

Prototipo virtual para la detección de fugas de agua potable Virtual prototype for water leaks detection

M. Chávez-Guzmán ^a, E. E. Monjaraz-Izquierdo ^a, R. Galván-Guerra ^b, R. Tolentino-Eslava ^{a,*}

^a Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Zacatenco, Instituto Politécnico Nacional, 07738, Ciudad de México, México

^b Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Hidalgo, Instituto Politécnico Nacional, 42162, San Agustín Tlaxiaca, Hidalgo, México

Resumen

En este trabajo se presenta un prototipo virtual para la detección de fugas de agua potable en un sistema de tuberías desarrollado en MATLAB y Simscape. Se parametrizaron los equipos con características proporcionadas por los fabricantes para tener un comportamiento apegado a un sistema real. El sistema se integró de un tanque de almacenamiento, una bomba centrífuga para recircular el agua, transmisores de flujo y presión, así como seis válvulas de control para simular fugas en diferentes ubicaciones en la tubería. En el prototipo se implementó un algoritmo de detección de fugas basado en observadores de alta ganancia, lo que permitió detectar las fugas en tres escenarios propuestos.

Palabras Clave: Agua potable, Algoritmo de detección, Fugas, Prototipo virtual, Sistema de tuberías

Abstract

This paper presents a virtual prototype for detecting drinking water leaks in a piping system developed in MATLAB and Simscape. Equipment with characteristics provided by the manufacturers was parameterized to have a behavior attached to a real system. The system was integrated with storage tank, a centrifugal pump to recirculate water, flow, and pressure transmitters, as well as six control valves to simulate leaks at different locations in the pipeline. In the prototype, a leak detection algorithm based on high gain observers was implemented, which made it possible to detect leaks in three proposed scenarios.

Keywords: Detection algorithm, Drinking water, Leakages, Pipes system, Virtual prototype

1. Introducción

En la operación de los procesos industriales son necesarios los servicios auxiliares de agua, combustible, aire comprimido, vapor y energía eléctrica. Por otro lado, en las casas habitación y comercios en las ciudades se requieren de servicios básicos para su adecuado funcionamiento tales como, agua potable, drenaje y energía eléctrica. Por lo que un recurso necesario para el desarrollo de un país es el agua, al cual se le debe poner cuidado tanto en el transporte desde los puntos o lugares de suministro hasta los puntos de consumo, así como en el sector industrial y comercial previniendo y reparando las fugas que se presenten en sus instalaciones.

En la Ciudad de México, se llegan a perder hasta 12 600 [l/s] de agua potable de los 31 500 [l/s] que en promedio entran a la red de distribución, siendo la causa principal las fugas (López J., 2021). Por otro lado, desde el 2018 hasta el 2021 se detectaron 1374 tomas clandestinas y atendieron 34 000 346 reportes de fugas (Lovera L., 2021).

Además, en las redes de distribución de agua potable hacia el Valle de México, se desaprovecha cerca del 35% por fugas en el sistema de tuberías. De los 63 [m³/s] se desperdician 21.5 [m³/s] (López P., 2018).

Existen diferentes métodos para detectar fugas. Estos métodos se pueden clasificar dependiendo del tipo de información utilizada en métodos de detección de fugas por hardware o por software. Los métodos por hardware utilizan diferentes sensores para detectar las fallas, como lidar, ultrasónicos, acústicos, sensores basados en láseres, sensores de presión piezoeléctricos, medidores de flujo, entre otros (para más detalles sobre estos métodos vea (Lu, Iseley, Behbahani, & Lingdi, 2020) y las referencias ahí citadas). La ventaja del uso de estos métodos es la sensibilidad y la exactitud en la ubicación de la fuga. Sin embargo, este tipo de metodologías son costosas y utilizan mediciones fuera de línea por lo que es necesario ir verificando sección por sección de la tubería para localizar la fuga.

*Autor para la correspondencia: rtolentino@ipn.mx

Correo electrónico: mchavezg1403@alumno.ipn.mx (Moisés Chávez-Guzmán), emonjarasi1400@alumno.ipn.mx (Erick Eduardo Monjaraz-Izquierdo), rgalvang@ipn.mx (Rosalba Galván-Guerra), rtolentino@ipn.mx (René Tolentino Eslava).

Cuando se trata con fugas pequeñas y se requiere la detección en tiempo real de las fugas, se han propuesto diferentes algoritmos basados en software, donde por medio de mediciones de flujo y el uso de observadores y estimadores de estado se detecta la presencia de las fugas y se aproxima su ubicación. Dentro de los métodos más utilizados se encuentran los métodos basados en modos deslizantes, los observadores no lineales, observadores de alta ganancia, métodos de identificación paramétrica, redes neuronales, entre otros (vea (Lu, Iseley, Behbahani, & Lingdi, 2020) y las referencias ahí citadas). La ventaja del uso de este tipo de metodologías es que el costo de operación es relativamente bajo y permiten la detección de las fugas en tiempo real. Pero la sensibilidad a las mismas disminuye y solo se pueden detectar fugas pequeñas.

Al diseñar algoritmos de detección de fugas basados en software, se requiere de la prueba y puesta a punto de los algoritmos por lo que normalmente se utilizan prototipos que requieren de espacio para realizar pruebas en los sistemas de tuberías que dependen de su longitud e instalación de instrumentación especializada y sistemas embebidos para el manejo de las señales.

Se han desarrollado trabajos experimentales para el monitoreo y localización de fugas empleando mediciones de flujo y presión de forma independiente o en conjunto. En (Gómez, J. A., et al, 2020) mediante LabVIEW implementaron un modelo matemático basado en las ecuaciones del golpe de ariete para localizar fugas en tiempo real en función del comportamiento del flujo y presión en un sistema en presencia y ausencia de fugas en estado transitorio, obteniendo resultados adecuados.

El análisis de la señal transitoria de presión en un solo punto y las transformaciones de wavelet para la detección de fugas en tuberías de agua permitió la detección, localización y evaluación de la magnitud de fugas con errores inferiores al 7% (Hanafi, M. Y., et al, 2021). Por otro lado, también se han realizado estudios experimentales empleando materiales de bajo costo y accesibles; en (Rahmat, R. F., et al, 2017), realizaron un estudio experimental mediante la medición de flujo y un sistema embebido en una tubería de 12 [mm] (0.5 [in]) de diámetro, con lo que pudieron detectar fugas a una distancia máxima de 2 [m] y determinar su ubicación para un flujo de 10 [lpm].

También se han realizado estudios comparando la simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) con la experimentación (Fu, H., Wang, S., & Ling, K., 2021); utilizaron dos medidores de flujo y presión en una tubería que presentaba dos puntos de fuga; encontraron que la diferencia de la caída de presión entre la simulación y la experimentación variaba desde -3.95% a 4.58% , por lo que consideraron ambos resultados confiables. Lo que permitió emplear la simulación para desarrollar un modelo para la detección de fugas, el cual reduce el tiempo de inspección y los costos para localizar una fuga, esto impacta en la reducción del volumen del fluido perdido, daños e impacto de la fuga. Los resultados de sus simulaciones mostraron que cuando la caída de presión es mayor a 7% y el flujo de la pérdida es superior al 5%, la fuga se detecta con certeza.

En este trabajo se propone un prototipo virtual que permite la prueba de los algoritmos de detección de fallas sin requerir

la construcción física del prototipo, reduciendo de esta forma los costos y requerimientos en etapas tempranas de desarrollo de sistemas de tuberías con metodologías de detección de fugas en línea.

2. Diseño del Prototipo para la Detección de Fugas

Para el diseño conceptual del prototipo virtual (Figura 1) se consideró una tubería recta de acero al carbón de 200 [m] de longitud y 1.5 [in] de diámetro con una rugosidad de 0.015 [mm], la cual suministra agua potable a través de un tanque de almacenamiento de 1100 [l] y una bomba centrífuga de 5 [Hp] alimentada con 120 [V] ac a 60 [Hz]. Para simular las fugas se conectaron 6 válvulas de control de 0.5 [in] con actuador eléctrico (FV-21), que serán activadas a través de una señal eléctrica dada por el usuario. El coeficiente de flujo calculado para cada una de las válvulas es $C_v = 6.64$. Estas válvulas están separadas por una distancia de 20 [m] como se muestra en la Figura 2.

El coeficiente de fricción de la tubería se determinó usando un número de Reynolds $Re = 94930.8$ y el diagrama de Moody, obteniéndose un coeficiente de fricción $f = 0.0205$. Usando este coeficiente de fricción se calculó la caída de presión desde el transmisor de presión PIT-21 hasta el transmisor PIT-21A al final de la tubería (Figura 3), como se muestra en el Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI).

$$\Delta p = 3.21 [\text{bar}] = 46.55 [\text{psi}]$$

La medición del flujo y la presión a lo largo de la tubería se realizan utilizando transmisores de flujo de tipo magnético (FIT-21/21A) y transmisores de presión de diafragma tipo piezoeléctrico (PIT-21/21A), a la entrada y salida de la tubería principal los cuales enviarán las mediciones obtenidas hacia un registrador remoto (FR-21). Para seleccionar una válvula de control de flujo, se consideraron las condiciones de servicio a las que será sometida, por lo que se debe determinar su coeficiente de flujo tomando en cuenta el flujo de fluido promedio de 0.0028565 [m³/s], la densidad del agua a condiciones normales y la caída de presión anteriormente calculada, obteniendo un coeficiente de $C_v = 6.637$ [gpm], tomándolo como base la selección de una válvula que cubra estas condiciones específicas en el mercado.

3. Implementación del Prototipo en Simscape

Se construyó el prototipo virtual usando Simscape, utilizando los instrumentos mostrados el DTI. La Figura 4 muestra la conexión del prototipo virtual y cada uno de los elementos fue programado en base a los parámetros calculados para el diseño del prototipo. El sistema de tuberías se encuentra alimentado por un tanque de almacenamiento con agua potable y una bomba centrífuga de 5 [Hp] de la marca Evans, que trabaja a una tensión trifásica de 220 [V] y 60 [Hz], a una velocidad angular de 3450 [rpm], con un diámetro de succión de 50.8 [mm] (2 [in]) y un diámetro de descarga de 38.1 [mm] (1.5 [in]).

La bomba se parametrizó con las curvas características del fabricante. Se conectaron seis válvulas de control para simular las fugas en la tubería principal, configuradas con el C_v y con



Figura 1. Diseño en CAD del prototipo virtual

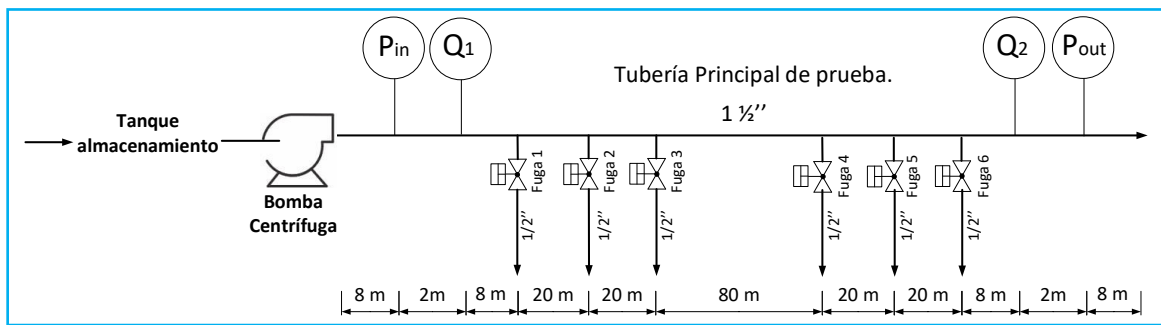


Figura 2 Esquema dimensionado del prototipo

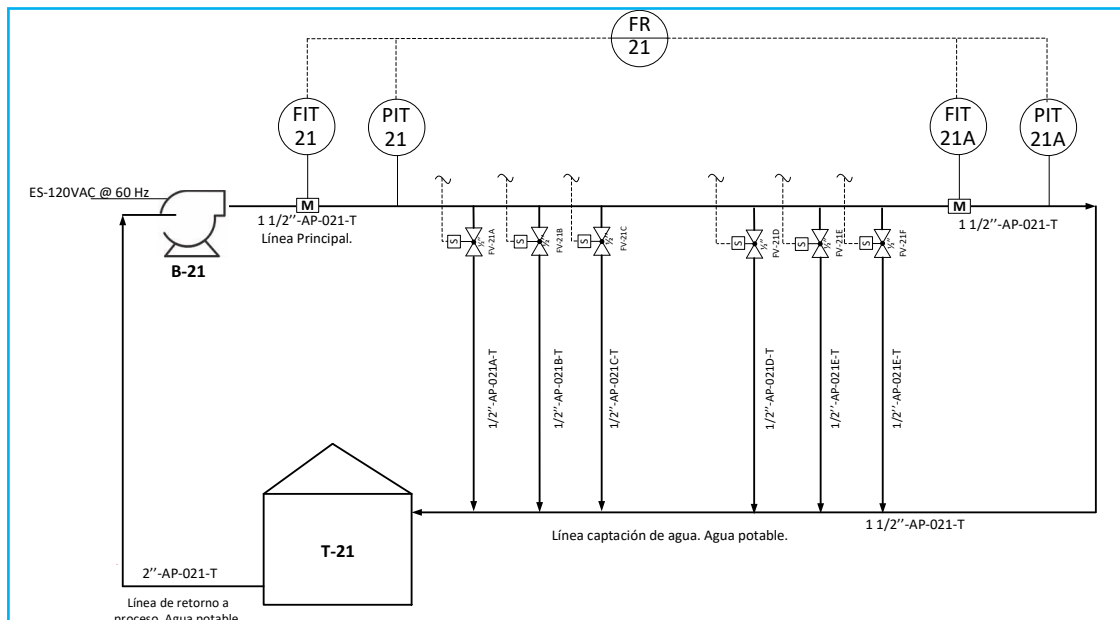


Figura 3 Diagrama de Tuberías e Instrumentación del Prototipo

las dimensiones descritas en la hoja de especificaciones de la válvula ON-OFF esférica con opción modulante, actuador eléctrico e indicador de posición marca Festo.

Tomando como base el DTI detallado en la Figura 5, se construyó así el prototipo virtual en Simulink-Simscape que emula el comportamiento de una tubería de agua de 200 [m]

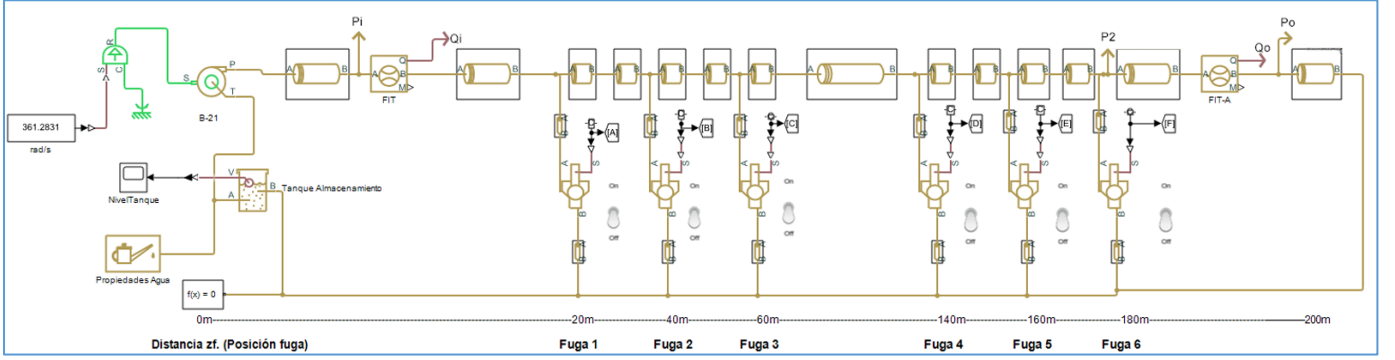


Figura 4 Prototipo Virtual

de longitud que es afectada por una fuga desconocida en la posición de las válvulas de control (Figura 4). El prototipo programado se validó considerando la ausencia de fugas. Observándose una caída de presión igual a la calculada durante el diseño (Tabla 1).

Tabla 1 Validación del prototipo virtual en Simscape en ausencia de fugas

Variable	Valor
Flujo Q_1	0.00267 [m ³ /s]
Flujo Q_2	0.00267 [m ³ /s]
Presión P_i	393078.29 [Pa]
Presión P_o	87323.28 [Pa]

Donde Q_1 y Q_2 representan los flujos en los extremos de la tubería en [m³/s], mientras que P_i y P_o representan las presiones registradas a la entrada y salida de la tubería respectivamente en [Pa].

4. Validación del Prototipo

El prototipo se validó en presencia de fugas usando un algoritmo de detección de fugas basado en observadores de alta ganancia propuesto en (Torres, Besançon, Georges, & Navarro Díaz, 2011). Es posible la implementación de cualquier algoritmo de detección de fugas existente en la literatura siempre que se consideren tuberías sin bifurcaciones. Considerando el modelo matemático de una tubería de 200 [m] sin bifurcaciones con solo una fuga, se tiene a partir de la construcción del modelo no lineal en función de las ecuaciones de golpe de ariete incluyendo los parámetros asociados a la fuga dentro del mismo vector de estados. Una vez delimitadas las condiciones del sistema, se tiene: en (Torres, Besançon, Georges, & Navarro Díaz, 2011).

$$\begin{aligned}
 \dot{Q}_1 &= -f\mu Q_1|Q_1| + \frac{a_1}{\Delta z_f}(H_{in} - H_2) \\
 \dot{H}_2 &= \frac{a_1}{\Delta z_f}(Q_1 - Q_2 - \lambda_f \sqrt{H_2}) \\
 \dot{Q}_2 &= -f\mu Q_2|Q_2| + \frac{a_1}{L - \Delta z_f}(H_2 - H_{out}) \\
 \dot{\Delta z}_f &= 0 \\
 \dot{\lambda}_f &= 0
 \end{aligned} \quad (1)$$

donde f es el factor de fricción, H_{in} y H_{out} son las alturas correspondientes a la presión dentro de la tubería [m] en la entrada y salida respectivamente, H_2 es la altura de presión en la posición de la fuga. z_f [m], Q_1 y Q_2 son los flujos de

entrada y salida [m³/s], $a_1 = -gA$, $a_2 = -\frac{b^2}{gA}$, $\mu = \frac{1}{2\phi A}$, L es la longitud de la tubería [m]. A es el área transversal de la tubería, g es la aceleración de la gravedad [m/s²], ϕ es el diámetro de la tubería. Δz_f [m] y σ_f son la posición de la fuga y el coeficiente de la fuga y se consideran desconocidas.

Considerando que la tubería opera con alturas de presión constantes. Tomando como entradas las alturas de presión constantes en los extremos de la tubería H_{in} y H_{out} y como salidas los flujos Q_1 y Q_2 medidos también en los extremos, el sistema (1) se puede ver en espacio de estados como

$$\dot{x} = \tilde{f}(x) + g(x)u_0 = F_{u_0}, \quad y = [Q_1 \quad Q_2];$$

$$\text{con } u_0 = \begin{bmatrix} H_{in} \\ H_{out} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^2, \quad g(x) = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{\Delta z_f} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{a_1}{L - \Delta z_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{5 \times 2},$$

$$\tilde{f}(x) = \begin{bmatrix} -f\mu Q_1|Q_1| - \frac{a_1}{\Delta z_f} H_2 \\ \frac{a_1}{\Delta z_f}(Q_1 - Q_2 - \lambda_f \sqrt{H_2}) \\ -f\mu Q_2|Q_2| + \frac{a_1}{L - \Delta z_f} H_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^5 \quad \text{y}$$

$$x(t) = [Q_1 \quad H_2 \quad Q_2 \quad \Delta z_f \quad \sigma_f]^T \in \mathbb{R}^5$$

La estimación de los parámetros de la fuga se realiza usando un observador de alta ganancia, considerando que únicamente se tienen mediciones de la presión y flujo en los extremos de la tubería. Dicho observador no lineal de alta ganancia (Torres, Besançon, Georges, & Navarro Díaz, 2011) tiene la forma

$$\hat{x} = \tilde{f}(\hat{x}) + g(\hat{x})u_0 - \left(\frac{\partial \Phi(\hat{x})}{\partial x} \right)^{-1} \begin{bmatrix} S_1^{-1} C_1^T \\ S_2^{-1} C_2^T \end{bmatrix} (\hat{y} - y) \quad (2)$$

donde

$$\hat{x}(t) = [\hat{Q}_1 \quad \hat{H}_2 \quad \hat{Q}_2 \quad \hat{\Delta z}_f \quad \hat{\sigma}_f]^T \in \mathbb{R}^5,$$

$$\hat{\mathbf{y}} = [\hat{Q}_1 \quad \hat{Q}_2] \in \mathbb{R}^2, \mathbf{C}_1 = [1 \quad 0], \mathbf{C}_2 = [1 \quad 0 \quad 0],$$

$$\Phi(\hat{\mathbf{x}}) = [\hat{Q}_1 \quad L_{F_{u_0}} \hat{Q}_1 \quad \hat{Q}_2 \quad L_{F_{u_0}} \hat{Q}_2 \quad L_{F_{u_0}}^2 \hat{Q}_2]^T \in \mathbb{R}^5,$$

$\frac{\partial \Phi(\hat{\mathbf{x}})}{\partial \mathbf{x}} \in \mathbb{R}^{5 \times 5}$ denota la matriz jacobiana de $\Phi(\hat{\mathbf{x}})$ y $L_{\mathbf{x}}^i \mathbf{y} \in \mathbb{R}$ la i -ésima derivada de Lie de \mathbf{y} a lo largo de \mathbf{x} . Por último \mathbf{S}_1 y \mathbf{S}_2 , son matrices de diseño definidas como

$$\mathbf{S}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & -\frac{1}{\lambda_1^2} \\ \frac{1}{\lambda_1^2} & \frac{2}{\lambda_1^3} \end{bmatrix}; \mathbf{S}_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{\lambda_2} & -\frac{1}{\lambda_2^2} & \frac{1}{\lambda_2^3} \\ -\frac{1}{\lambda_2^2} & \frac{2}{\lambda_2^3} & -\frac{3}{\lambda_2^4} \\ \frac{1}{\lambda_2^3} & -\frac{3}{\lambda_2^4} & \frac{6}{\lambda_2^5} \end{bmatrix}$$

para $\lambda_1, \lambda_2 > 0$.

5. Simulación de Fugas

Se implementó el observador mencionado dentro del prototipo virtual con el fin de corroborar si mediante el uso del prototipo virtual se podía aproximar la posición de las fugas. Para realizar la validación del algoritmo se configuró el simulador de Simulink con un solver del tipo “ode23s (stiff/Mod.Rosenbrock)” en modo de paso variable con un paso de muestreo automático y un tiempo de simulación infinito (inf) además de los escenarios descritos a continuación

5.1. Escenario 1: Fuga a 40 m, activada en $t = 100$ [s]

Se simuló el comportamiento del sistema con la presencia de una fuga a 40 [m] que se activa a 100 [s] de la simulación. En la Figura 5, se observa como el algoritmo detecta la presencia de la fuga a una distancia de aproximadamente 45 [m].

5.2. Escenario 2: Fuga a 20 m, activada en $t = 30$ s

Se simuló el comportamiento del sistema con una fuga ubicada a 20 [m] que se activa a 30 [s] de la simulación. La Figura 6, muestra como el algoritmo detecta la presencia de una fuga en una distancia de aproximadamente 25.5 [m].

5.3. Escenario 3: Fuga a 160 [m] activada en $t = 150$ [s]

Se simuló el comportamiento en el sistema con una fuga localizada a 160 [m] que se activa a 150 [s] de la simulación. En la Figura 7, se aprecia que el algoritmo ubica la presencia de una fuga a 180 [m].

6. Análisis de resultados y discusión

Comparando las simulaciones anteriores se analizó el comportamiento del algoritmo para detectar la fuga activada, éste respondió de una forma más efectiva a fugas cercanas a los instrumentos de medición. Como en el caso de la simulación 2, donde la fuga activada a 20 [m] siendo la más cercana al extremo inicial de la tubería, muestra un error menor en la estimación de su posición y su coeficiente, ya que la fuga se estimó a una distancia aproximada $z_f = 25.5$ [m]. Caso

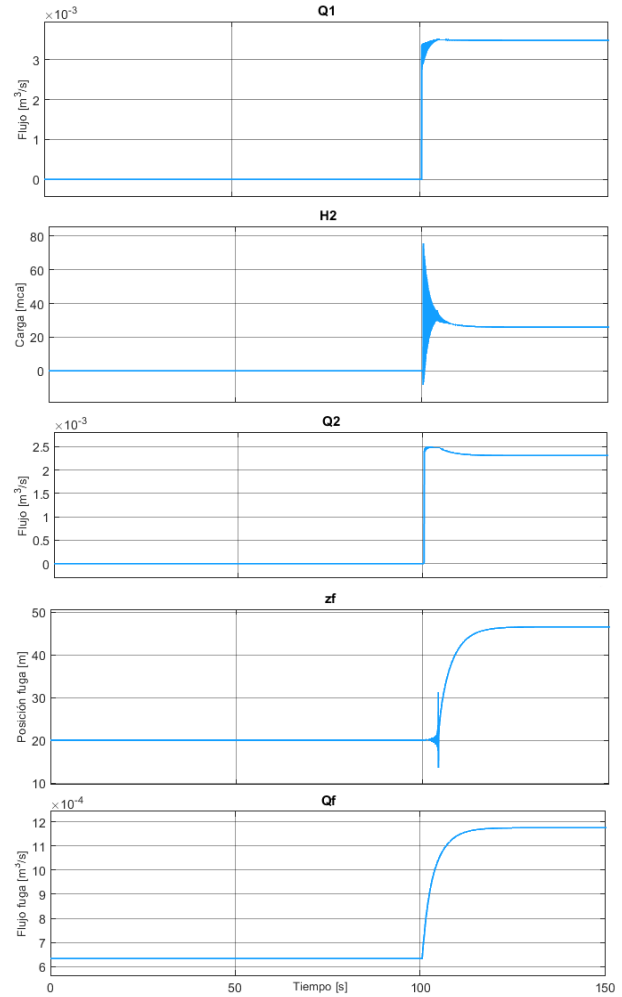


Figura 5 Fuga activa a 40 [m]

contrario para la fuga ubicada a 160 [m] en la simulación 3, ya que al encontrarse más lejana a los instrumentos de medición su error aumenta como se observa en la Figura 7, obteniendo así una distancia aproximada de 170 [m]. El algoritmo no identifica la ubicación exacta de las fugas, debido a que en el prototipo virtual se agregaron sensores de flujo después de cada fuga lo que afecta la posición real de ésta. Se muestra que el uso del prototipo permite emular la presencia de fugas en tuberías de agua potable. Por lo que es posible validar diferentes algoritmos de detección de fugas.

7. Conclusiones

Se diseñó y programó el prototipo virtual de una tubería de agua potable con fugas en diferentes ubicaciones, lo que permite validar algoritmos de detección de fugas sin la construcción física del prototipo, reduciendo así los costos de operación de proyectos de tuberías inteligentes en las primeras etapas de diseño. El prototipo propuesto se validó con el modelo matemático de una tubería de 200 [m] de longitud sin bifurcaciones.

El algoritmo implementado demostró tener efectividad elevada el determinar un error promedio menor al 2%, con un tiempo elevado de 30 [s] para la estimación de la posición y coeficiente de la fuga en una distancia total de 200 [m].

Estos resultados están sujetos a la ubicación real de la fuga,

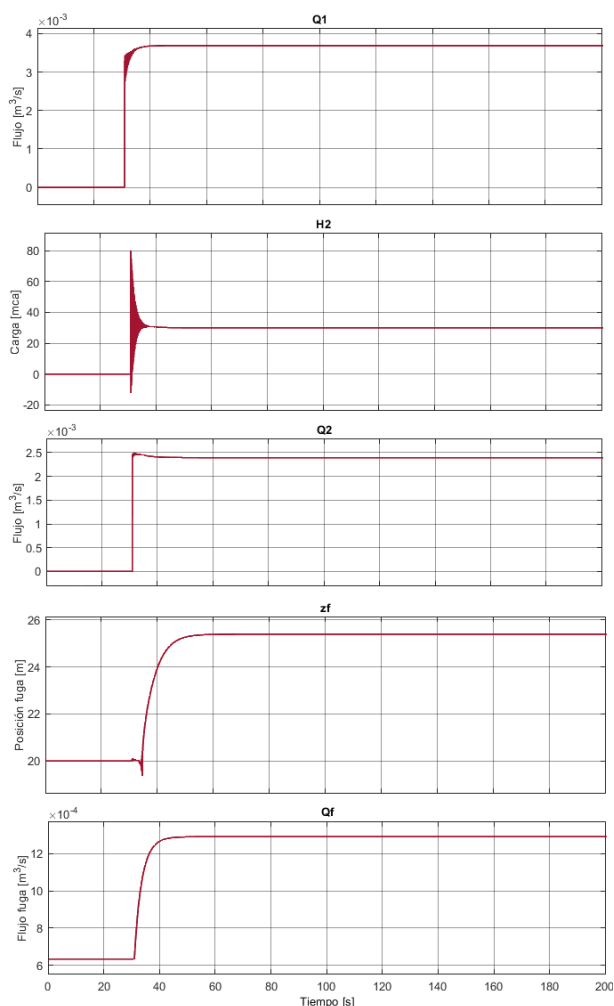


Figura 6 Fuga activa a 20 [m]

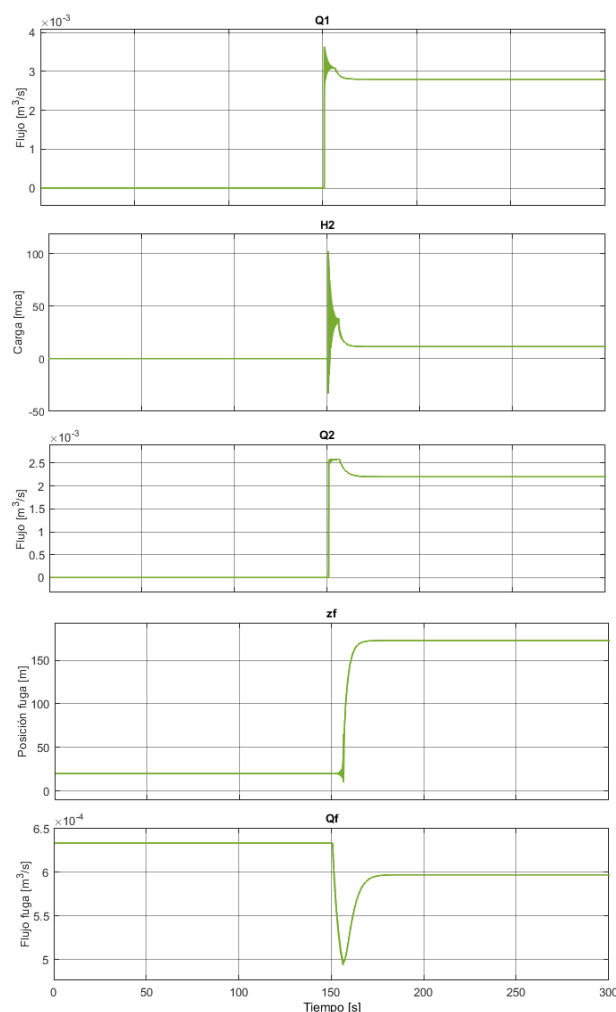


Figura 7 Fuga activa a 160 [m]

ya que con las simulaciones obtenidas de igual forma se concluye, que se tiene una mejor exactitud de detección en aquellas más cercanas a los instrumentos de medición ubicados en ambos extremos de la tubería.

Por último, el prototipo didáctico virtual está diseñado con herramientas de fácil manejo, por lo que se puede interactuar con el sistema observando el comportamiento que tiene éste ante cualquier perturbación activada por el usuario en un sistema ideal, acercándolo a una situación real y generando una conciencia sobre la importancia de detección de fugas para el cuidado del equipo, personal y medio ambiente ya que la pérdida de agua potable en nuestro país a través de fugas en sistemas de tuberías es un problema a tener en cuenta, por lo que dicho prototipo busca demostrar la importancia de detectar una fuga a tiempo.

Aunado a esto, se abre la oportunidad en investigaciones futuras de realizar variaciones al algoritmo que permitan obtener mejores resultados, así como la construcción física del prototipo a escala o tamaño real con fines educativos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional SIP-IPN, proyectos: 20220143 y 20221915.

Referencias

- Fu, H., Wang, S., & Ling, K. (2021). Detection of two-point leakages in a pipeline based on lab investigation and numerical simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 204, 108747.
- Gómez, J. A., Jaramillo, H. Y., & Nolasco, C. (2020). System to monitor and locate water leaks using LabVIEW software. *Journal of Physics: Conference Series*, 1704, 012006.
- Hanafi, M. Y., Ghazali, M. F., Azmi, W. H., Yusof, M. F. M., & PiRemli, M. A. (2021). Hydroinformatics based technique for leak identification purpose—An experimental analysis. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1078, 12038.
- López, J. (3 de abril de 2021). Cada segundo se pierden 12 mil litros por fugas en tuberías de agua potable, *Excelsior*.
- Lovera, L. (9 de mayo de 2021). Más de 34 mil fugas de agua en CDMX, en últimos cuatro años, *El sol de México*.
- Rahmat, R. F., Satria, I. S., Siregar, B., & Budiarto, R. (2017). Water pipeline monitoring and leak detection using flow liquid meter sensor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 190, p. 12036.
- López, P. (29 de Octubre de 2018). 35% de agua de la ciudad se desperdicia por fugas de agua. *Gaceta UNAM*.
- Lu, H., Iseley, T., Behbahani, S., & Lingdi, F. (2020). Leakage detection techniques for oil and gas pipelines: state of the art. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 1-15.
- Torres, L., Besançon, G., Georges, D., & Navarro Díaz, A. (2011). Examples of pipeline monitoring with nonlinear observers and real-data validation. *8th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, (págs. 1-6). Tunisia.