VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Validation of basic equations of pressurized pipe hydraulics in an experimental water distribution network

Validación de ecuaciones básicas de la hidráulica de conductos a presión en red experimental de distribución de agua

María Angélica López Ramírez [1], Efren Israel Palafox Navarro[2], Ruben Martínez[3], Xitlali Virginia Delgado Galván[4], José de Jesús Mora Rodríguez[5].
[12,3,4,5] Universidad de Guanajuato
ma.lopez.ramirez@ugto.mx, ei.palafoxnavarro@ugto.mx, xdelgado@ugto.mx, jesusmora@ugto.mx

Resumen

Las ecuaciones básicas de la hidráulica de conductos a presión son fundamentales para diseñar, gestionar y operar sistemas de abastecimiento de agua. Este artículo busca validar estos fundamentos en la red experimental de distribución de agua, ubicada en la Sede San Luisito de la Universidad de Guanajuato, evaluando régimen estacionario y transitorio, en línea de conducción, red de distribución, incluyendo fugas, gestión de la presión y protección contra golpe de ariete. Se combinan mediciones precisas de presión y caudal con simulaciones en Excel, EPANET y Bentley. Los resultados permiten mejorar la comprensión de las ecuaciones mediante un manual para estudiantes de Ingeniería Hidráulica que enfrentarán los retos actuales de grandes demandas concentradas en núcleos de población, sistemas de riego presurizados y desarrollos industriales, en donde se llegan a presentar bajas eficiencias físicas, sobreexplotación de recursos naturales y escasez hídrica.

Palabras clave: Pérdidas por fricción, Pérdidas por accesorios, celeridad, Golpe de Ariete, Válvula Reductora de Presión.

Abstract

The basic equations for pressurized pipe hydraulics are essential for the design, management, and operation of water supply systems. This study aims to validate these fundamental principles using the experimental water distribution network located at the San Luisito Campus of the University of Guanajuato. The evaluation includes both steady-state and transient flow conditions in transmission pipelines and distribution networks, as well as analyses of leakage, pressure management, and water hammer protection. Accurate pressure and flow measurements are combined with simulations performed in Excel, EPANET, and Bentley software. The results contribute to a better understanding of the governing hydraulic equations through the development of a practical manual for Hydraulic Engineering students, who will face current challenges such as increasing concentrated water demands in urban areas, pressurized irrigation systems, and industrial developments, where low physical efficiencies, overexploitation of natural resources, and water scarcity are common issues.

Keywords: Friction losses, Minor losses, Wave speed, Water hammer, Pressure Reducing Valve.

Introducción

Un sistema de abastecimiento tiene como objetivo llevar agua desde distintas fuentes hasta los diversos puntos de consumo, y representa una infraestructura fundamental para el desarrollo de núcleos de población, sistemas de riego presurizados y desarrollos industriales. Su correcto dimensionamiento y operación dependen directamente de los principios de la hidráulica de conductos a presión además de aspectos constructivos. Las ecuaciones que describen el comportamiento del flujo constituyen la base teórica para el diseño y gestión de las redes; sin embargo, su formulación se sustenta en hipótesis que no siempre reflejan con exactitud las condiciones reales de funcionamiento, donde intervienen fenómenos como variaciones en el consumo, pérdidas por fugas y cambios bruscos de presión.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

En este contexto, resulta fundamental verificar la precisión de estas ecuaciones mediante su contraste con mediciones físicas y mediante programas de cómputo hidráulico. El objetivo de la validación se realizará mediante escenarios en la red experimental de distribución de agua instalada en Sede San Luisito, conocida como La Perlita, de la División de Ingenierías del Campus Guanajuato en Guanajuato. Con ello se reforzarán los conocimientos de las y los estudiantes de Ingeniería Hidráulica mediante la actualización del Manual de Prácticas de la Unidad de Aprendizaje de Hidráulica de Conductos a Presión. Se analiza el comportamiento del flujo tanto en estado permanente como en estado transitorio, distinguiendo entre régimen inercial para líneas de conducción y no inercial para redes de distribución. Asimismo, se evalúan escenarios con fugas y gestión de presión, problemáticas relevantes ante el crecimiento de la demanda, bajas eficiencias físicas en sistemas de abastecimiento y escasez del recurso hídrico.



Figura 1. Red experimental, Sede San Luisito, Universidad de Guanajuato.

La metodología combina mediciones con equipos de precisión: manómetros digitales, transductores de presión, osciloscopio y medidores de caudal con cálculo analítico y simulación computacional, empleando herramientas de cálculo y modelado hidráulico en Excel, EPANET, módulos de ingeniería: WaterGEMS y Hammer de la marca Bentley. La comparación entre resultados experimentales y calculados permite evaluar su precisión y aplicabilidad y proporcionar mayor conocimiento, experiencia y entendimiento de las bases de la hidráulica de tuberías, además de relacionarlas con problemáticas actuales de suma importancia para el abastecimiento de agua tanto en núcleos de población, sistemas de riego presurizados y desarrollos industriales.

La información servirá para actualizar el libro “Hidráulica de Conductos a Presión” de la Universidad de Guanajuato” y aportará material didáctico actualizado a los retos de la infraestructura hidráulica para la formación de ingenieros, promoviendo sistemas más eficientes y sustentables.

Fundamentos de la hidráulica de conductos a presión

En mecánica de fluidos se analiza la capacidad del flujo para transportar materia y el mecanismo por el que cambia sus propiedades de un punto a otro, se establece que en los fluidos se deben satisfacer los principios de la mecánica del medio continuo; conservación de materia, segunda ley de Newton, conservación de energía y segunda ley de la termodinámica (Sotelo, 2011).

Del principio de conservación de materia se deriva la ecuación fundamental de la hidráulica, también conocida como ecuación de continuidad, que admite diferentes modificaciones de acuerdo con el tipo de flujo e hipótesis que se empleen. La segunda ley de Newton establece la relación que resulta de las fuerzas que actúan sobre la partícula del fluido y la variación en el tiempo de la cantidad de movimiento. La primera ley de la termodinámica, como el principio de conservación de energía deriva la ecuación que relaciona presión, densidad, temperatura; velocidad, elevación, trabajo mecánico y la cantidad de calor comunicado al flujo. De la segunda ley de la termodinámica se obtienen tres ecuaciones fundamentales para la hidráulica a partir de los dos primeros principios (Sotelo, 2011).

La ecuación de continuidad se rige por el principio de la conservación de la materia, es fundamental ya que establece que la masa de fluido dentro de un sistema permanece constante en el tiempo, es decir la masa neta de fluido que entra es igual a la que sale del sistema, muestra que el caudal es directamente proporcional al área de la sección y a la velocidad del flujo [1], es útil para problemas relacionados con flujo incompresible permanente o no permanente (Streeter et al., 2000).

$$Q = V \times A \quad [1]$$

Donde Q es el caudal, V es la velocidad de flujo y A es el área de la sección transversal de la conducción, normalmente circular en conducciones de agua.

La Ecuación de Bernoulli establece la conservación de energía en cualquier par de secciones a lo largo de una línea de corriente. Muestra la importancia de la energía potencial, energía de flujo y energía cinética [2], donde cada uno de sus términos se interpreta como una forma de energía disponible (Streeter et al., 2000).

$$\boldsymbol{Z_1} + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{\boldsymbol{V_1}^2}{\boldsymbol{2g}} = \boldsymbol{Z_2} + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{\boldsymbol{V_2}^2}{\boldsymbol{2g}} \quad [2]$$

Donde Z es la carga de altura geodésica, P es la presión, γ es el peso específico del líquido a conducir, V es la velocidad de flujo y g es la aceleración de la gravedad, los subíndices 1 y 2 se refiere al par de secciones a lo largo de la línea de conducción.

La ecuación del número de Reynolds es necesaria para la clasificación inicial de los flujos, en el estudio de resistencia al flujo, considerando las diferencias entre flujo laminar y turbulento, este número distingue ambos tipos de flujo y permite evaluar el dominio de las fuerzas viscosas sobre las de inercia (Sotelo, 2011).

$$Re = \frac{VD}{v} \quad [3]$$

Donde Re es el número de Reynolds, V es la velocidad del flujo, D es el diámetro de la tubería y n es la viscosidad cinemática del fluido a conducir.

La ecuación de pérdidas por fricción de Darcy – Weisbach es la ecuación de resistencia fluida más general para el caso de conductos a presión, resulta de la aplicación las leyes físicas del movimiento de Newton, predice las perdidas por fricción como función del fluido, velocidad, diámetro de la tubería y el tipo de material de esta, su función se asocia a problemas de flujo en tuberías (Saldarriaga, 2007).

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g} \quad [4]$$

Donde h_f son las perdidas por fricción, f es el coeficiente o factor de fricción, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería, V es la velocidad media del fluido y g es la aceleración de la gravedad.

En la ecuación de Darcy, se requiere calcular el coeficiente o factor de fricción, el cual se realiza con la ecuación de Colebrook – White, esta ecuación no es explicita, por lo que se requiere de un proceso iterativo para calcularlo, es válida para todo flujo turbulento en tuberías reales incluyendo el parámetro de la rugosidad relativa de estas (Saldarriaga, 2007).

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{\varepsilon/_D}{3.71} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad [5]$$

Donde f es el coeficiente o factor de fricción, e es la rugosidad del material de la tubería, D es el diámetro de la tubería y Re es el número de Reynolds del flujo.

Como alternativa a la ecuación no explicita de Colebrook – White, se tiene la ecuación de Swamee – Jain para obtener el factor de fricción de manera explícita, expresada para un rango amplio de flujo turbulento; hidráulicamente liso y rugoso, con números de Reynolds altos, tiene errores menores al 1% Con respecto a la ecuación de Colebrook – White, por lo que sus valores son aceptados.

$$f = \frac{0.25}{\left[\log\left(\frac{\varepsilon/D}{3.71} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \quad [6]$$

Donde f es el coeficiente o factor de fricción, e es la rugosidad del material de la tubería, D es el diámetro de la tubería y Re es el número de Reynolds del flujo.

Además de la ecuación de Darcy - Weisbach, existen otras expresiones utilizadas para estimar las pérdidas de carga por fricción, como lo son las ecuaciones de Hazen-Williams y Chezy - Manning, relacionan las características del conducto y del flujo con la pérdida de energía. Estas ecuaciones representan alternativas ampliamente utilizadas debido a su facilidad de aplicación y a los resultados aceptables que proporcionan en diversas condiciones de diseño y análisis hidráulico.

La ecuación de Hazen – Williams es la ecuación más sencilla que expresa la resistencia al flujo y las pérdidas de altura por fricción, es una ecuación empírica y explicita para el caudal y la velocidad, su principal uso se asocia a problemas en el diseño de tuberías (Saldarriaga, 2007).

$$h_f = \left(\frac{10.674L}{C_H^{1.852} D^{4.871}}\right) Q^{1.872} \quad [7]$$

Donde h_f son las perdidas por fricción, $C_{H\text{-}W}$ es el coeficiente de Hazen - Williams, L es la longitud de la tubería, D es el diámetro de la tubería y Q es el caudal.

La ecuación de Chezy – Manning se deriva de sus ecuaciones desarrolladas para obtener la velocidad media del flujo uniforme en canales abiertos, se observó que estas ecuaciones se podían emplear para el cálculo de perdidas por fricción en conductos completamente llenos, considerando el radio hidráulico de la sección llena y la pendiente hidráulica representa la perdida de energía por fricción (Chow, 1994).

$$h_f = \frac{10.3 n^2 Q^2 L}{D^{5.35}} \quad [8]$$

Donde h_f son las perdidas por fricción, n es el coeficiente de Manning, Q es el caudal, L es la longitud de la tubería y D es el diámetro de la tubería.

La ecuación general de pérdidas de energía por accesorios, o local, se utiliza debido a que Las conducciones están compuestas por tramos de tubería rectos y curvos lo que permite ajustarse a lo topografía del terreno, a cambios en la geometría de la sección y a dispositivos de control de descargas. Todos estos accesorios originan pérdidas de energía localizadas en el sitio de alteración del flujo, su magnitud se expresa como una fracción de la velocidad inmediatamente aguas abajo del sitio donde se produjo la perdida (Sotelo, 2011).

$$h_l = K \frac{V^2}{2g} \quad [9]$$

Donde hl son las pérdidas de energía lo cales por accesorios, K es el coeficiente de pérdida del accesorio, V es la velocidad del flujo, g es la aceleración de la gravedad.

Las ecuaciones para el análisis del golpe de ariete permiten describir la velocidad de propagación de la onda de presión y estimar la magnitud de las sobrepresiones generadas por cambios bruscos en el flujo.

La ecuación de Joukowsky determina la celeridad de la onda de presión, es decir, la velocidad con la que se propaga la perturbación a lo largo de la tubería después de un cierre o apertura rápida de una válvula. Esta velocidad depende tanto de la compresibilidad del agua como de la elasticidad de la tubería.

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + \frac{KD}{Ee}}} \quad [10]$$

Donde a es la celeridad de onda, K es el módulo volumétrico de elasticidad del agua, ρ es la densidad del agua, D es el diámetro interior de la tubería, E es el módulo de elasticidad del material de la tubería y e es el espesor de la tubería (Mataix, 2009).

La ecuación de Allievi estima la máxima sobrepresión cuando el tiempo de cierre de una válvula es menor o igual al tiempo que tarda la onda en recorrer la tubería y regresar (cierre instantáneo o rápido). En estas condiciones se presenta el golpe de ariete más severo (Wylie & Streeter, 1993).

$$\Delta H = \frac{av}{g} \quad [11]$$

Donde ΔH es la sobrepresión máxima, a es la celeridad de onda, v es la velocidad del flujo, g es la aceleración de la gravedad.

La ecuación de Michaud se emplea cuando el cierre de la válvula es lento, es decir, cuando el tiempo de cierre es mayor que el tiempo crítico del sistema. En este caso, la onda de presión se desarrolla de manera gradual y la sobrepresión es menor que la predicha por Allievi (Chaudhry, 2014).

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gt} \quad [12]$$

Donde ΔH es la sobrepresión máxima, L es la longitud de la tubería, v es la velocidad del flujo, g es la aceleración de la gravedad y t es el tiempo de cierre de válvula.

Clasificación de los flujos en base su estudio en el tiempo

El flujo de un fluido corresponde al movimiento de sus partículas con respecto a una superficie sólida y se caracteriza por variables como la velocidad, la presión y la aceleración, las cuales permiten describir su comportamiento hidráulico (Saldarriaga, 2007). De acuerdo con su variación temporal, el flujo se clasifica en dos categorías principales: flujo en estado permanente y flujo en estado transitorio. En el flujo permanente, las propiedades hidráulicas, como la velocidad, el caudal y la presión, permanecen constantes en el tiempo en cada punto del sistema, lo que simplifica su análisis y constituye la base para el diseño y operación de la mayoría de los sistemas de conducción de agua (Saldarriaga, 2007; Mataix, 2009).

Por el contrario, el flujo transitorio se presenta cuando dichas variables experimentan cambios con el tiempo como consecuencia de alteraciones en las condiciones de operación del sistema. Estas variaciones suelen originarse por maniobras de apertura o cierre de válvulas, arranque o paro de bombas, cambios bruscos en la demanda o fallas en la operación, generando ondas de presión que se propagan a lo largo de la tubería. Cuando estas ondas alcanzan magnitudes importantes se produce el fenómeno conocido como golpe de ariete, el cual puede ocasionar sobrepresiones o depresiones capaces de comprometer la integridad estructural de las tuberías y sus accesorios, por lo que su análisis es indispensable para el diseño de sistemas de protección y la operación segura de las redes de abastecimiento de agua (Mataix, 2009; Saldarriaga, 2007; Sotelo, 2011).

Modelación experimental de fugas en redes hidráulicas

Una red de distribución de agua potable (RDAP) tiene como objetivo suministrar agua en cantidad, presión y continuidad suficientes para satisfacer las necesidades de los usuarios, garantizando al mismo tiempo una operación eficiente y segura del sistema. Para lograrlo, es indispensable mantener un adecuado control y gestión de las presiones, ya que estas influyen directamente en el desempeño hidráulico de la red, la confiabilidad del servicio y la conservación del recurso hídrico. De acuerdo con Saldarriaga (2007), una RDAP debe diseñarse y operarse de manera que proporcione los caudales requeridos con presiones adecuadas en todos los puntos de consumo, evitando tanto presiones insuficientes como excesivas.

Las fugas representan una de las principales causas de pérdidas físicas de agua en las redes de distribución. Estas pueden originarse por deterioro de las tuberías, uniones defectuosas, fallas en accesorios o conexiones domiciliarias y, aunque en muchos casos corresponden a pérdidas continuas de bajo caudal, su acumulación puede generar volúmenes significativos de agua no contabilizada. La magnitud de una fuga depende principalmente de la presión de operación, las características del orificio, el material de la tubería y el tiempo transcurrido entre su aparición y su reparación. En consecuencia, la reducción de las presiones excesivas mediante estrategias de gestión constituye una de las medidas más efectivas para disminuir el volumen de pérdidas y prolongar la vida útil de la infraestructura (Denardi y Puccini, 2024).

La modelación experimental de fugas permite reproducir de manera controlada diferentes escenarios de operación para analizar la respuesta hidráulica del sistema ante variaciones de presión y caudal. Este tipo de estudios facilita la evaluación de estrategias de control de pérdidas, la validación de modelos hidráulicos y la comparación entre resultados experimentales y simulaciones numéricas, contribuyendo al desarrollo de metodologías para la gestión eficiente de las redes de abastecimiento.

Como parte de estas estrategias, en las RDAP se emplean diversos dispositivos hidráulicos para regular el comportamiento del flujo, entre los que destaca la válvula reductora de presión (VRP). Este accesorio introduce pérdidas de energía de forma controlada con el propósito de reducir y estabilizar la presión aguas abajo hasta un valor previamente establecido, evitando sobrepresiones que favorezcan la aparición o el incremento de fugas. Según Saldarriaga (2007), el uso adecuado de válvulas reguladoras de presión mejora las condiciones de operación de la red, disminuye las pérdidas de agua y contribuye a incrementar la eficiencia hidráulica y la confiabilidad del sistema de distribución.

Trabajo experimental y toma de datos

Montaje experimental e instrumentación

Para estudiar el comportamiento del flujo en conducciones hidráulicas, se utilizan instalaciones diseñadas para reproducir condiciones controladas de operación. Estas configuraciones incluyen depósitos de alimentación, tuberías con distintas características, dispositivos para regular el caudal y sensores adecuados para medir las variables de interés. El montaje se adapta según los objetivos del estudio, permitiendo modificar la disposición de los tramos de prueba y observar cómo se desarrolla el flujo bajo diferentes condiciones (Quintana-Molina et al., 2023).

Para analizar también situaciones en las que el flujo presenta variaciones o cambios bruscos, se complementa la instalación con equipos capaces de registrar modificaciones en periodos cortos de tiempo. La correcta selección y ubicación de los instrumentos es fundamental para garantizar que las mediciones reflejen el comportamiento real del flujo en el sistema (Besharat et al., 2017).

Procedimiento de medición

La toma de datos se realiza siguiendo protocolos definidos que aseguran la repetibilidad y fiabilidad de la información obtenida. En condiciones de flujo estable, se espera a que el sistema alcance un estado de equilibrio antes de registrar cualquier valor, y se emplean métodos complementarios para verificar el correcto funcionamiento de los equipos. Las variables características del flujo se anotan en intervalos adecuados para observar su evolución a lo largo del tiempo (Quintana-Molina et al., 2023).

Cuando se estudian cambios en las condiciones de operación, se establecen parámetros iniciales uniformes para todos los ensayos. Se introducen las modificaciones deseadas en el funcionamiento del sistema y se capturan los datos de forma continua, lo que permite describir cómo responde el flujo ante las alteraciones que se producen en la conducción (Besharat et al., 2017).

Tratamiento y análisis de datos

Una vez obtenidas las mediciones, se revisan y procesan para descartar valores anómalos y reducir las posibles fuentes de error. Se aplican principios de la hidráulica para interpretar la información y expresar los resultados de forma que permitan identificar tendencias y relaciones entre las variables que definen el

comportamiento del flujo. También se utilizan herramientas estadísticas para evaluar la consistencia de los datos y la validez de las observaciones realizadas (Quintana-Molina et al., 2023).

El análisis posterior permite distinguir patrones de comportamiento y evaluar cómo varía el flujo según las condiciones de operación del sistema. De esta forma, la información obtenida experimentalmente sirve como base para comprender el fenómeno y contrastar los planteamientos teóricos o modelos disponibles (Besharat et al., 2017).

Herramientas de cálculo y modelado para validación experimental

Para garantizar que las representaciones de los sistemas hidráulicos son fiables, es necesario establecer procedimientos que permitan relacionar cálculos teóricos, simulados y datos medidos en campo o laboratorio, utilizando herramientas que permitan garantizar la representabilidad del sistema analizado. Este proceso, se realiza inicialmente mediante hojas de cálculo en Excel, ya que facilitan la implementación de las ecuaciones fundamentales de la hidráulica, desde Bernoulli, pérdidas de carga con Darcy-Weiscach, Hazen-Williams o Chezy - Manning, pérdidas de energía por accesorios, velocidad de propagación de onda de presión y la estimación de parámetros característicos del equipo de bombeo. Al no emitir pasos de cómputo, permite verificar manualmente cada resultado, detectar desviaciones y ajustar valores de entrada como rugosidad, diámetro o viscosidad antes de recurrir a los modelos más complejos (Bermúdez, 2020).

Para el análisis y validación, se emplearán 3 programas de cómputo, EPANET que es libre y abierto, WaterGEMS y Hammer que son comerciales de la marca Bentley, de la cual se tiene licencia académica por parte de la Universidad de Guanajuato. Ambos softwares permiten configurar la geometría de la red, calcular la distribución de presiones y caudales en tuberías, mediante el uso implícito de las ecuaciones descritas y con ello validar el sistema de tuberías ante las condiciones de operación que se mencionaron, tanto en estado permanente como transitorio. Su uso permite contrastar los valores obtenidos con los registros medidos en laboratorio, identificando su influencia de cada variable y ajustando los parámetros del modelo para que se aproxime de manera coherente al sistema físico que se estudia (Gawande, 2023).

Cuando el análisis se extiende a situaciones donde ocurren cambios bruscos en el régimen, como los transitorios hidráulicos o el golpe de ariete, se utiliza el programa HAMMER de Bentley. Este software aplica el método de las características para resolver ecuaciones de flujo en estado variable, permitiendo describir la propagación de ondas de presión y evaluar factores como la inercia de las bombas o la ubicación de dispositivos de protección. Resulta especialmente útil en sistemas de baja carga, donde las simplificaciones teóricas suelen presentar mayor margen de incertidumbre y requieren una comparación detallada con datos experimentales para garantizar su validez (Abdel-Naby, 2025).

El uso combinado de estas herramientas conforma un procedimiento ordenado, iniciando en los cálculos fundamentales, se representa el sistema de régimen y se analiza su respuesta ante variaciones operativas. Esta secuencia permite disponer de predicciones fiables, reducir incertidumbres y contar con una base sólida para comparar, ajustar y confirmar que los modelos empleados reflejan adecuadamente el comportamiento real de las instalaciones hidráulicas (Abdel-Naby,2025; Bermúdez, 2020; Gawande, 2023).

El proyecto se realizó en el laboratorio de hidráulica mediante un modelo físico de sistema de abastecimiento y distribución de agua, organizado en 8 etapas para caracterizar el sistema, verificar equipos, validar ecuaciones hidráulicas, evaluar pérdidas, eficiencia y transitorios, usando hojas de cálculo y software de simulación.

Metodología

1. Reconocimiento y caracterización del sistema experimental. Se inició con la inspección integral de la instalación para identificar sus tres componentes principales: obra de captación, línea de conducción y red de distribución. Se elaboró un croquis esquemático que permitió ubicar cada tramo, medir longitudes, registrar diámetros y definir el material y clase de las tuberías. Además, se realizó la actualización de catastro de todos los accesorios presentes; válvulas, codos, uniones, tes, cruceros, medidores y manómetros, anotando sus

características geométricas y consultando en bibliografía especializada sus coeficientes de pérdida local (k) y Longitud Equivalente (LE), datos necesarios para los cálculos posteriores.

2. Verificación de la precisión de los equipos de medición. Antes de iniciar cualquier registro de datos, se evaluó la exactitud y repetitividad de los equipos de medición. Se calibraron los manómetros digitales ajustándolos a cero y definiendo sus unidades en centímetros columna de agua. Para los caudalímetros, se empleó el método volumétrico en tanque de descarga como referencia patrón: se midió el tiempo requerido para llenar un volumen conocido en un tanque de dimensiones fijas, tomando cinco lecturas por cada condición de flujo. En el caso de la presión, se verificó la precisión de la lectura de los equipos con la altura indicada en el piezómetro para 3 elevaciones diferentes. Se calcularon valores promedio y errores relativos comparado con los datos proporcionado por los fabricantes de los equipos, para asegurar que las mediciones cumplieran con los requisitos de precisión del estudio. En caso contrario se corregirán los valores medidos para los cálculos posteriores.

3. Determinación de pérdidas de energía por fricción. Se seleccionaron tramos rectos de tubería de diámetro constante para cuantificar las pérdidas continuas. Se garantizó el llenado completo de la columna de agua y la eliminación de bolsas de aire antes de poner en marcha el equipo de bombeo. Se establecieron cinco condiciones de operación, desde el caudal máximo hasta valores menores regulados mediante válvula. En cada escenario se registró el caudal y las presiones al inicio y final de cada tramo. La diferencia de carga piezométrica permitió obtener la pérdida de energía experimental. Posteriormente, se realizaron cálculos analíticos mediante las ecuaciones de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams y Chezy-Manning, y se compararon los resultados con los valores medidos.

4. Validación de las pérdidas de energía por accesorios. En esta etapa se evaluó la disipación de energía provocada por cambios en la geometría del flujo, utilizando como referencia el tren de descarga, codos y una válvula de mariposa. Se dirigió el flujo hacia el circuito donde se encontraba instalada. Se repitió el procedimiento de trabajo con cinco caudales distintos, registrando las presiones inmediatamente antes y después de los accesorios. A partir de la diferencia de carga y la velocidad calculada, se determinaron los coeficientes de pérdida k y LE experimentales, los cuales se contrastaron con los valores tabulados en la literatura técnica para validar la ecuación de pérdidas locales.

5. Evaluación de la eficiencia física de la red. Se realizaron pruebas en dos escenarios operativos: uno con fugas simuladas mediante válvulas abiertas y otro cerrado. Se midió el caudal total suministrado por la bomba y los volúmenes entregados a las zonas de consumo, utilizando jarras patrón como referencia. Se registraron también presiones en puntos estratégicos. La eficiencia física se definió como la relación entre el volumen establecido como consumidores y el volumen total suministrado, permitiendo cuantificar la mejora en el rendimiento al reducir las pérdidas no deseadas.

6. Evaluación de la eficiencia energética de la bomba. Se realizaron pruebas en diversos escenarios de descarga, se midieron las presiones a la descarga de la bomba, profundidad del nivel del agua en la cisterna y energía eléctrica consumida por el motor, con ello se evaluaron las eficiencias eléctrica, mecánica e hidráulica de las simulaciones de bombeo. Se comparó con la capacidad del equipo del motor y de operación de acuerdo con el modelo de la bomba.

7. Validación mediante simulación hidráulica. Finalmente, se integraron todos los datos obtenidos en las pruebas anteriores para modelar el sistema en el software EPANET. Se ingresaron las elevaciones, longitudes, diámetros, rugosidad de materiales, coeficientes de pérdida y características de operación de la bomba. Se ejecutó la simulación en régimen permanente y se compararon sus resultados con los cálculos analíticos realizados en hojas de cálculo y con las mediciones de laboratorio, con el fin de verificar la correspondencia entre modelos teóricos, numéricos y el comportamiento real del sistema.

8. Validación de las ecuaciones del golpe de ariete en régimen transitorio de presión. El fenómeno de golpe de ariete se evaluó experimentalmente mediante el registro de las variaciones de presión utilizando transductores de presión y un osciloscopio, durante una maniobra de cierre lento de una válvula de mariposa. De manera simultánea, se midieron la presión, el caudal y el tiempo de maniobra. Con base en los datos experimentales, se determinó la celeridad de onda mediante la ecuación [10] y la sobrepresión utilizando las ecuaciones [11] y [12]. Finalmente, el fenómeno transitorio se simuló en el software Bentley HAMMER, permitiendo comparar los resultados experimentales, analíticos y numéricos para validar la aplicación de las ecuaciones de golpe de ariete.

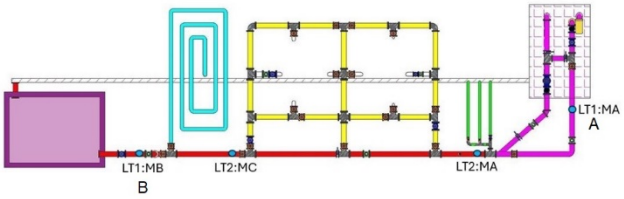


Figura 2. Representación en planta de la red experimental

Resultados

Línea de conducción en estado permanente

La validación de las ecuaciones utilizadas para estimar las pérdidas de energía por fricción mostró una buena estimación entre los valores experimentales y los obtenidos mediante las ecuaciones de Darcy–Weisbach y Chezy–Manning. En contraste, la ecuación de Hazen–Williams presentó una ligera subestimación de las pérdidas de energía, registrando un error aproximado del 20 % con respecto a los datos experimentales, estos resultados se obtuvieron considerando un coeficiente de Manning de n = 0.009 y un coeficiente de Hazen–Williams de CH = 150, e incorporando además las pérdidas locales asociadas a los accesorios del sistema en el tramo comprendido dentro del tramo A - B, cuya sumatoria del coeficiente de pérdidas por accesorios fue de 10.74. Por su parte, los resultados obtenidos mediante la simulación en EPANET mostraron una alta coincidencia con los valores experimentales, debido a que el programa emplea la ecuación de Darcy–Weisbach para el cálculo de las pérdidas por fricción.

ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 1. *Análisis de resultados de las pérdidas de energía por fricción.*

Tramo	Caudal (m^3/s)	Factor de fricción Ecuación de Swamee y Jain	Pérdidas de energía por fricción, hf (m)				
			Experimental	Analítica			Simulación en EPANET
				Ecuación de Darcy-Weisbach	Ecuación de Hazen-Williams	Ecuación de Chezy-Manning	
A - B	0.023	0.023	7.985	8.004	6.927	7.995	8.01
	0.020	0.023	6.235	6.206	5.395	6.186	6.21
	0.015	0.023	3.690	3.297	2.898	3.266	3.3
	0.009	0.024	1.750	1.168	1.043	1.141	1.17

La validación de la ecuación para la estimación de pérdidas localizadas en una válvula de mariposa evidenció diferencias moderadas entre los valores analíticos y los obtenidos experimentalmente, con un error promedio cercano al 12 %. En contraste, los resultados obtenidos mediante la simulación en EPANET mostraron una excelente concordancia con las mediciones experimentales. Estos hallazgos permiten contrastar los valores del coeficiente de pérdidas locales de la válvula de mariposa, obtenidos experimental y numéricamente, con los valores teóricos reportados por Sotelo (2011).

Tabla 2. *Análisis de resultados de pérdidas locales por válvula de mariposa.*

Número de lectura	Grado de apertura	Q (m3/s)	Pérdidas locales por válvula de mariposa, hL (m)			Coeficiente de pérdida por válvula de mariposa, Kv		
			Experimental	Analítica	Simulación en EPANET	Teórico	Experimental	Simulación en EPANET
1	10°	0.022	0.99	0.20	0.99	0.52	2.54	2.54
2	40°	0.021	3.60	3.59	3.6	10.8	10.81	10.83
3	60°	0.016	10.89	11.04	10.89	58.8	57.98	57.99
4	80°	0.010	16.40	19.84	16.4	256	211.72	211.66
5	90°	0.006	18.91	18.72	18.91	751	758.54	758.65

Línea de conducción en estado transitorio

Se evaluó el fenómeno del golpe de ariete mediante la ecuación de Michaud con el propósito de determinar la sobrepresión generada durante un cierre lento de válvula de 0.2 s ya que este es mayor al tiempo de regreso de la onda de celeridad de 0.043 s. Los resultados obtenidos se compararon con la simulación de transitorios hidráulicos realizada en Hammer. Se observó que la presión máxima registrada experimentalmente fue superior a la obtenida mediante la simulación. Asimismo, el modelo numérico mostró una disipación de la energía más gradual, mientras que en el sistema experimental la atenuación de la presión ocurrió en un intervalo de tiempo considerablemente menor (Figura 3). Estas diferencias pueden atribuirse a

las simplificaciones inherentes al modelo numérico y a las condiciones reales de operación presentes durante el ensayo experimental.

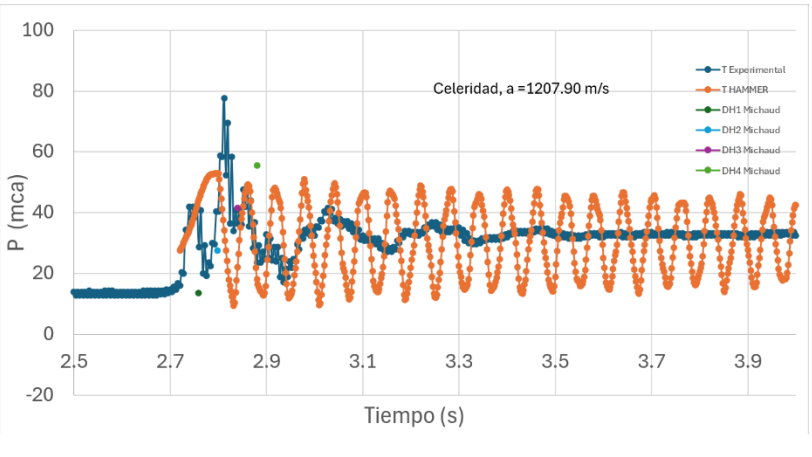


Figura 3. Comparación de transitorio experimental y simulado en Hammer.

Eficiencia física dentro de red de distribución de agua.

Los ensayos se llevaron a cabo en una red experimental de conducción de agua, en la que las presiones registradas en los puntos de consumo variaron cerca de 13 y 15 mca. Posteriormente, mediante la regulación del sistema, la presión se ajustó a 4 mca. La comparación entre los resultados obtenidos mediante la simulación hidráulica en EPANET y los datos experimentales evidenció que la regulación de presión constituye una estrategia eficaz para optimizar el desempeño hidráulico de la red. Al mantener constante la demanda y reducir la presión de operación a 4 mca durante los periodos de menor consumo, se observó una disminución significativa del volumen de agua perdido por fugas. En consecuencia, la eficiencia física del sistema aumentó debido a la reducción de las pérdidas de agua, manteniendo simultáneamente niveles de presión adecuados para garantizar una operación hidráulica eficiente.

Tabla 3. *Comparación de eficiencias físicas en red de distribución con y sin regulación de presiones.*

Escenario	Horario (h)	Escenarios sin regular presión con VRP				Escenarios regulando presión a 4 mca			
		Consumo (l/s)	Fugas (l/s)	Demanda (l/s)	Eficiencia (%)	Consumo (l/s)	Fugas (l/s)	Demanda (l/s)	Eficiencia (%)
1	0 a 5	5.42	7.30	12.72	42.61	5.42	3.65	9.07	59.76
3	6 a 11	10.95	5.25	16.20	67.59	10.95	2.75	13.70	79.90
4	12 a 17	12.61	4.56	17.16	73.44	12.61	2.35	14.96	84.26
2	18 a 23	8.31	6.26	14.57	57.03	8.31	3.23	11.54	72.00
		Eficiencia promedio =			60.17	Eficiencia promedio =			73.98

Conclusión

Los resultados obtenidos demuestran que la validación experimental es fundamental para verificar la aplicabilidad de las ecuaciones básicas de la hidráulica de conductos a presión en sistemas de abastecimiento de agua. En general, se observó una buena concordancia entre las mediciones experimentales, los cálculos analíticos y las simulaciones hidráulicas; las diferencias identificadas se atribuyen principalmente a las simplificaciones de los modelos, las incertidumbres de medición y las condiciones reales de operación que no son representadas completamente en las simulaciones. Estos hallazgos resaltan la importancia de complementar el análisis analítico y numérico con la validación experimental para mejorar la confiabilidad de las predicciones hidráulicas.

En régimen permanente, las ecuaciones de Darcy–Weisbach y Chezy–Manning reprodujeron con mayor precisión las pérdidas de energía por fricción registradas experimentalmente, mientras que la ecuación de Hazen–Williams presentó desviaciones apreciables bajo las condiciones analizadas, evidenciando las limitaciones inherentes a su naturaleza empírica. De igual forma, la evaluación de las pérdidas localizadas mostró una adecuada correspondencia entre los resultados experimentales y las simulaciones desarrolladas en EPANET, lo que confirma la capacidad de este tipo de herramientas para representar el comportamiento hidráulico de accesorios y elementos de control presentes en las redes de distribución.

En el análisis del régimen transitorio, la comparación entre las mediciones experimentales y las simulaciones realizadas en Hammer permitió reproducir el fenómeno de golpe de ariete. Las diferencias identificadas en la magnitud de la sobrepresión y en la velocidad de disipación de la energía ponen de manifiesto la influencia de las condiciones reales de operación y de las simplificaciones inherentes a los modelos numéricos, destacando la necesidad de complementar la modelación computacional con procesos de calibración y validación experimental para incrementar la confiabilidad de las predicciones hidráulicas.

Asimismo, los resultados obtenidos en la red de distribución evidencian que la implementación de estrategias de gestión de presiones mediante válvulas reductoras representa una alternativa eficaz para disminuir las pérdidas por fugas e incrementar la eficiencia física del sistema, alcanzando una mejora promedio cercana al 14 %. Este comportamiento confirma que el control de presiones constituye una de las medidas de mayor impacto para optimizar el desempeño operativo de las redes de abastecimiento, prolongar la vida útil de la infraestructura y favorecer un aprovechamiento más eficiente del recurso hídrico.

En conjunto, la investigación aporta evidencia experimental que fortalece la validez de las ecuaciones básicas de la hidráulica de conductos a presión y demuestra la capacidad de herramientas como EPANET y Hammer para representar el comportamiento hidráulico de sistemas reales cuando se sustentan en parámetros adecuadamente calibrados. Además de contribuir a la actualización del Manual de Hidráulica de Conductos a Presión de la Universidad de Guanajuato, los resultados generan una base experimental de referencia para la formación de estudiantes de ingeniería hidráulica y para ayuda en gestión sostenible de los sistemas de distribución de agua frente a los crecientes desafíos asociados con la demanda, las pérdidas de agua y la disponibilidad del recurso.

Referencias

Abdel-Naby, A. A., Abdel-Moaty, M. A., & Lotfy, E. R. (2025). Optimal water hammer protection strategies for low-head hydraulic systems: A case study using Bentley HAMMER. Mansoura Engineering Journal, 50(4), 1–9.

Bermúdez, J. (2020). Cálculo y modelación hidráulica con hojas de cálculo. Editorial Universidad Nacional de Colombia.

Besharat, M., Viseu, M. T., & Ramos, H. M. (2017). Experimental study of air vessel behavior for energy storage or system protection in water hammer events. Water, 9(1), 63. https://doi.org/10.3390/w9010063

Chaudhry, M. H. (2014). Applied hydraulic transients (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8538-4

Chow, V. T. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill Interamericana.

Denardi, F., & Puccini, A. (2024). Gestión de fugas y control de presión en redes de agua potable. Editorial Tecnología del Agua.

Gawande, J. C., & Hedaoo, M. N. (2023). Analysis of water distribution network using EPANET. Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 10(7), 291–299.

Mataix, C. (2009). Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas (2.ª ed.). Editorial del Castillo.

Quintana-Molina, J., García-Navarro, P., & Alcrudo, F. (2023). Medición y análisis experimental de flujos transitorios en tuberías. Editorial Universidad de Zaragoza.

Saldarriaga, J. (2007). Hidráulica de tuberías y canales (3.ª ed.). Editorial Universidad de los Andes.

Sotelo, G. (2011). Introducción a la mecánica de fluidos (5.ª ed.). Limusa Wiley.

Streeter, V. L., Wylie, E. B., & Bedford, K. W. (2000). Mecánica de fluidos (9.ª ed.). McGraw-Hill.

Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1993). Fluid transients in systems. Prentice Hall.