



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN  
PALUGUILLO - PARROQUIAS ORIENTALES POR MODELACIÓN EN  
FLUJO NO PERMANENTE**

**AUTOR: AGUILAR POZO, JULIO ANDRÉS**

**DIRECTOR: ING. CARVAJAL CEVALLOS, EDGAR BENJAMÍN**

**SANGOLQUÍ**

**2018**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, "OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PALUGUILLO - PARROQUIAS ORIENTALES POR MODELACIÓN EN FLUJO NO PERMANENTE", fue realizado por el señor AGUILAR POZO, JULIO ANDRÉS, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, junio de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Carvajal', written over a horizontal line.

ING. EDGAR CARVAJAL

CC: 1703314250

**DIRECTOR**



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Aguilar Pozo, Julio Andrés**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PALUGUILLO - PARROQUIAS ORIENTALES POR MODELACIÓN EN FLUJO NO PERMANENTE”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, junio de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Julio Andrés'.

---

JULIO ANDRÉS AGUILAR POZO

CC:0401706221



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## AUTORIZACIÓN

Yo, **Aguilar Pozo, Julio Andrés**, autorizo a la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PALUGUILLO - PARROQUIAS ORIENTALES POR MODELACIÓN EN FLUJO NO PERMANENTE”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, junio de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Julio', written over a horizontal line.

JULIO ANDRÉS AGUILAR POZO

CC:0401706221

## **DEDICATORIA**

A la vida, quien en la dura y sola travesía me vislumbró a culminar este objetivo, añadiendo y quitando personajes en el camino, dejando lo precisamente necesario para continuar.

A mis padres, Julio Aguilar y Alexandra Pozo, por el ejemplo firme y responsable, imagen de la que hoy soy reflejo.

**Julio Andrés Aguilar Pozo**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres y su profunda fe en Dios, pues la fuerza de sus oraciones iluminó mi camino.

A mi tutor y mentor, Ing. Edgar Carvajal, quien impulsó mi visión profesional.

**Julio Andrés Aguilar Pozo**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación e importancia.....	2
1.3 Objetivo Principal.....	4
1.4 Objetivos Secundarios.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
BASE TEÓRICA.....	5
2.1 Pérdidas de carga.....	5
2.2 Pérdidas por fricción.....	6
2.3 Pérdidas localizadas.....	8
2.4 Clases de tubería de Presión.....	14
2.5 Válvulas de aire.....	15
2.6 Válvulas de desagüe.....	17
2.7 Válvula Rompedora de presión reguladora de caudal.....	19
2.8 Tanques Rompe Presión.....	20
2.9 Flujo no permanente.....	22
CAPÍTULO 3.....	28
DESCRIPCIÓN SISTEMA ANALIZADO.....	28
3.1 Metodología de Análisis.....	28
3.2 Criterios y parámetros del diseño hidráulico.....	29
3.3 Componentes del sistema.....	30
3.4 Caudales de simulación.....	31

3.4.1	Análisis de población y demanda .....	31
3.5	Tanques rompe presión.....	32
3.6	Tanques de Rserva .....	33
3.7	Válvulas .....	36
3.7.1	Válvulas de aire.....	36
3.7.2	Válvulas de desagüe .....	36
3.7	Ubicación y tipo de válvula .....	37
CAPÍTULO 4.....		39
CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO NO PERMANENTE .....		39
4.1	Análisis de pérdidas por fricción y localizadas.....	39
4.2	Líneas de conducción.....	41
4.3	Análisis del tipo de tubería.....	42
4.3	Análisis de equipos y valvulería.....	45
4.3.1	Tanques Rompe Presión.....	45
4.3.2	Válvulas de control de flujo.....	45
4.3.2	Válvulas de aire .....	46
4.3.2	Válvulas de desagüe .....	46
4.4	Celeridad de onda .....	47
4.4	Análisis de flujo permanente.....	48
4.4.1	Evaluación de línea existente.....	48
4.4.2	Línea derivación Guayllabamba .....	51
4.4.2	Línea Parroquias .....	54
4.4.3	Líneas Secundarias.....	58



CAPÍTULO 5.....	59
SIMULACIÓN DEL FLUJO NO PERMANENTE .....	59
5.1 Análisis de Escenarios.....	59
5.1.1 Rotura de Tubería .....	60
5.1.1.1 Consideraciones particulares del modelo.....	61
5.1.2 Cierre de Válvulas .....	64
5.1.3 Inicio de operación .....	65
5.1.4 Desagüe controlado .....	66
5.2 Resultados de los escenarios analizados .....	67
5.2.1 Rotura en Quebrada Guambi – Ramal Inferior.....	67
5.2.1.1 Sub Modelo 1: Ramal Izquierdo de la Falla.....	69
5.2.1.2 Sub Modelo 2: Ramal Derecho de la falla .....	72
5.2.2 Cierre de válvulas por parada de operación.....	75
5.2.3 Apertura de válvulas por inicio de operación.....	80
5.2.4 Desagüe de fondo .....	83
5.2.5 Rotura en abscisa 21+500 – Línea Parroquias .....	88
5.2.5.1 Sub Modelo 1: Ramal izquierdo de la Falla.....	89
5.2.5.1 Sub Modelo 2: Ramal derecho de la Falla .....	93
5.2.6 Cierre de válvulas por parada de operación.....	96
5.2.7 Apertura de válvulas por inicio de operación.....	100
CAPÍTULO 6.....	103
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	103
6.1 Conclusiones .....	103
6.2 Recomendaciones .....	105

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
----------------------------------	-----

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Valores de $K_{val}$ en función del ángulo.....	11
<b>Tabla 2</b> Variación de $A'$ de acuerdo a la relación de áreas $F_s/F_c$ y caudales $Q_s/Q_c$ ....	13
<b>Tabla 3</b> Coeficiente de pérdida por reducción gradual del diámetro de la tubería .....	13
<b>Tabla 4</b> Espesor mínimo por diámetro de tubería. ....	14
<b>Tabla 5</b> Proyecciones demográficas (por cada parroquia).....	31
<b>Tabla 6</b> Proyecciones demográficas (Por tanque de reserva).....	32
<b>Tabla 7</b> Tanques a modelar (demandas) .....	35
<b>Tabla 8</b> Válvulas de aire a modelar.....	38
<b>Tabla 9</b> Válvulas de desagüe a modelar .....	38
<b>Tabla 10</b> Características tuberías a modelar.....	40
<b>Tabla 11</b> Valores $K_c$ para tuberías.....	41
<b>Tabla 12</b> Porcentaje de daños por Km.....	44
<b>Tabla 13</b> Parámetros a considerarse para cada tipo de tubería.....	44
<b>Tabla 14</b> Valores de celeridad.....	48
<b>Tabla 15</b> Características hidráulicas .....	49
<b>Tabla 16</b> Línea de transmisión Yaruquí – Guayllabamba .....	52
<b>Tabla 17</b> Línea de transmisión Parroquias.....	55
<b>Tabla 18</b> Derivaciones a Tanques de Reserva .....	58
<b>Tabla 19</b> Datos de pérdida de carga y caudal típico .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Coeficientes de pérdida codos Fuente: (Sotelo, 2000) .....	10
<b>Figura 2.</b> Ábaco coeficientes. Fuente (Sotelo, 2000) .....	10
<b>Figura 3.</b> Ábacos para determinar $\xi_{c.s}$ para un ángulo entre $\alpha = 0 - 90^\circ$ . Fuente: (Idelchik, 2004) .....	12
<b>Figura 4.</b> Rangos de altura mínima en tanques de reserva Fuente: (Idelchik, 2004)...	21
<b>Figura 5.</b> Rangos de altura mínima en tanques de reserva. Fuente: <i>Modelamiento Modelo</i> .....	34
<b>Figura 6.</b> Esquema de ubicación de Válvulas de Aire y Desagüe Fuente: (Ponce, Aournal ofHydrologic Engineering, 2001) .....	37
<b>Figura 7.</b> Esquema General Línea conducción / transmisión .....	50
<b>Figura 8.</b> Perfil y línea piezométrica Paluguillo - Quiport Fuente: Diseño particular .....	51
<b>Figura 9.</b> Perfil y línea piezométrica Yaruquí - Guayllabamb .....	53
<b>Figura 10.</b> Perfil y línea piezométrica BH – San Juan (continuación) Fuente: Diseño particular.....	53
<b>Figura 11.</b> Perfil y línea piezométrica Parroquias Fuente: Diseño particular .....	57
<b>Figura 12.</b> Condiciones iniciales para rotura de tubería Fuente: Diseño particular .....	62
<b>Figura 13.</b> Rampa de Caudal para Rotura de Tubería Fuente: Diseño particular .....	64
<b>Figura 14.</b> Rotura de Quebrada Guambi Fuente: Diseño particular.....	68
<b>Figura 15.</b> Flujo Permanente en Ramal PT Paluguillo – El Quinche Fuente: Diseño particular.....	69
<b>Figura 16.</b> Sub-modelo 1, rotura en Guambi, ramal izquierdo a la falla .....	70
<b>Figura 17.</b> Presiones negativas en submodelo 1 Fuente: Diseño particular .....	71
<b>Figura 18.</b> Presiones negativas en Sub-modelo 2 Fuente: Diseño particular .....	72
<b>Figura 19.</b> Sub-modelo 2, rotura en Guambi, ramal derecho a la falla .....	74
<b>Figura 20.</b> Flujo permanente en PT Paluguillo – TRP 1 Fuente: Diseño particular.....	76
<b>Figura 21.</b> Presiones negativas en Sub-modelo 2 Fuente: Diseño particular .....	77
<b>Figura 22.</b> Flujo permanente en PT Paluguillo – TRP 1 Fuente: Diseño particular.....	79
<b>Figura 23.</b> Sobrepresiones en la tubería (nulas) Fuente: Diseño particular .....	79

<b>Figura 24.</b> Condiciones iniciales para simulación apertura válvula Fuente: Diseño particular.....	80
<b>Figura 25.</b> <i>Presiones máximas y mínimas para apertura de válvula Fuente: Diseño particular.....</i>	81
<b>Figura 26.</b> Presiones y caudales presentados en apertura de válvula.....	82
<b>Figura 27.</b> Perfil hidráulico TRP 2 – TRP 4 Fuente: Diseño particular .....	84
<b>Figura 28.</b> Presiones máximas y mínimas TRP 2 – TRP 4 Fuente: Diseño particular ..	86
<b>Figura 29.</b> Evolución del caudal y presión en válvula de desagüe Fuente: Diseño particular.....	87
<b>Figura 30.</b> Esquema Línea Superior Fuente: Diseño particular .....	88
<b>Figura 31.</b> Esquema Línea Superior Fuente: Diseño particular .....	89
<b>Figura 32.</b> Presiones máximas y mínimas sub modelo 1 Fuente: Diseño particular.....	90
<b>Figura 33.</b> Esquema Línea Superior Fuente: Diseño particular .....	92
<b>Figura 34.</b> Presiones máximas y mínimas sub modelo 2 Fuente: Diseño particular.....	94
<b>Figura 35.</b> Presiones y subpresiones del submodelo Fuente: Diseño particular.....	95
<b>Figura 36.</b> Flujo permanente Cierre de Válvulas Fuente: Diseño particular.....	96
<b>Figura 37.</b> Presiones máximas y mínimas cierre de válvulas. ....	98
<b>Figura 38.</b> Presiones máximas y evolución del caudal por la válvula Fuente: Diseño particular.....	99
<b>Figura 39.</b> Flujo permanente Apertura de válvulas por inicio de operación Fuente: Diseño particular.....	100
<b>Figura 40.</b> Presiones máximas y evolución del caudal por la válvula .....	101
<b>Figura 41.</b> Flujo permanente Apertura de válvulas por inicio de operación Fuente: Diseño particular.....	102

## RESUMEN

La elaboración de este proyecto inicia con la necesidad de buscar soluciones de potenciación a corto y mediano plazo en redes de transmisión de agua potable para las parroquias orientales del Distrito Metropolitano de Quito, a través de la evaluación de las líneas construidas, levantamiento de información catastral, análisis de demandas reales y de demandas futuras. De esta forma queda al descubierto la prioridad de optimizar sistemas existentes hasta el punto de explotar su capacidad óptima de manejo, evitando la construcción de nuevos trazados de líneas por medio de la instalación de accesorios y equipos que maximicen su capacidad en tubería, accesorios y tanques de reserva. También se analizó a través de flujo no permanente, los parámetros y escenarios más críticos en las diferentes tuberías de transmisión, ramales secundarios, tanques rompe presión y diferentes tipos de válvulas de control y regulación de flujo, resultando en información precisa de puntos conflictivos, respuesta a problemas catastróficos y el correcto uso y mantenimiento del proyecto hidráulico en general. Se concluye el presente proyecto con los tiempos de apertura, cierre, rotura de tubería, inicio de operación y condiciones de desagüe crítico del sistema global, como una solución para el proceso creciente de demanda de agua potable.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **FLUJO NO PERMANENTE**
- **OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA**
- **TRANSIENTE**

## **ABSTRACT**

The development of this project begins with the need to look for short and medium term empowerment solutions in water transmission networks for the Oriental parishes of the Metropolitan District of Quito, through the evaluation of the constructed lines, cadastral information survey , analysis of real demands and future demands. In this way, the priority of optimizing existing systems to the point of exploiting their optimum handling capacity, avoiding the construction of new line tracings through the installation of accessories and equipment that maximize their capacity in pipes, fittings and tanks. Also analyzed through non-permanent flow, the most critical parameters and scenarios in the different transmission pipes, secondary branches, pressure-rupture tanks and different types of control valves and flow regulation, resulting in accurate information of conflicting points, response to catastrophic problems and the correct use and maintenance of the hydraulic project in general. The present project is concluded with the opening, closing, pipe rupture, start of operation and critical drainage conditions of the global system, as a solution for the growing process of demand for potable water.

### **KEYWORDS:**

- **NON-PERMANENT FLOW**
- **HYDRAULIC OPTIMIZATION**
- **TRANSIENT**

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El diseño hidráulico de las tuberías en líneas de conducción, transmisión y redes, toma en cuenta las características físicas de sus trazados que determina la carga estática y líneas de gradiente hidráulica de trabajo bajo condiciones normales de operación (flujo permanente); haciéndose necesario tener un entendimiento de la calidad del agua a ser transportada para de esta manera determinar y justificar la clase y tipo de tubería (acero, HD, PVC, HPRF, entre otras), necesarios para proceder con los diseños respectivos.

Sin embargo, se hace necesario considerar que las tuberías estarán sometidas a cargas mayores a las estimadas bajo condiciones normales de operación, ya que se pueden presentar condiciones no permanentes como es el caso de:

- Llenado brusco de tuberías
- Vaciado de tuberías
- Rotura
- Mal funcionamiento de equipos de control y valvulería

Estos escenarios se hacen necesario estudiarlos y poder determinar si la tubería escogida podrá resistir las altas cargas o subpresiones a las que estarán sometidas, de esta manera podremos escoger el tipo más adecuado para resistir las presiones

obtenidas del análisis de Flujo No Permanente, las cuales deberán cumplir con norma ASTM, AWWA M-11 y, de fabricación bajo norma ANSI/AWWA C200.

Tanto tubería como sus accesorios deben contemplar dentro de su diseño las presiones internas y cargas externas, conforme a los procedimientos de diseños de la AWWA.

Por lo enunciado en los párrafos anteriores, se debe realizar el análisis hidráulico de las líneas que contemple los escenarios transitorios (Flujo No Permanente) que permitan contar con un sistema seguro durante su periodo de vida útil que soporte sobrepresiones o subpresiones por acciones antropogénicas que se puedan dar en la operación normal de los sistemas, o por desastres naturales como pueden ser eventos sísmicos o deslizamiento de masas. Este análisis debe prever la operación y funcionamiento sistémico de cada uno de los elementos que componen los sistemas como son: válvulas de aire, desagüe, retenedoras de presión, tanques rompe presión, derivaciones, entre otras.

## **1.2 Justificación e importancia**

El objetivo fundamental del análisis de Flujo No Permanente es el poder determinar el valor de sobrepresión o subpresión cuando se presentan escenarios catastróficos ya sea por acciones antropogénicas o naturales a lo largo de las líneas de conducción; adicionalmente su análisis determina la ubicación y capacidad de la valvulería propuesta y de ser necesario, optimiza los diseños de los tanques de reserva o rompepresiones a ser considerados en toda línea de conducción y los cuales tienen como objetivo mantener



un volumen necesario para suplir la demanda en horas de mayor consumo ( $Q_{\max}$  horario) y de absorber los traslantes hidráulicos que puedan producirse en los sistemas especialmente por un llenado o vaciado brusco.

El análisis de transitorios hidráulicos se desarrolla a partir de la consideración del flujo no permanente generado por la detención o por la apertura del flujo en las válvulas de desagüe principales de la red, y la consideración del evento de rotura de la tubería en los puntos más críticos del sistema.

Actualmente, los sistemas existentes tienden a ser evaluados considerando los análisis de oferta y demanda actualizados con los últimos censos del INEC, los cuales muestran las tasas reales de crecimiento demográfico y políticas que ha emprendido tanto las empresas seccionales como las nacionales que tienden a optimizar el manejo del agua, lo que incide directamente en una reducción de la demanda y del Agua No Contabilizada (ANC); esto obliga a las empresas a optimizar las inversiones mediante el aprovechamiento al máximo de la infraestructura existente.

Los análisis de las situaciones de flujo no permanente referidas son:

- En flujo uniforme, cuando las condiciones en un punto determinado no varían a lo largo de la tubería.
- En flujo no uniforme, cuando la velocidad o el caudal varían a lo largo de la conducción de diámetro constante en un instante dado.
- Vibración no amortiguada del fluido en un sistema de tuberías, que se transforma en una oscilación amortiguada.

### **1.3 Objetivo Principal**

Proyectar la vida útil y la capacidad de Operación de las líneas de transmisión de agua Paluguillo – Parroquias Orientales, mediante la simulación en flujo no permanente con el software Bentley Hammer.

### **1.4 Objetivos Secundarios**

- Realizar un modelo matemático de simulación en flujo permanente de las líneas Paluguillo - Parroquias Orientales para describir el funcionamiento actual de las mismas con los caudales actuales por medio del software Bentley Hammer.
- En base a la información catastral y poblacional disponible en la EPMAPS determinar una demanda futura en base a las tasas de crecimiento y aplicarlo al modelo numérico, para de esta manera justificar la necesidad de una ampliación o mejoramiento de accesorios de la misma.
- Determinar por medio del análisis de flujo no permanente posibles variables al sistema actual, en variaciones de diámetro y tipo de tubería instalada, valvulería y pérdidas generadas en el sistema.
- Evaluar las líneas futuras a construirse en base a escenarios de falla, como rotura en los puntos de mayor presión de la tubería o falla en las válvulas sostenedoras y variaciones en presiones por efectos de llenado brusco o cerrado apresurado de válvulas.

## **CAPÍTULO 2**

### **BASE TEÓRICA**

Previo al análisis de Flujo No Permanente, se hace necesario realizar los estudios de las tuberías a presión en régimen de flujo permanente, con el fin de determinar la línea de gradiente hidráulico (LGH), esta información es de gran ayuda principalmente en términos de pérdidas tanto por fricción como locales, ya que el estudio de flujo no permanente debe necesariamente coincidir a los valores de pérdidas analizadas en régimen permanente.

#### **2.1 Pérdidas de carga**

La determinación de las distintas pérdidas de carga que se producen a causa de la circulación del agua por las tuberías, por sus accesorios puesto que, en cada elemento se obtiene una pérdida de carga y la suma de todas ellas dará una altura, en metros columna de agua.

A continuación, se detallan las distintas pérdidas a que se ha hecho referencia, dividiéndose en dos bloques:

- Pérdidas por fricción
- Pérdidas localizadas

## 2.2 Pérdidas por fricción

Este término es con diferencia el de mayor repercusión en las pérdidas totales en las líneas de conducción y corresponde al rozamiento del fluido. Son varias las fórmulas propuestas por diversos autores para calcular la pérdida de carga por rozamiento, unas típicas y otras más modernas, que se hallan incluidas en los manuales de ingeniería, con sus respectivas tablas y ábacos. Las diferencias en los resultados obtenidos con cada una de ellas no son de consideración.

Las pérdidas por fricción en la tubería pueden ser determinadas con la ecuación de Darcy Weisbach.

$$H_f = \lambda \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

$H_f$  es la pérdida de energía (m)

$\lambda$  es el coeficiente de fricción según Colebrook

$L$  es la longitud del tramo

$V^2/2g$  es la carga de velocidad (m).

Para flujos en la zona de transición y/o turbulenta, el análisis de las pérdidas producidas a lo largo de la tubería utiliza la siguiente expresión propuesta por Colebrook,

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

Siendo:

$\varepsilon$	Rugosidad absoluta, (mm)
D	Diámetro de la tubería, (mm)
Re	Número de Reynolds.
$\Lambda$	Coeficiente de pérdida por fricción.
E	0.3 mm (acero soldado), según el Manual "Hydromechanik im Wasserbau" de H. Press – R. Schroder, 1966.
$\varepsilon$	0.029 mm para tubería de PRFV

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$\nu$  = Viscosidad cinemática del agua, igual a 0.012 cm<sup>2</sup>/s, a una temperatura de 20°C.

La velocidad en la tubería está dada por:

$$V = \frac{4 * Q}{\pi * d^2}$$

Siendo:

V	velocidad en la tubería (m/s)
Q	caudal (m <sup>3</sup> /s)
d	diámetro de la tubería (m).

### 2.3 Pérdidas localizadas

Todas estas pérdidas se contabilizan como un porcentaje del término cinético  $v^2/2g$ , expresándose por lo tanto según:

$$h_i = K_i \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Siendo:

$h_i$  Pérdida localizada (m)

$K_i$  Coeficiente de pérdida(1)

$v^2/2g$  Término cinético (m)

#### - Pérdidas por embocadura

Suponiendo que el agua se halle en reposo en la cámara de presión, para ingresar en la tubería necesita, en primer lugar, adquirir una velocidad que sea equivalente a la altura de columna de agua capaz de generar dicha velocidad; si ésta es  $V$ , la pérdida de carga por tal concepto tendrá por valor:

$$h_1 = \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

La pérdida propiamente dicha por la entrada de agua en la tubería depende de la forma de la embocadura que da origen a una contracción. El coeficiente de pérdida de carga por dicho concepto con el extremo de la tubería recto es de 0.5, es decir, la pérdida será:

$$h_{em} = 0.5 \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

### - Pérdida en la rejilla

Se emplea la fórmula de O. Kirschmer





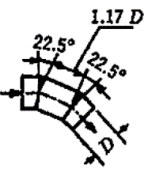
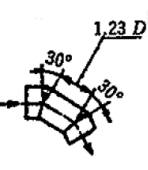
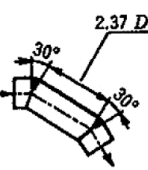
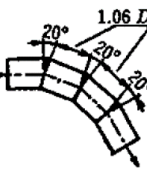
$$h_{rej} = \beta \cdot \left( \frac{S}{B} \right)^{4/3} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \cdot \text{seno}(\theta)$$

Siendo:

$h_{rej}$	Pérdida de carga en la rejilla (m)
$\beta$	Coeficiente de forma de los barrotes (1)
$S$	Espesor de los barrotes (m)
$B$	Luz entre los barrotes (m)
$\theta$	Ángulo de la rejilla con la horizontal (°)
$V$	Velocidad antes de los barrotes (m/s)

### - Pérdidas en los codos

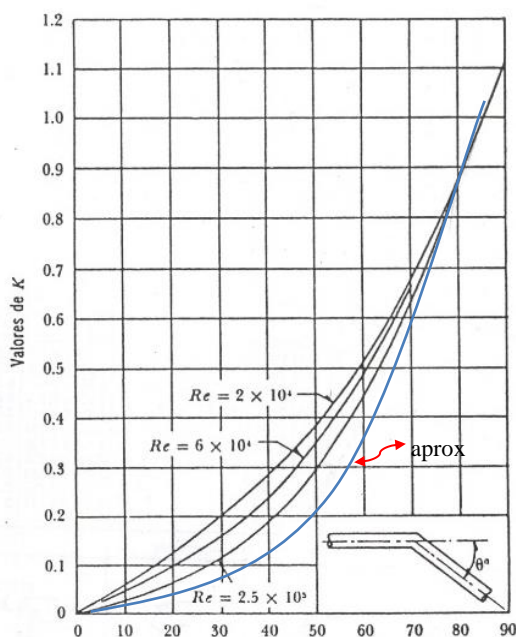
Al tratarse de codos segmentados o compuestos por tramos rectos, los coeficientes de pérdida se estimaron acorde con los ábacos presentados a continuación.

			
$K_s = 0.016$ $K_r = 0.024$	$K_s = 0.034$ $K_r = 0.044$	$K_s = 0.042$ $K_r = 0.062$	$K_s = 0.066$ $K_r = 0.154$
			
$K_s^s = 0.112$ $K_r^s = 0.284$	$K_s^s = 0.150$ $K_r^s = 0.268$	$K_s^s = 0.143$ $K_r^s = 0.227$	$K_s^s = 0.108$ $K_r^s = 0.235$

**Figura 1.** Coeficientes de pérdida codos  
Fuente: (Sotelo, 2000)

$$h_{co} = K_s \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

La tubería de presión tiene un ángulo de deflexión  $\theta$  en cada uno de los codos, y si el valor del número de Reynolds es igual a  $7.10 \times 10^6$ , los valores de los coeficientes K de pérdida local por cambio de dirección son:



**Figura 2.** Abaco coeficientes.  
Fuente (Sotelo, 2000)



- **Pérdidas en las válvulas**

$$h_{val} = K_{val} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Los valores empleados para  $K_{val}$  están en función del ángulo que forman la chapa y la directriz de la tubería.

**Tabla 1**

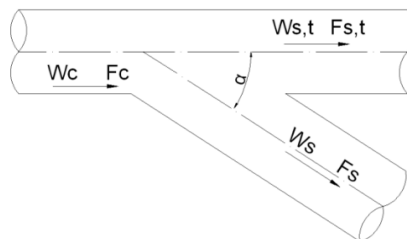
*Valores de  $K_{val}$  en función del ángulo*

A	5	10	15	20	30	40	45	50	60	70
<b>K<sub>val</sub></b>	0.24	0.52	0.90	1.5	3.9	11	19	33	120	750

*Fuente (Sotelo, 2000)*

- **Pérdidas por derivación**

La evaluación de la pérdida localizada en una derivación está en función de la división de caudales, áreas de entrada y salida del accesorio, velocidad media en la entrada y salida y ángulo de derivación

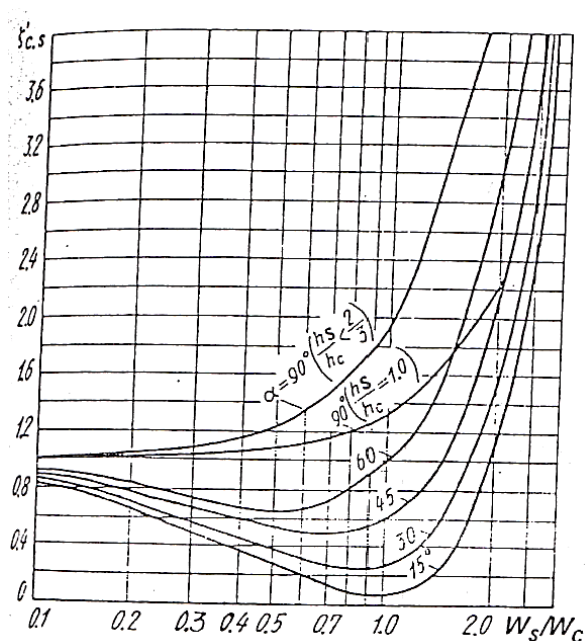


**Figura 3.** Esquema bifurcación.

*Fuente: (Sotelo, 2000)*

Para calcular dicha pérdida localizada determinamos dos coeficientes  $\xi_s$  y  $\xi_{s,t}$  correspondiente al coeficiente de pérdida en dirección de la derivación y de coeficiente de pérdida en la dirección original, respectivamente. (IDEL'CHIK, 1960)

Para el cálculo de  $\xi_s$ , primeramente se debe determinar  $\xi'_{c.s}$  de acuerdo al ábaco que se indica a continuación y que está en función de  $w_s/w_c$  y el valor del ángulo de la bifurcación  $\alpha$  ( $w_s$  es la velocidad correspondiente a la sección de derivación y  $w_c$  es la sección anterior a la derivación).



**Figura 3.** Ábacos para determinar  $\xi_{c.s}$  para un ángulo entre  $\alpha = 0 - 90^\circ$ .

Fuente: (Idelchik, 2004)

Luego,

$$\zeta_{c.s} = A' \zeta'_{c.s}$$

En donde  $A'$  varía de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 2**

*Variación de A' de acuerdo a la relación de áreas Fs/Fc y caudales Qs/Qc*

<b>Fs/Fc</b>	<b>≤ 0.35</b>		<b>&gt;0.35</b>	
Qs/Qc	≤0.4	>0.4	≤0.6	>0.6
A'	1.1-0.7Qs/Qc	0.85	1.0-0.65Qs/Qc	0.6

Para finalmente determinar el coeficiente de pérdida en dirección de la derivación:

$$\zeta_s = \frac{\zeta_{c,s}}{(W_s / W_c)^2}$$

Para determinar  $\xi_{st}$ , (coeficiente de pérdida en dirección original) primero se debe determina:

$$\zeta_{c,st} = 1 + \left(\frac{Fc}{Fst}\right)^2 \left(1 - \frac{Qs}{Qc}\right)^2 - 2 \frac{Fc}{Fst} \left(1 - \frac{Qs}{Qc}\right) - 2 \frac{Fc}{Fs} \left(\frac{Qs}{Qc}\right)^2 \cos \alpha + Kst$$

Para Yee's donde Fst = Fc el valor de Kst es igual a cero

$$\zeta_{st} = \frac{\zeta_{c,st}}{(W_{st} / W_c)^2}$$

#### - Pérdidas por estrechamiento de tubería

$$h_{est} = K_{est} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

En donde K se encuentra tabulado de acuerdo al ángulo de reducción.

**Tabla 3**

*Coefficiente de pérdida por reducción gradual del diámetro de la tubería*

<b>θ°</b>	10	15	20	25	30	35	40	45	60
<b>K<sub>est</sub></b>	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.3	0.32

Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2007)

## 2.4 Clases de tubería de Presión

El diseño hidráulico además de determinar las pérdidas, ayuda a determinar la clase de la tubería o calcular el espesor de la tubería el cual es el resultado mayor de los resultados a calculados con las siguientes relaciones:

$$T_y = (P_w)D_y / (2F_s)$$

$$T_y = (P_w' + P_t) D_y / (2F_{st})$$

$T_y$	espesor d tubería plg
$D_y$	Diámetro exterior plg
$P_w$	Presión diseñada de trabajo lb/plg <sup>2</sup>
$P_t$	Presión de oscilación momentánea lb/plg <sup>2</sup>
$F_s$	$\frac{3}{4}$ punto mínimo de rendimiento de acero lb/plg <sup>2</sup>
$F_{st}$	$\frac{3}{4}$ del punto mínimo de rendimiento de acero lb/plg <sup>2</sup>

En ningún caso, la presión de diseño excede los  $\frac{3}{4}$  de la fuerza mínima especificada de rendimiento ( $F_v$ ) del material de la tubería seleccionada en su presión de diseño de trabajo ( $P_w$ ), ni debe el espesor de la tubería ser menor del diámetro nominal de la tubería, dividido entre 230 como muestra la siguiente tabla:

**Tabla 4**  
*Espesor mínimo por diámetro de tubería.*

Diámetro nominal tubería (plg)	Espesor mínimo (plg)
18 a 24	0.125
30	0.136
36	0.163

Fuente: (INEN, 2014)

El espesor del cilindro para carga externa, según la determinación del espesor de la tubería, la desviación de esta, se desarrolla con la siguiente relación:

$$D_x = D_i K W_e R^3 / (E_i + 0.0614 E' R^3)$$

D <sub>x</sub>	Desviación horiz. tubería en plg, no debe exceder 0.03 veces diámetro inter.
D <sub>i</sub>	Factor de atraso de desviación, 1.0
K	Constante de estratificación 1.0
W <sub>e</sub>	Carga vertical en la tubería lb/plg
R	Radio plg
E <sub>i</sub>	Rigidez de la pared tubería lb-plg
E'	Modulo reacción del suelo = 1000 a 2000 lb/plg <sup>2</sup> , suelos 85-90% densidad

La carga del suelo se calcula, suponiendo una columna de suelo encima de la tubería. La determinación de los factores de la carga viva y del impacto, utiliza las recomendadas dadas por la AASHTO.

## 2.5 Válvulas de aire

En las líneas de conducción se prevé la colocación de válvulas de aire tipo combinadas (VAC), de purga (VAS) y triple acción ya que, la acumulación de aire en el sistema de conducción puede entorpecer sensiblemente el flujo normal y en algunos casos llegar a provocar accidentes destructivos, ya que se reduce la sección de flujo, aumenta la carga y disminuye el caudal. Por la elasticidad de las burbujas de aire, se

originan compresiones y dilataciones alternativas, las cuales llegan a causar sobrepresiones. El desplazamiento brusco de las masas de aire puede provocar golpes de ariete muy peligrosos.

Por lo expuesto, estas válvulas forman parte de los elementos de protección de las conducciones, razón por la cual deben ser ubicadas convenientemente para su óptimo funcionamiento. El dimensionamiento se lo realiza en base a ábacos de fabricantes y siguiendo el proceso presentado por los fabricantes y los cuales utilizan las siguientes relaciones:

- **Caudal para líneas llenadas a gravedad:**

$$Q \text{ (pies}^3\text{/s)} = 0.08666 (JD^5)^{1/2}$$

D      Diámetro del tubo plg

J      Gradiente hidráulico

Para la determinación del máximo diferencial de presión tolerable, para evitar el riesgo por aplastamiento por vacío se utiliza la relación:

$$P = 12500000 (T/D)^3$$

T      Espesor de la tubería plg

En sí, las válvulas conforme a los ábacos de los fabricantes, garantizan su total estanqueidad bajo el rango de operaciones de la conducción.

Las cámaras de válvulas de aire alojan en su interior válvulas de llenado, vaciado y de expulsión de aire para cuando el sistema trabaja a presión. Estas válvulas tienen sus respectivas válvulas de guardia (de compuerta), para desmontaje de las de aire en caso de que sea necesario darlas el respectivo mantenimiento.

Las válvulas de aire de llenado y vaciado permiten eliminar el aire cuando las líneas empiezan a ser llenadas e introducir aire cuando se realicen purgas a las mismas. Las válvulas de llenado y vaciado trabajarán en conjunto con las de desagüe cuando se realicen purgas durante la operación normal de las líneas y se las ha ubicado en los puntos más altos de la línea (cumbres), así como en los puntos de cambio de dirección de una línea ascendente y una descendente.

## **2.6 Válvulas de desagüe**

Los sedimentos que se acumulan en los puntos bajos de la línea de transmisión (concavidades) debido a la topografía que presenta el proyecto, ocasionan que se tenga una disminución en la sección del flujo de agua; por lo que es importante la colocación de válvulas de desagüe, que periódicamente faciliten la limpieza de la tubería. Las válvulas de desagüe son de accionamiento manual mediante volante y debido a las presiones a las que van a estar expuestas, estas no deberán permitir que se produzcan fenómenos de desprendimiento de flujo, ni cavitación que puedan originar daños en las válvulas.

Las cámaras de válvulas se colocan en los puntos más bajos y críticos de la línea de conducción, especialmente en los cruces de quebradas y ríos; se acoplan a la tubería principal por medio de un codo y tubería de derivación con diámetros similares equivalentes a los de las válvulas y clase de tubería correspondiente al tramo de desagüe, y descargan el agua por tubería de acero hacia los cauces naturales. El desagüe se lo realiza con tubería de acero del mismo diámetro de la válvula multichorro, unida con juntas mecánicas tipo Dresser, por lo que se deberá comprobar la hermeticidad de estas líneas de desagüe y de que no presenten irregularidades.

Las válvulas multichorro permitirán vaciar el agua de la conducción y la evacuación del líquido, guarda concordancia con los coeficientes ( $C_v$ ), adoptados y que, de acuerdo a los cálculos, estas serán de operación manual, con tiempos de cierre mayores a los 180 segundos con lo que se minimiza el trasciente hidráulico.

Estas válvulas debido a las presiones que van a estar expuestas no deberán permitir que se produzcan fenómenos de desprendimiento de flujo, ni cavitación que puedan originar daños en las válvulas. Su diseño prevé que trabajarán bajo la carga hidrodinámica máxima incluyendo la presión de golpe de ariete, por lo que se estima un tiempo de apertura o cierre mayor a los 180 segundos.

Para evitar socavaciones aguas debajo de los puntos de desagüe, se han construido disipadores de energía tipo martillo



## 2.7 Válvula Rompedora de presión reguladora de caudal

Para evitar cargas altas y controlar el caudal en la línea de conducción, se prevé la colocación de válvulas retenedoras de presión, las cuales están diseñadas para reducir la presión alta de entrada a una presión más baja de salida.

Estas serán válvulas automáticas controladas por pilotos que reducen la presión y que se activa con la presión de la línea. La válvula reduce la presión aguas arriba a un valor estable aguas abajo sin importar la variación de la presión y el flujo aguas arriba. Si la presión aguas abajo se excede del valor requerido por una condición externa la válvula se cierra.

Esta válvula se colocará donde amerite en las derivaciones secundarias y en las entradas a los tanques de reserva. Sus principales características son:

- Será de tipo globo, hidráulicamente operada y actuada por diafragma.
- Los diámetros nominales a emplearse serán de 4" y 6".
- Debe tener opciones para media y alta presión 230 psi y 350 psi respectivamente.
- Dimensiones cumplen con estándar ISO.
- Cuerpo de la válvula de hierro dúctil.
- Unión de tipo brida.

## 2.8 Tanques Rompe Presión

Como su nombre lo indica los Tanques Rompe Presión (TRP), alivian la presión en exceso con la que se llega a determinado punto, y la diferencia con el otro tipo de opción para simular abastecimiento o reserva de agua (Reservorio) es el volumen, ya que el TRP posee un volumen finito; así para el presente estudio se consideran 2 TRP cuyas dimensiones son: Área=28.09 y una altura efectiva de agua de 4.9 m, de estas dimensiones se obtiene un volumen del cual solo 128 m<sup>3</sup> son útiles para el cálculo.

Disponer de un volumen de agua para cubrir el requerimiento durante el incremento o vaciado brusco de la línea de transmisión, manteniendo la estabilidad del sistema.

### a) Volumen requerido

El proceso de dimensionamiento del tanque rompedpresión, está en función de factores clave como las características hidráulicas así como las geométricas de la tubería de transmisión, la forma en que las válvulas regula el caudal y el control que se prevé utilizar en el sistema.

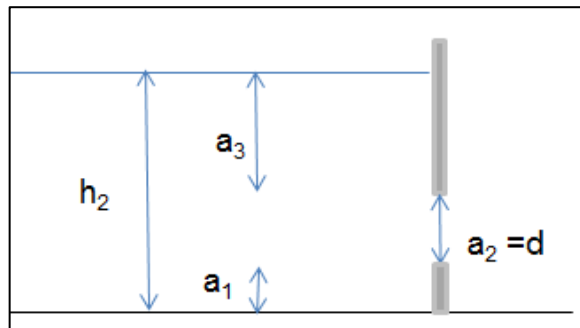
En un escenario real, la condición más desfavorable va a ser cuando se inicie el vaciado violento de un tanque, por tal motivo esto infiere una velocidad nula, lo que teóricamente implica el uso de un volumen máximo requerido en el tanque, que se calcula de esta manera:

$$V_{Tanque} = 0,693 \frac{(Av_o^2)}{I_e g}$$

- A    área transversal del flujo de aproximación
- $V_0$     velocidad de aproximación en la conducción
- $l_e$     pendiente longitudinal de la línea de energía en la conducción
- $g$     aceleración de la gravedad ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

Este tanque, debe evitar el ingreso de aire a la tubería, lo que podría ocasionar daños, de presentarse cambios importantes en la demanda. Esta condición puede ser solucionada por medio de un área adecuada del tanque. (Sotelo, 2003)

La altura mínima que debe tener el tanque para prevenir complicaciones en la tubería se define con la ayuda de las siguientes relaciones:



**Figura 4.** Rangos de altura mínima en tanques de reserva

Fuente: (Idelchik, 2004)

**Entrada de aire***Knauss*

$$a_3 = D * (2 * Fr + 0.5)$$

$$2 \text{ m/s} < V < 6 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * D}}$$

*Krochin*

$$2 < k < 3 \quad a_3 \geq 1 \text{ m}$$

$$a_3 = k * \left( \frac{V^2}{2 * g} \right)$$

*Polikovski y Perelman*

$$a_3 > 0.5 * D * \left( \frac{V}{\sqrt{2 * D}} \right)^{0.55}$$

**Altura mínima**

$$h_2 = a_1 + a_2 + a_3$$

La práctica recomienda dejar una distancia entre 0.30 y 0.50 m desde el fondo del tanque de presión hasta la tubería de presión para evitar el ingreso de material o sedimentos hacia la tubería.

Para reducir la sobreelevación por golpe de ariete, se recomienda adoptar bordes libres > 0,30 m.

## 2.9 Flujo no permanente

El Flujo no permanente, está gobernado por la ecuación de movimiento, denominada también ecuación de momentum, y la ecuación de continuidad. Estas ecuaciones son hiperbólicas “cuasi lineales”, y están expresadas en términos de dos variables dependientes: velocidad y elevación de la línea de gradiente hidráulica; y, dos variables independientes: distancia a lo largo de la tubería y tiempo. Las soluciones del sistema llevan a ecuaciones de propagación de pulsaciones de ondas por perturbaciones en el flujo y de propagación de la presión a través del sistema de tuberías.

Estas ecuaciones son diferenciales y simples de desarrollar algebraicamente por medio de diferencias finitas. Las soluciones generales para la ecuación de la onda están dadas, así como también se encuentran fórmulas especiales para obtener las velocidades de la onda con varios tipos de materiales.

La ecuación de movimiento es derivada para un flujo líquido a través de un tubo cónico o cilíndrico. Esta ecuación se expresa en términos de presiones en el eje central  $p(x,t)$  y de una velocidad media en la sección transversal  $V(x,t)$ .

La ecuación de movimiento se expresa también como función de una carga hidráulica  $H(x,t)$ , conocida como carga piezométrica. En la mayoría de los análisis se tiene  $H(x,t)$  y el caudal  $Q(x,t)$  como las variables dependientes.

En la ecuación de continuidad están dos ecuaciones: (1) diferenciación con respecto al movimiento axial de la tubería y (2) diferenciación con respecto a una partícula de masa de fluido. Existe además una tercera derivada total, que es la diferenciación con respecto al movimiento de la onda acústica. Esta es una forma conveniente de expresar la ecuación de continuidad donde  $V$  (velocidad) y  $H$  (carga o altura piezométrica) se consideran variables dependientes;  $x$  y  $t$  son variables independientes. A través del término  $a^2$  se incluyen las propiedades de las paredes de la tubería;  $a$  es la velocidad de propagación de la onda en el medio sólido.

Las soluciones particulares de las ecuaciones diferenciales parciales se obtienen asumiendo varias simplificaciones de acuerdo a los diferentes métodos de resolución del flujo de transientes.

Una solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo no permanente en tuberías constituye el método de las características, en base al cual se desarrolla el modelo numérico BENTLEY HAMMER.

No es posible obtener la solución general de las ecuaciones diferenciales parciales. Sin embargo, éstas pueden ser transformadas por el método de las características a ecuaciones totales particulares. Estas últimas pueden ser entonces integradas convenientemente por medio de diferencias finitas.

Luego del análisis matemático se encuentran dos pares de valores que son agrupados e identificados como ecuaciones C+ y C-

$$\begin{array}{c}
 C^+ \\
 \frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\
 \frac{dx}{dt} = +a \\
 C^- \\
 -\frac{a}{g} \frac{dH}{dt} + \frac{dV}{dt} + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\
 \frac{dx}{dt} = -a
 \end{array}$$

Por lo tanto, los valores del coeficiente  $[-a/g]$  convierten las ecuaciones originales en dos ecuaciones parciales totalmente diferentes, con restricciones que son válidas únicamente cuando las respectivas ecuaciones son aplicables.

Para el estudio del régimen no permanente, se utiliza el programa SURGE que permite evaluar el pulso de presión mediante un modelo elástico. La técnica usada en el programa es conocida como de la onda plana, la solución del problema se da a lo largo del eje de la tubería, por lo que el modelo es unidimensional. El método de la onda plana se basa en el concepto de que el flujo no permanente en tuberías resulta de la generación y propagación de ondas de presión que ocurren por la presencia de perturbaciones en el sistema, como es el cierre de una válvula por ejemplo.

Es necesario dividir el sistema a modelar en varios componentes que van a estar conectados a través de tramos de tubería, con condiciones particulares de materiales y diámetro. De esta manera puede determinarse los sectores en los que las ondas de presión actúan, en condición constante con el tiempo. Las partes del sistema transmiten las ondas de presión, a una velocidad conocida como celeridad y modifican su forma de acuerdo a la pérdida longitudinal por fricción, que se produce al circular el fluido por la conducción.

Para el cálculo del pulso de presión es necesario determinar un incremento de tiempo el mismo que debe ser igual para todos los tramos, de manera de posibilitar la determinación de las incógnitas en los contornos de las tuberías en un instante dado y así garantizar que la perturbación se vaya transmitiendo de una forma regular. Para esto es necesario imponerse la división de los conductos determinando los valores de los enteros  $N_j$  que satisfagan la condición:

$$\Delta t = \frac{L_1}{N_1 c_1} = \frac{L_2}{N_2 c_2} \dots\dots = \frac{L_j}{N_j c_j}$$

donde:

$\Delta t$  Incremento de tiempo (s)

$L_j$  Longitud de tramo (m)

$c_j$  celeridad del tramo (m/s)

En caso de no cumplirse ésta condición se realizan ajustes a los elementos susceptibles de tales ajustes, siendo la celeridad el elemento que más conviene ajustar, debido a que es el parámetro de mayor incertidumbre, la celeridad ajustada debe tener una variación de  $\pm 15\%$  con relación al valor original.

El valor de la celeridad de la onda de presión se evaluó mediante la siguiente ecuación:



$$c = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + \lambda \cdot D / e}}$$

donde:

- c celeridad de la onda de presión (m/s)
- D diámetro de la conducción en (mm)
- e espesor de las paredes de la tubería en (mm)
- $\lambda$  factor que depende del material de la conducción. Para acero 0.5

## **CAPÍTULO 3**

### **DESCRIPCIÓN SISTEMA ANALIZADO**

El área de estudio abarca las parroquias de Pifo, Tababela, Puembo, Yaruquí, Checa, El Quinche y Guayllabamba, área por la que las líneas de transmisión de agua potable derivan hacia los tanques de reserva.

El área de influencia se centra en la parte oriental del Distrito Metropolitano con un alcance de más de 19000 Ha, y en el que se localizan más de 100 000 pobladores directos beneficiados de las líneas de transmisión.

#### **3.1 Metodología de Análisis**

El modelamiento por flujo permanente y no permanente se lo realizará en mayor parte en el software Bentley Hammer, programa de licencia contratada y de interfaz accesible y fácil, considerado especialmente por la practicidad al momento de importar datos topográficos a partir de archivos CAD, lo que facilita aún más la labor de diseño y nos permite el ingreso adicional de válvulas y accesorios mediante archivos de tablas, además de adaptarse fácilmente a sistemas geográficos de diversa índole.

La metodología usada parte de la base teórica, y la parte experimental; la primera en base a todos los principios de la hidráulica general.

Para el caso específico de esta investigación, y dado que el modelo a analizar está construido, los escenarios a estudiarse se inferirán en base a los requisitos y falencias que actualmente presenta estas líneas en su sistema de distribución hacia las redes, datos que serán consultados en el periodo de tiempo establecido en el cronograma y se pedirá toda la información necesaria para correr el modelo con detalles reales y valores actuales.

### **3.2 Criterios y parámetros del diseño hidráulico**

La modelación hidráulica de la línea de transmisión y de los ramales secundarios interactúan a las condiciones hidrodinámicas y estáticas a las que se someten, por este motivo, las cargas hidráulicas considerables serán disipadas por medio de tanques rompe presión, logrando la ruptura de la continuidad, apoyados al mismo tiempo de válvulas reductoras de presión.

Dentro del dimensionamiento hidráulico se incluye:

- Definir parámetros hidráulicos generales en las líneas de transmisión como son: material, velocidad y línea de gradiente hidráulico.
- Simulación de condiciones normales de caudal nominal de diseño y el caudal máximo proyectado.
- Tiempos recomendados y máximos de cierre de válvulas.

- Puntos críticos para análisis de trascientes bajo condiciones de llenado brusco, vaciado o rotura.

### **3.3 Componentes del sistema**

El sistema considerado en el presente análisis está compuesto por tuberías de diferentes materiales (HD, PFRV, PVC) que conducen las aguas hacia tanques de reserva; a lo largo de las líneas (principales y secundarias), se ha previsto la inclusión de tanques rompepresiones, válvulas sostenedoras/reductoras de presión y reguladoras de caudal; válvulas de aire y desagüe. Su diseño y ubicación consideran las cargas hidráulicas a la que estarán sometidas, material, velocidades, espesor, rugosidades relativas, límite de fluencia, entre las principales variables. El análisis hidráulico se complementa con posibles escenarios catastróficos que se pueden dar en la fase de operación del sistema ya sea por fenómenos naturales como son un sismo, flujo de lodos, actividad volcánica y, acciones antropogénicas.

Tanto tubería como sus accesorios y/o equipamiento accesorio será ingresado en el modelo matemático en la posición geográfica identificada en las visitas de campo y los registros de catastro, a fin de reflejar un sistema real y detallado sobre el cual se considerará, dependiendo de los resultados de evaluación, las soluciones puntuales que optimicen las líneas de transmisión.

### 3.4 Caudales de simulación

El análisis numérico por realizarse plantea dos escenarios de demanda, la actual y la proyectada a una población para el año 2040. La primera se realizará en motivo de evaluar las condiciones actuales de funcionamiento y contrastar con los resultados en cada reserva y cámara de válvulas.

#### 3.4.1 Análisis de población y demanda

Este análisis tomó en cuenta el último censo de población y vivienda (noviembre de 2010), con el que se realizaron los ajustes poblacionales y cuyas estimaciones por parroquia, se presentan en la siguiente tabla donde se incluye la población estimada, considerando el uso de los suelos y la planificación territorial.

**Tabla 5**  
*Proyecciones demográficas (por cada parroquia)*

<i>Parroquia</i>	2010	2015		2040	
	Censo	PROY. DEM.	PROY. USOS S.	PROY. DEM.	PROY. USOS S.
<i>CHECA</i>	8980	10035	14888	15049	13525
<i>EL QUINCHE</i>	16056	18272	16244	29829	30209
<i>GUAYLLABAMBA</i>	16213	18856	17710	32406	33960
<i>PIFO</i>	16645	19568	19916	31243	27688
<i>PUEMBO</i>	13593	15381	23832	25648	24877
<i>TABELA</i>	2823	3189	4180	5433	16640
<i>YARUQUÍ</i>	17854	20570	11889	35028	28084
<b>TOTAL</b>	<b>92164</b>	<b>105871</b>	<b>108659</b>	<b>174636</b>	<b>174983</b>

Fuente: (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010)

La dotación neta toma en cuenta los consumos por categoría obtenidos de la EPMAPS (Gerencia Comercial) de las 7 parroquias orientales, registrados en 155l/hab/día. Para efectos de cálculo, se adoptó una dotación neta de 160 l/hab\*día, valor que guarda coherencia con los establecidos por la Gerencia Comercial, más un porcentaje de ANC del 25% para el año 2040.

Se muestra los caudales de cada uno de los tanques existentes con sus respectivos volúmenes vs los calculados considerando el análisis de población y demanda realizado por la consultora:

**Tabla 6**  
*Proyecciones demográficas (Por tanque de reserva)*

Línea	Tanque de Reserva	Q 2015 (l/s)	Q 2040 (l/s)
	Corazón	55	9
	Calluma	5	
Paluguillo - QUIPORT	Los Pinos		50
	Chaupimolino	100	61
	Aeropuerto	40	120
	Checa Cuscungo	11	
Yaruqui - El Quinche	Planta Yaruqui	20	
	Planta EL Quinche	30	
	Otón de Vélez	4	7
	Chaupi Estancia		15
Tababela - Guayllabamba	El Molino	15	40
	Sta.,Mónica		11
	San Juan	33	19
	Tababela	10	23
<b>Total Q entrega PTAP Paluguillo (l/s)</b>		<b>323</b>	<b>355</b>

Fuente: (INGECONSULT, 2014)

### 3.5 Tanques rompe presión

Estos tanques constituyen obras indispensables para controlar que las presiones de trabajo de las tuberías trabajen bajo condiciones de flujo permanente y no permanente. Se los ha dimensionado para que estos cuenten con un volumen de agua que cubra el requerimiento durante el incremento o vaciado brusco de la línea de transmisión, conserve la estabilidad del sistema y mantenga siempre sumergida la sección de ingreso, evitando así la entrada de aire a la tubería de la línea de transmisión.

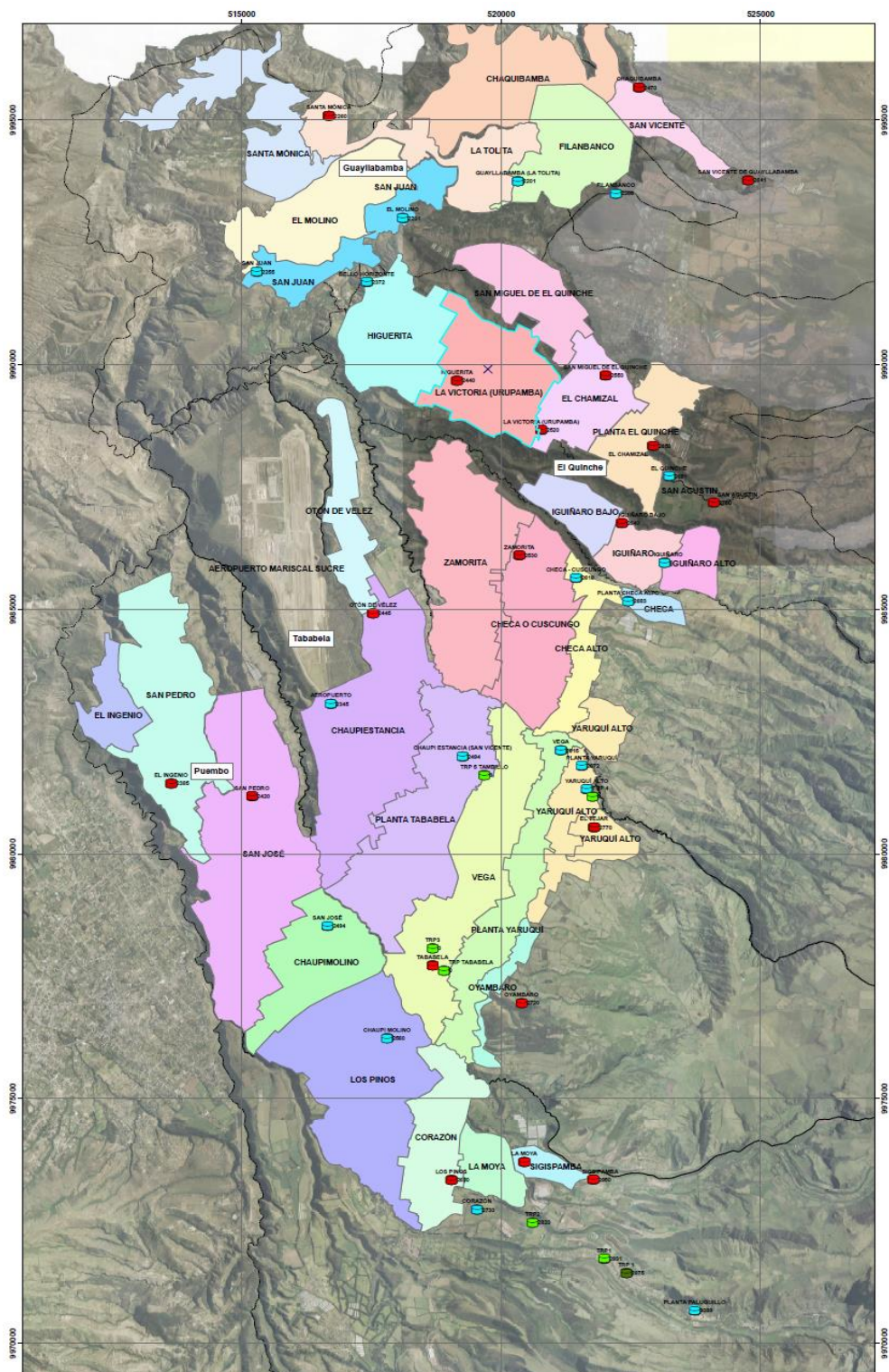
En la extensión del proyecto se ha considerado diferentes TRPs, a los cuales se analizará en el modelo considerando los caudales proyectados, y las cargas promedio de capacidad de disipación estimada en 100 mca.

### **3.6 Tanques de Reserva**

La tabla 7.0 (Tanques a Modelar) se indica las proyecciones poblacionales utilizada en conjunto con las zonas de presión, en parámetros directos del cálculo de los tanques de reserva, también dependientes de la población definida y el volumen diario asumido.

Las zonas de presión indican áreas comunes con intervalos de presión de 100 mca sobre las que se infiere las posibles ubicaciones de los tanques de reserva.

Se indica a continuación el mapa de zonas de presión que cubre el área de interés, y posteriormente la tabla del listado total de tanques considerados para la población futura:



**Figura 5.** Rangos de altura mínima en tanques de reserva.  
 Fuente: Modelamiento Modelo



**Tabla 7**  
*Tanques a modelar (demandas)*

SECTOR		Población abastecida (hab.)	Demanda (l/s)	Capacidad Tanque
PIFO	<b>La Moya**</b>	<b>1593</b>	<b>4</b>	<b>250</b>
	<b>Sigsipamba**</b>	<b>1959</b>	<b>5</b>	<b>250</b>
	El Corazón*	5691	9	0
	<b>Los Pinos**</b>	<b>14634</b>	<b>50</b>	<b>2000</b>
PUEMBO	Chaupi Molino*	5321	10	0
	San José*	13216	34	0
	<b>San Pedro**</b>	<b>5112</b>	<b>14</b>	<b>500</b>
TABABELA	<b>El Ingenio**</b>	<b>1218</b>	<b>3</b>	<b>250</b>
	<b>Planta Tababela**</b>	<b>9253</b>	<b>23</b>	<b>1000</b>
	Chaupi Estancia*	6018	15	0
YARUQUÍ	<b>Oyambaro**</b>	<b>1384</b>	<b>3</b>	<b>250</b>
	<b>El Tejar**</b>	<b>844</b>	<b>2</b>	<b>250</b>
	Yaruquí Alto*	4321	11	0
	Planta Yaruquí*	9330	24	0
	Vega*	11013	27	0
	<b>Otón de Vélez**</b>	<b>2585</b>	<b>7</b>	<b>250</b>
CHECA	<b>Planta Checa Alto**</b>	<b>4869</b>	<b>12</b>	<b>500</b>
	<b>Checa o Cuscungo*</b>	<b>4521</b>	<b>11</b>	<b>250</b>
	<b>Zamorita**</b>	<b>4135</b>	<b>10</b>	<b>250</b>
	Planta Iguiñaro*	4020	10	0
	<b>Iguiñaro Bajo**</b>	<b>862</b>	<b>2</b>	<b>250</b>
EL QUINCHE	Planta El Quinche	10492	30	0
	El Quinche Alto			
	<b>San Agustín**</b>	<b>1715</b>	<b>4</b>	<b>250</b>
	<b>El Chamizal**</b>	<b>3094</b>	<b>8</b>	<b>250</b>
	<b>La Victoria (Urupamba)**</b>	<b>2952</b>	<b>7</b>	<b>250</b>
	<b>San Miguel de El Quinche**</b>	<b>2058</b>	<b>5</b>	<b>250</b>
GUAYLLABAMBA	<b>Higuerita**</b>	<b>5016</b>	<b>12</b>	<b>500</b>
	Bello Horizonte	0	0	0
	San Juan*	5744	19	0
	El Molino Nuevo	15125	40	0
	<b>Santa Mónica**</b>	<b>4462</b>	<b>11</b>	<b>500</b>
	Filanbanco	1966	5	0
	La Tolita (Guayll. Medio)	3667	10	0
<b>Chaquibamba**</b>	<b>1738</b>	<b>3</b>	<b>250</b>	
<b>San Andres</b>	<b>500</b>	<b>1</b>	<b>250</b>	

### **3.7 Válvulas**

El diseño y el funcionamiento adecuados de una conducción a presión dependen, en gran parte, de la elección de las válvulas y de su correcta ubicación. Las válvulas son estructuras complementarias de una conducción a presión. Estos elementos deben colocarse en lugares de fácil acceso para su mantenimiento y/o remplazo. Su instalación considera que, de ser necesario, el sistema sea detenido el menor tiempo posible o, que al cerrar una parte de él, no se altere la conducción.

#### **3.7.1 Válvulas de aire**

Las válvulas de aire son usadas para:

- La expulsión de aire en el momento de iniciación del llenado de la tubería. Mientras, se encuentre en funcionamiento el agua hará presión sobre el flotador de la válvula evitando que se abra entretanto exista presión en la tubería.
- El ingreso de aire en la conducción cuando se inicia el vaciado de la tubería con el fin de evitar que se provoquen presiones negativas que pueda afectar al tubo.

#### **3.7.2 Válvulas de desagüe**

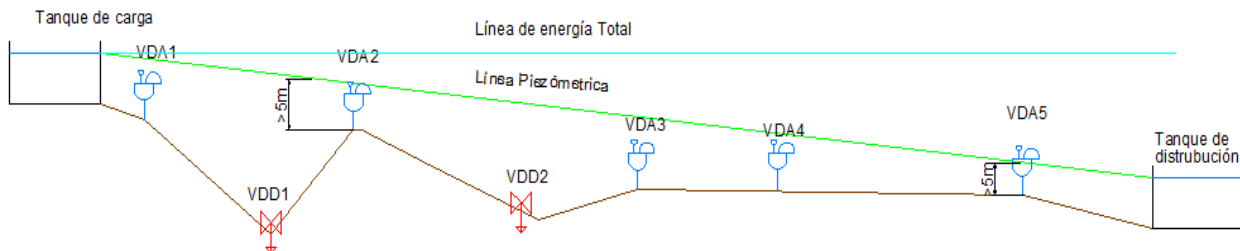
Los sedimentos que se acumulan en los puntos bajos de la conducción debido a la topografía accidentada, ocasionan que se tenga una disminución en la sección del flujo de agua, por lo que es importante la colocación de válvulas de desagüe, que periódicamente faciliten la limpieza de la tubería.

### 3.7 Ubicación y tipo de válvula

El diseño y el funcionamiento adecuados de una conducción a presión dependen, en gran parte, de la elección de las válvulas y de su correcta ubicación. Las válvulas son estructuras complementarias de una conducción a presión. Estos elementos deben colocarse en lugares de fácil acceso para su mantenimiento y/o remplazo. Su instalación considera que, de ser necesario, el sistema sea detenido el menor tiempo posible o, que al cerrar una parte de él, no se altere la conducción.

En el gráfico 1 se presenta un esquema de la ubicación de las válvulas de aire. Las válvulas de aire (VAC) 1 y 2 se colocan en puntos más altos, las válvulas 3 y 5 se sitúan en el cambio de gradiente (VAC), mientras que la 4 se halla en la mitad de un tramo largo de la conducción (VAS).

Así también se evidencia la presencia de las válvulas de desagüe en los puntos bajos de la conducción.



**Figura 6.** Esquema de ubicación de Válvulas de Aire y Desagüe

Fuente: (Ponce, ASCE Journal of Hydrologic Engineering, 2001)

**Tabla 8***Válvulas de aire a modelar*

ABSCISA (km)	COTA PROYECTO (m)	DIAMETRO TUBERIA (D) (mm)	DIAMETRO TUBERIA (D) (plg)	PCAS EXP. (pie <sup>3</sup> /seg)	
481.65	3721.500 3714.310	350	14	14.83	14.83
1391.95	3714.310 3711.850	350	14	14.83	14.83
3+857.21	3711.850 3707.775	400	16	14.83	14.83
5+424.13	3707.775 3704.451	400	16	14.83	14.83
11+950.00	3704.451 3690.762	400	16	14.83	14.83
12+464.98	3690.762 3683.530	400	16	14.83	14.83
17+734.63	3683.530 3671.194	300	12	14.83	14.83
34+846.65	3671.194 3655.643	250	10	14.83	14.83
41+564.20	3655.643 3643.943	250	10	14.83	14.83

Fuente: Modelo numérico particular

**Tabla 9***Válvulas de desagüe a modelar*

	Nº Válv.	Vel. Cond. (m/s)		Vel. Max. Desg. (m/s)		vaciado (min)	vaciado (h)	Ø Valv. Desg. Calc. (mm)
		C100	C150	C100	C150			
2+723	<u>1</u>	2.58	2.58	14.00	14.00	10	0.2	250
4+679	<u>2</u>	2.58	2.58	14.00	14.00	14	0.2	250
8+869	<u>3</u>	1.26	1.26	14.00	14.00	10	0.2	250
10+572	<u>4</u>	1.26	1.26	14.00	14.00	10	0.2	150
11+022	<u>5</u>	1.26	1.26	14.00	14.00	10	0.2	150
12+349	<u>6</u>	1.26	1.26	14.00	14.00	10	0.2	250
13+309	<u>7</u>	1.26	1.26	14.00	14.00	10	0.2	250
13+784	<u>8</u>	1.24	1.24	14.00	14.00	10	0.2	150
13+989	<u>9</u>	1.24	1.24	14.00	14.00	10	0.2	150

Fuente: Modelo numérico particular

## CAPÍTULO 4

### CONFIGURACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO NO PERMANENTE

El modelo se configura con la implantación en planta y perfil del proyecto en el cual se incluyen: tipo de tubería, diámetro interno, longitud, rugosidades relativas, coeficientes de pérdidas localizadas, celeridad de onda. La línea considera nodos no mayores a 50m, lo que permite obtener datos de presiones dinámicas, caudales en los tramos.

#### 4.1 Análisis de pérdidas por fricción y localizadas

Las pérdidas por fricción se cuantifican a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach la cual incluye el análisis de la longitud, velocidad, diámetro y tipo de material.

La forma general de la ecuación es:

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

Donde:

hf pérdida de carga debida a la fricción. (m)

f factor de fricción de Darcy. (Adimensional)

L longitud de la tubería. (m)

D diámetro de la tubería. (m)

$V^2/2g$  carga de velocidad. (m/s)

Esta ecuación permite considerar los efectos viscosos en la conducción, al ser el factor  $f$ , una función de del número de Reynolds y la rugosidad relativa, siendo el número de Reynolds precisamente el número adimensional que relaciona los efectos inerciales con los viscosos.

El cuadro que se presenta a continuación muestra un comparativo de los coeficientes para determinar las perdidas por fricción para diversos tipos de tuberías determinados por varios autores entre

**Tabla 10**  
*Características tuberías a modelar*

<i>Label</i>	Mannings Coefficient	Roughness Height	Kutters N Coefficient	HazenWilliams C Coefficient	Youngs Modulus	Poissons Ratio
<i>Hierro Dúctil</i>	0.012	0.00085	0.012	130	3592288800	0.28
<i>Acero</i>	0.013	0.000098425	0.013	140	4323277800	0.3

Fuente: (Bosserman, 1978)

Las perdidas localizadas, se producen por la presencia de accesorios a lo largo de la línea principal o por las deflexiones horizontales, estas se expresan en función de la carga de velocidad:

$$h_L = k \frac{V^2}{2g}$$

Los valores de  $k$  comúnmente utilizados en líneas de conducción y/o transmisión dependen de la deflexión, el material y el número de secciones como se indica a continuación:

**Tabla 11**  
*Valores Kc para tuberías*

ÁNGULO (°)	NUMERO SECCIONES	COEFICIENTE K <sub>c</sub>
3 – 5	2	0.016
5 – 10	2	0.025
10 – 15	2	0.038
15 – 22,5	2	0.054
22,5 – 30	2	0.098
30 – 45	2	0.183
45 – 60	3	0.131
60 – 90	3	0.21

Fuente: (Sotelo, 2000)

Se debe considerar el golpe de ariete, el mismo que se presenta cuando se tiene un retardo o una aceleración en el flujo, por ejemplo, en el cambio de abertura de una válvula. Si los cambios son graduales, los cálculos se efectúan considerando al fluido incompresible y al conducto rígido. La sobrepresión del golpe de ariete se calcula en la práctica como una fracción de la longitud desde el punto inicial al punto en consideración mediante la expresión propuesta por Michaud.

$$GA = 2V_0/gTcL$$

Finalmente se procede al cálculo de las características del flujo permanente en cada uno de los tramos de la conducción principal, programando para ello una hoja electrónica.

Normalmente, a excepción de la tubería de acero, los accesorios se consideran contruidos por 2 componentes (HD, PVC, PFRV).

## 4.2 Líneas de conducción

Las líneas se inician ya sea de un tanque de carga y/o a la salida de cualquier tipo de captación, plantas de agua, tanques de reserva. En el presente caso la línea de conducción considera:

- Líneas Existentes, que se considera como prototipo y que ha permitido determinar el comportamiento hidráulico entre los datos que se obtienen del modelo numérico y del prototipo.
- Trazado de una línea proyectada que considera la topografía y geomorfología del Ramal Norte que recorre la zona de Paluguillo y, recorre por las parroquias de Pifo, Yaruqui, Checa, El Quinche y Guayllabamba; esta línea prevé ramales secundarios que entregan las aguas a Tanques de reserva cuyo volumen considera los análisis de oferta y demanda
- Líneas secundarias que alimentan a los tanques.
- El trazado incluye válvulas de aire de triple acción, desagüe y reductoras/controladoras de flujo; los dimensionamientos consideran su funcionamiento para cuando la línea trabaje con flujo estacionario y, con escenarios a darse por posibles trascientes que se pueden dar en el normal hidráulico de las mismas.

### **4.3 Análisis del tipo de tubería**

El objetivo fundamental es el de determinar las características técnicas de las tuberías a ser consideradas en los proyectos, por lo que se hace necesario realizar un análisis de las propiedades mecánicas, cumplimiento de la normativa como es la AWWWA, ASTM, ISO, tipo de uniones, características topográficas y geomorfológicas, montaje, operación y mantenimiento, costos, durabilidad entre otras. Las cuales tendrán que ser contrastadas en el estudio de simulación numérica del flujo que permita:



- Determinar diámetros de tubería y espesores o clases y en una segunda fase determinar las sobrepresiones y supresiones en los puntos de máximo sollicitación en la conducción.
- En el caso particular de países andinos, las líneas son proyectadas por terrenos dispuestos en fajas alargadas, presentan límites estructurales fallados, discordantes, limitados por depósitos pliocuaternarios compuestos por materiales volcánicos, volcano-sedimentarios y sedimentarios; uno de los factores que más ha incidido en el modelado del relieve, es la erosión originada por la acción del agua (erosión hídrica) que ha tallado valles en V cerrados y abiertos, encañonados y escarpados.
- El trazado de la línea además de atravesar una zona sísmica alta, incluye terrenos poco portantes por lo que, independiente del tipo de tubería (HD, Acero, plásticas), deben seguir los movimientos de relieve del terreno puesto que las tensiones mecánicas que intervienen podrían ser considerables.
- Si se considera tubería de acero, esta se puede ajustarse al terreno ya que pueden realizarse en sus juntas deflexiones hasta de  $3^{\circ}$ ; para desviaciones mayores se tienen que fabricar piezas especiales ya sea en horizontal, vertical o en tres direcciones. Las juntas son soldadas y radiografiadas al 100% para tuberías con diámetros mayores a 500 mm.
- En la tubería de HD se permiten deflexiones hasta  $3^{\circ}$  como límites de desviación angular y juego axial a través de las juntas que permiten que la línea se acople al suelo.

En caso de un sismo los dos tipos de tubería tendrían un comportamiento elástico pudiendo fallar en sus uniones. Estudios realizados en Japón en 1979 después del terremoto de Miyagi-Ken-Oki se señala una tasa de daños por kilómetro de 0.04 para las tuberías de hierro fundido dúctil, frente a una tasa cuatro veces superior para el Acero como se indica.

**Tabla 12**

*Porcentaje de daños por Km*

<i>Material</i>	<i>% Daños/Km</i>
<i>HD</i>	0.04
<i>ACERO</i>	1.24
<i>PVC</i>	0.27

Fuente: (UNASAM, 2014)

**Tabla 13**

*Parámetros a considerarse para cada tipo de tubería*

<i>Descripción</i>	<i>HD</i>	<i>ACERO</i>
<i>Excavación de la zanja</i>	Mayor a 1.5 m altura	Necesita sobreanchos para soldadura
<i>Desfile de la tubería</i>	No es necesaria area adicional de plataforma	Mayor ancho de plataforma para el desfile y colocacion side bones
<i>Cama de arena</i>	No es necesaria	Por lo menos una cama de 15 cm
<i>Empate de tubos</i>	Con herramienta menor	Soldadura arco sumergida
<i>Relleno de la zanja</i>	Normal	normal
<i>Pruebas hidráulicas de campo</i>	Con carga estatica	con carga estatica
<i>Trabajos de acabado</i>	No es necesario	resanes
<i>Proteccion catodica</i>	No es necesario	es necesaria

Fuente: (EMAAP, 2009)

### **4.3 Análisis de equipos y valvulería**

#### **4.3.1 Tanques Rompe Presión**

Como su nombre lo indican los Tanques rompe presión (TRP), alivian la presión en exceso con la que se llega a determinado punto; permitiendo controlar las presiones de la tubería, evitando que éstas trabajen con presiones elevadas; adicionalmente dentro de la línea de conducción o transmisión el tanque rompe presión permite tener un volumen determinado, para en un caso determinado de llenado brusco o rotura de tubería en un punto bajo de la conducción, permita mantener la tubería llena de agua por un tiempo hasta que las válvulas de aire permitan el ingreso del aire y, llenen a la tubería evitando de esta manera el colapso por sub presión.

#### **4.3.2 Válvulas de control de flujo**

Las válvulas de control de flujo FCV (Flow control valve) son utilizadas para controlar el caudal de ingreso hacia tanques de reserva y/o en derivaciones, por lo general se trata de válvulas de tipo sostenedora de presión, reductora de caudal y reductora de presión. Usualmente este tipo de válvulas se pueden utilizar en las líneas para control de presiones, ingresos a los tanques de reserva, redes de distribución; con la finalidad de controlar el caudal de ingreso, la caída de presión que se presenta en dichos sitios, cumpliendo la función del tanque rompe presión.

### **4.3.2 Válvulas de aire**

Dentro del sistema se colocaron válvulas de aire triple acción con un diámetro de ingreso de caudal gaseoso, estas válvulas no intervienen directamente en el modelo numérico de simulación a flujo permanente; el análisis de este tipo de válvulas es de gran utilidad para el análisis de transitorios hidráulicos, particularmente para el vaciado brusco y o rotura de tubería.

### **4.3.2 Válvulas de desagüe**

Fueron colocadas como válvulas FCV (Flow Control Valve) y mediante estas se añaden las características típicas del caudal de descarga, de igual manera, esta válvula se usa en el escenario de transitorios propuesto. Las válvulas comúnmente usadas para presiones mayores a 100 mca, son las válvulas tipo aguja o de cilindro ranurado, que pueden ser controladas sus coeficientes de descarga de acuerdo a la apertura de las mismas; estas válvulas generalmente son comprobadas para que trabajen libre de cavitación.

Para válvulas con presiones menores a 100 mca se recomiendan la utilización de válvulas de compuerta; la configuración de las válvulas de desagüe se complementa con una válvula de guardia para operación y mantenimiento de las válvulas.

#### 4.4 Celeridad de onda

La celeridad ( $c$ ) es la velocidad de propagación de la onda de presión a través del agua contenida en la tubería, cada tramo de tubería que presente un cambio en su geometría (diámetro, espesor) o material, constituye un cambio de celeridad de onda, siendo notorios los cambios, cuando la tubería cambia de material, siempre y cuando su módulo de elasticidad difiera considerablemente. (Mendiluche, 2018).

Generalmente en un sistema presurizado se puede tener más de una celeridad de onda, razón por la cual para obtener un valor representativo se puede calcular una celeridad de onda ponderada.

$$\bar{a} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i \cdot a_i}{\sum_{i=1}^n L_i}$$

Donde:

$L_i$  Longitud de tramo con una misma celeridad de onda.

$A_i$  Celeridad de onda.

$n$  Número de tuberías con distinta celeridad de onda

Para el cálculo de la celeridad de onda se consideran los siguientes datos:

- El módulo de compresibilidad del agua es 2.05E9 Pa.
- El módulo de elasticidad de la tubería de hierro dúctil es 1.24E11 Pa.
- El módulo de elasticidad de la tubería de PRFV es 1.96E10 Pa.
- El módulo de elasticidad de la tubería de PVC es 2.94E9 Pa.

En el caso de la línea de transmisión actual, se posee 2 materiales cuyos módulos de Elasticidad difieren en el orden de 6 a 1 (Hierro Dúctil/PRFV). En la siguiente tabla se presenta los valores de celeridad de onda calculados para los tramos involucrados.

**Tabla 14**  
*Valores de celeridad*

<i>Diámetro Tubería (mm)</i>	espesor (mm)	Tipo Material	c (m/s)
99.6	5.2	PVC	377.8
133.2	3.4	PVC	269.0
150	5	PVC	305.8
152.2	3.9	PVC	269.5
181	9.5	PVC	378.7
190.2	4.9	PVC	270.2
211	7	PVC	305.1
226.2	11.9	PVC	379.1
321.2	16.9	PVC	379.1
240.2	4.9	PVC	241.4
150	5.00	HIERRO DUCTIL	1156.3
200	5.40	HIERRO DUCTIL	1112.7
250	5.80	HIERRO DUCTIL	1078.8
300	6.20	HIERRO DUCTIL	1051.6
450	8.60	HIERRO DUCTIL	1032.7
300	5.3	PRFV	543.9
350	5.3	PRFV	508.9
400	5.9	PRFV	503.1
450	6.58	PRFV	501.1

#### 4.4 Análisis de flujo permanente

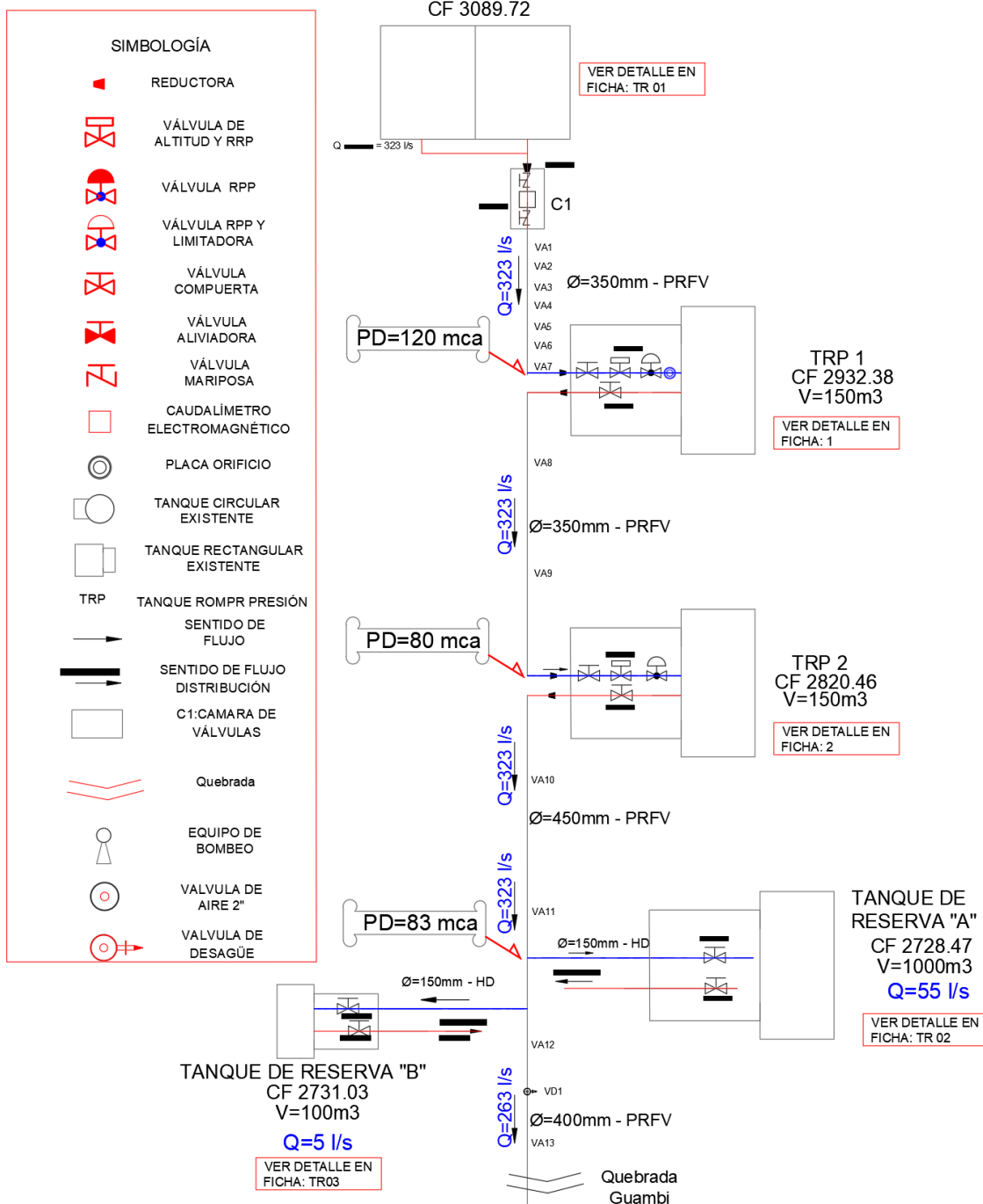
##### 4.4.1 Evaluación de línea existente

La evaluación de La línea existente cuenta con una longitud de 18 825m, sobre la misma y por los desniveles presentes en su trazado se han construido 4 tanques rompedresiones, una derivación que conduce mediante dos ramales a un tanque de reserva y al aeropuerto. A lo largo de la misma se encuentran instaladas válvulas de aire desagüe, sostenedoras de presión:

**Tabla 15**  
*Características hidráulicas*

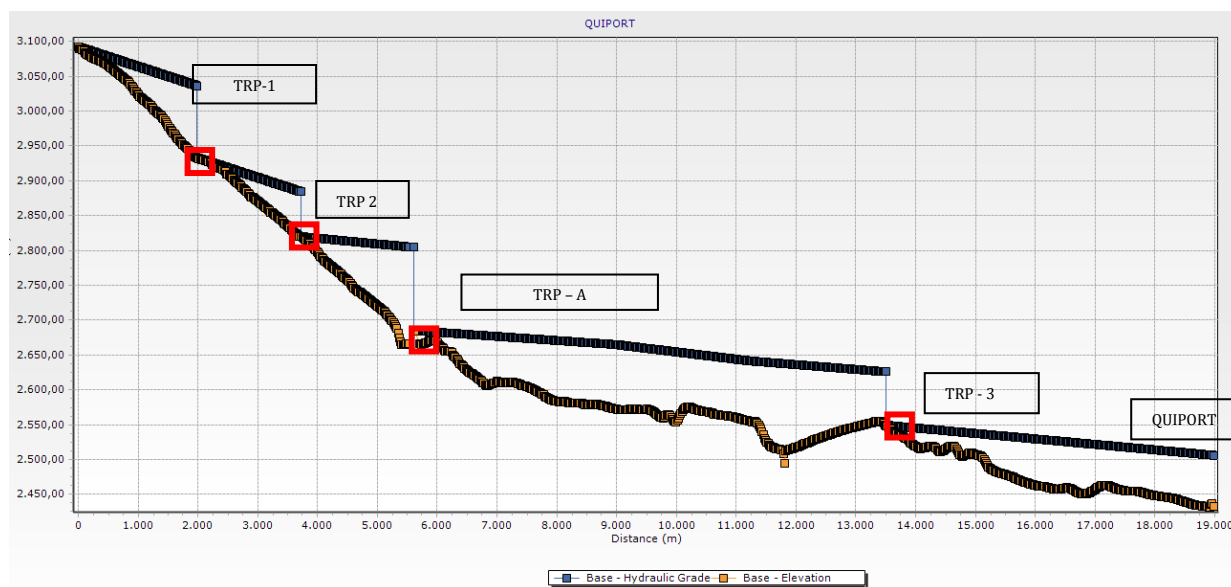
ABSCISA	DERIVACION	TIPO	DIAMETRO NOMINAL	CAUDAL	VELOCIDAD
1+993.97	Planta Paluguillo Linea a TRP 1	PRFV	355.00 mm	355.00 l/s	3.59 m/s
3+743.19	TRP 1 Linea a TRP 2	PRFV	355.00 mm	355.00 l/s	3.59 m/s
4+986.20	TRP 2 Derivacion El Corazon	PRFV	450.00 mm	355.00 l/s	2.23 m/s
5+911.92	Linea a Tanque Los Pinos	PRFV	450.00 mm	346.00 l/s	2.18 m/s
8+879.95	Tanque Los Pinos Cambio de Diametro	PRFV	450.00 mm	296.00 l/s	1.86 m/s
10+876.15	Derivacion Chaupi Molino	PRFV	400.00 mm	296.00 l/s	2.36 m/s
13+218.59	Derivacion a Tanque Tababela	PRFV	400.00 mm	235.00 l/s	1.87 m/s
13+337.00	Linea a TRP 3	PRFV	400.00 mm	212.00 l/s	1.69 m/s
13+404.59	TRP 3				
18+908.30	Linea a Tanque Aeropuerto	PRFV	300.00 mm	120.00 l/s	1.70 m/s
	Tanque Aeropuerto				

A continuación se presenta un esquema de la línea, en la cual constan la salida, distribuciones hacia los tanques de reserva, rompe presione y valvulería; así como las características de las tuberías y los caudales en cada tramo. La figura 7 presenta un perfil esquemático de la ubicación de los diversos tipos de válvulas que se han instalado para una mejor operación y mantenimiento del sistema.





Con las características, el modelo con los condicionamientos detallados en los capítulos anteriores para el flujo permanente o estacionario, se obtuvieron las siguientes presiones y cuyo perfil hidráulico se muestra a continuación:



**Figura 8.** Perfil y línea piezométrica Paluguillo - Quiport  
Fuente: Diseño particular

#### 4.4.2 Línea derivación Guayllabamba

Esta línea estará controlada por la carga del TRP Los Pinos, mejorando las presiones de trabajo de la tubería de HD; la línea incluye un ramal secundario que llevará el agua hacia el Tanque proyectado de Santa Mónica de Guayllabamba.

En el cruce de la quebrada Urvia se tiene instalada una válvula reductora, la cual reduce alrededor de 50 mca para las condiciones actuales (48 l/s), esta se encuentra trabajando bien y libre de cavitación. Para el caudal de diseño (70 l/s), se observa en la corrida del modelo que se puede utilizar el tanque Otón de Vélez para eliminar la válvula mencionada.

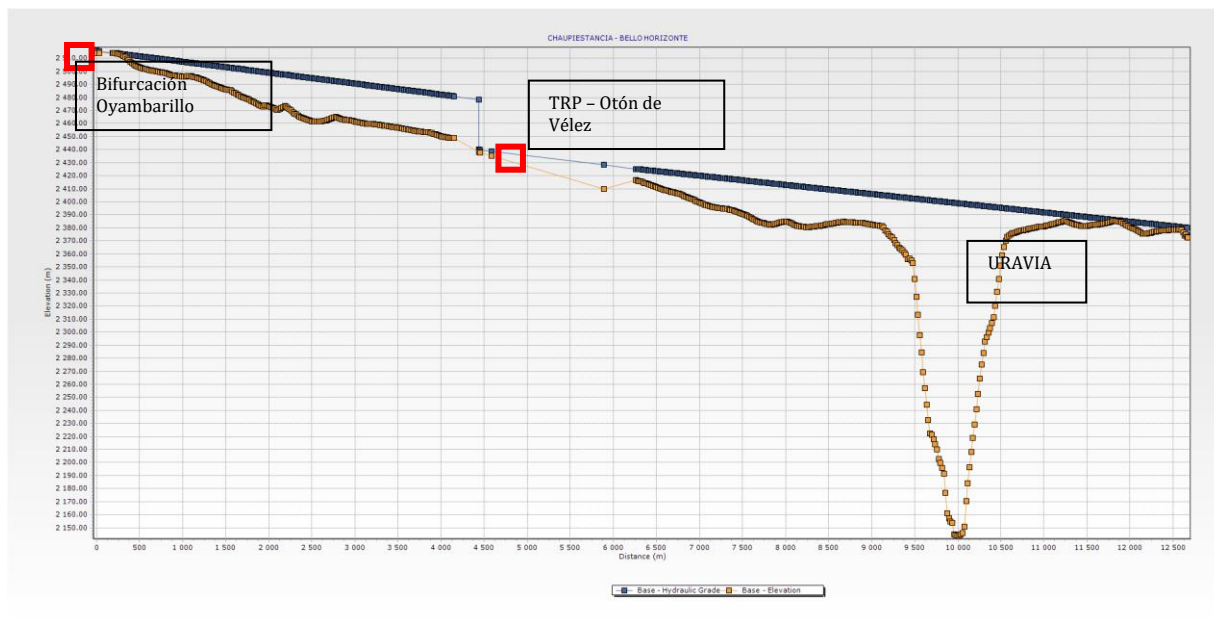
El Tanque Bello Horizonte al no tener área de servicio, funciona como Tanque rompedor de presión y de carga para conducir las aguas hacia los Tanques San Juan, El Molino y Santa Mónica.

Se construirá un ramal nuevo que conduce las aguas hacia el tanque Santa Mónica, se inicia en el Tanque Bello Horizonte y cuenta con una longitud de tubería de 5211m; esto permitirá controlar los caudales hacia la zona de Santa Mónica de forma independiente y al tanque de reserva.

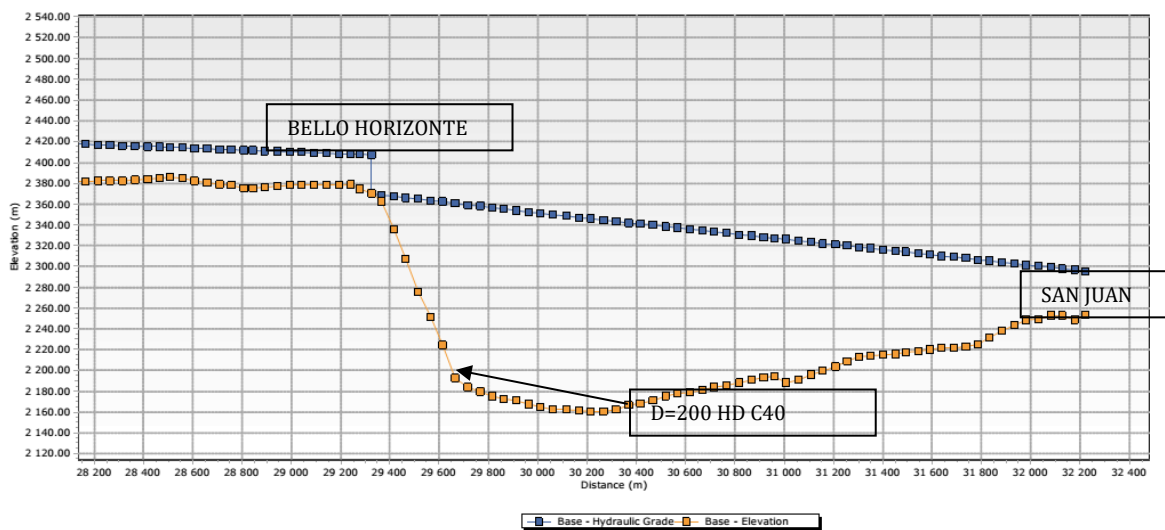
A continuación, se presentan las principales características hidráulicas de la línea que parte desde Tababela y el perfil longitudinal que cubre el nuevo Ramal de Santa Mónica incluyendo el TRP – Los Pinos.

**Tabla 16**  
*Línea de transmisión Yaruquí - Guayllabamba*

EST	DERIVACION	TIPO	DIAMETRO NOMINAL	CAUDAL	VELOCIDAD
0+000.00	Valvula Oyambarillo				
3+834.23	Punto Cambio de Diametro	HD C40	400.00 mm	92.00 l/s	0.73 m/s
5+080.93	Linea a Chaupi Estancia TRP Chaupiestancia	HD C40	250.00 m	92.00 l/s	1.87 m/s
9+109.22	Linea a Tanque Oton de Velez Tanque Oton de Velez	HD C40	250.00 m	77.00 l/s	1.57 m/s
16+887.03	Linea a Tanque Bello Horizonte Tanque Bello Horizonte	HD C40	250.00 m	70.00 l/s	1.43 m/s
17+663.43	Punto Derivacion a San Juan	HD C40	200.00 m	59.00 l/s	1.88 m/s
19+646.90	Linea a Tanque El Molino Tanque El Molino	HD C40	150.00 m	40.00 l/s	2.26 m/s
0+000.00	Punto Derivacion a San Juan Linea a TanqueSan Juan	HD C40	150.00 m	19.00 l/s	1.08 m/s
2+213.75	Tanque San Juan				



**Figura 9.** Perfil y línea piezométrica Yaruquí - Guayllabamba  
Fuente: Diseño particular



**Figura 10.** Perfil y línea piezométrica BH - San Juan (continuación)  
Fuente: Diseño particular

Como se aprecia, esta línea no tiene problemas en lo referente a la línea de gradiente hidráulico, pero, los perfiles nos muestran que tiene que cruzar quebradas con profundidades mayores a 200m, razón por la cual, se debe prever: cruzar la quebrada con tubería que soporte las presiones desde el punto más bajo de la estática + un porcentaje de flujo no permanente, lo cual incidiría en el costo del proyecto; no se justifica hacer un paso elevado por la longitud.

Utilizar una sostenedora de presión, que me permita controlar la presión, entre la entrada y salida del agua de la tubería y poder mantener cotas de trabajo que permitan instalar una tubería con espesor mínimo; esta válvula tendrá que ser operada en línea y controladas por sensores de nivel que detecten variaciones en la línea de gradiente hidráulico para, que la válvula se abra y se pueden controlar las mismas, a través del actuador, que puede ser eléctrico o neumático.

#### **4.4.2 Línea Parroquias**

Su trayecto cuenta con cuatro (4) tanques rompepresiones: la siguiente tabla permite conocer las principales características hidráulicas y los puntos de derivación hacia los distintos tanques de reserva.

**Tabla 17**  
*Línea de transmisión Parroquias*

EST	DERIVACION	TIPO	DIAMETRO NOMINAL	CAUDAL	VELOCIDAD
0+387.28	INICIO DE LA LINEA DE TRANSMISION				
1085.43 m	LINEA A TRP PALUGO	PVC 1.25 MPa	321.20 mm	215.00 l/s	2.65 m/s
1+472.71	TRP PALUGO				
3840.30 m	LINEA A LA MOYA BAJO	HD C40	450.00 mm	215.00 l/s	1.35 m/s
5+313.01	LA MOYA BAJO				
1934.99 m	LINEA A TRP LA MOYA ALTO	HD C40	450.00 mm	211.00 l/s	1.33 m/s
7+248.00	TRP LA MOYA ALTO				
4654.05 m	LINEA A OYAMBARO BAJO	HD C40	450.00 mm	211.00 l/s	1.33 m/s
11+902.05	OYAMBARO BAJO				
6297.19 m	LINEA AL TEJAR	HD C40	450.00 mm	208.00 l/s	1.31 m/s
18+199.24	EL TEJAR				
451.78 m	LINEA A YARUQUI ALTO-PTAP YARUQUI - TANQUE VEGA - TRP4	HD C40	450.00 mm	206.00 l/s	1.30 m/s
18+651.02	YARUQUI ALTO- PTAP YARUQUI - TANQUE VEGA - TRP4		250	127.00 l/s	2.59 m/s
9848.18 m	LINEA A IGUIÑARO	HD C40	300.00 mm	79.00 l/s	1.12 m/s
28+499.20	IGUIÑARO				
2112.42 m	LINEA A TRP SAN AGUSTIN	HD C40	300.00 mm	69.00 l/s	0.98 m/s
30+611.62	TRP SAN AGUSTIN				
2706.35 m	LINEA AL CHAMIZAL	PVC 1.25 MPa	226.20 mm	65.00 l/s	1.62 m/s
33+317.97	EL CHAMIZAL - *Caudal par TNQ SMQ, Urupamba, Higuerita				
6500.10 m	LINEA A DERIVACION FILANBANCO / LA TOLITA	PVC 1.25 MPa	226.20 mm	33.00 l/s	0.82 m/s
39+818.07	DERIVACION FILANBANCO - TANQUE LA TOLITA				
2199.59 m	DERIVACION TANQUE SAN VICENTE - GUAYLLABAMBA		226.20 mm	18.00 l/s	0.45 m/s
42+017.66	TANQUE SAN VICENTE / TANQUE CHAQUIBAMBA				

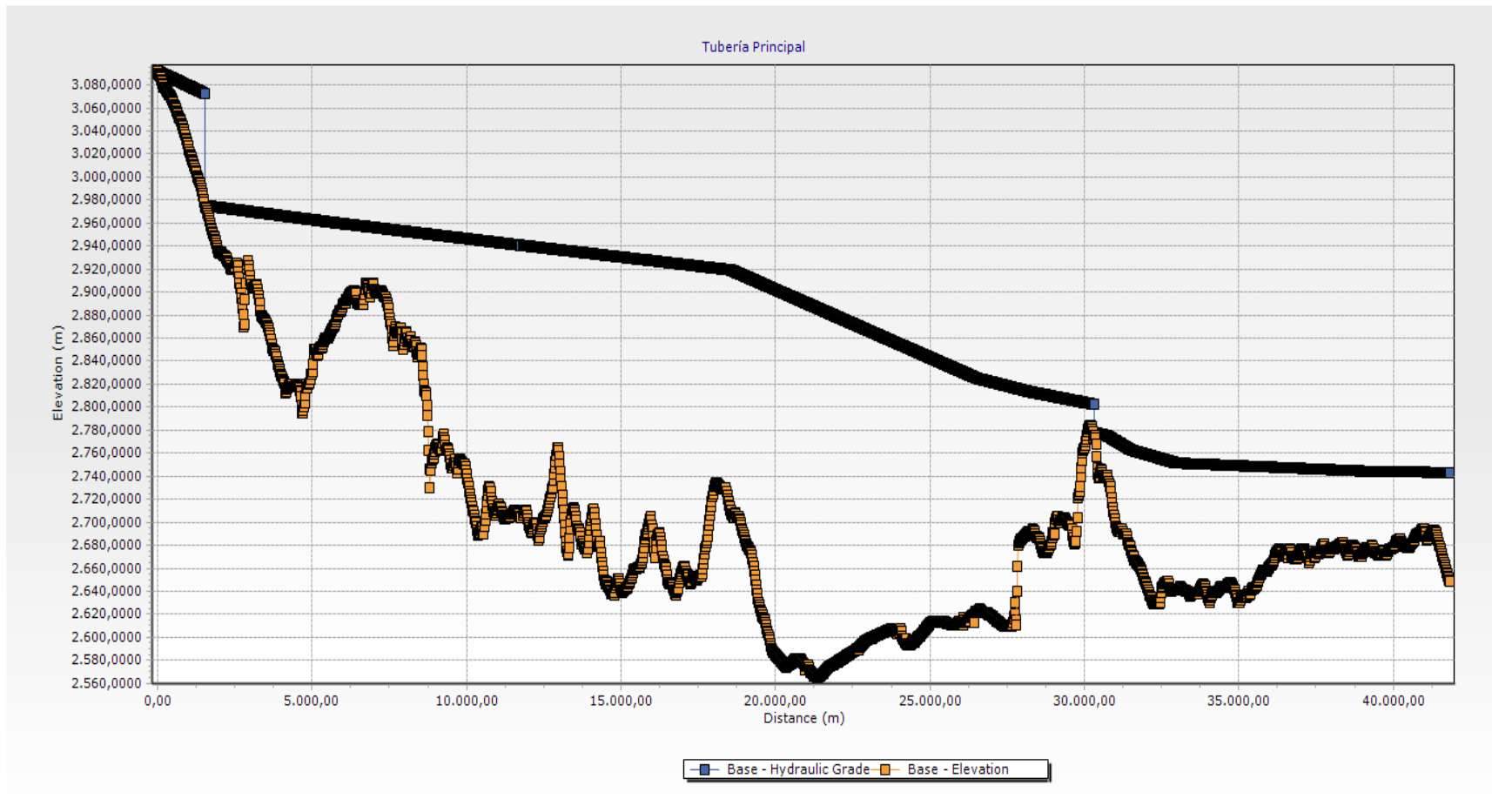
En el primer tramo como se puede ver, por la ubicación del tanque rompedor Palugo y la PTAP Palugillo que presentan un desnivel de 82 m de altitud, se justifica colocar tubería de PVC de 350 mm de diámetro.

Desde el TRP Palugo en adelante las presiones son variables y superiores a 150 mca se justifica la instalación de tubería de hierro dúctil.

Al TRP 4 se optimizará de tal manera que permita utilizar la tubería existente para transportar las aguas hasta el Tanque de la Planta del Quinche y en su recorrido alimente a los tanques como son Checa, Zamorita, Iguiñaro Bajo.

Desde el tanque San Agustín hasta Guayllabamba se utilizará tubería de PVC 1.25 MPa ya que las presiones así lo ameritan.

El caudal máximo que puede entregar esta línea es de 249 l/s, este caudal está gobernado por la parte alta de Yaruquí y podrá ser aprovechado en casos en que tuviera que darse mantenimiento a la línea existente Paluguillo QUIPORT para lo cual deberá utilizarse la interconexión entre el TRP de Yaruquí hasta Tababela. La siguiente tabla muestra las principales características con sus máximos caudales.



**Figura 11.** Perfil y línea piezométrica Parroquias  
Fuente: Diseño particular

### 4.4.3 Líneas Secundarias

Las líneas secundarias o derivaciones permiten suministrar el agua a los tanques de reserva localizados en la zona del proyecto, los cuales se muestran en el esquema adjunto y en la tabla 6.6.

En las derivaciones debido a las presiones altas que se tiene, no se justifica colocar tubería de PVC, las cuales la mayor serie es de 1.25MPA se instalará tubería de HD 100mm, para lo cual en los inicios de los ramales se procederá cámaras de derivación, para satisfacer posibles incrementos de demanda de consumo.

**Tabla 18**  
*Derivaciones a Tanques de Reserva*

Derivación Tanque	l (m)	Q (l/s)	Material	Ø (mm)	Ubicación
La Moya	10	4	HD	100	Ramal Norte
Oyambaro	187	3	HD	100	Ramal Norte
El Tejar	778	2	HD	100	Ramal Norte
Yaruquí/Vega	20	27	HD	100	Ramal Norte
P. Checa Alto	877	12	HD	100	Ramal Norte
Checa Cuscungo	1321	11	HD	100	Ramal Norte
Iguiñaró	389	10	HD	100	Ramal Norte
Iguiñaró Bajo	1662	2	HD	100	Ramal Norte
P. El Quinche	20	30	HD	100	Ramal Norte
Urupamba	4198	7	HD	100	Ramal Norte
El Chamizal	158	8	HD	100	Ramal Norte
San Miguel Quinche	1808	5	HD	100	Ramal Norte
Filanbanco-La Tolita	120	15	HD	150	Ramal Norte
San Andrés	940	1	HD	150	Ramal Norte
Chaquibamba	2400	3	HD	150	Ramal Norte
San José/San Pedro	5391	34	HD	150	Optimización
San Pedro/El Ingenio			HD	100	Optimización
Santa Mónica	5211	3	HD	150	Optimización

Estas líneas secundarias son las responsables de abastecer directamente a todos los tanques del proyecto.



## **CAPÍTULO 5**

### **SIMULACIÓN DEL FLUJO NO PERMANENTE**

La simulación del flujo no permanente se la realiza generalmente para posibles escenarios producto de una mala operación del sistema, acciones antropogénicas y/o de fenómenos naturales como puede ser el caso de un sismo o flujo de lodos, que puedan afectar a la línea de conducción y/o transmisión. Esta afectación, debido a las acciones y fenómenos mencionados, pueden afectar el material de la tubería provocando rotura, lo que incidiría negativamente en la demanda normal de los usuarios del sistema.

Los escenarios que generalmente se adoptan por acciones antropogénicas que comúnmente se adoptan son,

- Llenado y vaciado violento de la tubería
- Falta de mantenimiento de equipos y accesorios, como son válvulas de aire y desagüe, sostenedoras de presión entre otras.

#### **5.1 Análisis de Escenarios**

Los escenarios que simular se deben de una perturbación en el sistema, cuando en este se presenta un estado permanente, siendo uno de los casos más frecuentes la rotura de la tubería por diversos motivos que se puedan presentar durante la vida útil de la tubería. Para la evaluación de los sistemas hidráulicos antes descritos se analizan los siguientes escenarios:

- Rotura de tubería
- Cierre de Válvulas
- Inicio de operación
- Desagüe Controlado

Se detalla a continuación cada uno de los escenarios descritos

### **5.1.1 Rotura de Tubería**

Este escenario es catalogado como el más crítico de todos debido a que puede generar resultados catastróficos por el manejo inadecuado del sistema, o por causa de un fenómeno natural (flujo de lodos, asentamientos por malos rellenos) que en algunos casos puede no generar la rotura de la tubería, debiéndose entender también que esta falla puede originarse también por una falla estructural y mecánica del material de la tubería, razón por la cual, es muy importante la verificación de las propiedades mecánicas y presiones a la que van a estar sometidas, las cuales deben cumplir con lo especificado en las normas AWWA y M1;

Cuando sucede la ruptura de la tubería se genera una oscilación de presión y caudal al comportarse el tubo roto como un orificio sobre el cual inicialmente actúa toda la carga de presión del flujo permanente. En este escenario se tiene como resultados descensos de presión, una posible separación de la columna de agua y por lo tanto un posible aplastamiento de la tubería, en este escenario se verifica el correcto desempeño de las válvulas de aire.

Se estima que la rotura de la tubería no es instantánea, para efectos prácticos se considera un tiempo crítico de rotura igual a 30 s, este tiempo es el considerado para la simulación numérica, pues el máximo caudal se instaure después de este tiempo.

Para el caso en estudio, el análisis de rotura de tubería se analiza en la línea existente y la línea superior (proyecto).

En la línea existente se considera una rotura de tubería en la Quebrada denominada Guambi (Abs 11+555), actualmente para cruzar esta depresión se usa un paso elevado en una longitud considerable, esta estructura representa un potencial peligro de fallo ante la ocurrencia de un sismo fuerte y por lo tanto su potencial rotura.

En el caso de la línea superior se ha considerado simular una rotura en el sitio correspondiente a la mayor carga de presión que se tiene en el sistema (abs 21+500), siendo este escenario el más crítico. El origen de la rotura pudiese ser por un potencial deslizamiento, cuya probabilidad de ocurrencia crece ante el evento extraordinario de un sismo.

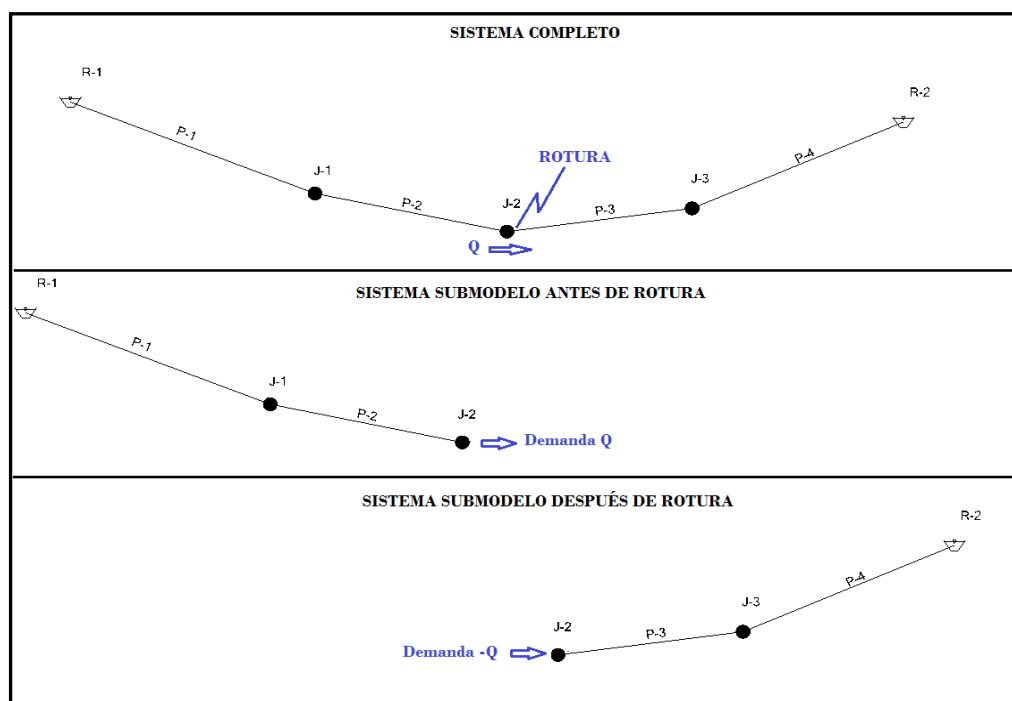
#### **5.1.1.1 Consideraciones particulares del modelo**

El programa discretiza el caso de rotura de tubería dividiendo al modelo en 2 tramos, uno aguas abajo y otro aguas arriba, cada tramo dividido es analizado.

La condición inicial para este escenario es el funcionamiento normal del sistema, es decir su funcionamiento con flujo permanente y uniforme; debido a que es necesario dividir el sistema en dos tramos, los resultados del sistema completo deben ser idénticos a los resultados de los submodelos antes y después de la rotura.

Para lograr los mismos resultados de presión y caudal en el submodelo antes de la rotura se corta en el nudo de la perturbación y se coloca una demanda igual al caudal que conduce la línea en el punto de rotura, con esto se asegura que el caudal y presión aguas arriba de la rotura sean idénticas al sistema completo.

Mientras que en el submodelo después de la rotura, para obtener los mismos resultados del modelo completo se coloca una demanda con signo negativo, esto implica que en el nudo que se asigna dicha demanda el caudal ingresa en vez de salir; sin embargo no siempre es suficiente colocar una demanda negativa sobre todo cuando al llegar al siguiente TRP se rompe la presión, en tales casos es necesario incluir un tanque o reservorio antes de la rotura para que este brinde una carga de presión adicional a la necesaria que brinda la demanda con signo negativo asignada.



**Figura 12.** Condiciones iniciales para rotura de tubería

Fuente: Diseño particular

El modelo simula la rotura mediante un artificio de descarga libre a través de un orificio. Este orificio considera una válvula de descarga ubicada en el nudo de rotura y localizada generalmente en los puntos más bajos de la conducción. Este elemento exige definir un caudal característico asociado a una carga de presión, mediante un coeficiente de descarga.

El coeficiente de descarga adoptado es igual a 0.6 correspondiente a un orificio de pared delgada.

$$Q_o = 0.6A\sqrt{2gH_n}$$

Donde:

Hn Carga neta antes de la rotura (Flujo Permanente).

A Área de tubería rota.

g aceleración de la gravedad

Qo Caudal.

Con estos datos se establece un caudal típico para una carga de presión típica, de tal manera que el modelo numérico calcule el caudal de descarga para determinada carga de presión en el flujo transitorio (caudal variable). Para la rotura en la Q. más crítica (Modelo líneas existentes) los datos de pérdida de carga y caudal típico son:

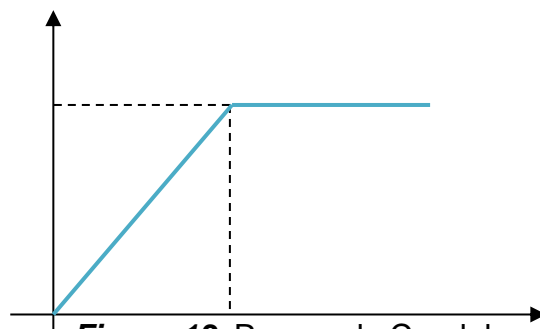
**Tabla 19**

*Datos de pérdida de carga y caudal típico*

	Modelo	Abs 21+500
Longitud	5348.76	3362.95
Carga de Presión (m H2O)	256.76	320.46

Se hace notar que los valores de carga de presión y caudales típicos son referenciales, el programa usa esos valores para calcular el coeficiente de descarga del orificio.

Para todos los escenarios de rotura se prevé que el tiempo de rotura crítico de la tubería es a los 30seg. de tal manera que se tiene una descarga lineal desde cero a  $Q_{max}$ , el caudal máximo al cual se hace referencia es calculado en forma automática y dinámica por el programa, a partir del coeficiente de descarga.



**Figura 13.** Rampa de Caudal para Rotura de Tubería  
Fuente: Diseño particular

### 5.1.2 Cierre de Válvulas

El cierre de válvulas tiene cabida cuando se planifica que el sistema salga de operación, para lo cual se requiere interrumpir el flujo por la línea principal, lo que da origen a un flujo transitorio entre el flujo permanente inicial y la estanqueidad del agua (considerando como un estado permanente), a su vez esta acción origina sobrepresiones en la tubería, las cuales deben ser controladas y por ningún motivo superar la máxima resistencia de la tubería. Para el efecto los tiempos de cierre de las válvulas deben ser superiores al tiempo crítico.

Generalmente para fines de operación en caso de que la válvula pueda ser manipulada se recomienda que el operador realice el cierre o apertura de la válvula en por lo menos 3 minutos que, considerando el volumen del tanque de reserva se podría decir que, el agua del tanque va a mantener la tubería siempre abierta. Ya que, el volumen que se tiene en el tanque comparado con el volumen a desalojarse es mayor, permitiendo que la tubería se vacíe en tiempos mayores a los estimados. Lo ideal sería mantener un tanque de reserva cuyo volumen sea igual o superior al volumen de agua que puede ser desalojado.

### **5.1.3 Inicio de operación**

Este escenario es importante de analizar, ya que, al inicio de operación del sistema, el fluido que se encuentra en reposo y con flujo permanente; en conductos cerrados, la velocidad igual a cero a una velocidad media constante correspondiente al caudal de diseño; cuando se tiene cambios bruscos en las velocidades, este se asocia directamente con un transitorio que incide en las presiones y caudales ya que se producen sobrepresiones y sub presiones. Las sobrepresiones ocurren cuando se genera un cierre brusco y las subpresiones en desagües.

Este cambio de velocidades origina un transitorio de presiones y caudales en la tubería, siendo de cuidado los descensos de presión que pueden originar presiones negativas en la línea de transmisión, para lo cual es importante verificar el adecuado funcionamiento de las válvulas de aire.

Al igual que en el escenario anterior tanto para las líneas existentes como para la línea superior (proyecto) el tramo analizado es el correspondiente al que se ubica entre la Planta de Tratamiento Paluguillo y TRP1, esto debido a que en ese tramo se presentará el mayor cambio de velocidad de reposo a funcionamiento normal.

#### **5.1.4 Desagüe controlado**

Las válvulas de desagüe constituyen un elemento importante en una línea de conducción ya que a través de estas se elimina el agua que se ha quedado en la tubería después de detener el funcionamiento del sistema, por lo general estas válvulas se colocan en los puntos más bajos de la conducción.

La activación de la válvula de desagüe debe ejecutarse de tal manera que el caudal de salida sea controlado y no se supere las velocidades máximas permisibles en la tubería, a más de establecer un tiempo idóneo para su apertura debido a que se debe evitar descensos bruscos de presión en la línea de tal manera de evitar presiones negativas. El no considerar tiempos de maniobra adecuados puede generar descensos de presión similares a los que se producirían en una rotura de tubería, con lo que se expondría el sistema a los potenciales peligros de una rotura. Este escenario busca determinar los tiempos iniciales mínimos de maniobra de apertura de las válvulas de desagüe.



El análisis de la línea, considera 2 válvulas de desagüe ubicadas en la Quebrada Guambi y la otra en la abscisa 9+793 (PRONACA); de estas se ha elegido simular numéricamente la primera por tener una mayor carga de agua en el inicio de su funcionamiento.

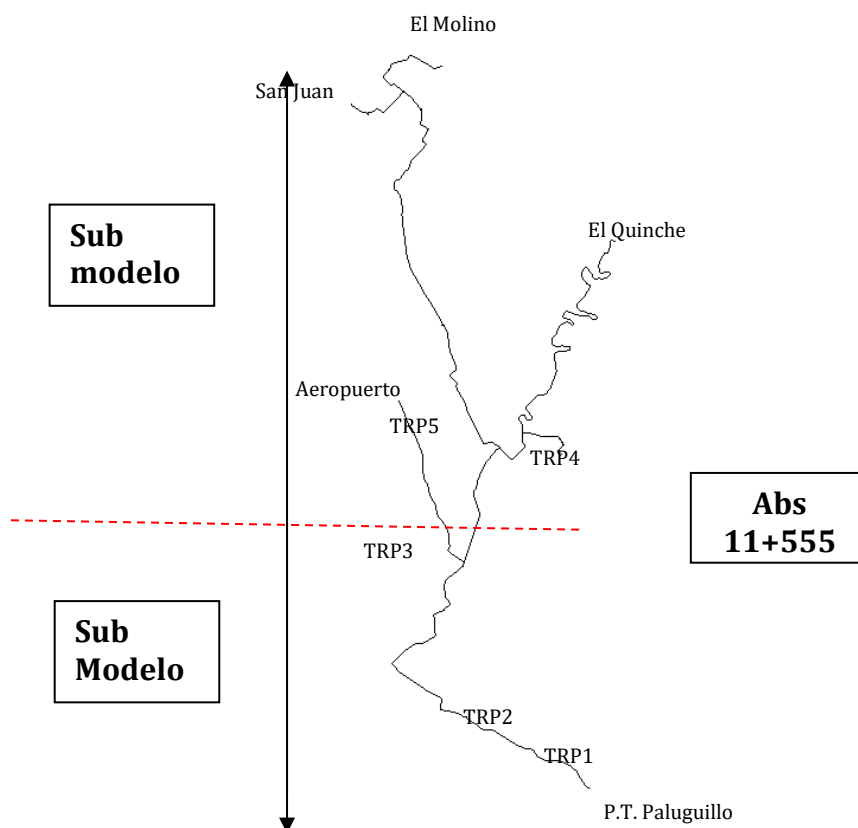
En la línea superior se ha proyectado 9 válvulas de desagüe multichorro (principales) y de compuerta (secundarias), al igual que en el análisis de la línea existente se ha elegido el caso más crítico en el cual se obtiene la mayor carga de presión al inicio del funcionamiento de la válvula, es decir en la abs 20+420 de la línea proyectada.

Para la simulación de las válvulas de desagüe se usan las curvas características de estos elementos, es decir las curvas que relacionan el coeficiente de caudal  $C_v$  en función del porcentaje de obturación de las mismas y su apertura se ejecuta mediante una ley de operación.

## **5.2 Resultados de los escenarios analizados**

### **5.2.1 Rotura en Quebrada Guambi – Ramal Inferior**

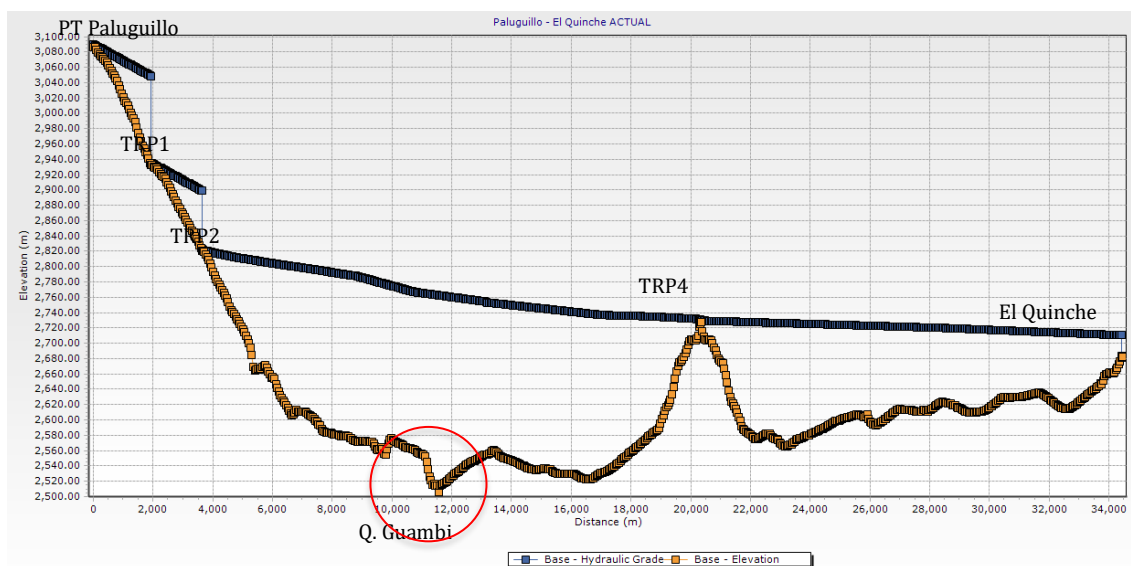
La simulación numérica de la rotura de la tubería en la quebrada Guambi contempla 2 submodelos, debido a que una rotura de la línea aísla al sistema en un tramo a la izquierda y otro a la derecha de la falla o rotura.



**Figura 14.** Rotura de Quebrada Guambi  
Fuente: Diseño particular

La quebrada Guambi se ubica aproximadamente en la abscisa 11+555m y a 2505.87 msnm. Por dicho punto transitan, en flujo permanente, 220.17 l/s a una presión de 254.24 mH<sub>2</sub>O. Aguas arriba se ubica el TRP2 y hacia aguas abajo se encuentran los ramales correspondientes a los TRPs 3, 4 y 5.

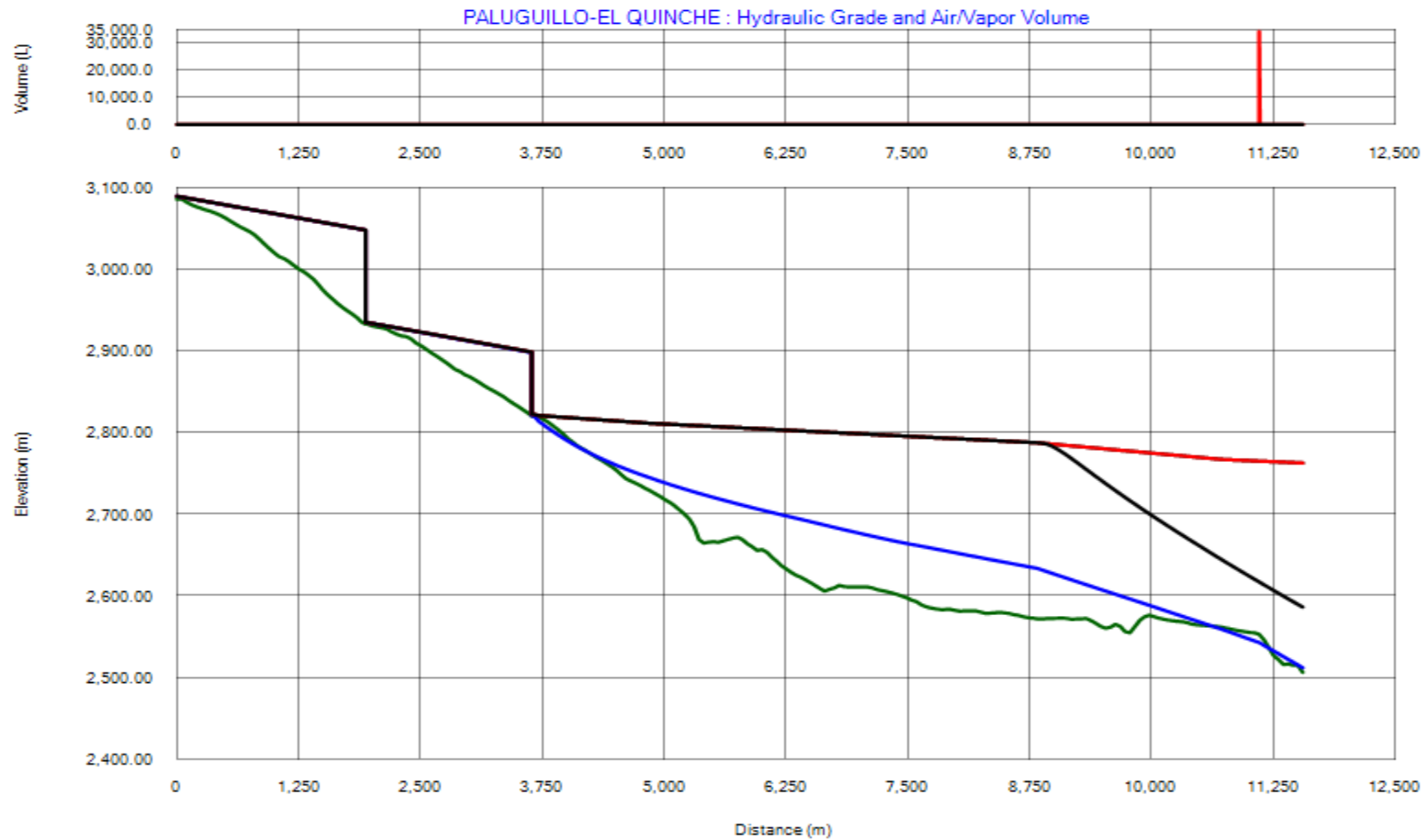
En condiciones de flujo permanente se presenta el siguiente perfil de presiones en el tramo comprendido entre las Plantas de tratamiento Paluguillo y El Quinche:



**Figura 15.** Flujo Permanente en Ramal PT Paluguillo – El Quinche  
Fuente: Diseño particular

### 5.2.1.1 Sub Modelo 1: Ramal Izquierdo de la Falla

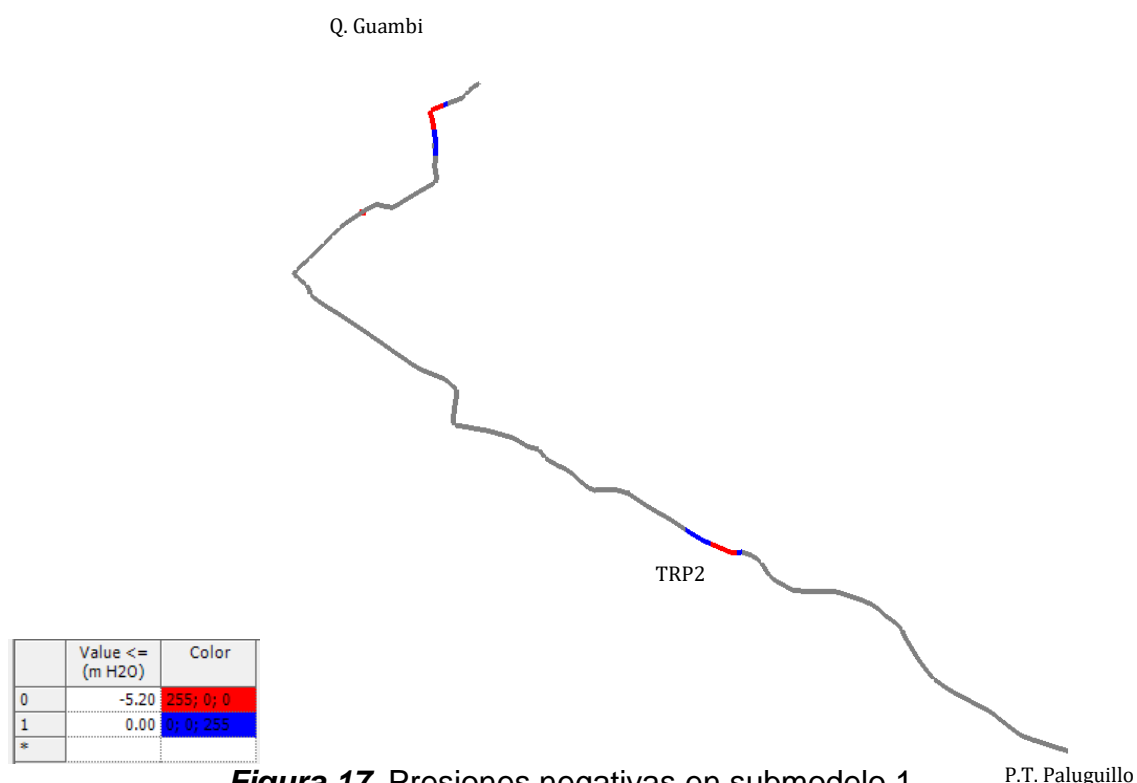
Hacia el ramal izquierdo de la falla el tanque más cercano corresponde el TRP2. Por la línea, hasta el punto de rotura, transitan 220.17 l/s. Durante la simulación de la rotura, en el segundo 6.82, se presenta el siguiente esquema:



**Figura 16.** Sub-modelo 1, rotura en Guambi, ramal izquierdo a la falla  
Fuente: Diseño particular

En la figura se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas del escenario de rotura para el sub-modelo 1 correspondiente al ramal izquierdo de la falla. La línea roja, que representa la envolvente de máximas presiones, coincide con la línea piezométrica del flujo permanente, lo que nos indica que no existe aumento de presiones en el tramo en estudio.

La línea de color azul representa el descenso de presiones por efecto de la bajada acelerada de la columna de agua en la tubería. Se puede apreciar que en el tramo inicial y al final las oscilaciones alcanzan a tener presiones negativas y por lo tanto separación de la columna líquida. En el tramo en el cual existe una válvula de aire se evidencia que ingresa un volumen de aire máximo aproximado igual a 34000 L.



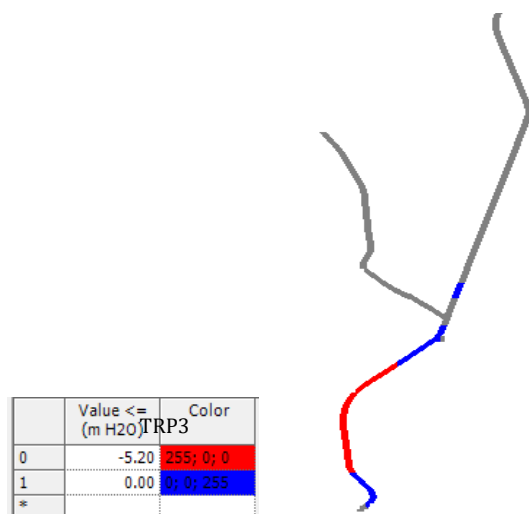
**Figura 17.** Presiones negativas en submodelo 1

Fuente: Diseño particular

En la figura se puede evidenciar que existen longitudes en las que se produciría aplastamiento de la tubería, debido a que las presiones negativas alcanzan valores menores a  $-0.5 \text{ atm}$  ( $5.2 \text{ m H}_2\text{O}$ ), que es la mínima presión referencial que soportan tuberías de GRP. Las presiones menores a cero se presentan en los primeros 590 m posteriores al TRP2 y entre las abscisas  $10+620$  a  $11+250 \text{ m}$  previos al punto de rotura en la quebrada de Guambi.

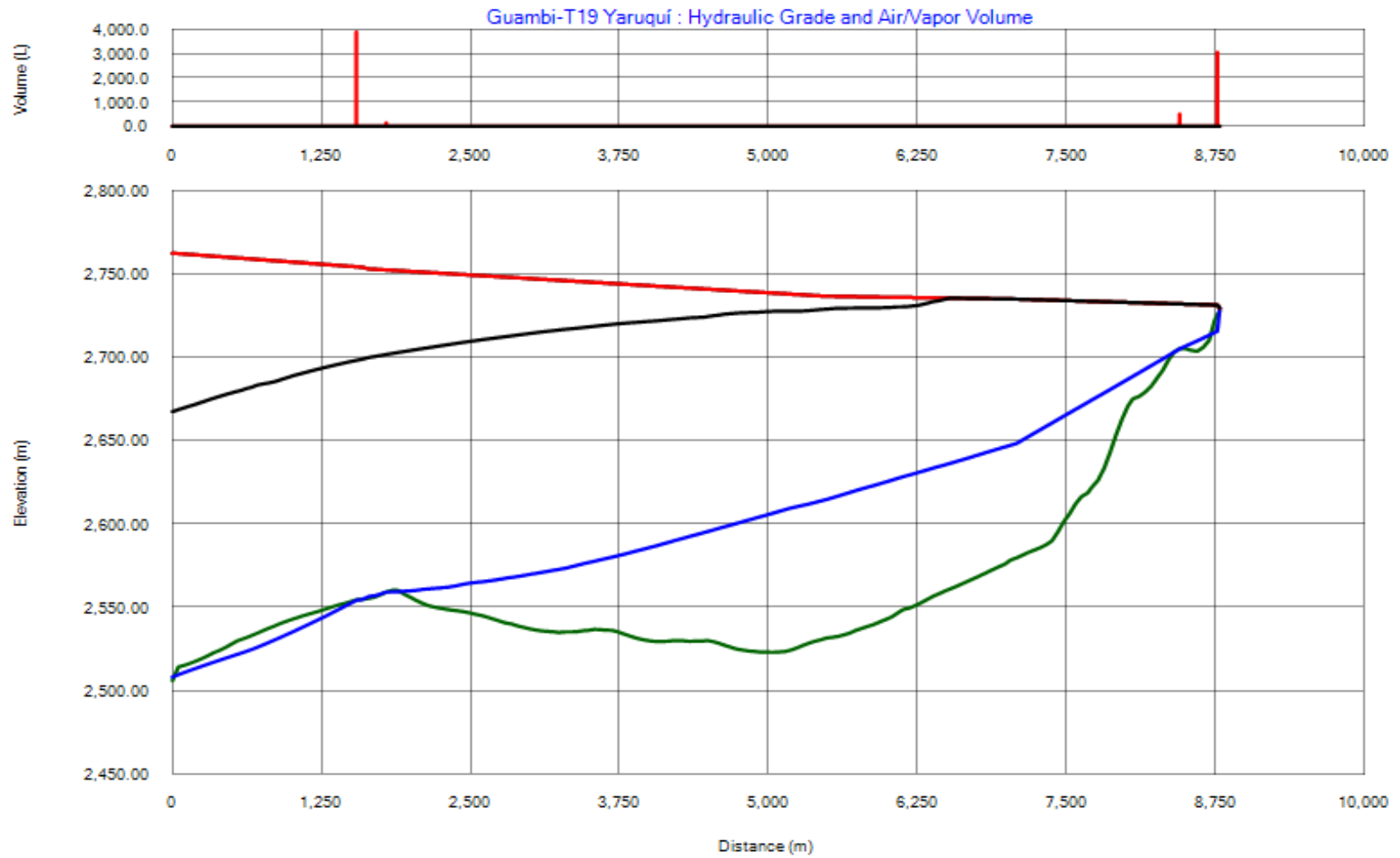
### 5.2.1.2 Sub Modelo 2: Ramal Derecho de la falla

Hacia el ramal derecho de la falla se ubican los TRPs 3,4 y 5 como se indican en la figura 7.5. Para el presente estudio se tomó el tramo más representativo correspondiente al ubicado entre la Quebrada de Guambi y el TRP4, ubicado en Yaruquí. Como se mencionó en sub-modelo 1 el caudal que transita en el sistema el momento de la rotura corresponde a  $220.107 \text{ l/s}$ .



**Figura 18.** Presiones negativas en Sub-modelo 2  
Fuente: Diseño particular

Por la figura se evidencia que existen longitudes en las que se produciría aplastamiento de la tubería, debido a que las presiones negativas alcanzan valores menores a  $-0.5 \text{ atm}$  ( $5.2 \text{ m H}_2\text{O}$ ), que es la mínima presión referencial que soportan tuberías de GRP. Las presiones menores a cero se presentan inmediatamente posterior a la rotura de Guambi ( $11+555 \text{ m}$ ) hasta la abscisa  $13+540 \text{ m}$ . Adicionalmente en sitios puntuales cercanos a las abscisas  $19+958 \text{ m}$  y entre la  $20+255$  hasta el TRP4 en Yaruquí.



**Figura 19.** Sub-modelo 2, rotura en Guambi, ramal derecho a la falla  
Fuente: Diseño particular

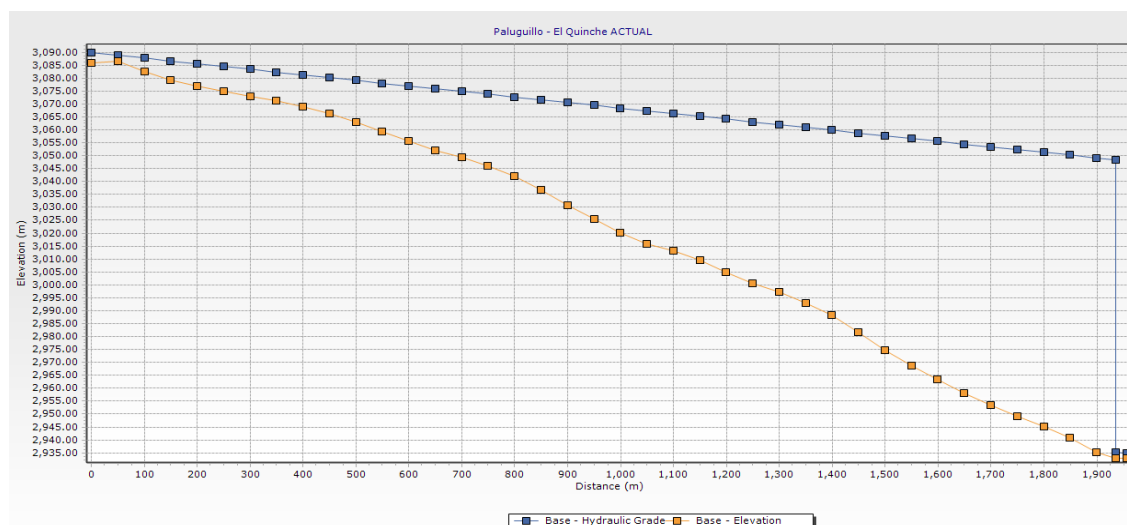


En la figura se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas del escenario de rotura para el sub-modelo 2 correspondiente al ramal derecho de la falla, en el segundo 9.0. La línea roja, que representa la envolvente de máximas presiones, coincide con la línea piezométrica del flujo permanente, lo que nos indica que no existe aumento de presiones en el tramo en estudio.

La línea de color azul representa el descenso de presiones por efecto de la bajada acelerada de la columna de agua en la tubería. Se puede apreciar que en el tramo posterior a la rotura y en la llegada al TRP4 en Yaruquí las oscilaciones alcanzan a tener presiones negativas y por lo tanto separación de la columna líquida. Se evidencia que la solicitud máxima de volumen de aire corresponde a 4000 l en la válvula de aire.

### **5.2.2 Cierre de válvulas por parada de operación**

Para el cierre de válvulas se consideró el tramo comprendido entre la T.P. Paluguillo y el TRP1 ya que es el tramo con mayor carga de presión (115.23 m H<sub>2</sub>O) y caudal transportado (323 l/s).

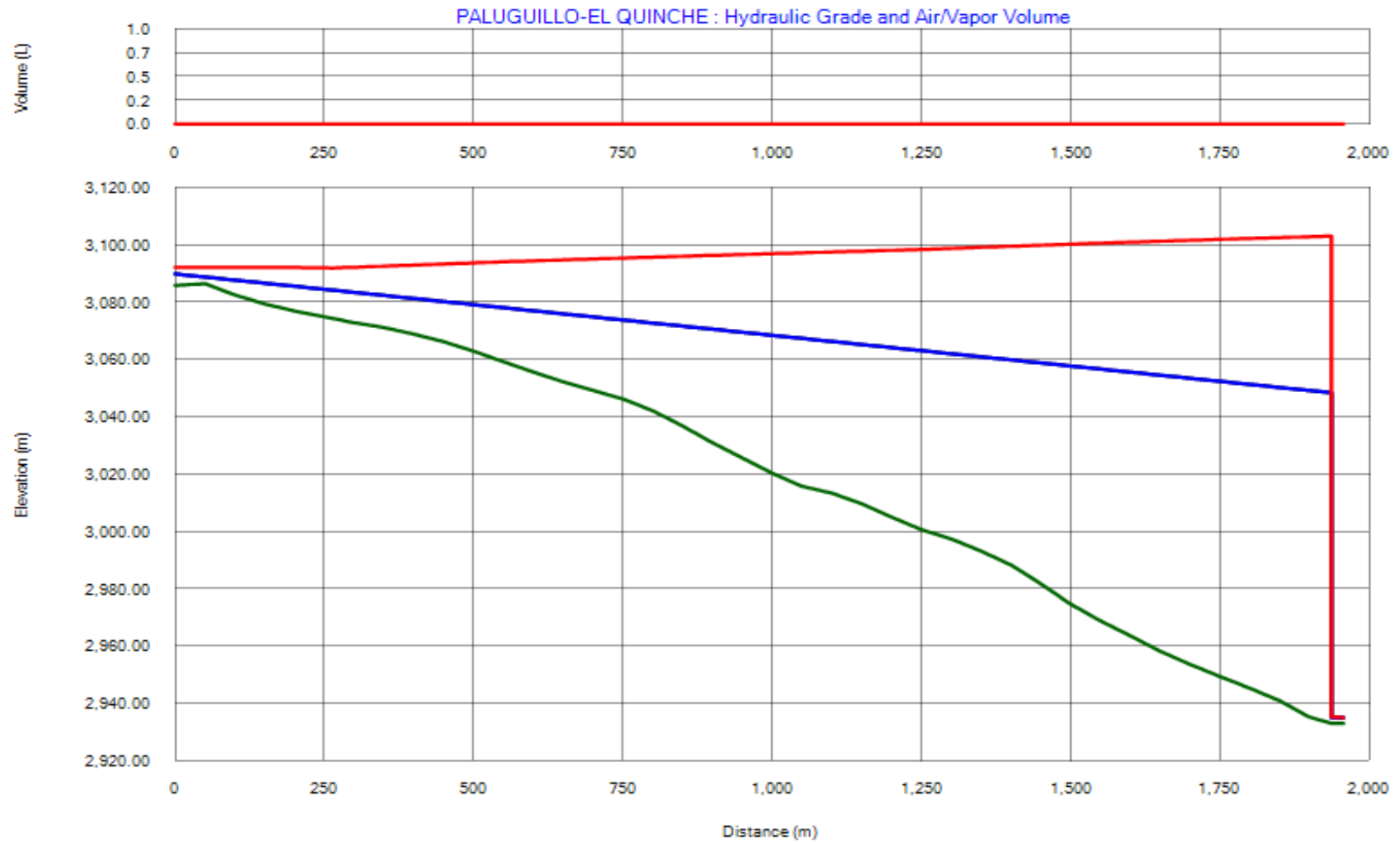


**Figura 20.** Flujo permanente en PT Paluguillo – TRP 1  
Fuente: Diseño particular

La válvula que cerrada corresponde a una válvula mariposa de 12" de diámetro. La máxima sobrepresión soportada por la tubería, en caso de GRP, corresponde al 40% de la presión nominal. Para el caso en estudio la presión nominal corresponde a 125 m H<sub>2</sub>O, y la máxima sobrepresión en la tubería corresponde a 175 m H<sub>2</sub>O.

El tiempo de cierre necesario para obtener la máxima presión antes mencionada corresponde a 50 segundos.

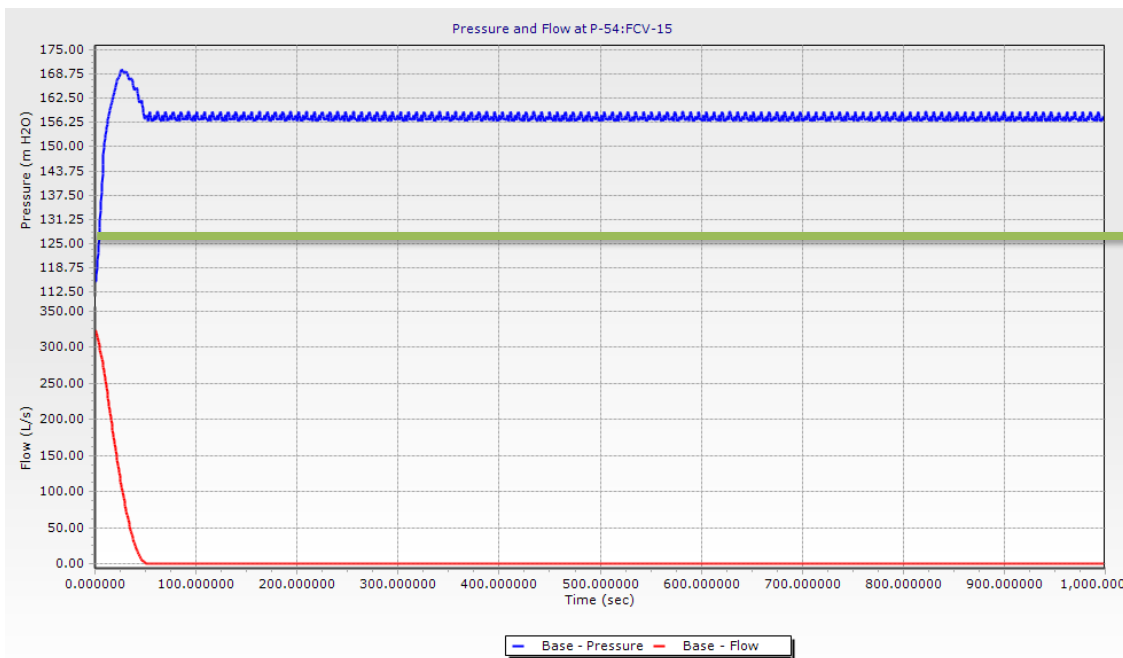
Los resultados obtenidos se presentan a continuación:



**Figura 21.** Presiones negativas en Sub-modelo 2  
Fuente: Diseño particular

En la figura se muestra la envolvente de presiones máxima (línea roja), misma que como se indicó anteriormente no debe sobrepasar el 40% de la presión nominal de la tubería. Al inicio de las operaciones la envolvente de presiones mínimas coincide con la línea piezométrica de flujo permanente indicando que en la simulación no se presentan bajas de presión. El modelo permite determinar que la presión máxima que se tendría en este oscilatorio, se presentaría dentro de los 30.5 segundos, como se puede apreciar en la figura, en la cual la sobrepresión se sitúa por sobre el 23 por ciento de la estática, lo que convalida las recomendaciones indicadas por los fabricantes, los cuales recomiendan en su diseño que para condiciones normales de funcionamiento se determine la presión máxima + un incremento de presión.

El esfuerzo admisible recomendado debe considerar los  $\frac{2}{3}$  del esfuerzo mínimo o el  $\frac{1}{3}$  del esfuerzo de tensión del material utilizado; en condiciones intermitentes (flujo no permanente) que incluye condiciones de llenado y de vaciado, sismos, etc que puedan ocurrir durante la operación del sistema, el esfuerzo admisible recomendado es del 80% del esfuerzo de tensión mínimo, o 0,44 veces el esfuerzo en tensión mínima especificada en el material.



**Figura 22.** Flujo permanente en PT Palugillo – TRP 1  
Fuente: Diseño particular

Como se mencionó anteriormente no se presentan presiones menores a cero y como se observa en la figura a continuación las presiones máximas admisibles en la tubería no son sobrepasadas.

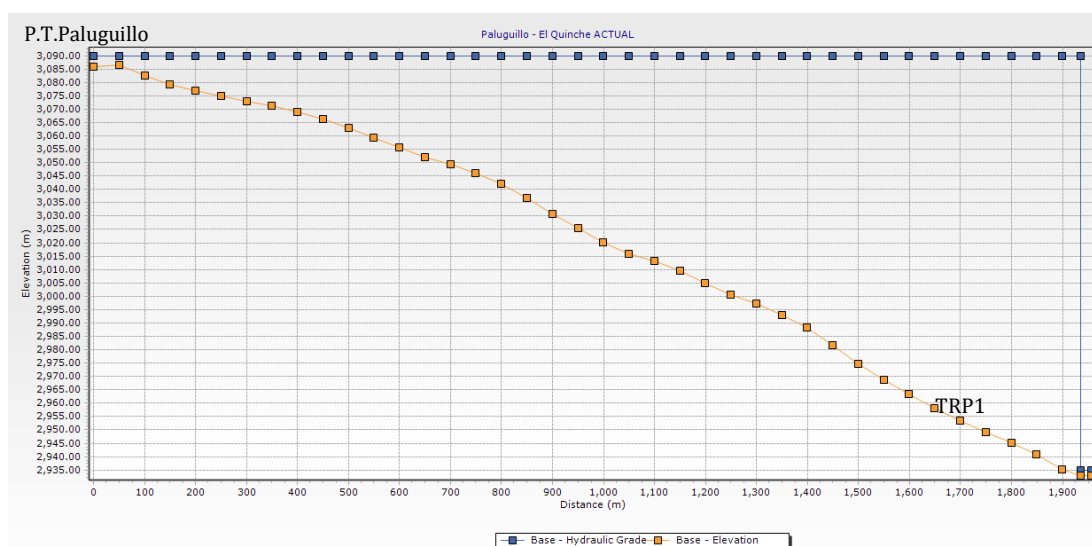


**Figura 23.** Sobrepresiones en la tubería (nulas)  
Fuente: Diseño particular

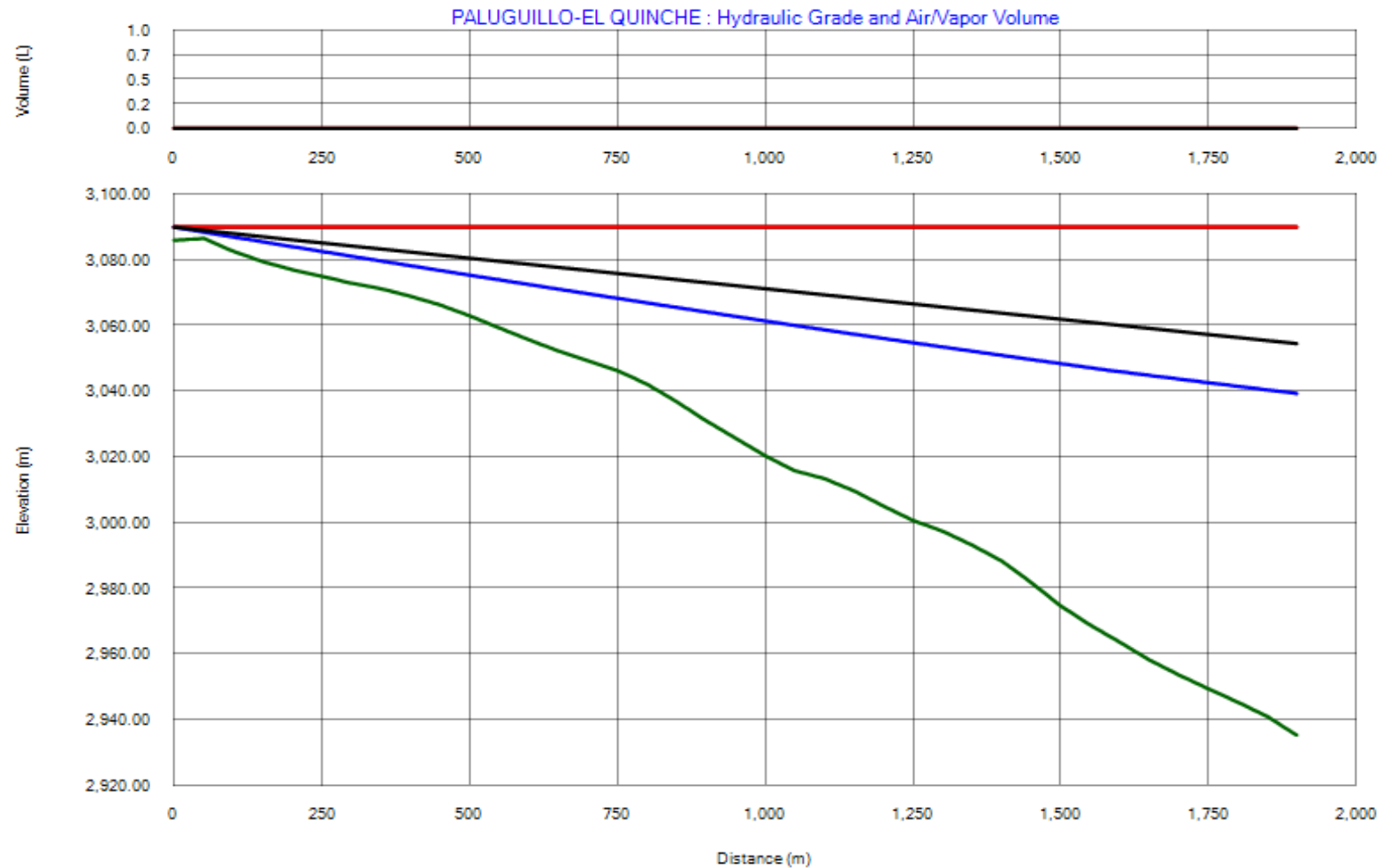
### 5.2.3 Apertura de válvulas por inicio de operación

Para la apertura de la válvulas se consideró el tramo comprendido entre la T.P. Paluguillo y el TRP1 ya que es el tramo con mayor carga de presión (115.23 m H<sub>2</sub>O) y caudal transportado (323 l/s).

Para inicio de operaciones se considera que el sistema se encuentra parado, para lo cual su línea de energía inicial debe estar horizontal.



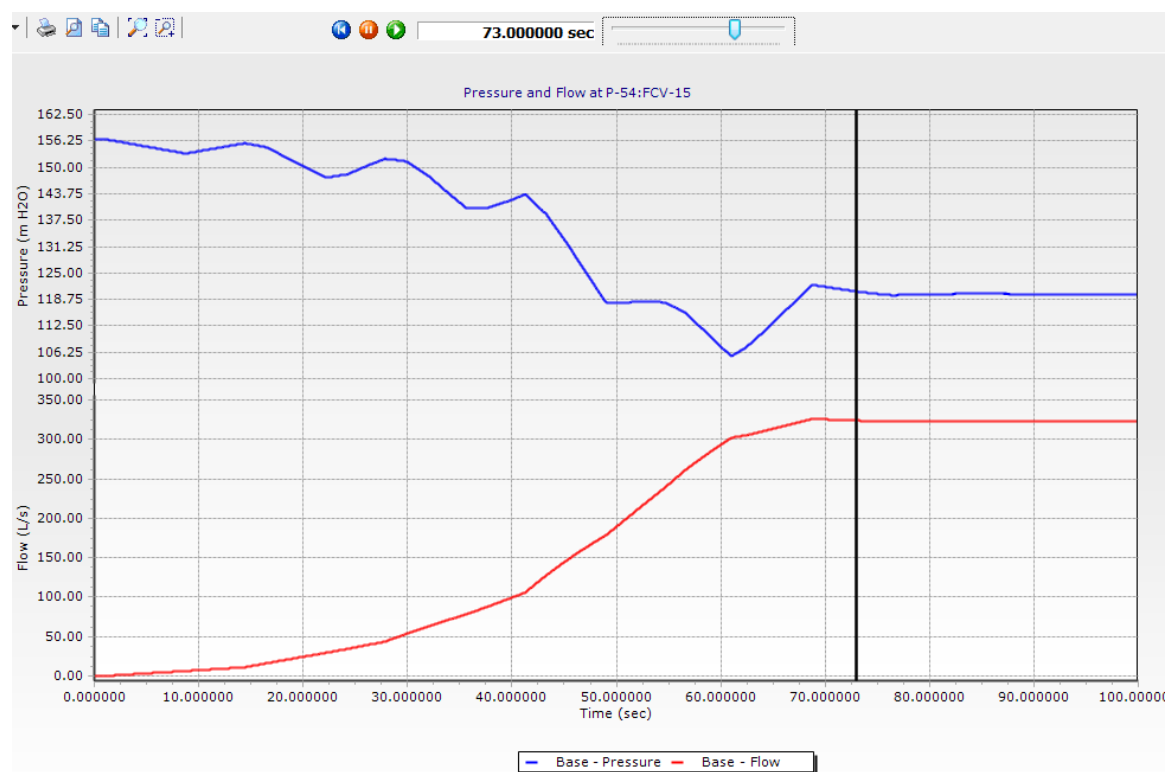
**Figura 24.** Condiciones iniciales para simulación apertura válvula  
Fuente: Diseño particular



**Figura 25.** Presiones máximas y mínimas para apertura de válvula  
Fuente: Diseño particular

Como se mencionó anteriormente las condiciones iniciales corresponden a la línea de energía horizontal, misma que coincide con la envolvente de las máximas presiones presentadas (línea roja). Posteriormente la línea piezométrica se desplaza verticalmente por el tránsito del caudal a través de la apertura en la válvula. Adicionalmente se observa que en este escenario no se presentan presiones negativas, mismas que fueron controladas mediante el tiempo de apertura de la válvula mismo que corresponde a 60 segundos.

Se nota que aproximadamente al segundo 73 de haber abierto la válvula el sistema se equilibra con el caudal de demanda de 323 l/s. Para lograr el caudal de demanda se requiere abrir la válvula 44.7%.



**Figura 26.** Presiones y caudales presentados en apertura de válvula  
Fuente: Diseño particular



Para minimizar las subpresiones, generalmente el análisis del transiente nos permitirá determinar un volumen que tendrá que ser almacenado ya sea en un tanque de carga con caudal suficiente como los que usualmente se dimensionan en centrales hidroeléctricas, o tanques de reserva, rompe presiones, etc que permitan suministrar el caudal en caso de una apertura o rotura de la tubería.

El volumen a dimensionarse debería guardar concordancia con el caudal desagüado en el tiempo que dura el oscilatorio, que en el presente caso, el tanque podría ser dimensionado para que entre a la conducción el caudal desagüado en el punto crítico durante los 73 segundos. En el caso particular si el caudal de salida es 323 l/s, el volumen del reservorio debería ser alrededor de 25m<sup>3</sup>. Este tanque más las válvulas de aire de doble y triple acción que permiten la admisión de aire a la tubería, permitirán tener a la tubería siempre llena, evitando el colapso por aplastamiento; como medida precautelatoria y para evitar la admisión de aire en los puntos iniciales de las conexiones se debe incluir siempre ventosas, que funcionan como válvulas de aire simple.

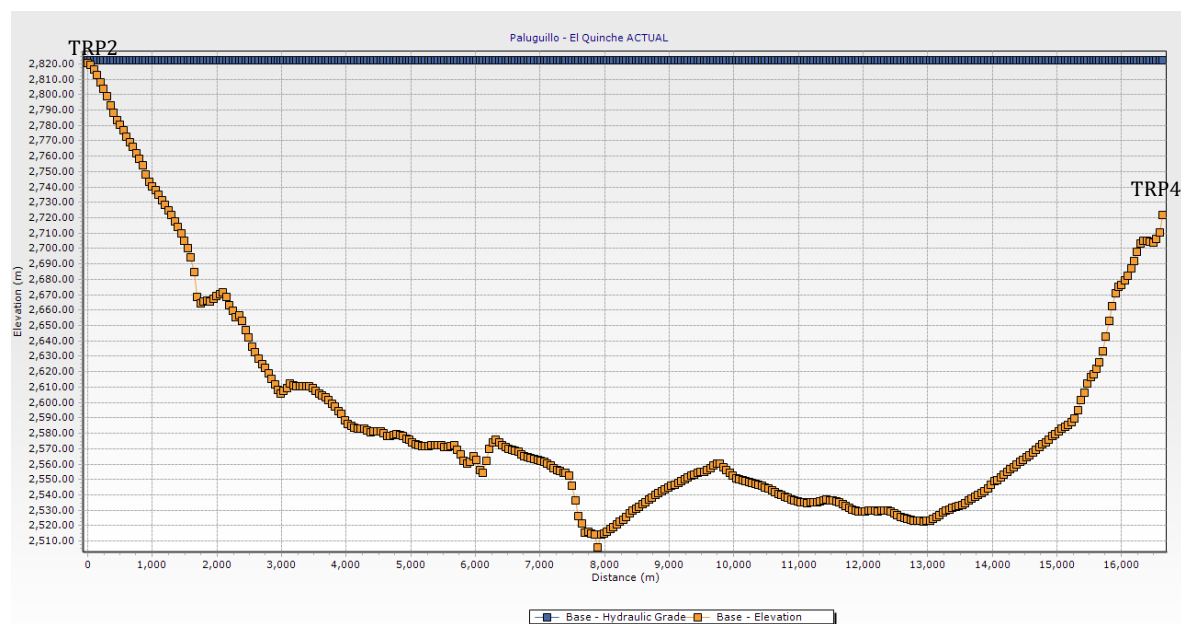
#### **5.2.4 Desagüe de fondo**

Básicamente se lo simula en los puntos más bajos de las conducciones y en donde se ponen válvulas de desagüe, las cuales dependiendo de la carga a la que están sometidas por el transiente, se recomendaría que para presiones menores a 100mca la configuración típica de válvulas sea de 2 válvulas de compuerta, que en condiciones

normales de funcionamiento, la una estará completamente abierta y la segunda cerrada, ésta segunda funciona como válvula de guardia para posibles reparaciones.

Para presiones mayores se recomienda la utilización de válvulas de aguja o de cilindro ranurado. Dependiendo de las condiciones del proyecto, éstas podrían funcionar como bypass, lo que permite una mayor versatilidad en la operación del sistema, y, si estas están provistas de actuadores eléctricos o neumáticos, podrían abrirse o cerrarse automáticamente para controlar presiones.

Para la modelación del desagüe de fondo se tomó el tramo comprendido entre el TRP2 y los ramales correspondientes a los TRPs 3, 4 y 5.



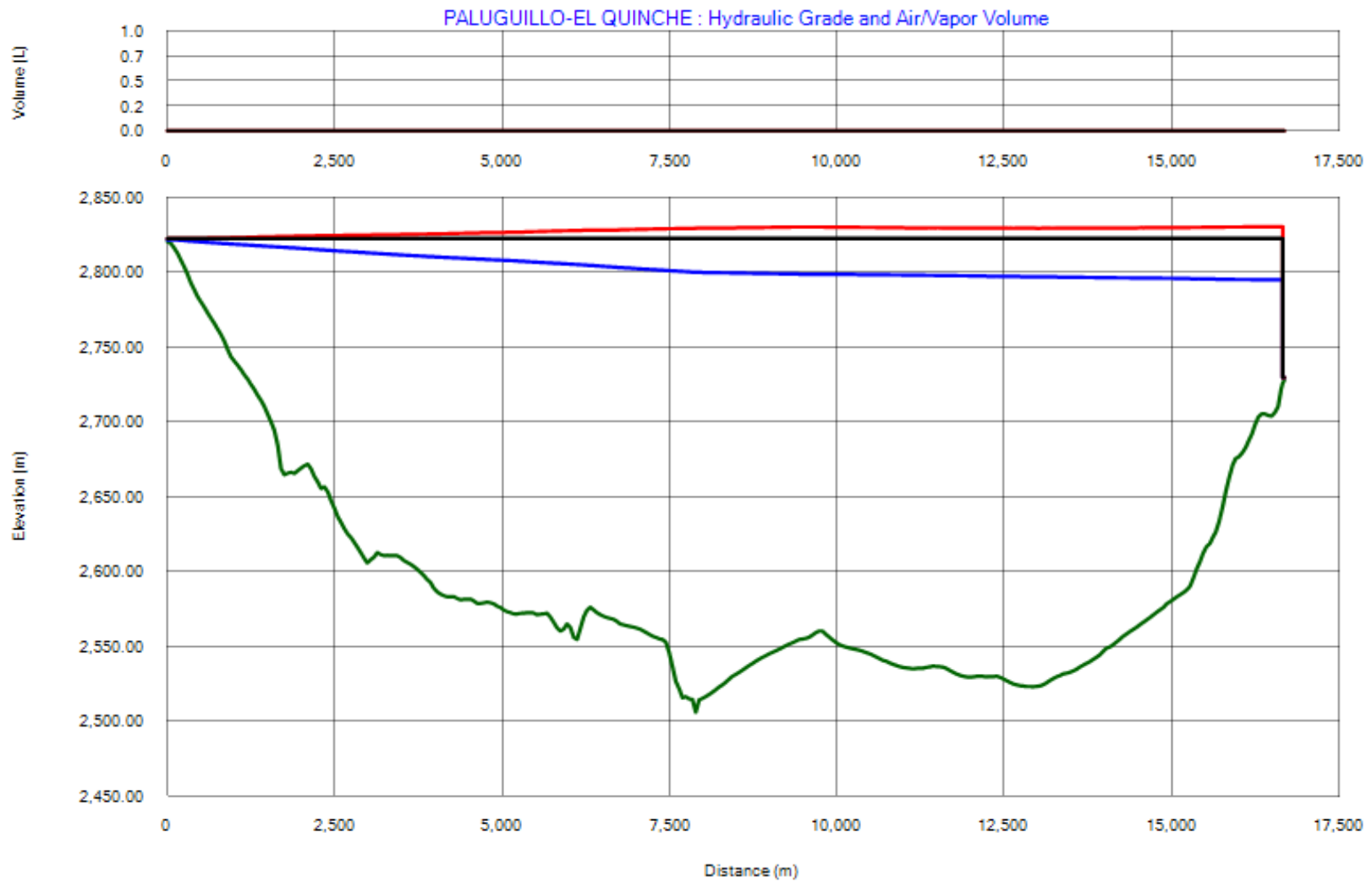
**Figura 27.** Perfil hidráulico TRP 2 – TRP 4  
Fuente: Diseño particular

La válvula de desagüe se ubica en el punto más bajo del perfil, mismo que corresponde a la quebrada de Guambi en la Abs. 11+555 m. Como se observa en la figura, la línea piezométrica se encuentra horizontal con referencia al nivel del caudal en

TRP2. Esto es posible debido a que la válvula que regula el ingreso del caudal al TRP4 se encuentra cerrada.

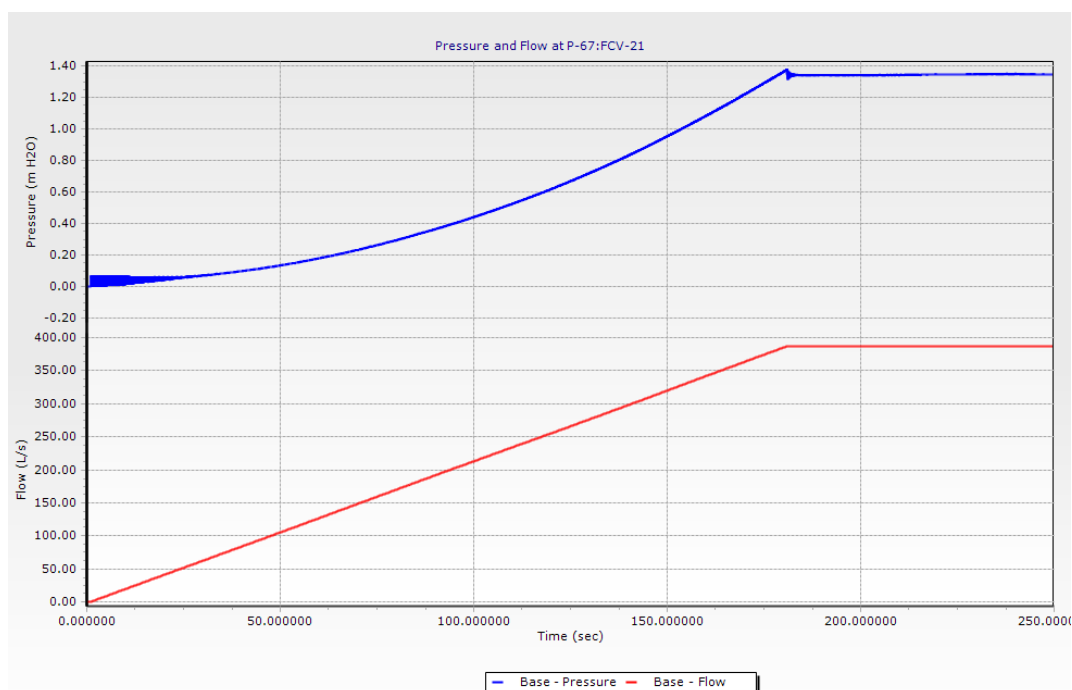
El dispositivo de descarga de caudales corresponde a una válvula de compuerta de 150mm de diámetro. La misma requiere una apertura del 3% en un tiempo de apertura de 180 segundos para de esta manera obtener un caudal de 387 l/s.

Los resultados de la simulación se presentan en la siguiente figura



**Figura 28.** Presiones máximas y mínimas TRP 2 – TRP 4  
Fuente: Diseño particular

Como se observa en la figura la línea roja representa un incremento en la presión, misma que no es representativa ya que la sobrepresión aceptada para PRFV corresponde al 40% de la presión nominal. Dicha elevación de presión corresponde a 8 m H<sub>2</sub>O.

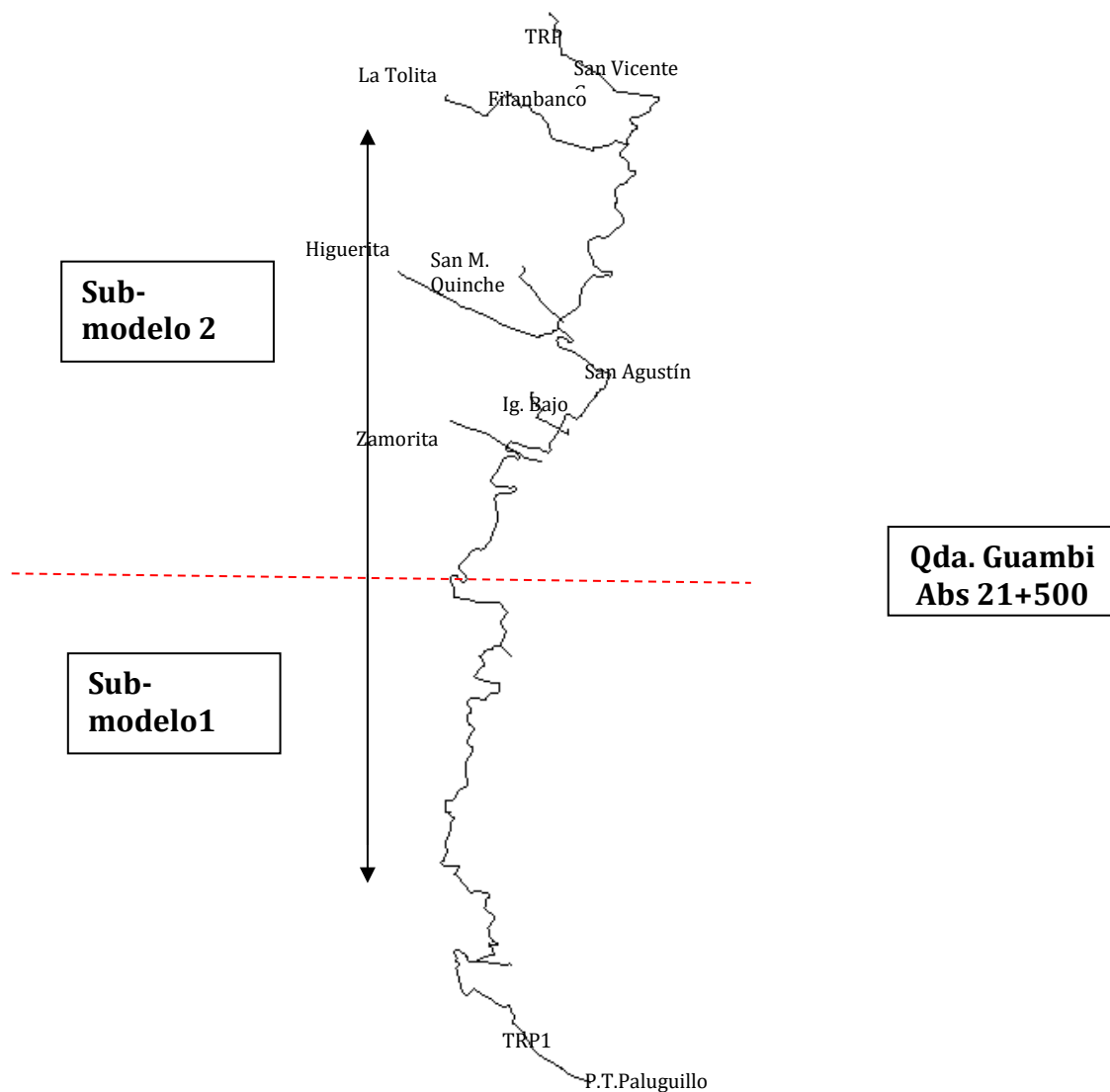


**Figura 29.** Evolución del caudal y presión en válvula de desagüe  
Fuente: Diseño particular

Como se indicó anteriormente la apertura necesaria para la evacuación de los 387 l/s es de 3%. Se estableció dicha apertura debido a que las velocidades máximas de vaciado de las tuberías adyacentes de PRFV son de 4m/s y el diámetro considerado para el cálculo corresponde a 350mm.

### 5.2.5 Rotura en abscisa 21+500 – Línea Parroquias

La simulación numérica de la rotura de la tubería en la quebrada ubicada en la abscisa 21+500 m contempla 2 sub-modelos, debido a que una rotura de la línea aísla al sistema en un tramo a la izquierda y otro a la derecha de la falla o rotura.



**Figura 30.** Esquema Línea Superior  
Fuente: Diseño particular

La simulación numérica de la rotura de la tubería en la quebrada ubicada en la abscisa 21+500 m contempla 2 sub-modelos, debido a que una rotura de la línea aísla al sistema en un tramo a la izquierda y otro a la derecha de la falla o rotura.

En condiciones de flujo permanente se presenta el siguiente perfil de presiones en el tramo comprendido entre las Plantas de tratamiento Paluguillo y Chaquibamba:



**Figura 31.** Esquema Línea Superior  
Fuente: Diseño particular

### 5.2.5.1 Sub Modelo 1: Ramal izquierdo de la Falla

Hacia el ramal izquierdo de la falla ubicada en la abscisa 21+500 m el tanque más cercano corresponde el TRP1. Por la línea, hasta el punto de rotura, transitan 133 l/s. Durante la simulación de la rotura, en el segundo 6.0, se presenta el siguiente esquema:

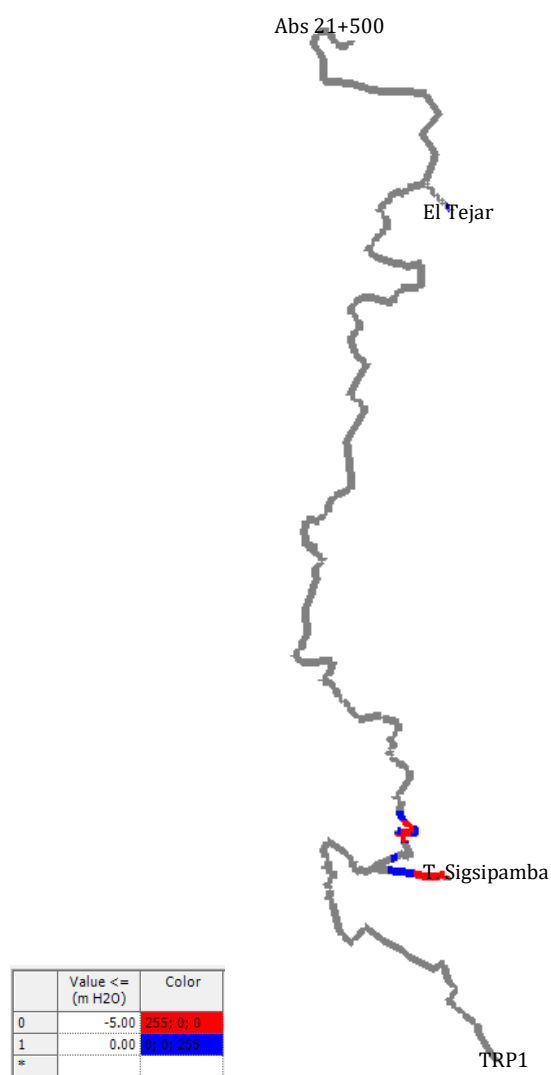


**Figura 32.** Presiones máximas y mínimas sub modelo 1  
Fuente: Diseño particular



En la figura se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas del escenario de rotura para el sub-modelo 1 correspondiente al ramal izquierdo de la falla. La línea roja, que representa la envolvente de máximas presiones, coincide con la línea piezométrica del flujo permanente, lo que nos indica que no existe incremento de presiones en el tramo en estudio.

La línea de color azul representa el descenso de presiones por efecto de la bajada acelerada de la columna de agua en la tubería. Se puede apreciar que cercano a la abscisa 6+500 las oscilaciones alcanzan a tener presiones negativas y por lo tanto separación de la columna líquida. En el tramo en el cual se presentan presiones negativas se evidencia que ingresa un volumen de aire aproximado igual a 275 L.



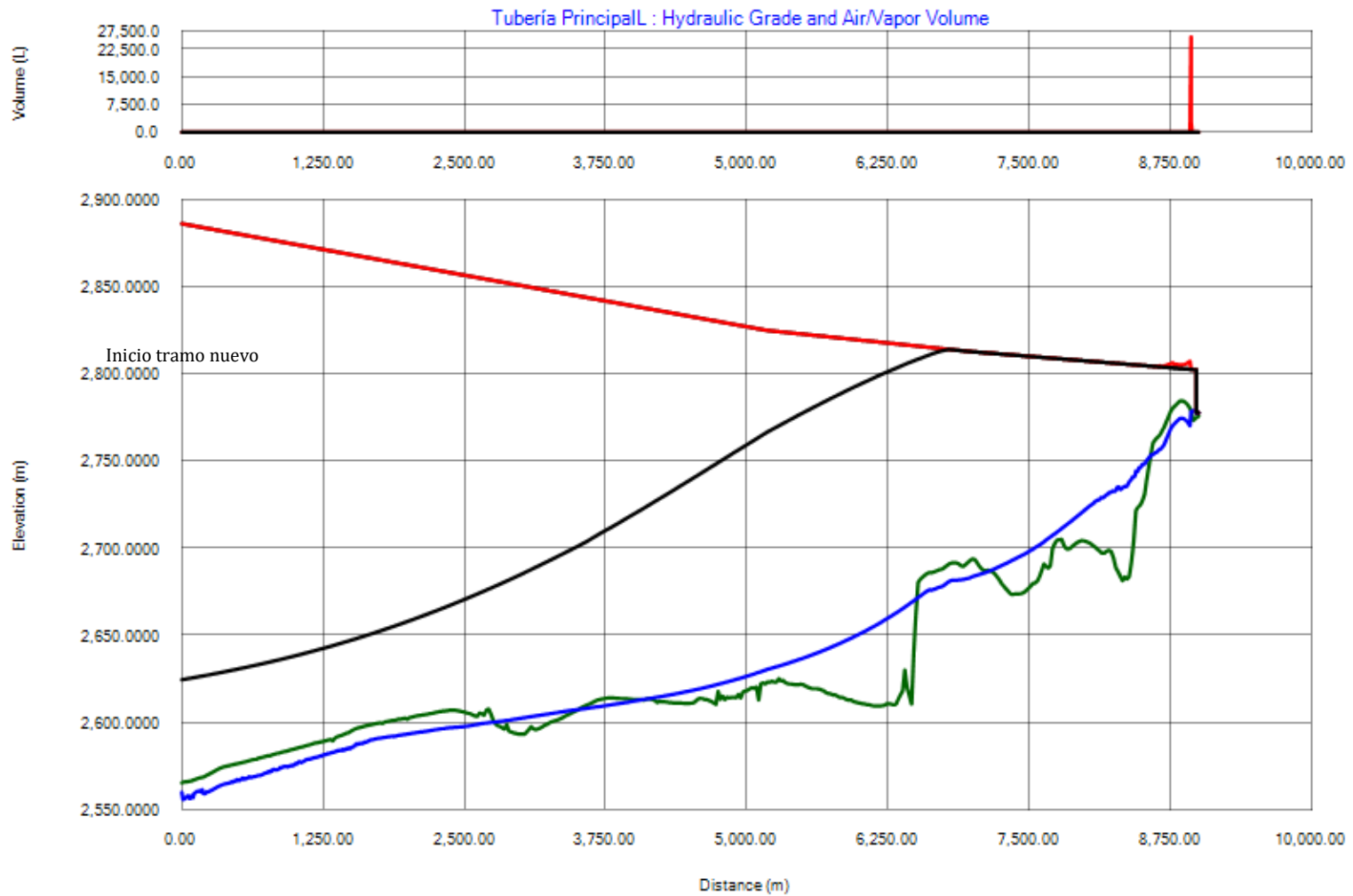
**Figura 33.** Esquema Línea Superior  
Fuente: Diseño particular

Como se puede observar, en el ramal que se dirige hacia el Tanque Sigsipamba, se presentan presiones entre 0 y -10 m H<sub>2</sub>O. En dicho tramo la tubería corresponde a PVC, por lo que la misma se vería gravemente afectada de presentarse el escenario de rotura modelado.

En el tramo comprendido entre las abscisas 6+420 y 6+480 se presentan presiones entre 0 y -5 m H<sub>2</sub>O, pero al ser la tubería de Hierro Dúctil no se vería afectada por las mismas. De la misma manera entre las abscisas 6+800 a 7+540 m se presentan presiones entre 0 y -10 mH<sub>2</sub>O. Cabe en este punto señalar que entre las abscisas 6+820 a 6+940, 7+000 a 7+120 y 7+260 a 7+420 se presentan presiones entre -5 y -10 m H<sub>2</sub>O que si bien no afectarían a la estructura de la tubería por aplastamiento, proporcionaría un potencial daño por cavitación ya que esa presión al estar cercana a la presión de vapor del agua, el fluido podría gasificarse y posteriormente ante un incremento de presión provocar daños por cavitación en la tubería.

#### **5.2.5.1 Sub Modelo 2: Ramal derecho de la Falla**

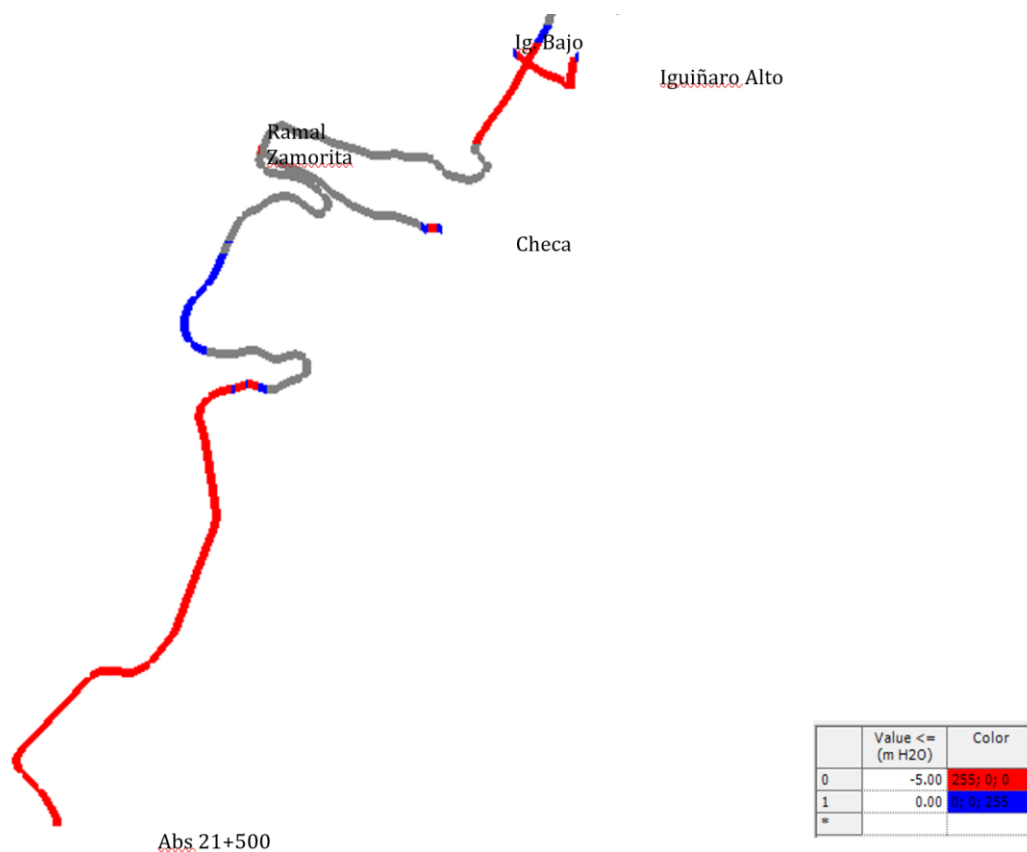
Hacia el ramal derecho de la falla ubicada en la abscisa 21+500 m se ubican los TRPs 2, 5 y 6. Por la línea, hasta el punto de rotura, transitan 133 l/s. Durante la simulación de la rotura, en el segundo 7.83, se presenta el siguiente figura:



**Figura 34.** Presiones máximas y mínimas sub modelo 2  
 Fuente: Diseño particular

En la figura se muestran las envolventes de presiones máximas y mínimas del escenario de rotura para el sub-modelo 2 correspondiente al ramal derecho de la falla. La línea roja, que representa la envolvente de máximas presiones, coincide con la línea piezométrica del flujo permanente, a excepción del tramo cercano al TRP2, lo que nos indica que no existe incremento de presiones excepto del sitio mencionado.

La línea de color azul representa el descenso de presiones por efecto de la bajada acelerada de la columna de agua en la tubería. En el tramo en el cual se presentan presiones ascensos de presión se evidencia que ingresa un volumen máximo aproximado igual a 27500 L.



**Figura 35.** Presiones y subpresiones del submodelo

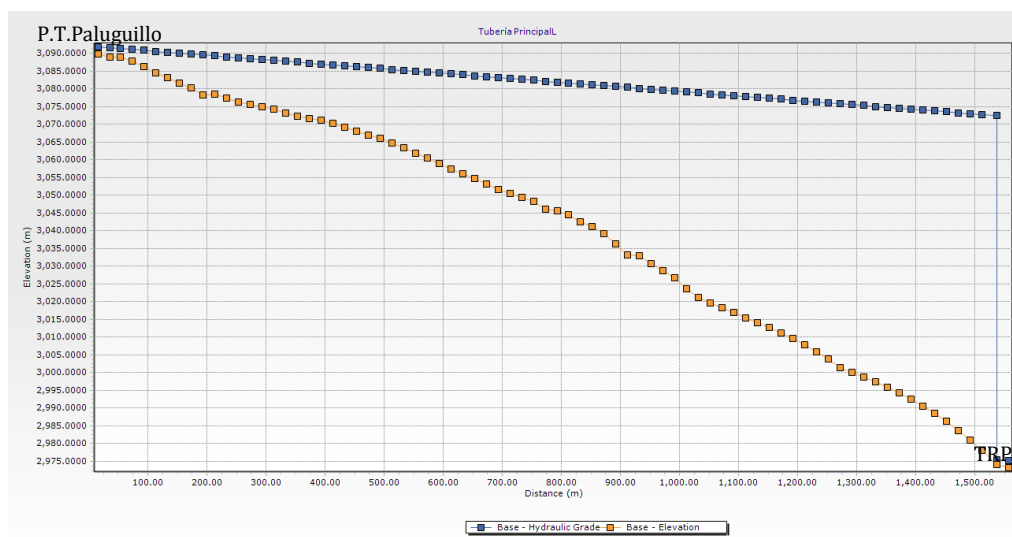
Fuente: Diseño particular

Como se puede observar, en los ramales que se dirigen hacia el Tanque Checa, Ramal Zamorita, TRP6 e Iguñaro Alto, se presentan presiones entre 0 y -10 m H<sub>2</sub>O. En dichos tramos la tubería corresponde a PVC, por lo que la misma se vería gravemente afectada de presentarse el escenario de rotura modelado.

En los tramos comprendidos entre las abscisas 25+020 a 25+580 y 28+580 a 28+680 se presentan presiones entre 0 y -5 m H<sub>2</sub>O, pero al ser la tubería de Hierro Dúctil no se vería afectada por las mismas. Adicionalmente entre las abscisas 21+500 a 24+280, 28+040 a 28+580 y 30+120 a 30+480 m se presentan presiones entre -5 y -10 mH<sub>2</sub>O, mismas que al estar cercanos a la presión de vapor del agua podrían provocar daños por cavitación.

## 5.2.6 Cierre de válvulas por parada de operación

Para el cierre de válvulas se consideró el tramo comprendido entre la P.T. Paluguillo y el TRP1 ya que es el tramo con mayor carga de presión (98.18 m H<sub>2</sub>O) y caudal transportado (209 l/s).

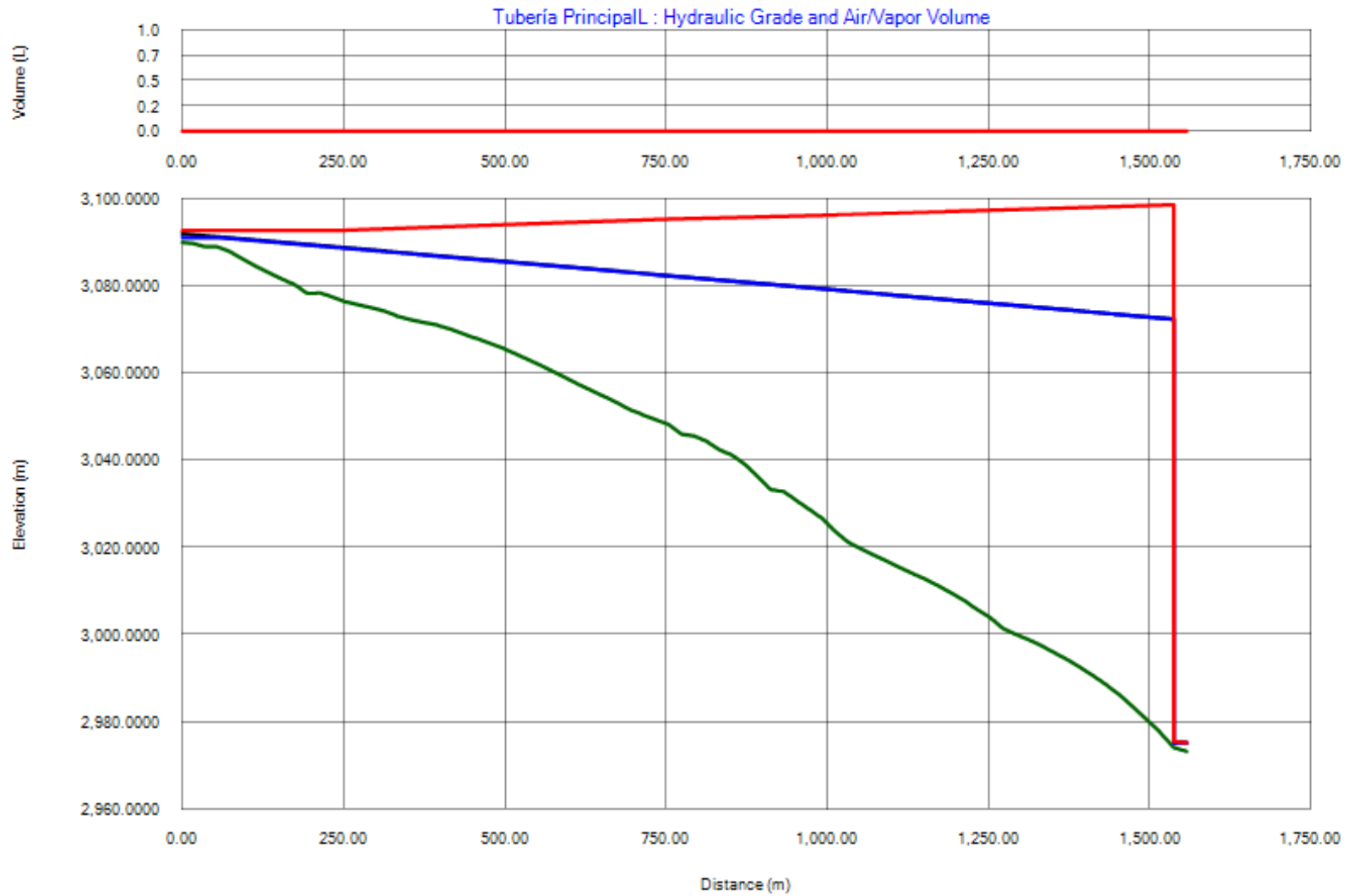


**Figura 36.** Flujo permanente Cierre de Válvulas  
Fuente: Diseño particular

La válvula que cerrada corresponde a una válvula anular de 300 mm de diámetro. La máxima sobrepresión soportada por la tubería, en caso de PVC, corresponde a la presión de trabajo establecida por el fabricante. Para el caso en estudio la presión de trabajo corresponde a 1.25 MPa, es decir 152 m de H<sub>2</sub>O.

El tiempo de cierre necesario para obtener la máxima presión antes mencionada corresponde a 70 segundos.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

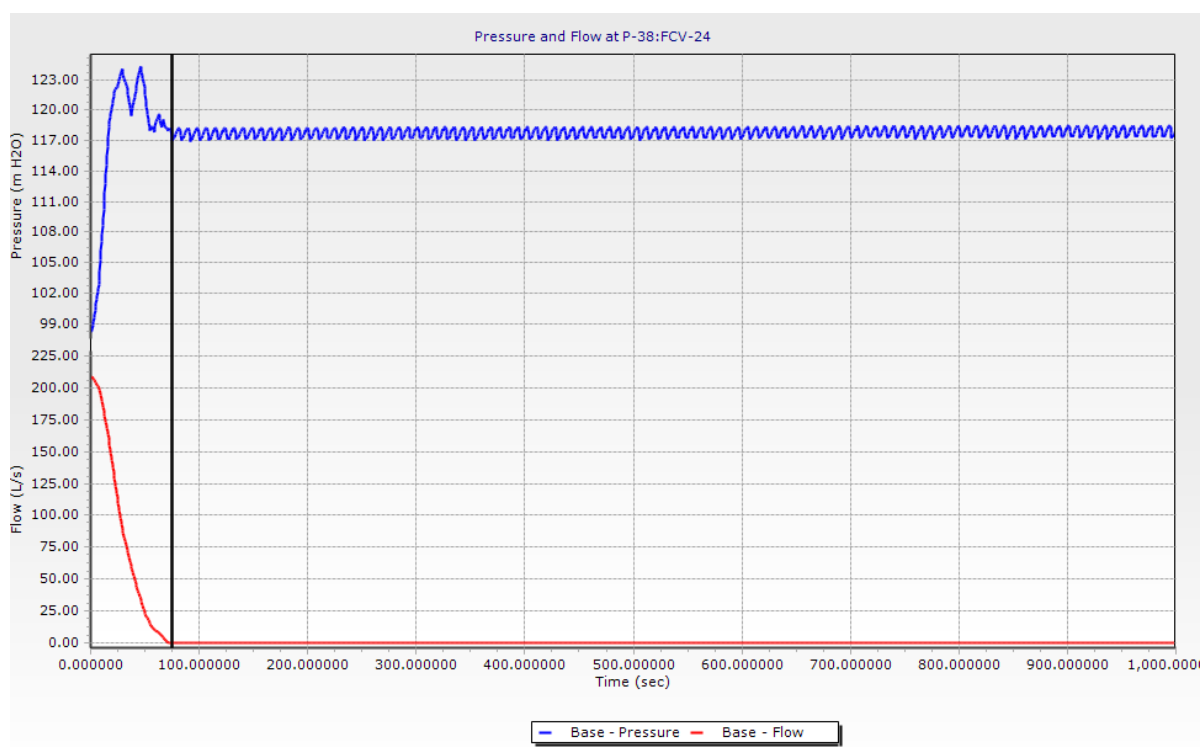


**Figura 37.** Presiones máximas y mínimas cierre de válvulas.  
Fuente: Diseño particular



En la figura se muestra la envolvente de presiones máxima (línea roja), misma que como se indicó anteriormente no debe sobrepasar la presión de trabajo de la tubería PVC. Al inicio de las operaciones la envolvente de presiones mínimas coincide con la línea piezométrica de flujo permanente indicando que en la simulación no se presentan bajas de presión. En el modelo se presenta que aproximadamente en los segundos 28 y 46 la presión llega al punto más alto para posteriormente tratar de mantenerse horizontal desde el segundo 75.

En la siguiente figura se puede apreciar las presiones máximas alcanzada en los tiempos antes mencionado y la evolución del caudal que transita por la válvula cuando se la realiza las operaciones de cierre.

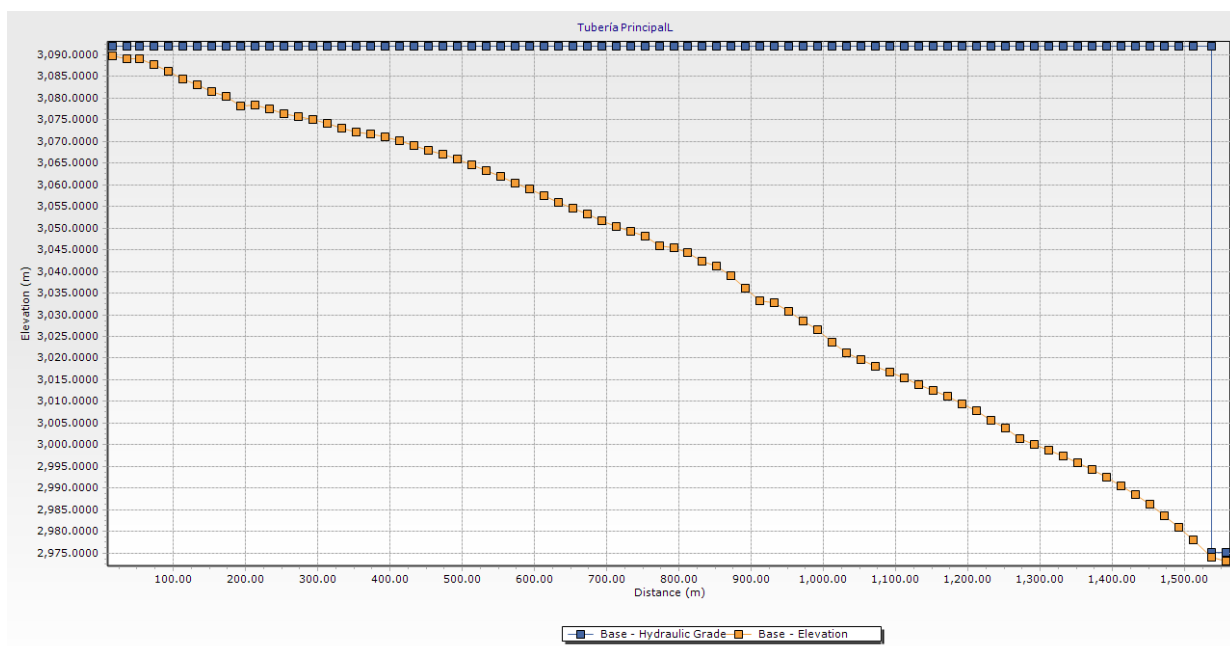


**Figura 38.** Presiones máximas y evolución del caudal por la válvula  
Fuente: Diseño particular

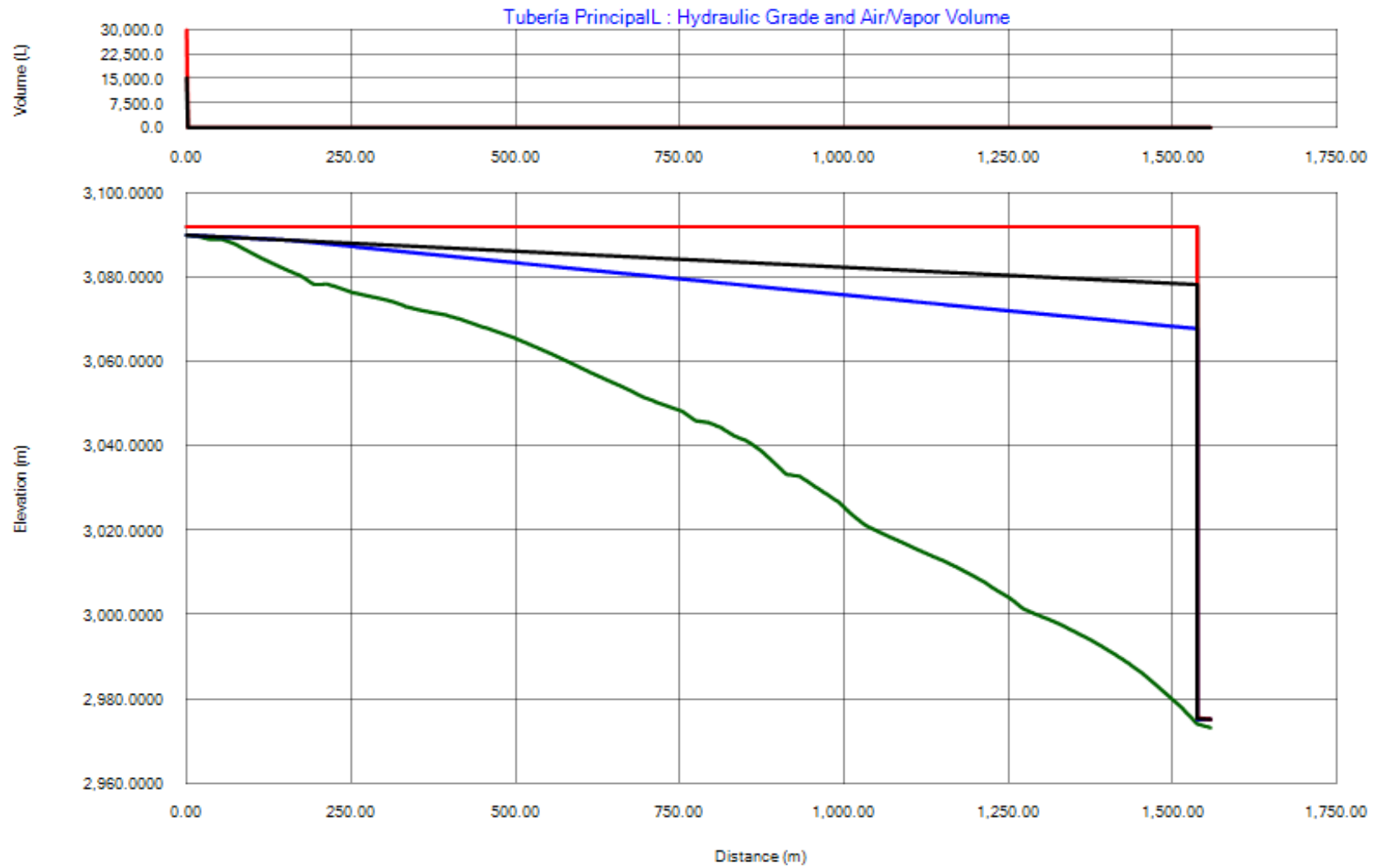
### 5.2.7 Apertura de válvulas por inicio de operación

Para la apertura de la válvula se consideró el tramo comprendido entre la T.P. Paluguillo y el TRP1 ya que es el tramo con mayor carga de presión (98.18 m H<sub>2</sub>O) y caudal transportado (209 l/s).

Para inicio de operaciones se considera que el sistema se encuentra parado, para lo cual su línea de energía inicial debe estar horizontal.



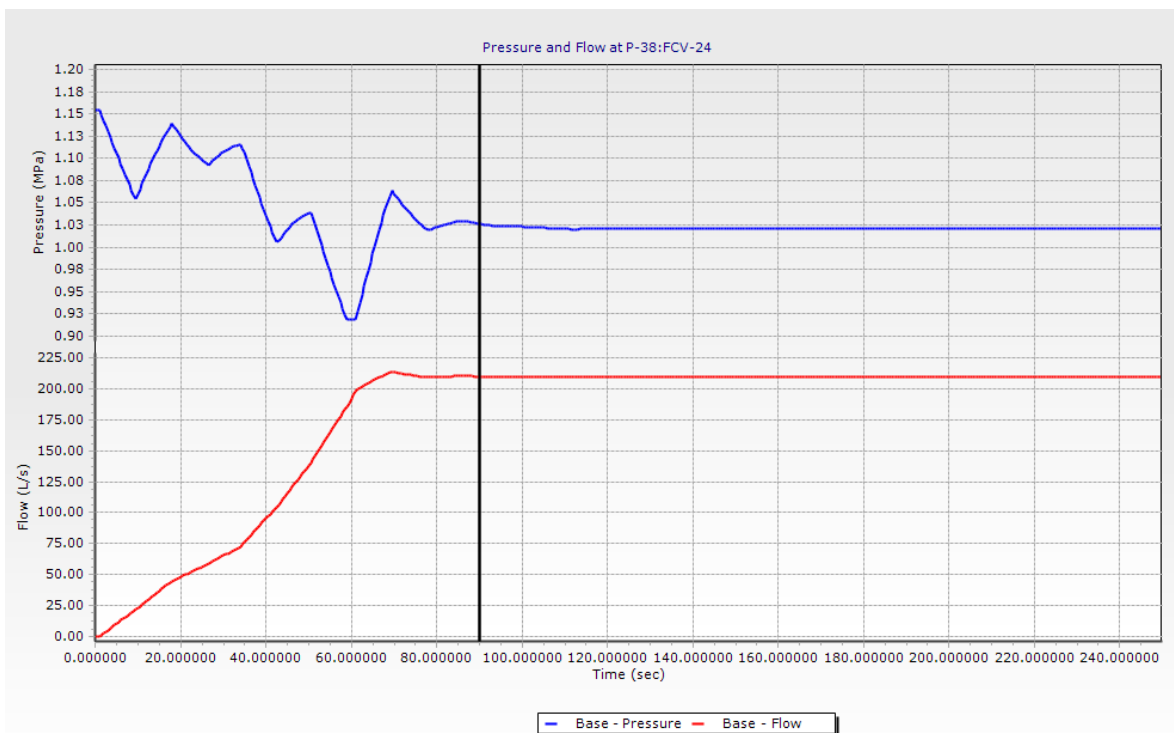
**Figura 39.** Flujo permanente Apertura de válvulas por inicio de operación  
Fuente: Diseño particular



**Figura 40.** Presiones máximas y evolución del caudal por la válvula inicio de operación  
 Fuente: Diseño particular

Como se mencionó anteriormente las condiciones iniciales corresponden a la línea de energía horizontal, misma que coincide con la envolvente de las máximas presiones presentadas (línea roja). Posteriormente la línea piezométrica se desplaza verticalmente por el tránsito del caudal a través de la apertura en la válvula. Como se observa en la figura se requiere un ingreso de aire máximo en aproximadamente 30000 l. Adicionalmente se observa que en este escenario no se presentan presiones negativas, mismas que fueron controladas mediante el tiempo de apertura de la válvula mismo que corresponde a 60 segundos.

Se nota que aproximadamente al segundo 90 de haber iniciado la apertura de la válvula el sistema se equilibra con el caudal de demanda de 209 l/s. Para lograr el caudal de demanda se requiere abrir la válvula 36.39%.



**Figura 41.** Flujo permanente Apertura de válvulas por inicio de operación

Fuente: Diseño particular

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

- El análisis de flujo permanente sirve como calibración del modelo computacional para el estudio de flujo permanente, siendo estrictamente necesario partir del primero para basar los resultados a procesos reales de conducción de agua potable.
- El análisis de flujo no permanente define la clase y/o espesores de tubería para que este soporte las presiones eventuales que se tendrían por una mala operación del sistema y/o por acciones naturales que pueden vulnerar a la tubería, estos fenómenos naturales pueden ser sismos, deslizamiento de lodos.
- El análisis de transitorios permite determinar el tipo de valvulería necesaria, así por ejemplo se puede determinar la necesidad de incluir un mayor número de válvulas de aire, definir tiempos de cierre y/o porcentaje de apertura de válvulas de desagüe y de control; las válvulas sostenedoras podrían ser accionadas si estas determinan un cambio brusco de presiones en la línea. El análisis de este equipo de valvulería apropiado en las líneas tiende a optimizar los espesores de esta.
- El análisis de trascientes en lo que respecta a las subpresiones que le predicen, nos sirven para determinar volúmenes que pueden ser incorporados a la línea en caso de rotura y de esta manera evitar que la tubería se vacíe.

- En los escenarios planteados los transitorios hidráulicos tienen mayor peso las presiones negativas que las sobrepresiones, en general los escenarios más críticos se presentaron en rotura de tubería.
- Se ha comprobado el correcto desempeño de las válvulas de aire existentes en el sistema, como medidas de alivio en cuanto a presiones negativas se refiere; sin embargo existen puntos adicionales identificados con presiones negativas mayores a las permisibles en los escenarios de rotura, colocar válvulas adicionales; cabe resaltar que se trata de escenarios catastróficos con una probabilidad de ocurrencia reducida.
- La autonomía de los tanques rompe presión para proveer el volumen necesario para mantener a las tuberías con un flujo constante y evitar posibles problemas de presiones negativas varía dependiendo de las características físicas y de la operación del sistema; sin embargo, para esta línea de transmisión existente con los caudales de diseño se ha evaluado que puede proveer entre 6 min (mayor caudal de descarga) y alrededor de 14 min, más favorable (menor caudal de descarga).
- El análisis de flujo no permanente permite establecer que las válvulas de desagüe no tienen que abrirse totalmente y dependiendo del porcentaje de apertura se debe determinar su respectivo coeficiente de descarga, en este caso y de los resultados se considera tiempos no mayores a 3 minutos.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda colocar válvulas adicionales en los puntos identificados con presiones negativas en los escenarios de rotura, evitando de esta manera sufrir complicaciones en la línea de transmisión de agua potable.
- Se recomienda que la apertura en válvulas de desagüe no exceda los 3 minutos, para así evitar los escenarios bruscos de apertura y cierre modelados.
- Para los casos de válvulas afectadas por presiones considerablemente altas, se recomienda la instalación de equipos tipo aguja o cilindro ranurado y cuyo desfogue se lo debe realizar hacia disipadores de energías (tipo martillo).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bosserman, B. (1978). *Computer Analysis of Hydraulic Transients in a Complex Piping System*. AWWA.
- Calvet, M., Corbella, E., García, A., López, C., Tayá, X., & Tomás, R. (2008). *Autocontrol en el servicio de suministro de agua. Manual básico de gestión de los riesgos para la salud*. Barcelona: Diputación de Barcelona. Área de Presidencia. Dirección de Comunicación.
- CICAM. (2015). *Informe Técnico de toma de muestras de las redes de abastecimiento de agua potable en el Cantón Rumiñahui*. Quito: Centro de Investigaciones y Control Ambiental.
- CIDTA. (2015). *Redes de Abastecimiento de Aguas: Partes del Abastecimiento y Tipo de Redes*. Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico del Agua. Sección 1. Retrieved from <http://cidta.usal.es/Cursos/redes/modulos/Libros/unidad%202/introduccion.PDF>
- CIDTA. (2015). *Redes de Abastecimiento de Aguas: Partes del Abastecimiento y Tipo de Redes*. Centro de Investigaciones y Desarrollo Tecnológico del Agua. Sección 2. Retrieved from <http://cidta.usal.es/Cursos/redes/modulos/Libros/unidad%202/tiposredes.PDF>
- Comisión Nacional del Agua. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- EMAAP. (2009). *Normas de Diseño de Sistemas de Alcantarillado para la EMAAP-Q*. Quito: Empresa Metropolitana de Alcantarillado y Agua Potable.
- Franco, L. E. (2006). *Cálculo de redes de agua potable considerando flujo permanente*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Idelchik, I. (2004). *Handbook of Hydraulic Resistance*. NAMELIOS.
- INEN. (1992). *Código Ecuatoriano de la Construcción CPE INEN 5 Parte 9-1*. Instituto Ecuatoriano de Normalización. Quito: Inen.
- INEN. (2014). *NTE INEN 1108. Agua Potable. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito.



- INGECONSULT. (2014). *Plan Maestro de Agua Potable y Alcantarillado*. Sangolquí: Ingeniería de Consulta y Desarrollo Sostenible.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010, Septiembre 12). *Ecuador en Cifras*. Retrieved from <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/>
- Lu, W., Kiéné, L., & Lévi, Y. (1999). *Chlorine demand of biofilms in water distribution systems*. Water Research.
- Martínez, A. (2017, Junio 27). *iagua*. Retrieved from <https://www.iagua.es/blogs/andres-martinez/minimo-vital-agua-ecuador>
- Mendiluche, R. E. (2018). *Ingeniería Rural*. Retrieved from Ingeniería Rural: [www.ingenieriarural.com](http://www.ingenieriarural.com)
- MIDUVI. (1992). *Código Ecuatoriano para el Diseño de la Construcción de Obras Sanitarias. Norma CO 10.07 - 601*.
- Pimienta Ramirez, N. (2014, Octubre 4). *Mecánica de Fluidos Guajira*. Retrieved from Universidad de Guajira: <http://mecanicadefluidosuniguajira2014.blogspot.com/2014/10/clasificacion-de-flujos-de-fluidos.html>
- PNUD. (2015). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Retrieved from <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals/resources.html>
- Ponce. (2001). *ASCE Journal of Hydrologic Engineering*.
- Ponce. (2015, Febrero). *Flujo no permanente*. Retrieved from [http://ponce.sdsu.edu/cuentos\\_flujo\\_permanente\\_flujo\\_nopermanente.html](http://ponce.sdsu.edu/cuentos_flujo_permanente_flujo_nopermanente.html)
- Rodríguez, N. (2016, abril). *Escuela de Ingeniería de Antioquia*. Retrieved from Recursos Hidráulicos: <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/clasificaciondelflujo/clasificaciondelflujo.html>
- Sotelo, G. (2000). *Hidráulica General, Vol 1*. México: LIMUSA.
- Trifunovic, N. (2006). *Introduction to urban water distribution*. New York: Taylor & Francis.

U.S. Environmental Protection Agency. (2000). *Epanet 2, manual de usuario*. Cincinnati: Cincinnati.

UNASAM. (2014). *Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo. Apuntes Abastecimiento de Agua y Alcantarillado*. Retrieved from <https://www.udocz.com/embed/abastecimiento-de-agua-y-alcantarillado-fic-unasam>