

# Modelo numérico de detección de fugas para sistema de tuberías.

## Numeric leak detection model for pipe system.

July Andrea Gómez-Camperos<sup>1</sup>, Pedro Julián García-Guarín<sup>2</sup>, Christian Nolasco-Serna<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Colombia

<sup>3</sup>Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia

Recibido: 20 de enero de 2020

Aprobado: 22 de abril de 2020

**Resumen**— La distribución usando redes hidráulicas define la planeación, producción y flexibilidad de la hidro-gestión en empresas. Sin embargo, las fugas representan pérdidas económicas en términos de mantenimiento y ubicación de las fallas. En este contexto, el flujo y presión al momento de que ocurra un fallo son las variables de análisis. Como primera contribución de esta investigación proponemos simular las pérdidas volumétricas de agua. De hecho, el software libre Openfoam es la herramienta computacional y el modelo de turbulencia  $k-\omega$  se seleccionó para un fluido en transición, es decir fluido que esta entre el régimen laminar y turbulento. La segunda contribución de esta investigación consiste en un algoritmo para detectar fugas en un sistema de tuberías. El algoritmo está basado en Teorema de Reynolds. Respecto a los resultados obtenidos con el Teorema de Reynolds, podemos decir que resultados son comparados con una red hidráulica real, obteniendo errores porcentuales de 4% para los mejores datos y 9% para el peor, y una distancia promedio para encontrar la fuga igual a 2,7 metros. Se demostró que la presión cae de forma lineal de acuerdo con la ley de Darcy. En conexión con los resultados, en métodos tradicionales se instalan manómetros a lo largo de las tuberías para identificar esta caída de presión, si el número de manómetros no es suficiente, la fuga puede pasar indetectada. El método propuesto en este proyecto permite localizar la fuga únicamente utilizando 2 manómetros. Lo cual lo hace más práctico para el caso de tuberías de difícil acceso.

**Palabras Claves:** Sistemas de tuberías, Analisis de Fugas, Ley de Darcy, Teorema de Reynolds, Modelo de Turbulencia.

**Abstract**— Distribution using hydraulic networks defines the planning, production, and flexibility of hydro-management in companies. However, leaks represent economic losses in terms of maintenance and fault location. In this context, the flow and pressure at the time a fault occurs, are the analysis variables. As the first contribution of this research, we propose to simulate volumetric water losses. OpenFOAM free software is the computational tool and the turbulence model  $k-\omega$  was selected for fluid in transition, that is, fluid that is between the laminar and turbulent regime. The second contribution of this research consists of an algorithm to detect leaks in a pipe system. The algorithm is based on Reynolds' theorem. Regarding the results obtained with the Reynolds Theorem, we can say that results are compared with a real hydraulic network, obtaining percentage errors of 4% for the best data and 9% for the worst, and an average distance to find the leak equal to 2.7 meters was shown that the pressure drops linearly according to Darcy's law. In connection with the results, in traditional methods pressure gauges are installed along the pipes to identify this pressure drop if the number of gauges is not sufficient, the leak can pass undetected. The method proposed in this project allows locating the leak only using 2 manometers. Which makes it more practical for difficult access pipes.

**Keywords:** Pipe systems, Leak analysis, Darcy's law, Reynolds' theorem, Turbulence mode.

\*Autor de correspondencia

Correo electrónico: [jagomez@ufpso.edu.co](mailto:jagomez@ufpso.edu.co) (July Andrea Gómez Camperos)

La revisión por pares es responsabilidad de la Universidad de Santander.

Este es un artículo bajo la licencia CC BY-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/>).

Forma de citar: J. A. Gómez-Camperos, P. J. García-Guarín y C. Nolasco-Serna, "Modelo numérico de detección de fugas para sistema de tuberías", Aibi revista de investigación, administración e ingeniería, vol. 8, no. 2, pp. 113-120, 2020.

## I. INTRODUCTION

La detección de fugas en sistema de tuberías de agua tienen un impacto negativo en términos de conservación de los recursos naturales, se estima que la cantidad de agua perdida se encuentra entre el 20-30% de la producción total y puede llegar a alcanzar incluso hasta el 50% para las redes de distribución más antiguas [1]. La fuga de la tubería puede resultar, por ejemplo, de una mala mano de obra o de cualquier causa destructiva, debido a cambios repentinos de presión, acción corrosiva, grietas, defectos en las tuberías o falta de mantenimiento [2].

Las redes públicas de tuberías de agua se extienden por miles de kilómetros, que consisten en muchos segmentos de tubería conectados por juntas [3]. Estas tuberías están sujetas al tráfico y otras cargas superficiales que sobrecargan las tuberías y las juntas. La fuga de agua se produce por la red y las conexiones de servicio en las juntas y accesorios, por la rotura debido a cargas excesivas impuestas y agujeros causados por la corrosión [4] y [5].

Se han desarrollado muchos métodos de detección de fugas basados en modelo y mecanismos [6-13].

Existen varios métodos para la detección directa de fugas basadas en la detección física visual o palpable [14]. Del fluido, que se denominan métodos basados en hardware. Estos métodos dependen mucho del equipo físico instalado a lo largo de la tubería. Por otro lado, hay enfoques de monitoreo de tubería computacional (CPM), que se refieren a los sistemas basados en software que operan con instrumentación limitada y proporcionan herramientas algorítmicas que amplían las posibilidades de los operadores de tuberías para reconocer las fugas en línea.

Algunos de los métodos usados en la práctica para localizar fugas emplean, por ejemplo:

a. El balance de masa en estado permanente. El inconveniente de este método radica en ser altamente sensible a diversas perturbaciones, caídas de presión y a la dinámica de la tubería [15] y [46].

b. La prueba hidrostática, que requiere sacar de operación la tubería e inyectar aire a presión en el ducto. Al monitorear la presión en el ducto durante un tiempo determinado se identifica la presencia de una fuga si se presenta una caída de esta. Así se concluye la existencia de una fuga y para localizarla se necesita segmentar, sellar y repetir la prueba hasta ubicar su posición [16].

c. La prueba por la que se colocan dispositivos directamente en las tuberías, mejor conocidos como pre-localizadores u orejas. Estas registran las ondas sonoras que producen las fugas, la información que obtienen acerca del nivel de ruido se almacena y se analiza para localizar el sitio de la fuga por medio de la medición de la resonancia acústica [17] y [47].

d. El método de desviación del flujo de presión se utiliza en gran medida en programas de detección de fugas basados en modelos en combinación con un enfoque de balance de masa para cubrir la detección de fugas a tiempo completo para una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Los métodos de desviación del flujo de presión son básicamente un subconjunto de la técnica de fuga transitoria inversa. El primer campo aplicado del método de análisis de transitorios inversos fue el amplio uso en problemas de transporte de aguas subterráneas basado en un modelo de red de tuberías de estado estable [18].

Todos estos métodos tienen grandes inconvenientes, como costos elevados de implementación y de mantenimiento, en el caso del acústico y del electromagnético el ruido del sistema debe de ser eliminado casi por completo para tener una medición fidedigna, el uso de personal adicional, un largo tiempo de localización de la fuga y en

los casos de ser redes muy grandes las pérdidas por fugas pueden ser consideradas como errores de medición.

En el diagnóstico de fugas, no solo es importante detectar la fuga y cuantificarla, sino que es una prioridad localizarla con la mayor precisión posible [19]. Por lo tanto, es necesario tener algoritmos que determinen con precisión la ubicación de la fuga porque no siempre es visible desde fuera de la tubería [20] y [21].

El objetivo de este trabajo es utilizar un software libre llamado OpenFoam para simular las pérdidas volumétricas de agua con un modelo de flujo en transición, es decir fluido que esta entre el régimen laminar y turbulento. Además, se propone desarrollar un algoritmo basado en el teorema de Reynold para detectar fugas en tuberías utilizando solamente dos nanómetros, lo cual hace al método más práctico para el caso de tuberías de difícil acceso.

## II. MARCO TEÓRICO

Para relizar el modelo numérico de detección de fugas en el sistema de tuberías se analizó varios parámetros y plataformas que se describen en esta sección, es de resaltar que se utilizo software libre, como lo es OpenFOAM y Salome para la simulación de la fuga. Se realizo un instrumento virtual en el software de labview para comprobar el modelo numérico en un banco de tuberías.

### a. Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (computational fluid dynamics) es una técnica basada en modelos numéricos que tiene como objetivo analizar el movimiento de fluidos, la transferencia de calor, la transferencia de masa y la reacción química. [22].

El software de dinámica de fluidos computacional (CFD) se utiliza para comparar la simulación numérica con los experimentos. El enfoque numérico tiene una ventaja práctica importante ya que podría describir geometría compleja. El modelo de turbulencia k-ε es el modelo más común utilizado en CFD para simular características de flujo para condiciones de flujo turbulento. [23].

Los paquetes de dinámica de fluidos computacional ahora se están utilizando ampliamente en la industria y la investigación por igual para simular fenómenos como el flujo de fluidos, la transferencia de calor y la difusión.

### b. Salome

SALOME es una plataforma de código abierto para realizar simulaciones multifísicas, desarrollada conjuntamente por las empresas desarrolladoras CEA, EDF y OpenCascade. La plataforma proporciona los medios para que diferentes programas comuniquen datos, controlen la ejecución general de la simulación, asignen y transformen campos de datos en diferentes mallas y visualicen resultados. SALOME admite marcos de acoplamiento flexibles y ajustados, así como la ejecución distribuida en diferentes procesadores y nodos informáticos[24].

La plataforma SALOME, una herramienta dedicada al entorno de los códigos científicos. La plataforma viene en forma de una caja de herramientas que ofrece funcionalidades para CAD, mallado, acoplamiento de código, visualización, desarrollo de GUI. Estas herramientas se pueden combinar para crear aplicaciones integradas que hacen que los códigos científicos sean más fáciles de usar e interactúen bien con su entorno, ya sean otros códigos, CAD y herramientas de mallado o software de visualización [25].

**c. OpeFoam**

La biblioteca de CFD de código abierto OpenFoam contiene un método para resolver flujos newtonianos de superficie libre utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por el teorema de Reynolds junto con un método de volumen de fluido [26] y [27].

Estructura de OpenFOAM:

OpenFOAM se divide en tres grandes módulos dependiendo de la fase de resolución del problema en que se encuentre, como se puede apreciar en la Figura 1.

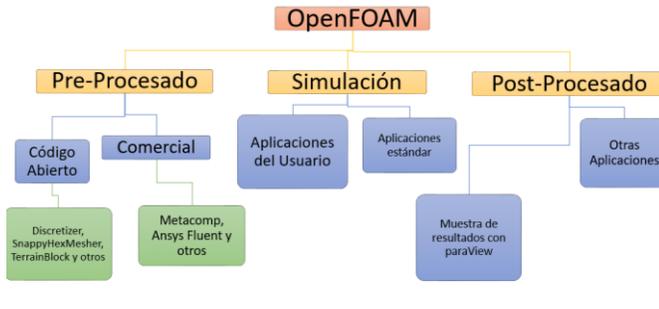


Figura 1: Descripción general de la estructura de OpenFOAM Fuente: [28].

**d. SolidWorks**

Es un software de entorno CAD para diseño de mecanismos y estructuras muy ampliamente usado en la ingeniería, y permite realizar el proceso completo de diseño mecánico[29].

**e. Fugas de Agua**

Salida o pérdida de agua incontrolada en una tubería, debido a fallas como corrosión interior o exterior de la tubería, fuerza de la naturaleza, acciones de terceros y fallas en mantenimiento de la tubería. Hay dos tipos básicos de fugas: visibles y no visibles. Las fugas no visibles significan pérdidas de producto, mientras no sean reparadas, daños a la estructura y daños ambientales que según sea el tiempo que lleve la fuga o la magnitud que posea pueden ser irreversibles. [30] y [31].

**f. Flujo en Tuberías**

El flujo es el fluido en movimiento y está sujeta en función de variables físicas como presión, densidad, y velocidad en todos los puntos del fluido El flujo de fluidos puede ser permanentes o no permanentes, uniforme o no uniforme, laminar o turbulento [32].

**g. Pérdidas de carga en tuberías**

En el cálculo de las pérdidas de carga en tuberías desempeña un papel discriminante que el régimen de corriente sea laminar o turbulento [33]. El régimen de flujo depende principalmente de la razón de fuerzas inerciales a fuerzas viscosas en el fluido, conocida como número de Reynolds (NR) [34]. Así, si el NR es menor a 2000 el flujo será laminar y si es mayor a 4000 será turbulento. La mayoría de los flujos que se encuentran en la práctica son turbulentos, por tal razón la presente investigación se desarrolla en mencionado tipo de régimen de flujo

**h. Ecuacion de Darcy**

La ecuación de Darcy se utiliza para calcular la pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas y largas tuberías redondas, tanto para flujo laminar como turbulento. La

diferencia entre los dos flujos está en la evaluación del factor de fricción adimensional como se muestra en la ecuación 1[35].

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

- $h_L$ = Pérdida de energía debido a la fricción (m)
- $L$  = Longitud de la corriente de flujo (m)
- $D$  = Diámetro del conducto (m)
- $V$  = Velocidad del flujo promedio (m/s)
- $f$  = Factor de fricción sin dimensiones.

**i. Ecuación de Colebrook**

Es utilizada universalmente para el cálculo del factor de fricción en flujo turbulento [36] y [37].

En [38] y [39] se establecieron para el flujo turbulento la relación entre las variables  $f$  y  $Re$  que es mostrada en la ecuación 2 no lineal.

$$\frac{1}{f} = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad (2)$$

Posteriormente, para flujos en transición y turbulentos,  $f$  está relacionado con el valor de  $Re$  y  $\epsilon/D$  (rugosidad relativa de la tubería) como se presenta en la ecuación 3:

$$\frac{1}{f} = -2 \log \left[ \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (3)$$

**h. Instrumento virtual**

Un Dispositivo Virtual es un programa basado en LabVIEW para controlar y manipular un prototipo físico. LabVIEW es un lenguaje de programación de gráficos que proporciona potentes funciones de programación como alta flexibilidad, ciclo de desarrollo corto y buen rendimiento en paralelo. El software desarrollado por LabVIEW está compuesto por el "panel frontal" y el "panel posterior". El "panel frontal" contiene controles e indicadores que permiten al usuario interactuar con el software, mientras que el "panel posterior" consta de líneas de flujo y diagramas de bloques que son los códigos fuente gráficos del programa. Los instrumentos virtuales son una mejora de los instrumentos tradicionales que se caracterizan por realizar una o varias funciones específicas que no pueden ser modificados [40] y [41].

**III. MATERIALES Y METODOS**

**a. Configuración experimental**

La figura 2 muestra la plataforma de tubería experimental utilizada. El banco de tuberías tiene dos contenedores de vidrio de 0,4 m de largo, 0,3 m de alto, con un espesor de 5 mm, utilizados como depósitos de agua, dos bombas que trasladan el fluido de un estanque al otro, cuatro bases o soportes para mantener un  $\Delta z = 0$ , y tuberías y accesorios de 1/2 pulgada. El banco de tuberías cuenta con los elementos descritos en la Tabla 1.



Figura 2: Configuración experimental.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1: Componentes del diseño Experimental.

Elementos Utilizados		
Instrumento	Tipo	Rango de Medición
Sensor de presión	PG2454	0 a 60 psi
Medidor de flujo	SBG434	0 a 35 L/min
Tarjeta de adquisición de datos	NI cDAQ-9178 y tarjeta NI 9203	N/A
Bomba	WATER PUMP QB - 60	r.p.m 3450 1./min Voltaje: 120 v
Depósito	Contenedores de vidrio	2 contenedores de vidrio de 0.4 m de largo, 0.3 m de ancho y 0.3 m de alto, con un espesor de 5 mm
Tubería	PVC	tuberías y accesorios de 1/2 pulgada
Válvulas	N/A	Cuatro válvulas de compuerta (apertura-cierre manual) para simular fugas, conectadas a mangueras de Retorno al depósito.
Software	N/A	Software NI-LabVIEW y MATLAB/Simulink para procesamiento y adquisición de las señales de presión Y caudal.

Fuente: [42].

Con este banco experimental se obtuvo el caudal Q de la entrada (salida de la bomba) con 100 datos tomados experimentalmente del prototipo real, se determina la velocidad del agua para cada dato utilizando la ecuación (4).

$$V = \frac{Q}{A}, \quad (4)$$

Donde A es el área para el diámetro de 1/2 pulgada. El promedio de los 100 datos se obtuvo:

$$V_{prom} = 1,7717 \text{ m/s}$$

Esta velocidad promedio se utilizó para las condiciones iniciales de la simulación.

### b. Modelo en Solidworks

Por medio del software SolidWorks se realizó un bosquejo del modelo real que por requisitos de simulación el modelo debe estar en condiciones sólidas, es decir en vez de tubería; cilindro y en vez de tanque, un cubo, ya que OpenFoam reemplaza el sólido por el fluido

y las paredes con las que choca dicho fluido serían las caras del mismo sólido. La Figura 3 muestra la geometría realizada.

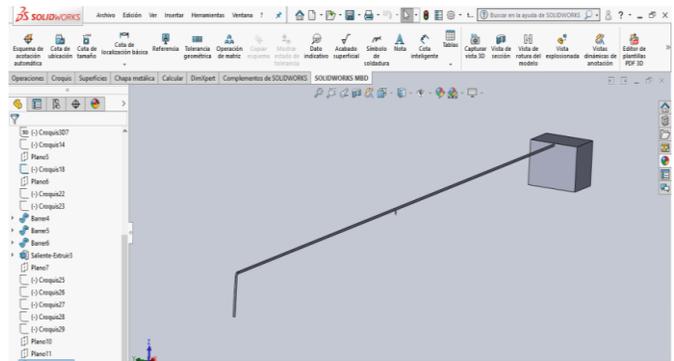


Figura 3 Modelo en solidworks.  
Fuente: Elaboración propia.

### c. Mallado en Salome

Al realizar el mallado en salome de la geometría realizada en el software de solidwork, la Figura 4 muestra la malla en el orificio de la fuga, y la plataforma salome nos da la información de la malla con valores del número de nodos, volúmenes, caras y aristas.

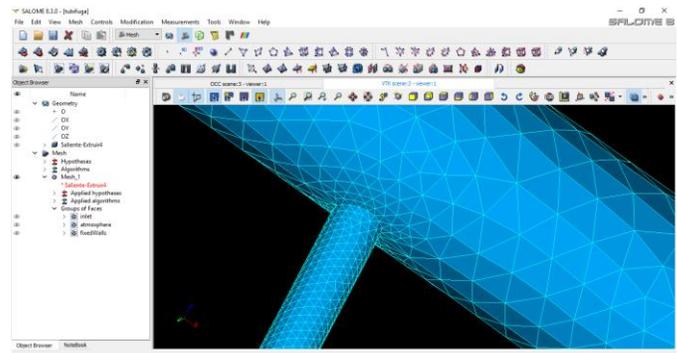


Figura 4 Mallado en Salomen.  
Fuente: Elaboración propia.

## IV. RESULTADOS, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Para realizar una validación de los datos encontrados de caudal y presión para las salidas y entradas de fluido, tanto en el banco experimental, como en las simulaciones realizadas en el software openfoam se optó por modelar por medio de ecuaciones que ayuden a determinar la ubicación de la fuga.

### a. Teorema de Transporte de Reynold

El modelo se compone de las ecuaciones de la conservación de energía y esta descrita por ecuaciones espaciales y superficiales para una derivada temporal como se muestra en la ecuación (5) [43].

$$\begin{aligned} \frac{dE_{sit}}{dt} = & \frac{d}{dt} \iiint_{vsc1} \left( \frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\gamma} + h_L g \right) * p dv \\ & + \frac{d}{dt} \iiint_{vsc2} \left( \frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\gamma} + h_L g \right) * p dv \\ & - \iint_{svc1} \left( \frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\gamma} + h_L g \right) p \bar{v} AdA \\ & + \iint_{svc2} \left( \frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\gamma} + h_L g \right) p \bar{v} AdA \\ & + \iint_{svcf} \left( \frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\gamma} + h_L g \right) p \bar{v} AdA \quad (5) \end{aligned}$$

Partiendo de la ecuación de continuidad que dice que la energía que entra debe ser igual a la que sale, obtenemos la ecuación (6):

$$\dot{m}_1 * \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) = \dot{m}_2 * \left( \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \right) + \dot{m}_f * \left( \frac{P_f}{\gamma} + \frac{v_f^2}{2g} \right) + \dot{m}_1 * h_{L1} + \dot{m}_2 * h_{L2} \quad (6)$$

La salida está puesta a chorro libre, la ecuación se reduce un poco haciéndose  $P_f = P_2 = 0$  ya que estas dos presiones se encuentran a la atmósfera como se muestra en la ecuación (7).

$$\dot{m}_1 * \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - (\dot{m}_2 + \dot{m}_f) * \left( \frac{P_2}{\gamma} \right) - \dot{m}_2 * \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) - \dot{m}_f * \left( \frac{v_f^2}{2g} \right) = \dot{m}_1 * h_{L1} + \dot{m}_2 * h_{L2} \quad (7)$$

Conociendo por balance de masa que  $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_f$  se divide la ecuación por  $\dot{m}_1$  como se ilustra en la ecuación (8).

$$\frac{\dot{m}_1 * \left( \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \right) - (\dot{m}_2 + \dot{m}_f) * \left( \frac{P_2}{\gamma} \right) - \dot{m}_2 * \left( \frac{v_2^2}{2g} \right) - \dot{m}_f * \left( \frac{v_f^2}{2g} \right)}{\dot{m}_1} = \frac{\dot{m}_1 * h_{L1} + \dot{m}_2 * h_{L2}}{\dot{m}_1} \quad (8)$$

Como  $\dot{m} = \rho * Q$  donde  $\rho$  es densidad y  $Q$  es caudal, transformamos las ecuaciones a caudal, debido a que las densidades se cancelan como se puede observar en la ecuación 9.

$$\left( \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) + \left( \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( \frac{Q_2}{Q_1} * \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left( \frac{Q_f}{Q_1} * \frac{V_f^2}{2g} \right) = h_{L1} + \left( \frac{Q_2}{Q_1} * h_{L2} \right) \quad (9)$$

Ahora introduciendo la ecuación de Darcy para los valores de  $h$  como se describe en la ecuación 10.

$$\left( \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) + \left( \frac{v_1^2}{2g} \right) - \left( \frac{Q_2}{Q_1} * \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left( \frac{Q_f}{Q_1} * \frac{V_f^2}{2g} \right) = \left( f_1 * \frac{L_1}{D} * \frac{V_1^2}{2g} \right) + \left( \frac{Q_2}{Q_1} * \left( f_2 * \frac{L_2}{D} * \frac{V_2^2}{2g} \right) \right) \quad (10)$$

Llevando las velocidades a caudal tenemos la ecuación (11).

$$\left( \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right) + \left( \frac{8Q_1^2}{\pi^2 D^4 g} \right) - \left( \frac{Q_2}{Q_1} * \frac{8Q_2^2}{\pi^2 D^4 g} \right) - \left( \frac{Q_f}{Q_1} * \frac{8Q_f^2}{\pi^2 D_f^4 g} \right) = \left( f_1 * \frac{L_1}{D} * \frac{8Q_1^2}{\pi^2 D^4 g} \right) + \left( \frac{Q_2}{Q_1} * \left( f_2 * \frac{L_2}{D} * \frac{8Q_2^2}{\pi^2 D^4 g} \right) \right) \quad (11)$$

Como  $P_2 = 0$ , entonces el primer termino queda como  $\frac{P_1}{\gamma}$  que se llamara  $Hm_1$  (cabeza de presión en metros de columna de agua). Simplificando obtenemos la ecuación (12).

$$(Hm_1) + \frac{8}{\pi^2 g} \left[ \frac{Q_1^2}{D^4} - \frac{Q_f^2}{D_f^4 Q_1} - \frac{Q_2^2}{D^4 Q_1} \right] = \left( \frac{8f_1 L_1 Q_1^2}{\pi^2 D^5 g} \right) + \left( \frac{8f_2 L_2 Q_2^3}{\pi^2 D^5 g Q_1} \right) \quad (12)$$

Se divide entre  $\frac{8}{\pi^2 g D^5}$  y se obtiene la ecuación (13).

$$(12,1 Hm_1 D^5) + Q_1^2 D - \frac{Q_f^2 D^5}{D_f^4 Q_1} - \frac{Q_2^2 D}{Q_1} = f_1 L_1 Q_1^2 + \left( \frac{f_2 L_2 Q_2^3}{Q_1} \right) \quad (13)$$

Como  $L_T = L_1 + L_2$  donde  $L_T$  es la longitud total de la tubería reemplazamos y nos queda la ecuación (14).

$$(12,1 Hm_1 D^5) + Q_1^2 D - \frac{Q_f^2 D^5}{D_f^4 Q_1} - \frac{Q_2^2 D}{Q_1} = f_1 L_1 Q_1^2 + \left( \frac{f_2 (L_T - L_1) Q_2^3}{Q_1} \right) \quad (14)$$

Sacando el factor común de  $L_1$  que es la longitud deseada queda la ecuación 15.

$$(12,1 Hm_1 D^5) + Q_1^2 D - \frac{Q_f^2 D^5}{D_f^4 Q_1} - \frac{Q_2^2 D}{Q_1} - \frac{f_2 L_T Q_2^3}{Q_1} = L_1 \left[ f_1 Q_1^2 - \frac{f_2 Q_2^3}{Q_1} \right] \quad (15)$$

Y despejando  $L_1$  se obtiene la ecuación 16 donde se tiene una longitud desde la entrada hasta la fuga.

$$L_1 = \frac{(12,1 Hm_1 D^5) + Q_1^2 D - \frac{Q_f^2 D^5}{D_f^4 Q_1} - \frac{Q_2^2 D}{Q_1} - \frac{f_2 L_T Q_2^3}{Q_1}}{f_1 Q_1^2 - \frac{f_2 Q_2^3}{Q_1}} \quad (16)$$

### b. Recopilación de datos

Para el desarrollo de la investigación se creó una interfaz de usuario, que le proporcionan al operador datos de caudal y presión, gráficas y controles para la correcta visualización y automatización del sistema de detección de fugas la Figura 5 muestra la interfaz.



Figura 5: Pantalla de adquisición de datos.

Fuente: [44].

Los caudales se determinaron convirtiendo la velocidad para diámetros de 0,018 m. Los promedios respectivos se ilustran en las ecuaciones 17, 18,19.

$$\text{Caudal entrada: } Q_1 = 0,0005782 \frac{m^3}{s} \quad (17)$$

$$\text{Caudal salida: } Q_2 = 0,0005028 \frac{m^3}{s} \quad (18)$$

$$\text{Presión } p_{\text{rgh}}: P_1 = 13306,313 \text{ Pa} \quad (19)$$

También es importante recalcar como se obtuvieron algunos valores para poder ejecutar toda la operación como se muestran en las ecuaciones (20), (21), (22), (23), (24).

$$\rho = 997 \frac{kg}{m^3} \quad (20) \text{ Densidad a } 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ Tomado de (L. Mott, 2006).}$$

$$\nu = 0,000000894 \frac{m^2}{s} \quad (21) \text{ Viscosidad Cinemática a } 25 \text{ }^\circ\text{C} \text{ Tomado de (L. Mott, 2006).}$$

$$L_T = 6m \quad (22) \text{ Longitud total de la tubería.}$$

$$D = 0,018 m \quad (22) \text{ Diámetro real para un tubería de PVC de } \frac{1}{2} \text{ in.}$$

$$\epsilon = 0,0000015 m \quad (23) \text{ Rugosidad para una tubería de plástico (valor utilizado para hallar el factor de fricción).}$$

$$f = 0,02 \quad (24) \text{ Factor de fricción constante para todo intervalo en flujo turbulento, para número de Reynolds mayores a 4000.}$$

**c. Validación de datos**

Para determinar el diámetro de la fuga, se usó de una consideración que utiliza la resta de caudales para conocer el área, como se muestra en la ecuación 25.

$$D_f = \sqrt{D^2 * Estimacion} \quad (25)$$

Donde f, hace referencia al diámetro de fuga y la Estimación se calcula a partir de la ecuación 26:

$$Estimacion = 1 - \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right) * 100\% \quad (26)$$

Para cada dato se evaluó la ecuación obteniendo una cantidad igual de longitudes la Figura 6, muestra las variables del fluido para puntos distantes de 0,006 en toda la tubería horizontal.

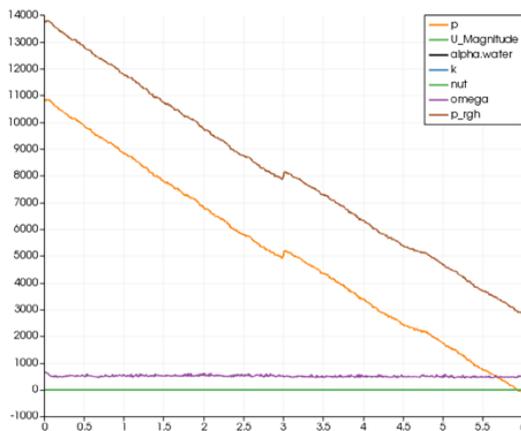


Figura 6. Condiciones de fluido. Fuente: elaboración propia.

La máximas presiones; hidrostáticas y del solucionador “p\_rgh” encontradas son de 10847,2 y 13790,4 Pa, respetivamente.

Las dos curvas de la Figura 6, demuestran un salto en sus pendientes para la longitud de 3 metros (lugar de la fuga) y se mantienen constantes, comprobando así la ley de Darcy que dice que el comportamiento de la presión en una tubería debe ser una caída lineal mediante la ecuación (27).

$$q = -k \left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (27)$$

Donde -k es una constante conocida como coeficiente de permeabilidad y es el que determina la geometría de tubería, se trata del gradiente de alturas piezométricas. La Figura 7 muestra el incremento de presión simulado debido a la fuga.

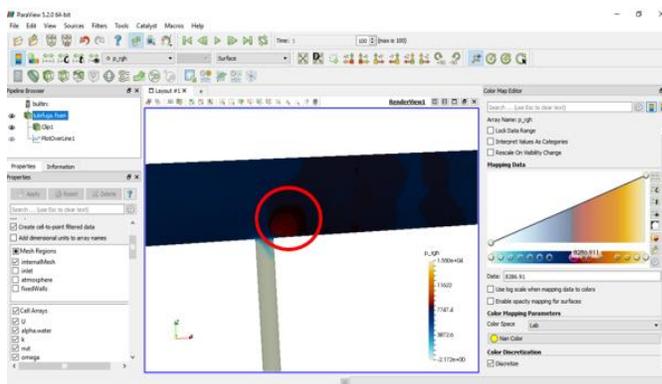


Figura 7: Incremento de presión debido a fuga. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 8 permite observar el preciso instante en el que cuando en el banco de pruebas de tuberías se presenta una fuga, este lo hace saber a través de una alarma especificando que existe fuga, permitiendo de esta manera realizar una acción inmediata al problema.

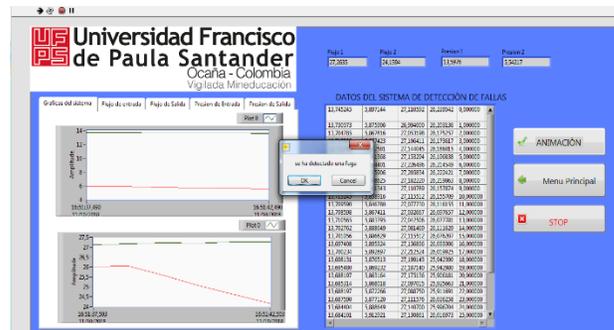


Figura 8. Interfaz gráfica del VI de detección de fugas (instante en que se detecta la fuga).

Fuente: Elaboración propia.

**V. CONCLUSIONES**

Respecto los resultados obtenidos con el Teorema de Reynolds, podemos decir que estos son alentadores puesto que el error porcentual tiene una tolerancia válida, se encontraron errores porcentuales de 4% para los mejores datos y 9% para el peor y una distancia promedio para encontrar la fuga igual a 2,7 metros.

La tubería afectada por un orificio de fuga, genera internamente un salto de pendiente en la presión del fluido, para los datos de esta simulación se obtuvo una pendiente antes del orificio equivalente a - 2024 y para el resto de tubería igual a -1769 para una desviación del 14%.

Se demostró que la presión cae de forma lineal de acuerdo con la ley de Darcy en métodos tradicionales se instalan manómetros a lo largo de las tuberías para identificar esta caída de presión, si el número

de manómetros no es suficiente, la fuga puede pasar indetectada. El método propuesto en este proyecto permite localizar la fuga únicamente utilizando 2 manómetros. Lo cual lo hace más práctico para el caso de tuberías de difícil acceso.

## VI. REFERENCIAS

- [1] J. A. C. Carrillo, "Método de detección y ubicación de fugas, en ductos de gran longitud, mediante velocidad de propagación de onda de presión negativa, en ductos con mediciones de presión multipunto," 2012.
- [2] A. De Coster et al., "Towards an improvement of GPR-based detection of pipes and leaks in water distribution networks," *J. Appl. Geophys.*, vol. 162, pp. 138–151, 2019.
- [3] M. Sánchez, "Modelado de flujo en tuberías para detectar y localizar fugas utilizando un enfoque de observador de estado," *Rev. Tec. la Fac. Ing. Univ. del Zulia*, vol. 29, no. 1, pp. 1–2, 2006.
- [4] C. Bermúdez, J. R., Santos-Ruiz, I., López-Estrada, F. R., Besançon, G., Torres, L., Valencia-Palomo, G., & CONAcYT, "Modelado y simulación de una red hidr aulica para diagnostico de fugas," pp. 10–12, 2018.
- [5] R. Carrera, R., Verde, C., & Cayetano, "on de un SCADA para Localizar Fugas en Ductos," *Memorias del XVI Congr. Latinoam. Control Automático, CLCA 2014*, 2014.
- [6] K. Li, X. Zhou, R. Tu, Q. Xie, J. Yi, and X. Jiang, "An experimental investigation of supercritical CO<sub>2</sub> accidental release from a pressurized pipeline," *J. Supercrit. Fluids*, vol. 107, pp. 298–306, 2016.
- [7] W. Liang, L. Zhang, Q. Xu, and C. Yan, "Gas pipeline leakage detection based on acoustic technology," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 31, pp. 1–7, 2013.
- [8] P. Wang, L. Xiong, Y. Sun, H. Wang, and G. Tian, "Features extraction of sensor array based PMFL technology for detection of rail cracks," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 47, no. 1, pp. 613–626, 2014.
- [9] A. Cataldo et al., "Recent advances in the TDR-based leak detection system for pipeline inspection," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 98, pp. 347–354, 2017.
- [10] S. Tian, J. Du, S. Shao, H. Xu, and C. Tian, "A study on a real-time leak detection method for pressurized liquid refrigerant pipeline based on pressure and flow rate," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 95, pp. 462–470, 2016.
- [11] Y. Zhang, S. Chen, J. Li, and S. Jin, "Leak detection monitoring system of long distance oil pipeline based on dynamic pressure transmitter," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 49, no. 1, pp. 382–389, 2014.
- [12] S. K. Mandal, F. T. S. Chan, and M. K. Tiwari, "Leak detection of pipeline: An integrated approach of rough set theory and artificial bee colony trained SVM," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 3071–3080, 2012.
- [13] Z. Qu, H. Feng, Z. Zeng, J. Zhuge, and S. Jin, "A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 43, no. 4, pp. 513–519, 2010.
- [14] P. S. Murvay and I. Silea, "A survey on gas leak detection and localization techniques," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 6, pp. 966–973, 2012.
- [15] S. Datta and S. Sarkar, "Una revisión sobre diferentes métodos de detección de fallas en tuberías," *Rev. prevención pérdidas en las Ind. procesos* Vol. 41 , mayo 2016 , páginas 97-106 Una, pp. 1–32, 2016.
- [16] P. Gupta, T. T. Thein Zan, M. Wang, J. Dauwels, and A. Ukil, "Leak detection in low-pressure gas distribution networks by probabilistic methods," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 58, no. July, pp. 69–79, 2018.
- [17] C. W. Liu, Y. X. Li, Y. K. Yan, J. T. Fu, and Y. Q. Zhang, "A new leak location method based on leakage acoustic waves for oil and gas pipelines," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, pp. 236–246, 2015.
- [18] A. Abdulshaheed, F. Mustapha, and A. Ghavamian, "A pressure-based method for monitoring leaks in a pipe distribution system: A Review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. January 2016, pp. 902–911, 2017.
- [19] X. Wang, J. Lin, A. Keramat, M. S. Ghidaoui, S. Meniconi, and B. Brunone, "Matched-field processing for leak localization in a viscoelastic pipe: An experimental study," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 124, pp. 459–478, 2019.
- [20] C. Liu, Y. Li, and M. Xu, "An integrated detection and location model for leakages in liquid pipelines," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 175, no. June 2018, pp. 852–867, 2019.
- [21] R. Verde, C., Molina, L., y Carrera, "Practical issues of leaks diagnosis in pipelines," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1 PART 1, pp. 12337–12342, 2011.
- [22] R. Moujaes, Samir; Gundavelli, "CFD simulation of leak in residential HVAC ducts," *Energy Build.* 2012, vol. 54, p. 534–539., pp. 1–2, 2012.
- [23] H. Zhu, P. Lin, and Q. Pan, "A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline," *Energy*, vol. 64, pp. 887–899, 2014.
- [24] N. U. Aydemir, A. Trottier, T. Xu, M. Echlin, and T. Chin, "Coupling of reactor transient simulations via the SALOME platform," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 126, pp. 434–442, 2019.
- [25] J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, and T. Kältiaisenaho, "The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 82, pp. 142–150, 2015.
- [26] D. R. Fuhrman, "Una caja de herramientas de generación de olas para la biblioteca de CFD de código abierto: OpenFoam®," *Numer. METHODS FLUIDS*, pp. 10–11, 2019.
- [27] Y. Cao and T. Tamura, "Large-eddy simulations of flow past a square cylinder using structured and unstructured grids," *Comput. Fluids*, vol. 137, pp. 36–54, 2016.
- [28] C. J. Greenshields, "OpenFOAM," no. July, 2019.
- [29] M. E. A. Cristancho, "Maskay Modelamiento y simulación de un quadrotor mediante la integración de Simulink y SolidWorks Modeling and simulation of a quadrotor through the integration of Simulink and Solidworks," *Maskay versión impresa ISSN 1390-6712 Maskay*, pp. 1–17, 2019.
- [30] G. Dinardo, L. Fabbiano, and G. Vacca, "Smart water grid : a smart methodology to detect leaks in," *Measurement*, p. 107260, 2019.
- [31] A. S. Izwan Ismail et al., "Experimental investigation of oil-water two-phase flow in horizontal pipes: Pressure losses, liquid holdup and flow patterns," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 127, pp. 409–420, 2015.
- [32] L. D. Paolinelli, "A comprehensive model for stability of dispersed oil-water flow in horizontal and inclined pipes," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 211, p. 115325, 2020.
- [33] F. Alimardani, H. A. Moghaddam, A. Sarmadian, and M. Shafae, "Pressure loss and performance assessment of horizontal spiral coil inserted pipes during forced convective evaporation of R-600a," *Int. J. Refrig.*, vol. 107, pp. 20–30, 2019.
- [34] W. T. M. Al-Tameemi and P. Ricco, "Water–air flow in straight pipes and across 90° sharp-angled mitre elbows," *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 118, pp. 113–127, 2019.
- [35] Z. Yuhong and H. Wenxin, "Application of artificial neural network to predict the friction factor of open channel flow," *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, vol. 14, no. 5, pp. 2373–2378, 2009.
- [36] G. I. Taylor, "Experiments with fluid friction in roughened pipes," *Proc. R. Soc. London. Ser. A - Math. Phys. Sci.*, vol. 161, no. 906, pp. 367–381, 1937.
- [37] D. D. E. Una, R. E. D. Neuronal, and P. La, "Design of a neural network for the prediction of the coefficient of primary losses in utrbulent flow regime Jairo," *Ingenius. Rev. Cienc. y Tecnol. versión On-line ISSN 1390-860X versión impresa ISSN 1390-650X Ingenius*, no. 20, pp. 1–10, 2018.

- [38] L. P. Alan Olivares, Rodrigo Guerra, Marco Alfaro, Eduardo Notte-Cuello, “Experimental evaluation of correlations used to calculate friction factor for turbulent flow in cylindrical pipes Alan,” *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 2019.
- [39] M. M. Shaikh, S. ur R. Massan, and A. I. Wagan, “A sixteen decimal places’ accurate Darcy friction factor database using non-linear Colebrook’s equation with a million nodes: A way forward to the soft computing techniques,” *Data Br.*, vol. 27, pp. 0–4, 2019.
- [40] G. G. Gómez, D. E. M. Carreazo, and J. A. G. Camperos, “Desarrollo de instrumento virtual enfocado en la adquisición de datos para generar perfiles de temperatura en hornos,” *Rev. Ingenio UFPSO*, vol. 8, no. 1, pp. 47–58, 2015.
- [41] D. A. Quintero, H. Claro, F. Regino, and J. A. Gómez, “Development of a data acquisition system using LabVIEW and Arduino microcontroller for a centrifugal pump test bench connected in series and parallel,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1257, p. 012002, 2019.
- [42] J. García-Guarín, J. Gómez, and D. Contrearras, “Experimental study of pumps in a pipe bench,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1257, p. 012003, 2019.
- [43] L. Molina-Espinosa, C. G. Aguilar-Madera, E. C. Herrera-Hernández, and C. Verde, “Numerical modeling of pseudo-homogeneous fluid flow in a pipe with leaks,” *Comput. Math. with Appl.*, vol. 74, no. 1, pp. 64–73, 2017.
- [44] E. Camperos, J., Ubarnes, F., & Blanco, “Experimental Study for Detection of Leaks in Horizontal Pipelines,” vol. 11, no. 101, pp. 5017–5025, 2018.
- [45] Robert L. Mott, *Mecanica de fluidos*, Sexta edic. 2006.
- [46] Duran-Pinzón, M., Páez-Arango, J., & García-Guarín, P. J. (2018). Modelado numérico y análisis experimental para flujos en un medio poroso homogéneo a través de suelos. *Iteckne*, 15(1), 24-33.
- [47] Shukla, Harshit and Piratla, Kalyan R., Smart and Sustainable Leakage Monitoring for Water Pipeline Systems (June 26, 2019). Abstract Proceedings of 2019 International Conference on Resource Sustainability - Cities (icRS Cities). Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3410336> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3410336>.