detectado grandes variaciones de caudal y altura piezométrica en el sistema durante el cálculo de este transitorio. Los resultados de la simulación se pueden obtener de forma numérica y gráfica.

El proceso de modelación hidráulica en el programa está representado en el siguiente diagrama de flujo, de manera que se obtenga una simulación exitosa tanto para un régimen permanente como análisis de transitorios.



El software contiene elementos característicos que permiten el trazado del modelo, como la inserción de nudos, tuberías y varios elementos hidráulicos.

En este caso se importó a ALLIEVI la red creada para la simulación en EPANET con extensión “.inp”, correspondiente al tramo 2: desde el desripiador hasta la planta de tratamiento de agua potable. Los elementos hidráulicos, como depósitos también se exportan desde EPANET.

Los parámetros introducidos en el software son los siguientes:

**Tubería:** Se introduce variables importantes para el cálculo de los fenómenos transitorios.

El valor de la celeridad puede ser introducido o calculado por el programa, debido a que se usó un tipo de tubería comercial, el cálculo se realizó de manera manual y se introdujo el valor en el software.

Tabla 21 Cálculo de la velocidad de onda. Elaboración: Autoras

Celeridad de onda de presión (a)			
<b>Diametro interior</b>	Di	184.6	mm
<b>Espesor</b>	e	7.7	mm
<b>Parámetro adimensional</b>	Kc	33.33	
<b>Módulo de elasticidad</b>	E	300000000	kg/m <sup>2</sup>
<b>Celeridad de onda de presión</b>	a	340.081	m/s

Tabla 22 Datos de ingreso en el software Allievi para la tubería Elaboración: Autoras

TUBERÍA		
<b>Nodo inicial</b>	2874.5	m
<b>Nodo final</b>	2859.012	m
<b>Diámetro interior</b>	184.4	mm
<b>Longitud</b>	536.44	m



<b>Espesor</b>	7.7	mm
<b>Rugosidad</b>	0.0015	
<b>Celeridad</b>	340.081	m/s

**Nodos:** Se caracterizan los nodos a analizar introduciendo su elevación. El nodo inicio hace referencia a la salida del desripiador, el nodo válvula representa la conexión de la tubería con la válvula y el nodo final representa el fin de la línea de conducción con la llegada a la PTAP.

Tabla 23 Datos de ingreso en el software Allievi para nodos Elaboración: Autoras

<b>NODO</b>	<b>COTA</b>	
<b>Nodo Inicio</b>	2874,5	m
<b>Nodo válvula</b>	2859,012	m
<b>Nodo final</b>	2859,012	m

**Depósitos:** Se seleccionó depósitos de grandes dimensiones con sección constante y sus respectivas cotas de la solera y del nivel de agua. El primer deposito representa el desripiador y el segundo la PTAP.

Tabla 24 Datos de ingreso en el software Allievi para depósitos Elaboración: Autoras

<b>DEPÓSITO</b>	<b>COTA SOLERA (m)</b>	<b>COTA NIVEL DEL AGUA (m)</b>
<b>Desripiador</b>	2874,5	2875,9
<b>PTAP</b>	2859,012	2859,25

**Válvulas:** Se utiliza una válvula de compuerta con el mismo diámetro nominal de la tubería de conducción. Se considera un coeficiente de pérdidas de 0.2, según el Manual de Comisión Nacional del Agua para válvulas de compuerta completamente abierta.

Tabla 25: Valor de coeficiente k para cálculo de pérdidas locales. Fuente:(Comisión Nacional del Agua, n.d.). Elaboración: Autoras

<b>VÁLVULA</b>	<b>COEFICIENTE k</b>
<b>Válvula de compuerta, completamente abierta</b>	0.20

Tabla 26 Datos de ingreso en el software Allievi para la válvula Elaboración: Autoras

<b>VÁLVULA</b>		
<b>Tipo</b>	Compuerta	
<b>Cota</b>	2859,012	m
<b>Diámetro nominal</b>	200	mm
<b>k ramal</b>	0,2	

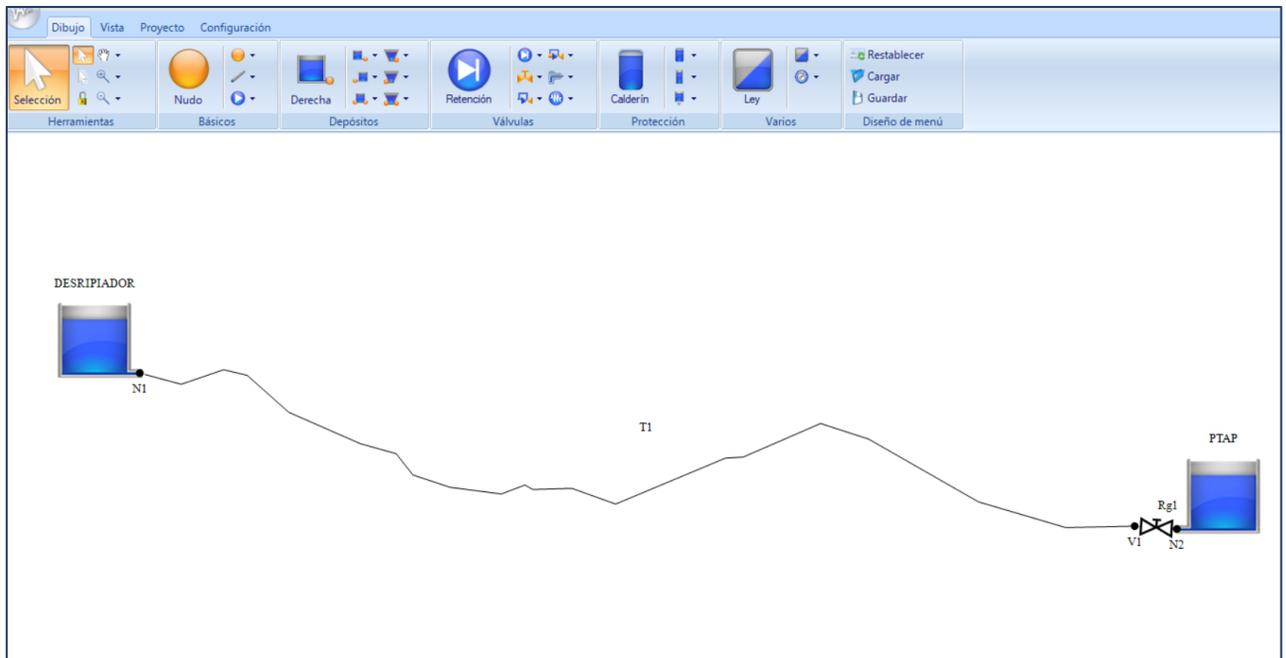


Ilustración 30 Modelo hidráulico de la línea de conducción de Sinincay. Nodos de análisis y estructuras de control. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.

Luego de que la línea de conducción haya sido cargada e introducido las respectivas características hidráulicas se realiza el corrido del modelo en régimen permanente y se analizan los parámetros hidráulicos obtenidos en los nodos, tubería, y válvula.

Se procede al cálculo del transitorio con la corrida de la simulación, posterior al éxito en el resultado de la simulación se analizan las envolventes piezométricas, verificando el comportamiento de las tuberías con el análisis de las gráficas resultantes.

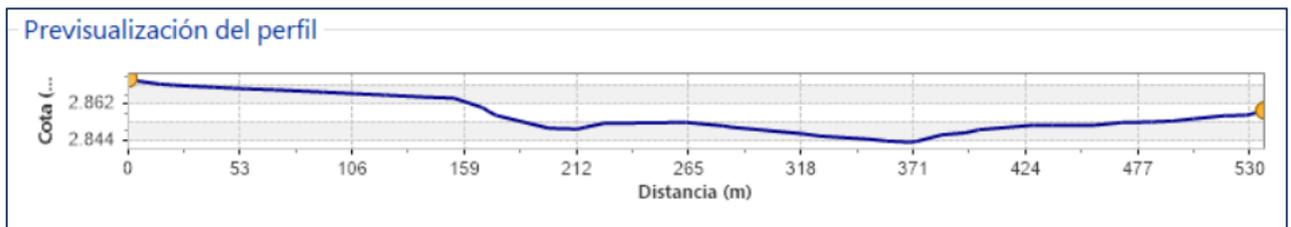


Ilustración 31 Previsualización del perfil de la línea de conducción Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras



### 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 ANÁLISIS DEL DIMENSIONAMIENTO DE LA CONDUCCIÓN

En el presente bloque de resultados se detalla como primer punto el estudio manual de la capacidad hidráulica del sistema, procedente a esto se especifican los resultados de los parámetros hidráulicos mediante el modelo computacional EPANET 2.0 de la capacidad hidráulica del sistema para una comparación con el cálculo manual; además resultados de parámetros hidráulicos para escenarios como la capacidad hidráulica real, capacidad hidráulica requerida según el número de usuarios actuales y la capacidad hidráulica para un periodo de análisis de 25 años.

##### 3.1.1 Cálculo manual de la capacidad hidráulica del sistema de conducción

###### Tramo 1: Captación – Desripiador

Tabla 27: Datos generales del tramo Captación- Desripiador.

DATOS TRAMO 1			
Longitud de tubería	L	45.17	m
Diámetro	D	0.1846	m
Viscosidad cinemática	v	0.000001	m <sup>2</sup> /s
Número de Reynolds	Re	775452.16	

Mediante un proceso de iteraciones con la expresión de Darcy-Weisbach y aplicando la teoría de Bernoulli se encuentra las pérdidas por fricción y el caudal que puede pasar por la tubería.

Tabla 28: Cálculo del factor de fricción, pérdidas por fricción y caudal en el tramo captación- desripiador.

Ecuación de Colebrook			
Rugosidad absoluta	ks	0.0000015	m
Factor de fricción de Darcy	f	<b>0.012</b>	
Pérdidas Darcy- Weisbach			
Velocidad	V	3.936	m/s
Perdidas	hf	2.409	m
Ecuación de Energía			
Elevación 1	z1	2876.91	m
Elevación 2	z2	2874.50	m
Energía 1	E1	2876.91	m
Energía 2	E2	2876.91	m
Caudal	Q	0.105	m <sup>3</sup> /s
Caudal	<b>Q</b>	<b>105.34</b>	<b>l/s</b>



Para el primer tramo se obtiene como resultado una capacidad hidráulica de 105.34 l/s.

### Tramo 2: Captación – Desripiador

Tabla 29: Datos generales del tramo Desripiador- PTAP.

<b>DATOS TRAMO 2</b>			
<b>Longitud de tubería</b>	L	536.44	m
<b>Diámetro</b>	D	0.1846	m
<b>viscosidad cinemática</b>	v	0.000001	m <sup>2</sup> /s
<b>Número de Reynolds</b>	Re	519759.40	

Luego de un proceso de iteraciones se obtiene los siguientes resultados:

Tabla 30: Cálculo del factor de fricción, pérdidas por fricción y caudal en el tramo Desripiador- PTAP.

<b>Ecuación de Colebrook</b>			
Rugosidad absoluta	ks	0.0000015	m
Factor de fricción de Darcy	<b>f</b>	<b>0.013</b>	
<b>Pérdidas Darcy- Weisbach</b>			
<b>Velocidad</b>	V	2.816	m/s
<b>Perdidas</b>	hf	15.490	m
<b>Ecuación de Energía</b>			
Elevación 1	z1	2874.50	m
Elevación 2	z2	2859.01	m
Energía 1	E1	2874.50	m
Energía 2	E2	2874.50	m
Caudal	Q	0.075	m <sup>3</sup> /s
Caudal	<b>Q</b>	<b>75.36</b>	<b>l/s</b>

Obteniendo una capacidad hidráulica de 75.36 l/s para el segundo tramo.

### 3.1.2 Capacidad hidráulica del sistema de conducción mediante el programa EPANET 2.0

De la modelación realizada en EPANET se obtiene la capacidad de la tubería:

#### Tramo 1: Captación – Desripiador

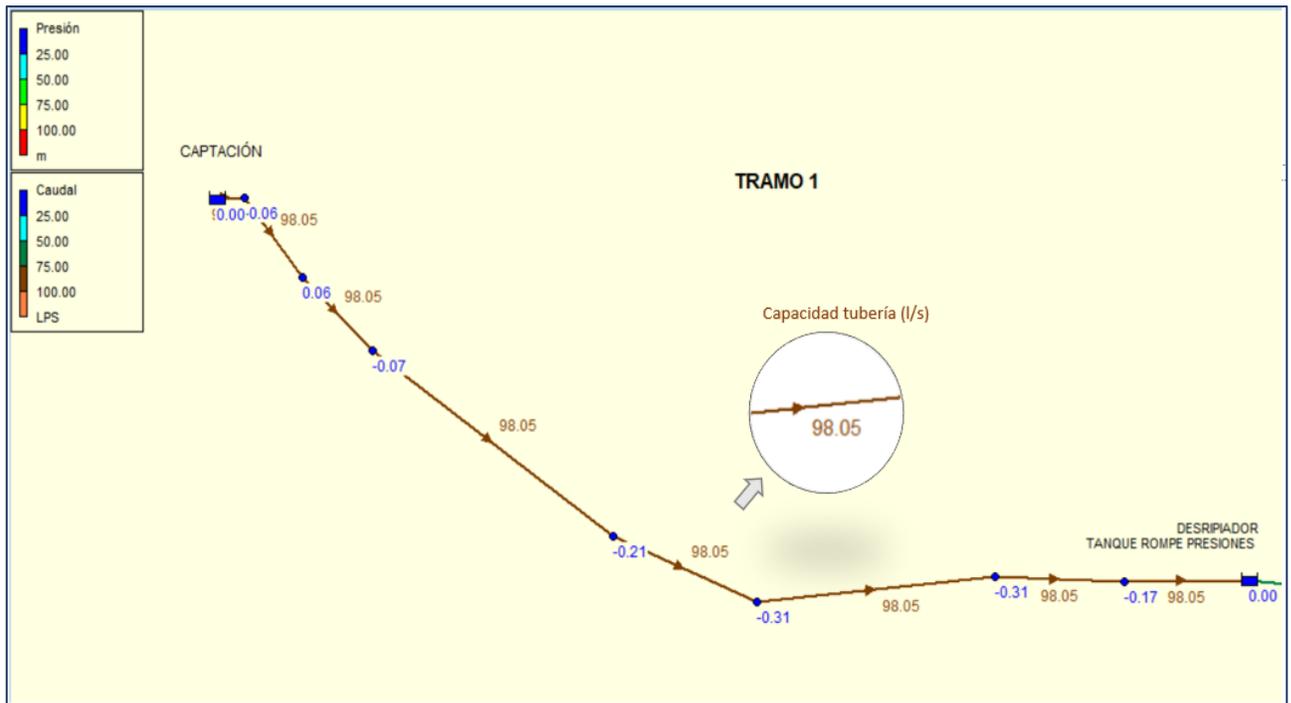


Ilustración 32: Capacidad de la línea de conducción en el tramo Captación-Desripiador. Simulación realizada en el programa EPANET 2.0.

Para este tramo se obtiene una capacidad de 98.05 l/s.

<b>Caudal EPANET</b>	98.05 l/s
----------------------	-----------

El caudal obtenido mediante el cálculo manual difiere en 6.92 % del calculado por el programa EPANET, sin embargo, este tramo no se analizará posteriormente ya que al ser una captación a superficie libre la línea no actúa a presión desde el comienzo.

En este tramo en la realidad existe rotura de tuberías y fugas por lo que hay una pérdida de caudal de aproximadamente 10 l/s hasta llegar al desripiador.

## Tramo 2: Desripiador – Planta de tratamiento

Para este tramo se tiene la siguiente simulación:

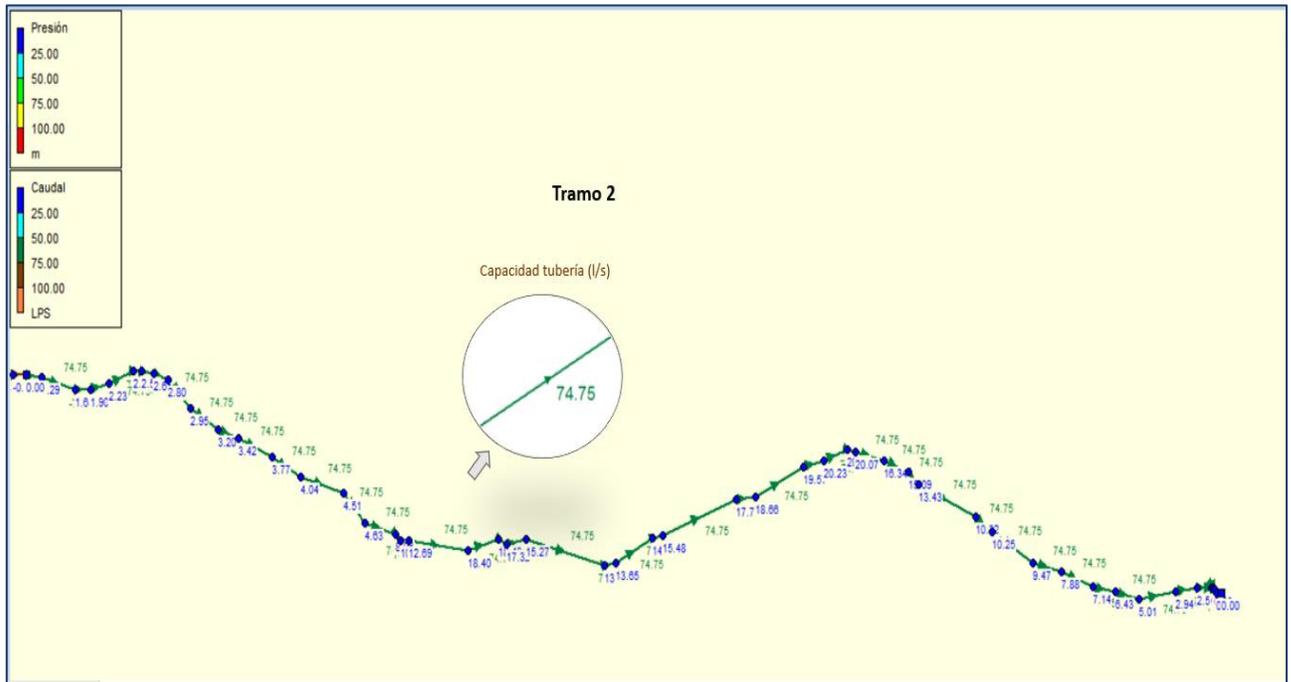


Ilustración 33: Capacidad de la línea de conducción en el tramo Desripiador- PTAP. Simulación realizada en el programa EPANET 2.0.

El resultado es una capacidad en el segundo tramo de 74.75 l/s.

Caudal EPANET	74.75 l/s
---------------	-----------

El caudal obtenido mediante el cálculo manual difiere en 0.81% del calculado por el programa EPANET, por lo que se comprueba este valor. Se trabajará con el caudal obtenido por el programa.

Para los análisis posteriores solamente se tomará en cuenta el segundo tramo; comprendido entre el desripiador y la planta de tratamiento, dado que el sistema actúa completamente a presión desde este punto, ya que existe un pequeño tanque a la salida del desripiador que proporciona una altura aproximada de 1 metro y porque este tramo es el encargado de llevar el caudal hacia la planta de tratamiento.

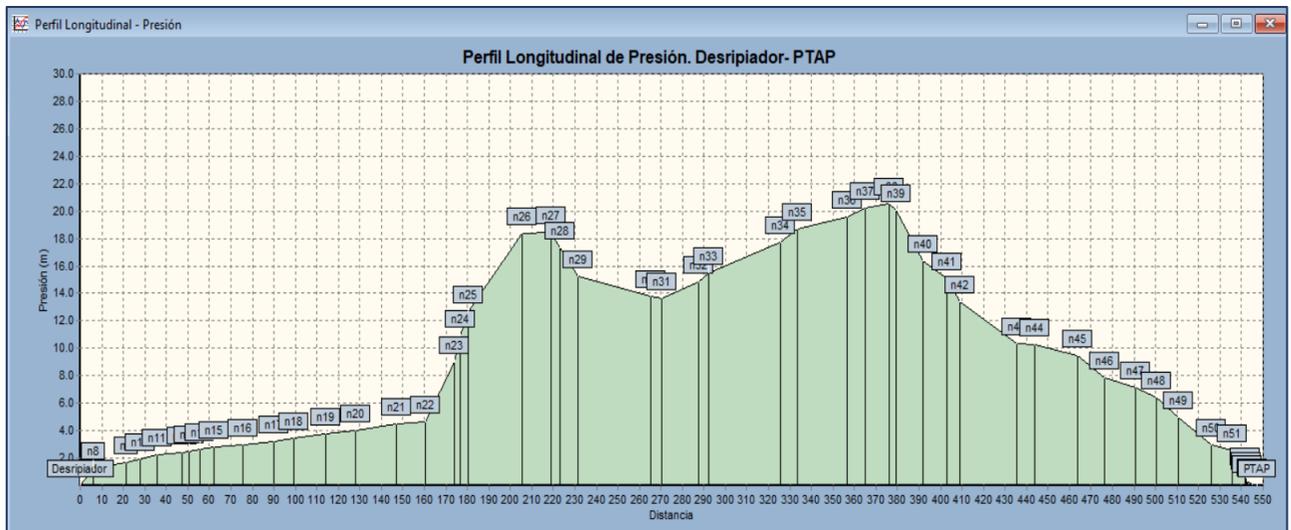


Ilustración 34: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador- PTAP. Actuando bajo el caudal de capacidad del sistema. Realizado en EPANET 2.0.

En la imagen anterior se puede apreciar el perfil longitudinal de presiones obtenido en EPANET 2.0, en el eje de las abscisas se encuentra la longitud de la tubería, mientras que en las ordenadas el valor de las presiones en cada nodo de análisis. En este gráfico el eje de la tubería está representado en la horizontal.

Como se puede apreciar, las presiones son variables a lo largo del tramo y todas son positivas, a excepción del desripiador, que cuenta con un tanque rompe presiones y de la planta de tratamiento donde la presión es cero, ya que están representados en el programa por un embalse que funciona a superficie libre, actuando sobre ellos la presión atmosférica. La presión máxima en este escenario es de 20.39 mca, siendo menor a la presión admisible de la tubería (101.9 mca)

Es importante tomar en cuenta que las capacidades de las tuberías obtenidas son para las condiciones más favorables que puede tener el sistema, es decir, ignorando pérdidas locales por accesorios, roturas de tuberías, edad de los elementos de la línea, fugas y despreciando pérdidas en estructuras hidráulicas como la captación y desripiador. Sin embargo, en la vida real se dan varios de los inconvenientes mencionados anteriormente.

La siguiente gráfica indica los resultados del gradiente hidráulico para transportar el caudal actuante real.

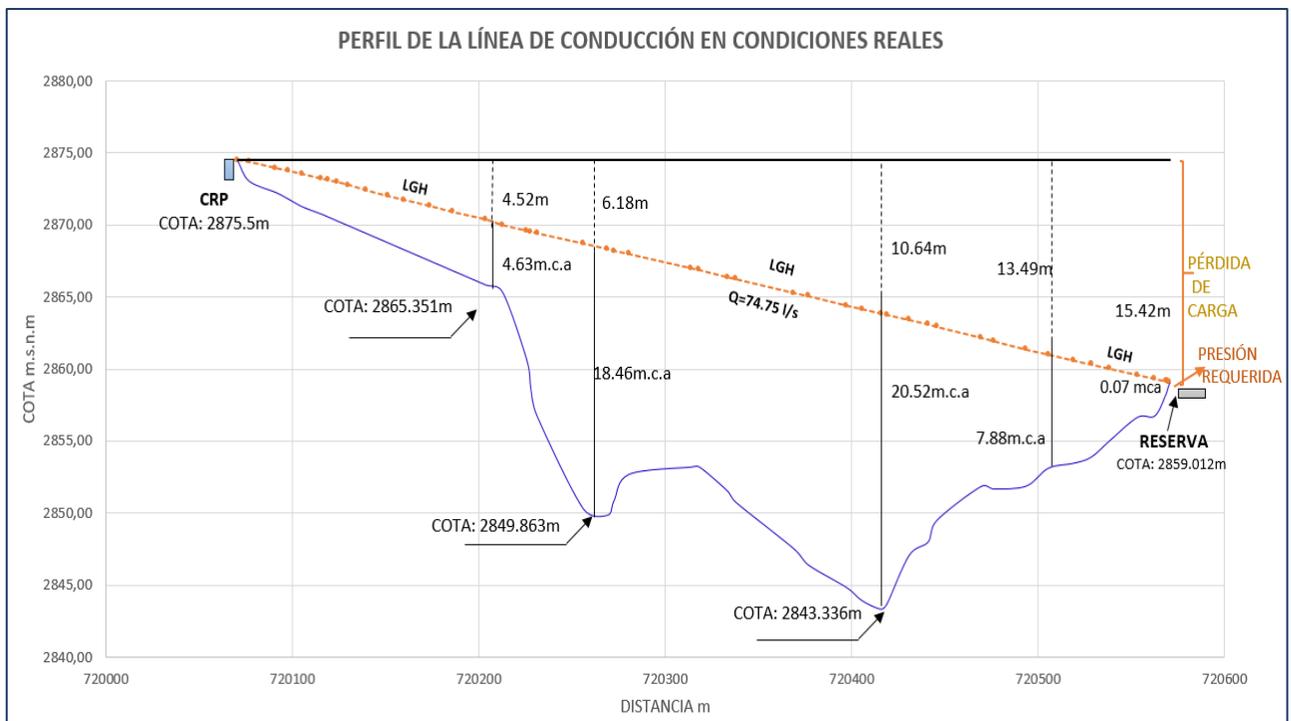


Figura 2: Línea de gradiente hidráulico de la conducción para un caudal actual en condiciones reales. Elaboración: Autoras.

Como se observa en la figura no existen cortes entre el gradiente hidráulico y el perfil del terreno, con lo que se concluye que la conducción actual es apta para transportar el caudal requerido actual.

Según la Normativa CO 10.07-601 del CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN DE PARTE IX OBRAS SANITARIAS, la línea piezométrica deberá estar por lo menos 2 metros más arriba de la clave del conducto y por lo menos 1 metro más arriba de la superficie del terreno, esta condición no será obligatoria para los tramos iniciales y final de conducciones a presión acopladas a reservorios.

Con esta simulación se verifica que la conducción está apta para transportar hasta 74.75 l/s cumpliendo con la demanda de la población. Sin embargo, el caudal actuante real es de 50 l/s lo que significa que existen aproximadamente 24 l/s en pérdidas en el transcurso de la línea de conducción.

A continuación, se realiza la simulación en EPANET 2.0 de la línea de conducción bajo distintos escenarios: caudal actual requerido en base a la población existente, caudal real que



pasa por la línea de conducción y por último con el caudal requerido para un periodo de análisis de 25 años.

### **3.1.3 Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido del sistema de conducción**

El caudal requerido para cubrir la demanda actual es de 39.61 l/s. Se realiza la simulación colocando este caudal como demanda base del sistema y se procederá a realizar un análisis de los resultados.



Ilustración 35: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0

El caudal requerido en la actualidad es menor a la capacidad de la tubería (74.75 l/s) por lo que las condiciones de la línea de conducción en la actualidad son suficientes para cubrir la demanda existente

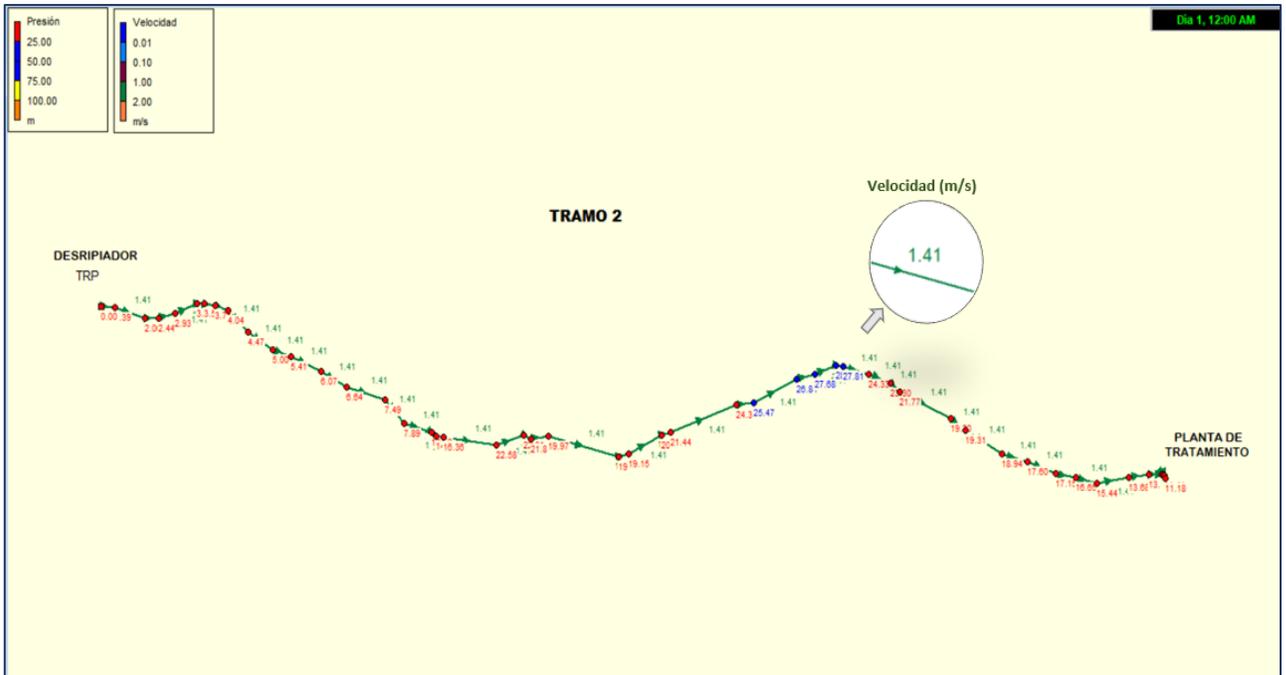


Ilustración 36: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0. Elaboración: Autoras.

La velocidad de flujo a lo largo de este tramo es de 1.41 m/s, cumple con la velocidad mínima de 0.6 m/s para evitar sedimentación de sólidos y con la máxima para PVC de 4.5 m/s (Norma CO 10.07 - 601, 2010). Para evitar daños en la tubería. Funciona a una velocidad menor a la de la tubería a toda su capacidad, debido a que el caudal requerido es aproximadamente el 47% de la capacidad que tiene la tubería.

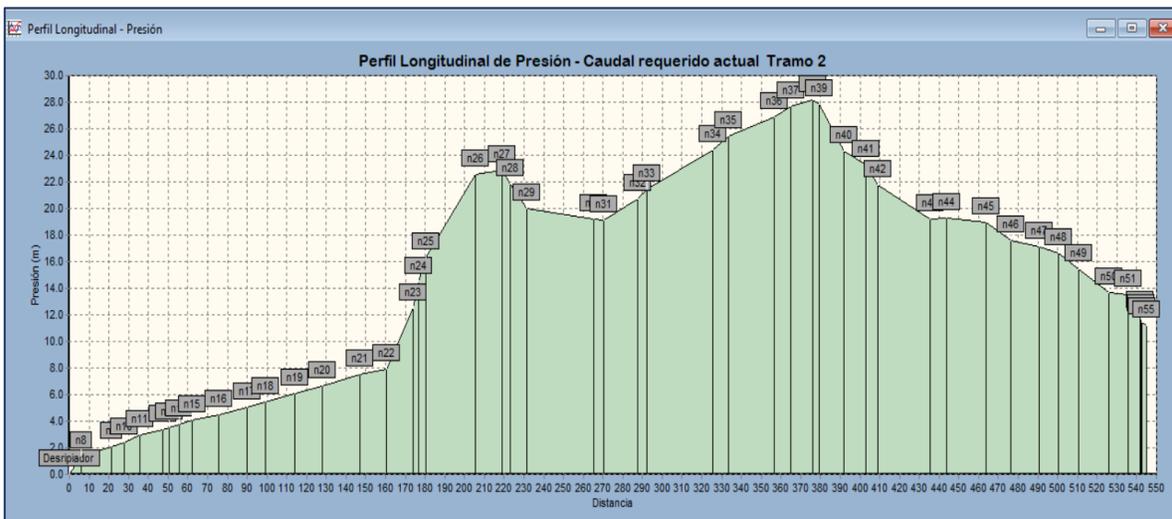


Ilustración 37: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador- PTAP. Actuando bajo el caudal requerido para la población actual

En la ilustración anterior se puede observar que en los nodos analizados todos los valores de presión son positivos, existen segmentos en los que se dan incrementos notables de presión, esto se puede dar principalmente por los desniveles existentes ya que la tubería sigue la topografía del terreno. La línea de Sinincay cuenta con tuberías PVC de 1.0 MPa. (101.9 mca). Bajo este escenario la presión máxima es de 28.19 mca, por lo que cumple con la presión máxima admisible.

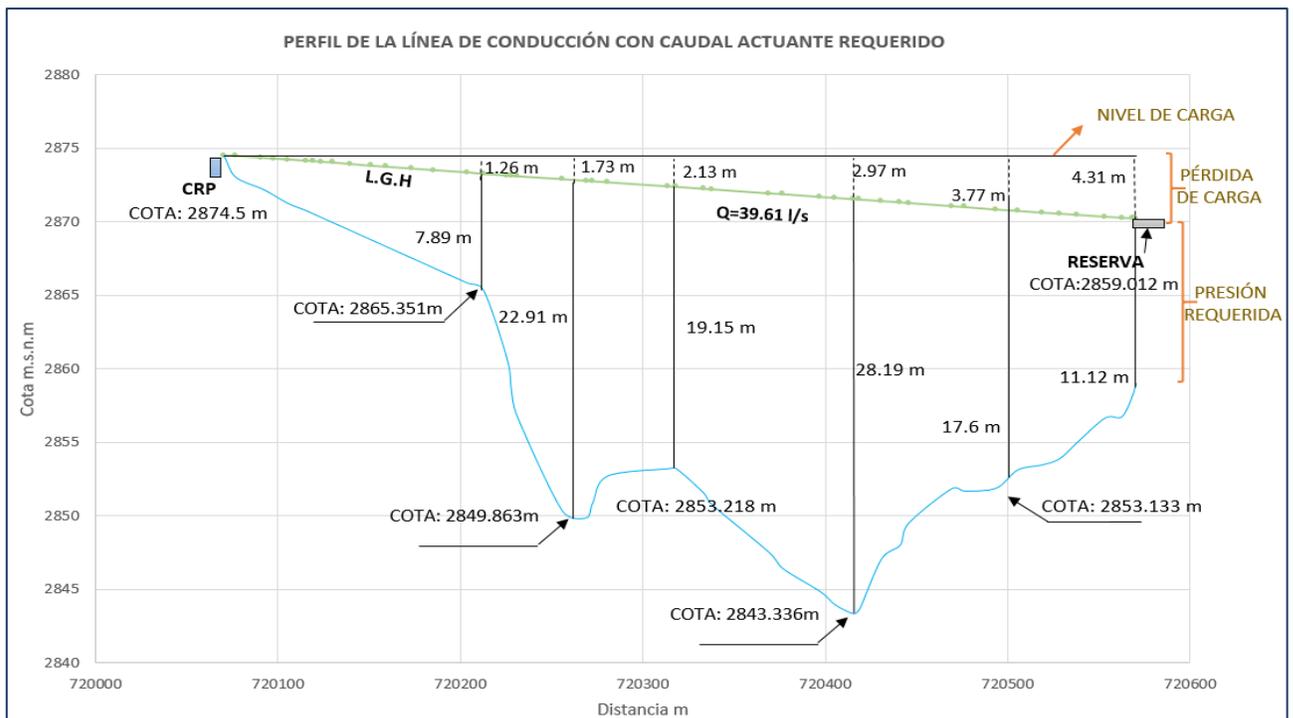


Figura 3: Línea de gradiente hidráulico de la conducción para un caudal actual requerido. Elaboración: Autoras.

Como se observa en la figura existe una presión positiva lo que indica que hay suficiente energía gravitacional para transportar el caudal de 39.61 l/s.

### 3.1.4 Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real del sistema de conducción

Se realiza la simulación considerando el caudal actual real indicado por el operador de la planta de tratamiento de agua potable de Sinincay y encargado de la línea de conducción.

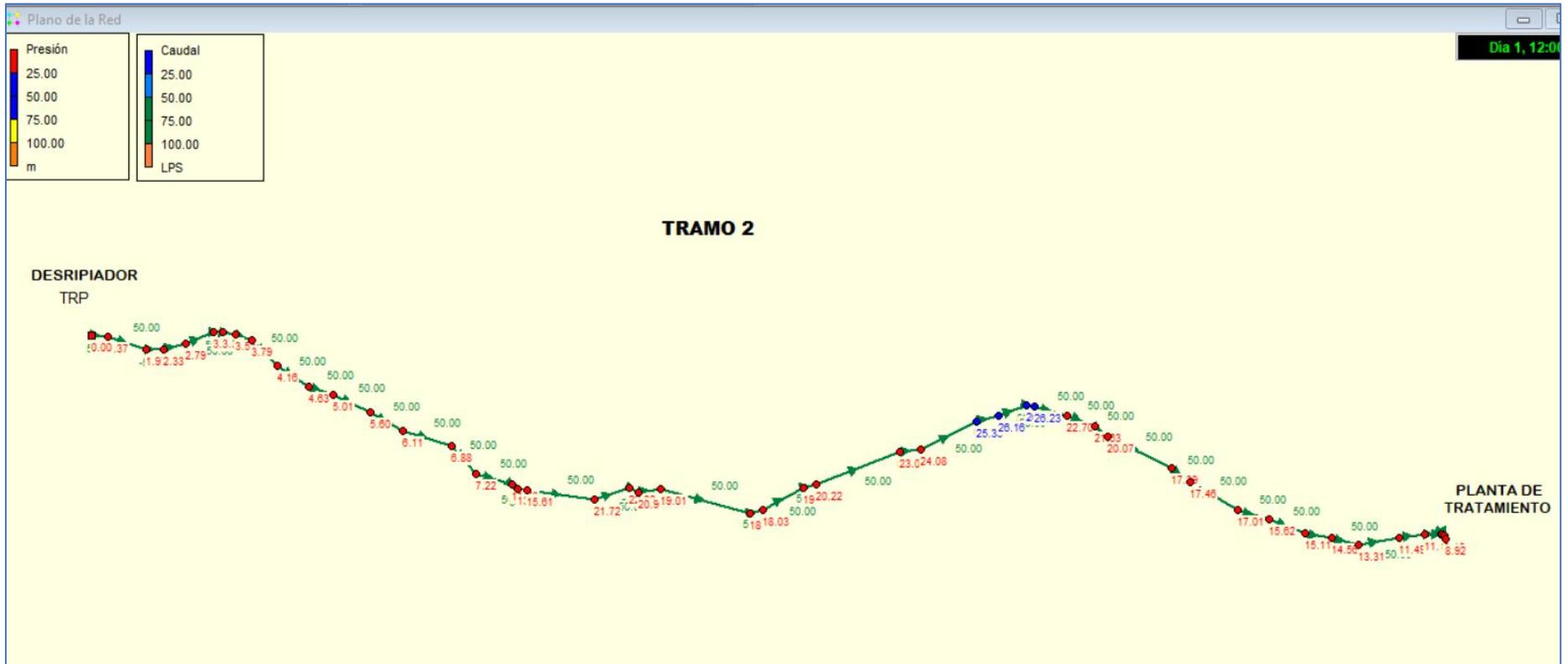


Ilustración 38: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real actual, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0

El caudal transportado por la línea de conducción realmente a partir del desripiador es de 50 l/s, la línea estaría funcionando a un 67% de su capacidad total. Este caudal es mayor al requerido para satisfacer la demanda actual (39.61 l/s).

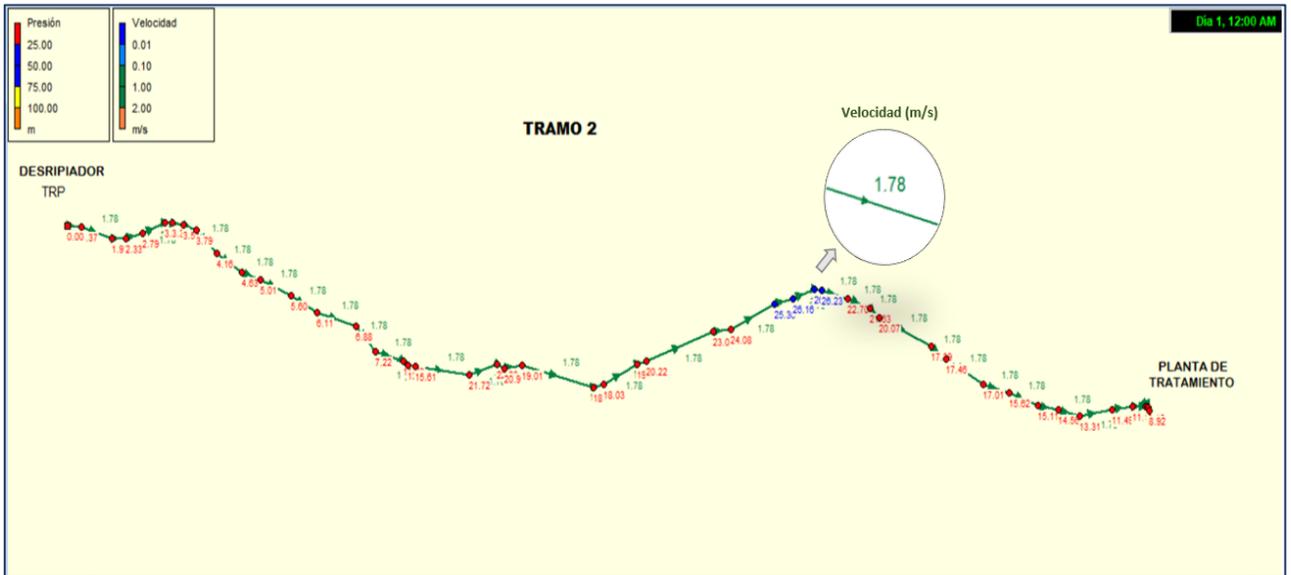


Ilustración 39: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0.

La velocidad a la que actúa el sistema con el caudal medio actual es de 1.78 m/s, cumple con el criterio de velocidad mínima (0.6 m/s) para evitar depósitos de sólidos y con la velocidad máxima (4.5 m/s) para que no se de erosión de las tuberías.

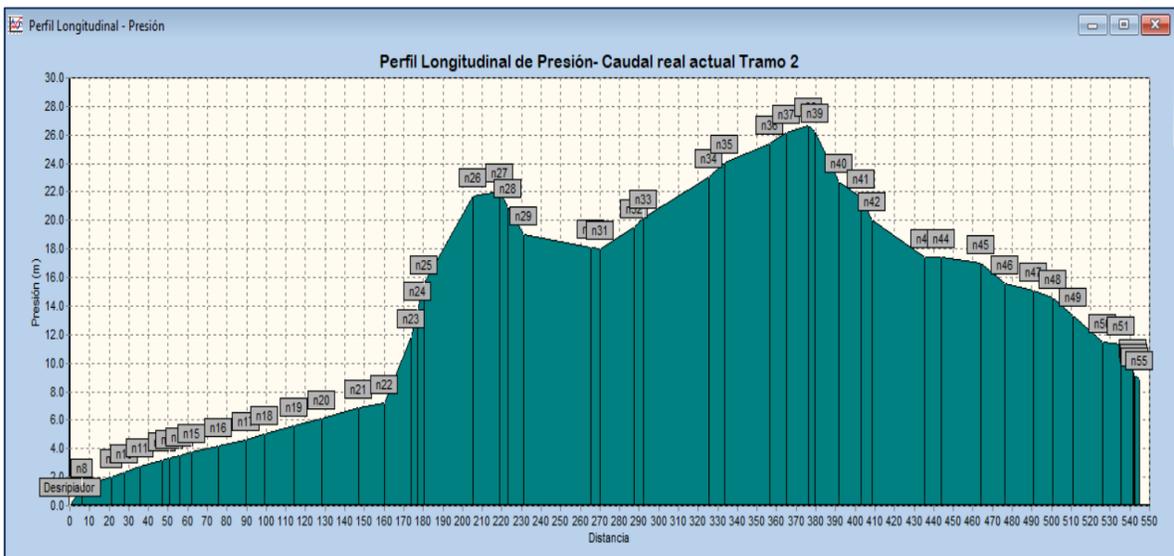


Ilustración 40: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador- PTAP. Actuando bajo el caudal real actual. Realizado en EPANET 2.0

Como se indicó anteriormente la presión admisible de las tuberías del sistema es de 1.0 MPa (101.9 mca), en este caso se realizó la simulación con una media del caudal real que es transportado por el sistema, la presión máxima generada es de 26.63 mca, por lo que está muy lejos de alcanzar el límite establecido. Las presiones a lo largo del tramo son positivas.



Figura 4: Línea de gradiente hidráulico para el caudal actual real de la línea de conducción. Elaboración: Autoras.

Como se verifica en la ilustración anterior la línea de gradiente hidráulico en todos los puntos de la conducción está por encima del perfil del terreno, por lo que no hay presiones negativas, y el caudal llegaría a la Planta de Tratamiento con una presión de 8.92 m.

### 3.1.5 Modelo unidimensional de flujo para el caudal requerido en el periodo de análisis de 25 años

A continuación, se presenta la simulación del modelo hidráulico con el caudal requerido en un periodo de 25 años. El caudal requerido en la línea de conducción en el futuro será de 68.04 l/s

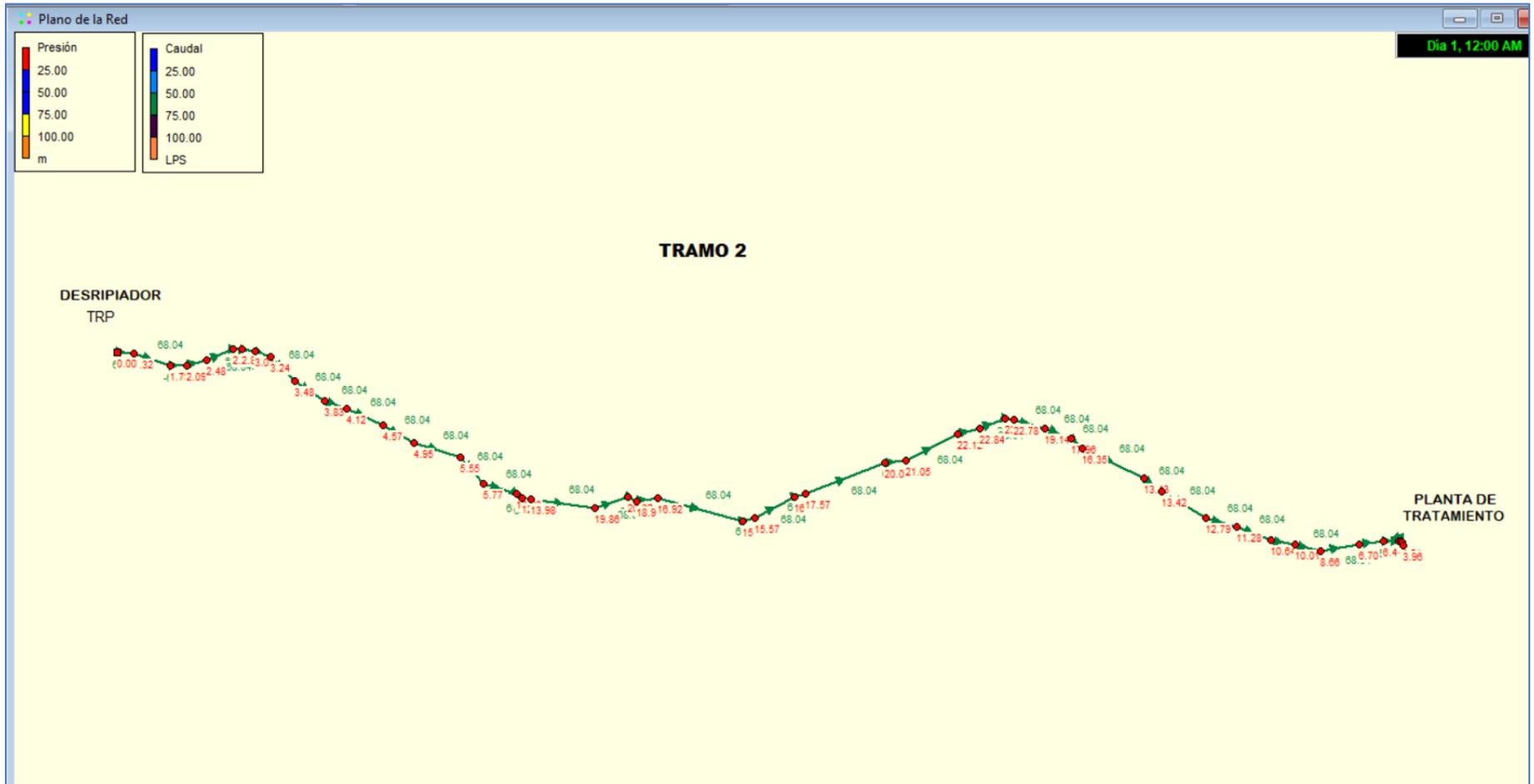


Ilustración 41: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual real actual, se muestra en las tuberías el caudal y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0

En un periodo de 25 años el caudal requerido será aproximadamente el 91% del caudal de capacidad de la tubería.

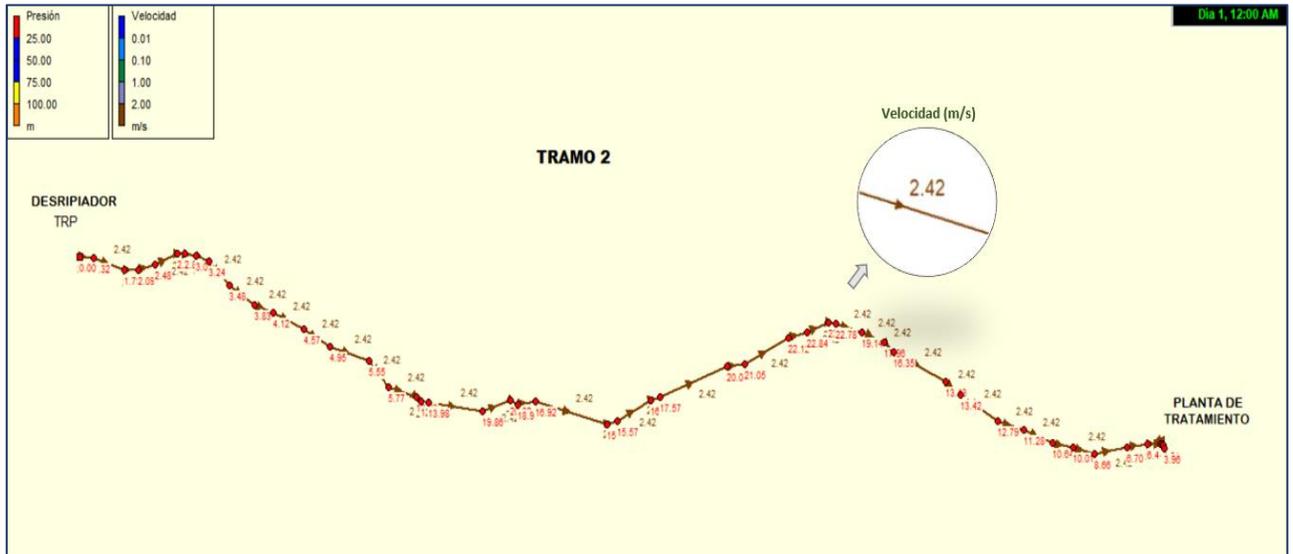


Ilustración 42: Modelo unidimensional de flujo para el caudal actual requerido, se muestra en las tuberías la velocidad y en los nodos la presión del sistema. Realizado en EPANET 2.0

La velocidad de flujo para el caudal calculado en el periodo de diseño es de 2.42 m/s, cumple con el límite mínimo de velocidad (0.6 m/s) para evitar sedimentación de sólidos y con el máximo para tubería de PVC establecido en la (Norma CO 10.07 - 601, 2010) de 4.5 m/s para evitar daños en las tuberías.

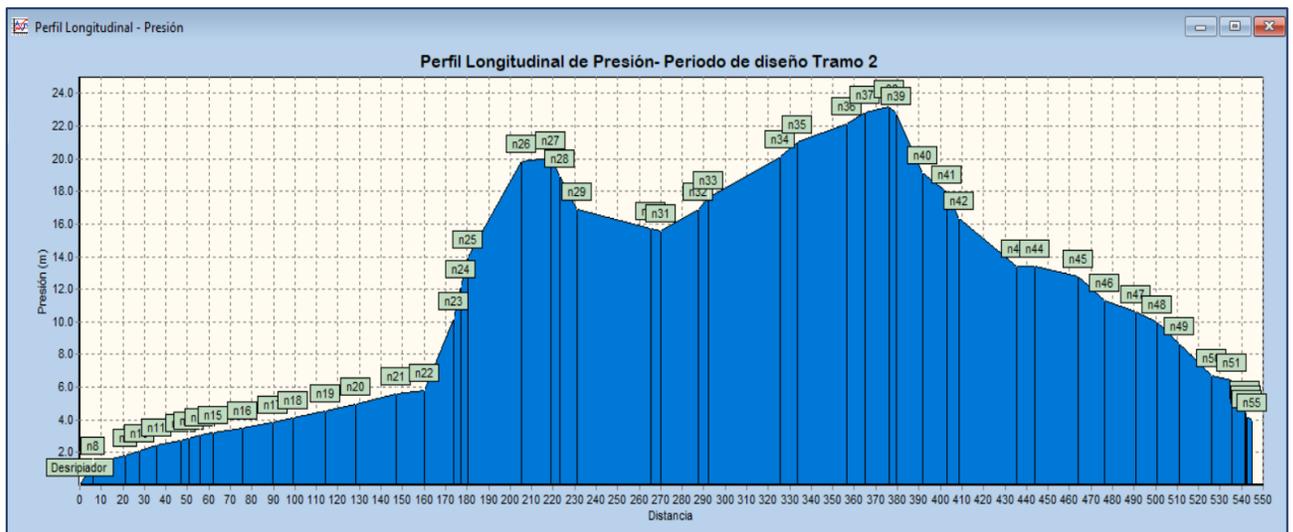


Ilustración 43: Perfil longitudinal de presiones de la línea de conducción en el tramo desripiador- PTAP. Actuando bajo el caudal en un periodo de de 25 años. Realizado en EPANET 2.0. Elaboración: Las autoras.

Como se analiza en el perfil de presiones de la ilustración anterior, todas las presiones a lo largo de la línea de conducción serán positivas. La tubería soporta una presión de 1 MPa (101.9 mca), la presión máxima estimada es de 23.21 mca, por lo tanto, cumple con el límite admisible.



Figura 5: Línea de gradiente hidráulico para el caudal actual futuro en un periodo de 25 años. Elaboración: Autoras.

Como se observa en la figura anterior para el periodo de análisis la línea de gradiente hidráulico se encuentra por encima de la superficie del terreno en todos los puntos, además llegaría con una presión de 3.96 mca la cual es superior a 2 metros que se recomienda (Tixe, 2004).

Respecto a las pérdidas de carga, estas son mayores a las pérdidas en las condiciones actuales, sin embargo, el sistema estaría funcionando adecuadamente para los 25 años con un caudal de 68.04 l/s; el inconveniente se da que no todo el gasto estaría ingresando a la Planta de Tratamiento de Agua Potable, sino como se indica anteriormente, ingresa solamente 35 l/s y en ese caso ya no abastecería la demanda de la población para el periodo de diseño.



## **3.2 ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR MANIOBRA DE VÁLVULAS**

En el presente bloque de resultados se detalla el análisis de transitorios para tres diferentes escenarios: válvula abierta completamente, cierre de válvula y apertura de válvula. Para el segundo y tercer escenario se analizan resultados de la maniobra en tres diferentes tiempos, 5, 10 y 20 segundos, posterior a esto se especifican resultados de fenómenos transitorios para un tiempo óptimo en el que no existan sobrepresiones, presiones negativas y cavitación. Además, se detalla un análisis de resultados para un cierre y apertura de válvula en un tiempo en dos etapas.

### **3.2.1 Primer escenario: Válvula abierta completamente sin realizar ninguna maniobra.**

Se realiza el primer escenario con la válvula completamente abierta, sin realizar ninguna maniobra de cierre ni apertura, sería equivalente a realizar una simulación en régimen permanente.

Se obtiene la siguiente figura de envolventes piezométricas.

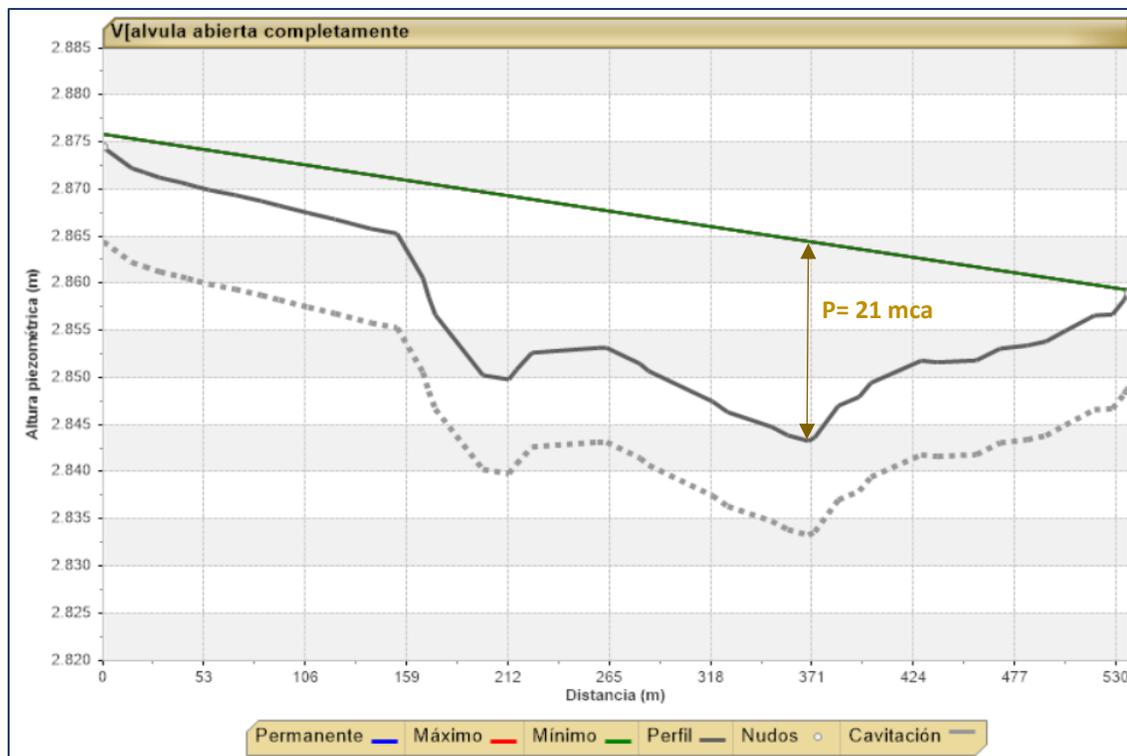


Figura 6: Envolventes piezométricas para un escenario de válvula completamente abierta. Fuente: ALLEVI. Elaboración: Autoras

Según la gráfica de envolventes piezométricas el sistema funcionaría correctamente sin sobrepresiones, ni depresiones si la válvula trabajaría completamente abierta; es decir tal como el sistema funciona actualmente, ya que no cuenta con una válvula reguladora, sin embargo, es necesaria para el control de la línea de conducción. La presión máxima resultante a la que llegaría el sistema está alrededor de 21 mca en la distancia de 372 metros, lo cual concuerda con la presión resultante en la modelación del flujo en EPANET 2.0 (20.39 mca), este parámetro es menor a la presión admisible de la tubería por lo que el sistema funcionaría eficientemente; además no existe cavitación en ningún tramo de la conducción.



Figura 7: Caudal para un escenario con válvula completamente abierta Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

La gráfica representa el caudal cuando la válvula se encuentra completamente abierta, se visualiza que el caudal en este escenario se mantiene constante en el tiempo, debido a que el sistema no está sometido a cambios que provoquen variación en el flujo.

### 3.2.2 Segundo escenario: Cierre de válvula

Se simula el cierre de la válvula, maniobra que puede generar un fenómeno transitorio de gran impacto en el sistema.

En régimen permanente se tiene los siguientes resultados:

**Nodos:** La línea de conducción se encuentra actuando bajo régimen permanente cuando la válvula se encuentra completamente abierta, las presiones obtenidas en los nodos bajo este régimen son las siguientes:



Tabla 31 Resultados en los nodos bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	nodo valvul	2859.35	0.34
2	nodo inicio	2875.90	1.40
3	nodo inicio	2875.90	1.40
4	nodo final	2859.25	0.24
5	nodo final_	2859.25	0.24

**Tubería:** Bajo régimen permanente el caudal que fluye por la tubería es el de capacidad de la tubería, este valor calculado en el software ALLIEVI es muy cercano al obtenido en EPANET.

Tabla 32 Resultados en la tubería bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.

Nombre	Q(l/s)	V(m/s)	F. Fric.	Per. Fric. (m)
CONDUCCION	77.41	2.90	0.01329	16.55

**Válvula:** Bajo régimen permanente la válvula se encuentra abierta, por lo que el caudal que pasa por ella es igual al de la tubería en su capacidad máxima.

Tabla 33 Resultados en la válvula bajo régimen permanente en cierre de válvula. Realizado en ALLIEVI.

Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
Rg1	1	77.41	0.10	100.00

Para el análisis de transitorios se obtiene los siguientes resultados:

Para el cierre de válvula, se prueban varias simulaciones con distintos tiempos de cierre, para analizar el comportamiento de las envolventes piezométricas respecto a la maniobra a la que se somata la válvula.

#### Cierre en $t = 5$ segundos

Se realiza el cierre completo de la válvula en un tiempo de 5 segundos

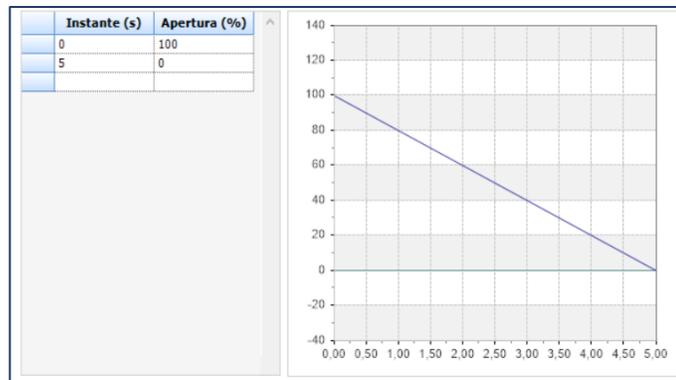


Figura 8 Cierre lineal de la válvula Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

## Tubería:

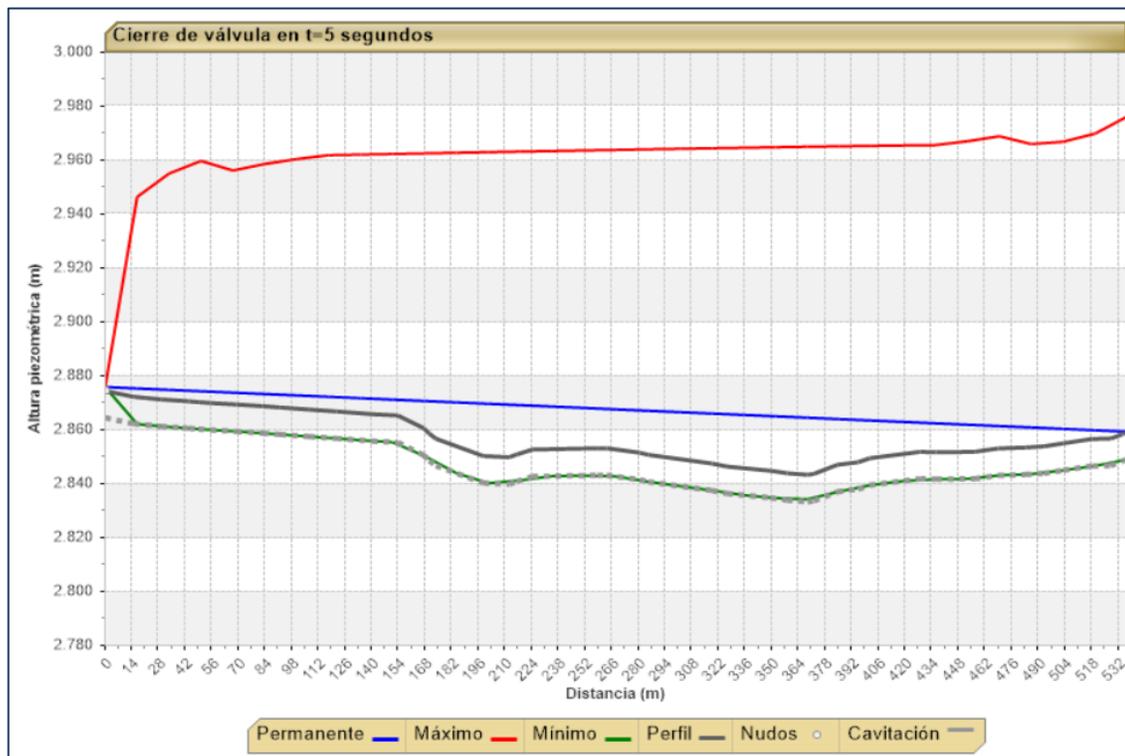


Figura 9 Envolventes piezométricas para un cierre de 5 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la Figura 9 se observa las envolventes de alturas piezométricas en el perfil de conducción a gravedad producido por el cierre de la válvula a los 5 segundos.

La máxima sobrepresión y depresión se produce donde se encuentra instalada la válvula y las ondas de presión máxima y mínima se van reflejando hacia aguas arriba con menor intensidad hasta el desripador.



Al producirse un cierre rápido de la válvula de 5 segundos, se genera una altura máxima al pie de la válvula de 2976 m aproximadamente, tomando en cuenta que la cota de perfil en ese punto corresponde a 2859.012 m, se genera una presión de 117.17 mca superando la presión admisible de la tubería correspondiente a 101.9 mca, lo que ocasionaría una rotura de la misma.

Tabla 34 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 5 segundos. Elaboración: Autoras

<b>Altura máxima</b>	2976,18	mca
<b>Cota de perfil</b>	2859,01	mca
<b>Sobrepresión</b>	117,17	mca

La línea verde indica las presiones mínimas que se dan a lo largo de la conducción, se visualiza que se genera una altura mínima de 2859 m en el punto de colocación de la válvula, produciendo un valor de presión negativa de -10 mca.

Tabla 35 Depresión para un tiempo de cierre de 5 segundos Elaboración: Autoras

<b>Altura mínima</b>	2849,01	mca
<b>Cota de perfil</b>	2859,01	mca
<b>Presión negativa</b>	-10,00	mca

La línea gris punteada indica la línea de cavitación, se visualiza que esta se encuentra al mismo nivel de la línea verde (presión mínima), con lo que resulta que al cerrar la válvula a los 5 segundos el sistema se encontraría al límite de producir cavitación. Sin embargo, considerando que, por la toma de datos, el procesamiento de los mismos y por las simulaciones en el modelo computacional, se genera un margen de error, por lo que en el caso más desfavorable se consideraría que si se genera el fenómeno de cavitación en el sistema y por ende un colapso de la conducción.

Por lo tanto, se deberá encontrar un tiempo de cierre óptimo para la válvula, a fin de evitar la cavitación, presiones negativas y sobrepresiones superiores a la admisible de la tubería.

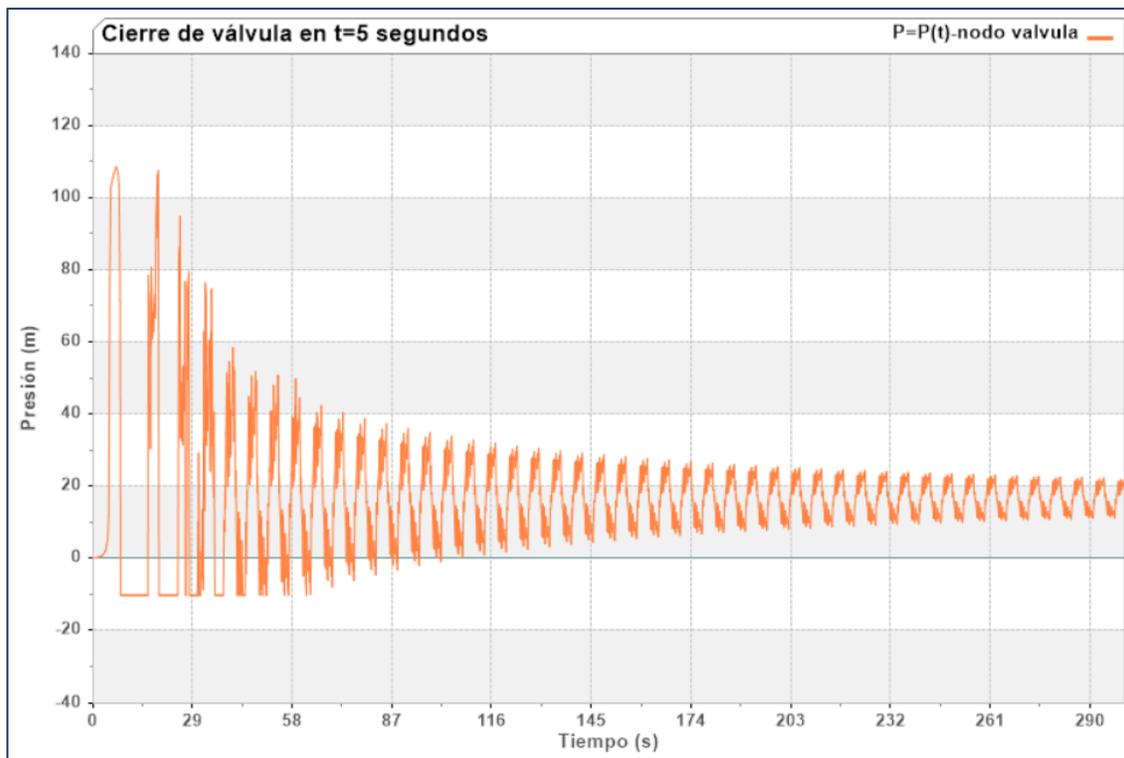
**Nodos:**

Figura 10 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 5 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras

En la gráfica se puede visualizar como varía la presión en función del tiempo de la simulación. Una vez cerrada la válvula en el tiempo de los 5 segundos se genera una sobrepresión de 107.24 mca, luego inmediatamente hay una caída de presión llegando a una presión negativa de -10 mca por debajo de la presión atmosférica, y luego nuevamente se generan sobrepresiones que van oscilando, hasta que en un tiempo alcanza el equilibrio.

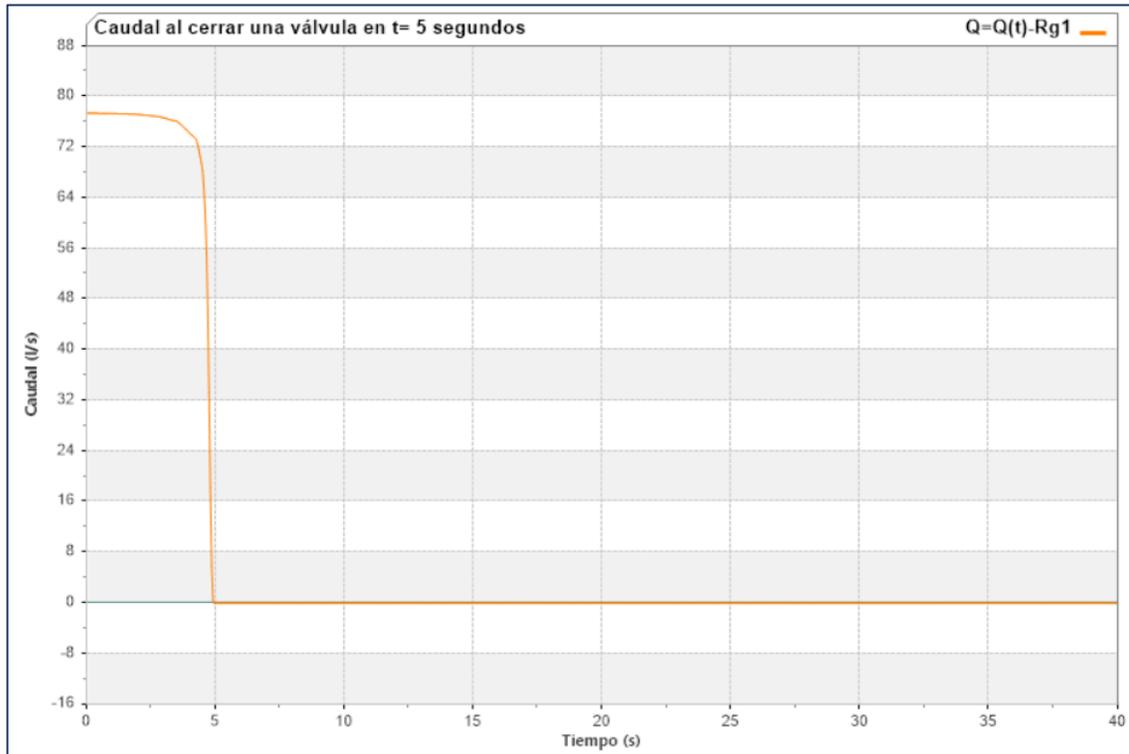
**Válvula:**

Figura 11 Variación del caudal para un cierre de 5 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.

La Figura 11 muestra como varía el flujo al cerrar la válvula en un tiempo de 5 segundos, se visualiza que el flujo empieza con los 77.40 l/s y al cerrar la válvula este disminuye rápidamente hasta llegar a los 5 segundos a un caudal de 0 l/s.

**Cierre en  $t = 10$  segundos**

En el siguiente escenario se evalúan los transitorios por cierre de válvula en un tiempo de 10 segundos.

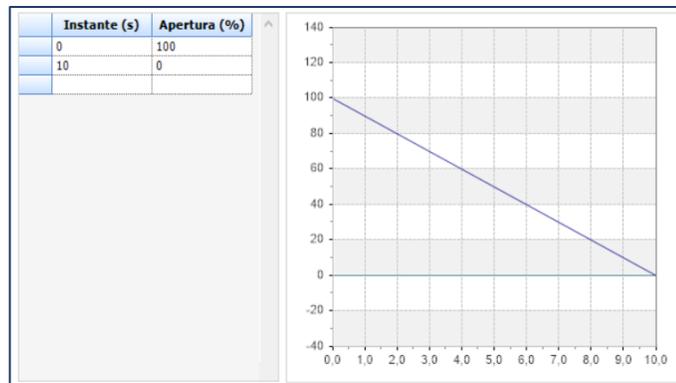


Figura 12 Cierre lineal de la válvula en 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

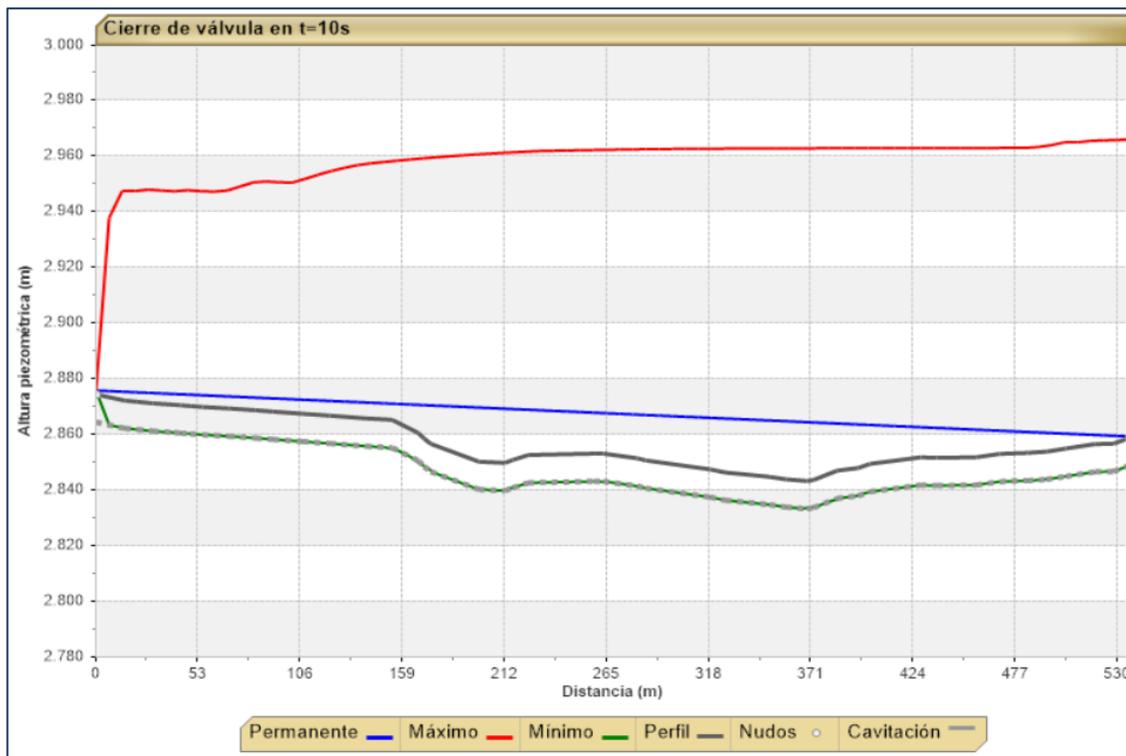


Figura 13 Envolturas piezométricas para un cierre de 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

La gráfica anterior indica las presiones máximas y mínimas que se generan en la línea de conducción al cerrar una válvula en 10 segundos; según la línea roja se llega a una altura máxima de 2966.29 mca, generando una sobrepresión de 107.28 mca, inferior a la sobrepresión al cerrar la válvula a los 5 segundos, lo que significa que cuando la maniobra de cierre se da en un tiempo menor, mayor sobrepresión causa y mayor probabilidad de rotura de tuberías.



La presión admisible de la tubería corresponde a 101.9 mca, y la sobrepresión obtenida en el cierre es de 107.28 mca siendo esta mayor, por lo que la tubería sufriría daños al cerrar la válvula en este tiempo.

Tabla 36 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 10 segundos. Elaboración: Autoras

<b>Altura máxima</b>	<b>2966.29</b>	<b>mca</b>
<b>Cota de perfil</b>	2859.01	mca
<b>Sobrepresión</b>	107.28	mca

Respecto a las presiones mínimas, en la Figura 13 se observa que la línea verde sigue estando por debajo del perfil, lo que significa que al cerrar la válvula a los 10 segundos se siguen generando presiones negativas; y respecto a la línea de cavitación, esta sigue estando en el mismo nivel de la línea de presión mínima, por lo que el tiempo de 10 segundos para cerrar la válvula no es suficiente para solucionar estos fenómenos.

**Nodos:**

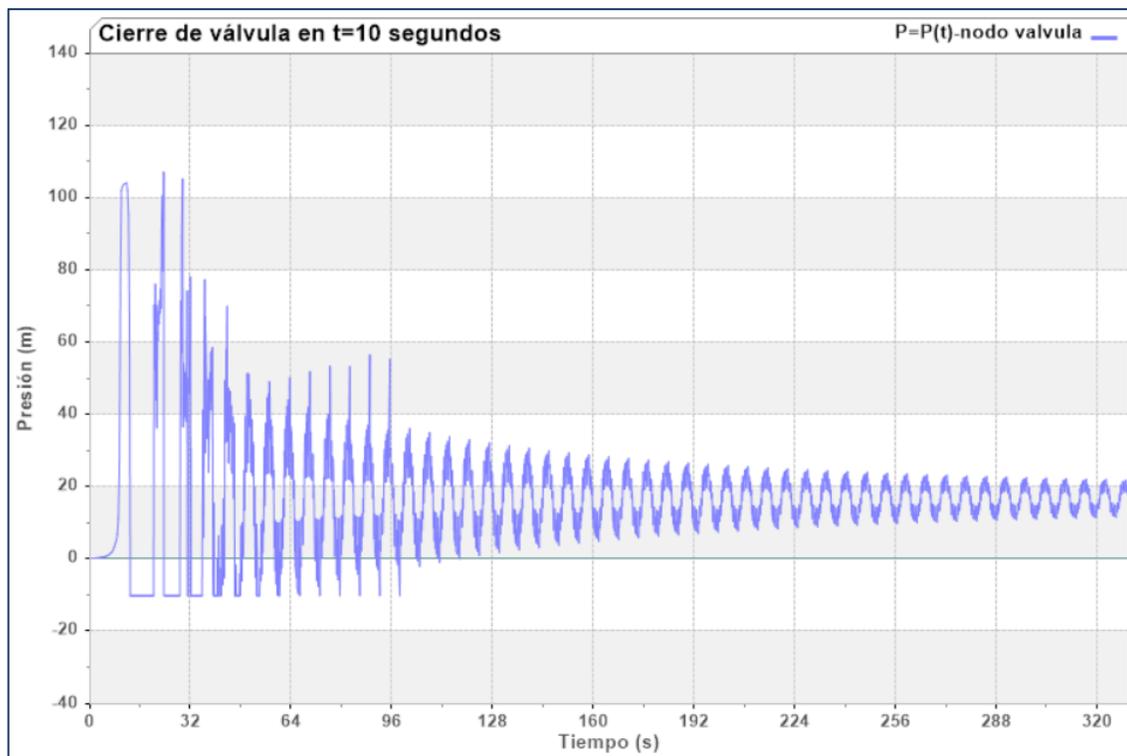


Figura 14 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 10 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras

La figura muestra la presión en el nodo en función del tiempo de simulación, se observa como la presión aumenta al instante en que se cierra la válvula llegando a una presión de 104.24 mca, menor que al cerrar la válvula en los 5 segundos, luego empieza a disminuir a una presión negativa de -10 mca se mantiene en esta presión durante aproximadamente 10 segundos para luego volver a aumentar; así se van generando oscilaciones en el transcurso del tiempo hasta que en un punto las presiones alcancen el equilibrio.

#### Válvula:

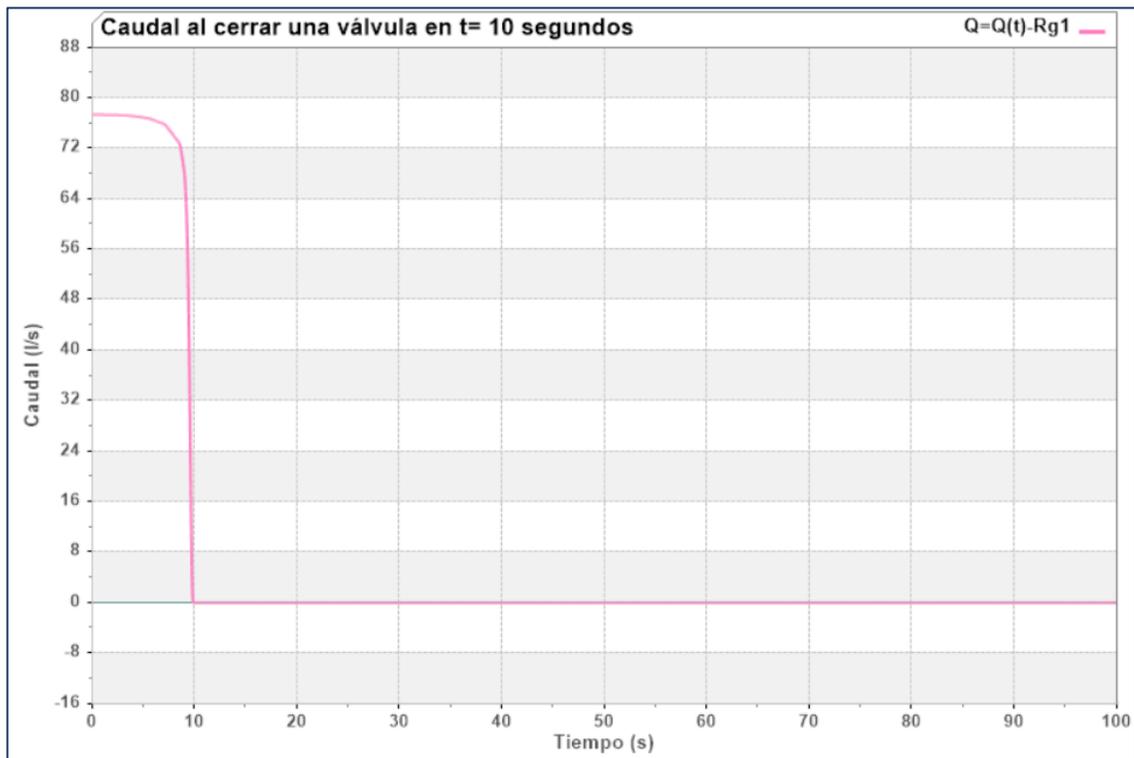
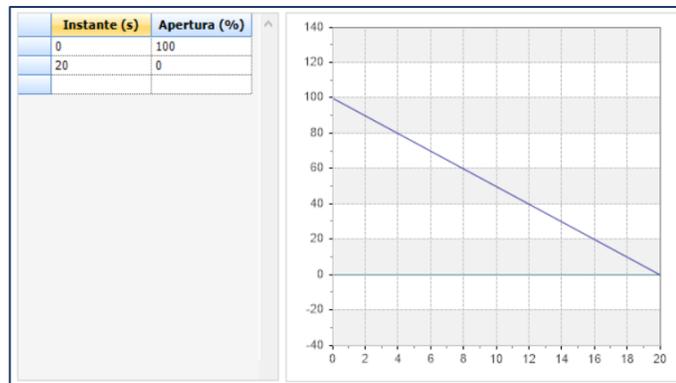


Figura 15 Variación del caudal para un cierre de 10 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.

La Figura 15 representa como el caudal disminuye al cerrar la válvula, aproximadamente a los 7 segundos el flujo disminuye hasta que en el tiempo de cierre de 10 segundos el caudal llega a ser nulo.

#### Cierre en $t = 20$ segundos

En el siguiente escenario se evalúan los transitorios por cierre de válvula en un tiempo de 20 segundos.



**Tubería:**

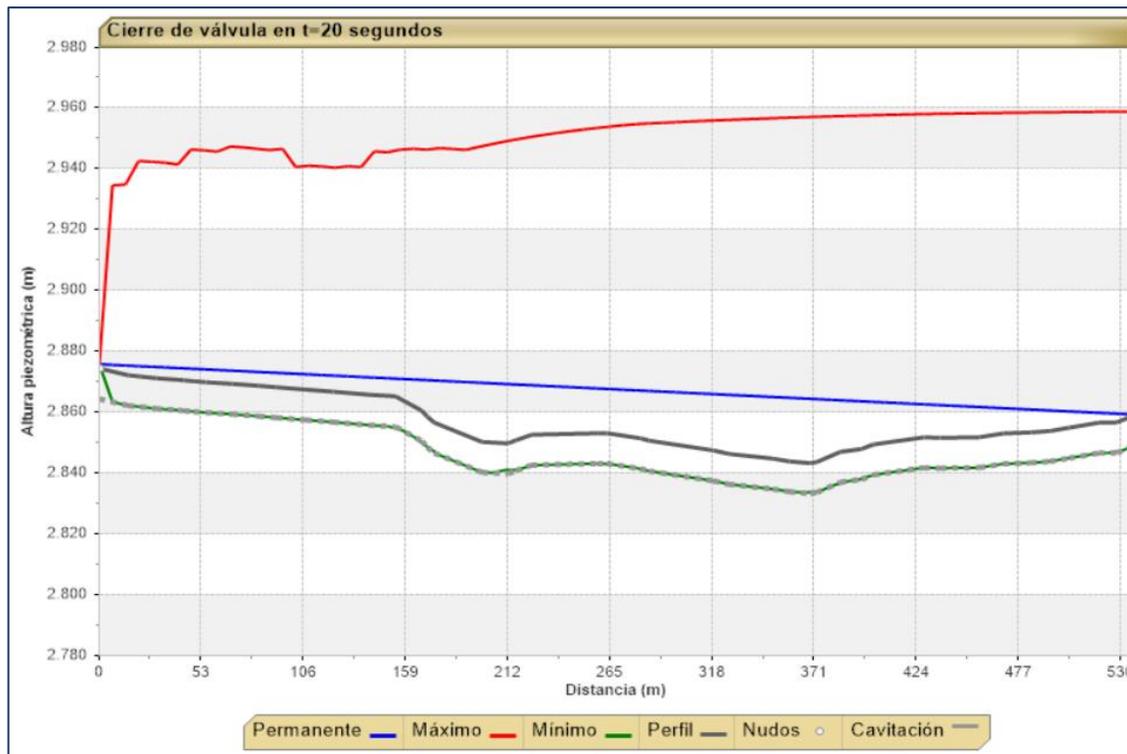


Figura 16 Envolturas piezométricas para un cierre de 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Tomando en cuenta la cota del perfil de la conducción, la presión máxima que se produce en la línea de conducción que corresponde donde está ubicada la válvula es de 100.05 mca, recordando que la válvula está ubicada en la cota 2859.012 m. Si bien es cierto este valor de sobrepresión máxima es inferior a la presión que puede soportar la tubería que es de 101.9mca. Sin embargo, está muy cerca del valor por lo que la tubería estaría en riesgo de sufrir daños.

Respecto a la cavitación, sucede igual que los eventos anteriores, la línea de presiones mínimas está en el mismo nivel de la línea de cavitación, por lo que se verifica que 20 segundos no es suficiente para evitar este fenómeno, además de que se están generando presiones negativas en el sistema.

Como se explicó anteriormente se deberá encontrar un tiempo de cierre óptimo para la válvula a fin de evitar tanto la cavitación como las presiones negativas en la conducción a gravedad.

Tabla 37 Sobrepresión para un tiempo de cierre de 20 segundos. Elaboración: Autoras

<b>Altura máxima</b>	<b>2959.06</b>	<b>mca</b>
<b>Cota de perfil</b>	2859.01	mca
<b>Presión máxima</b>	100.05	mca

### Nodos:

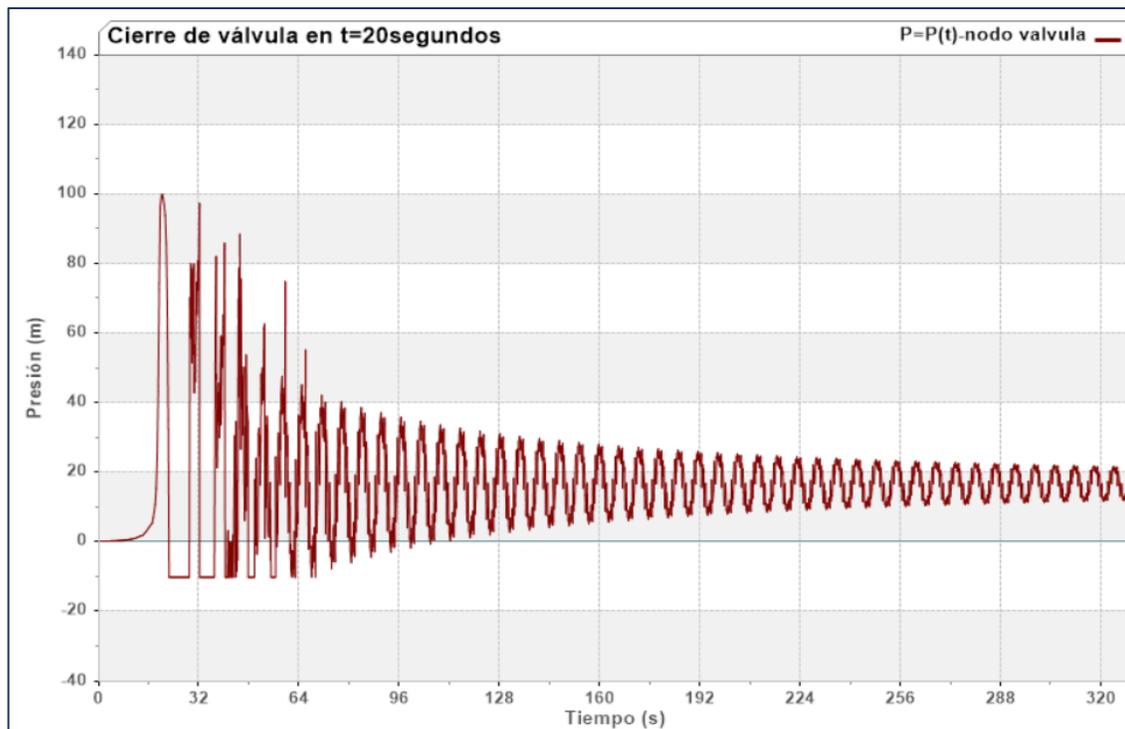


Figura 17 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 20 segundos. Fuente ALLIEVI. Elaboración: Autoras

La Figura 17 representa la presión en los nodos respecto al tiempo, se observa que a los 20 segundos que se cierra la válvula alcanza una presión de 100.05 mca, la cual es inferior a las presiones de los eventos anteriores, esto se da por lo que la válvula tendrá un mayor tiempo de cierre.

La oscilación durante el tiempo va disminuyendo hasta que llegue a un nuevo estado de equilibrio.

### Válvula:

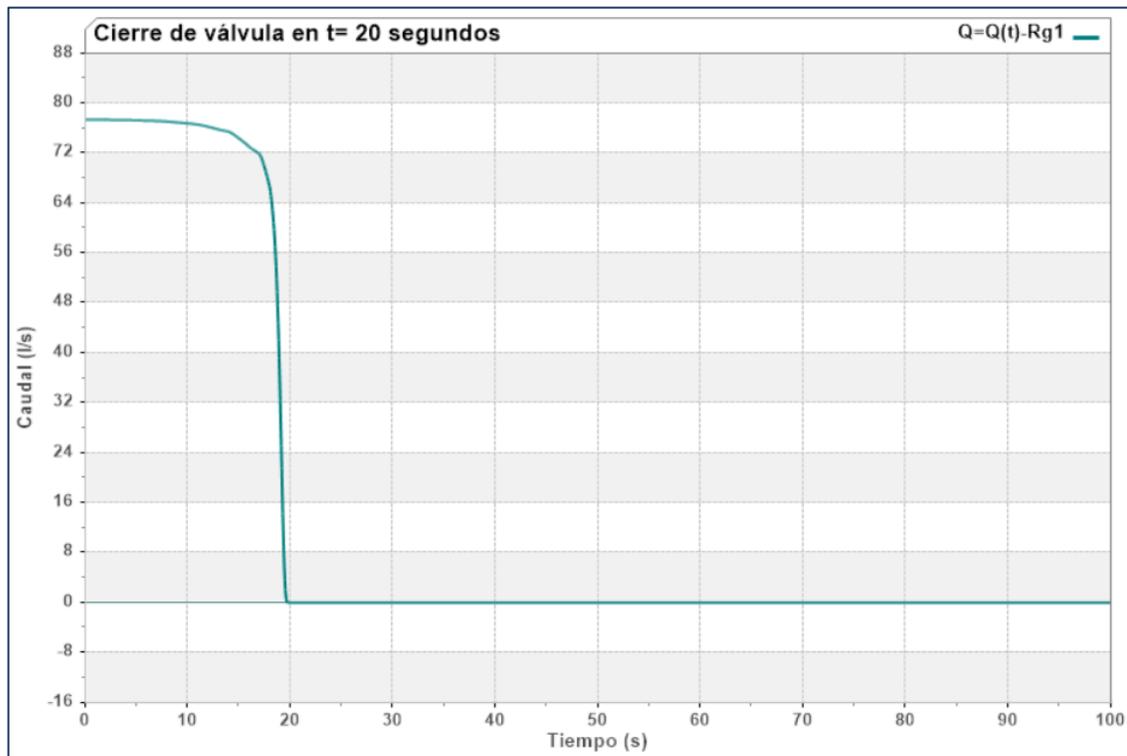


Figura 18 Variación del caudal para un cierre de 20 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.

En la Figura 18 se observa la disminución del caudal al cerrar la válvula, se verifica que aproximadamente a los 12 segundos el flujo empieza a reducir, hasta al llegar a los 20 segundos y hacerse nulo. Este parámetro cambiaría si se volviera abrir la válvula.

### Soluciones al cierre de válvula:

Se busca un tiempo óptimo, mayor a los tiempos de las simulaciones anteriores, en el que se solucione el fenómeno de la cavitación, no existan presiones negativas, ni sobrepresiones que provoquen daños en la tubería.

Luego de varias simulaciones se encontró que, si se cierra la válvula a los 90 segundos, se evita la cavitación en todos los puntos de la tubería de la línea de conducción. Sin embargo, como indica la Figura 19 en algunos tramos de la conducción, la línea de presiones mínimas está por debajo del perfil de la conducción, lo que significaría presiones negativas en el sistema, tal como se muestra en la siguiente figura.

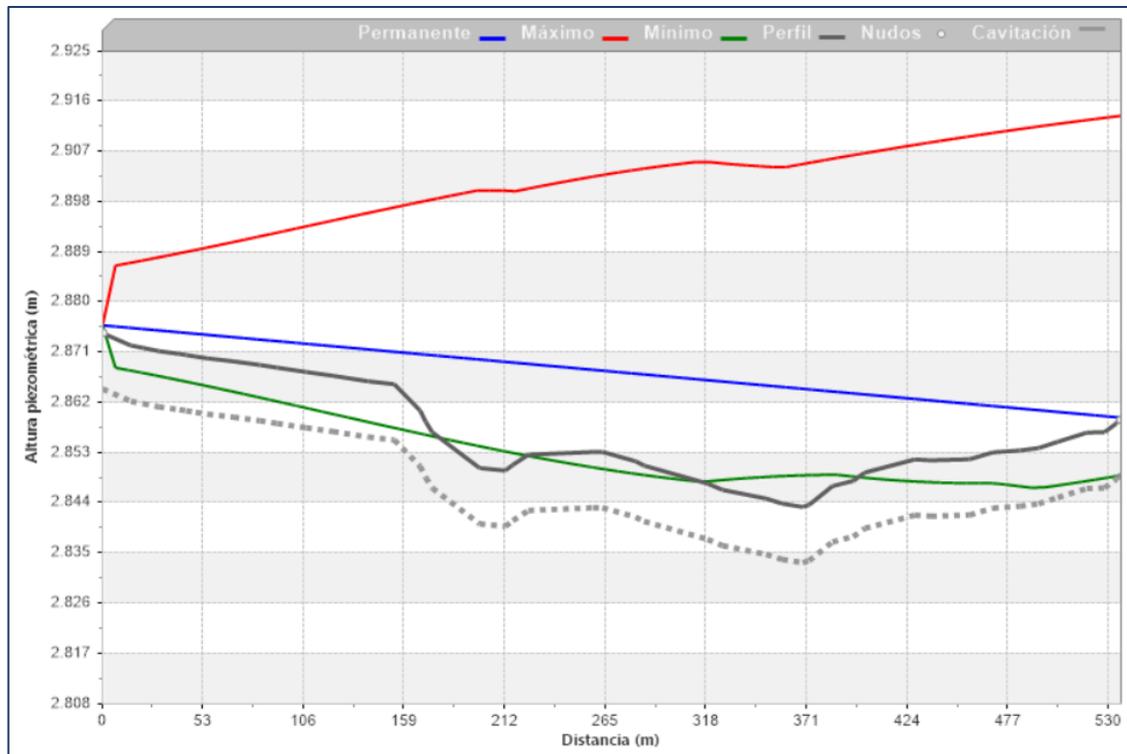


Figura 19 Envolturas piezométricas para un cierre de 90 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

### Cierre en 120 segundos

Tras varias simulaciones se estableció un tiempo óptimo de cierre  $T_c=120$  segundos, en el que se evite presiones negativas en la conducción a gravedad; suponiendo un cierre lineal de 100% a 0% de abertura.

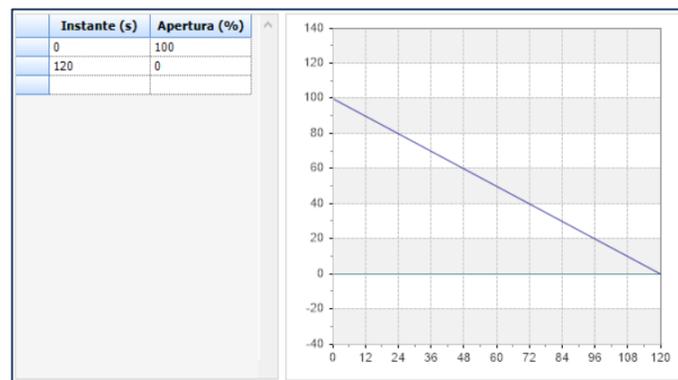


Figura 20 Cierre lineal de la válvula en 120 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

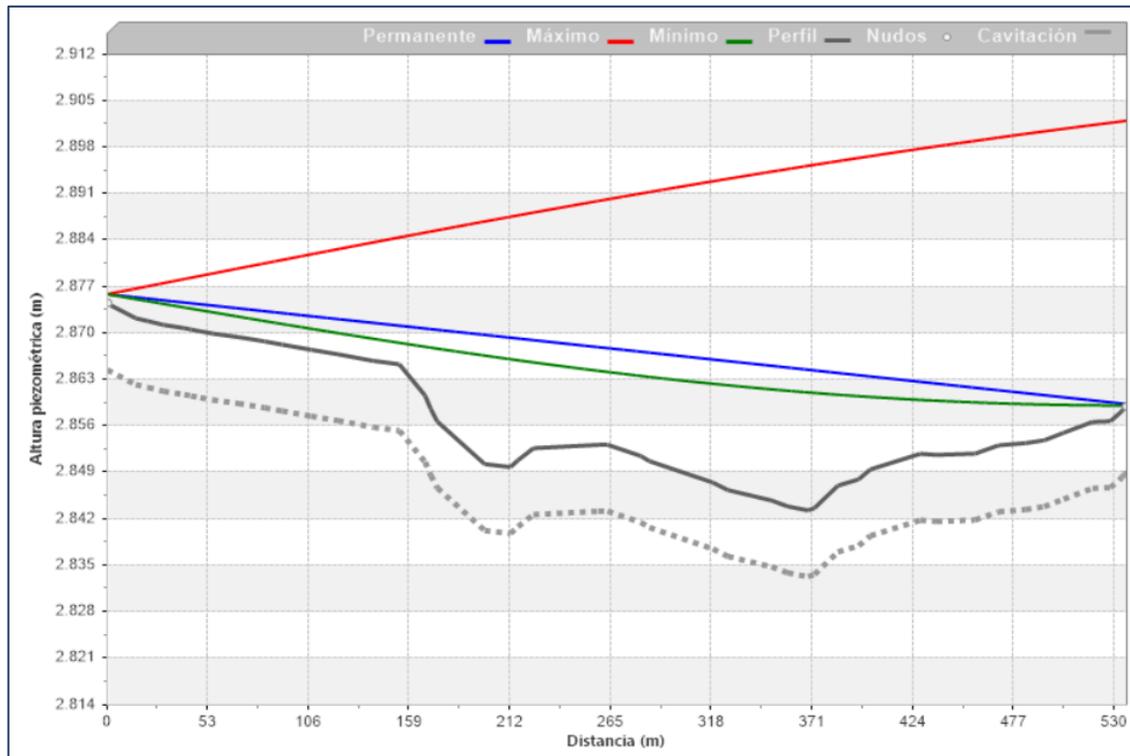
**Tubería:**

Figura 21 Envolventes piezométricas para un cierre de 120 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la Figura 21 se puede observar la envolvente de alturas piezométricas máximas y mínimas en la conducción, donde se observa que la altura máxima es de 2902.04 mca en el nudo de la válvula, generando una presión de 43 mca y la altura mínima es de 2859.15 mca, la cual es más alta a la cota final del perfil de la conducción por lo que no hay presiones negativas que era el objetivo con este tipo de cierre lento.

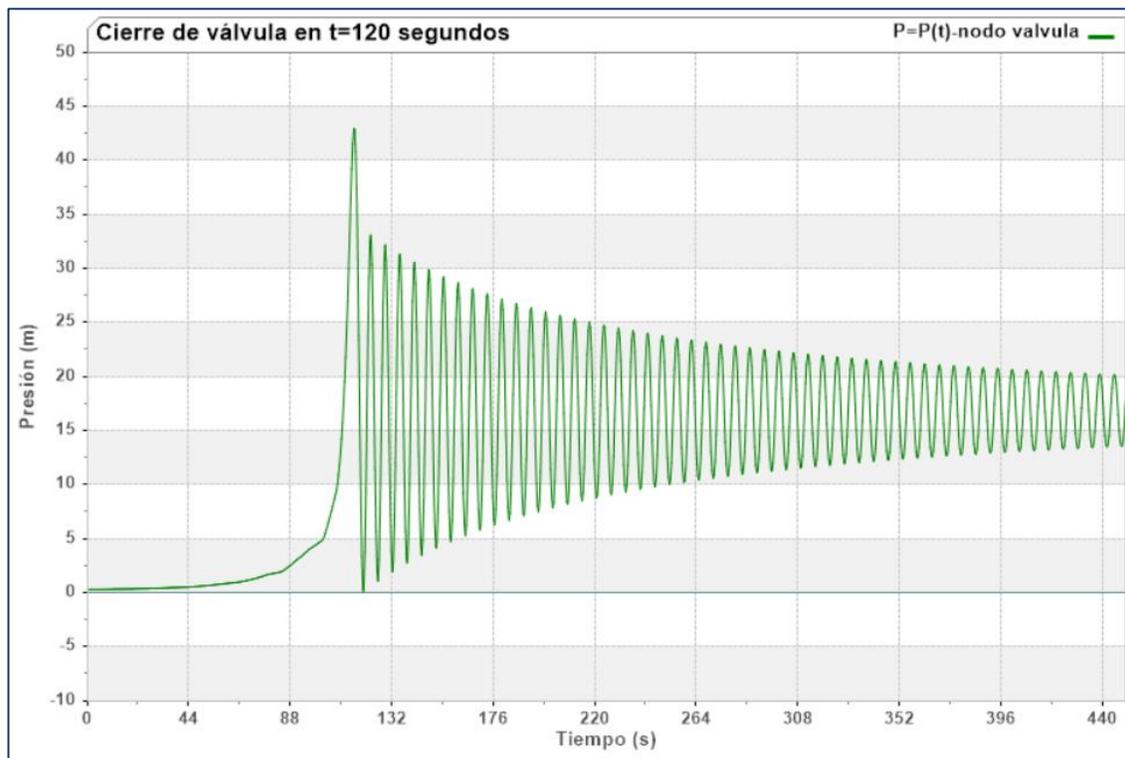
**Nodos:**

Figura 22 Figura 17 Presión en función del tiempo para un cierre de la válvula de 20 segundos. Fuente ALLIEVI.  
Elaboración: Autoras

En la figura anterior se muestra las presiones en los nodos al cerrar la válvula a los 120 segundos, se verifica que en ese tiempo alcanza la presión máxima, menor a la admisible de la tubería, luego inmediatamente baja y vuelve a subir, provocando oscilaciones a lo largo del tiempo, hasta alcanzar el equilibrio.

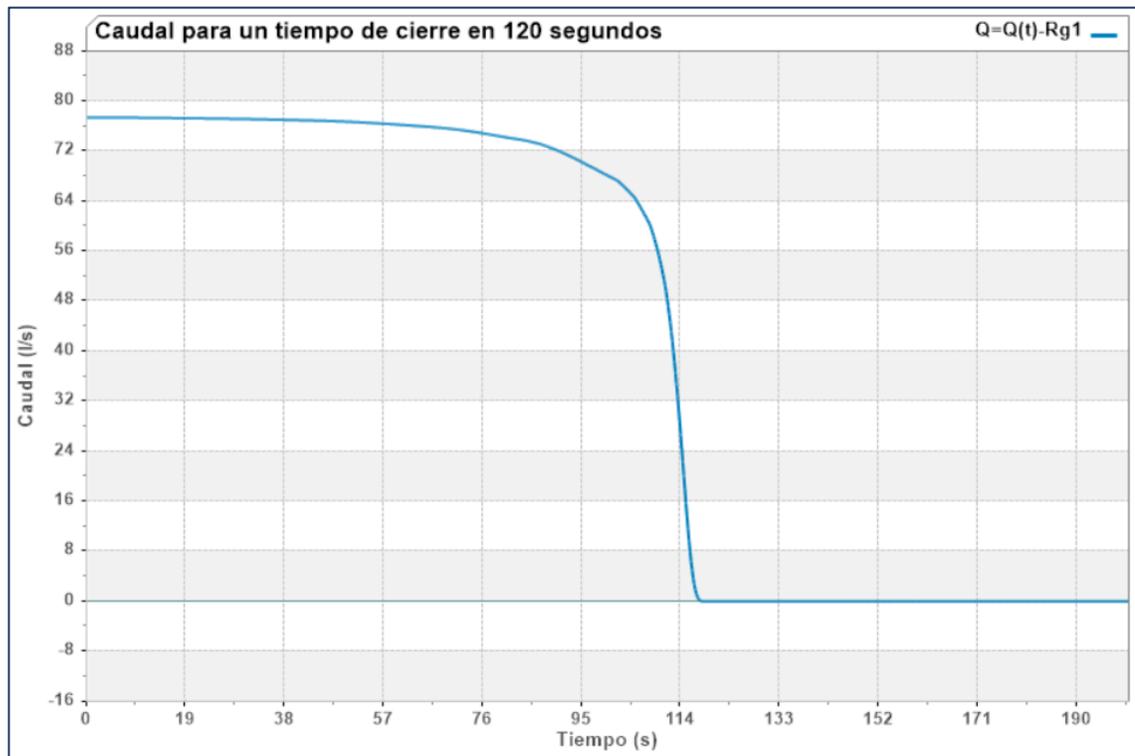
**Válvula:**

Figura 23 Variación del caudal para un cierre de 120 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras.

En la Figura 23 se observa que aproximadamente en los primeros 76 segundos de cierre la disminución de caudal es bien pequeña, y en el tiempo restante se produce la disminución total del caudal lo cual no es acorde al funcionamiento de una válvula.

Una buena alternativa para un correcto cierre de la válvula es cerrar en dos etapas, y este caso se lo puede realizar hasta en un tiempo menor a los 120 segundos, se opta por un cierre de 20 segundos, en donde en los primeros 5 segundos hasta el 12% de abertura y 15 segundos de cierre de 12% al 0%.

**Cierre de válvula en dos etapas**

Para controlar las sobrepresiones y presiones negativas en la simulación, se cierra la válvula en dos etapas.

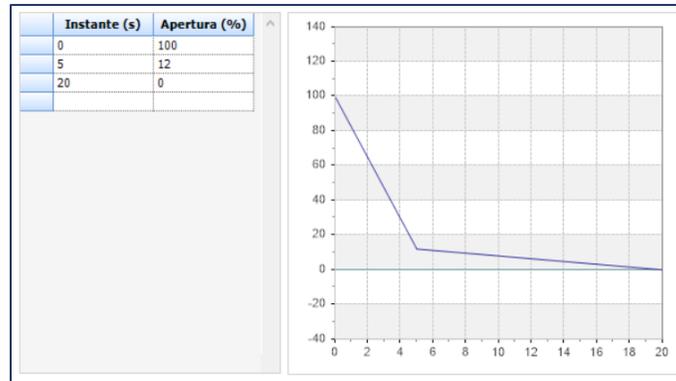


Figura 24 Cierre de la válvula en dos etapas. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

## Tubería:

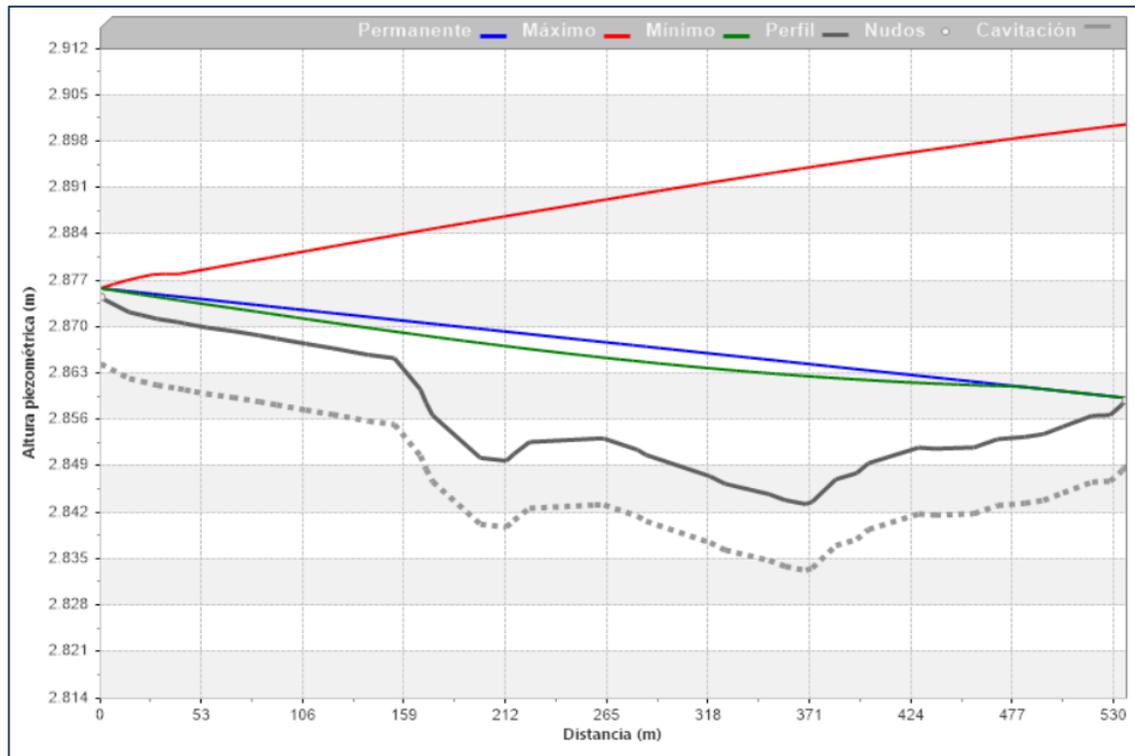


Figura 25 Envolventes piezométricas para un cierre en dos etapas Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

La Figura 25 representa las envolventes al cerrar la válvula en dos etapas, a los primeros 5 segundos dejando una apertura del 12% y a los 15 segundos restantes cerrándola completamente.

Se observa que con el tiempo de cierre propuesto controlado en dos etapas se obtienen resultados mejores en lo que se refiere a sobrepresiones generadas. Donde la altura máxima

de presión disminuyó de 2959.06m (cierre en 20 segundos) 2900.64m generando una presión máxima de 41.63 mca, la cual no supera la presión admisible de la tubería (109 mca). Respecto a la envolvente de alturas piezométricas mínimas está por encima de la cota del perfil de la conducción, por lo que evidencia que no hay presiones negativas ni cavitación.

El cierre de la válvula en 20 segundos en dos etapas, sería una alternativa de solución para evitar los fenómenos transitorios al cerrar la válvula en el sistema.

Se realiza una comparación de gráficas de envolventes de alturas piezométricas con un tiempo de cierre de 20 segundos, el cual generaba sobrepresiones, presiones negativas y cavitación; con el tiempo de cierre en dos etapas en el que se da solución a los fenómenos mencionados.

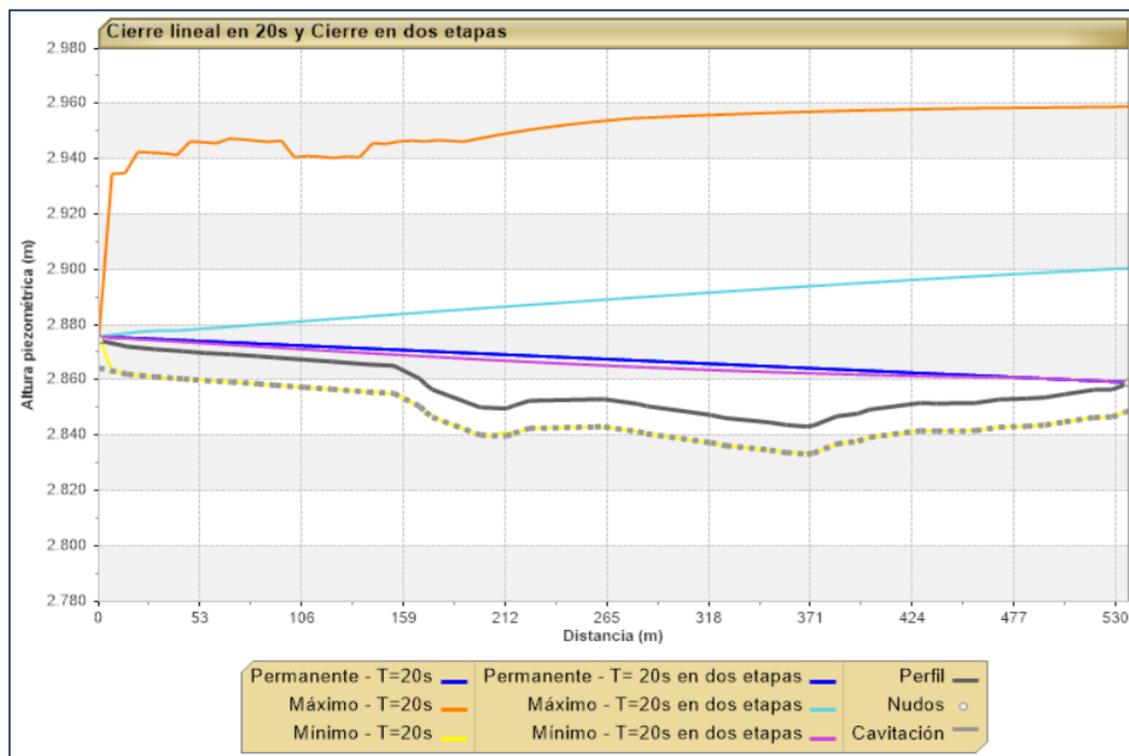


Figura 26 Comparación de envolventes piezométricas para un cierre de 20 segundos lineal y un cierre de 20 segundos en dos etapas Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

La Figura 26 muestra la comparación entre un tiempo de cierre lineal de 20 segundos y un tiempo de cierre en dos etapas de 20 segundos, se visualiza la sobrepresión existente al cerrar la válvula al primer tiempo llegando a una altura máxima de 2959.06 m, la cual genera una sobrepresión de 100.05 mca, muy cercana a la presión admisible de la tubería (101.9 mca),



sin embargo al cerrar la válvula a los 120 segundos se visualiza como se soluciona este problema en donde la presión máxima producida es de 41.63 mca, inferior a la admisible, por lo que se evitaría daños en la tubería.

Además, se observan las presiones negativas (línea amarilla) que se generan al cerrar la válvula a los 20 segundos y como las mismas se solucionan al cerrar la válvula en dos etapas. La línea de presiones mínimas en el cierre de 20 segundos coincide con la a línea punteada de cavitación que como se explicó anteriormente se produciría este fenómeno, sin embargo, al cerrar la válvula en dos etapas se puede observar en la magenta (presión mínima) que ha aumentado, solucionando así las presiones negativas y la cavitación a lo largo de la línea de conducción a gravedad.

*Tabla 38 Comparación entre un cierre lineal de 20 segundos y un cierre en 20 segundos en dos etapas Elaboración: Autoras*

	<b>Tiempo de cierre líneal en 20 segundos</b>	<b>Tiempo de cierre de 20 segundos en dos etapas</b>
<b>Presiones máximas</b>	100.05 mca	41.63 mca
<b>Presiones mínimas</b>	-10 mca	0.33 mca
<b>Cavitación</b>	SI	NO

### **3.2.3 Tercer escenario: Apertura de válvula**

Una vez que la válvula se cierra, esta se puede volver a abrir y eventualmente volver a cerrar, generando nuevas ondas de sobre- presión. La maniobra de apertura de válvula también genera un fenómeno transitorio en la línea de conducción, generalmente de menor impacto que el cierre de la válvula, sin embargo, igual es importante realizar su estudio.

#### **Régimen Permanente**

**Nodos:** En este caso la línea de conducción se encuentra actuando bajo régimen permanente cuando la válvula se encuentra cerrada. Por lo tanto, las presiones actuantes (P) en los nodos son la diferencia entre la altura de la línea piezométrica (H) y la cota del terreno en la que se encuentra el nodo.

Tabla 39: Resultados en los nodos bajo régimen permanente en apertura de válvula. Realizado en ALLIEVI

	Nombre	H(m)	Pr(m)
1	V1	2875.90	16.89
2	N1_fin	2875.90	1.40
3	N1	2875.90	1.40
4	N2	2859.25	0.24
5	N2_fin	2859.25	0.24

**Válvula:** El hecho de que la válvula se encuentre cerrada, o si existieran bombas paradas significa que el caudal en régimen permanente es cero. En estos casos se puede asignar directamente caudal nulo para evitar que las condiciones del régimen se realicen bajo un gran número de iteraciones.

Tabla 40: Resultados en la válvula bajo régimen permanente en apertura de válvula. Realizado en ALLIEVI.

	Nombre	Ramal	Q (l/s)	Perd. (m)	Apertura (%)
1	Rg1	1	0.00	Cerrada	0.00

### Apertura en t= 5 segundos

Se realiza la apertura completa de la válvula en un tiempo de 5 segundos, simulando una maniobra abrupta sobre este elemento.

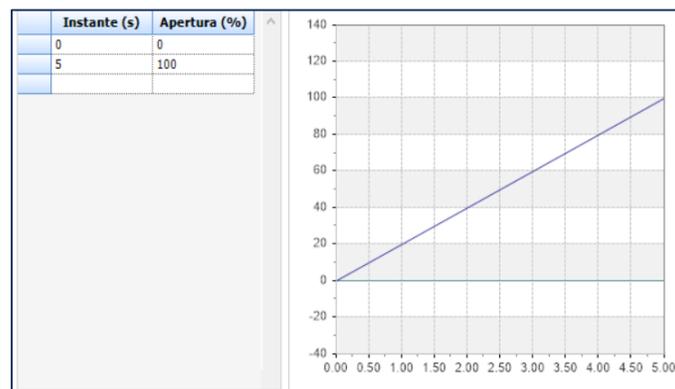


Figura 27: Apertura lineal de la válvula en 5 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Se obtienen los siguientes resultados en el programa:

## Tubería:

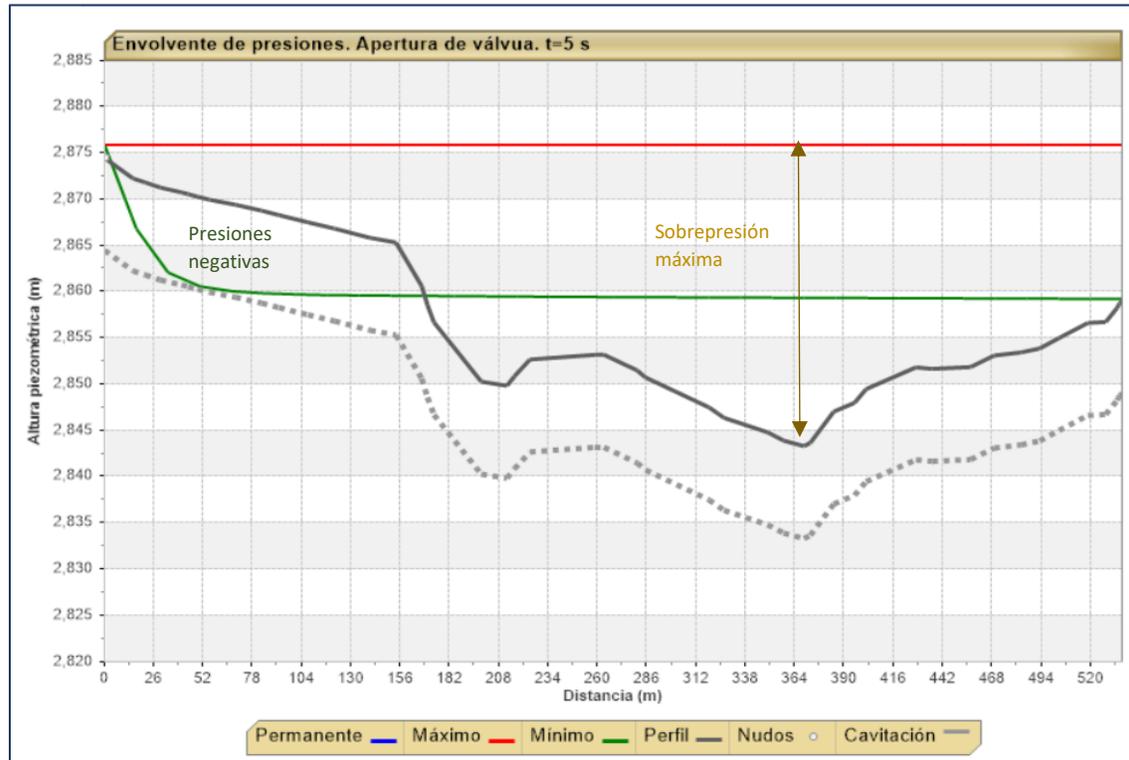


Figura 28: Envolventes piezométricas para una apertura de 5 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la gráfica de envolvente de presiones se puede observar que la línea de presión máxima se mantiene constante a lo largo de la línea de conducción, siendo la misma presión que actúa en el régimen permanente en este escenario. La sobrepresión máxima se dará en el punto de cota más baja en la línea de conducción.

Tabla 41: Sobrepresión máxima en la línea de conducción en apertura de válvula en t=5s.

<b>Altura línea piezométrica (cte)</b>	2875.899	mca
<b>Cota de perfil</b>	2843.336	mca
<b>Sobrepresión</b>	32.564	mca

Esta sobrepresión máxima por apertura de válvula en 5 segundos es menor a la capacidad nominal de la tubería

No se da el fenómeno de cavitación, ya que no existen presiones inferiores a la presión de vapor, la línea de cavitación (línea gris entrecortada) está por debajo de la línea de presión mínima (línea verde), a los 50 metros existe una aproximación a la presión de vapor, pero no se da cavitación.

La línea de presión mínima disminuye a medida que se acerca a la válvula. La presión en el desripiador tiene un valor de cero y hasta los 170 metros la línea de presiones mínimas se encuentra por debajo de la topografía del terreno, lo que implica que se dan presiones negativas en este tramo. A partir de los 170 metros de conducción las presiones mínimas tienden a estabilizarse y son positivas porque la línea de presiones mínimas se encuentra sobre la topografía del terreno.

### Válvula:

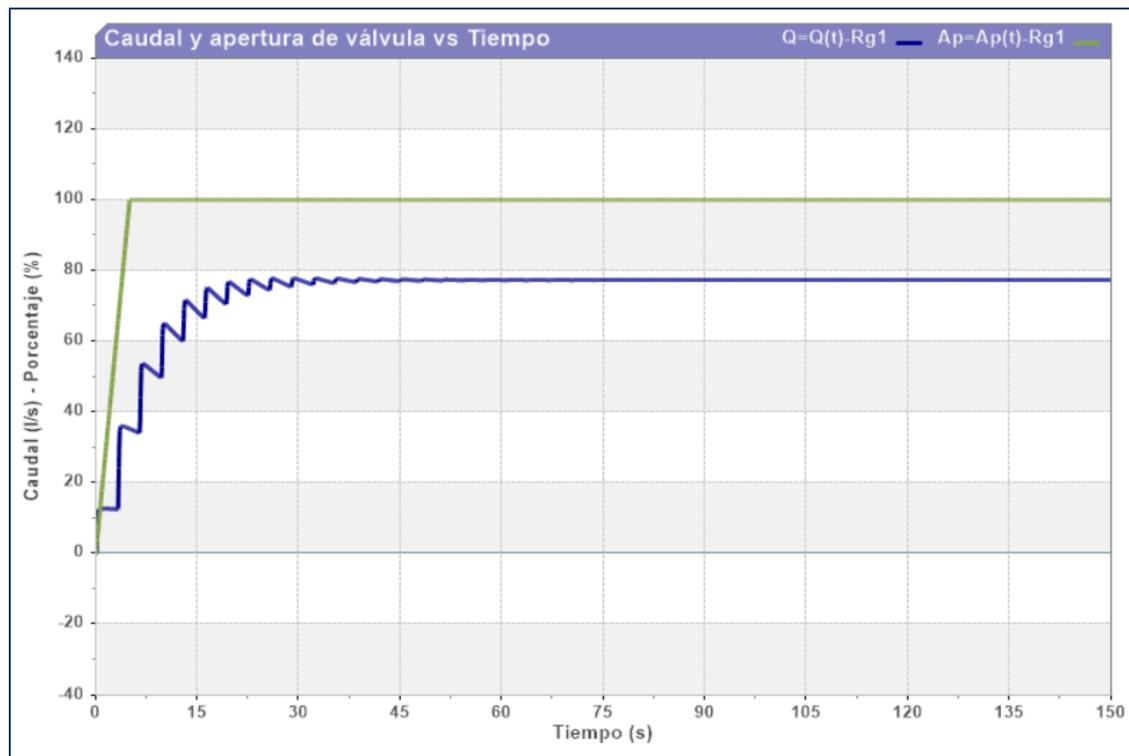


Figura 29: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 5 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

La línea verde representa la apertura de la válvula, tiene una apertura lineal hasta los 5 segundos, a partir de este tiempo se encuentra abierta completamente. La línea azul representa el paso de caudal por la válvula, en los primeros segundos el caudal es creciente y presenta oscilaciones hasta estabilizarse y alcanzar la capacidad de la tubería aproximadamente a los 40 segundos.

## Depósitos:

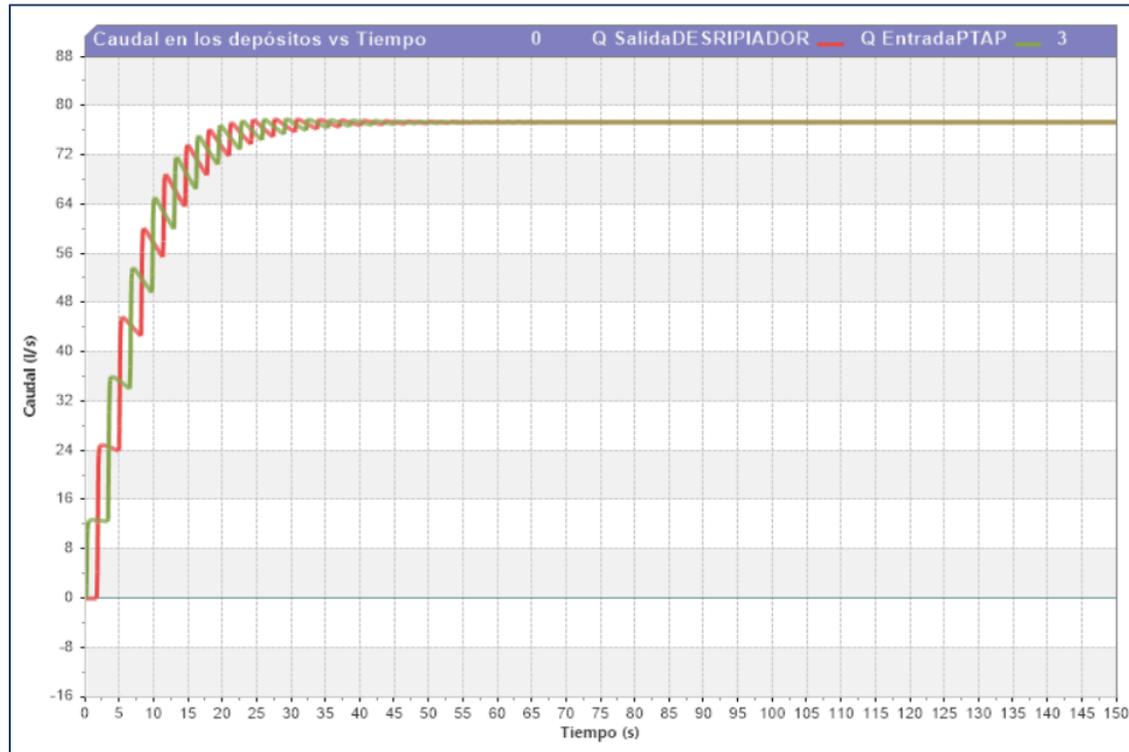


Figura 30: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 5 segundos Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras

La línea roja representa el caudal de salida del desripiador y la línea verde el caudal de entrada a la PTAP. En  $t=0$  segundos la válvula se encuentra cerrada, por lo que no hay demanda de caudal en la planta, lo que implica que no hay salida de caudal del desripiador. A medida que incrementa el tiempo y la válvula se abre progresivamente la demanda de caudal en la planta es mayor y el caudal de salida del desripiador aumenta, hasta que aproximadamente a los 40 segundos, este comportamiento se estabiliza y el caudal que sale del desripiador es el mismo que llega a la planta de tratamiento, aguas abajo.

### Apertura en $t=10$ segundos

Se realiza la apertura completa de la válvula en un tiempo de 10 segundos, simulando una maniobra rápida sobre este elemento.

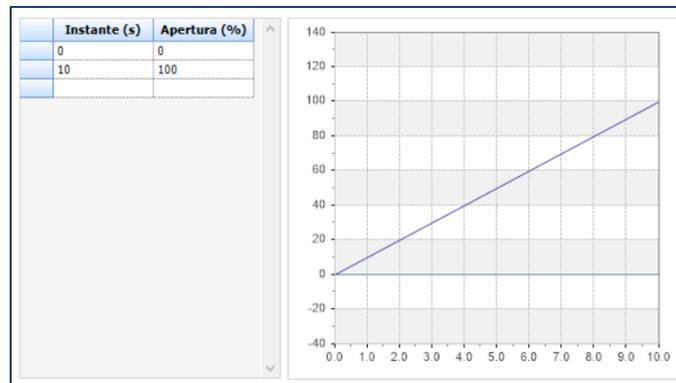


Figura 31: Apertura lineal de la válvula en 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Se realiza un análisis en el programa, para estudiar el comportamiento en este tiempo de apertura

### Tubería:

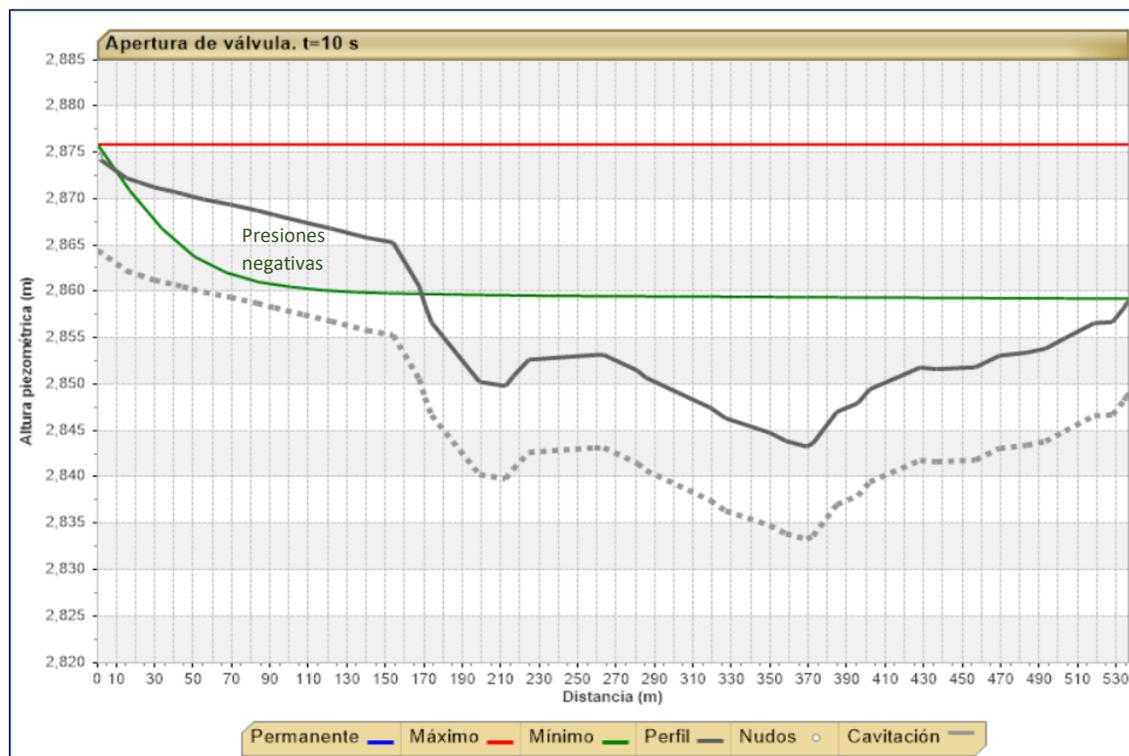
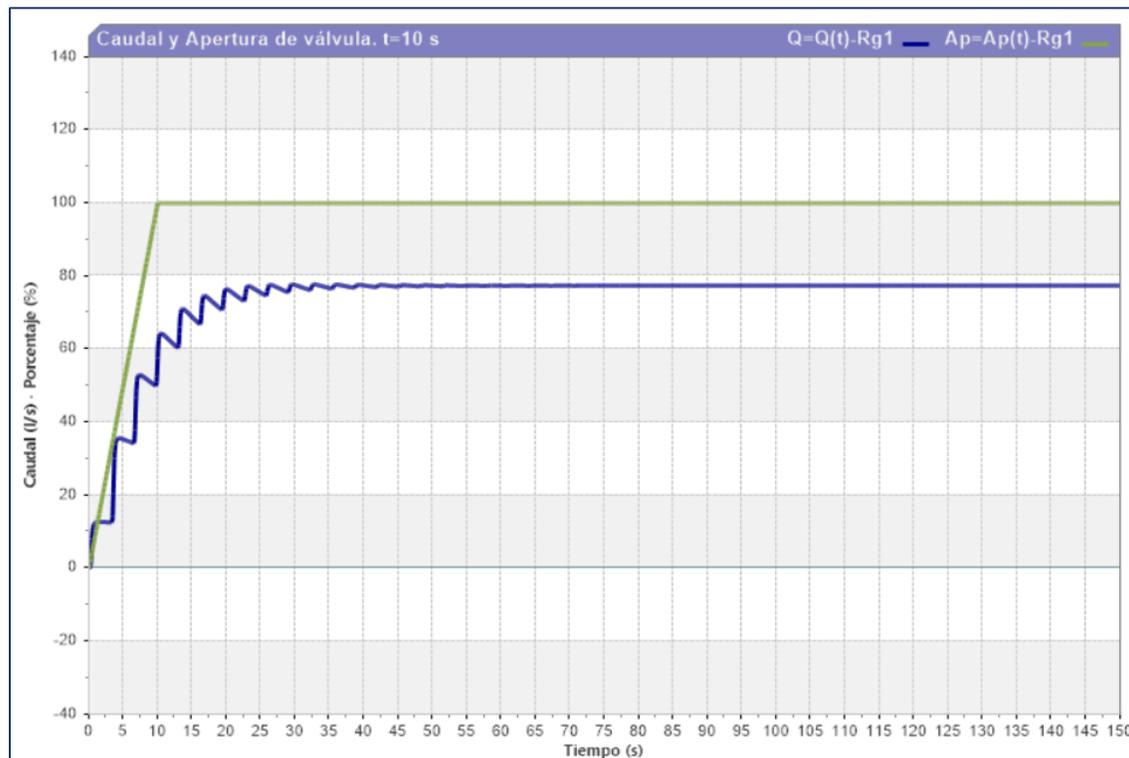


Figura 32: Envoltentes piezométricas para una apertura de 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Se observa que, a mayor tiempo de apertura de la válvula, existe menor riesgo de cavitación. La línea roja que representa la presión máxima se mantiene constante a lo largo de la línea de conducción, la presión mínima (línea verde) se encuentra por debajo de la tubería hasta los 170 m aproximadamente lo que significa que habrá presiones negativas en este trayecto.

A partir de este punto en adelante, las presiones sobrepasan la topografía del terreno entonces no se darán depresiones.

### Válvula:



En la gráfica anterior la línea verde representa la apertura lineal de la válvula en un tiempo de 10 segundos, y la línea azul indica el paso de caudal por la válvula. El caudal inicialmente es cero y a medida que la apertura de la válvula es mayor, el flujo aumenta. De la misma manera que la apertura en un tiempo de 5 segundos, el flujo se estabiliza aproximadamente a los 40 segundos, a partir de este tiempo ya no se generan perturbaciones en la válvula.

## Depósitos:

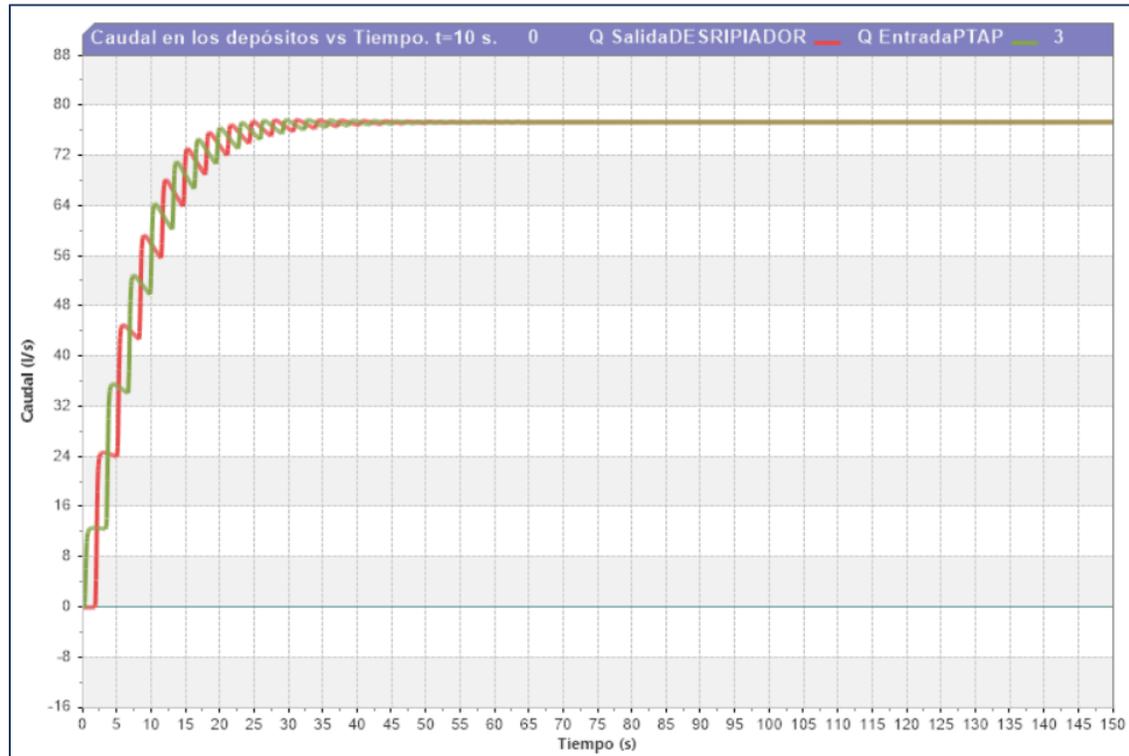


Figura 34: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 10 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la gráfica anterior se analiza el flujo de agua en los depósitos vs tiempo, el caudal de salida del desripiador aumenta a medida que la demanda en la plata de tratamiento crece, independientemente del tiempo de apertura se alcanza la capacidad de la tubería a los 40 segundos.

### Apertura en $t= 20$ segundos.

Se realiza la apertura de la válvula en un tiempo de 20 segundos de manera lineal.

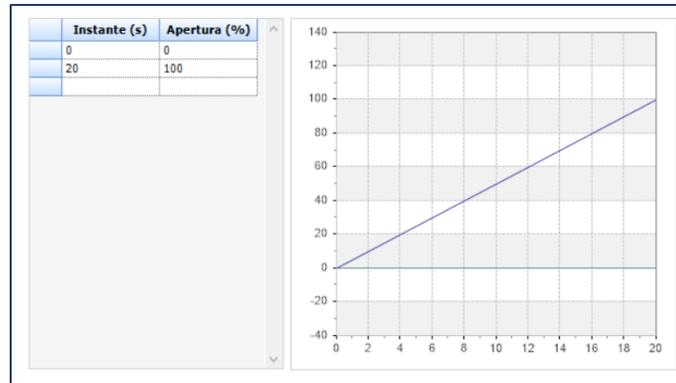


Figura 35: Apertura lineal de la válvula en 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

**Tubería:**

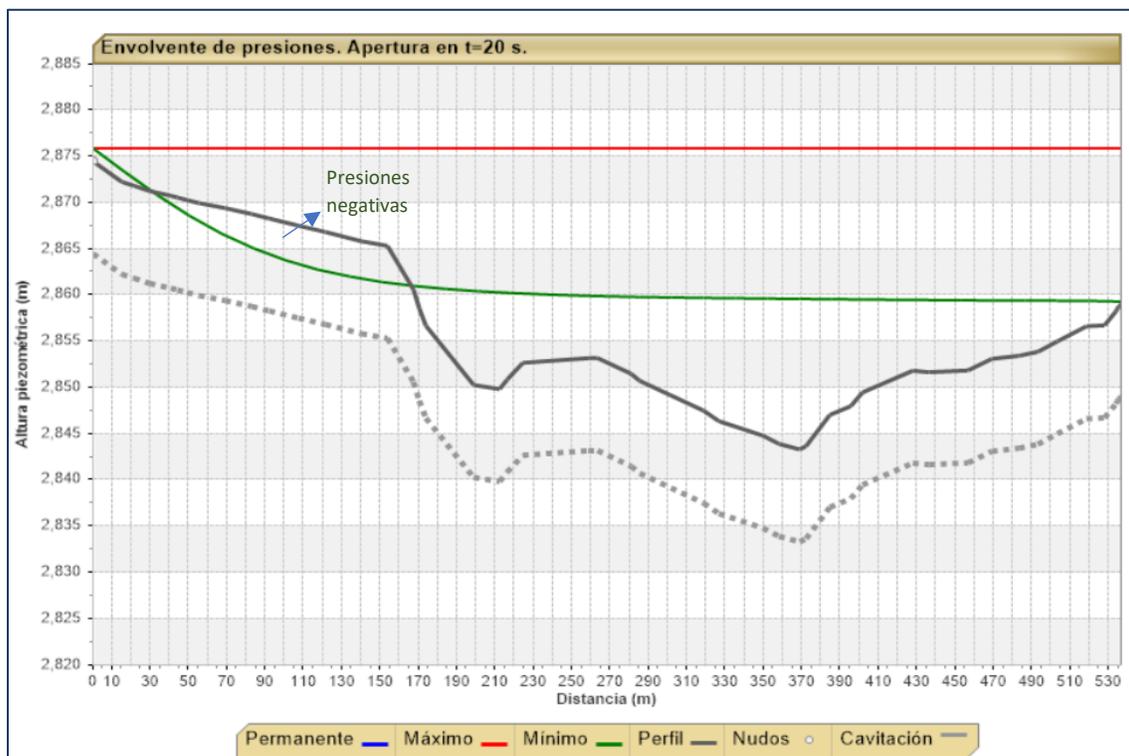


Figura 36: Envoltentes piezométricas para una apertura de 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

A mayor tiempo de apertura de la válvula se reduce el riesgo de cavitación y el tramo en el que se presentan presiones negativas es cada vez más corto, La línea de presión máxima (roja) es constante al igual que los casos anteriores ya que esta se da cuando el sistema actúa en régimen permanente. En este tiempo de apertura, no se soluciona el problema de depresiones ya que la línea de presiones mínimas se encuentra por debajo de la presión atmosférica (perfil del terreno).

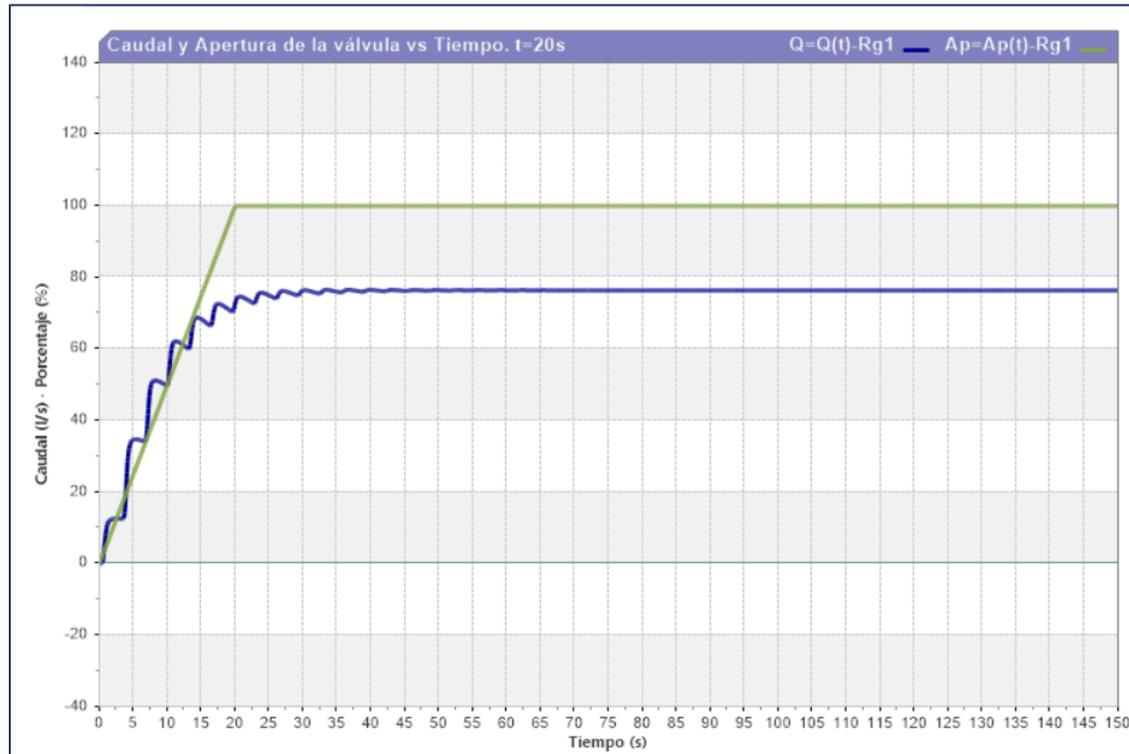
**Válvula:**

Figura 37: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 20 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la gráfica anterior se presenta los resultados del análisis transitorio en la válvula. Se observa en la línea verde la apertura lineal de la válvula en 20 segundos, mientras que la línea azul representa el paso de caudal por la válvula durante este fenómeno. A medida que se abre la válvula empieza el paso de agua y aumenta hasta estabilizarse en la capacidad de la tubería, cerca de los 80 l/s.

## Depósitos:

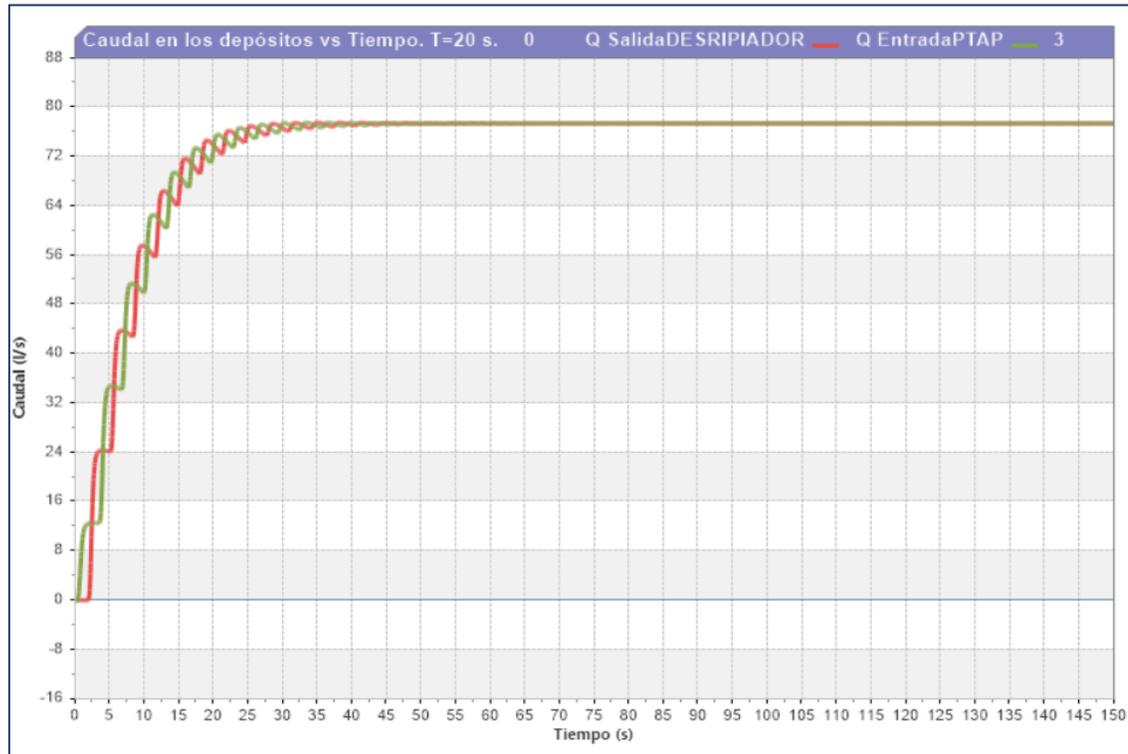


Figura 38: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Al igual que el análisis realizado en los depósitos en los tiempos de 5 y 10 segundos, el comportamiento a los 20 segundos indica que inicialmente al estar la válvula cerrada el caudal en  $t=0$  es igual a 0 tanto en la salida del desripiador como en la entrada a la PTAP. En un tiempo de 20 segundos el caudal que pasa por la tubería aun no llega a la capacidad de la tubería. Este caudal máximo se alcanza aproximadamente a los 40 segundos.

### Soluciones a la apertura de válvula

Se realizan varias simulaciones con distintos tiempos de apertura de válvula hasta encontrar el tiempo adecuado que evita las presiones negativas. Se plantean dos soluciones para la apertura de válvula: la primera realizando una apertura de manera lineal y la segunda realizando una apertura gradual en dos instantes de tiempo.

## Apertura en $t=40$ s

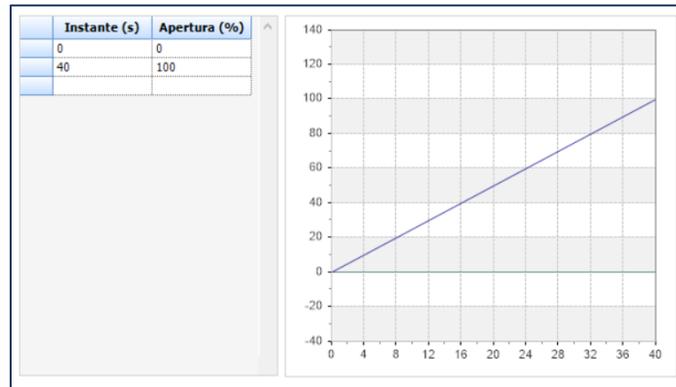


Figura 39: Apertura lineal de la válvula en 40 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Se realizan varias simulaciones, realizando ensayos prueba- error hasta obtener un tiempo tal que no se den presiones mínimas por debajo de la presión atmosférica, no exista cavitación, ni la presión máxima exceda la admisible según el material de la tubería. Encontrando que este problema se soluciona en un tiempo mínimo de 40 segundos, como indica la gráfica a continuación.

## Tubería:

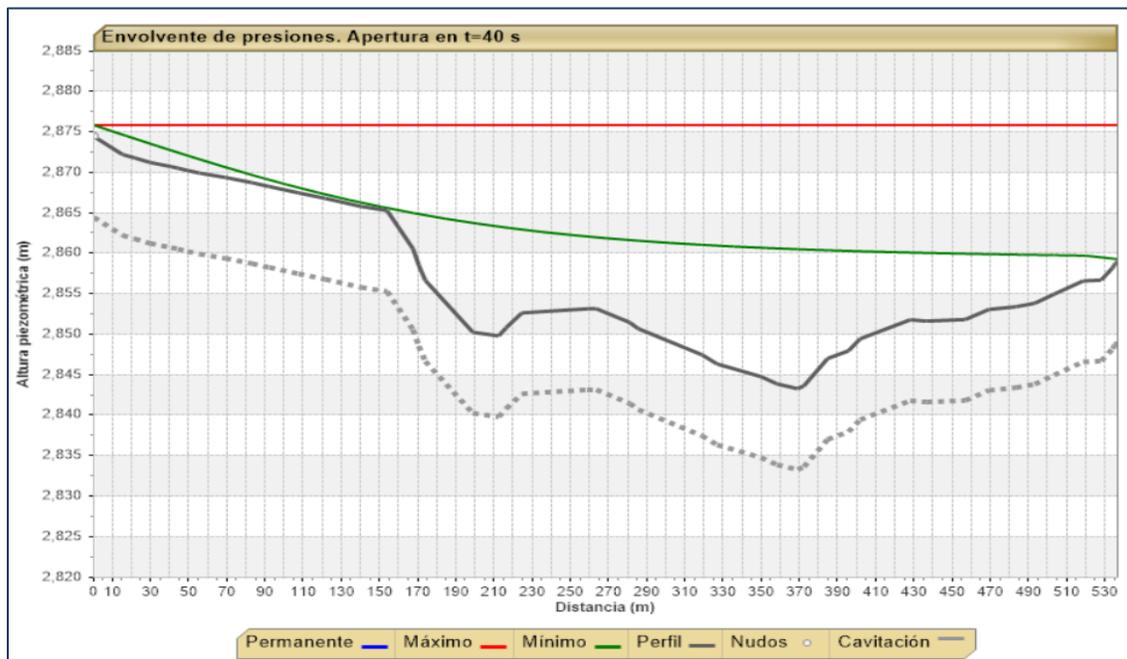


Figura 40: Envolturas piezométricas para una apertura de 40 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Se observa que en un tiempo de apertura de 40 segundos no se dan presiones negativas, las presiones mínimas son mayores a la presión atmosférica, por lo tanto, no existiría problemas de colapso de la tubería, sin embargo, a los 160 m de conducción estas presiones están muy próximas, por lo que sería recomendable que el tiempo de cierre sea mayor a 40 segundos.

### Válvula:

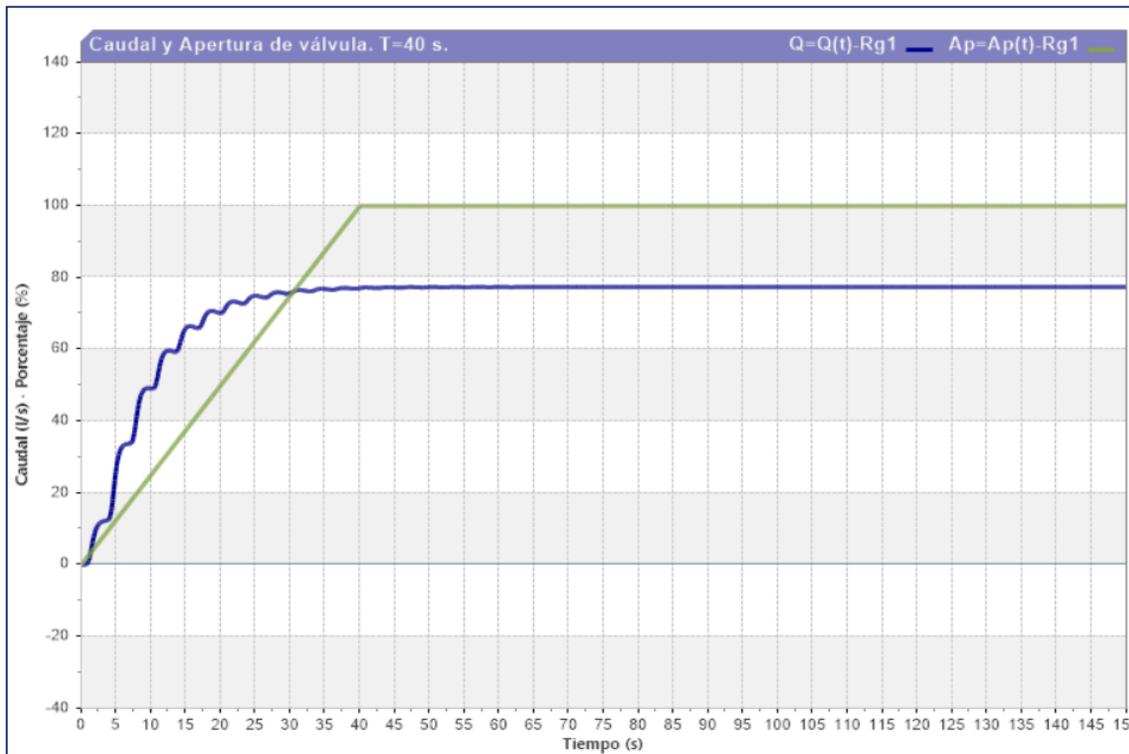


Figura 41: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura de 40 segundos. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

En la gráfica anterior se presenta la apertura y el caudal total que pasa por la válvula de compuerta en el momento de la manipulación de la misma. La línea verde representa la apertura lineal en  $t=40$  s, para que se del fenómeno transitorio, mientras que la línea azul representa el flujo de agua por la válvula, a medida que se abre el caudal aumenta y logra estabilizarse aproximadamente a los 40 segundos.

## Depósitos:

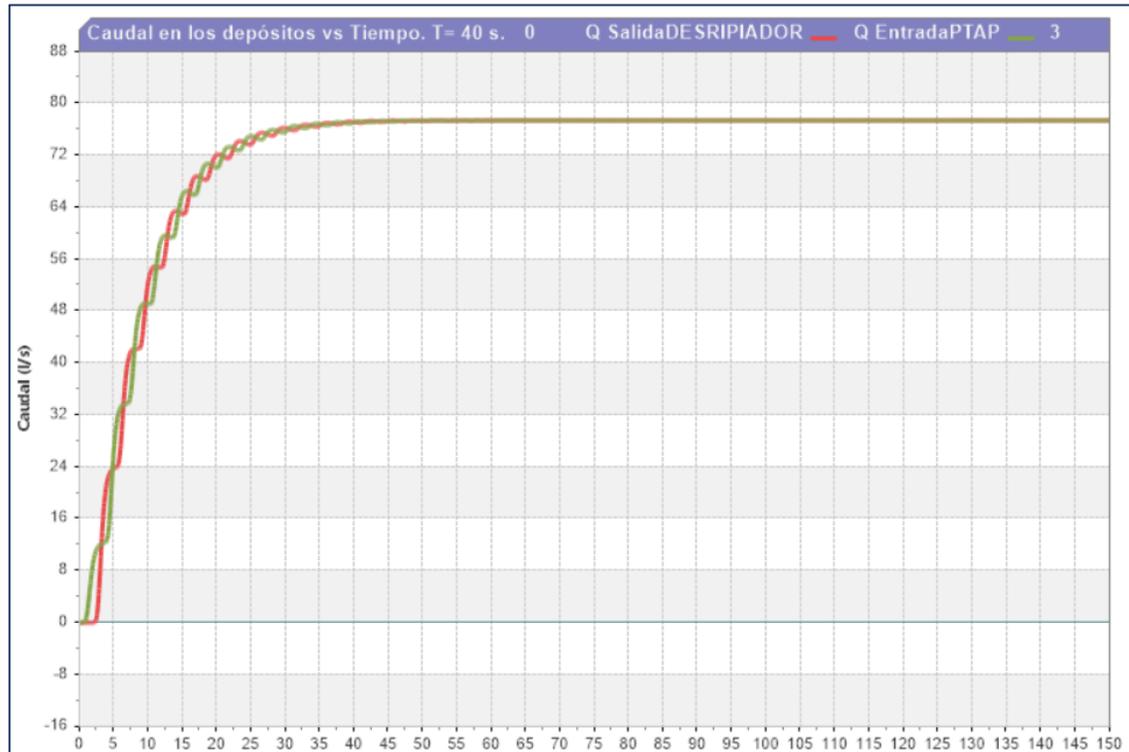


Figura 42: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura de 20 segundos Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

A los 40 segundos el caudal de salida del desripiador y el caudal de entrada a la planta de tratamiento se estabilizan, la válvula se encontrará completamente abierta y el caudal que puede fluir es la capacidad de la tubería, cerca de 80 l/s.

### Apertura en dos instantes de tiempos

Otra opción para realizar la apertura de la válvula sin generar problemas de presiones negativas, sobrepresiones y cavitación es ejecutar la maniobra en dos tiempos. A los 10 segundos la válvula tendrá una apertura de 20% y a los 20 segundos una apertura del 100%.

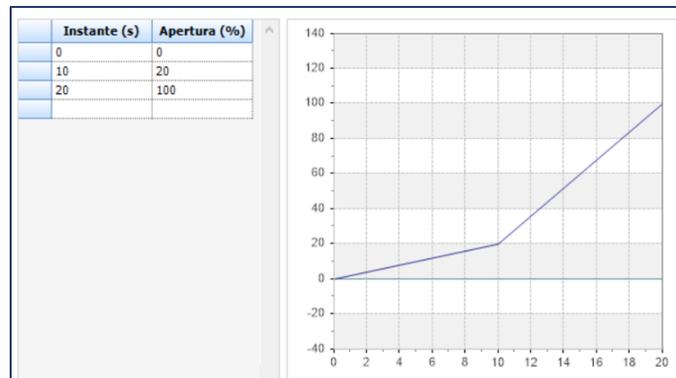


Figura 43: Apertura lineal de la válvula en dos instantes de tiempo Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

### Tubería:

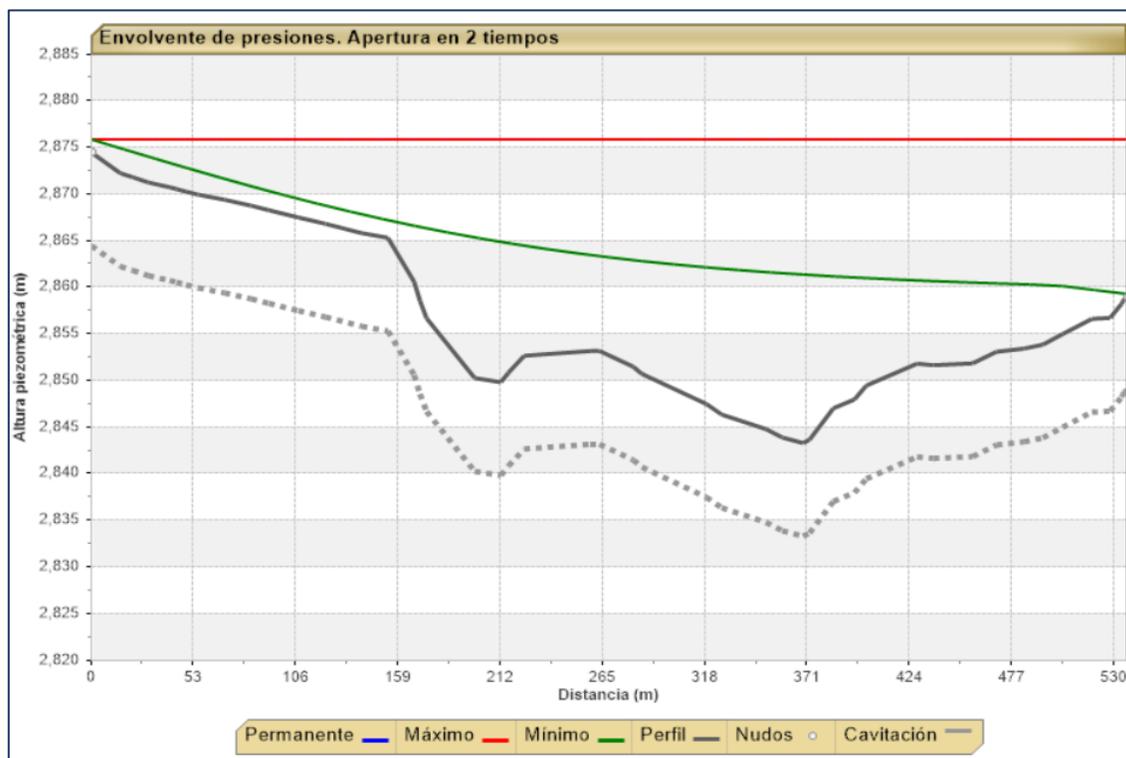


Figura 44: Envolturas piezométricas para una apertura en dos instantes de tiempo. Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

Al realizar la maniobra de apertura en 2 partes, en un tiempo total de 20 segundos, la línea de presiones mínimas se encuentra sobre el perfil de terreno, por lo que no hay presiones negativas, y la sobrepresión máxima es 32.56 mca, la cual no supera la presión admisible de la tubería (1Mpa).

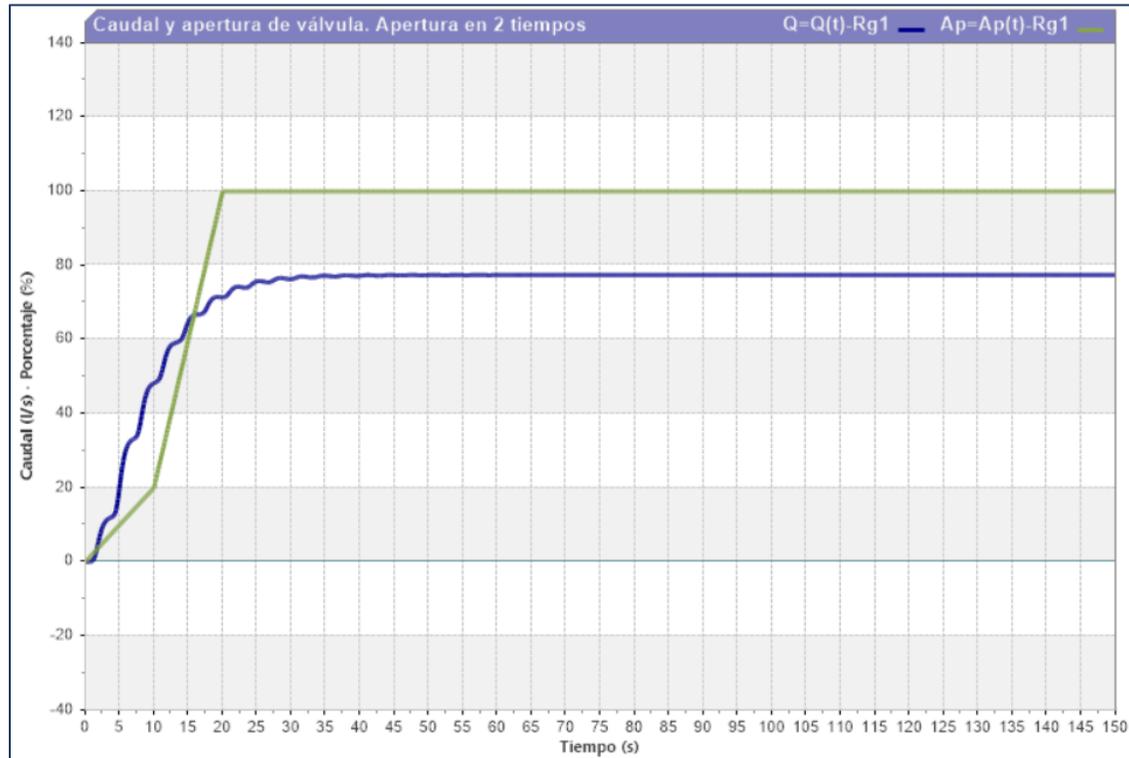
**Válvula:**

Figura 45: Caudal y apertura de la válvula vs Tiempo para una apertura en 2 instantes de tiempo. Fuente: ALLIEVI  
Elaboración: Autoras

La línea verde indica la apertura de la válvula en dos instantes de tiempo, a los 10 segundos se abre el 20% de la válvula y a los 20 segundos el 100% y en adelante permanece abierta. La línea azul indica el paso de caudal por la válvula, alcanzando su caudal máximo aproximadamente a los 40 segundos, al igual que el análisis en los tiempos de apertura anteriormente realizados.

## Depósitos:

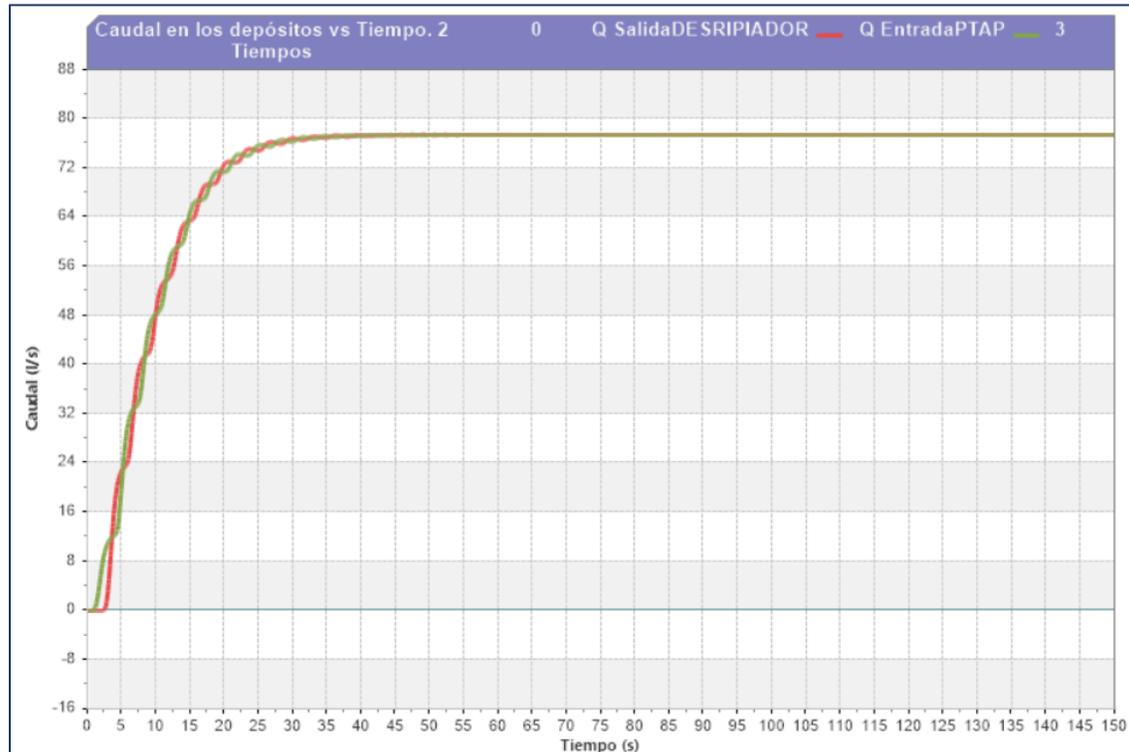


Figura 46: Caudal total en los depósitos (Desripiador y PTAP) vs tiempo para una apertura en dos instantes de tiempo.  
Fuente: ALLIEVI Elaboración: Autoras

El caudal de salida del desripiador es igual al caudal de entrada de la Planta de Tratamiento de Agua Potable, el programa considera las perturbaciones por las ondas. La capacidad de la tubería de 200 mm de diámetro se alcanza a los 40 segundos aproximadamente.

En la siguiente gráfica se observa que independientemente del tiempo de apertura de la válvula, el caudal que pasa por la válvula se estabiliza aproximadamente a los 40 segundos, el cual es el tiempo mínimo para que no se den problema como cavitación y depresiones. El paso de caudal por la válvula, tiene el mismo comportamiento en los distintos tiempos de análisis, únicamente varía el efecto de las ondas generadas por los fenómenos transitorios.

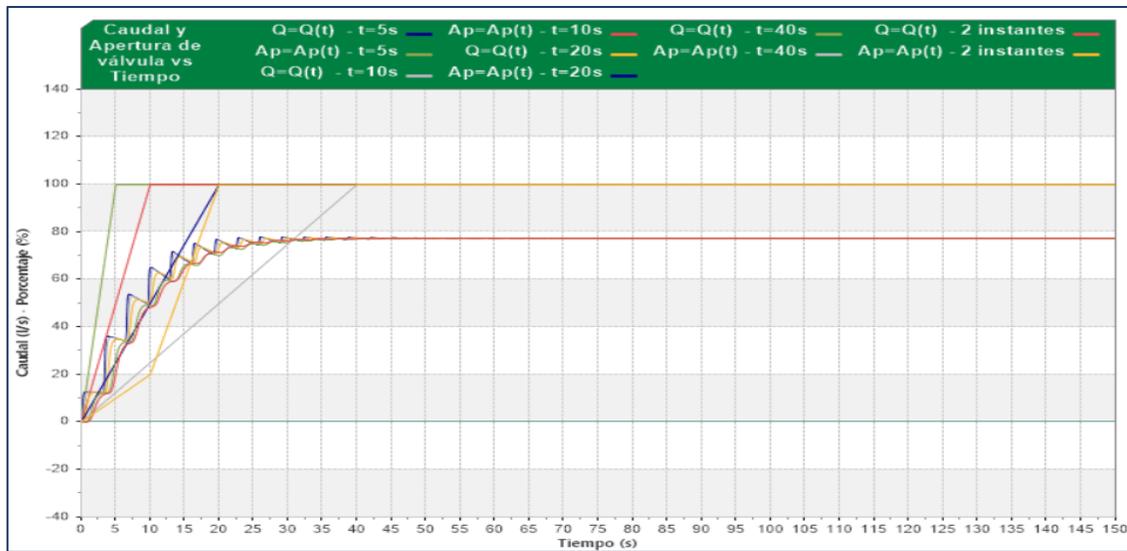


Figura 47: Caudal y porcentaje de apertura de la válvula correspondientes a todos los tiempos de análisis: 5, 10, 20, 40 segundos y apertura en 2 etapas. Fuente: ALLIEVI. Elaboración: Autoras.

La variación de caudal en los depósitos, tanto en la salida del desripiador como en la entrada a la Planta de tratamiento de aguas residuales es independiente del tiempo de apertura de la válvula. En todos los tiempos analizados para apertura de válvula se observa el mismo comportamiento en los depósitos, variando únicamente el efecto de las ondas generadas por el transitorio. En la imagen a continuación se observa lo descrito anteriormente, el caudal se estabiliza a partir de los 40 segundos aproximadamente, punto en el que alcanza la capacidad de la tubería.

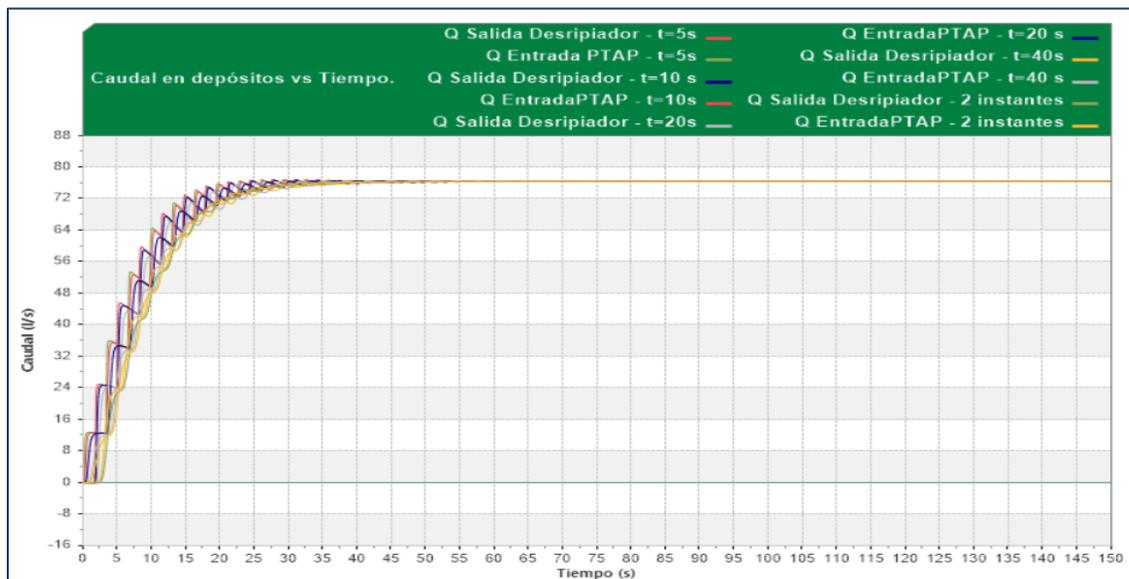


Figura 48: Caudal en los depósitos (Desripiador y PTAP) correspondiente a todos los tiempos de análisis: 5, 10, 20, 40 segundos y apertura en 2 etapas. Fuente: ALLIEVI. Elaboración: Autoras.



## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

En el presente trabajo de titulación se realizaron varias visitas de campo y reconocimiento de la zona de estudio, así como catastro de la línea de conducción y recopilación de información hidráulica, de manera que se pudo obtener los datos necesarios para una simulación hidráulica adecuada mediante un modelo unidimensional de flujo. A partir de los resultados obtenidos con el modelo numérico mediante el software EPANET 2.0, se analizó el dimensionamiento de la línea de conducción y su capacidad para abastecer de agua potable a la comunidad en la actualidad y en un periodo de 25 años.

Además, al ser una conducción que funciona a presión se realizó un análisis de fenómenos transitorios por maniobra de una válvula colocada al final de la línea de conducción en distintos periodos de tiempo, encontrando el tiempo adecuado para apertura y cierre, de manera que las presiones máximas, mínimas y cavitación sean controlados en el sistema.

Con lo mencionado anteriormente, las conclusiones se describen enfocadas a la mejora del sistema de abastecimiento de Sinincay, en términos de: dimensionamiento de la conducción y manejo y operación de válvulas para evitar fenómenos transitorios. De manera general se tiene que:

- Para el cálculo de la población futura, el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia nos indica dos tasas de crecimiento, una correspondiente a los años 1990-2001 con un valor de -1.59% y otra del periodo 2001-2010 de 2.51%. Comúnmente para la estimación poblacional suele considerarse un promedio de las tasas de crecimiento conocidas, pero en este caso solamente se considera la tasa de crecimiento positiva (2.51%), ya que la tasa de crecimiento negativa no representa un comportamiento poblacional real de la parroquia, que incluso al ser área de crecimiento urbano, su población tiende a aumentar. La tasa de crecimiento negativa, se puede explicar con el hecho de haber sido un periodo de migración que afectó principalmente a las parroquias rurales de la ciudad de Cuenca en la década de 1990.



- Las proyecciones poblacionales fueron estimadas como comúnmente se calcula, con un promedio de 3 métodos: aritmético, geométrico y exponencial. Sin embargo, lo más óptimo sería realizar un análisis orientado a establecer un criterio más técnico para la proyección de la población futura y así evitar problemas de sobre dimensionamiento de la población y por ende del sistema de conducción.

En cuanto al análisis del dimensionamiento del sistema se concluye lo siguiente:

- La capacidad del sistema en las condiciones más favorables es de 74.75 l/s, el caudal requerido en la actualidad en base al catastro de medidores, estudio poblacional y dotación es de 39.61 l/s por lo que se puede concluir que las dimensiones del sistema si tuviera las condiciones apropiadas, son aptas para abastecer al Sistema de Agua Potable de Sinincay.

- El caudal transportado actualmente desde el desrpiador es de 50 l/s según manifiesta el operador de la planta de agua potable y encargado de la captación y línea de conducción. Este caudal sobrepasa al caudal de demanda (39.61 l/s), lo que indica un excedente de caudal que está siendo transportado hacia la planta, cuya capacidad máxima es de 35 l/s aproximadamente según el operador de la planta, por lo que se han visto en la necesidad de construir un aliviadero en la entrada a la planta, el cual desvía 15 l/s nuevamente al río Patamarca.

- En épocas de verano el operador indica que para intentar abastecer al sistema suele requerirse aproximadamente 40 l/s (valor muy cercano al calculado para la población actual) pero esto provoca que la planta de tratamiento sea sobrecargada. Por lo que se puede concluir que en la actualidad las características de la línea de conducción si permiten abastecer a todo el sistema, sin embargo, existen grandes limitaciones en la planta de tratamiento y en la red de distribución, lo cual no está comprendido en el estudio del presente trabajo.

- El caudal de diseño calculado para la conducción en un periodo de análisis de 25 años (2046) es de 68.04 l/s. En condiciones favorables la línea de conducción con sus características actuales seguiría teniendo la capacidad de transportar este gasto, ya que actuaría aproximadamente al 91% de su capacidad.



- El diámetro de la tubería de conducción es adecuado ya que la capacidad hidráulica (74.75 l/s) es superior a la demanda actual (39.61 l/s) y futura (68.04 l/s). Sin embargo, se verifica una pérdida de gasto considerable a lo largo de la línea, lo que se da principalmente por el estado físico de la misma, la cual presenta roturas de tuberías, accesorios y tuberías que han sobrepasado su vida útil, parches colocados en orificios en las tuberías y cobertura de vegetación. Se concluye que la línea de conducción tiene las dimensiones adecuadas para abastecer a la población actual y dentro de un periodo de análisis de 25 años, sin embargo, no se aprovecha la capacidad de la misma.

- Las obras hidráulicas como captación y desripador han sobrepasado su periodo de diseño, se encuentran con residuos y no han tenido un mantenimiento adecuado. Algunos elementos como compuertas, ya no se encuentran en funcionamiento. Así mismo obras complementarias como anclajes de las tuberías, se encuentran en mal estado. Se concluye que existe un déficit de mantenimiento en la línea de conducción y sus obras complementarias.

Respecto al manejo y operación de válvulas en la línea de conducción de Sinincay se concluye:

- Tras varias simulaciones en el cierre de la válvula se concluye que si la válvula se cierra en tiempos menores a 20 segundos se generan sobrepresiones que superan la presión admisible de la tubería de 1 MPa (101.9 mca) lo cual ocasionaría rotura de la misma, sin embargo con un cierre lineal de 20 segundos la presión máxima producida es de 100.05 mca, encontrándose cerca de la presión admisible, por lo que la tubería correría peligro de sufrir daños y además se ocasionarían presiones negativas a lo largo de la línea de conducción.

- Se encontró que el tiempo mínimo de cierre de 120 segundos es el tiempo óptimo para un cierre lineal en el que se evitaría que la tubería se someta a fenómenos de cavitación, sobrepresiones y presiones negativas en el sistema, es decir, otra alternativa sería realizar el cierre lineal de la válvula en un tiempo mayor o igual a 120 segundos para que funcione correctamente.



- Las sobrepresiones, depresiones y fatiga del material, son algunas de las consecuencias que causa el golpe de ariete; se plantea como solución cerrar la válvula en 20 segundos siempre y cuando esta maniobra se dé en dos etapas (cerrando el 88% de la válvula en los primeros 5 segundos y en el tiempo restante el 12% final), es una alternativa para solucionar estos fenómenos y que el sistema funcione correctamente.
- Se comprobó que independientemente del tiempo de apertura, las presiones máximas no exceden la presión admisible de la tubería, sin embargo, para evitar que se den problemas de cavitación y presiones negativas, se establece que la apertura de la válvula debe realizarse de manera lineal en un tiempo mínimo de 40 segundos.
- Se plantea como segunda alternativa realizar la maniobra de apertura en dos instantes, para un tiempo de 10 segundos, realizar la apertura del 20% de la válvula de compuerta y para un tiempo de 20 segundos que ya se encuentre abierta completamente, así se solucionan problemas de cavitación y presiones negativas.
- Se debe tener en cuenta que en el programa Allievi se realizaron los cálculos considerando únicamente pérdidas por fricción en base al coeficiente de rugosidad más no se está considerando las condiciones de la tubería, como roturas, daños en uniones, edad de la tubería, pérdidas locales de caudal, etc.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda la instalación de una válvula de purga en las coordenadas (720269.097 E; 9687356.05 N) ya que es el punto con cota más baja de la conducción. La colocación de esta válvula ayudaría a evitar la acumulación de sedimentos por el cambio de pendiente en esa zona; esto puede llegar a taponar la tubería y más aún en épocas de lluvia cuando el agua captada es más turbia.
- Se recomienda el uso de válvulas de aire en los puntos de coordenadas: (720212.823 E; 9687361.54 N) y (720469.418 E; 9687363.48 N) ya que, según el perfil de elevaciones,



corresponden a los puntos más altos de la línea de conducción. El uso de este accesorio permite eliminar el aire existente en la tubería; cuando el aire se acumula produce una estrangulación de la sección de paso del agua lo que puede llegar a interrumpir el paso del flujo; además un mayor peligro sería una posible compresión del aire y su expulsión súbita que con la interrupción del flujo se puede multiplicar la presión y ocasionar una explosión con proyección de fragmentos, es por todo esto que se recomienda el uso de este tipo de accesorios en los puntos más elevados del perfil de la conducción.

- Se debe considerar que la línea de conducción es controlada por el operador de la planta de tratamiento de agua potable, por lo tanto es poco probable que las maniobras de apertura y cierre de la válvula de compuerta reguladora de caudal, colocada al final de la línea de conducción se puedan realizar como han sido planteadas en los análisis en el programa ALLIEVI, ya que pueden existir errores en la manipulación de las mismas, por lo que se recomienda un sistema que permita automatizar la apertura y cierre de estos accesorios (Uso de temporizador) de manera que se cumpla el tiempo óptimo de maniobra y evitar problemas por fenómenos transitorios.
- Se recomienda el cambio de tuberías en varios tramos de la línea de conducción, pues se constató que existen agujeros, parches y tuberías en mal estado lo que provoca pérdidas considerables de caudal, también considerar estructuras de soporte y diseño de los anclajes de la tubería para un funcionamiento más óptimo.

Adicionalmente al estudio realizado en el presente trabajo, se establecen las siguientes recomendaciones que permitirán estudiar de manera integral el sistema de abastecimiento de agua potable de Sinincay.

- Se recomienda la creación de un manual de operación y mantenimiento para la línea de conducción, también capacitaciones al operador de la misma especialmente por la manipulación de accesorios como válvulas, programación de maniobras y sistemas de protección de manera que las condiciones límites de trabajo no sean superadas.



- En el presente trabajo se realizó un análisis de sobrepresiones mediante el modelo computacional de Allievi, utilizado para el estudio de fenómenos transitorios, por lo que se recomienda un análisis comparativo de las diferencias que podrían existir en los resultados obtenidos mediante un calculo manual de las sobrepresiones y los resultados que presenta el programa.
  
- Al concluir que la planta de tratamiento de agua potable no tiene la capacidad hidráulica para satisfacer la demanda en la actualidad y en el periodo de 25 años, se recomienda plantear un estudio de la planta de tratamiento de agua potable, lo cual no se contempla dentro del presente trabajo, sin embargo, es importante para un abastecimiento correcto del líquido vital.
  
- La línea de conducción tiene la capacidad de abastecer a la población en un periodo de análisis de 25 años (año 2046) en base a los análisis realizados, sin embargo, es de suma importancia estudiar si la fuente de captación tendrá las características hidrológicas e hidráulicas necesarias para abastecer a este periodo.
  
- Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial la parroquia de Sinincay es considerada un área de expansión urbana ya que se planea que en el futuro la ciudad de Cuenca crezca hacia sus zonas rurales, por lo tanto, la población aumentará cuantiosamente y considerando que los proyectos algunas veces no se ejecutan hasta años después de su estudio, creemos de suma importancia expandir el estudio de todo el Sistema de Agua Potable más allá del periodo de análisis planteado (50, 75 y hasta 100 años) de manera que se planteen alternativas viables que permitan abastecer adecuadamente a la población futura.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, J. M., & Escobar, G. M. (2018). *Análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica-Quito Sur*. UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR.
- Arocha, S. (1979). Abastecimiento de Agua (Teoría y Diseño). In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9, pp. 1689–1699).
- Arturo, R. (2007). Hidráulica De Tuberías Y Canales. In *Susferrinmaquinas.Com.Ar*.
- Bartolin, H., Martínez, F., Sanz, F., & Cabrera, E. (2006). *El análisis de transitorios en grandes conducciones para el transporte de agua. Aplicación al trasvase Júcar-Vinalopó*. November. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4918.8881>
- Chuquín, N., Chuquín, D., Miño, G., Chuquín, J., & Soriano, J. (2018). Modelación Matemática Del Sistema Hidráulico De La Red De Agua Potable De La Ciudad De Riobamba. *Perfiles*, 1(19), 37–49. <https://doi.org/10.47187/perf.v1i19.25>
- Comisión Nacional del Agua. (n.d.). *Manual de Agua Potable , Alcantarillado y Saneamiento Fenómenos Transitorios En Líneas De Conducción*.
- CONAGUA. (2007). Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento Conducciones. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento* (Issues 978-968–5).
- EUITACR, I. rural. (n.d.). *El golpe de ariete*. 1–19.
- Ingeniería Química. (2020). *¿Qué es la ecuación de Bernoulli?*  
<https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/10/ecuacion-de-bernoulli.html>
- Norma CO 10.07 - 601, S. (2010). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES*. 6, 420.



Norma OS.010. (2006). Captación y conducción de agua para consumo humano. *Rne.*, 1–9.

Pakariñan. (2015). *Actualización del diagnóstico del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la parroquia Sinincay.*

Pérez, L. E., & Guitelman, A. (2005). *ESTUDIO DE TRANSITORIOS GOLPE DE ARIETE.* 71.

Plana Navarro., F. (2019). *Modelización de Transitorios Hidráulicos. Resolución numérica del Golpe de Ariete.*  
[http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/190061/TFM\\_Navarro Plana%2C Francisco .pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/190061/TFM_Navarro%20Francisco.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Rossman, A. (2017). *EPANET 2.0 en Español: Análisis Hidráulico y de Calidad del Agua en Redes de Distribución de Agua. Manual del Usuario.*

SAGARPA. (2007). *Líneas de Conducción por gravedad .*

SENAGUA. (2016). Normas para estudio y diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable y disposición de aguas residuales, para poblaciones mayores a 1000 habitantes. *Secretaria Del Agua*, 6, 420. [http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma\\_urbana\\_para\\_estudios\\_y\\_disenos.pdf](http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf)

Streeter, V. L., & Wylie, E. B. (1988). *MECÁNICA DE LOS FLUIDOS (OCTAVA).*

Tixe, S. (2004). Guía de diseño para líneas de conducción e impulsión de sistemas de abastecimiento de agua rural. *Organización Panamericana de La Salud. (2004). Guía*



*de Diseño Para Líneas de Conducción e Impulsión de Sistemas de Abastecimiento de Agua Rural. Organización Panamericana de La Salud, 19. [Http://Www.Bvsde.Paho.Org/Bvsacg/Guialcalde/2sas/D23/032\\_Diseño\\_lín](http://Www.Bvsde.Paho.Org/Bvsacg/Guialcalde/2sas/D23/032_Diseño_lín), 19.*

Toledo L., A. F. (2009). ESTUDIO Y EXPERIMENTO DEL FENÓMENO DE GOLPE DE ARIETE, DEBIDO A CIERRE DE VÁLVULAS, PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA. *American Journal of Research Communication, August*, 12–42. [http://downloads.esri.com/archydro/archydro/Doc/Overview of Arc Hydro terrain preprocessing workflows.pdf](http://downloads.esri.com/archydro/archydro/Doc/Overview%20of%20Arc%20Hydro%20terrain%20preprocessing%20workflows.pdf)<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.003><http://sites.tufts.edu/gis/files/2013/11/Watershed-and-Drainage-Delineation-by-Pour-Point.pdf><http://www>



## 6. ANEXOS

Tabla 42: Coordenadas

Puntos de la línea de conducción -EPANET			
X	Y	Z	Longitud tubería
<b>TRAMO 1</b>			
720026.217	9687428.54	2876.908	
720028.78	9687425.18	2876.591	4.23
720031.895	9687422.08	2876.519	4.39
720042.541	9687414.19	2876.037	13.25
720048.925	9687411.41	2875.809	6.96
720059.507	9687412.49	2875.313	10.64
720065.202	9687412.29	2874.297	5.70
<b>DESRIPIADOR</b>			
<b>TRAMO 2</b>			
720076.858	9687411.73	2873.07	
720091.096	9687407.14	2872.284	14.96
720097.569	9687407.4	2871.85	6.48
720105.323	9687409.5	2871.291	8.03
720115.602	9687413.52	2870.78	11.04
720119.141	9687413.55	2870.582	3.54
720124.055	9687412.88	2870.308	4.96
720129.973	9687410.76	2869.977	6.29
720139.466	9687401.05	2869.447	13.58
720151.08	9687393.35	2868.799	13.94
720159.746	9687390.48	2868.315	9.13
720173.679	9687384.23	2867.537	15.27
720185.825	9687377.09	2866.859	14.09
720203.695	9687371.74	2865.861	18.65
720212.823	9687361.54	2865.351	13.69
720225.805	9687357.64	2860.633	13.55
720227.993	9687355.57	2858.603	3.02
720231.404	9687355.23	2856.72	3.43
720256.144	9687352.09	2850.304	24.94
720269.097	9687356.05	2849.863	13.54
720272.621	9687354.28	2850.882	3.94
720280.647	9687355.91	2852.703	8.19
720313.589	9687346.94	2853.204	34.14
720318.315	9687347.84	2853.218	4.81
720333.633	9687356.36	2851.524	17.53
720337.997	9687357.27	2850.757	4.46
720369.021	9687369.64	2847.534	33.40
720376.926	9687370.35	2846.398	7.94



720397.339	9687380.79	2844.839	22.93
720405.534	9687382.96	2843.936	8.48
720415.691	9687386.62	2843.336	10.80
720418.969	9687386	2843.691	3.34
720430.865	9687382.7	2847.072	12.35
720441.128	9687378.92	2848.015	10.94
720445.705	9687374.89	2849.501	6.10
720469.418	9687363.48	2851.859	26.32
720476.319	9687358.48	2851.686	8.52
720493.651	9687347.91	2851.887	20.30
720505.549	9687344.62	2853.133	12.35
720518.823	9687339.47	2853.467	14.24
720528.46	9687337.82	2853.894	9.78
720538.299	9687335.26	2855.024	10.17
720553.339	9687337.81	2856.661	15.25
720562.632	9687339.15	2856.759	9.39
720568.667	9687338.99	2858.282	6.04
720569.298	9687338.98	2858.547	0.63
720569.879	9687338.58	2858.793	0.71
720570.482	9687337.4	2859.012	1.33