

Evaluación hidráulica del flujo transitorio en tuberías de alta carga con ramales en zonas de alta densidad urbana

Hydraulic evaluation of transient flow in high load pipelines with branches in high density urban areas

María Gabriela Soria Pugo*
Universidad Técnica de Ambato
Ambato-Ecuador
mg.soria@uta.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9045-0870>

Verónica Valeria Yépez Martínez
Universidad Politécnica Salesiana
Quito-Ecuador
vyopez@ups.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-2790-7211>

Doris Alexandra Andrade Sandoval
Universidad Politécnica Salesiana
Quito-Ecuador
dandrades@ups.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-3654-8285>

Silvia Alexandra Rodríguez Freire
Universidad Politécnica Salesiana
Quito-Ecuador
srodriguez@ups.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0008-9950-1492>

*Correspondencia: mg.soria@uta.edu.ec

Cómo citar este artículo:

Soria, M., Yépez, V., Andrade, D., & Rodríguez, S. (2025). Evaluación hidráulica del flujo transitorio en tuberías de alta carga con ramales en zonas de alta densidad urbana. *Esprint Investigación*, 4(1), 434-450. <https://doi.org/10.61347/ei.v4i1.121>

Recibido: 22 de marzo de 2025

Aceptado: 28 de abril de 2025

Publicado: 5 de mayo de 2025

Resumen: El análisis del flujo transitorio estudia el comportamiento hidráulico de flujos incompresibles afectados por el tiempo, especialmente ante variaciones bruscas de presión causadas por operaciones como arranque de bombas, maniobras de válvulas o presencia de aire en el sistema. El artículo expone los pormenores de un proyecto ejecutado en la provincia de Pichincha, específicamente en la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador, con el objetivo de garantizar para el futuro la provisión adecuada de agua potable para los sectores del norte de la ciudad. Dada la importancia de este recurso, se requiere asegurar su suministro en condiciones óptimas de calidad y cantidad, y minimizar el riesgo de daños en las tuberías y accesorios. Para el estudio, se realizó un análisis del flujo no permanente en una línea de conducción con dos ramificaciones, utilizando modelación numérica mediante el software HAMMER V8i (serie 6). La simulación, basada en el método de las características, estableció los tiempos mínimos de operación de dispositivos de control, con el fin de prevenir transitorios hidráulicos que puedan comprometer la integridad del sistema. Se definieron los parámetros físicos relevantes como caudales de diseño en distintas etapas, material de las tuberías, ubicación de reservorios y disposición tentativa de válvulas de aire. Los resultados fueron contrastados con la presión máxima de trabajo admisible para la tubería, evaluando su comportamiento frente a distintos límites de fluencia y verificando los espesores de chapa según la norma de American Water Works Association AWWA-M11. Finalmente, se presentaron envolventes de presión que permiten visualizar los puntos críticos del sistema y facilitar la toma de decisiones en su diseño y operación.

Palabras clave: Escenarios emergentes, escenarios normales, flujo no permanente, Hammer V8i, transitorio.

Abstract: Transient flow analysis studies the hydraulic behavior of incompressible flows affected by time, especially in the face of sudden pressure variations caused by operations such as pump start-up, valve maneuvers or the presence of air in the system. The article presents the details of a project executed in the province of Pichincha, specifically in the urban area of the Metropolitan District of Quito, Ecuador, with the objective of guaranteeing for the future an adequate supply of drinking water for the northern sectors of the city. Given the importance of this resource, it is necessary to ensure its supply in optimal conditions of quality and quantity, and to minimize the risk of damage to pipes and accessories. For the study, an unsteady flow analysis was carried out in a pipeline with two branches, using numerical modeling with HAMMER V8i software (series 6). The simulation, based on the characteristics method, established the minimum operating times of control devices, to prevent hydraulic transients that could compromise the integrity of the system. Relevant physical parameters such as design flow rates at different stages, pipe material, reservoir location and tentative air valve arrangement were defined. The results were contrasted with the maximum allowable working pressure for the pipeline, evaluating its behavior against different creep limits and verifying the thicknesses of the sheet metal according to the American Water Works Association AWWA-M11 standard. Finally, pressure envelopes were presented to visualize the critical points of the system and facilitate decision making in its design and operation.

Keywords: Emergency scenarios, Hammer V8i, normal scenarios, transient, unsteady flow.

Copyright: Derechos de autor 2025 María Gabriela Soria Pugo, Verónica Valeria Yépez Martínez, Doris Alexandra Andrade Sandoval, Silvia Alexandra Rodríguez Freire.



Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NonComercial 4.0.

1. Introducción

En contextos de acelerado crecimiento poblacional, resulta fundamental priorizar el desarrollo de proyectos orientados a la transmisión y conducción de agua cruda y tratada, para garantizar el abastecimiento actual y futuro tanto en zonas urbanas como rurales. Esta necesidad se sustenta en el reconocimiento del acceso al agua como un derecho humano fundamental, que implica que todas las personas deben contar con una cantidad suficiente de agua para el uso doméstico y personal, asegurando que sea segura, de calidad aceptable, económicamente asequible y físicamente accesible (Andrade et al., 2019).

El flujo no permanente o transitorio es aquel en el que las propiedades del fluido, como la viscosidad (μ), la temperatura (dT), la densidad ($d\rho$) y la velocidad (dV), experimentan variaciones a lo largo del tiempo (dt). A diferencia del flujo permanente, donde estas magnitudes permanecen constantes en un punto dado del sistema, en el flujo transitorio los cambios temporales influyen directamente en el comportamiento hidráulico, donde resultan especialmente relevantes en situaciones como arranques o paradas de equipos, aperturas o cierres de válvulas, y otras condiciones no estacionarias (Lozada, 2010).

Los escenarios hidráulicos se estudian mediante hipótesis y condiciones impuestas por el proceso, donde el flujo varía en el tiempo y el espacio, recurriendo a las ecuaciones para modelar el flujo considerado como unidimensional (De las Heras, 2011). Este enfoque simplifica el análisis sin perder precisión en la representación de fenómenos complejos, como el comportamiento de ondas de presión, las pérdidas por fricción y la interacción con dispositivos de control hidráulico. La modelación unidimensional, basada en las ecuaciones de Saint-Venant, se convierte así en una herramienta esencial para simular condiciones tanto en régimen permanente como transitorio, al facilitar la evaluación de escenarios operativos y la toma de decisiones en el diseño y gestión de sistemas de conducción a presión (Chaudhry, 2014).

Las condiciones hidráulicas de un sistema de conducción varían considerablemente según el trazado de la línea tanto en planta como en perfil, así como en función de la población a la que está destinada a servir (Mays, 2011). En este sentido, los caudales de operación proyectados hacia el año horizonte de diseño difieren de los valores correspondientes a etapas intermedias del proyecto, dependiendo del ritmo de crecimiento y consolidación de la población y sus demandas. Esta variabilidad genera la necesidad de incorporar accesorios de control a lo largo de la línea de transmisión, para garantizar una operación segura y eficiente en las fases del sistema. Sin embargo, si estas operaciones no se gestionan adecuadamente, pueden provocar importantes alteraciones en el régimen hidráulico, comprometer la integridad de la tubería e incluso causar daños estructurales severos.

El objetivo del presente trabajo es realizar la simulación numérica en régimen no permanente partiendo como base del software, Hammer V8i - serie 6, la utilización del método de las características; de tal forma que se obtenga un modelo general para un caso de estudio adaptable a otros casos particulares, por lo que el modelo dispondrá de cierta organización y distribución adecuada de la información recopilada para el caso bajo análisis.

El caso de estudio constituye tres plantas de tratamiento que van a ser abastecidas desde un tanque ubicado en una central recuperadora. Estas plantas de tratamiento estarán conectadas mediante tuberías: una principal que parte desde la recuperadora (PTAPP) hasta la planta (PTAP1) que entrará en funcionamiento en 2021 con un caudal de 1.5 m³/s, de la línea principal parten dos ramificaciones hacia las plantas (PTAP2) y (PTAP3) que entrarán en funcionamiento en el año 2021 con 1.3 m³/s y 2025 con 1.5 m³/s, respectivamente.

2. Metodología

Para abordar el análisis del flujo no permanente, se emplearon diversas metodologías complementadas entre sí. En primer lugar, se implementó una modelación numérica a través del software Bentley HAMMER V8i, fundamental para simular las condiciones de flujo no permanente y evaluar los transitorios hidráulicos en las conducciones y sus derivaciones. La capacidad de HAMMER para realizar simulaciones específicas facilitó la comprensión del comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operativos.

Además, el análisis se basó en la evaluación de ecuaciones fundamentales que rigen la dinámica de fluidos, tales como la ecuación de continuidad y las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento y energía. Estas ecuaciones son imprescindibles para el entendimiento de las interacciones del flujo con los distintos elementos del sistema, permitiendo determinar las condiciones iniciales y las variables del flujo que afectan el rendimiento de la infraestructura (Kerger et al., 2011; White, 2011).

Se llevó a cabo un estudio de escenarios que involucró simulaciones para evaluar diferentes situaciones hidráulicas, considerando el comportamiento del flujo en función del tiempo y ante diversas condiciones operativas. Esto incluyó el análisis de situaciones como cambios bruscos de presión, el arranque de bombas y el paso a través de válvulas, crucial para identificar vulnerabilidades potenciales en el sistema.

El uso del método de las características también fue una herramienta clave en el análisis de los transitorios hidráulicos, ya que permite estudiar la tubería bajo distintas condiciones y con diferentes dispositivos de control. Esta metodología se destacó por su capacidad para proporcionar un análisis detallado y específico de los fenómenos que afectan el flujo.

Finalmente, se realizó una evaluación de resultados donde los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas se contrastaron con datos experimentales. Aunque los modelos numéricos pueden ser precisos, pueden contener simplificaciones que deben ser validadas a través de comparación con la realidad. Estas diversas metodologías juntas no solo optimizan el análisis del flujo no permanente, sino que contemplan aspectos técnicos y económicos en el diseño de la infraestructura hidráulica.

3. Resultados y discusión

Descripción del problema físico

La variante seleccionada para la línea de conducción se inicia en una central recuperadora (PTAPP), y continúa hasta llegar al sector desde donde parte la derivación (Derv1) hacia PTAP2 y la línea principal continúa hacia la intersección (Derv2) donde se inicia la derivación hacia PTAP3 y finalmente la línea principal continúa hasta PTAP1. Consta por tanto de un tanque de salida y de tres tanques de llegada, y es de interés para la simulación las cotas del espejo de agua registradas en cada uno (figura 1).

En el desarrollo longitudinal del trazado de la variante seleccionada, se cuenta con un sifón que tiene tres puntos importantes de máxima profundidad correspondientes a los cruces con los ríos C, S P y M.

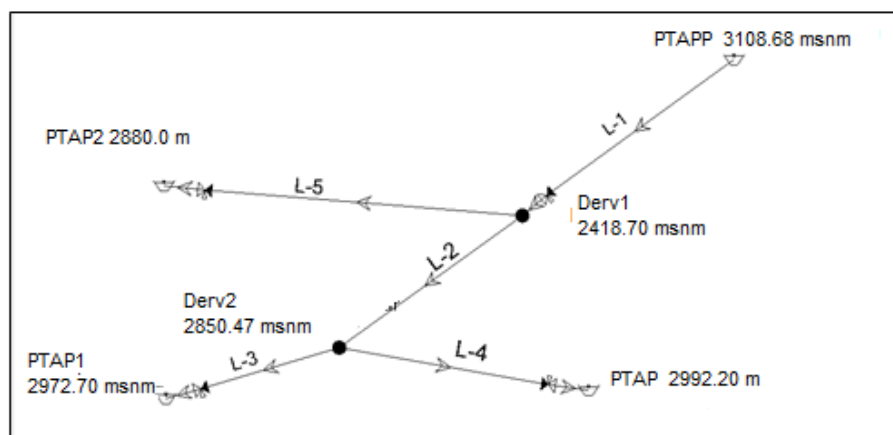
El desarrollo del trazado de la variante seleccionada se ha trabajado en 5 tramos comprendidos entre los reservorios y las derivaciones respectivas, se presenta un sifón con cargas máximas del orden de 680 mca. Por esta razón atendiendo a las características del perfil de la línea PTAPP – PTAP1 se recomienda el uso del acero API 5L Gr. X60-65 cuyas presiones de trabajo para espesores de 31 mm superan los 1000 mca, dependiendo del porcentaje de su fluencia que se utilice.

Se han denominado los tramos siguiendo la secuencia de diseño de la siguiente manera:

L1 corresponde al tramo entre la Planta de Tratamiento PTAPP y el punto de derivación hacia la PTAP2 que se ubica en el sector conocido como la derivación 1.

Figura 1

Esquema general, vista en planta



Nota. L2 corresponde al tramo entre el punto de la derivación y el punto de derivación 2

L3 corresponde al tramo entre el punto conocido como derivación 2 y el tanque de PTAP1.

L4 corresponde al tramo entre el punto de derivación 2 y PTAP3; y finalmente

L5 corresponde al tramo entre el punto derivación 1 y PTAP2.

Elementos de control

Para el control del caudal o flujo se seleccionaron las válvulas de émbolo o aguja, en las que el control del flujo es preciso, la sección de flujo es regular y cambia paulatinamente, posee un accionamiento simple, requiere de poca instrumentación relativa y muestra una alta confiabilidad operacional.

Se colocaron válvulas de regulación en la derivación hacia la PTAP2, y en el inicio del tramo L2 de la línea principal. Para la regulación se proponen válvulas de aguja de 800 mm de diámetro, considerando que el caudal derivado hacia PTAP2 (1300 l/s hasta 650 l/s) será regulado por una sola válvula; mientras que el caudal que sigue en la línea (3000 l/s hasta 1500 l/s) será regulado por dos válvulas de aguja de 800 mm en paralelo.

Se dispusieron cámaras de regulación con sistemas redundantes, para lo cual se ha trifurcado la línea principal al inicio del tramo L2, regulando el caudal para este tramo con la operación simultánea de dos de estas tres válvulas. En las tres cámaras de regulación restantes previstas para el sistema al inicio de la Derivación 1 – PTAP2, Tramo L3 y Derivación 2 – PTAP3, la regulación se realiza con la operación de una sola válvula, por lo que se ha dispuesto en cada caso la bifurcación con el arreglo de válvulas de guardia – válvula reguladora – válvula de guardia, de manera idéntica para las tres.

Para las operaciones de limpieza y evacuación de los caudales de la línea de transmisión PTAPP – PTAP1 se ubicó válvulas de desagüe y disipación de energía en 4 puntos bajos de la línea (tabla 1) buscando que sea posible la descarga de estos caudales en cauces naturales. Debido a las altas cargas en los tramos donde se prevé la ubicación de los desagües, se recomienda que las válvulas disipadoras de energía sean del tipo POLYJET y descarguen sumergidas en cámaras para la disipación de la energía residual.

Tabla 1*Ubicación de válvulas de desagüe*

Tramo	Abscisa	Cota (msnm)	Descarga
L1	9+908.90	2511.00	A
L2	14+893.25	2278.00	C
L2	22+650.00	2200.00	M
L2	27+173.22	2595.00	S/N1

El aire atrapado en los conductos a presión puede migrar a sus puntos altos, donde no hay válvulas de aire o ventosas instaladas y formar bolsas de aire que pueden quedar estacionarias, cuando la fuerza de arrastre del flujo no es capaz de vencer la fuerza de flotación de las bolsas (Pozos, 2007). En el mismo sentido, si la línea de piezométrica corta la tubería en las cimas de la conducción donde hay ventosas colocadas, el aire se introduce y forma bolsas de aire que estarán a presión atmosférica y su flujo debajo de estas será a superficie libre.

Las válvulas de aire fueron ubicadas preferentemente en los puntos altos de la conducción con espaciamiento entre ellas de aproximadamente 1 km. Las de triple función se utilizan para controlar la presencia de aire en el interior de la tubería de conducción que puede provocar fenómenos hidrodinámicos indeseables como el golpe de ariete, sobrepresiones y presiones de vacío, tanto en régimen permanente como en operaciones de llenado, drenaje y aceleraciones o desaceleraciones del flujo.

La presión de trabajo de la tubería en esta conducción es considerablemente alta y, cuando se descargue aire a una presión que exceda 1.9 veces la presión de salida (asumiéndola como la atmosférica) producirá un flujo sónico (The American Society of Mechanical Engineers, 2016), por ende, la velocidad del aire es limitada a la velocidad del sonido, ocasionando de esta forma restricción de descarga de aire a presiones más altas.

Para controlar y minimizar los efectos de los transitorios en la conducción diseñada se ubicaron válvulas de aire de triple acción de conformidad con las recomendaciones de las normas (AWWA M11, 2004 y AWWA M51, 2001).

Flujo permanente (simulación numérica para el diseño de instalaciones)

Para la estimación de pérdidas a lo largo de la conducción de alta presión se aplicó la ecuación de Darcy-Weisbach, por el efecto combinado de la viscosidad y de la rugosidad relativa tanto para el flujo turbulento como para el flujo en transición.

$$hf = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (1)$$

Donde

f: Factor de fricción (adimensional)

L: Longitud de la tubería

D: Diámetro interno de la tubería

V: Velocidad media del fluido

hf: Pérdida de carga debido a la fricción (m)

Para la definición de diámetros constructivos, así como de las velocidades de flujo se empleó un valor de rugosidad absoluta para la tubería de acero con revestimiento interno igual a $\varepsilon = 0.1$ mm, recomendado en la literatura técnica para tubos comerciales de acero de calidad normal (Sotelo, 1997). Este valor coincide con el obtenido en el proceso de calibración, ejecutado previo a la simulación del flujo a presión en la conducción existente aplicando el paquete computacional WATERCAD. Adicionalmente, se implementó en este proceso la calibración de valores representativos de las pérdidas locales para cada tramo de la conducción definiendo un valor de coeficiente de la pérdida local por kilómetro de conducción.

Se definieron cinco escenarios de simulación para las diferentes etapas de entrada en funcionamiento de las plantas de tratamiento, respectivamente, con el fin de definir diámetros, chequear caudales y velocidades. Estos escenarios se detallan a continuación:

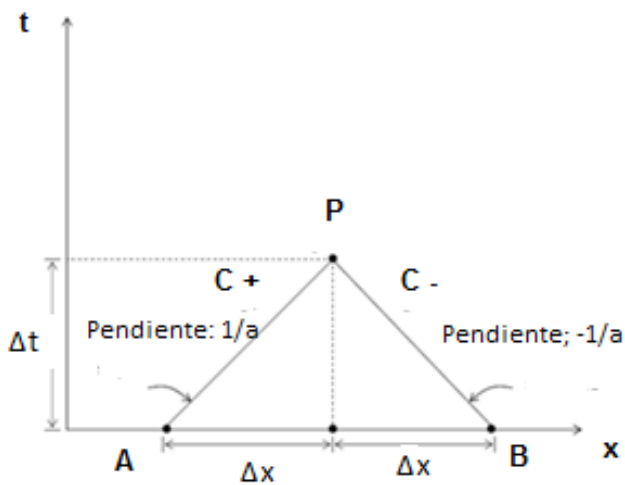
- **Escenario No. 1:** El caudal total se conduce a través de la línea principal PTAPP – PTAP1 y de las líneas de derivación hacia PTAP2, Tramo L5 (Derivación 1 – PTAP2) y hacia PTAP3, Tramo L4 (Derivación 2 – PTAP3).
- **Escenario No. 2:** El caudal de 750 l/s se conduce a través de la línea principal PTAPP – PTAP1 y no se deriva caudal para las líneas de derivación hacia PTAP2 (Derivación 1 – PTAP2) y hacia PTAP3 (Derivación 2 – PTAP3).
- **Escenario No. 3:** El caudal de 2800 l/s se conduce a través del primer tramo de la línea principal PTAPP – PTAP1, 1300 l/s se conducen a la línea de derivación hacia PTAP2 (Derivación 1- PTAP2) y adicionalmente 1500 l/s se conducen a PTAP1.
- **Escenario No. 4:** El caudal de 2050 l/s se conduce a través del primer tramo de la línea principal PTAPP – PTAP1, 1300 l/s se conducen para la línea de derivación hacia PTAP2 (Derivación 1- PTAP2) y 750 l/s se dirigen hacia PTAP1.
- **Escenario No. 5:** El caudal de 2800 l/s se conduce a través del primer tramo de la línea principal PTAPP – PTAP1, 1300 l/s se dirigen hacia la planta PTAP2 (Derivación 1 – PTAP2), 750 l/s se dirigen hacia PTAP1 y 750 l/s hacia la PTAP3.

Flujo transitorio o no permanente (simulación numérica para la comprobación diseño de instalaciones)

La solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo no permanente en tuberías debe establecerse debido a que las soluciones de las ecuaciones diferenciales no están disponibles. Sin embargo, estas ecuaciones pueden transformarse como es el caso del método de las características. El software Bentley HAMMER V8i utiliza el Método de Característica (MOC) para resolver ecuaciones que gobiernan el Flujo de tubería inestable. Usando el MOC, las dos ecuaciones diferenciales parciales pueden ser transformadas a los siguientes pares de ecuaciones:

$$+\frac{g}{a} \frac{dH}{dx} + \frac{dV}{dt} \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (2)$$

$$C^+ \frac{dx}{dt} = a$$

Figura 2*Plano x-t*

$$-\frac{g}{a} \frac{dH}{dx} + \frac{dV}{dt} \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

$$C^- \frac{dx}{dt} = a$$

Las ecuaciones no pueden resolverse analíticamente, pero pueden expresarse gráficamente en el espacio-tiempo como líneas características (o curvas), llamadas características (figura 2), que representan señales que se propagan a la derecha (C+) y a la izquierda (C-) simultáneamente.

El modelado transitorio consiste esencialmente en resolver estas ecuaciones, para cada punto de solución y paso del tiempo, para una amplia variedad de condiciones de contorno y topología (Wylie & Streeter, 1993).

Para la simulación numérica de flujo no permanente se consideraron los siguientes aspectos:

1. La línea de transmisión opera con los caudales de diseño hacia las plantas PTAP1, PTAP2 y PTAPP.
2. Se adoptó un tiempo de cierre de las válvulas de regulación de 90 segundos, que corresponde a una operación de cierre rápido en el primer tercio del tiempo de operación de la válvula y un cierre lento en los dos tercios restantes de tiempo de operación de la válvula.
3. Se consideró el efecto de las válvulas de aire a lo largo de la conducción.
4. Los escenarios considerados son los ocho divididos entre escenarios de operación normal y emergente.

Se indican los parámetros principales adoptados para el análisis del flujo no permanente en los diferentes escenarios (tabla 2). Para calcular de los espesores de las tuberías en los diferentes tramos de la conducción de agua cruda se usa como referencia técnica las normas AWW11 y ASME B31.1, de acuerdo con la cual se definen los espesores de la tubería considerando la presión estática, el incremento de presión por fenómenos transitorios, el esfuerzo de fluencia del material, el esfuerzo de trabajo del material adoptado como el 50 % del esfuerzo de la tubería. Para la estimación de la sobrepresión por transitorios en la conducción se adopta un incremento del 10 % de la presión dinámica.

Figura 2

Parámetros adoptados para la simulación de los escenarios para el análisis de transitorios

Tramo	No. de puntos	Longitud total (m)	Diámetro (mm)
L1			1400
L2	297	29896.38	1300
L3			700
L4	-	23887.09	1200
L5	-	14587.8	800

Parámetros para el cálculo de la velocidad de onda			
Líquido: Agua a 20°C			
Módulo de Elasticidad		22312.69	kg/cm ²
Gravedad específica		0.998	-
Material: Acero API 5L grado 60			
Módulo de Young		2110812.12	kg/cm ²
Relación de Poisson		0.3	-
Espesor máx:		30	mm

Los espesores se obtienen en función de la ecuación general de Barlow: (Sviatoslav, 1982 y The American Society of Mechanical Engineers, 2016)

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma_T} \quad (4)$$

Dónde:

- e : Espesor de la tubería (in).
 P : Presión interna en la tubería (PSI)
 D : Diámetro externo de la tubería (in)
 σ_T : Esfuerzo de trabajo del acero de la tubería (PSI).

La Norma AWWA11 indica que para condiciones de funcionamiento normal se deberá trabajar con el 0.5 del valor del esfuerzo de fluencia y para escenarios emergentes con el 0.75 fy. Con estas consideraciones se definieron los espesores de la tubería para los diferentes tramos.

Con el objeto de evaluar la sobrepresión producida por el golpe de ariete, la norma recomienda la siguiente ecuación derivada de la ecuación de momento, en caso de un cierre abrupto (instantáneo):

$$ha = \frac{a \cdot V}{g} \quad (5)$$

$$a = \frac{0.319}{\sqrt{\frac{\rho}{g} \left(\frac{1}{k} + \frac{d}{E \cdot t} \right)}} \quad (6)$$

Donde:

- ha : sobrepresión por golpe de ariete en m
- V : Velocidad del fluido (m/s)
- a : Celeridad del transitorio por golpe de ariete en (m/s)
- ρ : Densidad del fluido en (kg/m³)
- g : Gravedad en (m/s²)
- k : Módulo de compresibilidad de Bulk para el líquido en (Pa)
- E : Módulo de elasticidad de Young en (Pa)
- t : espesor de la tubería (m)

La sobrepresión, directamente proporcional a la velocidad del flujo y a la celeridad de la onda, es independiente de la longitud de la tubería. Por otra parte, la celeridad de la onda depende de las propiedades del fluido, del material de la tubería, así como de las características geométricas de la tubería (diámetro y espesor). Al aumentar el espesor se incrementa la celeridad de la onda.

Para la comprobación de dimensiones de diámetros y espesores de la línea principal del proyecto se analizaron, con mayor profundidad, ocho escenarios dentro de dos categorías: normales y emergentes. Estos escenarios son base para el análisis del flujo no permanente, o transitorios, y permiten definir el comportamiento de la línea de transmisión en presencia de cambios violentos de las características hidráulicas del flujo en el tiempo.

Escenarios normales: se analizan en esta categoría cinco escenarios de operación normal, con miras a determinar el correcto comportamiento de los órganos de control y sus rangos de operación, sin que se generen perturbaciones que puedan poner en riesgo la conducción.

- **Escenario normal No. 1:** Operación de cierre de las válvulas de regulación en la Derivación 1. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s. El caudal de diseño se encuentra circulando por el sistema y después de cierto tiempo se inicia la operación de cierre de las válvulas que regulan el caudal hacia el ramal L5 (Derivación 1 – PTAP2).
- **Escenario normal No. 2:** Operación de cierre de las válvulas de regulación en la Derivación 1. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s. El caudal de diseño se encuentra circulando por el sistema y después de cierto tiempo se inicia la operación de cierre de las válvulas que regulan el caudal hacia el ramal L2 (Derivación 1 – Derivación 2).

- **Escenario normal No. 3:** Operación de cierre de las válvulas de regulación en la Derivación 2. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s. El caudal de diseño se encuentra circulando por el sistema y después de cierto tiempo se inicia la operación de cierre de las válvulas que regulan el caudal hacia el ramal L4 (Derivación 2 – PTAP3).
- **Escenario normal No. 4:** Operación de cierre de las válvulas de regulación en la Derivación 2. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s. El caudal de diseño se encuentra circulando por el sistema y después de cierto tiempo se inicia la operación de cierre de las válvulas que regulan el caudal hacia el ramal L3 (Derivación 2 – PTAP1).
- **Escenario normal No. 5:** Operación de purga o de desagüe del sistema. El caudal de simulación es el caudal de diseño para la línea principal PTAPP – PTAP1, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s. La operación de purga o desagüe inicia con el cierre de las válvulas de regulación de los tramos L5 y L4, continúa con el cierre de las válvulas de regulación ubicados en la línea principal en la Derivación 1 y la Derivación 2; para luego iniciar la apertura controlada y en secuencia de las cuatro válvulas de purga ubicadas a lo largo de la línea principal.

Escenarios emergentes: representan un riesgo mayor para la seguridad del sistema puesto que pueden ser situaciones impredecibles o que se generen por factores externos al sistema. Mediante el análisis de estos escenarios se pretende establecer procesos de mitigación que ayuden a disminuir los potenciales daños.

- **Escenario emergente No. 1:** Operación de las válvulas de regulación y purga en respuesta de una ruptura instantánea de línea principal en el cruce del río S P. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s, en total circula un caudal de 4300 l/s.
- **Escenario emergente No. 2:** Operación de las válvulas de regulación y purga en respuesta de una ruptura instantánea de línea principal en cruce del río S P. El caudal de simulación es el caudal previsto en la primera fase del proyecto, 1500 l/s para PTAP1, en total circula un caudal de 1500 l/s.
- **Escenario emergente No. 3:** Operación de las válvulas de regulación y purga en respuesta de una mala operación de desagüe de la línea principal PTAPP – PTAP1. El caudal de simulación es el caudal de diseño, 1300 l/s para PTAP2, 1500 l/s para PTAP1 y 1500 l/s para PTAP3, en total circula un caudal de 4300 l/s, en total circula un caudal de 4300 l/s.

El análisis del flujo permanente con los cinco escenarios conduce a la selección de los diámetros internos óptimos (tabla 2), en cada tramo de la variante seleccionada, a partir de los cuales y, para las condiciones de diseño se obtienen los rangos de velocidades y de presiones para los respectivos caudales.

Se evidencia por tanto que para las condiciones geométricas y topográficas indicadas los diámetros sugeridos son suficientes para conducir el caudal de diseño necesario para satisfacer las necesidades de agua al año horizonte. El chequeo de velocidad se realizó para cada escenario teniendo una velocidad promedio entre todos los escenarios y tramos de 3 m/s, aceptable para tuberías de alta presión.

Mientras que el flujo no permanente, en función de las simulaciones realizadas para los diferentes escenarios y del patrón de comportamiento característico (K_v vs % de apertura) de las válvulas utilizadas para el proyecto se verificó que el patrón de comportamiento de cada una de las válvulas ubicadas en la tubería de conducción y en sus derivaciones, permiten desde el 35 % de apertura de la válvula que se obtenga el caudal necesario en el ramal correspondiente.

Las reglas de operación para las válvulas de control de caudal (figura 3) difieren en el inicio de operación, pero el período de tiempo de apertura y cerrado corresponden a 90 segundos. Estos poseen un comportamiento lineal con el porcentaje de cerrado, que inician con un cierre rápido los primeros 30 segundos, 70 % de cierre, y continúan con 60 segundos de cierre lento, 30 % de cierre, para estabilizar las ondas generadas en el flujo.

La modelación para los 4 escenarios de control de caudal con la operación controlada de las válvulas de aguja ubicadas en las dos derivaciones, PTAP2 y PTAP3, respectivamente, se llevó a cabo durante 200 s y, en todos los escenarios por igual la válvula empezó su cierre a los 40 s del inicio de la simulación, completándolo 90 s después, con el patrón de cerrado lineal de 70 % rápido y 30 % lento.

Luego de varias simulaciones con diferentes patrones de cerrado de las válvulas de aguja se estableció como el sistema de operación normal recomendado para la operación de control de caudal. Adicionalmente, se obtuvo un rango inferior y superior para porcentaje de cerrado, en la zona de cierre rápido (30s), de las válvulas de aguja que son de 57 % y 75 %, respectivamente, y que junto con su complemento hasta el 100 % de cierre en los 60 segundos restantes, no generan problemas en la tubería.

Los resultados son satisfactorios en la operación normal del control de caudal en lo que respecta a la simulación de transitorios hidráulicos, sin generar la presencia de presiones negativas y sobrepresiones que excedan la capacidad de trabajo de la tubería con límite de fluencia al 50 %.

Las válvulas de regulación son de tipo embolo o aguja; del tramo 2 en la línea principal PTAPP – PTAP1 son de 700 mm, del tramo 5 en la Derivación 1 y del tramo 3 en la Derivación 2 son de 800 mm, del tramo 4 en la Derivación 2 son de 900 mm.

Figura 3

Regla de operación de válvula de control de caudal

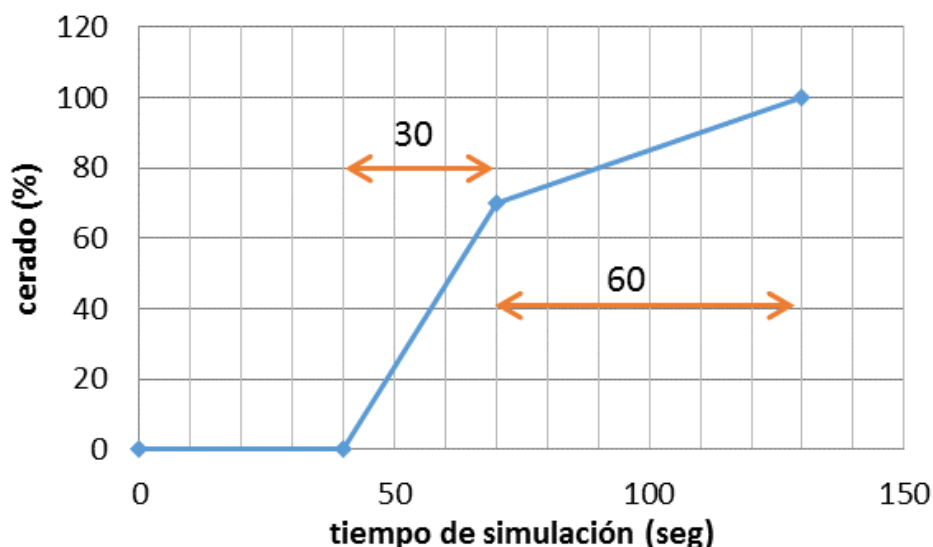
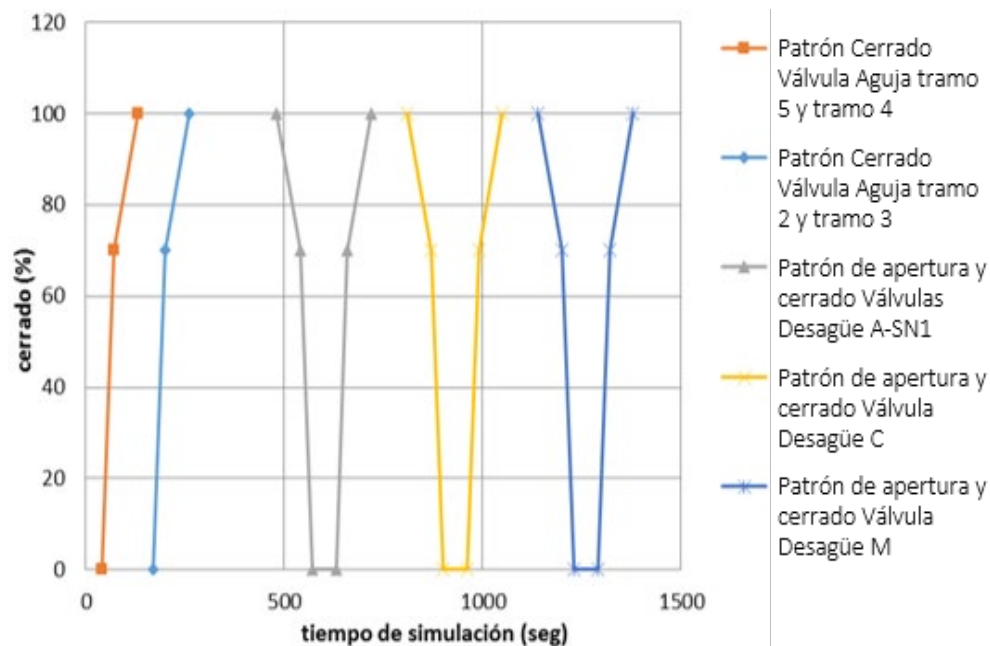
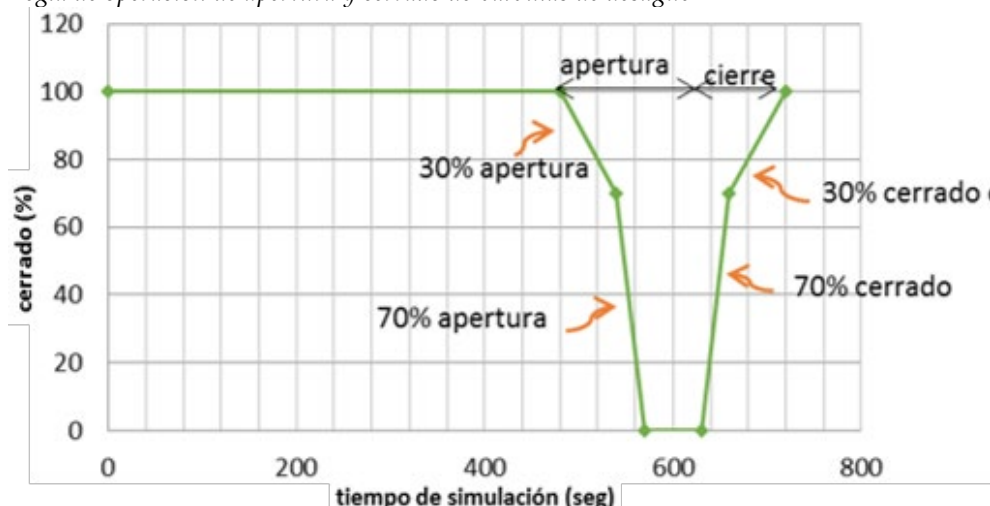


Figura 4*Operación de desagüe controlado del sistema*

El resultado de la simulación numérica para el escenario normal 5 permitió establecer los tiempos de apertura y cierre de las válvulas polijet planificadas para descargar un caudal de 500 lt/s ajustando los parámetros hidráulicos de ingreso al Hammer V8i en la derivación (T) de la tubería hacia la descarga en vista que el programa no cuenta con un patrón de comportamiento similar al de este tipo de válvulas.

Las válvulas de desagüe se abren de forma lenta en los dos primeros tercios del tiempo de apertura, abriéndose un 30 % de la válvula, y de forma rápida en el último tercio de tiempo, abriéndose un 70 % de la válvula, con un comportamiento lineal (figura 5).

Conjuntamente y en secuencia programada se planificó inicialmente el cierre de las válvulas de control para independizar los tramos a ser descargados y entonces abrir las válvulas de descarga. Este proceso de operación adoptado busca generar el menor efecto de transitorios en la línea de conducción.

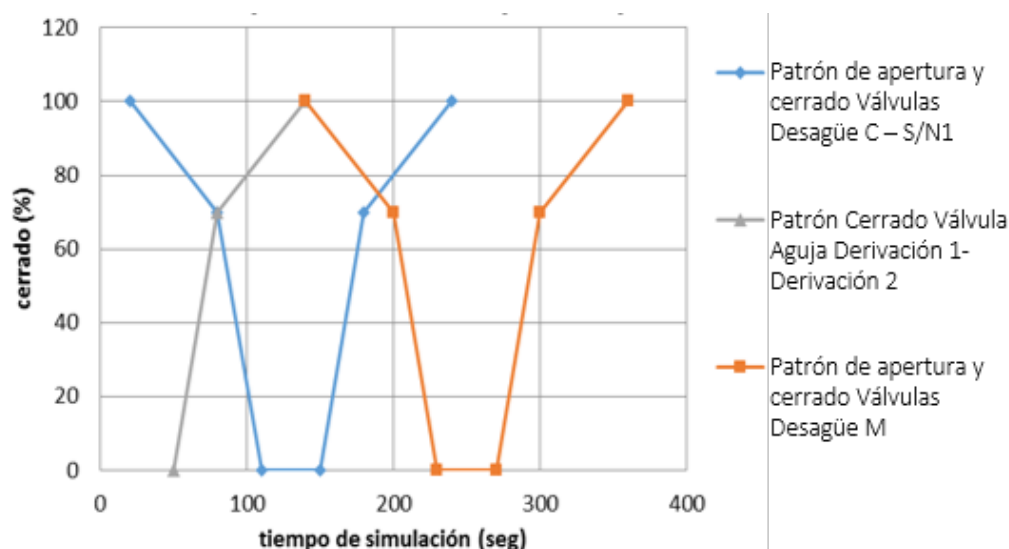
Figura 5*Regla de operación de apertura y cerrado de válvulas de desagüe*

Sin embargo, las limitaciones del software no permitieron determinar el tiempo total necesario para un vaciado completo de la tubería, pero sí los transitorios hidráulicos generados por la operación controlada de apertura y cierre. Entre la operación de apertura y cerrado de la válvula es recomendable mantener un tiempo sin operar la válvula. Este tiempo en la simulación ha sido adoptado de 60 segundos y garantiza que no afecte al sistema provocando fenómenos transitorios aún más bruscos.

Con los escenarios que simulan la rotura de la tubería en el punto más bajo de la conducción se determinó una operación de respuesta que garantice que las supresiones generadas por la rotura sean mitigadas mediante el accionamiento de válvulas de desagüe y de control.

Figura 6

Operación de respuesta por rotura de la tubería



El proceso de respuesta (figura 6) inicia con la apertura simultánea de las válvulas de desagüe ubicadas en las cotas altas descarga A y descarga S/N1. Mientras estas dos válvulas se abren, entran en operación de cerrado las válvulas de control ubicadas en la Derivación 1 y Derivación 2. Una vez que el mayor porcentaje de las válvulas de control se cierre entra en operación la válvula de descarga M.

La apertura escalonada de las válvulas de desagüe permite que la línea piezométrica descienda y se reduzca paulatinamente el caudal de rotura. Con la operación de cierre de las válvulas de regulación se asegura que el sistema se aísla en tramos evitando que se vacíe la tubería en su totalidad y que se comprometan los reservorios en las plantas de tratamiento.

En la simulación de operación incorrecta del desagüe de la línea principal PTAPP – PTAP1 se busca determinar la operación de respuesta mediante las válvulas de control y de purga cuando circula por la tubería el caudal de diseño.

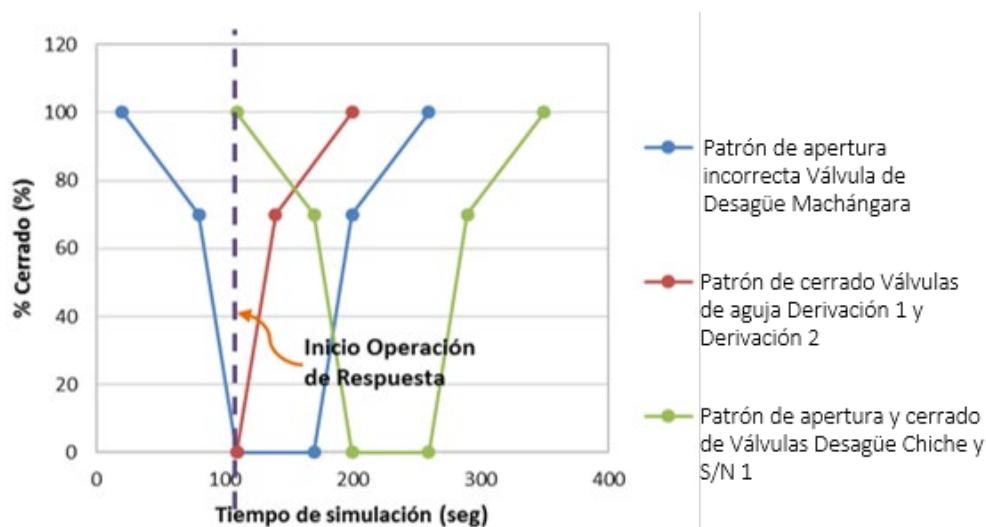
El proceso de simulación (figura 7) inicia cuando se abre erróneamente la válvula ubicada en la cota más baja y, como respuesta ante esta operación se procede a la apertura simultánea de las válvulas de desagüe ubicadas en las cotas altas del tramo 2, Descarga C y Q. S/N1 1, al mismo tiempo que estas dos válvulas se abren, se están cerrando las válvulas de regulación ubicadas en la Derivación 1 y en la Derivación 2, las ubicadas en la línea principal y la que se encuentra sobre la derivación a PTAP3.

Con esta operación de respuesta se evita subpresiones por la apertura no controlada de la válvula de purga con carga energética más alta y se genera el menor efecto de transitorios en la línea de conducción mediante el accionamiento de las válvulas de desagüe. Con la operación de cierre de las

válvulas de regulación se asegura que el sistema se aíse en tramos evitando que se vacíe la tubería en su totalidad y que se comprometan los reservorios en las plantas de tratamiento.

Figura 7

Operación de respuesta por mala operación de descarga



Los patrones adoptados tanto para la operación de las válvulas de desagüe y la operación de cierre de válvulas de regulación son iguales a los utilizados en el escenario normal No. 5 (desagüe controlado del sistema).

Con el chequeo de las sobrepresiones mediante la comparación de las envolventes de presión máxima para todos los escenarios emergentes y normales a lo largo de la línea principal con la presión admisible para cada espesor en los diferentes tramos y, considerando los respectivos esfuerzos de fluencia del material para cada tipo de escenario se verificaron los espesores de la tubería para todos los tramos (tabla 3), asegurando de esta forma que la conducción se preparara para resistir las sobrecargas de presión generadas por los transitorios hidráulicos.

Tabla 3

Detalle de los espesores ajustados de la tubería a lo largo de la conducción principal

Tamo	Diámetro (mm)	Abscisa inicial	Abscisa final	Espesor Normalizado (mm)
L1	1400	0.00	2712.14	9.53
		2712.14	4286.26	12.70
		4286.26	7270.18	19.05
		7270.18	13559,70	25.40
		13559,7	21569.03	31,75
L2	1300	21569.03	24310,74	31.75
		24310,74	26722,92	25.40

	26722,92	27633.18	19.05
	27633.18	27964.18	12.70
L3	27964.18	28224.77	9.53

Los resultados identificaron que la correcta ubicación y selección del tipo de válvulas de control mitiga de manera efectiva los riesgos asociados con los transitorios hidráulicos. Las simulaciones mostraron que, al implementar dispositivos de protección contra sobrepresiones, se reduce significativamente el potencial de fallo en la infraestructura, lo que resalta la importancia de un diseño técnico riguroso basado en criterios de seguridad y eficiencia. Estos hallazgos apoyan la idea de que un enfoque proactivo en el diseño hidráulico resulta en una operación más segura y confiable, minimizando la necesidad de intervenciones correctivas posteriores (Demir et al., 2024).

Asimismo, la modelación numérica aplicada con el software Bentley HAMMER V8i demostró ser una herramienta eficaz para abordar los fenómenos de flujo no permanente. Esta metodología no solo permitió obtener una visión detallada de las dinámicas del flujo, sino que evidenció las interacciones complejas entre diferentes variables en respuesta a perturbaciones del sistema. Sin embargo, es fundamental reconocer que, debido a las simplificaciones inherentes en los modelos numéricos, resulta recomendable validar los resultados con datos experimentales para garantizar la precisión de las simulaciones en condiciones reales.

4. Conclusiones

El caso de estudio presentado representa una simulación afanosa por la irregularidad de la topografía y las altas cargas a la que está sometida la conducción y permite concluir que el modelo bidimensional propuesto en este trabajo es apto para este tipo de casos, cuando lo que se busca es determinar las sobrepresiones generadas por los transitorios y con ello establecer reglas de operación para el funcionamiento normal y emergente del sistema. Al tratarse de un modelo matemático cuenta con las inherentes restricciones para simular una rotura, ya que en el proceso el programa no cuenta con una base numérica que le admita comprender el vaciado y disminución paulatina del caudal, así como para estimar el volumen de aire requerido para salida o entrada mediante las válvulas de aire colocadas en sitios estratégicos.

Los resultados, en función del análisis de transitorios, permitieron verificar espesores y establecer patrones de operación que podrían avocar a la generación de un manual de operación y mantenimiento, bajo los límites y tiempos sugeridos.

El primer paso para iniciar con el diseño de la tubería de conducción y su simulación numérica fue conocer su funcionamiento en condiciones iniciales en régimen permanente para diferentes etapas de entrada en funcionamiento del sistema de red abierta, ajustando las válvulas de control de caudal para permitir o evitar el paso del fluido a las correspondientes derivaciones, logrando así determinar los diámetros para los diferentes tramos.

Los resultados de la simulación numérica en régimen no permanente permitieron conocer el funcionamiento de la línea de conducción ante escenarios críticos de operación, así como ajustar los espesores calculados, de tal forma que aseguren que la tubería sea capaz de resistir las sobrepresiones generadas por transitorios.

Para la operación de descarga o vaciado programado y controlado se implementó 4 desagües que permiten descargar 500 lt/s, las derivaciones se consideraron como tuberías de acero en donde se registraría una carga de presión dinámica que deberá ser disipada por una válvula polijet.

Para la simulación numérica de las válvulas de aire se trabajó con el patrón de comportamiento comercial para cada función de la válvula que relaciona el volumen de aire a eliminarse o introducirse con la presión en el punto donde esté colocada cada válvula y esto para diferentes diámetros. De los diámetros se seleccionó el más grande, lo que evidenció variaciones en el volumen de aire que necesita extraer o eliminar la conducción, pero no sugiere un dimensionamiento de las válvulas en mención.

Las reglas de operación para las válvulas de control de caudal únicamente difieren en el inicio de operación, pero el período de tiempo de apertura y cerrado corresponden a 90 segundos, el cual se ha demostrado en las simulaciones que es el óptimo para evitar la presencia de sobrepresiones que afecten a la tubería. Los 90 segundos tienen un comportamiento lineal con el porcentaje de cerrado, que inician con un cierre rápido los primeros 30 segundos, 70 % de cierre, y continúan con 60 segundos de cierre lento, 30 % de cierre, con el objetivo de estabilizar las ondas generadas en el flujo.

Además, como resultado de los avances en la computación y los métodos numéricos, existe una tendencia de diseñar acueductos solo mediante simulaciones numéricas. Sin embargo, el desarrollo de investigación experimental sería muy recomendable para realizar un estudio más riguroso del efecto del aire atrapado en transitorios hidráulicos.

Referencias

- American Water Works Association. (2001). *Air-Release, Air/Vacuum and Combination Air Valves*. AWWA. <https://n9.cl/lg5k1>
- American Water Works Association. (2004). *Steel Pipe- A Guide for Design and Installation*. AWWA. <https://n9.cl/gyt65>
- Andrade, J. M., Escobar, G. M., & Paredes, D. F. (2019). Análisis en flujo permanente de los factores que inciden en la disminución de la capacidad hidráulica de la línea de conducción del sistema La Mica-Quito Sur. *Ingenio*, 2(2), 46-57. <https://doi.org/10.29166/ingenio.v2i2.1703>
- Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients (3rd ed.)*. Springer. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-1-4614-8538-4.pdf>
- De las Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://acortar.link/Tvz66H>
- Demir, E., Schmidt, A., & Ailyn, D. (2024). *Safety and risk management: hydraulic system failures and their impact on HDD operations*. Necmettin Erbakan University. <https://n9.cl/sxau8v>
- Kerger, F., Dewals, B., Archambeau, P., & Erpicum, S. (2011). Pressure-balanced Saint-Venant equations for improved asymptotic behavior in transient open-channel flows. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 235(2), 608-615. <https://doi.org/10.1016/j.cam.2010.06.007>
- Lozada, J. M. (2010). *Análisis de flujo no permanente en conductos a presión para aprovechamientos hidroeléctricos* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio institucional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2364>
- Mays, L. W. (2011). *Water resources engineering (2nd ed.)*. John Wiley & Sons. <https://acortar.link/HnVA05>

- Pozos, O. (2007) *Investigation on the effects of entrained air in pipelines*. [Tesis doctoral, Universität Stuttgart]. Repositorio institucional. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20910689>
- Sotelo, G. (1997). *Hidráulica General vol 1*. Editorial Limusa S. A. <https://www.ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/files/original/0ff57d95965bc22731468bf37b0c594f.pdf>
- Sviatoslav, K. (1982) *Diseño hidráulico*. Editorial Universitaria EPN. <https://es.scribd.com/doc/283882848/Diseno-Hidraulico-KROCHIN-pdf>
- The American Society of Mechanical Engineers. (2016) *ASME B.31.1 Power Piping*. ASME. <https://www.nrc.gov/docs/ML0314/ML031470592.pdf>
- White, F. M. (2011). *Fluid mechanics (7th ed.)*. McGraw-Hill. http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf
- Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Cambridge University Press. <https://acortar.link/PB64hD>

Transparencia

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés que influyan en la objetividad de este estudio.

Fuente de financiamiento

No se recibieron fondos financieros de ninguna organización que pudiera tener interés en los resultados presentados.

Contribución de autoría

María Gabriela Soria Pugo: Conceptualización, metodología, software, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, administración del proyecto, recursos, supervisión.

Verónica Valeria Yépez Martínez: Metodología, software, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos, supervisión.

Doris Alexandra Andrade Sandoval: Conceptualización, validación, análisis formal, investigación, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Silvia Alexandra Rodriguez Freire: Conceptualización, validación, análisis formal, investigación, gestión de datos, visualización, redacción - preparación del borrador original, redacción - revisión y edición, financiamiento, recursos.

Los autores contribuyeron activamente en el análisis de los resultados, revisión y aprobación del manuscrito final.