



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
DEPARTAMENTO DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN HIDROSANITARIA

CALIBRACIÓN Y ANÁLISIS DE TRANSITORIOS
PARA EL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL
SISTEMA YANUNCAY

Trabajo previo a la obtención del título de:
MASTER EN HIDROSANITARIA

Autores:

Karla Gabriela Lliguisaca Parra
Jessenia Karina Pacheco Galindo

Director:

Ing. Josué Larriva
Cuenca - Ecuador

2025

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la vida, la salud y la sabiduría, y por permitirme alcanzar un paso más en mi camino. A mis padres, Pedro y Teolinda, por ser mi motor fundamental, por creer en mí en cada meta que me propongo y por ser mi impulso diario. A mis hermanas y hermano, por su constante apoyo y compañía en cada momento; y a mis sobrinas, por llenar mi vida de alegría.

A mi enamorado, Mateo, por estar a mi lado desde el primer día, por ser mi apoyo incondicional y por ayudarme a sobrellevar cada obstáculo en este proceso.

Dedico esta tesis a una persona muy especial que ahora me cuida desde el cielo, mi abuelito, Florencio Lliguisaca. Anhelaba que estuvieras aquí para ver este logro, pero te adelantaste un poquito. Gracias por ser mi inspiración y mi impulso cada día.

También quiero agradecer a mi compañera de tesis y amiga, Jessenia Pacheco. Juntas hemos crecido en esta hermosa profesión y, una vez más, cumplimos un sueño juntas. Gracias por todo, amiga.

Expreso mi gratitud al ingeniero Josué Llarriva, nuestro director de tesis, por su guía, sus enseñanzas y su apoyo constante en este proceso, lo que nos ha permitido culminar con éxito este trabajo.

Finalmente, gracias a todas las personas, familiares y amigos, que en algún momento se preocuparon por mí y me brindaron su apoyo incondicional. A cada uno de ustedes los llevo en mi corazón. ¡Gracias por todo!

Karla Gabriela Lliguisaca Parra

Con profundo agradecimiento a todos quienes han sido parte de este proceso, sin su respaldo este logro no sería posible.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la oportunidad y fortaleza para alcanzar una nueva meta en mi vida. A mis padres, Gersson y Carmita, por su amor incondicional, su esfuerzo incansable y su apoyo en cada paso.

A mis hermanos, Danny, Paúl, Andrés y Pedro y mis sobrinos Pedrito y Violeta por su cariño, compañía y por estar presentes, brindándome su aliento y confianza.

A mi abuelita Elsa, por su afecto y sabiduría, por compartir conmigo su fortaleza con sus consejos y oraciones.

A la persona que me ha acompañado en todo este proceso, Juan Francisco, por su cariño, paciencia y apoyo incondicional.

A Gabi, mi gran amiga y compañera de tesis, con quien he compartido este camino y una amistad sincera. Que esta sea una más de las metas cumplidas juntas.

A mis profesores de maestría, de manera especial al director de este trabajo. Ing. Josué Larriva, por su invaluable orientación y compromiso en este proyecto.

Y a mis ángeles en el cielo, que sé que me acompañan en cada paso y que, desde donde estén, comparten conmigo la alegría de este logro.

A todos ustedes, gracias de corazón.

Jessenia Karina Pacheco Galindo

RESUMEN

El presente estudio analiza los fenómenos transitorios en el sistema de conducción del Sistema de Agua Potable Yanuncay, ubicado en Cuenca, Ecuador. La investigación se centra en evaluar los efectos del cierre de válvulas y la rotura de tuberías mediante modelación numérica con el software HAMMER, considerando dos escenarios temporales: 2024 y 2050.

El análisis abarca tres tramos clave de la red: Ictocruz, San Miguel y Huizhil, los cuales presentan diferentes materiales de tubería y condiciones hidráulicas. Los resultados muestran que la presencia de tuberías de PVC en el tramo de Ictocruz ayuda a disipar las sobrepresiones debido a su menor celeridad de onda, en comparación con los tramos conformados exclusivamente por hierro dúctil, donde se generan presiones significativamente más altas.

En el escenario proyectado para el año 2050, el aumento de la demanda de agua potable y el crecimiento poblacional agravan las condiciones de operación, por lo que, se concluye que es fundamental evaluar el estado de los accesorios y componentes del sistema, además de optimizar las estrategias de maniobra de válvulas para mitigar los efectos del golpe de ariete y evitar fallas estructurales.

Los hallazgos de este estudio proporcionan herramientas para la gestión eficiente del sistema de conducción, permitiendo una planificación más efectiva de las medidas de protección hidráulica y asegurando la sostenibilidad del abastecimiento de agua potable en el futuro.

Palabras clave: transitorios hidráulicos, golpe de ariete, modelación numérica, sobrepresión, sistema de conducción, HAMMER.

ABSTRACT

This study analyzes transient phenomena in the Yanuncay Drinking Water System's conduction network, located in Cuenca, Ecuador. The research focuses on evaluating the effects of valve closure and pipeline rupture through numerical modeling using HAMMER software, considering two time scenarios: 2024 and 2050.

The analysis covers three key sections of the network: Ictocruz, San Miguel, and Huizhil, which feature different pipe materials and hydraulic conditions. The results indicate that the presence of PVC pipes in the Ictocruz section helps dissipate overpressures due to its lower wave velocity, compared to the sections composed entirely of ductile iron, where significantly higher pressures occur.

In the projected 2050 scenario, increasing potable water demand and population growth exacerbate operating conditions, raising overpressures within the network. The study concludes that assessing the state of system accessories and components is essential, along with optimizing valve maneuvering strategies to mitigate water hammer effects and prevent structural failures.

The findings of this study provide tools for the efficient management of the conduction system, enabling better planning of hydraulic protection measures and ensuring the sustainability of the potable water supply in the future.

Keywords: hydraulic transients, water hammer, numerical modeling, overpressure, conduction system, HAMMER.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. ANTECEDENTES	14
1.2. OBJETIVOS	16
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MATERIALES Y MÉTODOS	17
2.1. ESQUEMA HIDROTÉCNICO DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY	17
2.1.1. CAPTACIÓN	17
2.1.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	17
2.1.3. LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.....	18
2.2. ESTUDIOS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN.....	19
2.2.1. FENÓMENOS TRANSITORIOS	19
2.2.2. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN	22
2.2.3. GOLPE DE ARIETE Y EFECTOS EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN	23
2.3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY	24
2.3.1. CATASTRO DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DE YANUNCAY.....	24
2.3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA.....	27
2.3.2.1. Curvas de consumo de tanques de reserva	27
2.3.2.2. Geometría de tanques de reserva.....	30
2.4. PARÁMETROS PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS.	31
2.4.1. PERIODO DE ANÁLISIS.....	31
2.4.2. DOTACIÓN (D)	32
2.4.3. CAUDALES DE DISEÑO	35
2.4.3.1. POBLACIÓN DE DISEÑO (P).....	35
2.4.3.2. CAUDAL MEDIO DIARIO (Qm).....	37
2.4.3.3. CAUDAL MÁXIMO DIARIO (QMD).....	39
2.5. MODELACIÓN NUMÉRICA	42
2.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN SOFTWARE HAMMER.....	42
2.5.2. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY	43
ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY.....	44
2.5.2.1. PRIMER ESCENARIO: CIERRE DE VÁLVULAS.....	45

2.5.2.1.1.	TRAMO ICTOCRUZ	45
2.5.2.1.1.1.	MODELO ACTUAL 2024	46
2.5.2.1.1.2.	MODELO PROYECTADO 2050	50
2.5.2.1.2.	TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI	52
2.5.2.1.2.1.	MODELO ACTUAL 2024	54
2.5.2.1.2.2.	MODELO PROYECTADO 2050	58
2.5.2.1.3.	TRAMO HUIZHIL	61
2.5.2.1.3.1.	MODELO ACTUAL 2024	62
2.5.2.1.3.2.	MODELO PROYECTADO 2050	66
2.5.2.2.	SEGUNDO ESCENARIO: ROTURA DE LA TUBERÍA EN UN PUNTO BAJO DE LA LÍNEA	68
2.5.2.2.1.	TRAMO ICTOCRUZ	69
5.2.2.2.	TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI	72
5.2.2.3.	TRAMO HUIZHIL	74
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	76
3.1.	ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR MANIOBRA DE VÁLVULAS	76
	CIERRE LENTO Y RÁPIDO DE VÁLVULA	76
3.1.1.	<i>TRAMO ICTOCRUZ</i>	<i>77</i>
3.1.2.	<i>TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI</i>	<i>77</i>
3.1.3.	<i>TRAMO HUIZHIL</i>	<i>78</i>
3.2.	ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR ROTURA DE LA TUBERÍA	79
3.2.1.	<i>TRAMO ICTOCRUZ</i>	<i>80</i>
3.2.2.	<i>TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ</i>	<i>80</i>
3.2.3.	<i>TRAMO HUIZHIL</i>	<i>81</i>
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	83
5.	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	85

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY	14
TABLA 3 VALORES DE COEFICIENTE K PARA DIFERENTES MATERIALES FUENTE: (VARAS & URIBE, N.D.)	21
TABLA 3 DATOS DE CURVA DE CONSUMO PARA SECTORES URBANOS. FUENTE: ETAPA EP	28
TABLA 4 DATOS DE CURVA DE CONSUMO PARA SECTORES RURALES. FUENTE: ETAPA EP	28
TABLA 5 GEOMETRÍA DE LOS TANQUES DE RESERVA FUENTE: ETAPA EP	30
TABLA 6 DOTACIÓN PARA SECTORES DE CUENCA. ESTUDIOS DEFINITIVOS DE PLANES MAESTROS II ETAPA.....	32
TABLA 7 ANÁLISIS DE DOTACIONES PARA LAS ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY. FUENTE: CONSULTORÍA ETAPA EP	33
TABLA 8 DOTACIONES ANUALES DE LOS SECTORES ABASTECIDOS POR EL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY. FUENTE: ETAPA EP.....	34
TABLA 9: DOTACIÓN FINAL CONSIDERADA PARA EL ANÁLISIS DEL MODELO UNIDIMENSIONAL DEL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY. FUENTE: ETAPA EP.....	35
TABLA 10: ANÁLISIS POBLACIONAL PARA LOS SECTORES ABASTECIDOS POR EL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY. FUENTE: ETAPA EP.	36
TABLA 11: CAUDAL MEDIO DIARIO. OBTENIDO MEDIANTE LA ECUACIÓN 5. PARA LOS DATOS Y PROYECCIONES DE LOS AÑOS 2024, 2030, 2035, 2040, 2045 Y 2050. FUENTE: ETAPA EP	38
TABLA 12: CAUDAL MÁXIMO DIARIO. OBTENIDO MEDIANTE LA ECUACIÓN 6. PARA LOS DATOS Y PROYECCIONES DE LOS AÑOS 2024, 2030, 2035, 2040, 2045 Y 2050. FUENTE: ETAPA EP	40
TABLA 13: PATRONES DE CIERRE RÁPIDO EN VÁLVULA DE CONTROL FCV DEL TANQUE DE ICTOCRUZ.	47
TABLA 14: PATRÓN DE CIERRE LENTO EN VÁLVULA DE CONTROL FCV DEL TANQUE DE ICTOCRUZ.....	49
TABLA 15: PATRONES DE CIERRE RÁPIDO EN VÁLVULA DE CONTROL FCV DEL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI.	55
TABLA 16 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 5.5 L/S. TRAMO ICTOCRUZ 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	70
TABLA 17 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 6.0 L/S. TRAMO ICTOCRUZ 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	71
TABLA 18 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 7.0 L/S. TRAMO ICTOCRUZ 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	71
TABLA 19 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 40 L/S. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	73
TABLA 20 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 60 L/S. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	73
TABLA 21 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 40 L/S. TRAMO HUIZHIL 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	75
TABLA 22 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN "ROTURA DE LA TUBERÍA EN EL PUNTO MÁS BAJO DE LA LÍNEA", CAUDAL DE DESCARGA DE 70 L/S. TRAMO HUIZHIL 2024 Y 2050. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	75
TABLA 23: RESUMEN DE RESULTADOS DE CIERRE DE VÁLVULA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	76

TABLA 24: TIPOS DE CIERRE EN VÁLVULA DE CONTROL Y SOBREPRESIONES GENERADAS EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO ICTOCRUZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	77
TABLA 25: TIPOS DE CIERRE EN VÁLVULA DE CONTROL Y SOBREPRESIONES GENERADAS EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI.	78
TABLA 26: TIPOS DE CIERRE EN VÁLVULA DE CONTROL Y SOBREPRESIONES GENERADAS EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO HUIZHIL.....	78
TABLA 27: RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON UNA VÁLVULA DE PURGA EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO ICTOCRUZ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	80
TABLA 28: RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON UNA VÁLVULA DE PURGA EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	80
TABLA 29: RESULTADOS DE SIMULACIÓN CON UNA VÁLVULA DE PURGA EN MODELO 2024 Y 2050. TRAMO HUIZHIL.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: CATASTRO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	15
ILUSTRACIÓN 2 CATASTRO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY EN EL SOFTWARE HAMMER, SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL. FUENTE: ETAPA EP	25
ILUSTRACIÓN 3 CATASTRO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE YANUNCAY EN EL SOFTWARE HAMMER, SEGÚN EL TIPO DE MATERIAL. FUENTE: ETAPA EP	26
ILUSTRACIÓN 4 CURVA DE CONSUMO, SECTORES URBANOS. FUENTE: ETAPA EP	29
ILUSTRACIÓN 5 CURVA DE CONSUMO, SECTORES RURALES. FUENTE: ETAPA EP	29
ILUSTRACIÓN 6 VOLÚMENES DE TANQUES DE RESERVA. FUENTE: ETAPA EP	31
ILUSTRACIÓN 7: POBLACIÓN ACTUAL (2024) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	37
ILUSTRACIÓN 8: POBLACIÓN PROYECTADA (2050) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	37
ILUSTRACIÓN 9: CAUDAL MEDIO DIARIO (2024) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	39
ILUSTRACIÓN 10 : CAUDAL MEDIO DIARIO PROYECTADO (2050) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	39
ILUSTRACIÓN 11: CAUDAL MÁXIMO DIARIO (2024) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.....	41
ILUSTRACIÓN 12: CAUDAL MÁXIMO DIARIO PROYECTADO (2050) DE ZONAS ABASTECIDAS POR EL SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE AGUA POTABLE YANUNCAY.	41
ILUSTRACIÓN 13 : DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE MODELACIÓN HIDRÁULICA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	43
ILUSTRACIÓN 14 : ESQUEMA DE LAS DIFERENTES CONDICIONES A ANALIZAR. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	44
ILUSTRACIÓN 15: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. TRAMO PTAP SUSTAG – TANQUE ICTOCRUZ.	45
ILUSTRACIÓN 16: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO PTAP SUSTAG – TANQUE ICTOCRUZ GENERADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	45
ILUSTRACIÓN 17 SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ –CHAULLAYACU A TANQUE ICTOCRUZ, GENERADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	46
ILUSTRACIÓN 18: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10s) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	47
ILUSTRACIÓN 19 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=30s) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ, AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	48
ILUSTRACIÓN 20 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 s) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ, AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	49

ILUSTRACIÓN 21: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ, AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	50
ILUSTRACIÓN 22 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=30 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ, AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	51
ILUSTRACIÓN 23 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN ICTOCRUZ-CHAULLAYACU AL TANQUE DE ICTOCRUZ, AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	52
ILUSTRACIÓN 24 SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. TRAMO PTAP SUSTAG A TANQUE SAN MIGUEL DE PUTUSHI	53
ILUSTRACIÓN 25 SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO PTAP SUSTAG – TANQUE SAN MIGUEL DE PUTUSHI, GENERADO EN EL SOFTWARE HAMMER.....	53
ILUSTRACIÓN 26: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL – SAN MIGUEL A TANQUE SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ, GENERADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	54
ILUSTRACIÓN 27 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	55
ILUSTRACIÓN 28 GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=20 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	56
ILUSTRACIÓN 29: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	57
ILUSTRACIÓN 30: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	58
ILUSTRACIÓN 31: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=20 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	59
ILUSTRACIÓN 32: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN HUIZHIL-SAN MIGUEL AL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	60
ILUSTRACIÓN 33: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. TRAMO PTAP SUSTAG A TANQUE HUIZHIL.....	61
ILUSTRACIÓN 34: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO PTAP SUSTAG – TANQUE HUIZHIL, GENERADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	61
ILUSTRACIÓN 35: SISTEMA DE CONDUCCIONES YANUNCAY. PERFIL DEL TRAMO INTERSECCIÓN J79 – TANQUE HUIZHIL,, GENERADO EN EL SOFTWARE	62

ILUSTRACIÓN 36: PATRONES DE CIERRE RÁPIDO EN VÁLVULA DE CONTROL FCV DEL TANQUE DE HUIZHIÑ	63
ILUSTRACIÓN 37: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN J79 AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.....	63
ILUSTRACIÓN 38: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=15 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN J79 AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.....	64
ILUSTRACIÓN 39: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN J79 AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2024. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.....	65
ILUSTRACIÓN 40: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=10 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	66
ILUSTRACIÓN 41: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=15 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER.	67
ILUSTRACIÓN 42: GRÁFICA DE ANÁLISIS DE GRADIENTE HIDRÁULICO POR CIERRE DE VÁLVULA (T=120 S) DEL TRAMO INTERSECCIÓN AL TANQUE HUIZHIL. AÑO 2050. MODELADO EN EL SOFTWARE HAMMER	68
ILUSTRACIÓN 43: UBICACIÓN DE VÁLVULA DE PURGA PARA SIMULACIÓN DE ROTURA DE TUBERÍA EN EL TRAMO DEL TANQUE DE ICTOCRUZ	69
ILUSTRACIÓN 44: UBICACIÓN DE VÁLVULA DE PURGA PARA SIMULACIÓN DE ROTURA DE TUBERÍA EN EL TRAMO DEL TANQUE DE SAN MIGUEL DE PUTUSHI	72
ILUSTRACIÓN 45: UBICACIÓN DE VÁLVULA DE PURGA PARA SIMULACIÓN DE ROTURA DE TUBERÍA EN EL TRAMO DE HUIZHIL.	74
ILUSTRACIÓN 46 VOLÚMENES DE AIRE GENERADOS EN LAS MODELACIONES DE LOS DIFERENTES TRAMOS DE CONDUCCIÓN	81

1. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable es un aspecto fundamental para el desarrollo urbano y el bienestar de la población. La infraestructura hidráulica debe garantizar un suministro eficiente y seguro, minimizando los riesgos asociados a variaciones de presión y otros fenómenos transitorios que puedan afectar la integridad del sistema de conducción.

El Sistema de Agua Potable Yanuncay, ubicado en la ciudad de Cuenca, Ecuador, representa una de las principales redes de distribución en la región, abasteciendo aproximadamente a 56,000 habitantes. Debido a su extensión y características de funcionamiento por gravedad, este sistema está expuesto a fenómenos transitorios que pueden generar variaciones significativas en la presión de las tuberías, lo que puede derivar en daños estructurales o fallos operativos.

Este estudio tiene como objetivo analizar los transitorios hidráulicos en el sistema de conducción de Yanuncay mediante modelación numérica con el software HAMMER. Se evaluarán distintos escenarios, como el cierre de válvulas y la rotura de tuberías, con el fin de identificar las condiciones operativas críticas y proponer estrategias para la mitigación de sobrepresiones y otros efectos adversos.

A través de este análisis, se busca proporcionar herramientas para optimizar la gestión del sistema de agua potable, asegurando su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

1.1. ANTECEDENTES

El Sistema de Agua Potable Yanuncay está ubicado en la ciudad de Cuenca en el sector Sustag, representa uno de los principales sistemas de agua potable de la ciudad abasteciendo, según información de la empresa ETAPA EP aproximadamente a 16000 usuarios, lo que representa alrededor de 56000 habitantes, de los sectores occidentales de la ciudad de Cuenca (Andrade; Lizeth & Pesantez; Jerica, 2020). La captación se realiza en el río Yanuncay y la línea de conducción de agua cruda abastece a la planta de tratamiento de agua potable de Sustag.

El sistema de conducción de agua potable está conformado por varias líneas que abastecen los sectores: Narancay, Huizhil, San Joaquín, San Miguel de Putuzhi, Ictocruz, San Miguel del Valle y Pinchisana; transportando un volumen de aproximadamente 250.000 m³ de agua potable al mes, según registros de micromedición de una consultoría realizada por ETAPA EP. De manera inicial el Sistema de Agua Potable Yanuncay por su dimensión y el crecimiento de la ciudad se ha ido extendiendo con el tiempo para cubrir las zonas mencionadas anteriormente, como se indica en el siguiente cuadro:

Tabla 1: Información del Sistema de Agua Potable Yanuncay

SISTEMA YANUNCAY	USUARIOS	MICROMEDICION	POBLACION
	Total Conexiones	m ³ Totales	hab
Narancay	3.745	51.836	12.854
Huizhil	3.520	53.387	12.234
San Joaquin	3.696	76.777	13.212
San Miguel de Putuzhi	4.553	61.726	16.190
Ictocruz	195	2.687	604
San Miguel del Valle	262	2.800	862
Pinchisana	189	3.674	699
TOTAL YANUNCAY	15.898	250.087	55.795

La Ilustración 1 representa el catastro de la cobertura del Sistema de Agua Potable de Yanuncay y sus zonas de abastecimiento.

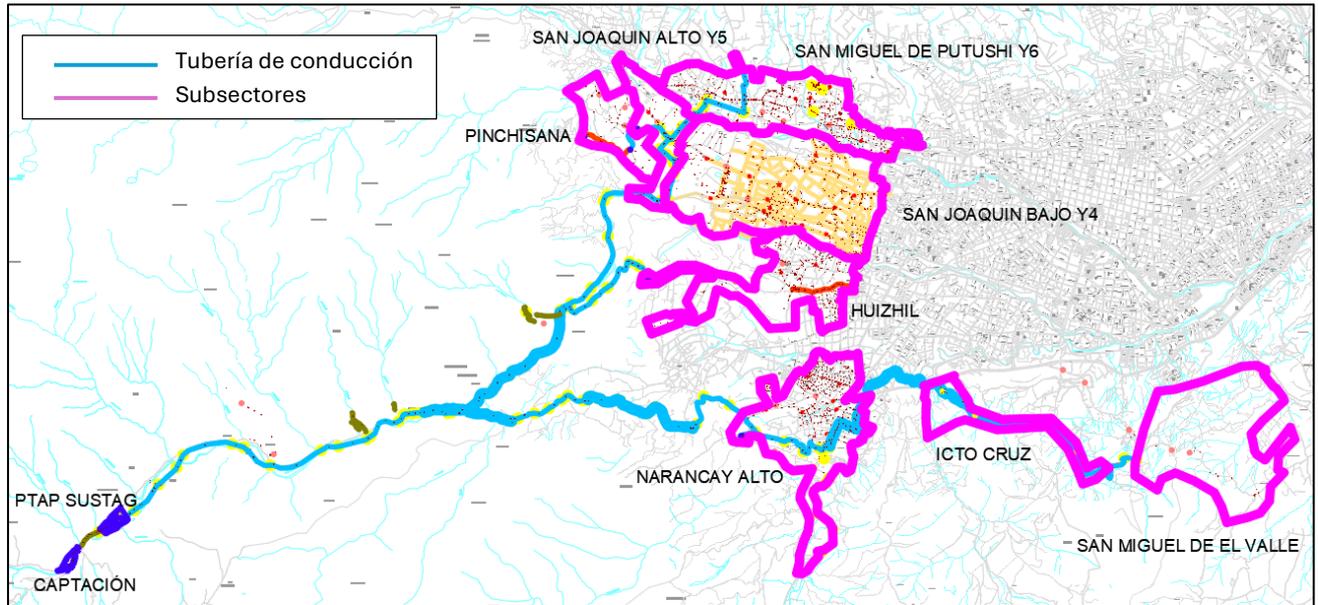


Ilustración 1: Catastro del Sistema de Agua Potable Yanuncay

El presente trabajo se enfoca en el estudio del sistema de conducción de agua potable del sistema Yanuncay, el mismo que funciona mediante gravedad, lo que, como indica la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Comisión Nacional del Agua, n.d.) tiene como ventajas la operación sencilla, mantenimientos económicos y reducidos cambios de presión, sin embargo, al ser un sistema a gran escala, que tiene una gran área de cobertura y grandes distancias, es susceptible de presentar fenómenos transitorios.

Al ser un sistema tan relevante en la ciudad de Cuenca, el sistema de conducción requiere un análisis de parámetros hidráulicos para realizar la calibración de las líneas de conducción y el estudio de las condiciones de funcionamiento actuales. Además, el Sistema de Conducción funciona a gravedad, lo que puede generar problemas importantes de fenómenos transitorios bajo distintos escenarios.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis integral del sistema de conducción del Sistema de Agua Potable Yanuncay, mediante la modelación unidimensional de flujo calibrado y el análisis de fenómenos transitorios mediante programas computacionales.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar datos topográficos y geométricos, condiciones hidráulicas, propiedades de flujo del sistema de conducción Yanuncay para crear un modelo unidimensional de flujo mediante el software HAMMER.
- Realizar la modelación del sistema de conducción Yanuncay con parámetros actuales del año 2024 y una proyección del modelo al año 2050.
- Realizar un análisis de fenómenos transitorios y su influencia en la variación de parámetros hidráulicos en el sistema de conducción, bajo distintos escenarios en el software HAMMER.
- Analizar los fenómenos transitorios causados por cierre de válvulas y rotura de tubería en 3 tramos del sistema: Ictocruz, San Miguel de Putushi y Huizhil.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ESQUEMA HIDROTÉCNICO DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY

El sistema de conducciones del Sistema Yanuncay está constituido por un conjunto de estructuras que tienen como finalidad dotar de agua potable a varios sectores de la ciudad:

- a. Captación
- b. Planta de tratamiento de agua potable
- c. Líneas de conducción.

2.1.1. CAPTACIÓN

La captación de agua cruda hace referencia a un conjunto de estructuras que permiten la recolección de agua sin tratar desde la fuente, Según la Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua (Asamblea Nacional del Ecuador, 2014), se deben construir las obras necesarias de captación, conducción, aprovechamiento, medición y control, verificando que cumpla con los caudales necesarios, asegurando el ingreso de agua al sistema en cualquier época del año, además, minimizando el ingreso de material como hojas, ramas, arena y material flotante.

Los ríos son las fuentes más frecuentes de captación, en el caso del Sistema Yanuncay, se obtiene el agua cruda del Río Yanuncay mediante un azud transversal al río, toma lateral y desarenador.

La conducción de agua cruda tiene una longitud aproximada de 970 metros con tubería de 700 mm de hierro dúctil, la cual dirige el agua a la planta de tratamiento de agua potable de Sustag.

2.1.2. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

El agua cruda captada es dirigida a la planta de tratamiento de agua potable de Sustag, ubicada en el sector de Sustag a 2920 metros de altura. La planta fue inaugurada el 10 de julio de 2009, y fue parte de la II fase de los Planes Maestros de Etapa.

La planta de Sustag cuenta con una capacidad inicial de 40 lt/s, con una proyección de incremento de su capacidad a 690 lt/s en una segunda Etapa (Mosquera; Julio, 2012).

Construida para satisfacer el crecimiento poblacional acelerado de la ciudad, abasteciendo de agua a los sectores: Narancay, Huizhil, San Miguel de Putuzhi, San Joaquín (Bajo y Alto), Pinchisana, Icto Cruz y Chaullayacu.

Según Ávila, Rosa (2013), el agua cruda que ingresa a la planta presenta baja turbiedad, baja alcalinidad, alto color y una alta carga bacteriológica. El proceso de potabilización consta de cinco pasos:

- Recepción del agua cruda.
- Floculación.
- Sedimentación.
- Filtración.
- Desinfección.

La planta cuenta con un reservorio de 5000 m³.

Según Ávila, Rosa en su publicación en la Revista Galileo No.23 (2013), se puede catalogar a esta planta como la más moderna de la provincia, por poseer una central inteligente con el programa informático ESCADA, el mismo que controla todos los procesos necesarios para la potabilización, además, permite controlar los equipos a distancia mediante un dispositivo de control remoto.

También, se recalca que la planta, realiza su propio tratamiento de lodos mediante un proceso de espesamiento, acondicionamiento, deshidratación y transporte de lodo deshidratado, de manera que ningún material sobrante del proceso de potabilización se devuelto al río Yanuncay. El volumen promedio de lodos tratados en la Planta de Sustag es de 15 m³ por mes (Avila; Rosa, 2013).

2.1.3. LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

La línea de conducción corresponde al conjunto integrado por tuberías y dispositivos de control, los cuales permiten el transporte del agua desde la fuente de

abastecimiento en condiciones óptimas de calidad, cantidad y presión. (SECRETARÍA DE AGRICULTURA, n.d.)

El sistema de conducción de agua potable está conformado por varias líneas que abastecen los sectores: Narancay, Huizhil, San Joaquín, San Miguel de Putuzhi, Ictocruz, San Miguel del Valle y Pinchisana; transportando un volumen de aproximadamente 250.000 m³ de agua potable al mes, según registros de micromedición de ETAPA EP. De manera inicial el Sistema de Agua Potable Yanuncay fue diseñado para abastecer solamente a ciertos sectores, sin embargo, por su dimensión y el crecimiento de la ciudad se ha ido extendiendo para cubrir las zonas mencionadas anteriormente, como se indica en la Tabla 1

2.2. ESTUDIOS DE TRANSITORIOS HIDRÁULICOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

2.2.1. FENÓMENOS TRANSITORIOS

Se conoce como fenómenos transitorios a los fenómenos de variación de presiones en las conducciones a presión. (Pérez & Guitelman, 2005)

Los transitorios pueden ser: muy lentos o cuasi- estáticos, lentos y rápidos o golpe de Ariete.

Los transitorios muy lentos o cuasi- estáticos, son aquellos en los que las variables de flujo cambian muy lentamente en relación al tiempo, con duraciones de varias horas o incluso días, en este tipo no es necesario considerar la inercia del flujo ni las propiedades elásticas del fluido y la tubería. (Comisión Nacional del Agua, n.d.)

Los transitorios lentos, se relacionan con el movimiento de masa de agua en la conducción en periodos de tiempo de varios minutos u horas y los cambios de las variables son significativos, pero no tanto para considerar las propiedades elásticas del fluido y de la tubería. (Comisión Nacional del Agua, n.d.)

Por último, los transitorios rápidos o golpe de Ariete, se generan cuando las oscilaciones de presión son muy grandes, generadas por cambios bruscos de la velocidad en la

tubería, puede darse por apertura y cierre de válvulas. Los cambios bruscos de velocidad, generan cambios bruscos de presión, creando ondas de presión de periodo muy corto. En este tipo de transitorios es necesario considerar los efectos elásticos de la tubería y del líquido. (Comisión Nacional del Agua, n.d.)

Según, (Pérez & Guitelman, 2005), el tiempo que tarda la onda en recorrer el trayecto de ida y vuelta se le conoce como tiempo crítico (T_c), y está dada por la siguiente ecuación.

$$T_c = \frac{2 * L}{a}$$

Ecuación 1: Tiempo crítico

Donde:

L: Longitud de la tubería (m)

a: Celeridad de la onda (m/s)

Allievi ha establecido la celeridad de la onda mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + K * \frac{D}{e}}}$$

Ecuación 2: Celeridad de la onda

Donde:

K: Coeficiente característico del material

D: Diámetro media de la tubería

e: espesor de la pared de la tubería

Los valores típicos del coeficiente K se muestran en la siguiente tabla:

MATERIAL	K
Acero	0.5
Hierro	0.5
Fundición de hierro	1
Hormigón armado	5
Fibrocemento	4
PVC	33.3

Tabla 2 Valores de coeficiente K para diferentes materiales Fuente: (Varas & Uribe, n.d.)

Según, (Varas & Uribe, n.d.), cuando la tubería de elevación presenta variaciones en su trayectoria, la celeridad puede tomar distintos valores. Para un cálculo más preciso, se puede determinar el promedio de las celeridades ponderadas según las diferentes longitudes, mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{a_1 L_1 + a_2 L_2 + \dots + a_n L_n}{L_1 + L_2 + \dots + L_n}$$

Ecuación 3: Celeridad ponderada

Por lo tanto, si $T < \frac{2*L}{a}$, la maniobra habrá finalizado antes del retorno de la onda de presión, lo que se considera un cierre rápido y genera la máxima sobrepresión en algún punto de la tubería. Sin embargo, si $T > \frac{2*L}{a}$, el cierre es lento, lo que implica que ningún punto alcanzará la sobrepresión máxima, ya que la primera onda positiva reflejada regresa antes de que se forme la última onda negativa. (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, n.d.)

Las ecuaciones que rigen los movimientos transitorios en conducciones a presión son las ecuaciones de Saint Venant, posteriormente Allievi introdujo algunas simplificaciones, acotando el problema a las aplicaciones ingenieriles (grandes oscilaciones de velocidad y, consecuentemente, de presión). (Pérez & Guitelman, 2005).

Se puede estimar manualmente un fenómeno transitorio en una tubería, como un golpe de ariete, mediante la ecuación de Joukowsky, que estima la sobrepresión generada por una variación brusca de velocidad del flujo:

$$\Delta P = \rho \cdot a \cdot \Delta V$$

Ecuación 4: Ecuación de Joukosky

Donde:

ΔP : Cambio de presión debido al transitorio (Pa o N/m²)

ρ : Densidad del agua (1000 kg/m³)

a : Velocidad de propagación de la onda de presión. (m/s)

ΔV : Cambio de velocidad del fluido (m/s)

Expresado en metros de columna de agua (mca):

$$\Delta H = \frac{a \cdot \Delta V}{g}$$

Ecuación 4: Ecuación de Joukosky

Donde:

ΔH : Cambio de presión en mca.

g : gravedad (9.81 m/s²)

2.2.2. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS EN LÍNEAS DE CONDUCCIÓN

Según, (Comisión Nacional del Agua, n.d.) un flujo es transitorio o no permanente, cuando las condiciones de flujo, presión y velocidad varían en el tiempo, además considera transitorio rápido o golpe de ariete, al flujo generado por cambios bruscos en la velocidad de la tubería, debido a maniobras rápidas, como el cierre rápido de una válvula o el paro repentino de una bomba.

El golpe de ariete se produce en una tubería forzada por el efecto de fluctuación del caudal circulante y se traduce en una variación de la presión interna en la tubería, tanto superior o inferior a la presión de trabajo, por lo tanto, es importante el estudio de este fenómeno, al que pueden estar sujetos los sistemas de conducción. (Toledo, 2009).

Según, (Pérez & Guitelman, 2005) entre las maniobras por las cuales se produce el fenómeno de golpe de ariete, están:

- Cierre y Apertura de Válvulas.
- Arranque de Bombas.
- Detención de Bombas.
- Funcionamiento inestable de bombas.
- Llenado inicial de tuberías.
- Sistemas de Protección contra Incendios.

Según, (Savic et al., 2009) la calibración de un modelo hidráulico transitorio, tiene como ventaja el uso de datos transitorios sobre los datos recopilados de mediciones de campo en condiciones de estado estacionario, además, por lo general existe gran cantidad de datos en medición. Sin embargo, este método no ha sido aceptado por muchos profesionales por razones como los problemas con la calibración de la onda de presión y el costo en la medición de campo, empleando el uso de registradores de presión de alta frecuencia.

2.2.3. GOLPE DE ARIETE Y EFECTOS EN LOS SISTEMAS DE CONDUCCIÓN

El diseño de las tuberías a presión se ajusta mejor a la forma del terreno; no obstante, esto puede generar problemas significativos con los transitorios hidráulicos. Cualquier acción, ya sea planificada o accidental, puede causar efectos no deseados como aumentos o disminuciones de presión en las tuberías. Cada operación ocasionará un transitorio que continuará hasta que se alcance un nuevo punto de equilibrio o un estado estable permanente (Ayala et al., n.d.). Dichas maniobras pueden provocar efectos indeseables en las conducciones, por exceso o déficit de presión.

Según, (Pérez & Guitelman, 2005), cuando la variación de presiones implica el impedimento de escurrir, velocidad final nula, y las oscilaciones de presión son grande, al fenómeno se lo define como golpe de ariete. Es un fenómeno de transformación de energía que se da cuando se produce un cambio brusco en la velocidad del agua, además esto puede ocasionar un impacto destructivo sobre los elementos de la conducción o simplemente degradar la energía en una deformación, calor y sonido. (Varas & Uribe, n.d.).

2.3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY

2.3.1. CATASTRO DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DE YANUNCAY

El sistema de agua potable Yanuncay abastece aproximadamente a 16000 usuarios, lo que corresponde alrededor de 56000 habitantes. La línea de conducción de agua potable abastece a 7 sectores: Narancay, Huizhil, San Joaquín, San Miguel de Putuzhi, Ictocruz, San Miguel del Valle y Pinchisana.

La Ilustración 2 e **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representan el catastro de la cobertura del Sistema de Agua Potable de Yanuncay y sus zonas de abastecimiento.



*Ilustración 2 Catastro del Sistema de Agua Potable Yanuncay en el software HAMMER, según el tipo de material.
Fuente: Etapa EP*

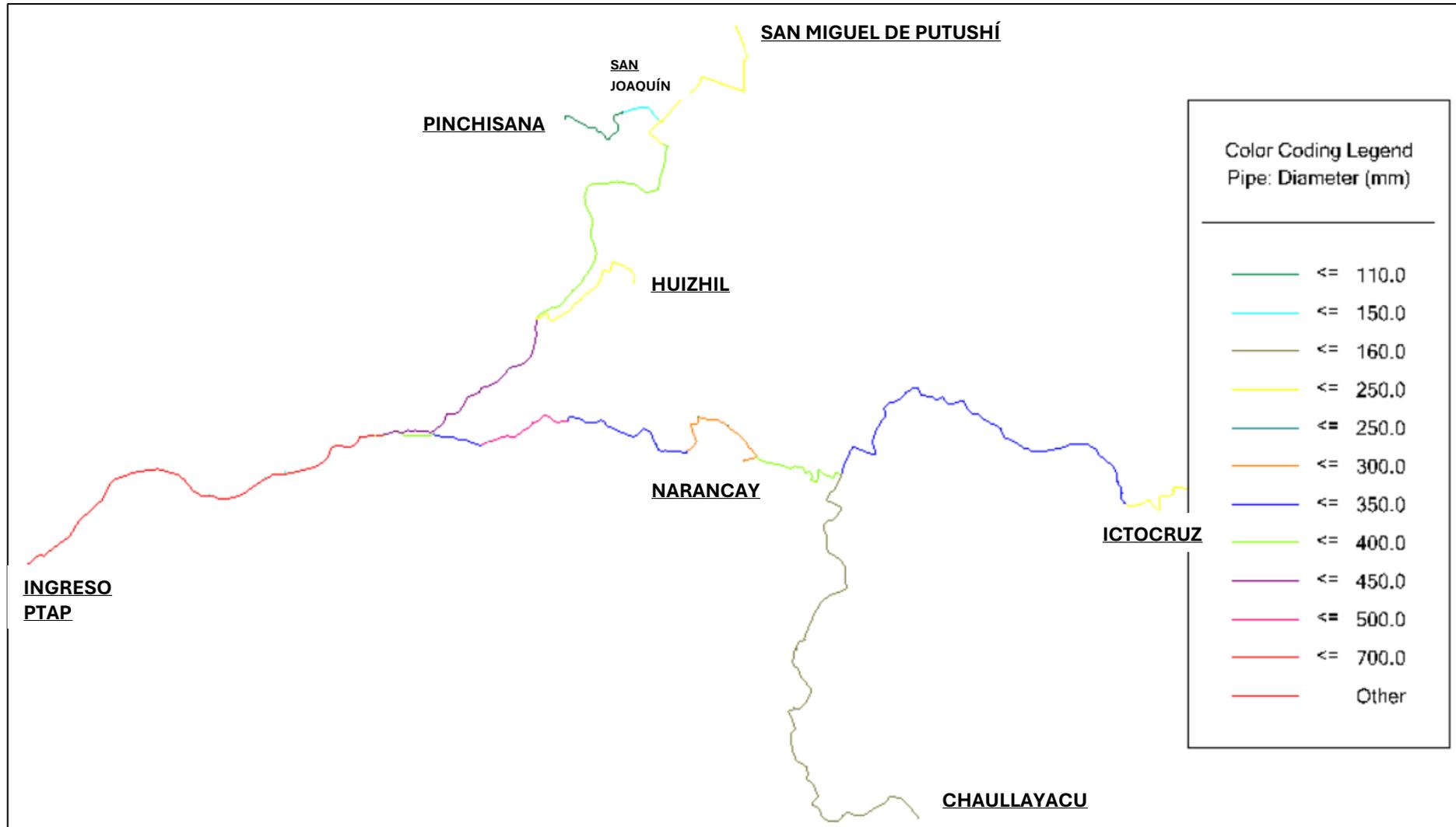


Ilustración 3 Catastro del Sistema de Agua Potable Yanuncay en el software HAMMER, según el tipo de material. Fuente: Etapa EP

2.3.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA.

2.3.2.1. Curvas de consumo de tanques de reserva

Entre la información hidráulica obtenida se plantea las curvas de consumo de los tanques del sistema de conducción Yanuncay.

El sistema se divide en sectores rurales y urbanos.

- Rurales: Huizhil, Pinchisana, Chaullayacu, e Ictrocruz.
- Urbanos: Naranca, San Joaquín y San Miguel de Putushi.

URBANO		RURAL	
Horas	q / qmed	Horas	q / qmed
00h00-01h00	0.60	00h00-01h00	0.36
01h00-02h00	0.56	01h00-02h00	0.43
02h00-03h00	0.55	02h00-03h00	0.32
03h00-04h00	0.55	03h00-04h00	0.38
04h00-05h00	0.55	04h00-05h00	0.53
05h00-06h00	0.65	05h00-06h00	0.56
06h00-07h00	1.02	06h00-07h00	1.13
07h00-08h00	1.22	07h00-08h00	1.16
08h00-09h00	1.31	08h00-09h00	1.57
09h00-10h00	1.36	09h00-10h00	1.18
10h00-11h00	1.37	10h00-11h00	1.26
11h00-12h00	1.32	11h00-12h00	1.26
12h00-13h00	1.26	12h00-13h00	1.71
13h00-14h00	1.28	13h00-14h00	1.30
14h00-15h00	1.31	14h00-15h00	1.52
15h00-16h00	1.22	15h00-16h00	1.21
16h00-17h00	1.18	16h00-17h00	1.32
17h00-18h00	1.14	17h00-18h00	1.11
18h00-19h00	1.10	18h00-19h00	1.50
19h00-20h00	1.04	19h00-20h00	1.06
20h00-21h00	0.98	20h00-21h00	0.89
21h00-22h00	0.91	21h00-22h00	0.96
22h00-23h00	0.82	22h00-23h00	0.68
23h00-00h00	0.69	23h00-00h00	0.58

Tabla 3 Datos de curva de consumo para sectores urbanos. Fuente: ETAPA EP

Tabla 4 Datos de curva de consumo para sectores rurales. Fuente: ETAPA EP

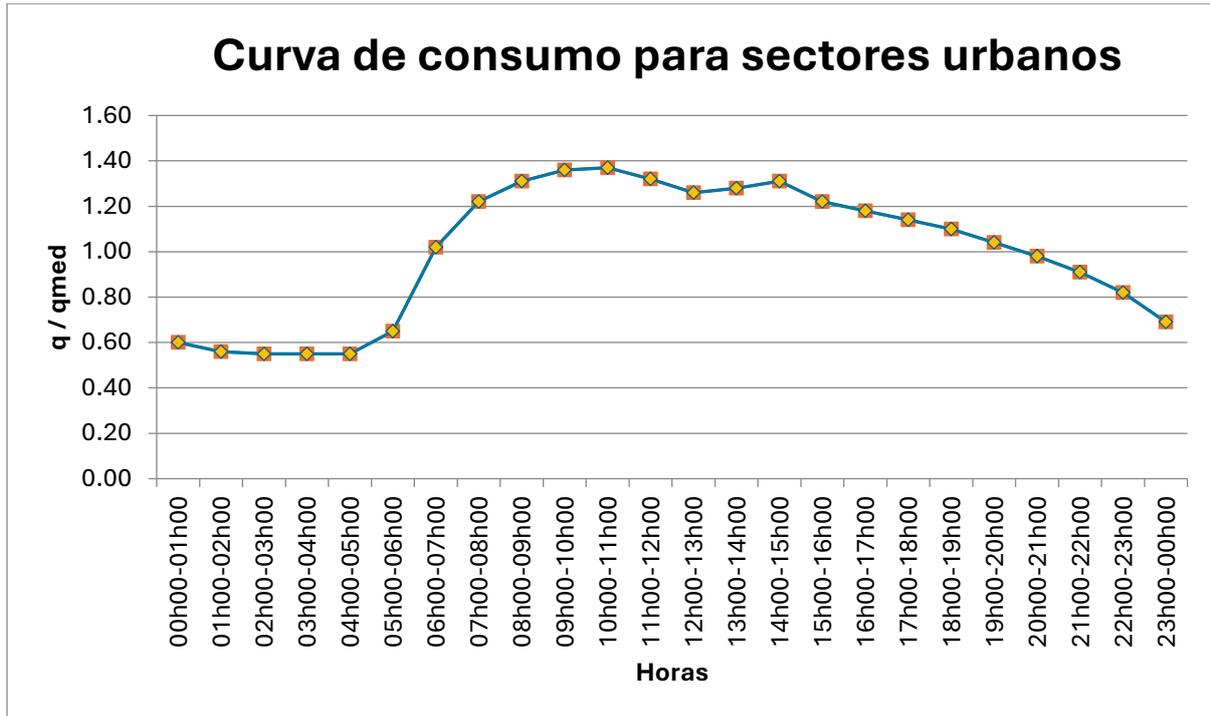


Ilustración 4 Curva de consumo, sectores urbanos. Fuente: ETAPA EP

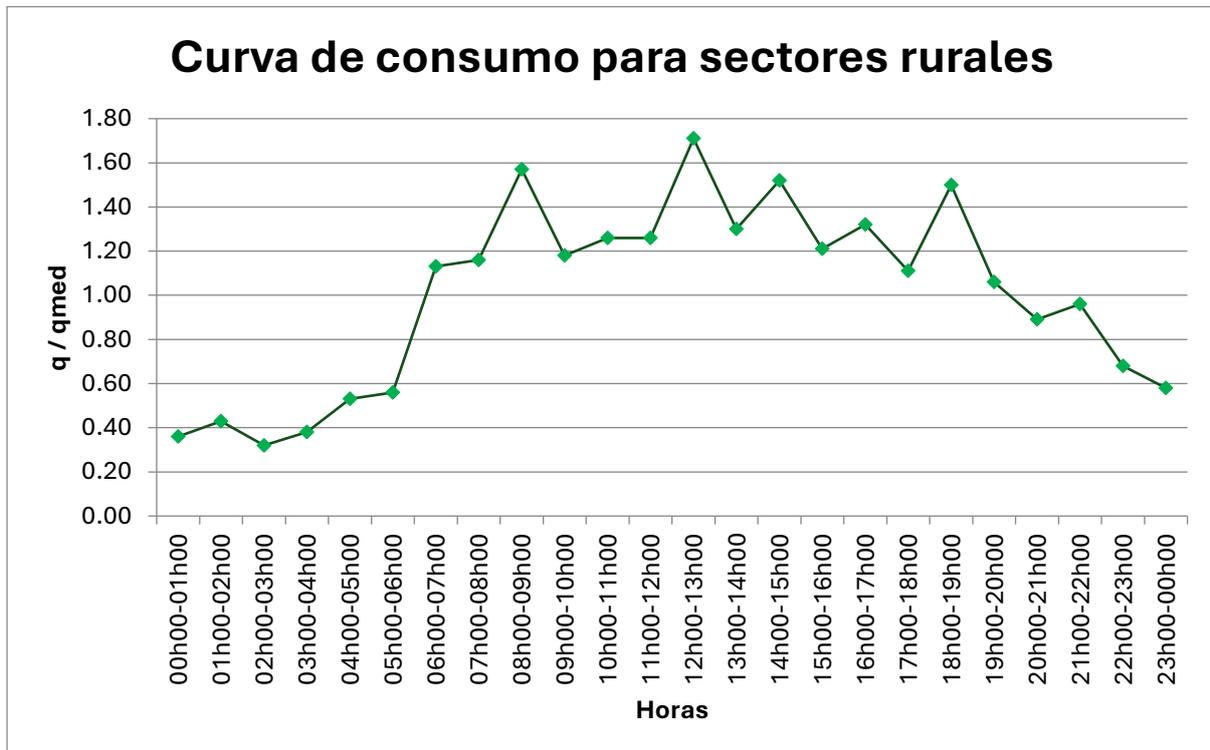


Ilustración 5 Curva de consumo, sectores rurales. Fuente: ETAPA EP

2.3.2.2. Geometría de tanques de reserva

La Tabla 5 e Ilustración 6 representan la geometría de los diferentes tanques de reserva del Sistema Yanuncay.

TANQUES DE RESERVA	Volumen Reserva m3	Altura (h) (m)	Diámetro equivalente (m)
PTAP Yanuncay	5000	4.00	39.89
Huizhil	4500	3.50	40.46
Narancay	4500	3.50	40.46
San Joaquin Alto	1500	3.00	25.23
San Miguel de Putuzhi	3000	3.00	35.68
Pinchizana	500	2.80	15.08
Chaulayacu	1000	3.00	20.60
Ictocruz	1000	3.00	20.60

Tabla 5 Geometría de los tanques de reserva Fuente: ETAPA EP.

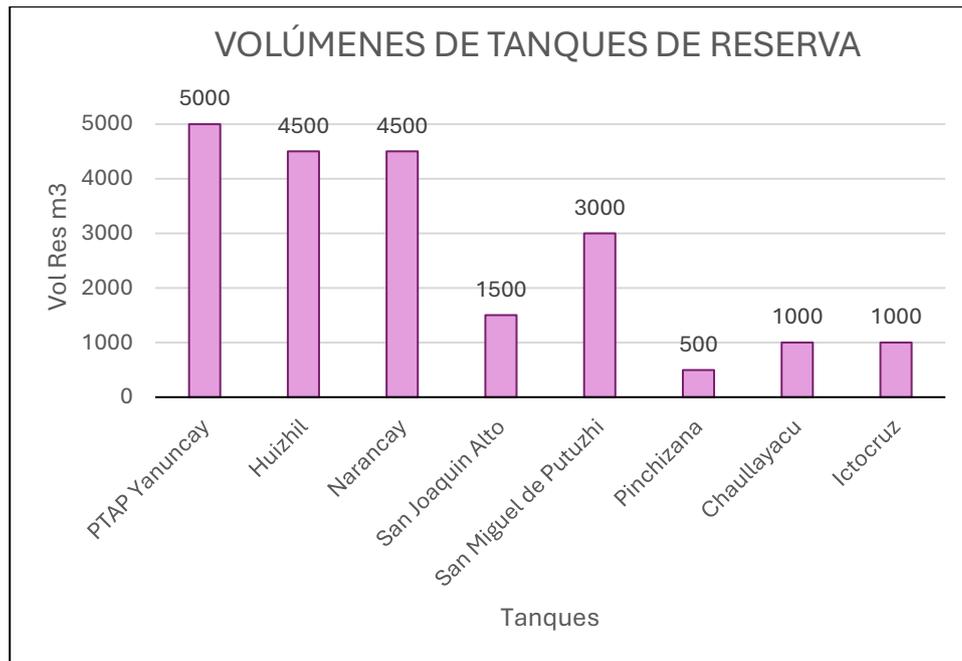


Ilustración 6 Volúmenes de tanques de reserva. Fuente: ETAPA EP

2.4. PARÁMETROS PARA EL PERIODO DE ANÁLISIS.

2.4.1. PERIODO DE ANÁLISIS

Es importante mencionar que los periodos de diseño están vinculados con los aspectos económicos y la vida útil de la infraestructura. Los periodos de diseño muy grandes pueden implicar sobredimensionamiento y, por tanto, costos de inversión y operación pueden ser exagerados. (Comisión Nacional del Agua, n.d.)

Según la Comisión Nacional del Agua de México, se recomienda, que las obras de captación y conducciones, tengan un periodo de diseño entre 20 y 30 años de operación, mientras que, para elementos ya construidos, se sugiere una vida útil de 30 a 40 años. Para el estudio del modelo se plantea un periodo de análisis de 25 años. Es decir, se realiza el modelo con proyección al año 2050.

Por lo tanto, se realiza el estudio de fenómenos transitorios en el modelo con datos presentes (año 2024) obtenidos de la Empresa ETAPA EP y con proyección al año 2050.

2.4.2. DOTACIÓN (D)

La dotación se refiere al caudal de agua potable consumido diariamente, en promedio, por cada habitante (Secretaría del Agua, n.d.). Incluye los consumos doméstico, comercial, industrial y público.

Según el Código Urbano de la Construcción de parte IX Obras Sanitarias (Secretaría del Agua, n.d.), la producción de agua para satisfacer las necesidades de la población y otros requerimientos, debe establecerse según las condiciones particulares de cada población.

En los estudios definitivos de los Planes Maestros – II Etapa, se establecieron las dotaciones per cápita para los distintos sectores urbanísticos del cantón Cuenca:

Zona de servicio	Dotación Neta (l/hab/día)	Pérdidas (%)	Dotación Bruta (l/hab/día)
Rural	112.50	25	150
Centro Parroquial	150	25	200
Urbano Consolidad y Zonas Especiales	247.5	25	330

Tabla 6 Dotación para sectores de Cuenca. Estudios definitivos de Planes Maestros II Etapa.

Asimismo, según una consultoría la empresa ETAPA EP se establecen las siguientes dotaciones para la línea de conducción de agua potable del Sistema Yanuncay.

SISTEMA YANUNCAY	Dot Res	Dot Com	Dot Ind	Dot Esp	Dotacion
	(l/hab/día)				
Narancay Alto	133,85	9,12	3,14	4,17	150,28
Huizhil	134,84	7,39		1,26	143,49
San Miguel De Putuzhi	120,26	9,37	0,76	1,12	131,51
San Joaquín Bajo	136,87	10,38	0,3	2,03	149,58
San Joaquín Alto	211,11	12,02		13,34	236,47
Pinchisana	184,68	5,67			190,35
Icto Cruz	150,31	34,87		4,31	189,49

Tabla 7 Análisis de dotaciones para las zonas abastecidas por el Sistema de Agua Potable Yanuncay. Fuente: Consultoría ETAPA EP

Donde:

Dot Res: Dotación residencial

Dot Com: Dotación comercial

Dot Ind: Dotación Industrial

Dot Esp: Dotación Especial

La dotación final es la suma de todas las anteriores (categorías de consumo en ETAPA EP).

En la misma consultoría realizada por ETAPA EP se obtiene la siguiente información de dotaciones anuales desde el año 2020 al año 2024.

	DOTACIONES					
	2020	2021	2022	2023	2024	Dotación Promedio
	(l/hab/día)					
Narancay	169	169	187	189	130	169
Huizhil	140	144	133	136	141	139
San Miguel de Putuzhi	153	147	139	152	123	143
San Joaquín	196	192	444	171	187	238
Pinchisana			130	154	170	151
Ictocruz		171	185	197	144	174
San Miguel del Valle	113	131	110	134	105	119

Tabla 8 Dotaciones anuales de los sectores abastecidos por el Sistema de Agua Potable Yanuncay. Fuente: Etapa EP.

Posterior a este análisis de dotaciones, junto con lo establecido en los planes maestros de ETAPA EP, se establece una dotación para la elaboración del modelo.

Se considera la dotación bruta para las zonas rurales abastecidas por el sistema Yanuncay de 150 lt/hab/día y para las zonas semi-urbanas se considera una dotación bruta de 180 lt/hab/día. Las dotaciones para las zonas abastecidas por el Sistema de Agua Potable Yanuncay se resumen en la siguiente tabla:

SECTORES DE DISTRIBUCION YANUNCAY	DOTACION BRUTA
l/hab/día	
NARANCAY ALTO	180
HUIZHIL	150
SAN MIGUEL DE PUTUSHI	150
SAN JOAQUIN	150
SAN JOAQUIN BAJO	150
SAN JOAQUIN ALTO	150
PINCHISANA	150
ICTO CRUZ	150
CHAULLAYACU	150

Tabla 9: Dotación final considerada para el análisis del modelo unidimensional del Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay. Fuente: Etapa EP

2.4.3. CAUDALES DE DISEÑO

2.4.3.1. POBLACIÓN DE DISEÑO (P)

Según la Secretaría Nacional del Agua, para el cálculo de la población servida, las proyecciones de crecimiento poblacional deben realizarse considerando mínimo tres métodos.

Según información entregada por ETAPA EP, se tienen los siguientes datos de población, proyectados en un intervalo de 5 años. En este estudio nos interesa la población para análisis en el año 2024 y proyectado al año 2050.

POBLACION SERVIDA						
(Hab)						
	2024	2030	2035	2040	2045	2050
SECTORES DE DISTRIBUCION	Pob 2024 (hab)	Pob 2030 (hab)	Pob 2035 (hab)	Pob 2040 (hab)	Pob 2045 (hab)	Pob 2050 (hab)
SISTEMA YANUNCAY						
Narancay Alto	17505	19989	22543	25141	27724	30230
Huizhil	12909	15140	17400	19676	21931	24119
San Miguel De Putuzhi	15075	16415	17681	18866	19927	20833
San Joaquin	17514	20577	23701	26876	30026	33077
San Joaquin Bajo	16636	19589	22606	25682	28743	31722
San Joaquin Alto	878	988	1095	1194	1283	1355
Pinchisana	269	302	324	335	335	321
lcto Cruz	1368	1628	1869	2086	2269	2408
Chaulayacu	451	502	544	586	613	635

Tabla 10: Análisis poblacional para los sectores abastecidos por el Sistema de Agua Potable Yanuncay. Fuente: ETAPA EP.

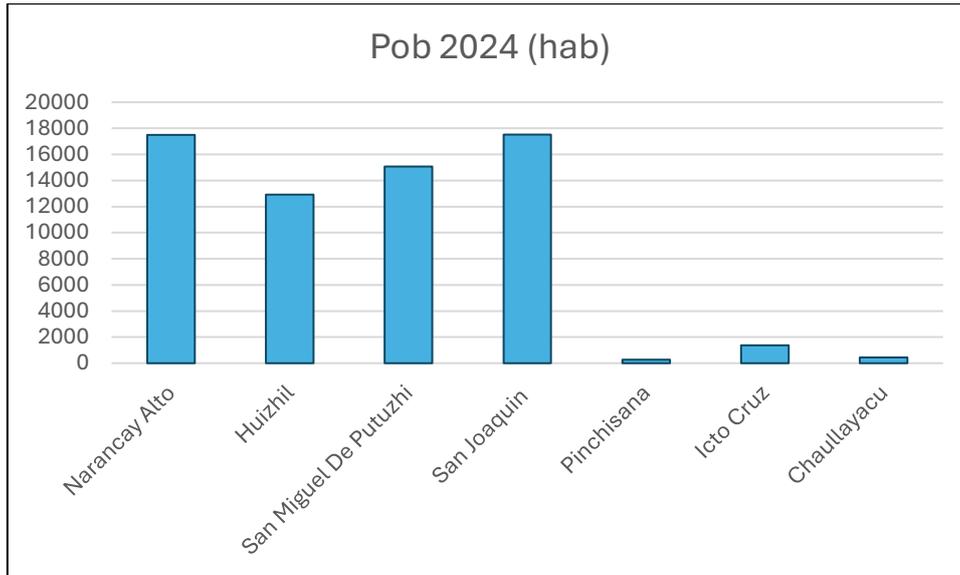


Ilustración 7: Población actual (2024) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

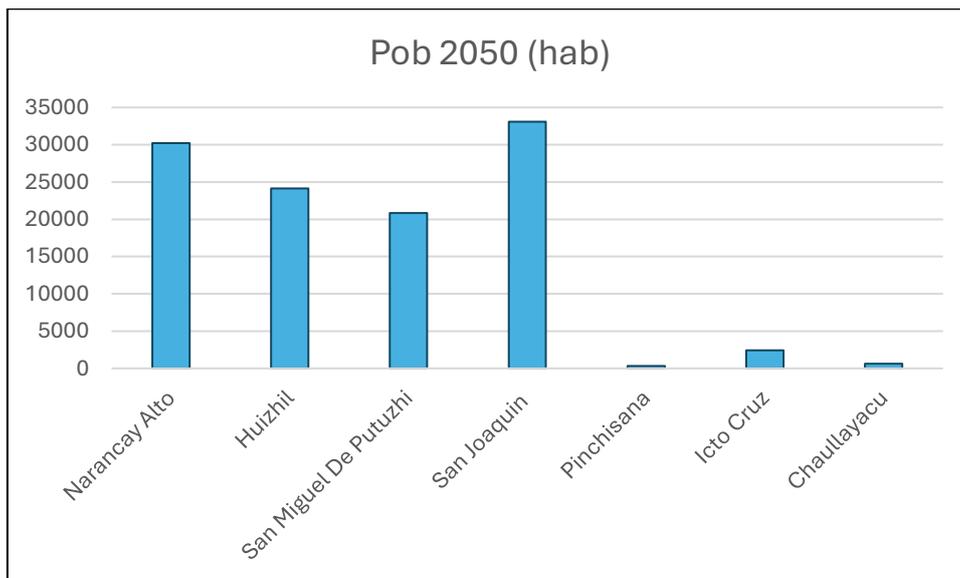


Ilustración 8: Población proyectada (2050) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

2.4.3.2. CAUDAL MEDIO DIARIO (Qm)

El caudal medio diario anual, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_m = \frac{D}{(1 - \%p\u00e9rdidas)} * \frac{P}{86400}$$

Ecuación 5: Caudal Medio Diario.

Donde:

D: dotación tomada de la Tabla 9

P: Número de habitantes tomado de la Tabla 10

% pérdidas: porcentaje de fugas en el sistema.

Pérdidas	35%	34%	33%	32%	31%	30%
Caudal medio Qm						
l/s						
	2024	2030	2035	2040	2045	2050
SECTORES DE DISTRIBUCION	Qm_2024	Qm_2030	Qm_2035	Qm_2040	Qm_2045	Qm_2050
SISTEMA YANUNCAY	182,00	205,31	228,10	250,23	271,13	290,26
NARANCAY ALTO	56,11	63,10	70,10	77,03	83,71	89,97
HUIZHIL	34,48	39,83	45,09	50,23	55,18	59,82
SAN MIGUEL DE PUTUSHI	40,26	43,18	45,82	48,17	50,14	51,67
SAN JOAQUIN	46,78	54,13	61,41	68,62	75,55	82,04
SAN JOAQUIN BAJO	44,43	51,53	58,58	65,57	72,32	78,68
SAN JOAQUIN ALTO	2,35	2,60	2,84	3,05	3,23	3,36
PINCHISANA	0,72	0,79	0,84	0,86	0,84	0,80
ICTO CRUZ	3,65	4,28	4,84	5,33	5,71	5,97
CHAULLAYACU	1,20	1,32	1,41	1,50	1,54	1,57

Tabla 11: Caudal medio diario. Obtenido mediante la ecuación 5. Para los datos y proyecciones de los años 2024, 2030, 2035, 2040, 2045 y 2050. Fuente: Etapa EP

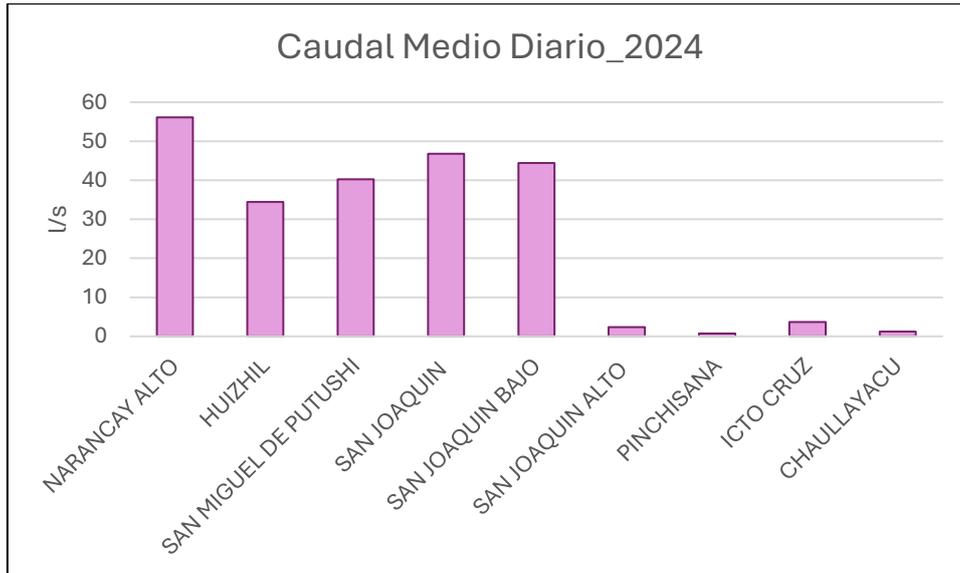


Ilustración 9: Caudal Medio Diario (2024) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

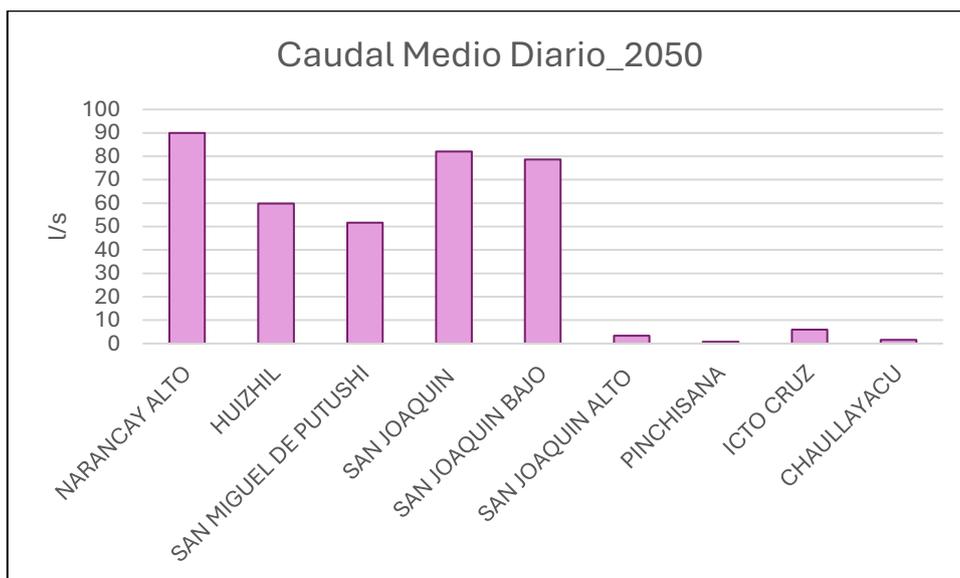


Ilustración 10: Caudal Medio Diario proyectado (2050) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

2.4.3.3. CAUDAL MÁXIMO DIARIO (QMD)

El caudal máximo diario se calcula con la ecuación:

$$QMD = KMD \times Qmd$$

Ecuación 6: Caudal Máximo Diario.

Donde:

QMD: Caudal máximo diario (l/s)

KMD: Factor de mayoración máximo diario. Se considera un factor KMD= 1.30

	KMD=	1,30				
Caudal Máximo Diario (QMD)						
l/s						
	2024	2030	2035	2040	2045	2050
SECTORES DE DISTRIBUCION	Qm_2024	Qm_2030	Qm_2035	Qm_2040	Qm_2045	Qm_2050
SISTEMA YANUNCAY	236,60	266,90	296,52	325,29	352,47	377,34
NARANCA Y ALTO	72,94	82,03	91,13	100,13	108,82	116,96
HUIZHIL	44,82	51,77	58,61	65,31	71,73	77,76
SAN MIGUEL DE PUTUSHI	52,34	56,13	59,56	62,62	65,18	67,17
SAN JOAQUIN	60,81	70,37	79,84	89,20	98,21	106,65
SAN JOAQUIN BAJO	57,76	66,99	76,15	85,24	94,02	102,28
SAN JOAQUIN ALTO	3,05	3,38	3,69	3,96	4,20	4,37
PINCHISANA	0,93	1,03	1,09	1,11	1,10	1,03
ICTO CRUZ	4,75	5,57	6,30	6,92	7,42	7,76
CHAULLAYACU	1,57	1,72	1,83	1,94	2,01	2,05

Tabla 12: Caudal máximo diario. Obtenido mediante la ecuación 6. Para los datos y proyecciones de los años 2024, 2030, 2035, 2040, 2045 y 2050. Fuente: Etapa EP.

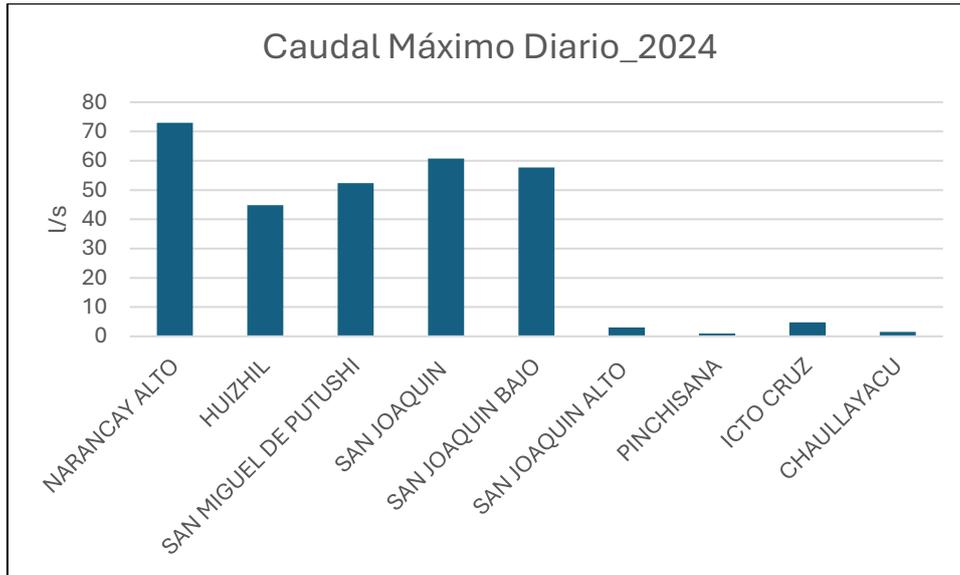


Ilustración 11: Caudal Máximo Diario (2024) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

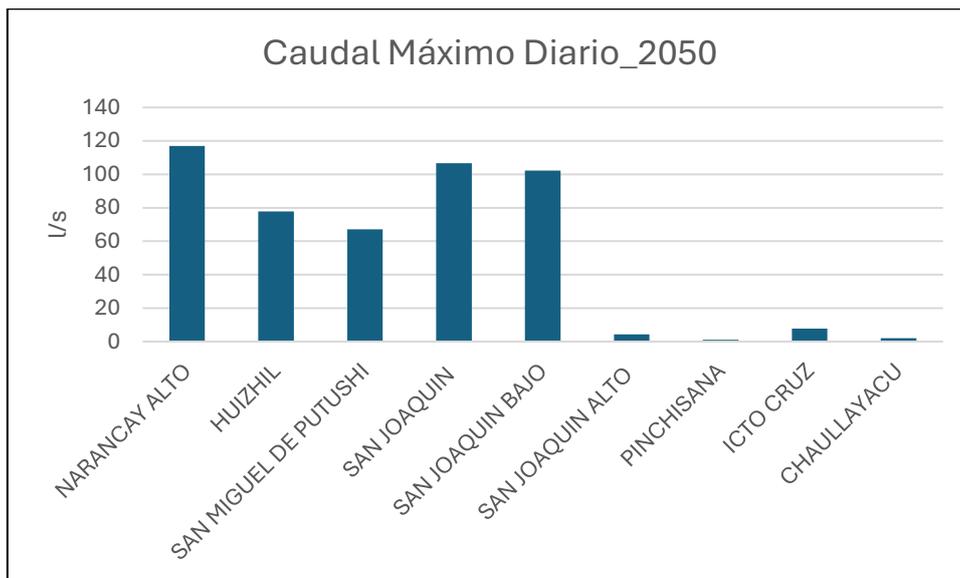


Ilustración 12: Caudal Máximo Diario proyectado (2050) de zonas abastecidas por el Sistema de Conducción de Agua Potable Yanuncay.

2.5. MODELACIÓN NUMÉRICA

Según, (Nelson et al., 2018), la modelación matemática de los sistemas hidráulicos es una herramienta fiable para la toma de decisiones, ya que permite simular su comportamiento y calcular variables como la velocidad del flujo, las pérdidas unitarias y las presiones a lo largo de la conducción en distintos escenarios. Esto contribuye a optimizar el diseño y mejorar la eficiencia en el suministro de agua potable.

En los modelos utilizados, las ecuaciones hidráulicas son bien conocidas y describen los principales parámetros del sistema, como el caudal, la velocidad y la presión del flujo en toda la red de abastecimiento o en los principales nudos de consumo. El desempeño de estos parámetros se presenta mediante gráficos tabulados con fines de evaluación.

El éxito o fracaso del modelo en términos de eficiencia depende directamente de una adecuada estimación y de un análisis implícito de sensibilidad de los parámetros de entrada empleados en la generación del modelo. (Nelson et al., 2018)

2.5.1. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO EN SOFTWARE

HAMMER

Bentley HAMMER es una herramienta eficaz para modelar transitorios hidráulicos en redes de tuberías. Permite analizar el comportamiento de las tuberías a través de un editor gráfico y llevar a cabo estudios de transitorios hidráulicos, con y sin dispositivos de protección. (Soria & Peña, 2017)

El sistema de agua potable Yanuncay, consiste en varias líneas de conducción, las mismas que son exportadas de CIVIL 3D, hacia el software HAMMER, con sus propiedades geométricas, y dimensiones de los tanques de reserva.

Según el año de análisis, se inserta las propiedades hidráulicas para cada tramo de conducción.

El proceso de la modelación hidráulica con análisis de transitorios, en el software está representado en el siguiente diagrama de flujo, de manera que se obtenga una simulación exitosa.

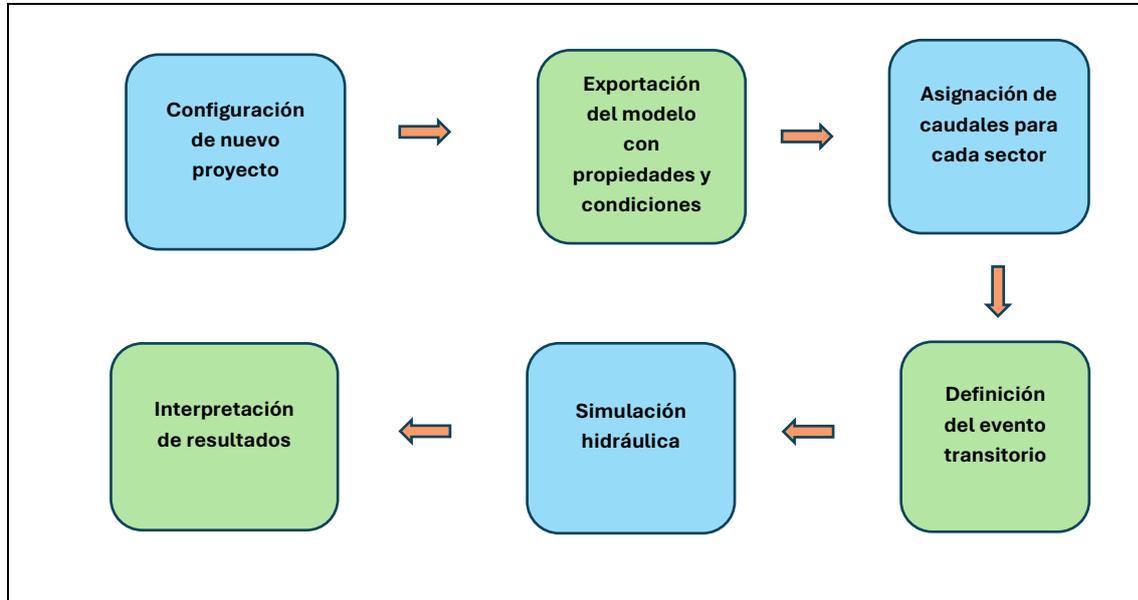


Ilustración 13 : Diagrama de flujo del proceso de modelación hidráulica. Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 3 (Catastro del Sistema de Agua Potable Yanuncay en el software HAMMER), representa el modelo hidráulico en el software.

2.5.2. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS DEL SISTEMA DE CONDUCCIONES DEL SISTEMA YANUNCAY

Se realiza el análisis de fenómenos transitorios causados por dos escenarios: cierre de válvula y rotura de tubería en 3 tramos del sistema de conducciones, considerando condiciones hidráulicas actuales del sistema, y condiciones del sistema proyectado al año 2050.

La siguiente ilustración representa un esquema de los análisis a realizarse en los diferentes tramos de conducción, en los dos escenarios mencionados.

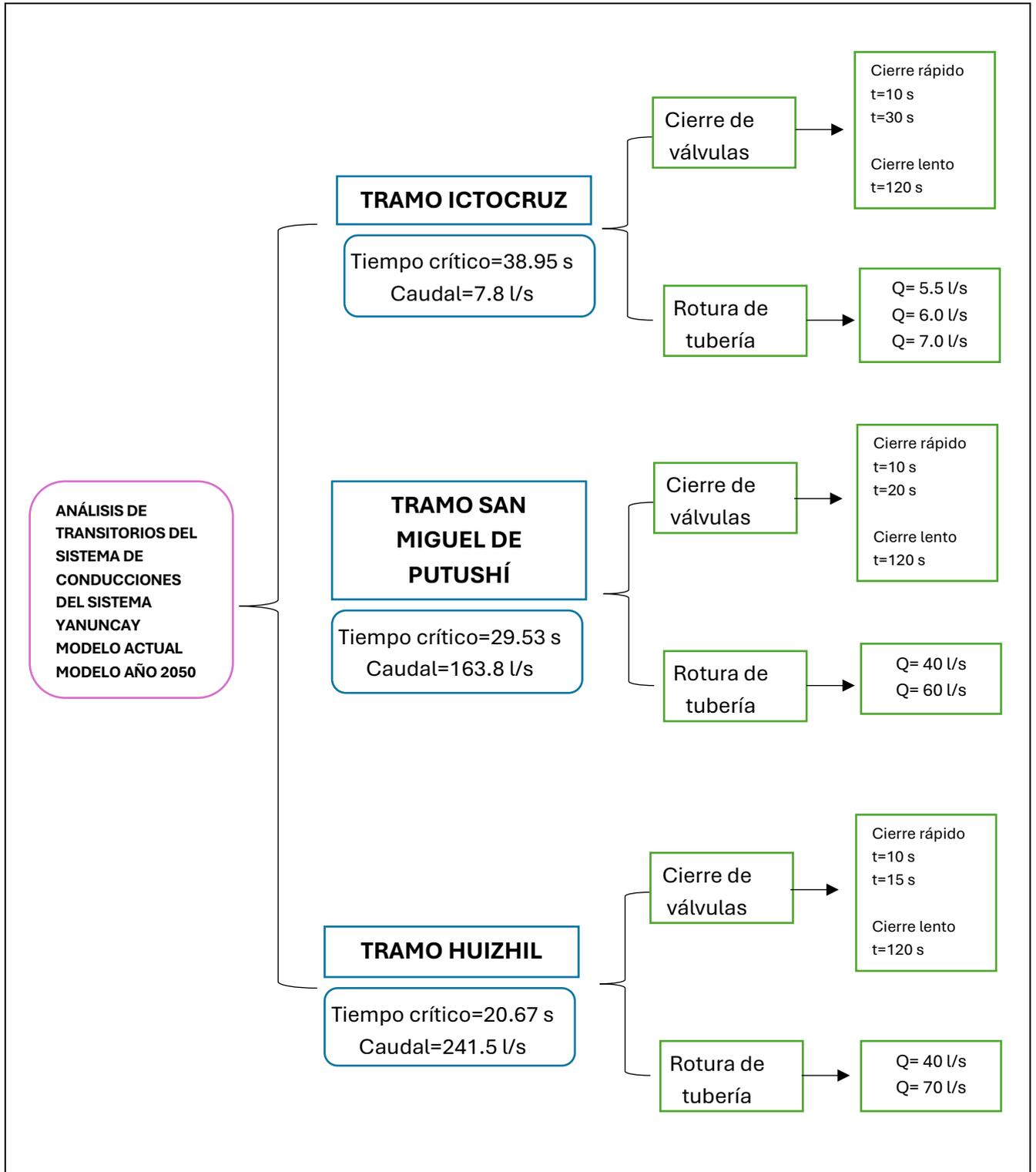


Ilustración 14 : Esquema de las diferentes condiciones a analizar. Fuente: Elaboración propia

2.5.2.1. PRIMER ESCENARIO: CIERRE DE VÁLVULAS

2.5.2.1.1. TRAMO ICTOCRUZ

Se realiza un análisis de la línea de conducción que se dirige hacia el tanque ICTOCRUZ, ya que actualmente esta línea presenta problemas de roturas frecuentemente.

Se obtiene el tiempo crítico del tramo comprendido entre la planta de tratamiento de agua potable de Sustag, hasta el tanque de Ictocruz.

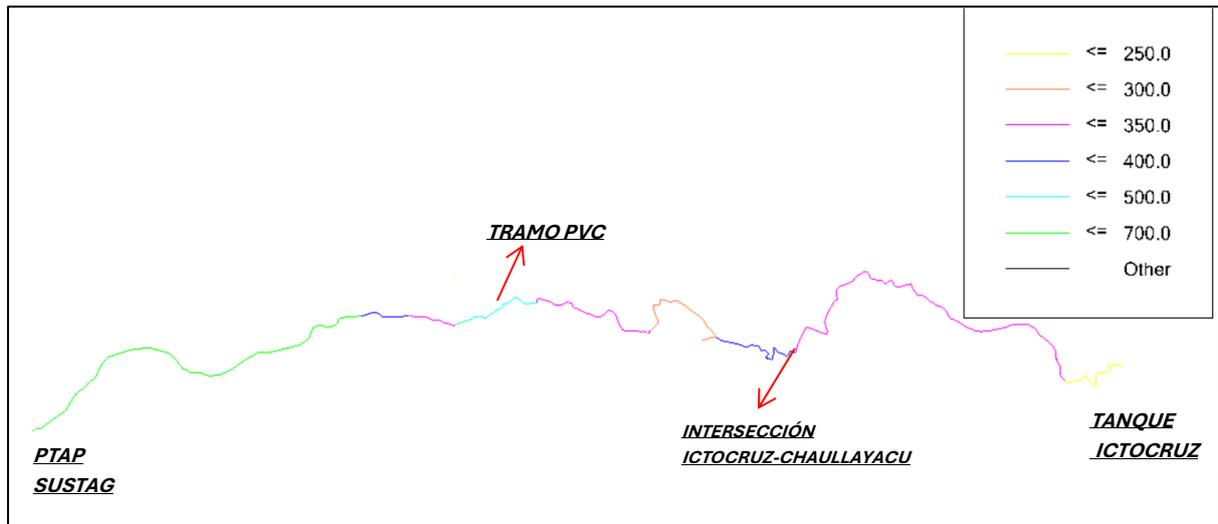


Ilustración 15: Sistema de Conducciones Yanuncay. Tramo PTAP Sustag – Tanque Ictocruz.

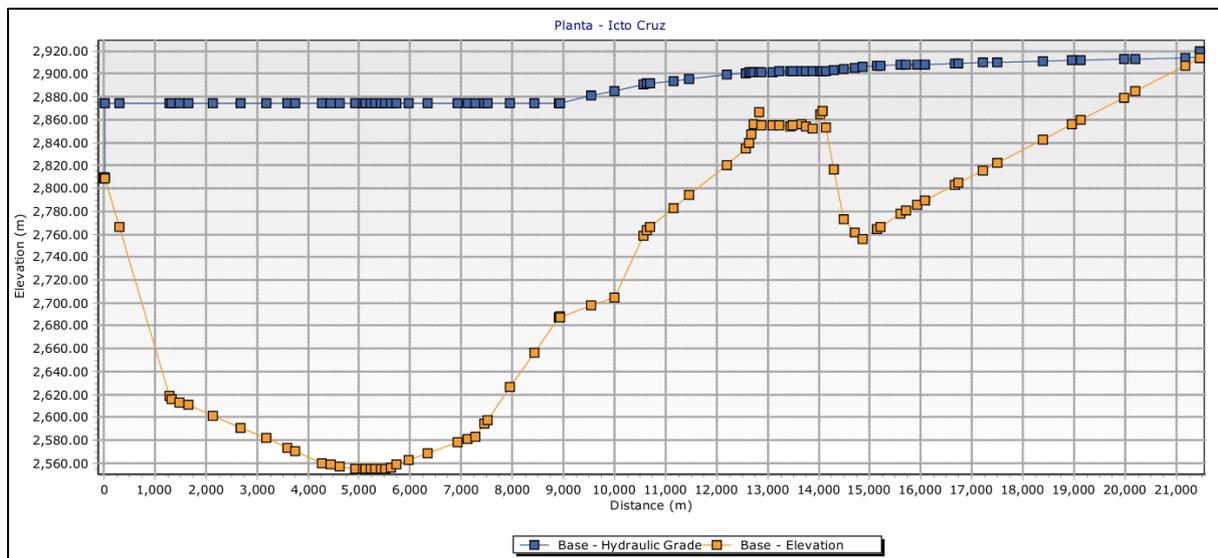


Ilustración 16: Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo PTAP Sustag – Tanque Ictocruz generado en el software HAMMER.

Realizando un análisis en la línea definida se obtiene el tiempo crítico:

Tiempo crítico Tc	38,95	Segundos
-------------------	-------	----------

Para el análisis de fenómenos transitorios se considera el tramo comprendido desde la intersección Ictocruz – Chaullayacu al tanque de Ictocruz, tal como indica la Ilustración 15.

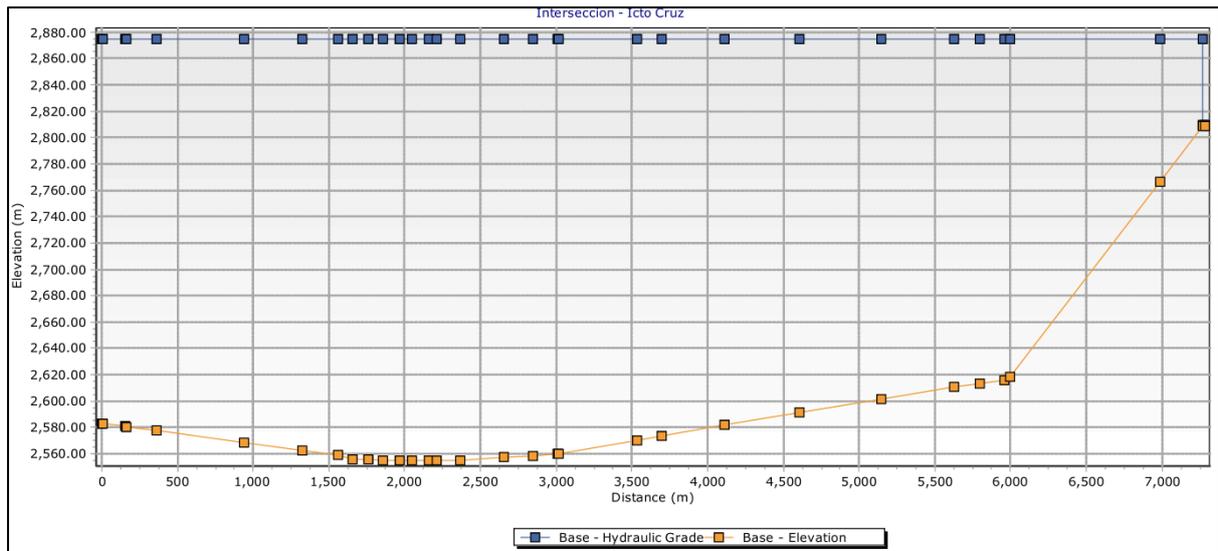


Ilustración 17 Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo Intersección Ictocruz -Chaullayacu a Tanque Ictocruz, generado en el software HAMMER.

2.5.2.1.1.1. MODELO ACTUAL 2024

a. CIERRE RÁPIDO

Para el análisis se considera dos tiempos de cierre (10 y 30 segundos), menores al tiempo crítico calculado.

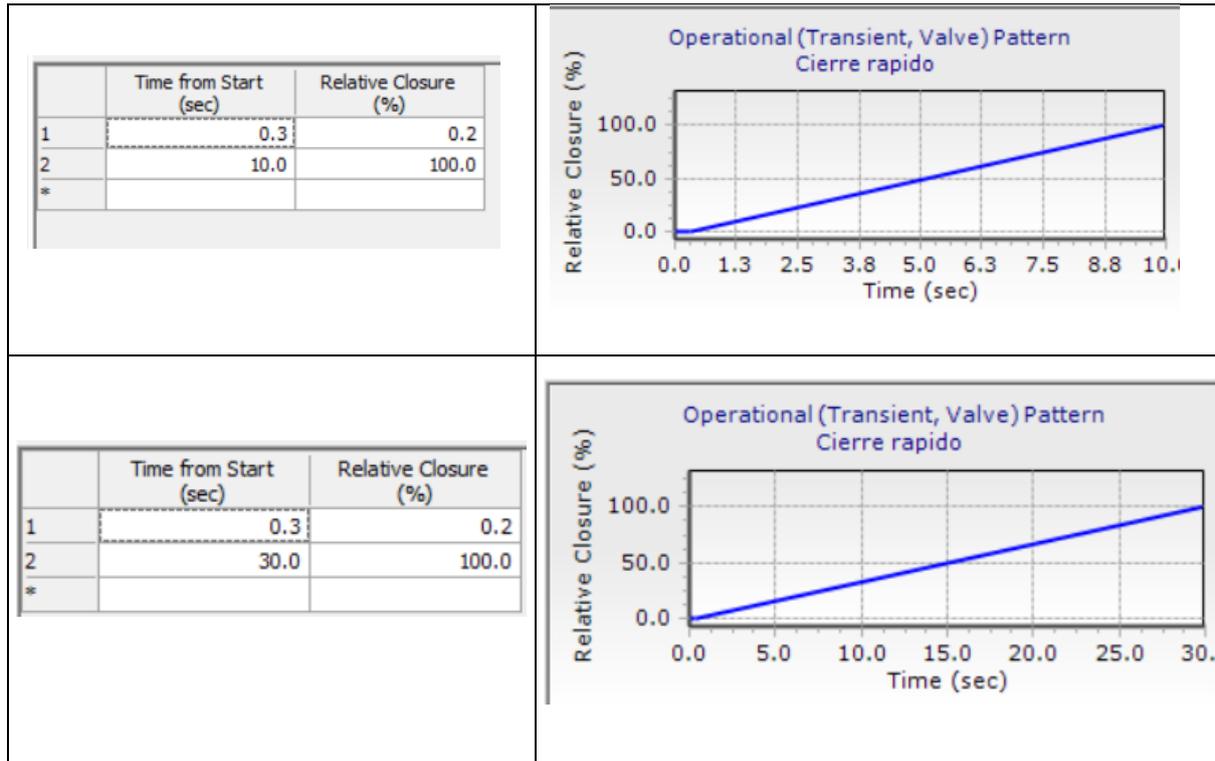


Tabla 13: Patrones de cierre rápido en válvula de control FCV del tanque de Ictocruz.

- Tiempo de cierre: $t=10$ segundos

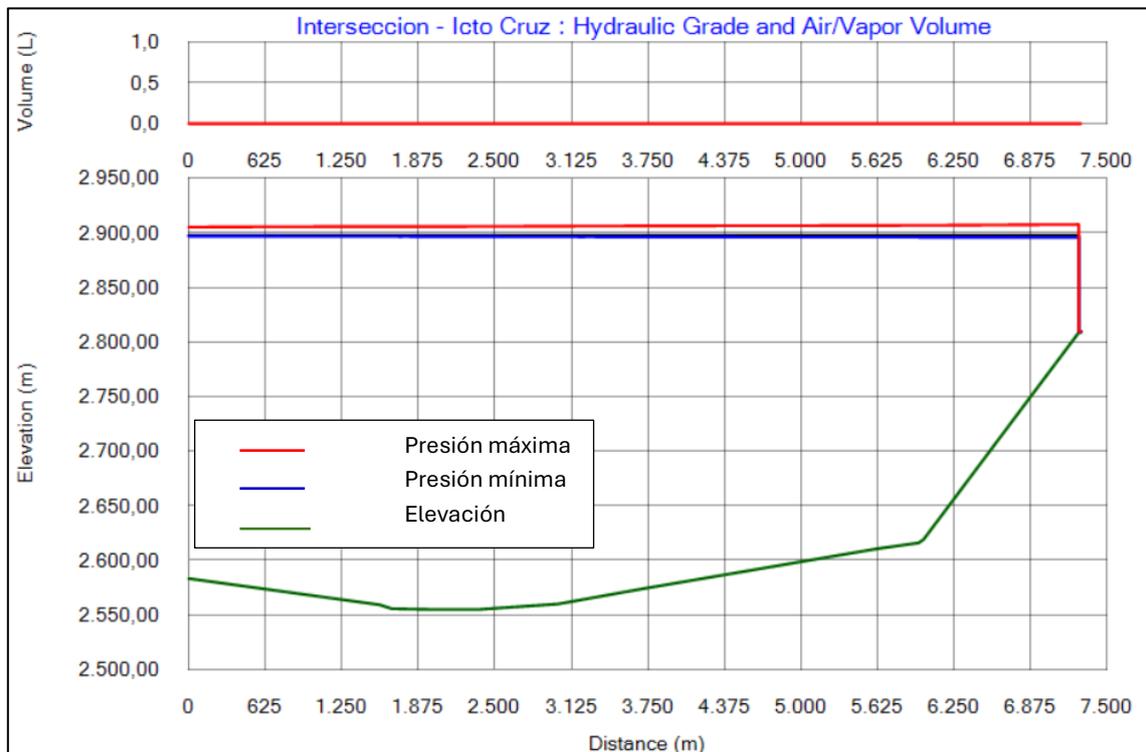


Ilustración 18: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=10s$) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 18 indica que el cierre de la válvula en un tiempo de 10 segundos genera una sobrepresión máxima de 9.97 mca. Sin embargo, dicha sobrepresión es poco significativa.

- **Tiempo de cierre: $t=30$ segundos**

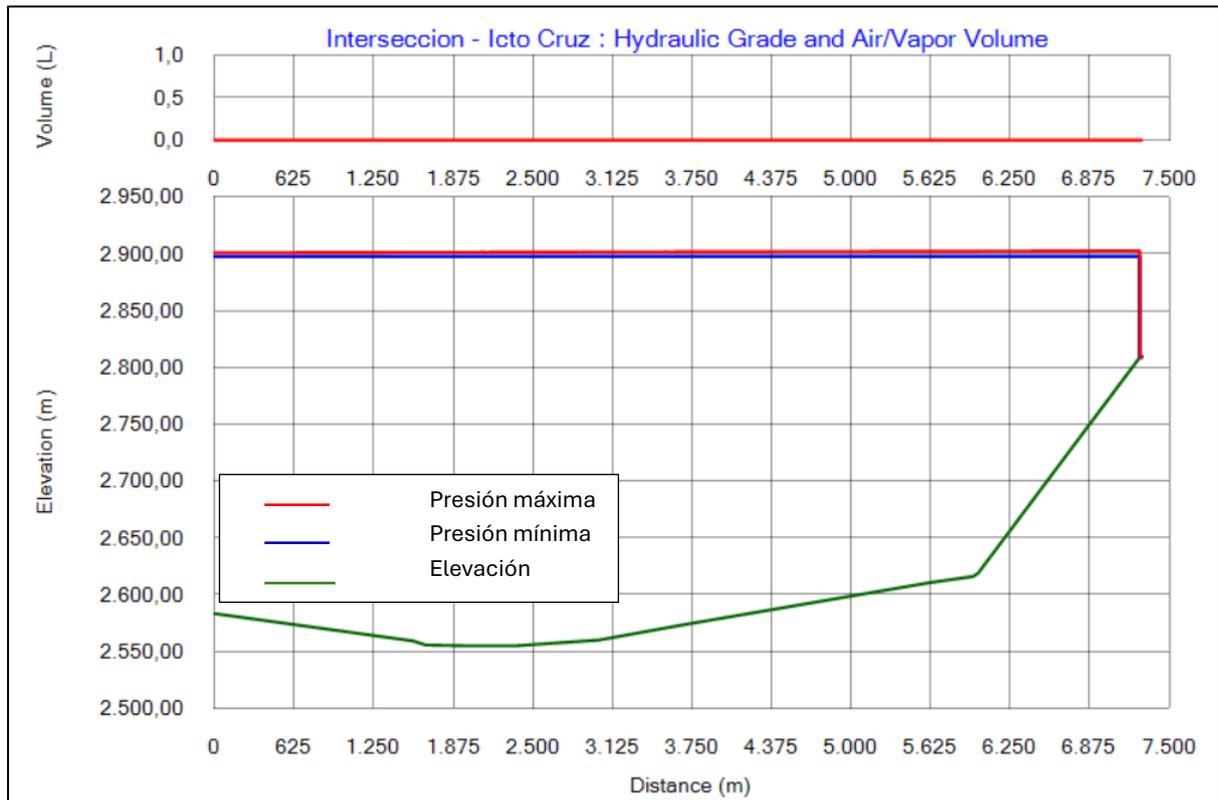


Ilustración 19 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=30s$) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz, Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 19 indica el cierre de la válvula en un tiempo de 30 segundos, al ser un tiempo superior a la modelación anterior, se genera una sobrepresión máxima (5.03 mca) inferior a la generada con un tiempo de cierre de 10 segundos. Sin embargo, al igual que el caso anterior dicha sobrepresión es poco significativa.

b. CIERRE LENTO

Para este análisis se considera un tiempo de cierre, mayor al tiempo crítico calculado.

- **Tiempo de cierre: 120 segundos**

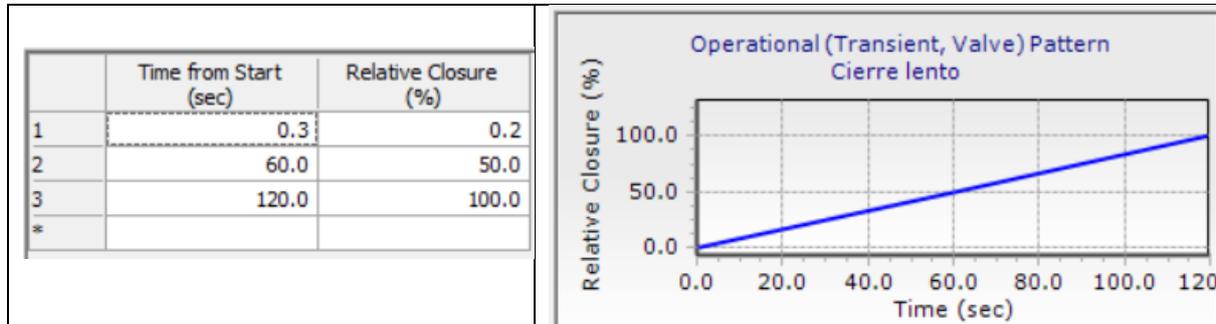


Tabla 14: Patrón de cierre lento en válvula de control FCV del tanque de Ictocruz.

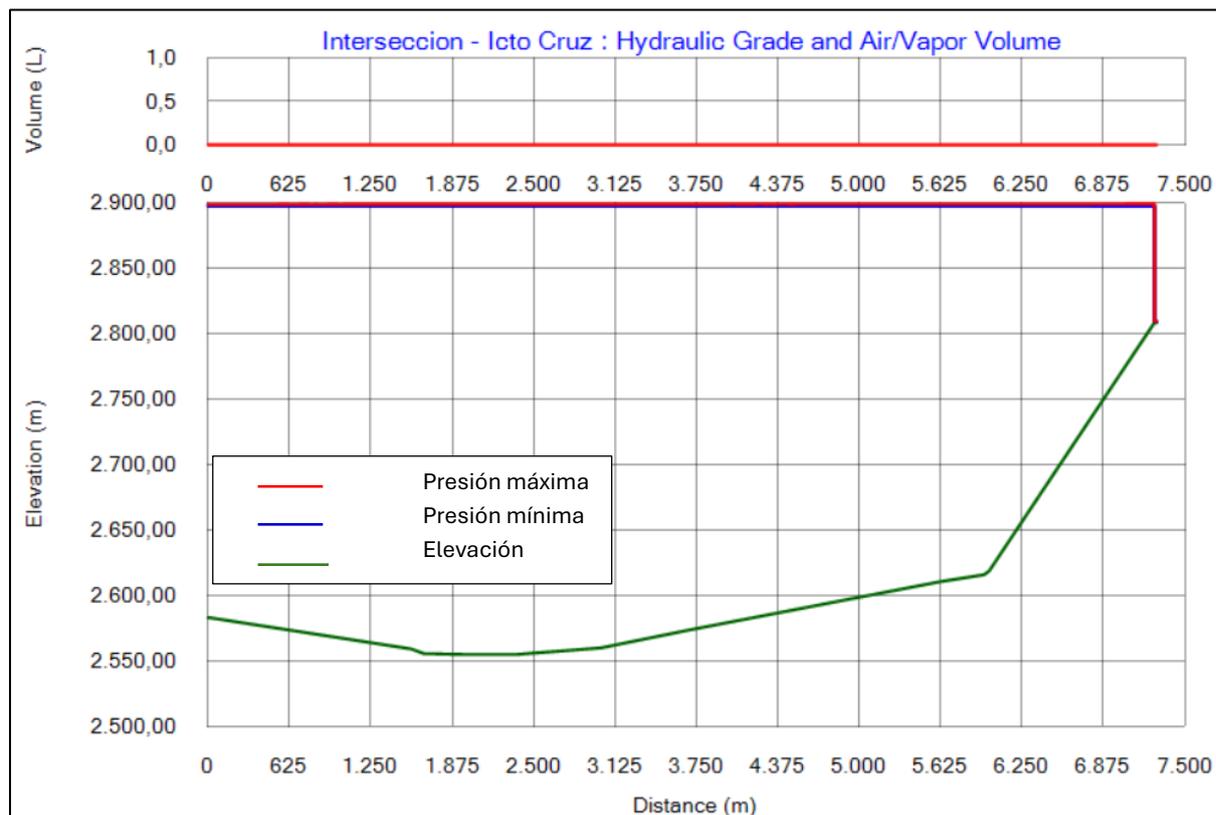


Ilustración 20 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz, Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 20 muestra que el cierre lento de la válvula en un tiempo de 120 segundos provoca una sobrepresión máxima de 1.64 mca, la cual es poco relevante y menor en comparación con las generadas por un cierre rápido.

2.5.2.1.1.2. MODELO PROYECTADO 2050

a. CIERRE RÁPIDO

- Tiempo de cierre: $t=10$ segundos

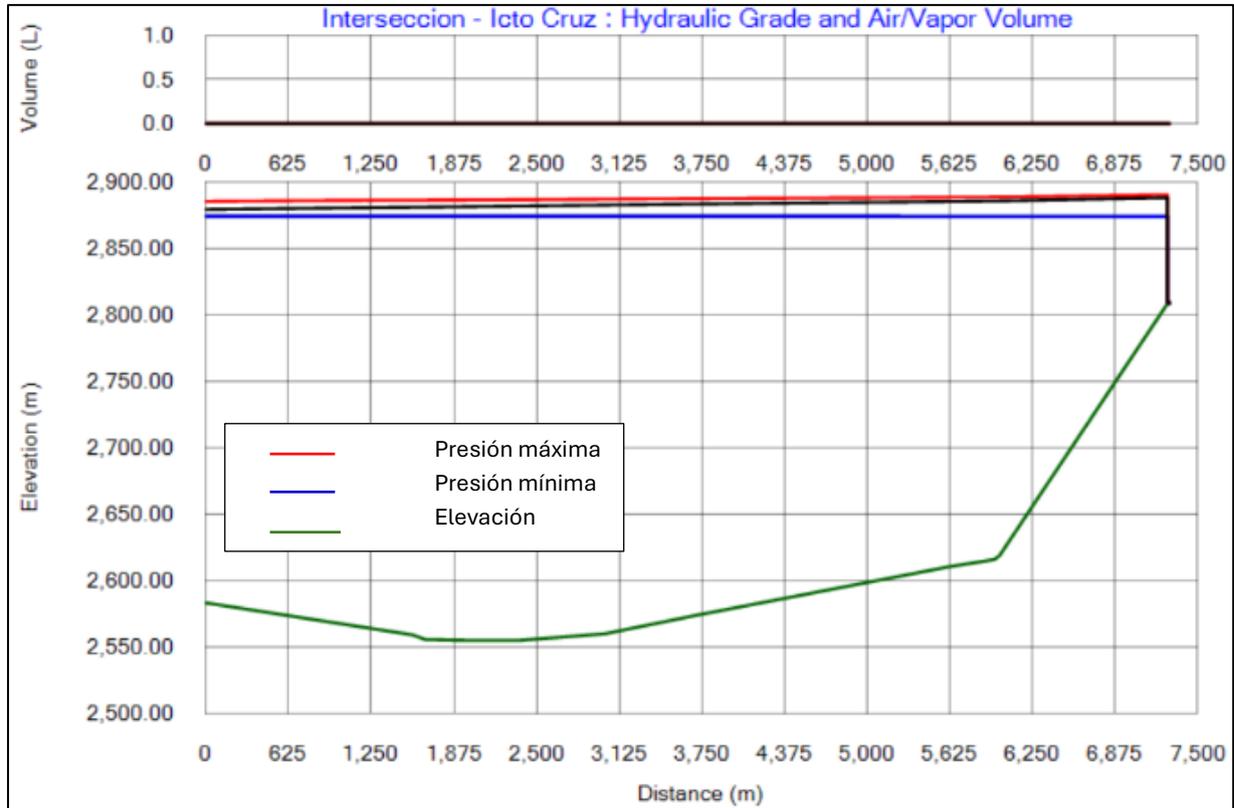


Ilustración 21: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=10$ s) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz, Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 21 indica que el cierre de la válvula en un tiempo de 10 segundos genera una sobrepresión máxima de 16.50 mca. Sin embargo, dicha sobrepresión es poco significativa, en comparación a la presión que posee este tramo de conducción.

- Tiempo de cierre: $t=30$ segundos

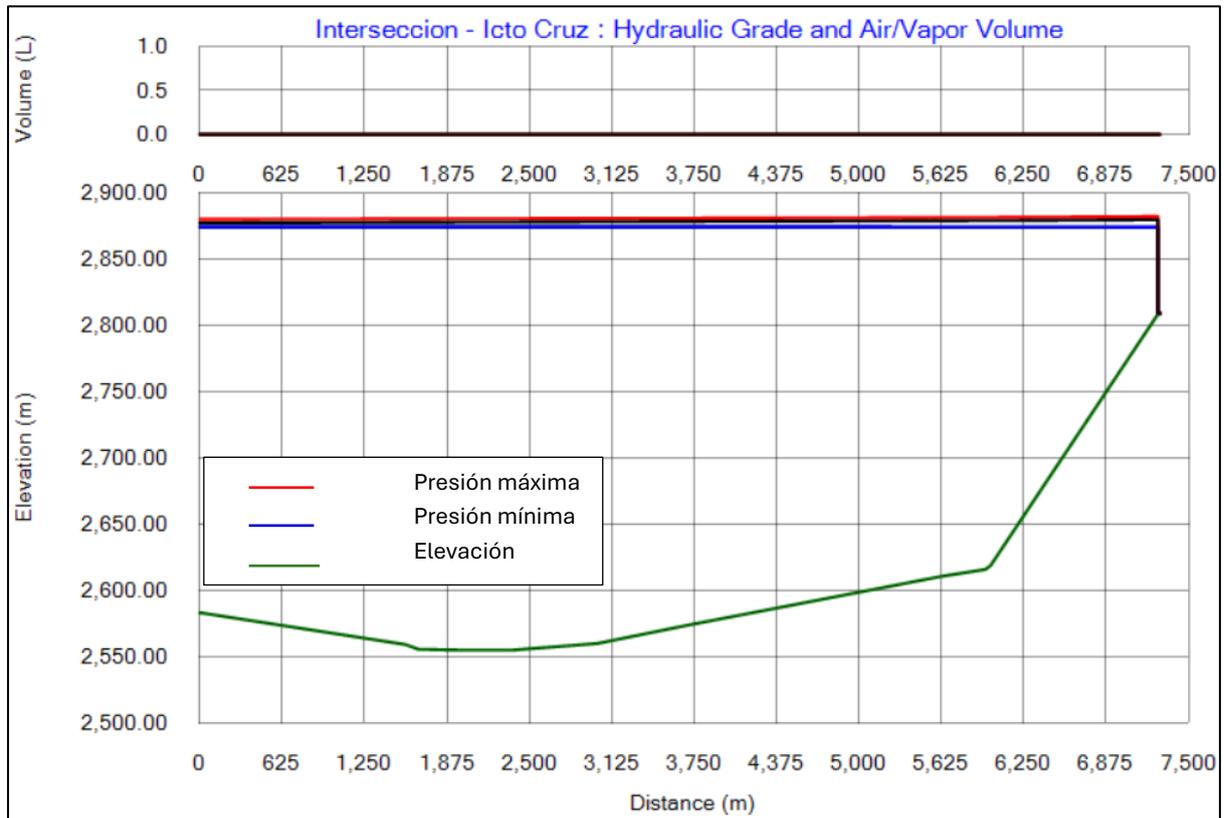


Ilustración 22 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=30$ s) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz, Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 22 muestra que el cierre de la válvula en 30 segundos genera una sobrepresión máxima de 8.12 mca, menor que la obtenida en la modelación previa debido a su mayor tiempo de cierre. No obstante, al igual que en la modelación anterior, dicha sobrepresión es poco significativa.

b. CIERRE LENTO

- Tiempo de cierre: $t=120$ segundos

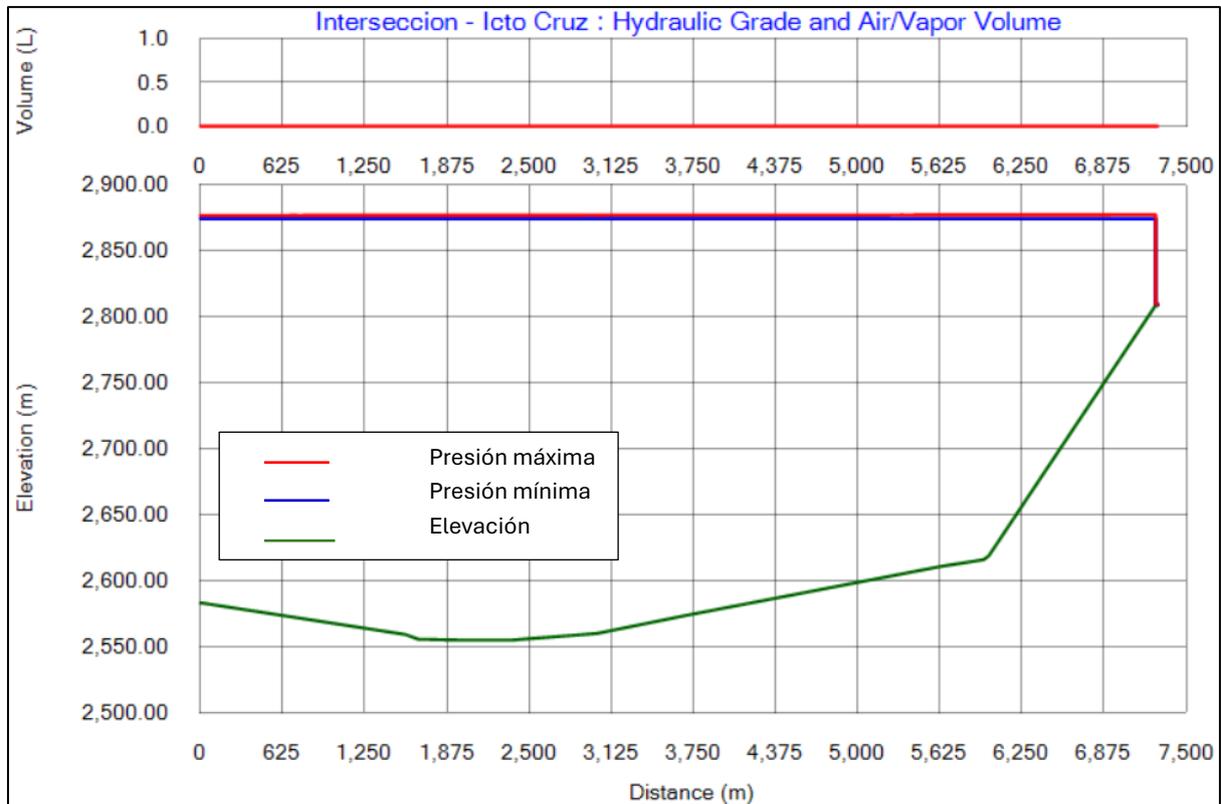


Ilustración 23 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección Ictocruz-Chaullayacu al tanque de Ictocruz, Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 23 indica que el cierre lento de la válvula en un tiempo de 120 segundos genera una sobrepresión máxima de 2.99 mca, menor a las sobrepresiones generadas en un cierre rápido.

2.5.2.1.2. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI

Se realiza un análisis de la línea de conducción que se dirige hacia el tanque SAN MIGUEL DE PUTUSHI.

Se obtiene el tiempo crítico del tramo comprendido entre la planta de tratamiento de agua potable de Sustag, hasta el tanque de San Miguel de Putushi.

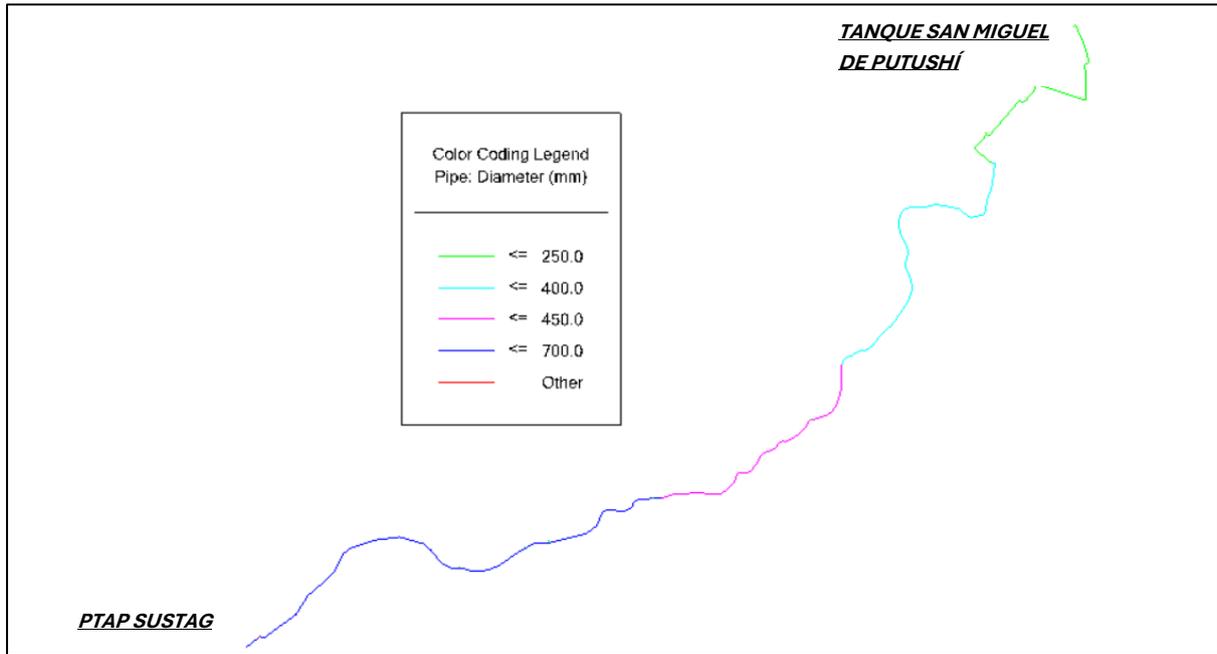


Ilustración 24 Sistema de Conducciones Yanuncay. Tramo PTAP Sustag a Tanque San Miguel de Putushi

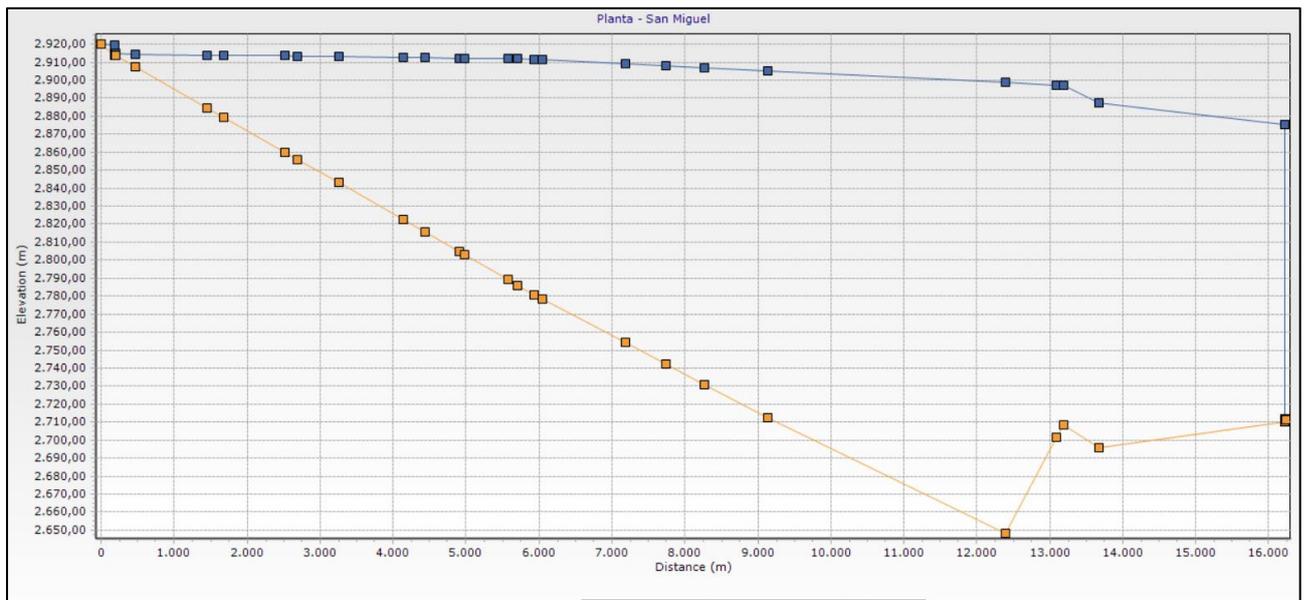


Ilustración 25 Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo PTAP Sustag – Tanque San Miguel de Putushi, generado en el software HAMMER

Tras el análisis de la línea establecida, se obtiene el tiempo crítico.

Tiempo crítico Tc	29.53	Segundos
-------------------	-------	----------

Para el análisis de fenómenos transitorios se considera el tramo desde la intersección Huizhil – San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi, tal como indica la Ilustración 25.

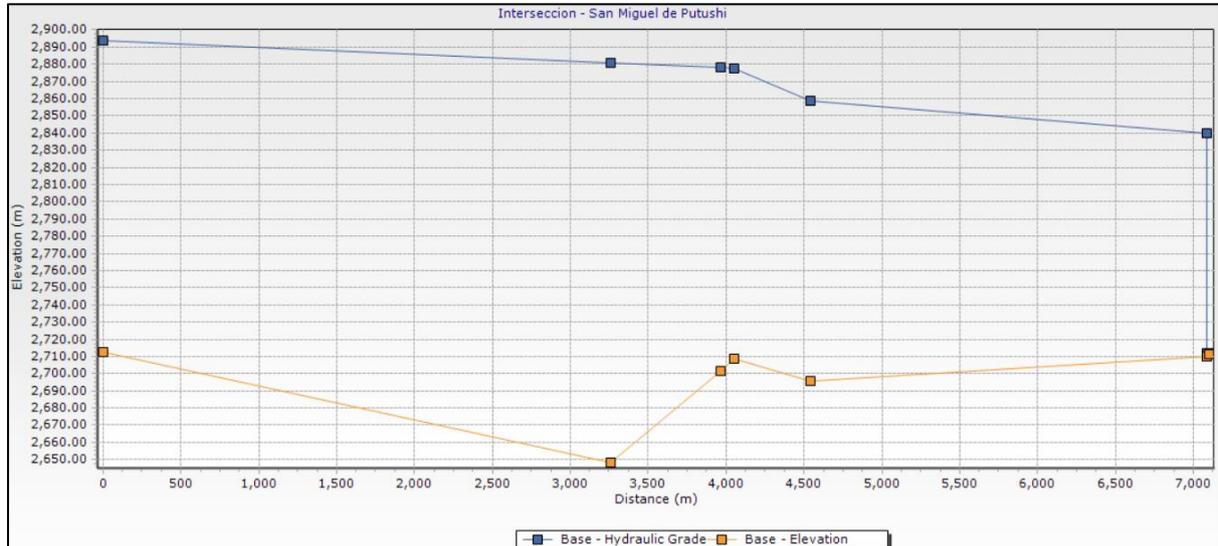


Ilustración 26: Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo Intersección Huizhil – San Miguel a Tanque San Miguel de Putushí, generado en el software HAMMER.

2.5.2.1.2.1. MODELO ACTUAL 2024

a. CIERRE RÁPIDO

Para este análisis se consideran dos tiempos de cierre (10 y 20 segundos), menores al tiempo crítico calculado.

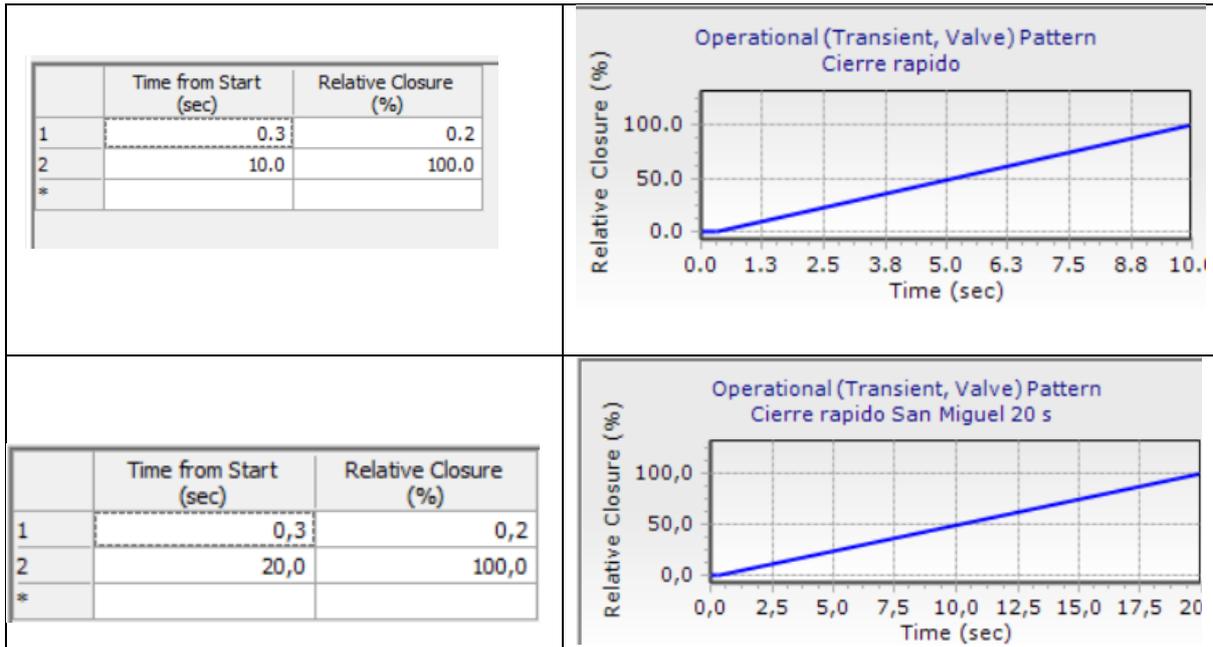


Tabla 15: Patrones de cierre rápido en válvula de control FCV del tanque de San Miguel de Putushi.

- **Tiempo de cierre: t=10 segundos**

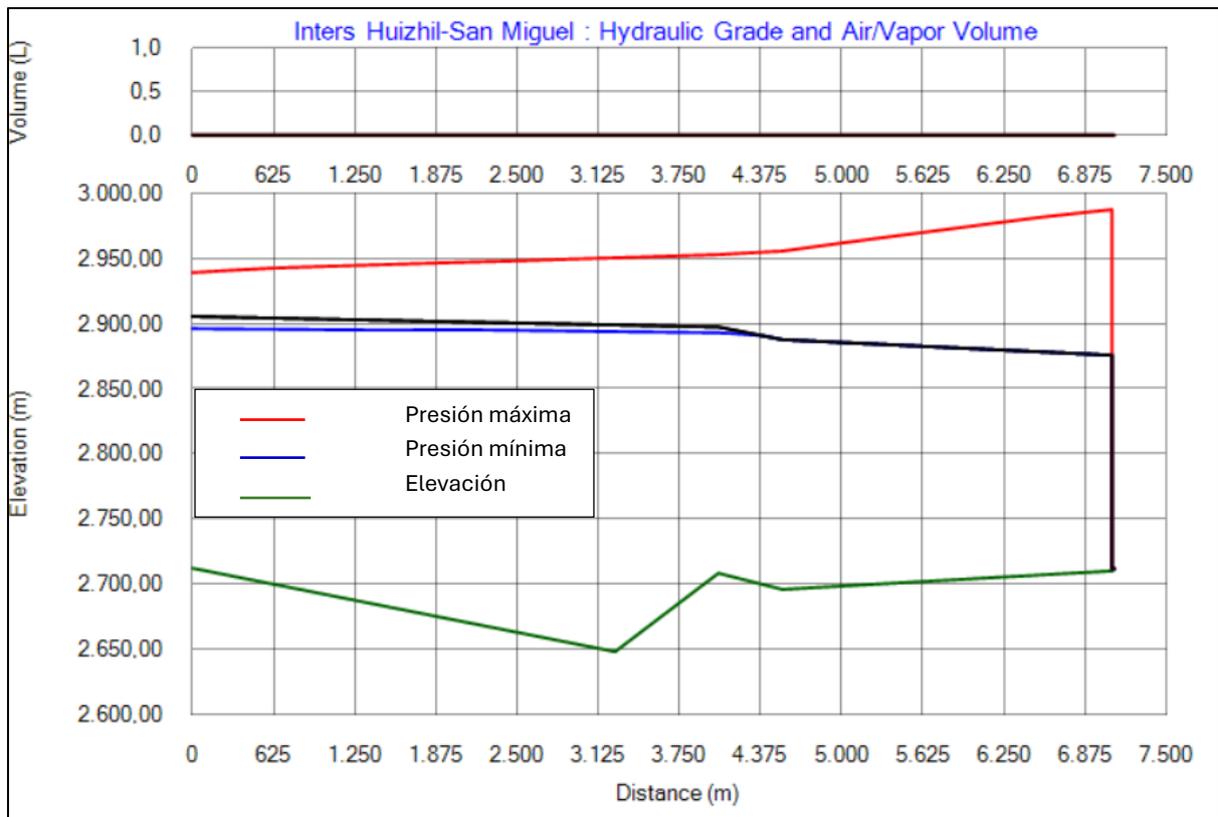


Ilustración 27 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula (t=10 s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 27 muestra que el cierre rápido de la válvula en 10 segundos produce una sobrepresión máxima de 111.70 mca. Esta sobrepresión es considerable.

- **Tiempo de cierre: $t=20$ segundos**

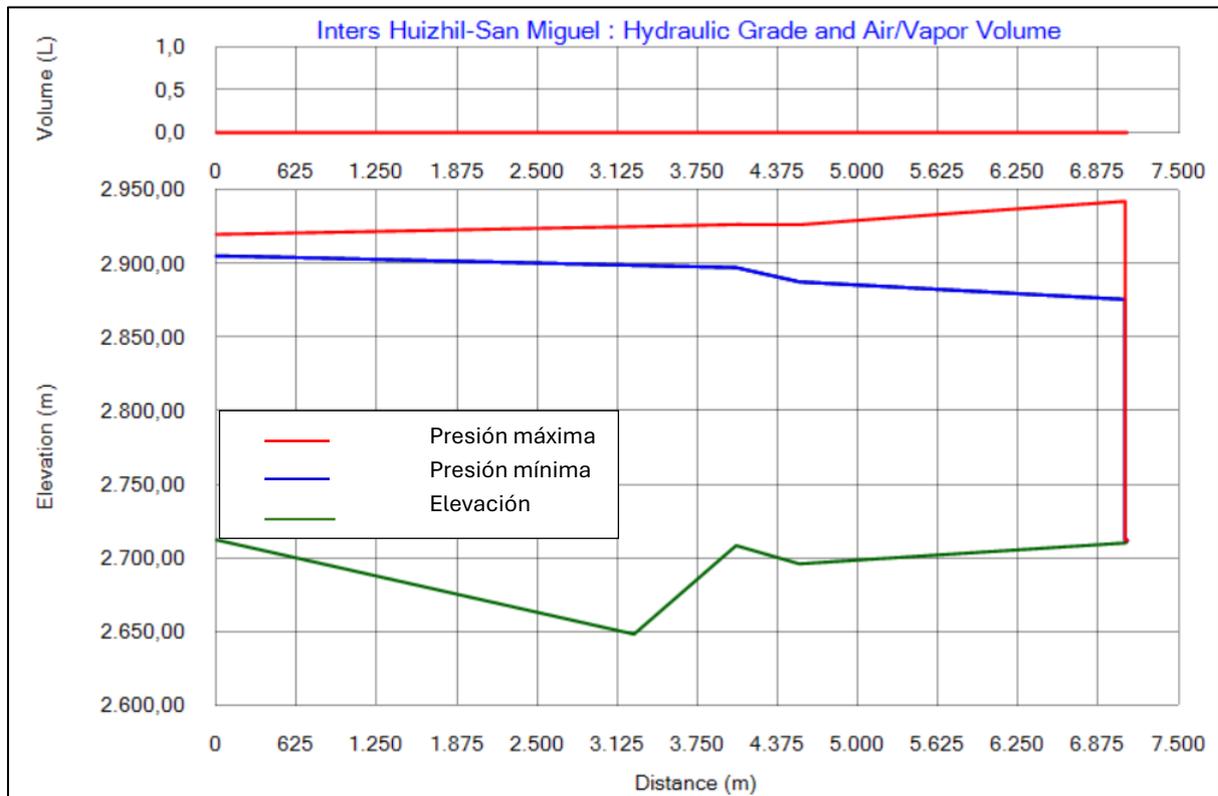


Ilustración 28 Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=20$ s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 28 muestra que el cierre rápido de la válvula en 20 segundos provoca una sobrepresión máxima de 66.65 mca. Aunque esta sobrepresión es menor que la generada con un cierre en menos tiempo, es considerable de acuerdo a las presiones de la conducción.

b. CIERRE LENTO

Para este análisis se considera un tiempo de cierre, mayor al tiempo crítico calculado.

- **Tiempo de cierre: $t=120$ segundos**

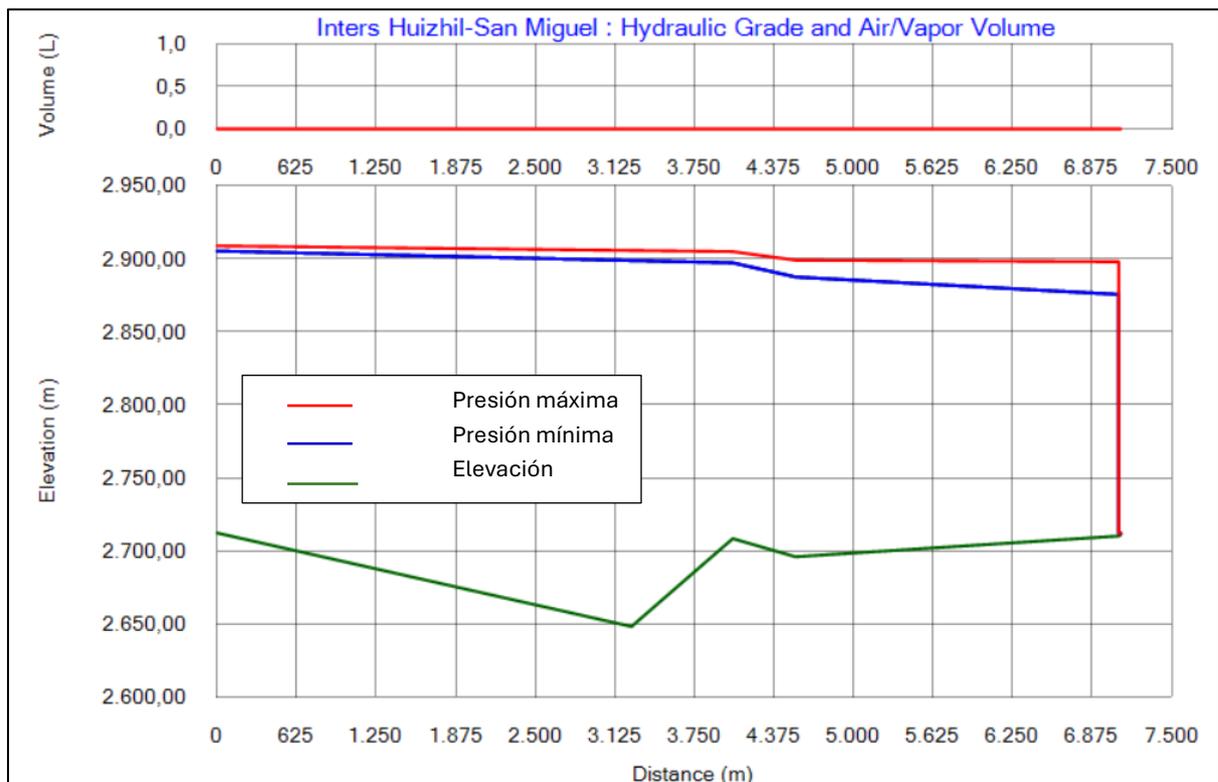


Ilustración 29: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 29 indica que el cierre lento de la válvula en 120 segundos produce una sobrepresión máxima de 22.37 mca, generada en el nodo donde se ubica la válvula. Esta sobrepresión ya no representa un riesgo para la válvula.

2.5.2.1.2.2. MODELO PROYECTADO 2050

a. CIERRE RÁPIDO

- Tiempo de cierre: $t=10$ segundos

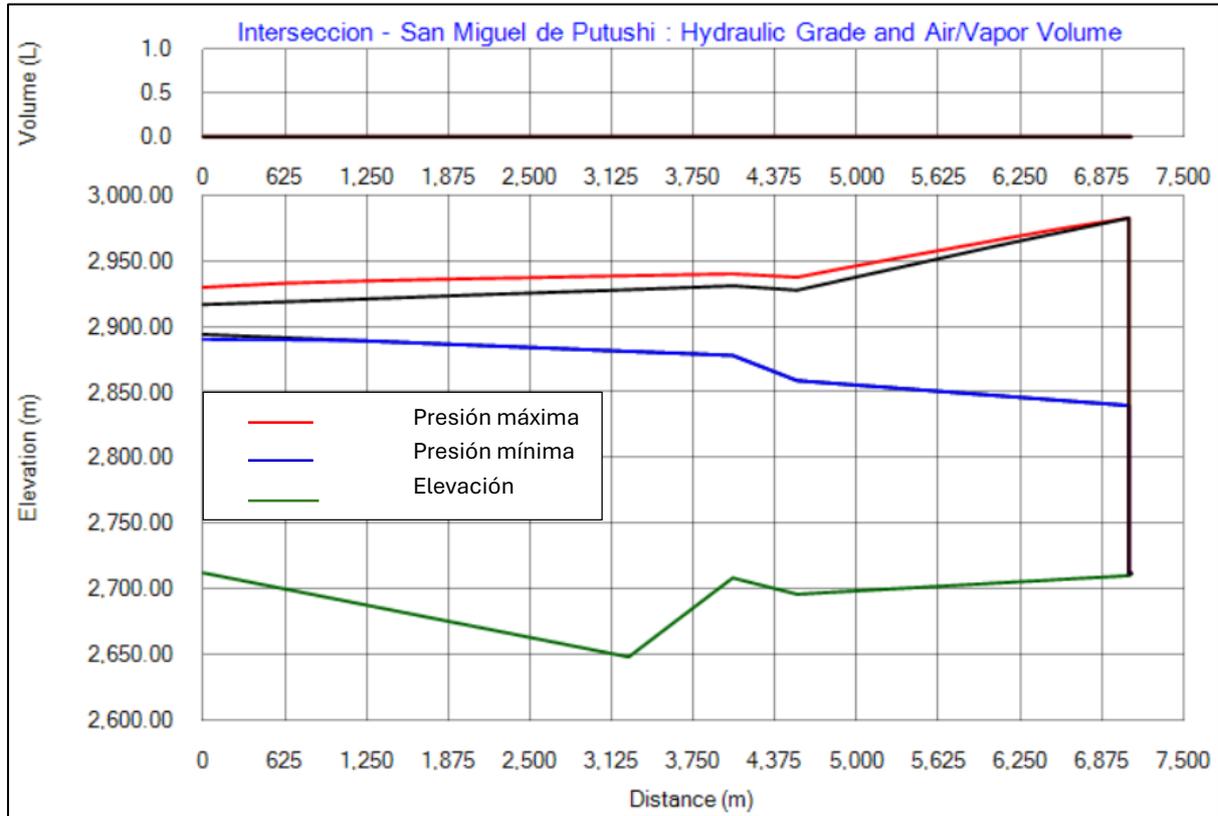


Ilustración 30: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=10$ s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 30 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 10 segundos genera una sobrepresión máxima de 142.77 mca. Esta sobrepresión es considerable y se genera en el nodo en el que se encuentra la válvula.

- Tiempo de cierre: $t=20$ segundos

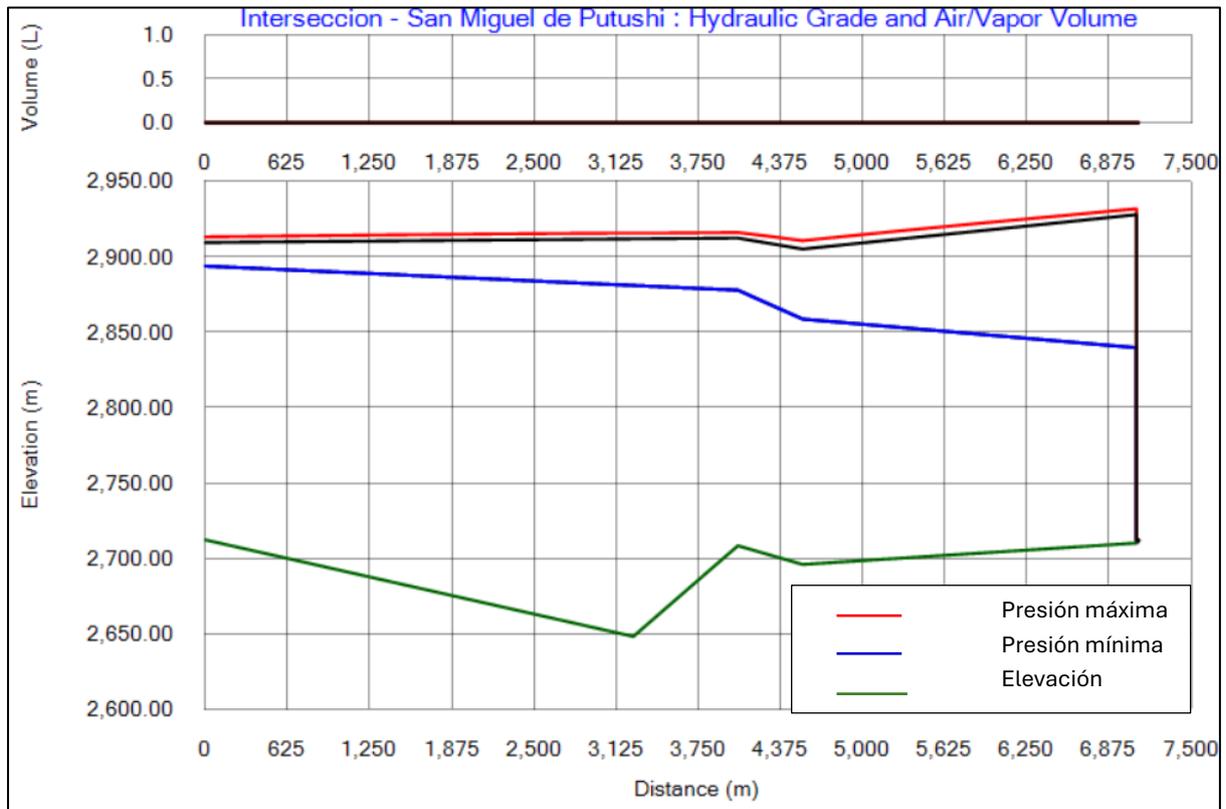


Ilustración 31: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=20$ s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 31 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 20 segundos genera una sobrepresión máxima de 92.11 mca. Esta sobrepresión es significativa, sin embargo, menor que la sobrepresión generada en un cierre en menor tiempo.

b. CIERRE LENTO

- Tiempo de cierre: $t=120$ segundos

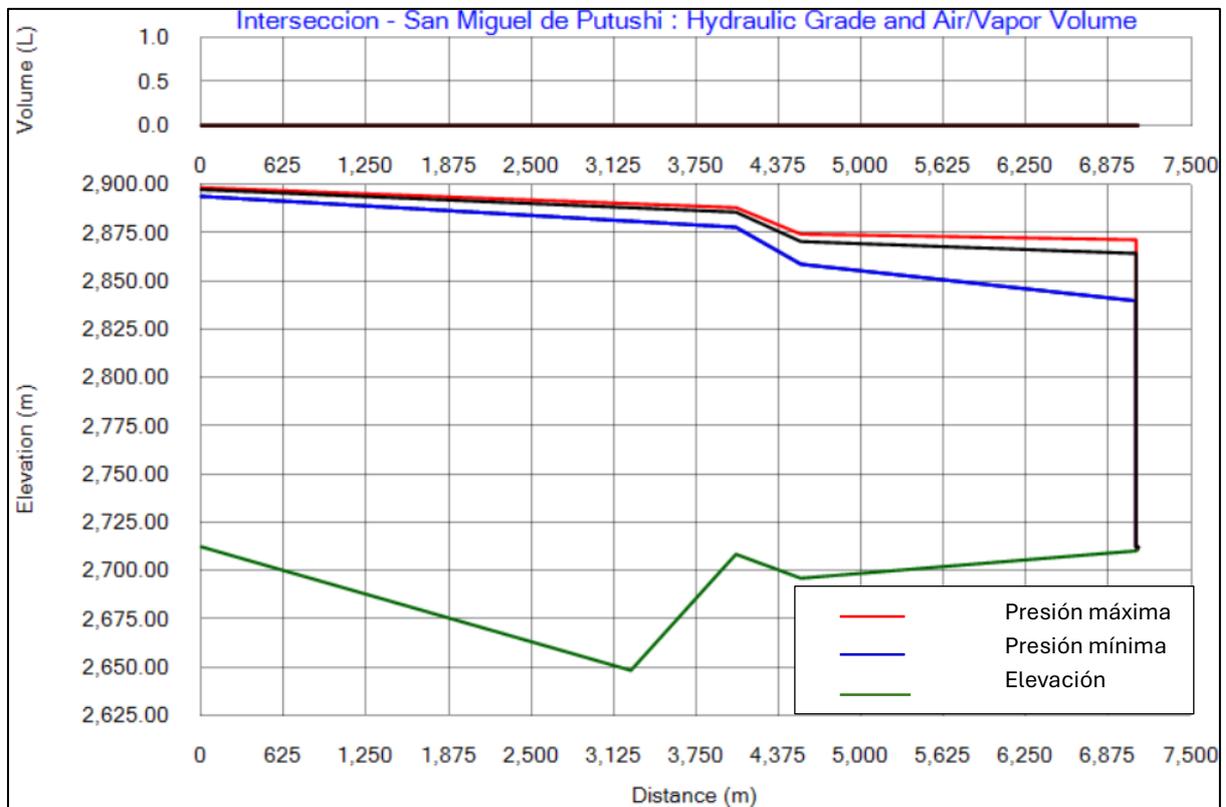


Ilustración 32: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección Huizhil-San Miguel al tanque de San Miguel de Putushi. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 32 indica que el cierre lento de la válvula en un tiempo de 120 segundos genera una sobrepresión máxima de 31.66 mca. Esta sobrepresión ya no representa un riesgo en la válvula.

2.5.2.1.3. TRAMO HUIZHIL

Se realiza un análisis de la línea de conducción que se dirige hacia el tanque HUIZHIL. Se obtiene el tiempo crítico del tramo comprendido entre la planta de tratamiento de agua potable de Sustag, hasta el tanque de Huizhil.

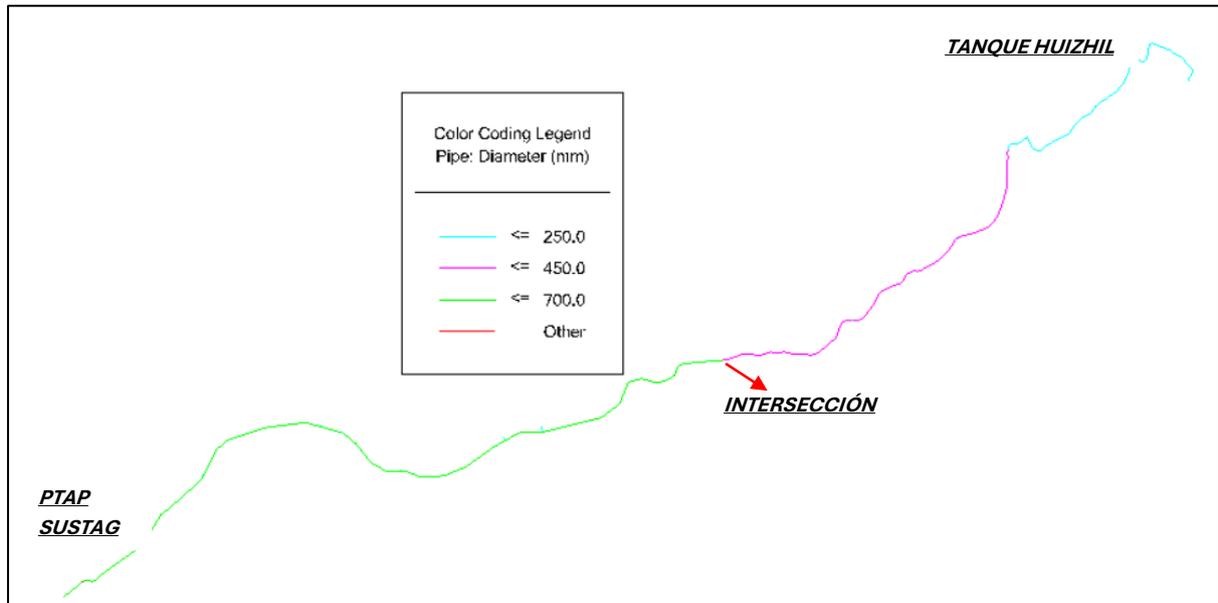


Ilustración 33: Sistema de Conducciones Yanuncay. Tramo PTAP Sustag a Tanque Huizhil

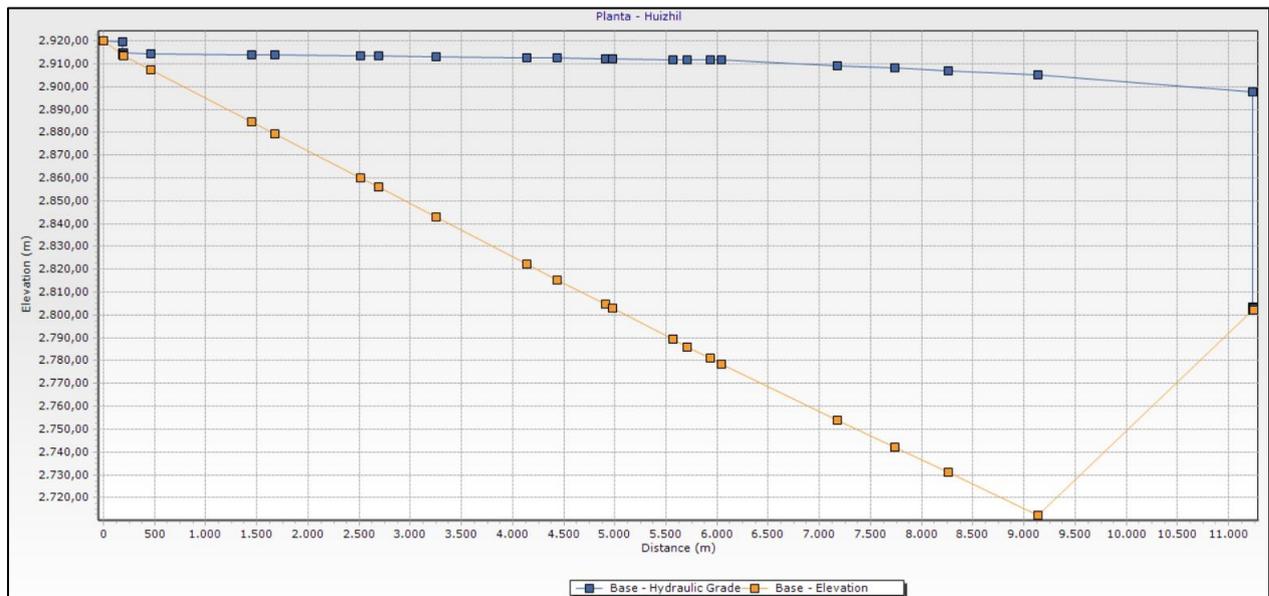


Ilustración 34: Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo PTAP Sustag – Tanque Huizhil, generado en el software HAMMER.

Luego de un análisis en la línea definida se obtiene el tiempo crítico:

Tiempo crítico T_c	20.67	Segundos
----------------------	-------	----------

Para el análisis de transitorios se considera el tramo de conducción desde la intersección ubicada en el nodo J-79 hasta el tanque de Huizhil, tal como indica la Ilustración 33.

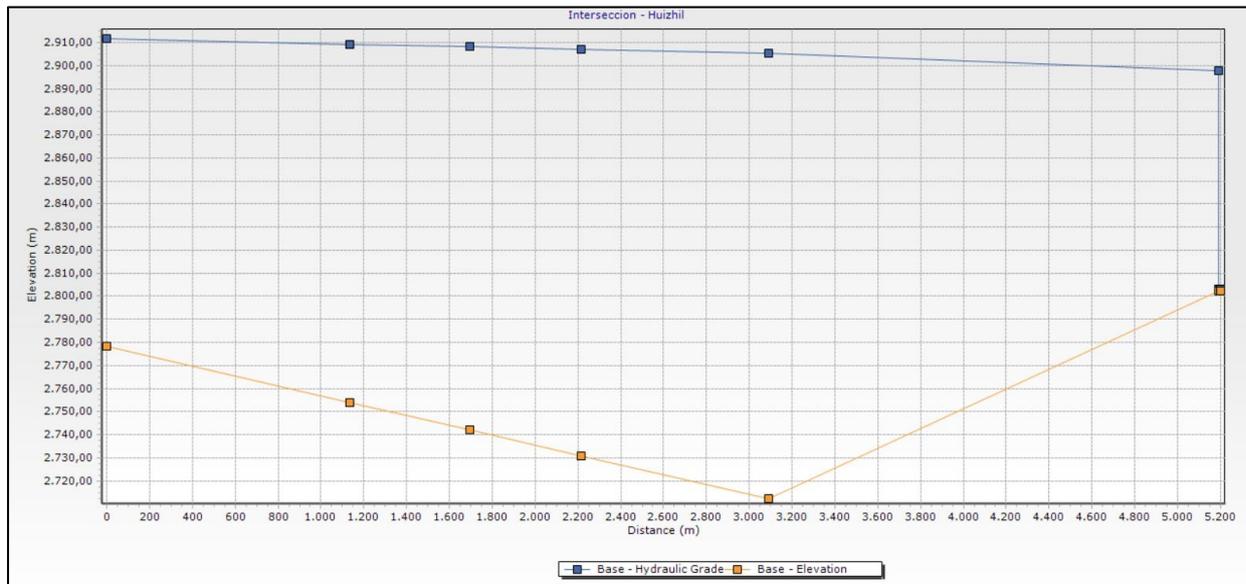


Ilustración 35: Sistema de Conducciones Yanuncay. Perfil del Tramo Intersección J79 – Tanque Huizhil,, generado en el software

2.5.2.1.3.1. MODELO ACTUAL 2024

a. CIERRE RÁPIDO

Se consideran dos tiempos de cierre (10 y 15 segundos), menores al tiempo crítico calculado.

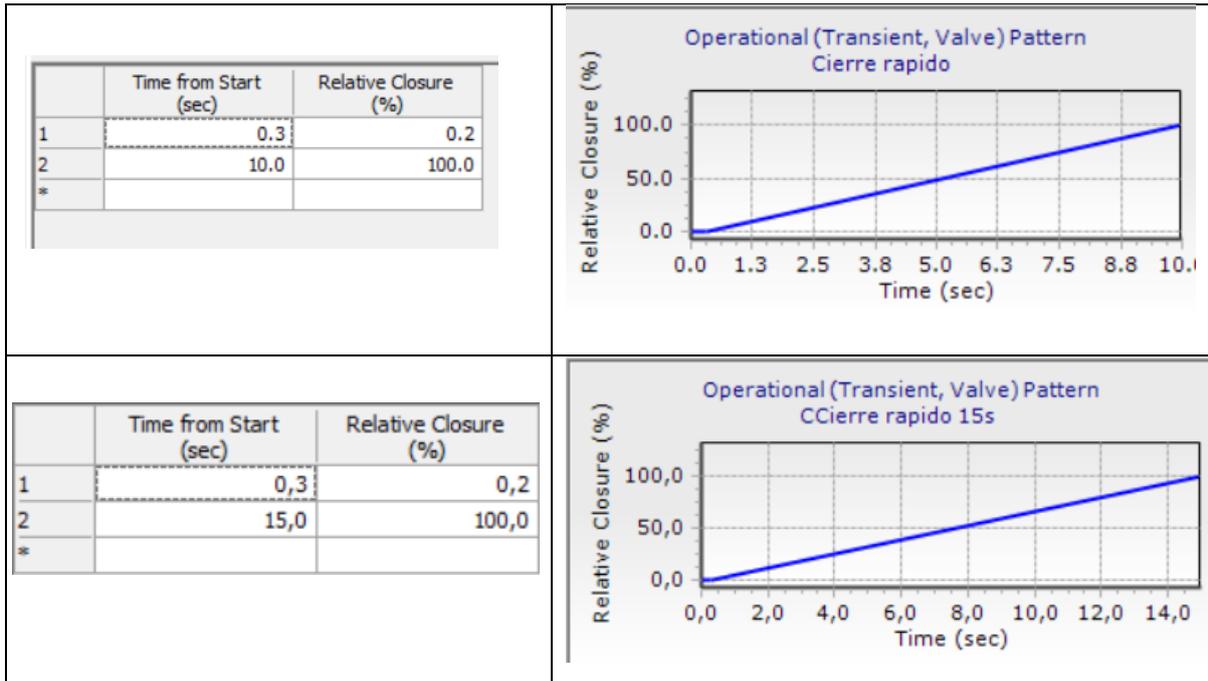


Ilustración 36: Patrones de cierre rápido en válvula de control FCV del tanque de Huizhiñ

- Tiempo de cierre: $t=10$ segundos

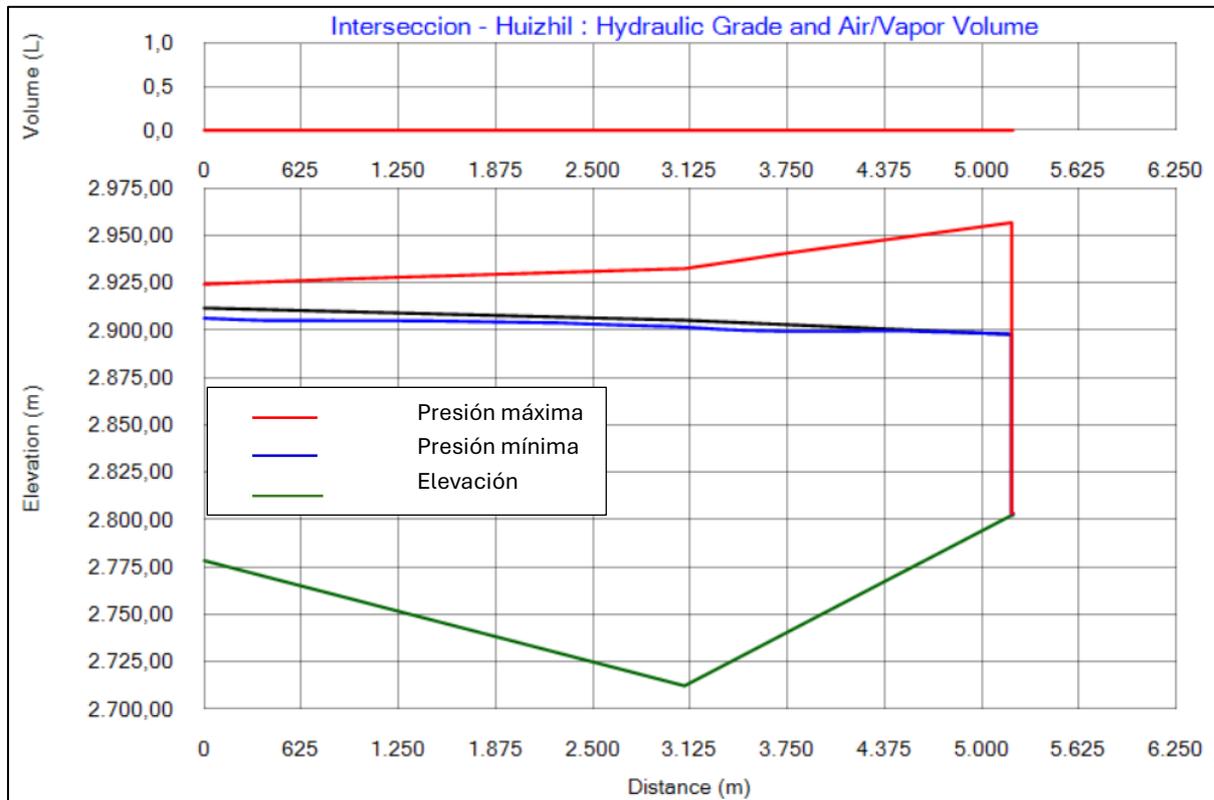


Ilustración 37: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=10$ s) del tramo Intersección J79 al tanque Huizhil. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 37 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 10 segundos genera una sobrepresión máxima de 58.97 mca.

- **Tiempo de cierre: t=15 segundos**

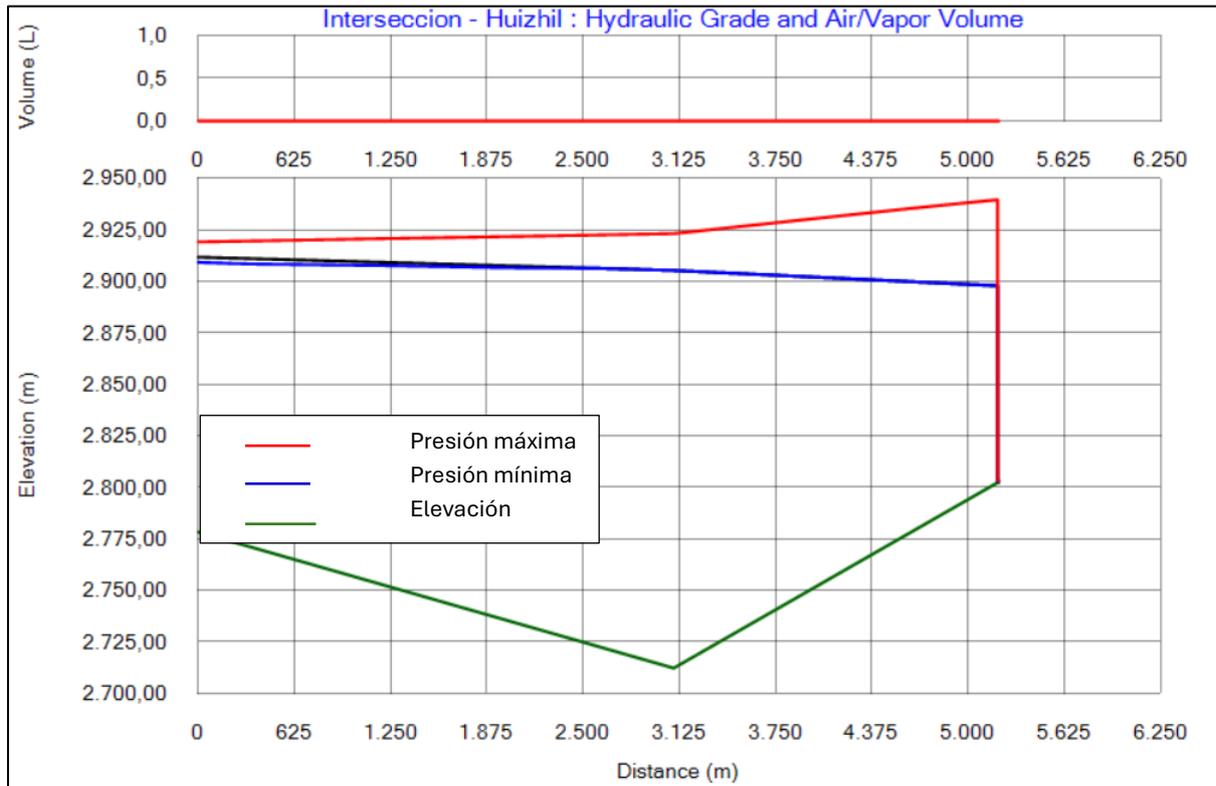


Ilustración 38: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula (t=15 s) del tramo Intersección J79 al tanque Huizhil. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 38 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 15 segundos genera una sobrepresión máxima de 41.73 mca. Esta sobrepresión es menor a la generada en un menor tiempo de cierre.

b. CIERRE LENTO

Para un cierre lento se considera un tiempo de cierre mayor al tiempo crítico calculado.

- **Tiempo de cierre: $t=120$ segundos**

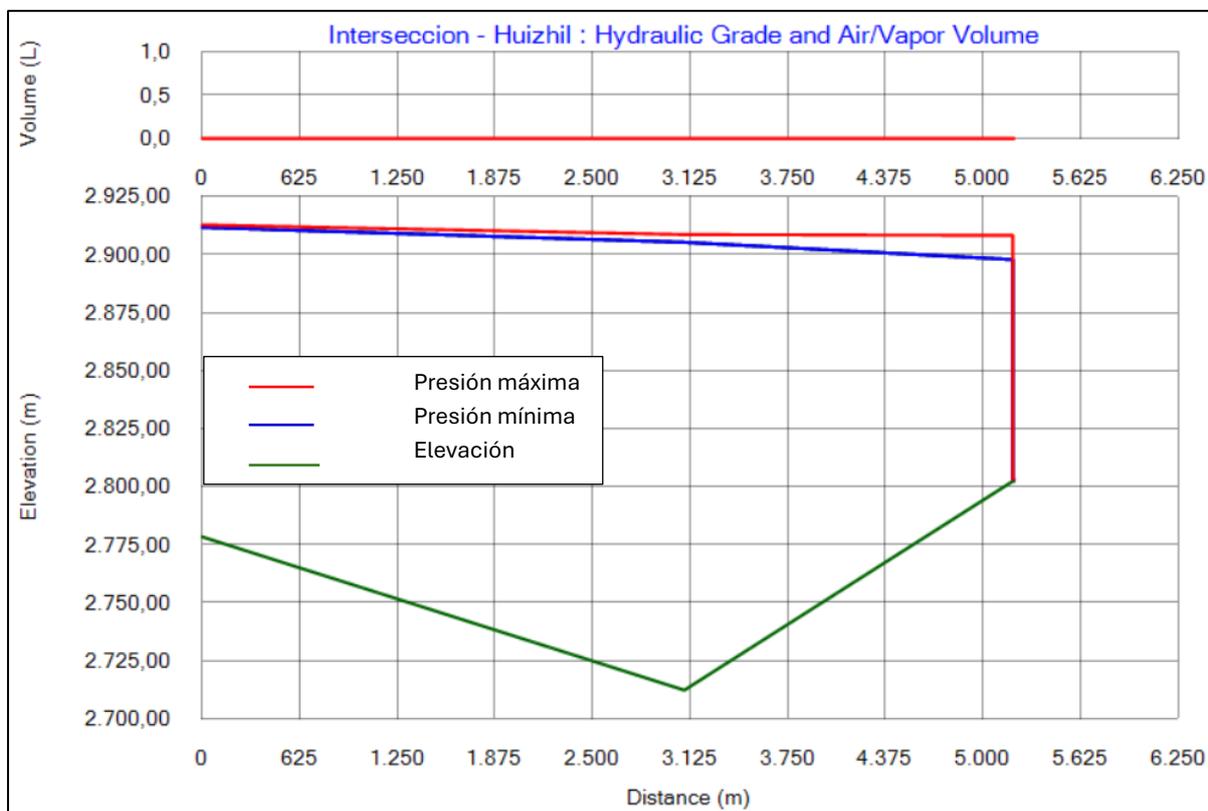


Ilustración 39: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección J79 al tanque Huizhil. Año 2024. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 39 indica que el cierre lento de la válvula en un tiempo de 120 segundos genera una sobrepresión máxima de 10.38 mca. Esta sobrepresión ya no representa un riesgo en la válvula.

2.5.2.1.3.2. MODELO PROYECTADO 2050

a. CIERRE RÁPIDO

- Tiempo de cierre: $t=10$ segundos

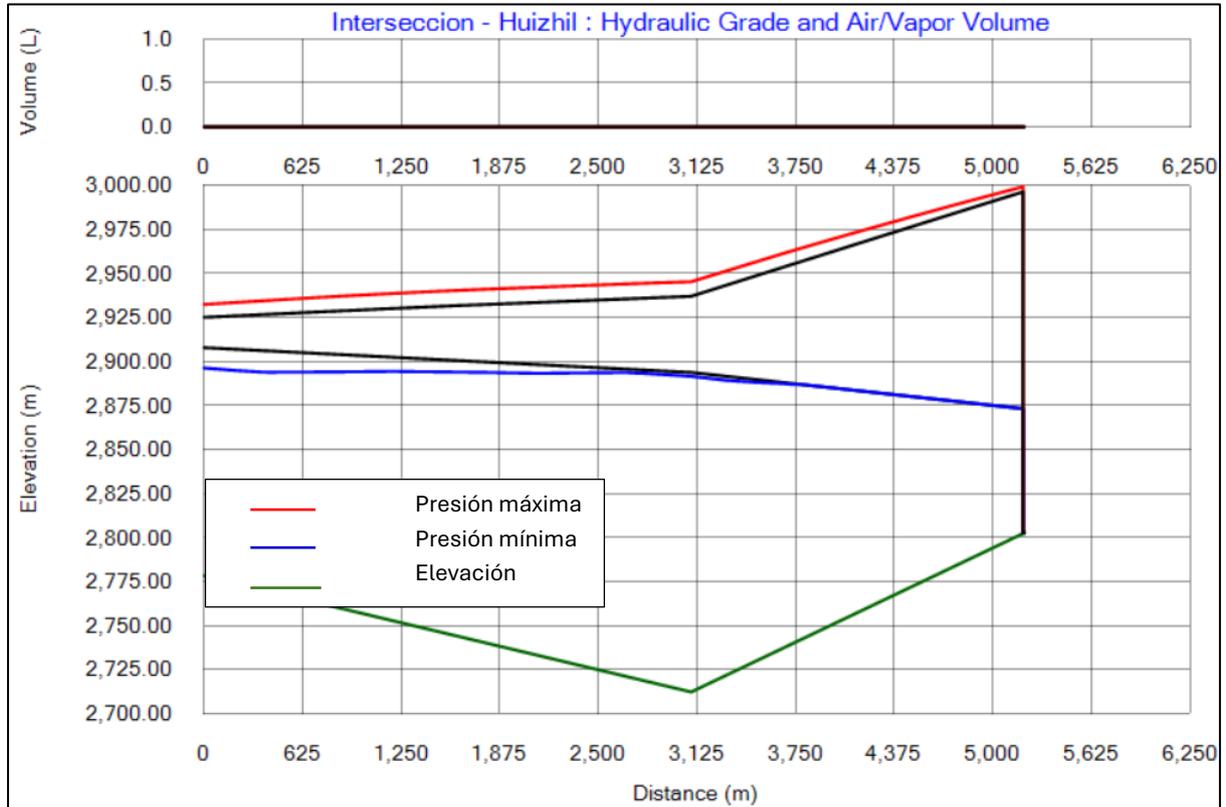


Ilustración 40: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=10$ s) del tramo Intersección al tanque Huizhil. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 40 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 10 segundos genera una sobrepresión máxima de 126.10 mca.

- Tiempo de cierre: $t=15$ segundos

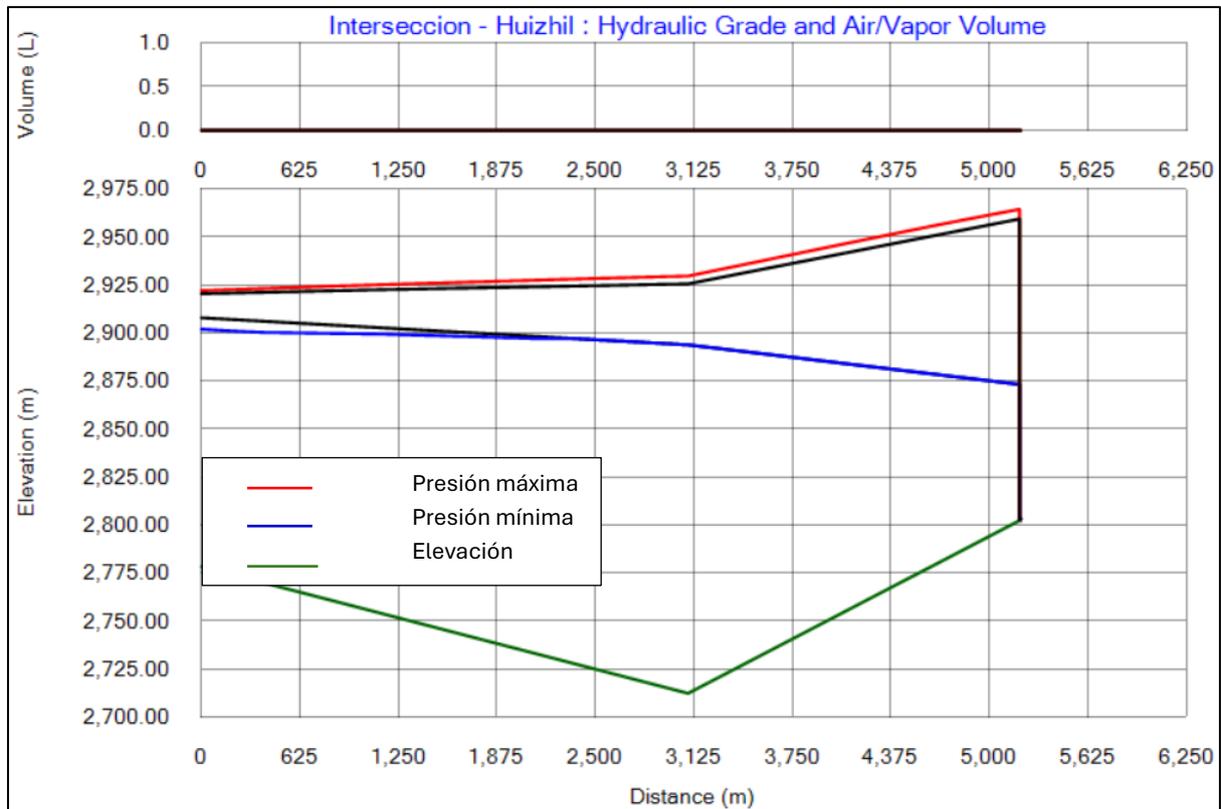


Ilustración 41: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=15$ s) del tramo Intersección al tanque Huizhil. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER.

La Ilustración 41 indica que el cierre rápido de la válvula en un tiempo de 15 segundos genera una sobrepresión máxima de 91.24 mca. Esta sobrepresión es menor a la generada en un menor tiempo de cierre.

b. CIERRE LENTO

- Tiempo de cierre: $t=120$ segundos

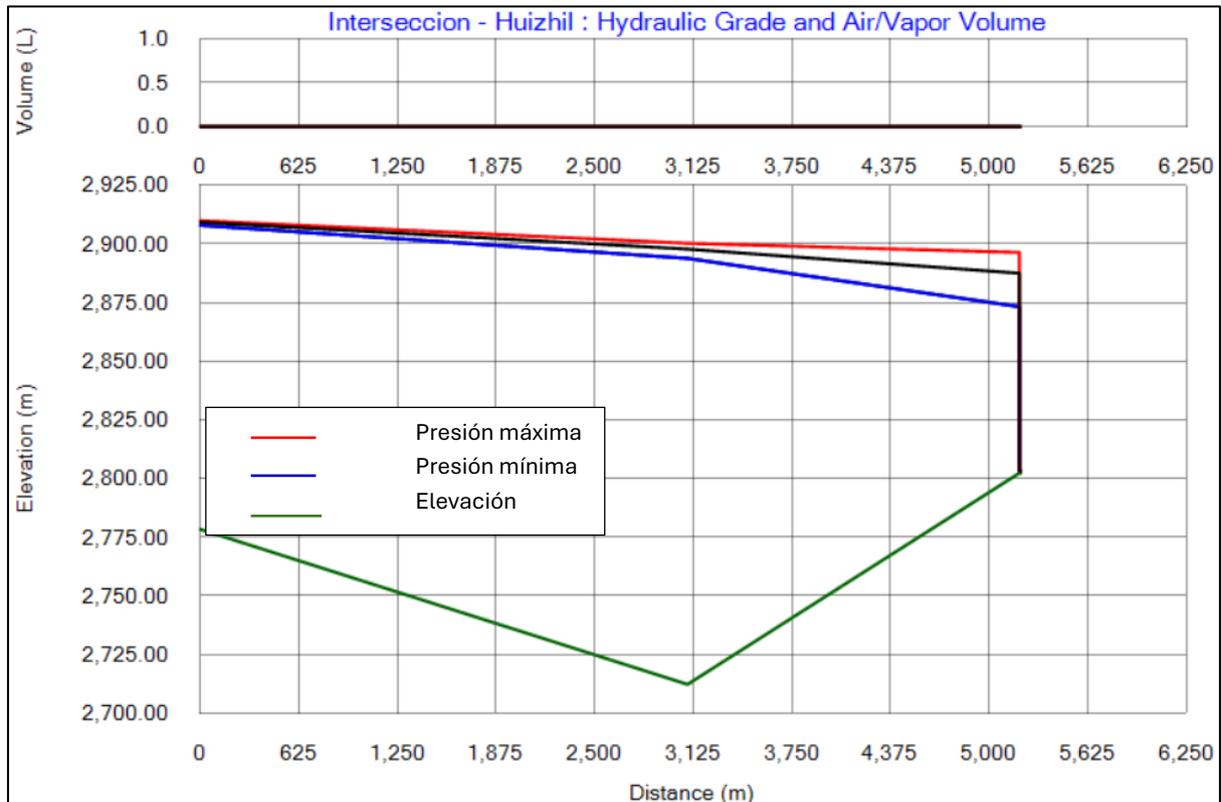


Ilustración 42: Gráfica de análisis de gradiente hidráulico por cierre de válvula ($t=120$ s) del tramo Intersección al tanque Huizhil. Año 2050. Modelado en el Software HAMMER

La Ilustración 42 indica que el cierre lento de la válvula en un tiempo de 120 segundos genera una sobrepresión máxima de 23.14 mca. Esta sobrepresión ya no representa un riesgo en la válvula.

2.5.2.2. SEGUNDO ESCENARIO: ROTURA DE LA TUBERÍA EN UN PUNTO BAJO DE LA LÍNEA

Se realiza la modelación de la rotura en el punto más bajo del tramo de la conducción de análisis, para lo cual, se utiliza en la modelación una válvula de descarga a la atmósfera.

Para este escenario se evalúa volúmenes de aire generados y problemas de cavitación. La cavitación ocurre cuando la presión dentro de una tubería cae por debajo de la

presión atmosférica, lo que provoca que el agua cambie de estado y se convierta en vapor. En este proceso, se liberan los gases disueltos en el líquido, formando burbujas que viajan con la corriente. Al aumentar nuevamente la presión aguas abajo, estas burbujas colapsan o implosionan, generando lo que se conoce como cavitación. (Monge Redondo, 2017)

Para el seteo de la válvula, se considera los siguientes aspectos:

- Tiempo de inicio de operación: 5 segundos
- Tiempo de apertura o cierre total: 20 segundos
- Caudal de descarga.

Se analiza la rotura de tubería en los mismos 3 tramos que se analizó para el cierre de válvula.

2.5.2.2.1. TRAMO ICTOCRUZ

Se realiza la simulación de la rotura de la tubería colocando una válvula de descarga en el punto más bajo del tramo ubicado entre la intersección Chaullayacu -Ictocruz, hasta Ictocruz. Esta válvula se coloca en el nodo J380.

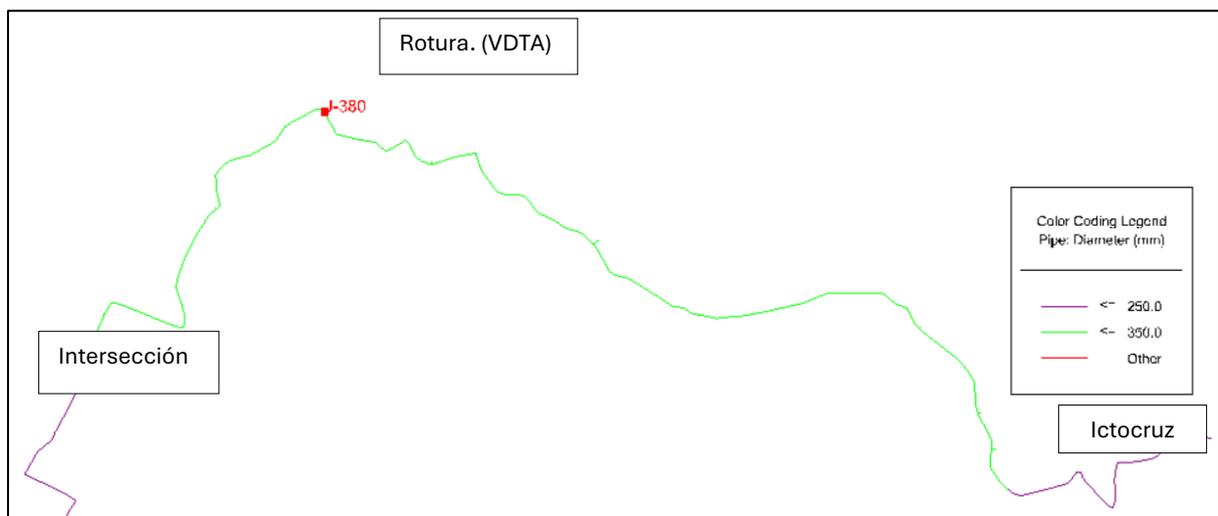


Ilustración 43: Ubicación de válvula de purga para simulación de rotura de tubería en el tramo del tanque de Ictocruz

Modelo Actual 2024 y Proyectado 2050

Se ejecuta la simulación para diferentes caudales de descarga, simulando la rotura de la tubería, cabe mencionar que el tramo de Ictocruz conduce un caudal de 7.8 l/s. Se considera que las condiciones de las tuberías del sistema se mantienen tanto en el modelo actual como en el modelo proyectado al año 2050.

Para este modelo según el caudal del tramo de estudio se consideran tres caudales para el análisis.

- Caudal 5.5 l/s

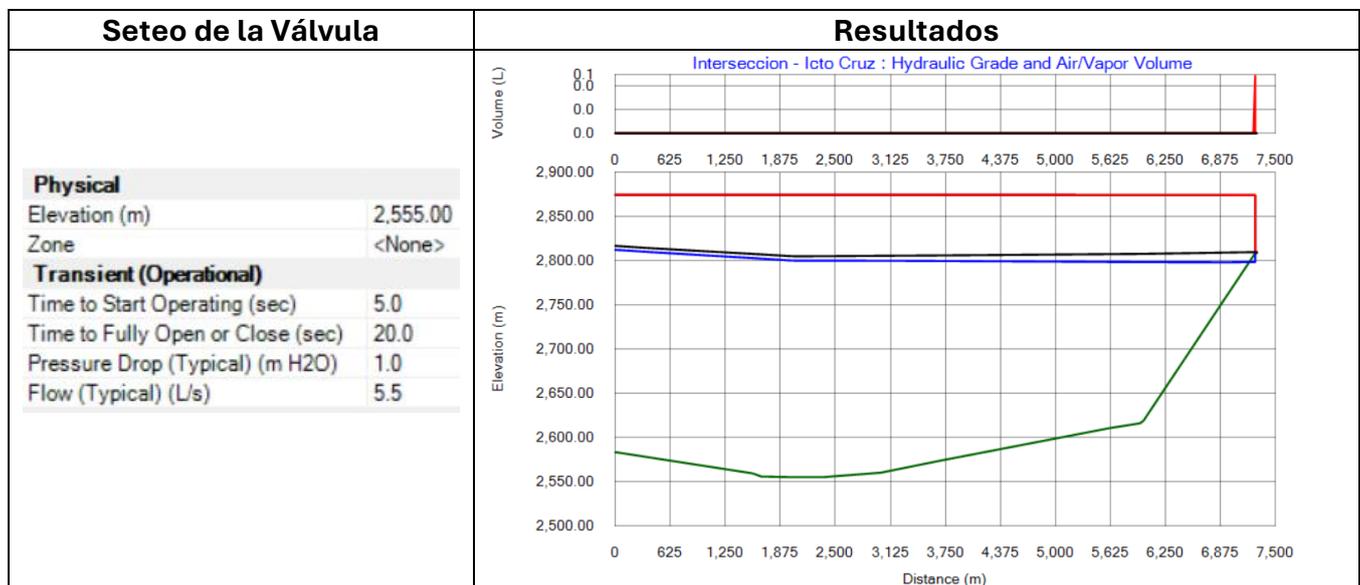


Tabla 16 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 5.5 l/s. Tramo Ictocruz 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

Con un caudal de 5.5 l/s, se genera un volumen de aire muy pequeño (menor a 1 l), el cual es despreciable.

- Caudal 6.0 l/s

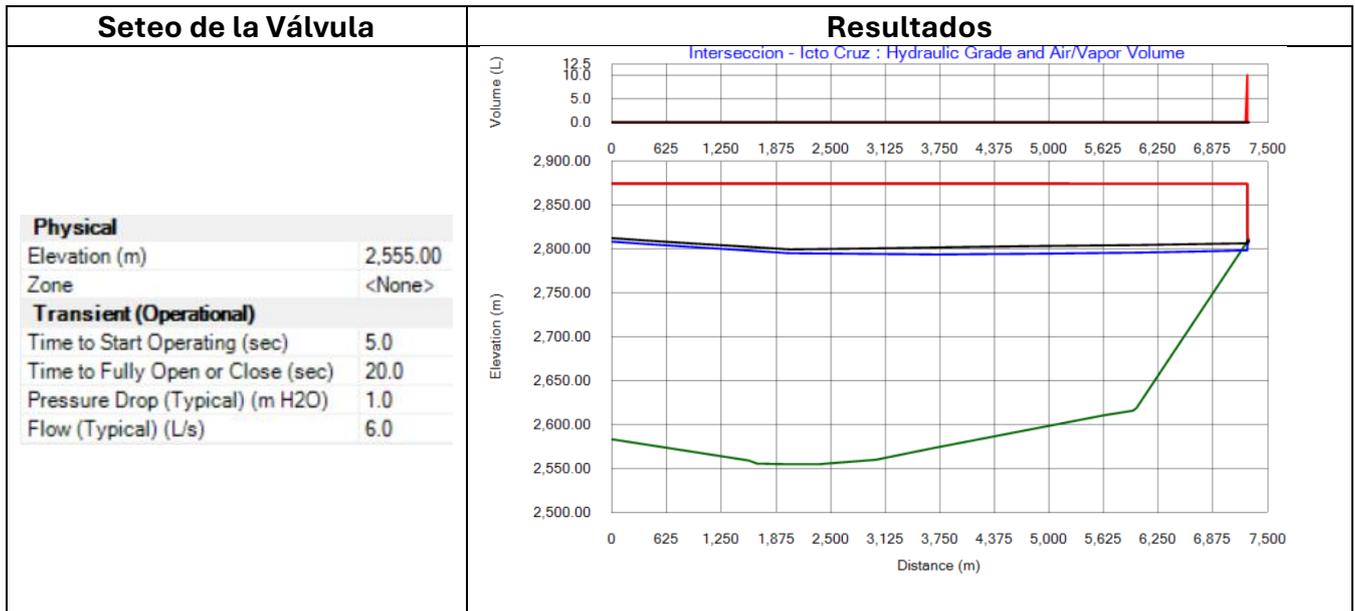


Tabla 17 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 6.0 l/s. Tramo Ictocruz 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

Con un caudal de 6.0 l/s, se genera un volumen de aire de 10.1 l, superior al generado anteriormente, por lo que se deberían considerar válvulas de aire en la modelación.

- Caudal 7.0 l/s

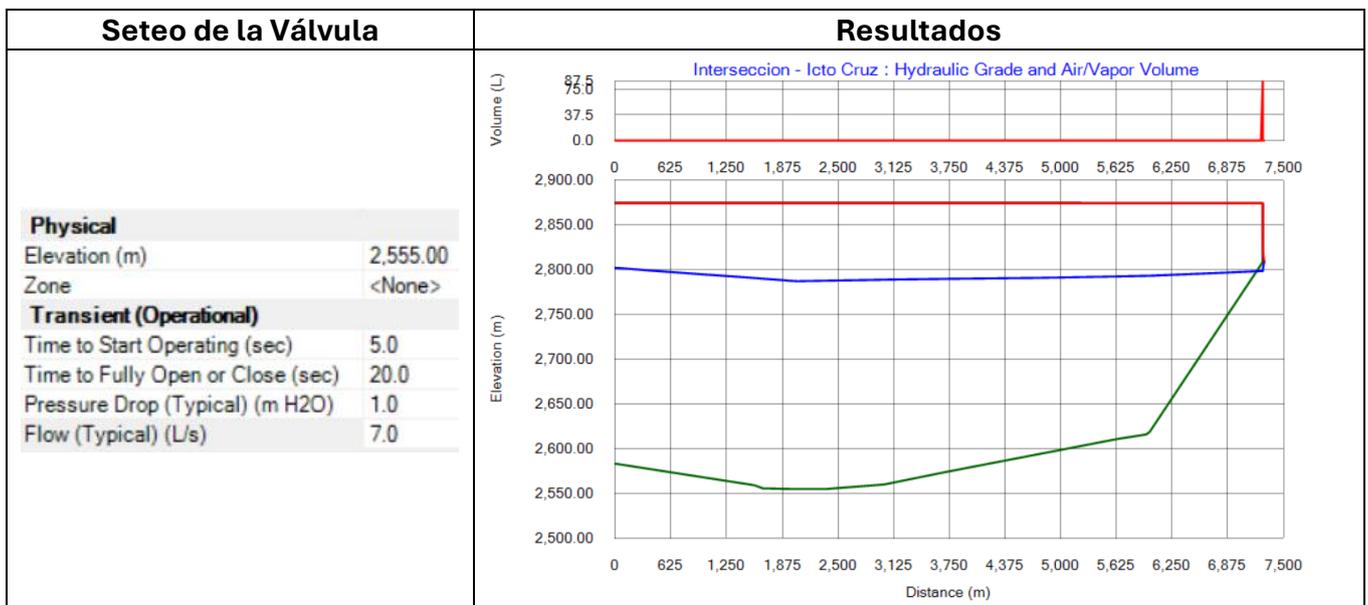


Tabla 18 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 7.0 l/s. Tramo Ictocruz 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

Con un caudal de 7.0 l/s, se genera un volumen de aire de 86.7 l, por lo que para este caso se debe considerar un sistema de protección.

5.2.2.2. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI

Se realiza la simulación de la rotura de la tubería colocando una válvula de descarga en el punto más bajo del tramo Intersección Huizhil- San Miguel. Esta válvula se coloca en el nodo J204.

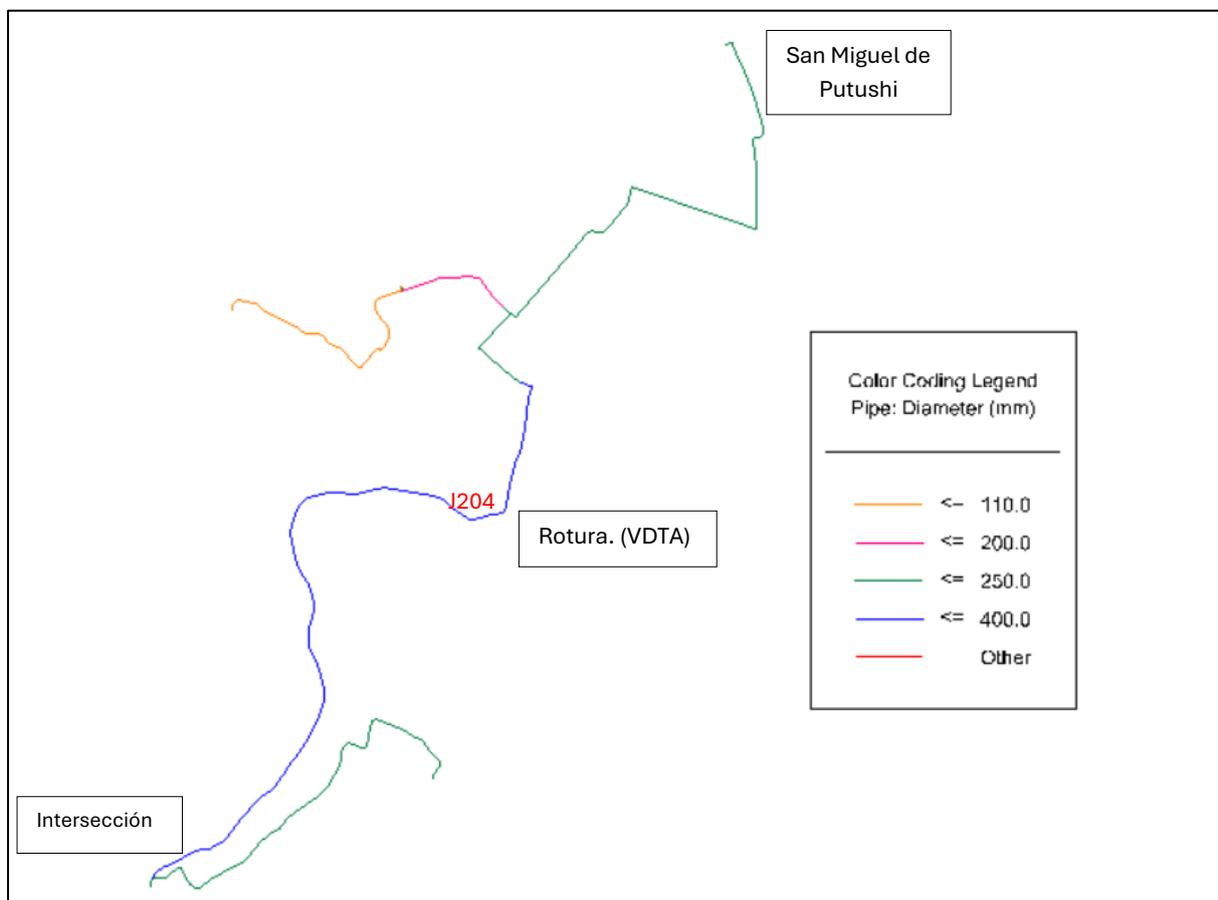


Ilustración 44: Ubicación de válvula de purga para simulación de rotura de tubería en el tramo del tanque de San Miguel de Putushi

Modelo Actual 2024 y Proyectado 2050

Se realiza la simulación para diferentes caudales de descarga, simulando la rotura de la tubería, cabe mencionar que el tramo San Miguel de Putushí conduce un caudal de

163.8l/s. Se considera que las condiciones de las tuberías del sistema se mantienen tanto en el modelo actual como en el modelo proyectado al año 2050.

Para este modelo según el caudal del tramo de estudio se consideran dos caudales para el análisis.

- Caudal 40 l/s

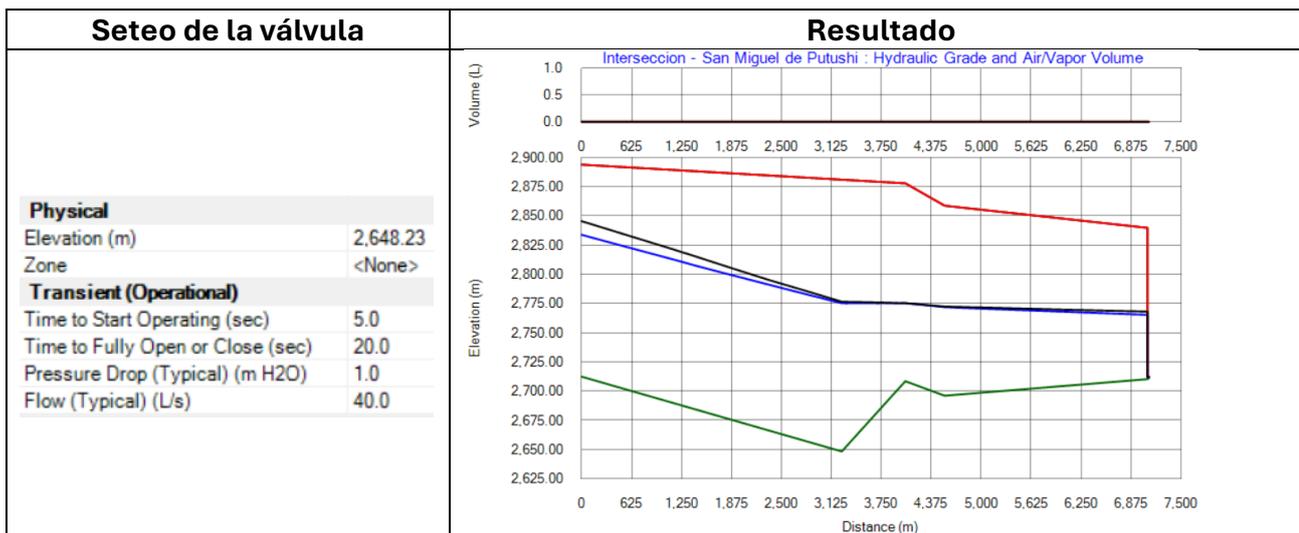


Tabla 19 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 40 l/s. Tramo San Miguel de Putushi 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

- Caudal 60 l/s

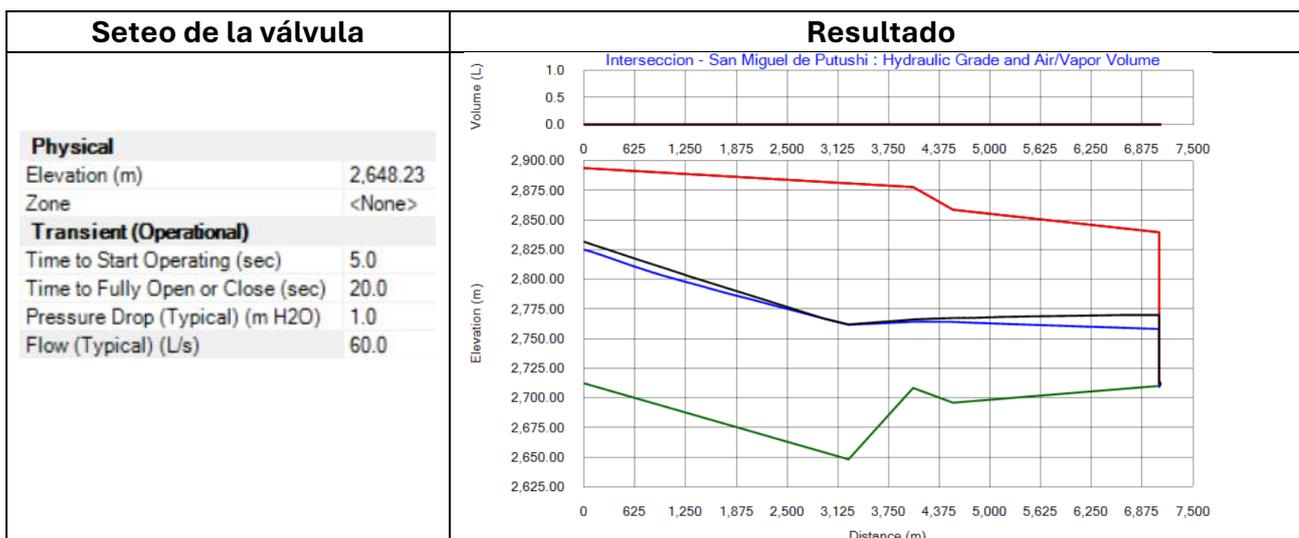


Tabla 20 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 60 l/s. Tramo San Miguel de Putushi 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

Según las gráficas generadas con caudales de 40 l/s y 60 l/s, la conducción no cavita y a su vez, no se generan volúmenes de aire a considerar.

5.2.2.3. TRAMO HUIZHIL

Se realiza la simulación de la rotura de la tubería colocando una válvula de descarga en el punto más bajo del tramo de Huizhil. Esta válvula se coloca en el nodo J116.

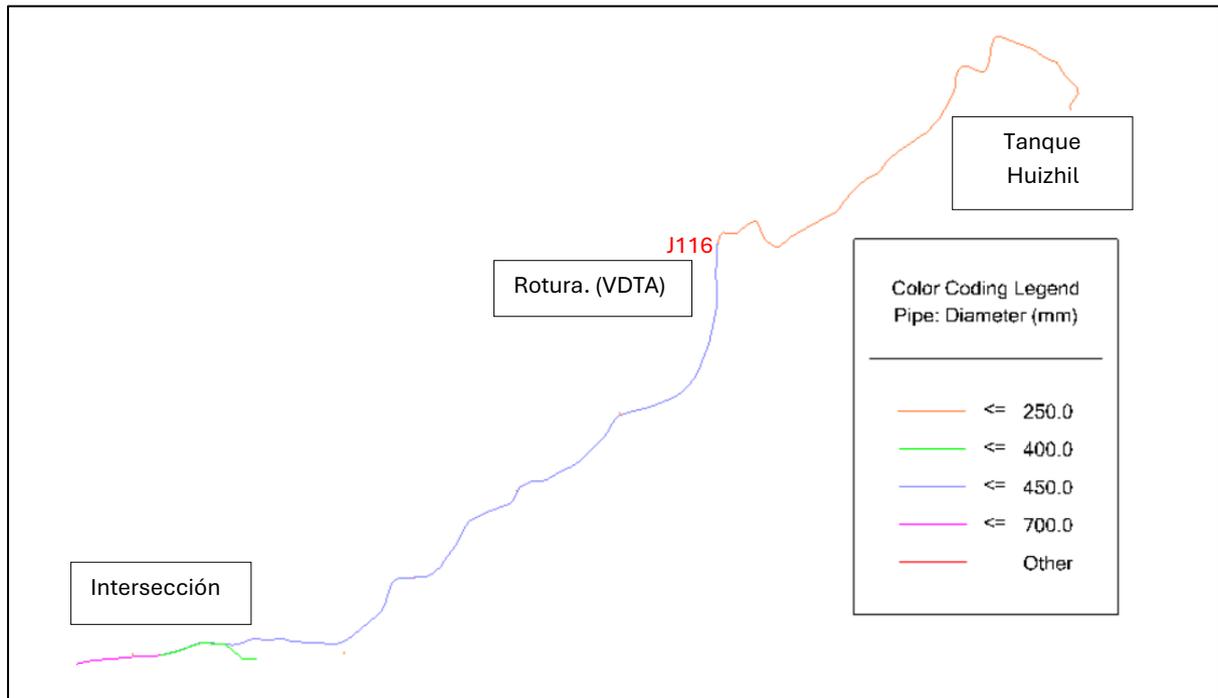


Ilustración 45: Ubicación de válvula de purga para simulación de rotura de tubería en el tramo de Huizhil.

Modelo Actual 2024 y Proyectado 2050

Se realiza la simulación para diferentes caudales de descarga, simulando la rotura de la tubería, cabe mencionar que el tramo Huizhil conduce un caudal de 241.5 l/s. Se considera que las condiciones de las tuberías del sistema se mantienen tanto en el modelo actual como en el modelo proyectado al año 2050.

Para este modelo según el caudal del tramo de estudio se consideran dos caudales para el análisis.

- Caudal 40 l/s

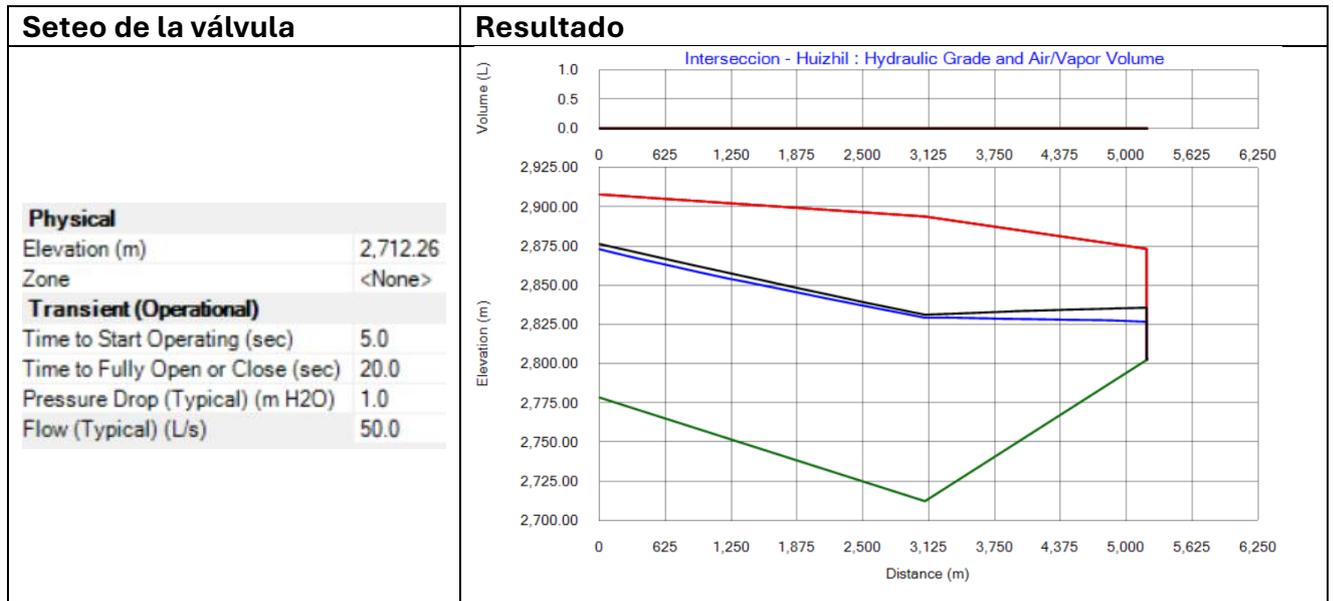


Tabla 21 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 40 l/s. Tramo Huizhil 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

- Caudal 70 l/s

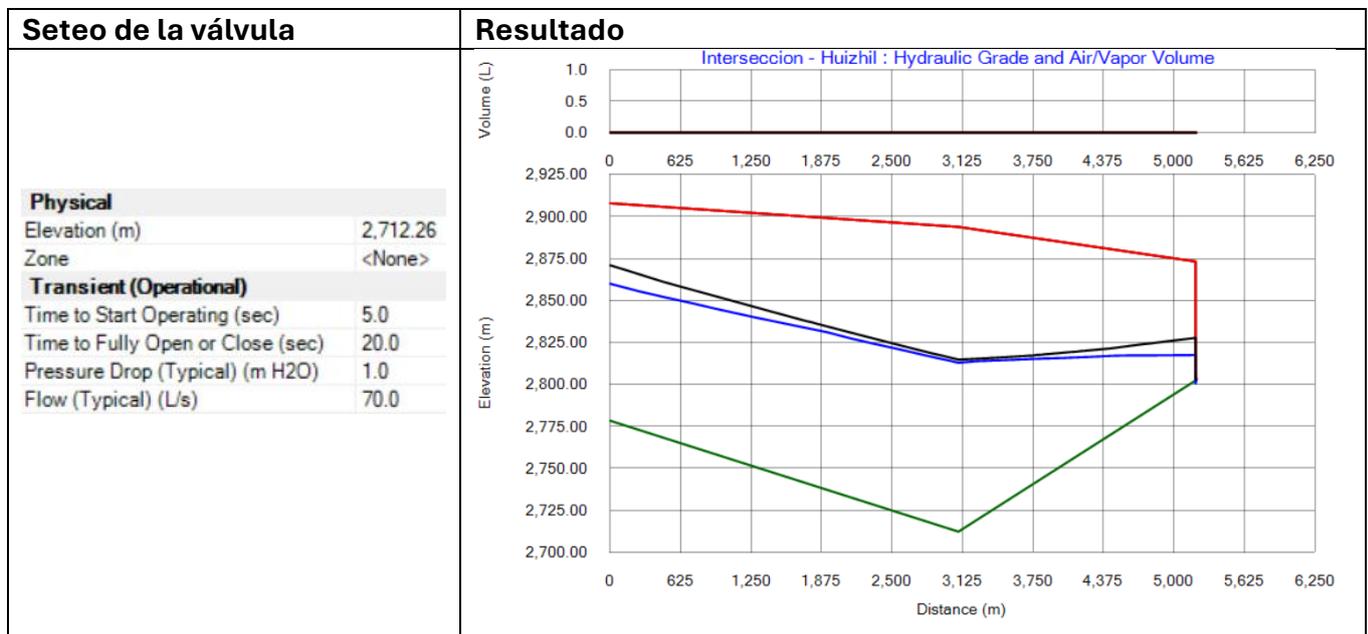


Tabla 22 Resultados de la simulación "Rotura de la tubería en el punto más bajo de la línea", caudal de descarga de 70 l/s. Tramo Huizhil 2024 y 2050. Fuente: Elaboración propia

Según las gráficas generadas con caudales de 50 l/s y 70 l/s, la conducción no cavita y a su vez, no se generan volúmenes de aire a considerar.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR MANIOBRA DE VÁLVULAS

CIERRE LENTO Y RÁPIDO DE VÁLVULA

CIERRE DE VÁLVULA							
Año del modelo				2024		2050	
Tramo	Tipo de cierre	Tiempo crítico	Tiempo de cierre	Sobrepresión		Sobrepresión	
TRAMO ICTOCRUZ	Cierre rápido	38,95 s	10 s	9,97	mca	16,5	mca
			30 s	5,03	mca	8,12	mca
	Cierre lento		120 s	1,64	mca	2,99	mca
TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI	Cierre rápido	29,53 s	10 s	111,7	mca	142,77	mca
			20 s	66,65	mca	92,11	mca
	Cierre lento		120 s	22,37	mca	31,66	mca
TRAMO HUIZHIL	Cierre rápido	20,67 s	10 s	58,97	mca	126,1	mca
			15 s	41,73	mca	91,24	mca
	Cierre lento		120 s	10,38	mca	23,14	mca

Tabla 23: Resumen de resultados de cierre de válvula. Fuente: Elaboración propia

Inicialmente se realiza la simulación del modelo en condiciones estáticas, sin embargo, el objetivo del presente trabajo es el análisis de fenómenos transitorios, por lo que se obtiene el tiempo crítico para cada uno de estos tramos, considerando el recorrido del flujo de agua desde la Planta de Tratamiento de Agua Potable de Sustag, hasta cada uno de los tanques mencionados.

Partiendo de este tiempo crítico, se analiza para cada uno de los tramos, 3 escenarios de cierre de válvula: dos de ellos consideran un cierre rápido ($t < t_c$) y uno considerando un cierre lento ($t > t_c$).

3.1.1. TRAMO ICTOCRUZ

Corresponde al tramo más largo del sistema (21635 m) desde la planta de Sustag hasta el tanque de almacenamiento de Ictocruz. En la actualidad, este tramo presenta recurrentemente varios problemas en las tuberías.

Al realizar la modelación del cierre de la válvula de control ubicada en el tanque de Ictocruz, se obtiene:

Año del modelo				2024		2050	
Tramo	Tipo de cierre	Tiempo crítico	Tiempo de cierre	Sobrepresión		Sobrepresión	
TRAMO ICTOCRUZ	Cierre rápido	38,95 s	10 s	9,97	mca	16,5	mca
			30 s	5,03	mca	8,12	mca
	Cierre lento		120 s	1,64	mca	2,99	mca

Tabla 24: Tipos de cierre en válvula de control y sobrepresiones generadas en modelo 2024 y 2050. Tramo Ictocruz.
Fuente: Elaboración propia

Como se comprueba, mientras el tiempo de la maniobra de cierre sea mayor, la sobrepresión generada en la línea es menor.

Esta línea está compuesta en su mayoría por tuberías de Hierro Ductil y un pequeño tramo por tubería de PVC clase 30.

Las sobrepresiones máximas generadas se producen en el nodo en el que se encuentra la válvula, tanto para el año 2024, como para el año 2050 se observa que las sobrepresiones generadas no se consideran altas, sin embargo, son importantes y se deben considerar por la clase de tubería. Pasados los 2 minutos de cierre, el efecto de la sobrepresión es casi nulo en el sistema.

No se producen presiones negativas en el análisis de este tramo.

3.1.2. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI

Esta línea tiene una longitud de 16227 m y está conformada en su totalidad por tubería de Hierro Ductil. Al realizar el análisis de fenómenos transitorios en Hammer se obtiene los siguientes resultados:

Año del modelo				2024		2050	
Tramo	Tipo de cierre	Tiempo crítico	Tiempo de cierre	Sobrepresión		Sobrepresión	
TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHI	Cierre rápido	29,53 s	10 s	111,7	Mca	142,77	mca
			20 s	66,65	Mca	92,11	mca
	Cierre lento		120 s	22,37	Mca	31,66	mca

Tabla 25: Tipos de cierre en válvula de control y sobrepresiones generadas en modelo 2024 y 2050. Tramo San Miguel de Putushi.

En este caso se observa que al realizar un cierre rápido tanto en el modelo del año 2024 y 2050, se producen sobrepresiones altas en el sistema.

Así mismo, se comprueba que en el año 2050 las presiones son mayores que en el modelo 2024 tanto en cierre rápido como en cierre lento. Sin embargo, Cuando el cierre es controlado y se produce en un tiempo mayor al tiempo crítico, las sobrepresiones del sistema se controlan.

No se producen presiones negativas en el análisis de este tramo.

3.1.3. TRAMO HUIZHIL

Este tramo tiene una longitud de 11238 m y está conformada en su totalidad por tuberías de Hierro Dúctil.

Año del modelo				2024		2050	
Tramo	Tipo de cierre	Tiempo crítico	Tiempo de cierre	Sobrepresión		Sobrepresión	
TRAMO HUIZHIL	Cierre rápido	20,67 s	10 s	58,97	mca	126,1	mca
			15 s	41,73	mca	91,24	mca
	Cierre lento		120 s	10,38	mca	23,14	mca

Tabla 26: Tipos de cierre en válvula de control y sobrepresiones generadas en modelo 2024 y 2050. Tramo Huizhil.

Al realizar el análisis en un cierre rápido de la válvula se comprueba que se generan para el año 2024 sobrepresiones altas, pero bajo el límite admisible por la tubería. Sin embargo, para el año 2050, estas sobrepresiones en un cierre rápido se duplican lo que afectaría de sobremanera a las tuberías. Por otro lado, si se realiza un cierre lento, mayor a 2 minutos las sobrepresiones se controlan.

No se producen presiones negativas en el análisis de este tramo.

- **Análisis General Cierre de Válvulas.**

A mayor caudal se puede generar mayores sobrepresiones, en el sistema Yanuncay se proyecta un aumento de caudal para el año 2050, y se realiza la modelación bajo las mismas condiciones de las tuberías que en el año 2024; por lo que, en todos los casos de análisis de cierre de válvula, en el Modelo 2050 se dan mayores sobrepresiones. Si el caudal es mayor y se produce un cierre rápido de válvulas, la sobrepresión será más grande, pero, si el aumento de caudal se acompaña de un cierre lento, la sobrepresión puede ser controlada.

Al analizar el cierre de válvulas, en ninguno de los tramos se generan presiones negativas, tanto en cierre rápido como lento, lo que significa que la red está correctamente diseñada y operada. Bajo este escenario, no existe riesgo de colapso, ingreso de aire al sistema o daños por cavitación. Sin embargo, es importante verificar que las sobrepresiones que se producen no sean excesivas, ya que podrían comprometer la tubería por otro mecanismo de falla.

Se observa una clara diferencia en las sobrepresiones máximas entre el tramo de Ictocruz, compuesto por tuberías de PVC y Hierro Dúctil, y los tramos de San Miguel y Huizhil, que están conformados completamente por Hierro Dúctil y presentan sobrepresiones significativamente más altas. Esto se debe a que en el tramo de Ictocruz, la presencia de PVC contribuye a la disipación del golpe de ariete, ya que este material tiene una menor celeridad de onda. Como resultado, la velocidad del cambio de presión en este tramo es menor, lo que reduce la sobrepresión generada

3.2. ANÁLISIS DE TRANSITORIOS POR ROTURA DE LA TUBERÍA

Se realizó las modelaciones para el análisis de transitorios por rotura de la tubería modelado con una válvula de descarga a la atmósfera en el punto más bajo del tramo de conducción analizado, dichas modelaciones se realizaron para diferentes caudales de descarga.

3.2.1. TRAMO ICTOCRUZ

Al realizar varias simulaciones para el tramo Ictocruz, para diferentes caudales de descarga en una válvula de purga, se obtiene los siguientes resultados.

TRAMO ICTOCRUZ		
CAUDAL (l/s)	VOLUMEN DE AIRE (l)	CAVITACIÓN
5.5	0.1	NO
6	10.1	NO
7	86.7	NO

Tabla 27: Resultados de simulación con una válvula de purga en modelo 2024 y 2050. Tramo Ictocruz. Fuente: Elaboración propia

La Tabla 27 muestra que, con un caudal de descarga de 5.5 l/s, no se presentan problemas en la conducción. Sin embargo, para caudales superiores, se generan volúmenes de aire que podrían mitigarse mediante la instalación de válvulas de aire. Es importante señalar que ninguna modelación evidenció problemas de cavitación.

3.2.2. TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ

Al realizar simulaciones para el tramo San Miguel de Putushí, para un caudal de descarga de 40 l/s y 60 l/s, se obtiene los siguientes resultados.

TRAMO SAN MIGUEL DE PUTUSHÍ		
CAUDAL (l/s)	VOLUMEN DE AIRE (l)	CAVITACIÓN
40	0	NO
60	0	NO

Tabla 28: Resultados de simulación con una válvula de purga en modelo 2024 y 2050. Tramo San Miguel de Putushí. Fuente: Elaboración propia

La Tabla 28 muestra que, para caudales de descarga de 40 l/s y 60 l/s, no se presentan problemas de cavitación ni de volúmenes de aire, para el tramo San Miguel de Putushí.

3.2.3. TRAMO HUIZHIL

Al realizar simulaciones para el tramo Huizhil, para un caudal de descarga de 40 l/s y 70 l/s, se obtiene los siguientes resultados.

TRAMO HUIZHIL		
CAUDAL (l/s)	VOLUMEN DE AIRE (l)	CAVITACIÓN
40	0	NO
70	0	NO

Tabla 29: Resultados de simulación con una válvula de purga en modelo 2024 y 2050. Tramo Huizhil.

La Tabla 29 muestra que, para caudales de descarga de 40 l/s y 70 l/s, no se presentan problemas de cavitación ni de volúmenes de aire, para el tramo Huizhil.

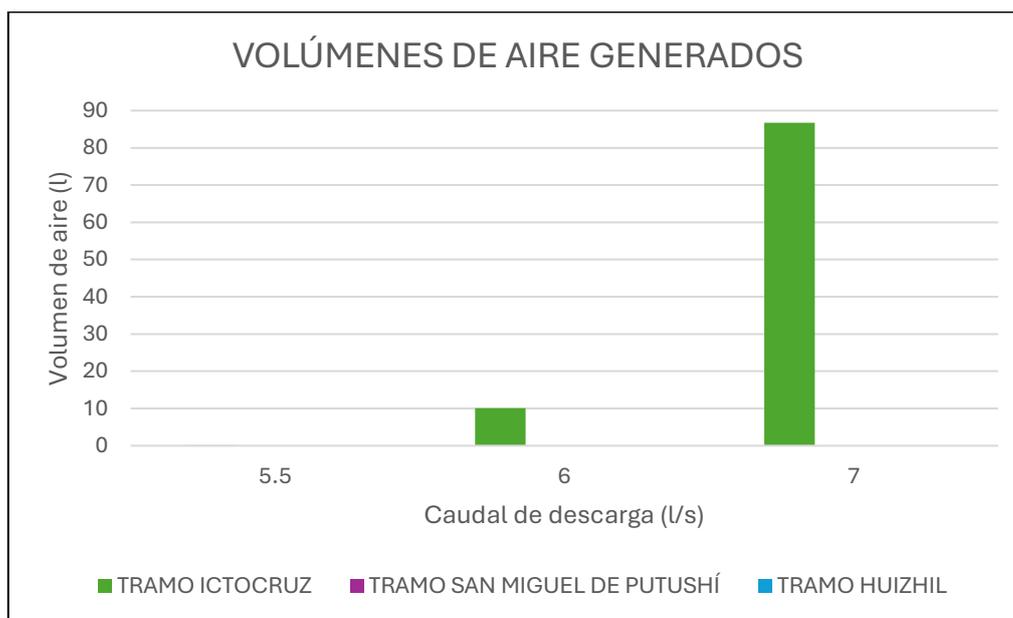


Ilustración 46 Volúmenes de aire generados en las modelaciones de los diferentes tramos de conducción

La Ilustración 46 muestra que, únicamente en el tramo de Ictocruz, la instalación de la válvula de purga en el punto más bajo de la línea genera volúmenes de aire que deben ser considerados. Esto se debe a que su caudal es inferior al de otros tramos, por lo que una rotura en la tubería podría provocar la descarga de la mayor parte del caudal, generando volúmenes de aire en la conducción.

- **Análisis General Rotura de Tubería.**

Al realizar la modelación de rotura de la tubería mediante la simulación con una válvula de purga en el punto más bajo, es importante mencionar que, si el caudal de descarga está controlado este no causa ningún problema de fenómenos transitorios, mientras que, si se da una rotura grande en la que el caudal de descarga es mayor, se genera mayor volumen de aire, por lo que, se recomienda el diseño de elementos de control o de aire, en el punto más alto del tramo analizado.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis del sistema de conducción del Sistema de Agua Potable Yanuncay, realizado mediante modelaciones unidimensionales de flujo calibrado, permitió evaluar su comportamiento hidráulico. Además, el estudio de fenómenos transitorios en tres tramos específicos, utilizando el software HAMMER, proporcionó información clave para la optimización y seguridad del sistema.
- Se recopiló información topográfica, condiciones hidráulicas y propiedades del flujo del sistema de conducción para desarrollar un modelo unidimensional de flujo en el software HAMMER, permitiendo así una representación precisa de su comportamiento hidráulico.
- Se realizaron modelaciones hidráulicas del sistema de Yanuncay considerando los parámetros del año 2024 y su proyección al año 2050, permitiendo así evaluar su comportamiento a futuro.
- Se han realizado distintos análisis en 3 tramos diferentes del Sistema de Conducciones Yanuncay, y se ha obtenido información variada de cada uno de ellos tanto para el escenario de cierre de válvula, como para la rotura de tubería. Esta diversidad en los resultados, nos permite concluir que, en un mismo sistema, es importante realizar el análisis de fenómenos transitorios en cada uno de los tramos de manera independiente y no un análisis de manera general de todo el sistema, ya que un análisis detallado, permitirá al diseñador o analista tomar las decisiones adecuadas para protección del sistema en puntos específicos.
- Para el análisis de cierre de válvula y rotura de tubería, es importante considerar que las simulaciones se han realizado bajo las mismas condiciones para los modelos de los años 2024 y 2050. Los resultados muestran que, en 2050, las condiciones son más desfavorables debido al crecimiento poblacional y al

aumento en la demanda de agua potable. Por ello, se recomienda revisar el horizonte de diseño de los tramos de la línea de conducción, así como evaluar el estado de los accesorios y demás componentes del sistema para garantizar su operatividad y eficiencia a largo plazo.

Ing. Karla Gabriela Lliguisaca Parra

Autora

CI: 0107097313

Email: gabriela.lliguisaca@es.uazuay.edu.ec

Ing. Jessenia Karina Pacheco Galindo

Autora

CI: 0104988597

Email: jessenia.pacheco@es.uazuay.edu.ec

Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez Ph.D

DIRECTOR

5. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Andrade; Lizeth, & Pesantez; Jerica. (2020). *Análisis de los niveles y caudales de entrada de las reservas de los sistemas de agua potable Machángara, Yanuncay y Tomebamba.*
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2014). *Ley Orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua.* <https://www.regulacionagua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/03/Ley-Org%C3%A1nica-de-Recursos-H%C3%ADricos-Usos-y-Aprovechamiento-del-Agua.pdf>
- Avila; Rosa. (2013). *SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y AGUAS RESIDUALES DE LA CIUDAD DE CUENCA.*
- Ayala, H. J. B., Sanz, F., Alzamora, F. M., & Cabrera, E. (n.d.). *El análisis de transitorios en grandes conducciones para el transporte de agua. Aplicación al trasvase Júcar-Vinalopó.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4918.8881>
- Comisión Nacional del Agua. (n.d.). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.* www.conagua.gob.mx
- Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (n.d.). *El golpe de ariete.*
- Monge Redondo, M. (2017, September). *¿Qué es la cavitación? ¿Cómo evitarla?*
- Mosquera; Julio. (2012). *GESTIÓN POR PROCESOS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE “SUSTAG”, DE ETAPA.*
- Nelson, C., Daniel, C., Gloria, M., Juan, C., & Javier, S. (2018). *MODELACIÓN MATEMÁTICA DEL SISTEMA HIDRÁULICO DE LA RED DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA.*
- Pérez, L., & Guitelman, A. (2005). *ESTUDIO DE TRANSITORIOS: GOLPE DE ARIETE.*

- Savic, D. A., Kapelan, Z. S., & Jonkergouw, P. M. R. (2009). Quo vadis water distribution model calibration? In *Urban Water Journal* (Vol. 6, Issue 1, pp. 3–22). <https://doi.org/10.1080/15730620802613380>
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA, G. D. R. P. Y. A. (n.d.). *Líneas de Conducción por gravedad*.
- Secretaría del Agua. (n.d.). *NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES*. <https://doi.org/10.07>
- Soria, M., & Peña, P. (2017). *ANÁLISIS DEL FLUJO NO PERMANENTE EN UNA CONDUCCIÓN DE ALTA CARGA CON RAMIFICACIONES*.
- Toledo, A. (2009). *Estudio y experimento del fenómeno de golpe de ariete, debido a cierre de válvulas para el laboratorio de hidráulica*.
- Varas, E., & Uribe, H. (n.d.). *GOLPE DE ARIETE*.