



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE FLUJO NO PERMANENTE PARA ESCENARIOS DE OPERACIÓN NORMAL
Y EMERGENTE EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE ALTA CARGA, PROYECTADO
DESDE LA ZONA ORIENTAL HASTA EL CENTRO-NORTE DE LA CIUDAD DE QUITO,
PROVINCIA DE PICHINCHA**

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

AUTOR: Cristian Elías Auquilla Criollo

TUTOR: María Gabriela Soria Pugo

Quito – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Cristian Elías Auquilla Criollo con documento de identificación N° 1752647535 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



Cristian Elías Auquilla Criollo

1752647535

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Yo, Cristian Elías Auquilla Criollo con documento de identificación N° 1752647535, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Análisis de Flujo no permanente para Escenarios de operación Normal y Emergente en un Sistema de Conducción de alta carga, proyectado desde la Zona Oriental hasta el Centro-Norte de la Ciudad de Quito, Provincia de Pichincha”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



Cristian Elías Auquilla Criollo

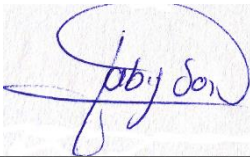
1752647535

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, María Gabriela Soria Pugo con documento de identificación N° 1803981214, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE FLUJO NO PERMANENTE PARA ESCENARIOS DE OPERACIÓN NORMAL Y EMERGENTE EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE ALTA CARGA, PROYECTADO DESDE LA ZONA ORIENTAL HASTA EL CENTRO-NORTE DE LA CIUDAD DE QUITO, PROVINCIA DE PICHINCHA, realizado por Cristian Elías Auquilla Criollo con documento de identificación N° 1752647535, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 11 de agosto del 2023

Atentamente,



Ing. María Gabriela Soria Pugo, MSc.

1803981214

ANÁLISIS DE FLUJO NO PERMANENTE PARA ESCENARIOS DE OPERACIÓN NORMAL Y EMERGENTE EN UN SISTEMA DE CONDUCCIÓN DE ALTA CARGA, PROYECTADO DESDE LA ZONA ORIENTAL HASTA EL CENTRO-NORTE DE LA CIUDAD DE QUITO, PROVINCIA DE PICHINCHA

UNSTEADY FLOW ANALYSIS FOR NORMAL AND EMERGENCY OPERATION SCENARIOS IN A HIGH LOAD CONDUCTION SYSTEM, PROJECTED FROM THE EASTERN ZONE TO THE CENTER-NORTH OF THE CITY OF QUITO, PROVINCE OF PICHINCHA

Cristian Auquilla-Criollo ¹, María Soria-Pugo²

Resumen

En este trabajo se analiza un sistema de conducción que cuenta con un trazado a través de zonas montañosas o países en cual se encuentren atravesadas por la cordillera de los andes, la definimos como un sistema de conducción de alta carga debido a la diferencia de nivel, ya que se considera la ubicación de los sitios de captación que se pueden encontrar en cotas muy elevadas y que debe transportar caudales hacia sitios con cotas más bajas.

Se plantean escenarios de operación normales y emergentes a fin de controlar sobrepresiones presentadas en el sistema de conducción. Previo a la simulación en régimen no permanente se determinó diámetros mediante el análisis de régimen no permanente, con el propósito de obtener mayor eficiencia en cuanto al transporte del caudal a través de la conducción y sus ramificaciones.

Esta investigación busca definir alternativas de operación de válvulas de control, de purga y de aire empleando patrones de cierre y apertura distintos, mediante la modelación y análisis de flujo no permanente, a fin de obtener condiciones de operación adecuados para evitar sobrepresiones y subpresiones en la tubería, garantizando que los

Abstract

This work analyzes a conduction system with a route through mountainous areas or countries crossed by the Andean Mountain range. We define it as a high load conduction system due to the difference in level, since it considers the location of the catchment sites that can be found at very high elevations and that must transport flows to sites with lower elevations.

Normal and emergent operation scenarios are considered in order to control overpressure in the conduction system. Prior to the simulation in non-permanent regime, diameters were determined by means of the analysis of non-permanent regime, with the purpose of obtaining greater efficiency in terms of flow transport through the conduction and its branches.

This research seeks to define alternatives for the operation of control, purge and air valves using different closing and opening patterns, through the modeling and analysis of unsteady flow, in order to obtain adequate operating conditions to avoid overpressure and underpressure in the pipeline, ensuring that the pipe thicknesses withstand the working pressures. The modeling will be performed in the HAMMER program.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito – Ecuador

² Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito – Ecuador

Autor para correspondencia: cauquillac@est.ups.edu.ec, msoria@ups.edu.ec

Auquilla / Análisis de flujo no permanente para escenarios de operación normal y emergente en un sistema de conducción de alta carga, proyectado desde la zona oriental hasta el centro-norte de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha

espesores de la tubería resistan las presiones de trabajo. El modelo se realizará en el programa HAMMER.

Keywords: Flow, Unsteady flow, HAMMER, Overpressure, Conduction System.

Palabras Clave: Caudal, Flujo no permanente, HAMMER, Sobrepresiones, Sistema de Conducción.

1. Introducción

En el presente trabajo se indica el análisis para escenarios normales y emergentes en una línea de conducción con flujo no permanente de alta carga. El sistema de conducción se considera de alta carga debido a que esta se encuentra inmersa en una zona topográfica atravesada por una red de montañas, lo cual hace que exista cambios bruscos de pendientes en la línea de conducción, misma que busca transportar el caudal desde la zona de captación y distribuir a los sectores que han de ser beneficiados. “Las obras hidráulicas forman parte de los servicios vitales que hoy recibe la humanidad, y son cada vez más amenazadas por el impacto de fenómenos naturales como los sismos o terremotos” [1]. “Los estudios para satisfacer la necesidad de los usuarios son de prioridad y llevan al análisis y diseño de las líneas de conducción de alta carga con sus respectivas ramificaciones según sea el caso” [2]. Para desarrollar un mejor análisis del flujo no permanente en conductos a presión se estudia los fenómenos transitorios, en especial el golpe de ariete.

La línea de conducción del caso de análisis se encuentra ubicada en la provincia de Pichincha, cantón Quito, conecta las plantas de tratamiento de la zona centro-norte y oriente. La necesidad de este análisis responde a escenarios de operación regulares durante la vida útil de un proyecto tipo y a la ubicación topográfica de la tubería que durante su funcionamiento podría presentar escenarios imprevistos que pueden suceder al estar ubicada en zonas de alto relieve topográfico o por presentar en su trazado cruces con vías o cauces. Es así que al analizar el sistema con escenarios emergentes se prevé simular la ruptura de la tubería, debido a los factores antes mencionados, además de la presencia frecuente de movimientos telúricos en el Ecuador. Además de los escenarios emergentes también se simularán los escenarios de operación habituales o normales que suceden debido a la manipulación controlada accesorios.

Mediante el modelado se establece los patrones de cierre y apertura de los accesorios inmersos en la línea de conducción, también se controlará las subpresiones o sobrepresiones que se

puede generar debido al relieve topográficos con la que cuenta el trazado de la tubería. Para el efecto de este análisis se trabaja con la línea de conducción principal, comprendido por los tramos 1, 2 y 3.



Figura 1. Vista en planta de la línea de conducción y sus derivaciones.

2. Materiales y Métodos

Para el análisis de la conducción con ramificaciones planteada se partirá de ciertas características particulares que presenta el entorno en el cual se encuentre inmersa la línea de conducción como la topografía, la demanda que debe satisfacer esta línea de conducción, el material, espesores, diámetros etc. La necesidad de dar solución a posibles eventos atípicos en el futuro hace que sea posible utilizar una metodología aplicada. Según [11] “La característica básica de la investigación aplicada es resolver problemas”. Es por ello que se escoge esa metodología ya que se busca dar solución a través de distintos patrones de operación válvulas en la línea de conducción principal.

2.1. Caudales

Se plantea el uso de información básica, en este caso datos de caudales que se transportarán, cotas, y longitud de la tubería. Según [5] “El caudal es un dato esencial en estos sectores, ya que de ello depende el dimensionamiento de presas, embalses, así como la construcción de obras viales”. A continuación, se presenta un cuadro con la información. Indicada:

Tabla 1. Datos de caudales

Ubicación	Caudal (l/s)	Cota (msnm)	Longitud (m)
PTT1			
Derivación 1	4500	3108,68 2418,7	13500
Derivación 1	3000	2418,7 2850,47	12700
Derivación 2			
Derivación 2	1500	2850,47 2972,7	1700
PTT2			

Se considera estos caudales porque son los utilizados para el diseño de las plantas de tratamiento, ubicadas en el centro-norte y oriente de Quito.

2.2. Escenarios de Operación

El tiempo operacional de la válvula se planteó inicialmente 90 segundos, con un intervalo de estabilización de 40 segundos entre cada operación de válvula, sin embargo, se probó varios tiempos para la operación de la válvula desde los 70 segundos hasta los 300 s, periodo en el cual las válvulas actúan de manera directa en el sistema de conducción, manteniendo el periodo de 40 segundos como intervalo de estabilización. Según [15] “La simulación hidráulica de sistemas de tuberías presurizadas es un paso bastante crucial para la gestión de grandes redes de distribución de agua, así como para la toma de decisiones en condiciones normales y anormales”. Es por ello que se simula dichos escenarios para tener un mejor análisis acerca de los sucesos que conlleva la buena o mala operación de los accesorios en los diferentes escenarios de operación.

2.2.1. Escenario Normal

En los escenarios normales existen procesos por los cuales el sistema de conducción funciona de acuerdo a parámetros establecidos. Las condiciones de operación son estables y predecibles, garantizan el correcto funcionamiento del sistema y la dotación de agua potable.

2.2.2. Escenario Emergente

Los escenarios emergentes son aquellos que representa un riesgo mayor, debido a que se pueden presentar de forma inesperada, siendo de alto riesgo. “Mediante el análisis de estos escenarios se pretende establecer procesos de mitigación que ayuden a disminuir los potenciales daños” [2]. Este puede surgir como resultado de eventos inesperados, desde una mal operación hasta factores geográficos.

2.3. Tipo de material y espesor

2.3.1. Obtención del material

El material empleado debe cumplir con ciertas características, debido a las altas cargas de presión presentes, además de la sobrepresión. “Se seleccionó al acero API 5L grado 60, debido a su alto valor de esfuerzo de fluencia, lo que permitió reducir los espesores requeridos para los tramos de máximas presiones” [2]. “El moderno tubo de acero API 5L es una micro aleación de acero baja en carbono o ultra baja en carbono. Es un producto de alto valor y hecho con la más alta tecnología” [3].

Tabla 2. Características de la tubería API 5L x60

Propiedad	Símbolo	Unidad	Valor
Peso específico del acero	ρ	Kg/m ³	7,85E+03
Módulo de elasticidad del acero	E	Pa	2,07E+11
Esfuerzo de fluencia	s	Pa	4,08E+08

El uso de este tipo de tubería no es diseñado específicamente para el uso en sistemas de agua potable, sin embargo, al estar fabricada de acero inoxidable, su alta resistencia a la corrosión, y su bajo contenido de carbono y la resistencia a presiones altas la hacen ideal para nuestro sistema de conducción.

2.3.2. Espesores

Para la obtención de espesores se procede a emplear la ecuación general de Barlow, en el cual se tomará esfuerzos de trabajo de la tubería de 0.5 para escenarios normales y de 0.75 para escenarios

emergentes. Por lo tanto, [9] propone la siguiente ecuación para el cálculo de espesores:

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot s_T} \quad (1)$$

Donde:

e = Espesor de la tubería (in).

P = Presión interna de la tubería (PSI).

D = Diámetro externo de la tubería (in).

s_T = Esfuerzo del trabajo del acero de la tubería en (PSI).

El material empleado será el recomendado en base a la normativa ANSI/AWWA C200, el cual hace hincapié en que el espesor con el cual se trabaje sea el mínimo, el cual será obtenido a partir de las siguientes ecuaciones. Para lo cual, [10] propone las siguientes ecuaciones para el cálculo de espesores según el diámetro de la tubería:

Ecuación para tubería con diámetro menor a 1354 mm

$$e_m = \frac{D}{288} \quad (2)$$

Ecuación para tubería con diámetro mayor a 1354 mm

$$e_m = \frac{D+20}{400} \quad (3)$$

Ecuación para calcular el espesor total de la tubería

$$e_T = e_M + e_C + \frac{P \cdot D}{2 \cdot s_T} \quad (4)$$

Donde:

e_M = Espesor por manipulación

e_C = Espesor por corrosión (2 mm)

Dado el análisis de las ecuaciones mencionadas se decide trabajar con espesores que se encuentran normalizados, para facilitar la adquisición de la tubería con cualquier proveedor. Se trabaja con espesores de análisis previos. Para lo cual [2] propone los siguientes valores de espesores:

Tabla 3. Espesores Normalizados para cada tramo a intervenir

TRAMO	ABS. INICIAL	ABS. FINAL	Q DISEÑO (l/s)	ESPESOR NORMALIZADO (mm)
1	0	2712,14	4300	9,53
	2712,14	4286,26		12,70
	4286,26	7270,18		19,05
	7270,18	13559,7		25,40
	13559,7	21569,03		31,75
2	21569,03	24310,74	3000	31,75
	24310,74	26722,92		25,40
	26722,92	27633,18		19,05
	27633,18	27964,18		12,70
3	27964,18	28224,77	1500	9,53
	28224,77	29587,77		7,93

2.4. Cálculo de diámetros de la tubería

El tamaño del diámetro de la tubería de presión es el resultado de un análisis de diseño mediante el cual se considera el diámetro que genere pérdidas de caudal y de energía mínimas [6]. La selección óptima del diámetro corresponde al correcto funcionamiento de los accesorios a lo largo del sistema de conducción. Para el presente trabajo se utilizan válvulas de control de flujo, debido a que esta línea de conducción actúa con caudales distintos, es decir no es un caudal único, para ellos en la mayoría de la línea de conducción se intervienen con válvulas de control de caudal. Estos datos son tomados a partir del análisis del flujo permanente, el cual permite determinar diámetros que generen pérdidas mínimas.

Tabla 4. Diámetros a partir del Flujo Permanente

TRAMO	ABS. INICIAL	ABS. FINAL	Q DISEÑO	DIÁMETRO
1	0	2712,14	4300	1400
	2712,14	4286,26		
	4286,26	7270,18		
	7270,18	13559,7		
	13559,7	21569,03		
2	21569,03	24310,74	3000	1300
	24310,74	26722,92		
	26722,92	27633,18		
	27633,18	27964,18		
3	27964,18	28224,77	1500	700
	28224,77	29587,77		

2.5. Software y Elementos de apoyo

2.5.1. Hammer

Este paquete computacional trabaja bajo el principio de la combinación lineal de las

ecuaciones fundamentales de flujo transitorio, la determinación del multiplicador lineal, la transformación del sistema de ecuaciones diferenciales a ordinarias y la determinación de la carga piezométrica y velocidad en el tiempo y espacio. “El motor computacionalmente riguroso de OpenFlows HAMMER y la interfaz fácil de usar para identificar, administrar y mitigar de manera eficiente los riesgos asociados con los transitorios” [4].

2.6. Patrones de Operación en escenarios

2.6.1. Normales

2.6.1.1. Cerrado de válvula de control de caudal en el tramo 4

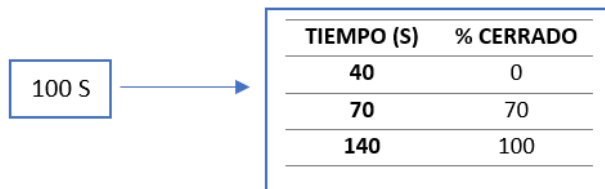


Figura 2. Patrón de cerrado para escenario de operación normal 1.

2.6.1.2. Cerrado de válvula de control de caudal en el tramo 1,4 y 5.

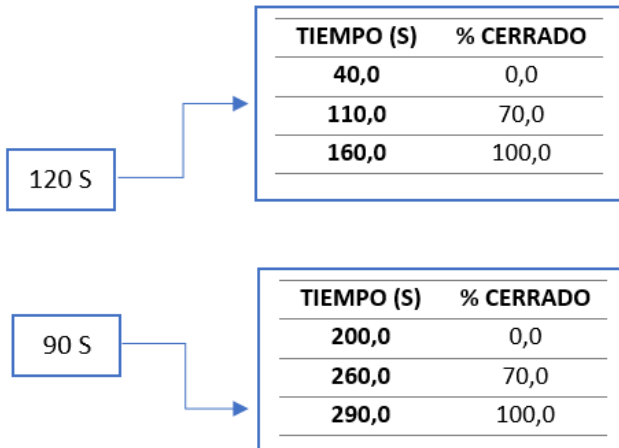


Figura 3. Patrón de cerrado para escenario de operación normal 2.

2.6.1.3. Cerrado de Válvulas de control de caudal, y apertura y cerrado

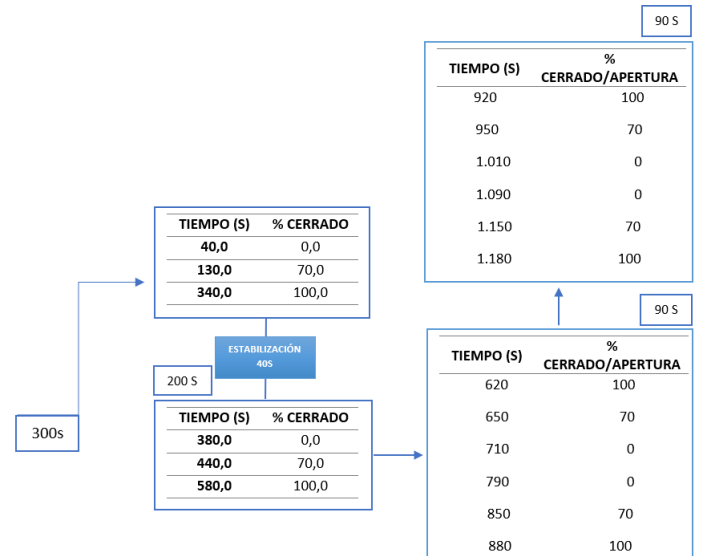


Figura 4. Patrón de cerrado para escenario de operación normal 3.

2.6.2. Emergentes

2.6.2.1. Intervención de válvulas de purga, sin previamente cerrar válvulas de control de caudal

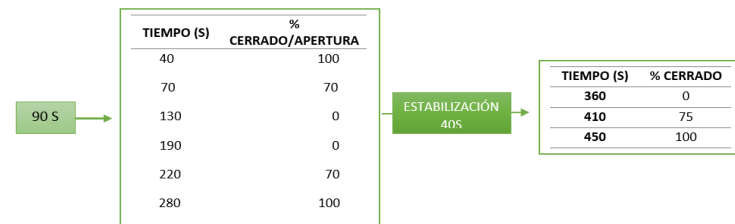


Figura 5. Patrón de cerrado para escenario de operación emergente 1.

2.6.2.2. Apertura de válvulas sin ningún tipo de orden

2.6.2.3.

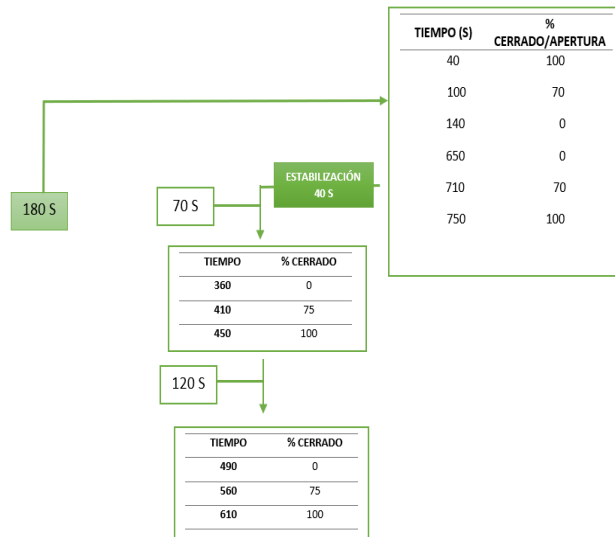


Figura 6. Patrón de cerrado para escenario de operación emergente 2.

En los escenarios propuestos se tomó en consideración el patrón de cerrado o apertura, que controlara efectos no deseados en nuestro sistema como subpresiones o sobrepresiones, añadido a eso se establece un tiempo de estabilización para un mejor funcionamiento de las válvulas.

2.7. Parámetros iniciales para modelado en Software HAMMER

Hay que definir aspectos iniciales para el modelado en Hammer, que son los siguientes:

Tabla 5. Parámetros iniciales para el modelado

Parámetros para el cálculo de la velocidad de onda		
Líquido: Agua a 20°C		
Módulo de Elasticidad	22312.69	kg/cm2
Gravedad específica	0.998	-
Material: Acero		
Módulo de Young	2110812.12	kg/cm2
Relación de Poisson	0.3	-
Espesor máx.:	31.75	mm

Las válvulas de control y purga cuentan con las siguientes curvas características durante su funcionamiento.

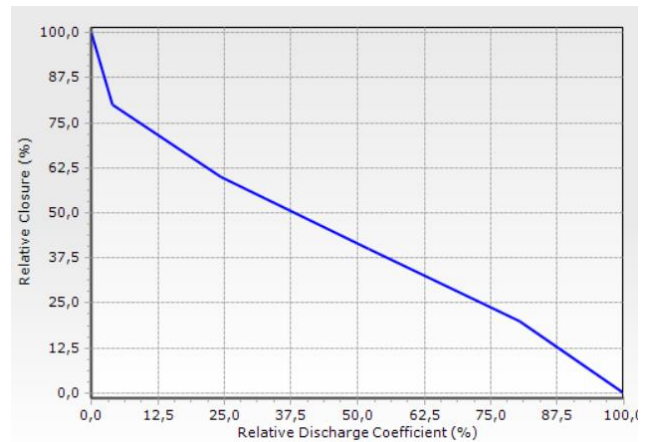


Figura 7. Curva característica de la válvula de control FC1-FC2, Hammer.

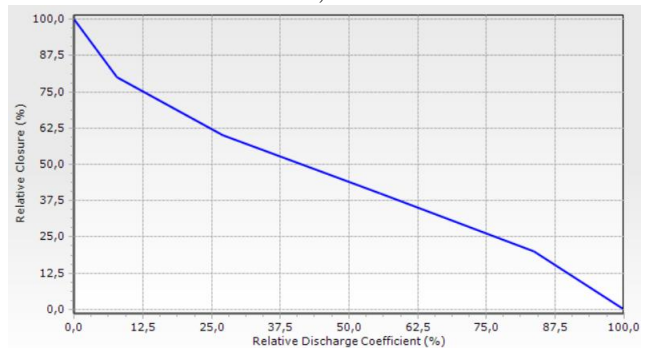


Figura 8. Curva característica de la válvula de control HAMMER.

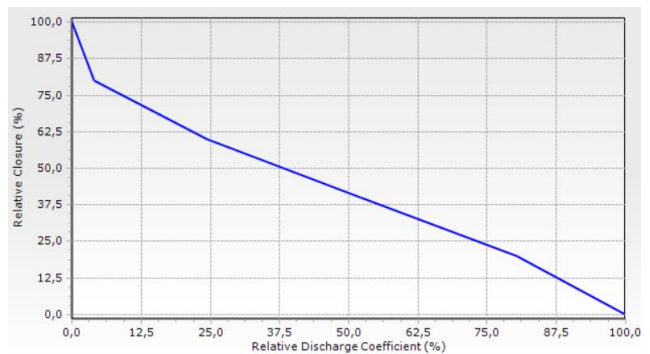


Figura 9. Curva característica de la válvula de control FC3-FC4, Hammer.

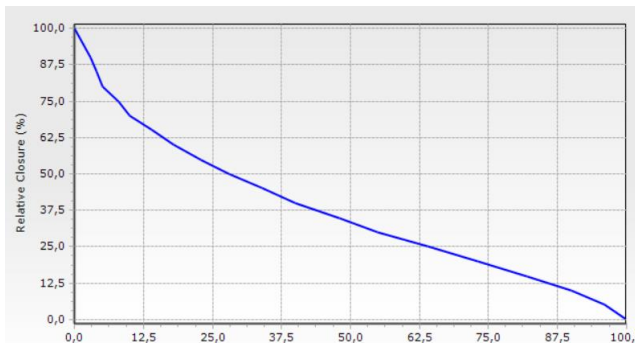


Figura 10. Curva característica de la válvula de purga FC5-FC6, Hammer.

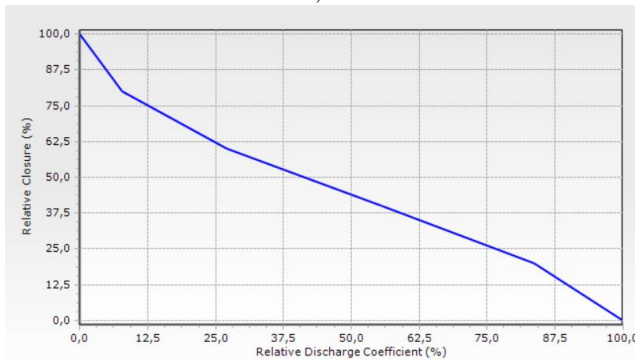


Figura 11. Curva característica de la válvula de purga, Hammer.

Además, se instala válvulas de aire en zonas topográficas altas, zonas de descenso y cambios de pendiente. Según [13] “Las válvulas de aire son un medio clave para limitar y controlar la presencia de aire y los comportamientos erróneos asociados al aire atrapado en los sistemas de tuberías”. Para minimizar dichos errores integra las siguientes curvas características al programa Hammer.

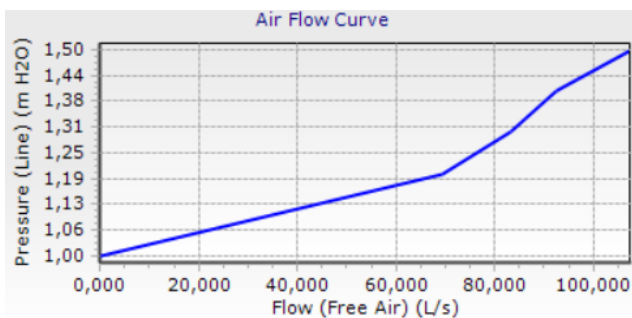


Figura 12. Primera función evacuar aire, Hammer.

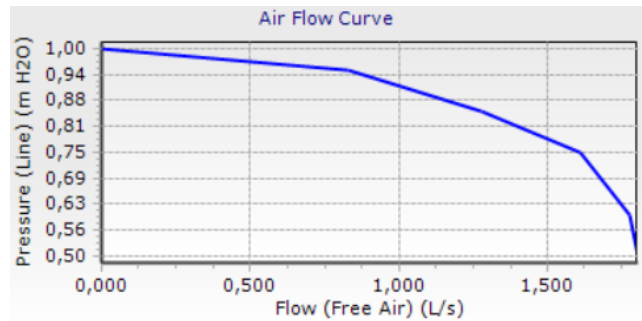


Figura 13. Segunda función ingreso de aire, Hammer.

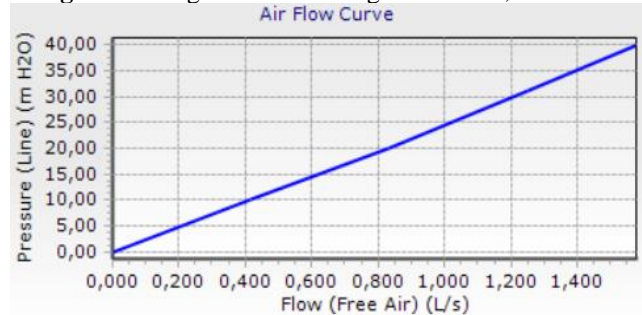


Figura 10. Tercera función purga de aire bajo presión, Hammer.

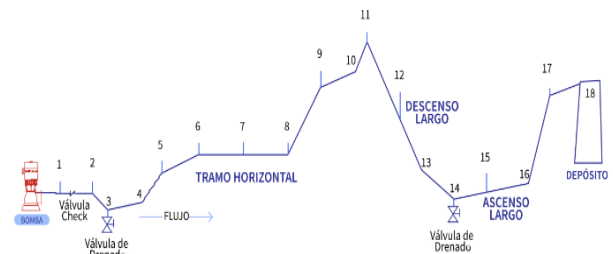


Figura 14. Ubicación de válvulas de aire. [12]

3. Resultados y Discusión

Se presentan los diámetros que han sido verificados para realizar cada uno de los escenarios propuestos.

Tabla 6. Diámetros verificados.

TRAMO	DIÁMETRO
1	1400
2	1300
3	700

A continuación, se presentan los resultados de cada uno de los escenarios modelados, los cuales constan de normales y emergentes. Para ello se cuentan con puntos en los cuales se controlarán las presiones, que se encuentran en el siguiente gráfico:

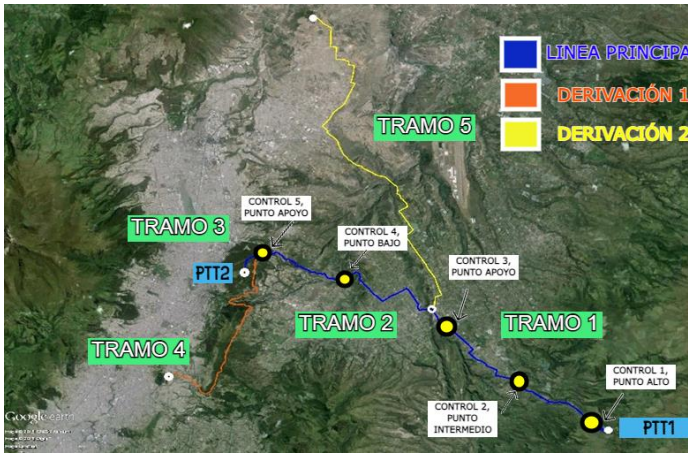


Figura 15. Vista en planta de los tramos a intervenir y puntos de control.

Para los puntos de control se toma aspectos característicos topográficos tales como zonas elevadas y bajas, también se cuenta con puntos de apoyo en una topografía intermedia a los puntos altos y bajos, además de puntos de apoyo aleatorios a lo largo de la línea de conducción principal.

3.1. Escenarios Normales

3.1.1. Escenario 1: Simulación de escenario mediante cerrado en la válvula de control de caudal (FCV) del tramo 4

A partir de los perfiles topográficos adquiridos a través de la recopilación de información se establecen puntos estratégicos para la ubicación de los accesorios, en este caso válvulas de control de caudal. Una válvula de aguja se utiliza para controlar con precisión el caudal de gases o líquidos limpios. Los ajustes graduales del vástago y el émbolo permiten un control suave del caudal [8]. Para lo cual es necesario establecer un patrón de cerrado, esto se hace a partir de la curva característica propia de la válvula utilizada donde se analiza el porcentaje de cerrado vs el coeficiente de flujo (kv).

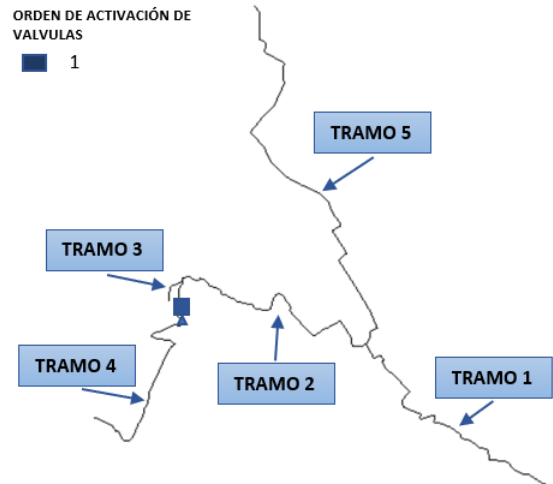
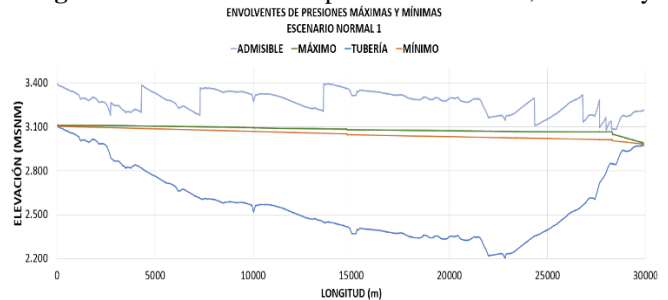


Figura 16. Ubicación de Válvula con patrón de cerrado, Hammer.

En este escenario se prevé que la válvula ubicada en el tramo 4 suspenda su operación, es decir, se cierra.

Comprobamos que el caudal no supere a la línea de la tubería, ya que en se construye el sistema de conducción y no deberá superar este, así evitando problemas de cavitación y sobrepresiones. Según [14] “Si la presión en la tubería desciende hasta la presión de vapor o por debajo de ella, se formará cavitación”. Provocando que estas cavidades creadas sean perjudiciales para la tubería.

Figura 17. Envoltentes de presiones máximas, mínimas y



admisibles, para escenario de operación 1, Excel.

Tabla 7. Resultados en nodos de la tubería principal, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
CONTROL 1	100	8,13	9,15	283,21
CONTROL 2	6700	432,08	450,46	566,13
CONTROL 3	14600	632,34	661,65	943,55
CONTROL 4	22650	825,02	865,44	943,55
CONTROL 5	29500	10,32	19,08	235,66

Tabla 8. Resultados en nodos de las derivaciones, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
DERIVACIÓN 1	27955	161,3	213,4	283,2
DERIVACIÓN 2	14615	633,1	662,4	943,6

3.1.2. Escenario 2: Cierre de válvulas en el tramo 1 y 5 con un patrón de cerrado principal y el tramo 4 con uno diferente.

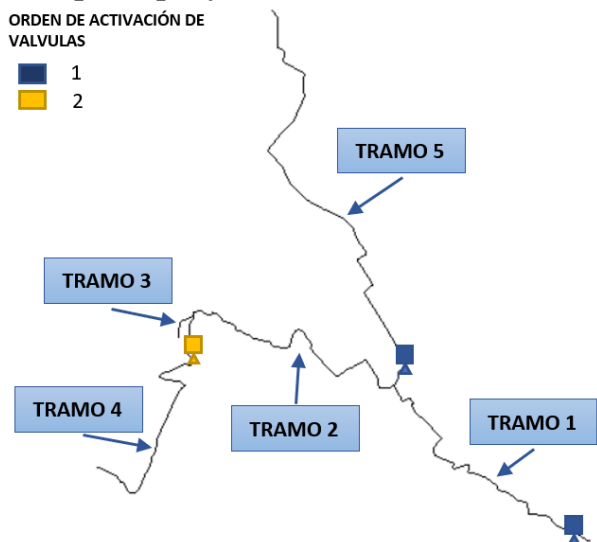


Figura 18. Ubicación de Válvulas con patrón de cerrado, Hammer.

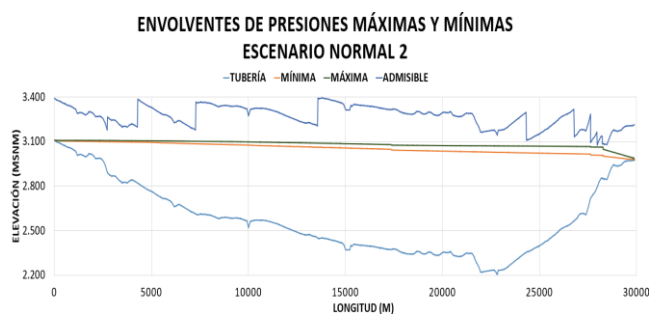


Figura 19. Envolventes de presiones máximas, mínimas y admisibles, para escenario de operación 2, Excel.

Tabla 9. Resultados en nodos de la tubería principal, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
CONTROL 1	100	6,2	9,04	283,21
CONTROL 2	6700	428,09	448,57	566,13
CONTROL 3	14600	627,46	658,6	943,55
CONTROL 4	22650	819,99	867,28	943,55
CONTROL 5	29500	8,45	18,79	235,66

Tabla 10. Resultados en nodos de las derivaciones, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
DERIVACIÓN 1	27955	157,2	211,5	283,2
DERIVACIÓN 2	14615	628,2	659,5	943,6

3.1.3. Escenario 3: Cerrado de válvulas de control de flujo y apertura de válvula de purga

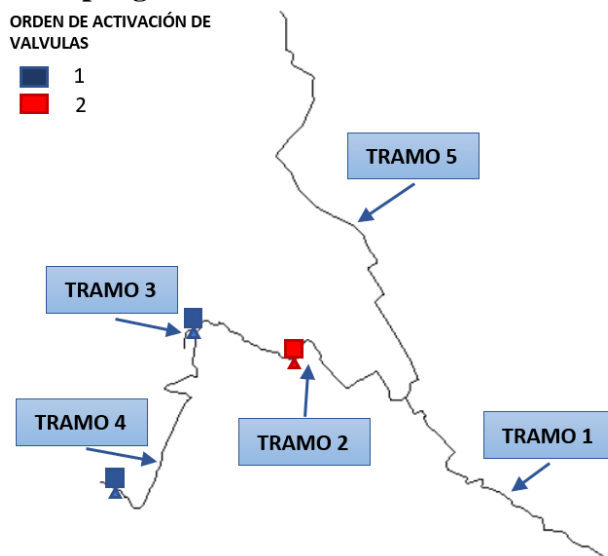


Figura 20. Ubicación de Válvulas con patrón de cerrado y purga, Hammer.

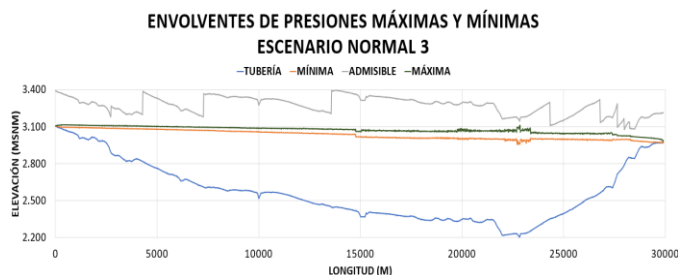


Figura 21. Envolventes de presiones máximas, mínimas y admisibles, para escenario de operación 3, Excel.

Tabla 11. Resultados en nodos de la tubería principal, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
CONTROL 1	100	7,97	8,58	283,21
CONTROL 2	6700	434,44	431,49	566,13
CONTROL 3	14600	632,17	637,48	943,55
CONTROL 4	22650	820,58	830,58	943,55
CONTROL 5	29500	7,86	10,89	235,66

Tabla 12. Resultados en nodos de las derivaciones, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
DERIVACIÓN 1	27955	175,2	148,1	283,2
DERIVACIÓN 2	14615	656,0	621,0	943,6

3.2. Escenarios emergentes

3.2.1. Escenarios 1: Intervención de válvulas de purga, sin previamente cerrar válvulas de control de caudal. Solución.

En este escenario se plantea que no se intervengan las válvulas de control de flujo, se accionaran las válvulas con el patrón de purga de manera inmediata.

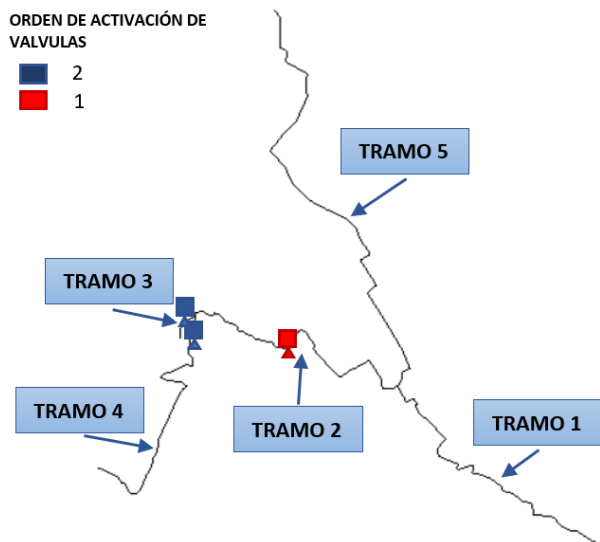


Figura 22. Ubicación de Válvulas con patrón de purga, Hammer.

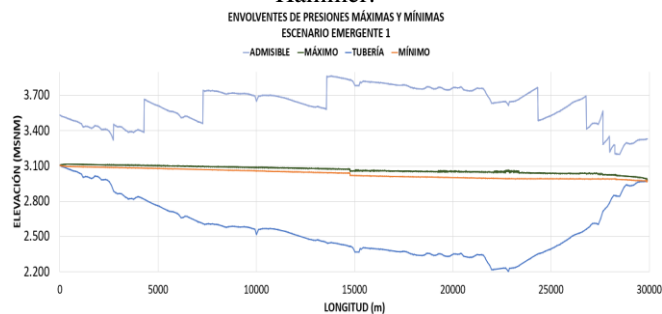


Figura 23. Envolventes de presiones máximas, mínimas y admisibles, para escenario de operación 1, Excel.

Tabla 13. Resultados en nodos de la tubería principal, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
CONTROL 1	100	7,03	8,16	424,82
CONTROL 2	6700	417,53	432,08	849,2
CONTROL 3	14600	603,78	632,34	1415,33
CONTROL 4	22650	772,16	824,32	1415,33
CONTROL 5	29500	4,99	10,33	353,5

Tabla 14. Resultados en nodos de las derivaciones, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
DERIVACIÓN 1	27955	140,3	175,4	424,8
DERIVACIÓN 2	14615	621,7	653,9	1415,33

3.2.2. Escenario 2: Apertura de válvulas sin ningún tipo de orden

El siguiente escenario se plantea una falla, ruptura, en el funcionamiento de la línea principal, es decir, 1, 2 y 3 se verá afectado, siendo esta intervenida con cerrados en las válvulas de control y válvulas de purga. Sigüentes válvulas:

- Válvulas de control de flujo, actuaran obstruyendo el paso del caudal.
- Válvulas de purga, se encargan de drenar el caudal que se queda en segmento donde se plantea la ruptura, minimizando el desperdicio.

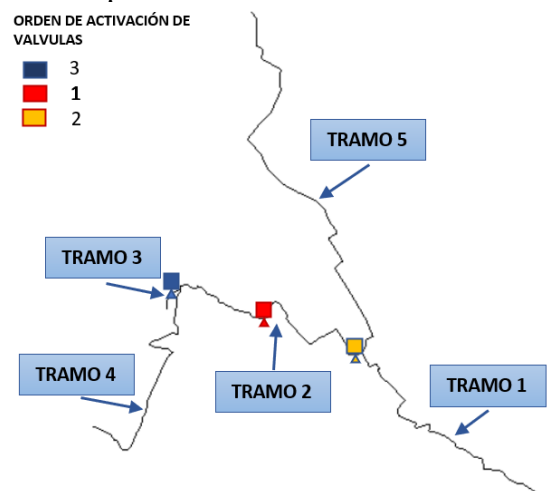


Figura 24. Ubicación de Válvulas con patrón de purga, Hammer.

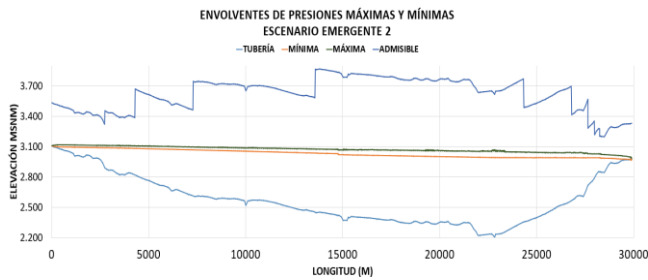


Figura 25. Envoltorios de presiones máximas, mínimas y admisibles, para escenario de operación 2, Excel.

Tabla 15. Resultados en nodos de la tubería principal, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MINIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
CONTROL 1	100	5,64	14,43	424,82
CONTROL 2	6700	421,34	447,42	849,2
CONTROL 3	14600	610,86	650,69	1415,33
CONTROL 4	22650	792,07	855,85	1415,33
CONTROL 5	29500	4,22	22,35	353,5

Tabla 16. Resultados en nodos de las derivaciones, Excel.

DETALLE	NODOS	PRESIÓN MÍNIMA (mH2O)	PRESIÓN MÁXIMA (mH2O)	PRESIÓN ADMISIBLE (mH2O)
DERIVACIÓN 1	27955	141,0	175,4	424,8
DERIVACIÓN 2	14615	611,6	650,6	1415,33

4. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos a lo largo de las simulaciones en los dos casos, emergente, normal. Se concluye que es importante conocer cada una de las características tanto de los accesorios, como de la ubicación en la cual se encuentra ubicado dentro del sistema. Es necesario la inclusión de accesorios como válvulas de control de aire, ya que estas permiten controlar el ingreso y salida del aire en la línea de conducción, logrando así mayor duración de las tuberías sin sufrir daños en su vida útil. Ya que estas son ubicadas en puntos estratégicos garantizando que el sistema permita la entrada de aire en periodos que la presión caiga por debajo de la tubería, y reducir presiones transitorias si se comprime lo suficiente el fluido antes de que este se impacte. El mal control de este fenómeno puede dar paso a la creación de burbujas de aire, que a la

larga pueden dar paso a la cavitación y afectara a la línea de conducción. A partir de las siguientes tablas es posible evidenciar cual es el rango de presiones que es capaz de soportar cada uno de los escenarios para los cuales fueron diseñados.

Tabla 17. Resultados en nodos de presiones máximas, mínimas y admisibles para los escenarios normales planteados, Excel.

		PRESIÓN (mH2O)						
ESCENARIOS		1		2		3		
ID	NOD	P. ADM	P. MIN	P. MÁX	P. MIN	P. MÁX	P. MIN	P. MÁX
C 1	100	283,2	8,1	9,2	6,2	9,0	8,0	8,6
C 2	6700	566,1	432,1	450,5	428,1	448,6	434,4	431,5
C 3	14600	943,6	632,3	661,7	627,5	658,6	632,2	637,5
C 4	22650	943,6	825,0	865,4	820,0	867,3	820,6	830,6
C 5	29500	235,7	10,3	19,1	8,5	18,8	7,9	10,9

El control mediante los escenarios normales 1 y 2 fueron simulaciones en las cuales intervienen válvulas tipo FCV las cuales controlan y regulan el caudal presente en el tramo de conducción. Estos escenarios también deben considerar un orden en la operación de los accesorios tal como es el caso del escenario 3, en el cual se prevé el cerrado de las válvulas de control de flujo, estabilizando el flujo en cierto tramo para la posterior apertura y cerrado de la válvula de purga.

Tabla 18. Resultados en nodos de presiones máximas, mínimas y admisibles para los escenarios normales planteados, Excel.

		PRESIÓN (mH2O)				
ESCENARIOS		1		2		
ID	NOD	P. ADM	P. MIN	P. MÁX	P. MIN	P. MÁX
C 1	100	424,82	7,03	8,16	5,64	14,43
C 2	6700	849,2	417,53	432,08	421,34	447,42
C 3	14600	1415,33	603,78	632,34	610,86	650,69
C 4	22650	1415,33	772,16	824,32	792,07	855,85
C 5	29500	353,5	4,99	10,33	4,22	22,35

En los escenarios emergentes se planteó eventos atípicos para lo cual fue necesario controlar escenarios críticos y controlar efectos como sobrepresiones que se presentaron por la mala operación de los escenarios. La comprobación de los espesores y diámetros propuestos forman parte del modelado de los escenarios normales y

emergentes, controlando las presiones en puntos estratégicos definidos anteriormente.

Existe la opción de implementar válvulas de purga o de descarga a la atmósfera en el programa Hammer, pero debido a que esta no cuenta con la opción de agregar una curva característica con la cual el usuario controle este evento, se implementa válvulas polijet las cuales nos permiten descargar 500 l/s. Las ubicaciones de las mismas se encuentran detalladas a continuación:

Tabla 19. Características de válvula de purga en el escenario normal 3, Excel.

DETALLE	COTA (m)	CAUDAL (l/s)
PURGA	2.190,00	500
PURGA 1	2.360,00	500

Tabla 20. Características de válvula de purga en el escenario emergente 1 y 2, Excel.

DETALLE	COTA (m)	CAUDAL (l/s)
FCV-20	2.150,00	500

Las envolventes de presión presentados nos permiten visualizar las presiones en las cuales se encuentran inmersa la línea de conducción sujeto a los escenarios de operación presentados y factores topográficos.

La Variación en los tiempos de apertura y cerrado de los accesorios, mejorará ampliamente el sistema en los escenarios emergentes y normales, ya que la tubería tendrá una cantidad de trabajo en un escenario en el cual se activen las válvulas de control de caudal y también se activen las válvulas de purga.

Los espesores con los cuales se trabajó pueden ser modificados desde el punto de vista económico, debido a que en el gráfico de las envolventes se evidencia que se puede trabajar con espesores menores sin que esto afecte la resistencia de la tubería a sobrepresiones.

Referencias

- [1] L. Galbán, Y. González y Y. Urquiza. "Vulnerabilidad y riesgo sísmico en obras hidráulicas: una nueva aproximación metodológica". SciELO - Scientific Electronic Library Online. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382021000400109.
- [2] P. Peña, M.G. Soria, "análisis del flujo no permanente en una conducción de alta carga con ramificaciones" Tesis de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, 2017.
- [3] OCTALSTEEL GROUP. "Steel Pipe, OCTG, Casing and Tubing Supplier - Octal". Octalsteel. <https://www.octalsteel.com/>
- [4] Bentley Systems Infrastructure Engineering Software Company. "OpenFlows HAMMER: Water Transient Analysis Software Bentley Systems". <https://www.bentley.com/software/openflows-hammer/>
- [5] J. L. Ramirez. "CAUDAL (fluidos) | Concepto, características, como se mide". ComoFunciona. <https://comofunciona.co/caudal-fluidos/>.
- [6] J. M. Lozada Fiallos, "Análisis de flujo no permanente en conductos a presión para aprovechamientos hidroeléctricos", Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [7] J. F. Martínez. "¿Que es CivilCAD?". CAD2X3. <https://cad2x3.com/2016/05/18/que-es-civilcad/>.
- [8] Tameson. "Válvula de aguja - Cómo funcionan". <https://tameson.es/pages/valvula-de-aguja-como-funcionan>.
- [9] J. Abreu, R. Guargua, J. Izquierdo, "Transitorios Y Oscilaciones En Sistemas Hidráulicos A Presión". Ed. Sichert, España, 1995, pp. 505.
- [10] Steel Water Pipe: A Guide for Desing and Installation, American Water Works Association, Denver, 2004.
- [11] Namakforoosh, M. N. Metodología de la investigación, 2a Ed. Limusa. 2005

- [12] RUDMEX. "Mejores prácticas en la localización de válvulas de aire en la línea de conducción". Fabricante de válvulas industriales I Rudmex. <https://www.rudmex.com/blog/mejores-practicas-en-la-localizacion-de-valvulas-de-aire-en-la-linea-de-conduccion>.
- [13] HM Ramos et al., "Sobre los efectos dinámicos en los sistemas de tuberías con flujos de dos fases: aumentos repentinos de presión, cavitación y ventilación", *Water*, vol. 14, núm. 15, pág. 2376, julio de 2022, doi: 10.3390/w14152376.
- [14] D. Jiang, C. Ren, T. Zhao y W. Cao, "Modelo transitorio de presión de tuberías hidrodinámicas con cavitación", *Applied Sciences*, vol. 8, núm. 3, pág. 388, marzo de 2018, doi: 10.3390/app8030388.
- [15] A. Mentis, P. Galiatsatou, D. Spyrou, A. Samaras y P. Stournara, "Simulación hidráulica y análisis de los acueductos de un centro urbano utilizando escenarios de emergencia para el funcionamiento de la red: el caso de la ciudad de Tesalónica en Grecia", *Agua*, vol. 12, núm. 6, pág. 1627, junio de 2020, doi: 10.3390/w12061627.