

Instalación Experimental para Estimación de Parámetros de un Ducto en Tiempo Real [★]

Rolando Carrera ^{*} Cristina Verde ^{*}

^{} Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería,
Ciudad de México, México (e-mail: rcarrera@unam.mx,
verde@unam.mx).*

Resumen Se presenta una instalación experimental para estudiar el comportamiento del flujo en una tubería en condiciones normales y de falla. La instalación consta básicamente de una tubería de acero galvanizado por la que circula agua, y un sistema SCADA compuesto por sensores, sistema de adquisición de datos y una computadora personal. Con este sistema se pueden estimar algunos de los parámetros esenciales en el modelo del comportamiento del flujo en el ducto. La condición de falla es una fuga y se presenta la forma de ubicarla en tiempo real con un método sencillo basado en el comportamiento del sistema en estado permanente.

Keywords: Adquisición de datos, detección y localización de fallas, flujo en tuberías, SCADA, parámetros

1. INTRODUCCIÓN

Una de las líneas de investigación de la Coordinación de Eléctrica y Computación del Instituto de Ingeniería de la UNAM es la detección e identificación de fallas (FDI, por sus siglas en inglés), y una de sus vertientes es la identificación temprana de fallas en tuberías. Con este fin se tiene en el Laboratorio de Hidromecánica una instalación piloto con su correspondiente sistema SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition). La primera versión del prototipo se construyó en 1999, Carrera and Verde (2010), y a lo largo de la última década se han realizado adecuaciones a la instalación, obteniendo con ello un mejor manejo en la operación y en el registro de datos de los experimentos. En este año, además de cambiar los tubos se agregó un nuevo sistema para la adquisición de datos y su procesamiento en tiempo real; este sistema permite correr programas en un arreglo FPGA (Field Programmable Gate Array) cuya ejecución se realiza en pocos ciclos de reloj.

El objetivo de este trabajo es describir el prototipo de tubería en su versión actual donde se pueden estimar los parámetros del modelo matemático de la tubería y validar algoritmos de detección de fallas en tiempo real.

El prototipo de laboratorio, figura 1, es un ducto sin tomas laterales en forma de serpentin, instrumentado con sensores de presión y gasto en los extremos y diversas válvulas para simular fugas a lo largo del ducto.

El contenido de este trabajo es el siguiente: en su sección 2 se detalla la configuración del prototipo de laboratorio, así como la técnica para modelar este ducto como uno

^{*} Proyecto 28170 conv 2016-3, Fondo Sectorial CONACYT-Secretaría de Energía-Hidrocarburos.



Figura 1. Vista parcial de la instalación de laboratorio

horizontal; en la sección 3 se presenta el modelo matemático que describe el comportamiento de la tubería en problemas de detección de fugas u observadores y el procedimiento para calcular el valor de la onda de presión y la fricción de la tubería, así como la ubicación de la fuga; en la sección 4 se presenta el equipo que integra esta instalación; en la sección 5 se dan todos los detalles del sistema de comunicación entre la computadora personal y los módulos del sistema de adquisición de datos, y se dan detalles del sistema SCADA desarrollado en LabVIEW para esta instalación; en la sección 6 se resaltan algunos detalles importantes surgidos de la experiencia de utilizar este sistema.

2. CONFIGURACIÓN

El prototipo para la detección de fallas consiste de una tubería de hierro galvanizado de 3 pulgadas de diámetro (Cédula 40). La configuración esquemática del prototipo es mostrada en la figura 2; este prototipo está compuesto por los siguientes elementos: (a) tanque de almacenamiento de agua ($10.0 m^3$), (b) dos bombas hidráulicas, de 7.5 y 10 CP, (c) la tubería en una configuración de espiral sobre un plano vertical que en su extremo final desemboca en el tanque de almacenamiento, (d) válvulas de esfera para regular el flujo de agua, (e) puntos de medición de flujo y presión y (f) servoválvulas para provocar diferentes escenarios de fallas. La tubería es monitoreada y actuada (sistema SCADA, sección 5) por una computadora personal conectada a un sistema de adquisición de datos, a través del cual monitorea las variables de flujo y presión, actúa las servoválvulas y modifica la velocidad de la bomba hidráulica.

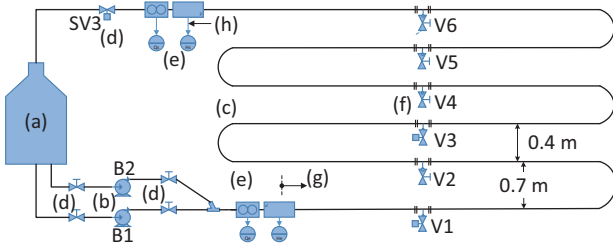


Figura 2. Diagrama esquemático de la instalación piloto. a) Tanque de almacenamiento, b) Bombas hidráulicas, c) Tubería, d) Válvulas de paso, e) Sensores de flujo y presión, f) Válvulas de fuga, g) inicio del ducto útil y h) fin del ducto útil

El modelo matemático tradicional que describe el comportamiento de un fluido en una tubería está desarrollado con base en el análisis de una tubería recta, sin embargo el prototipo de laboratorio, por limitaciones de espacio, se compone de un arreglo de tubos en espiral sobre un plano vertical. Este arreglo no es una limitante ya que de esta distribución se puede obtener un equivalente de tubería recta horizontal, al usar la diferencia de alturas entre tubos (sección 2.2).

La parte del ducto útil para la detección de fallas es la correspondiente a la espiral entre los carretes con instrumentos de medición (presión y flujo, sección 4). Estos dos puntos constituyen el inicio y fin del ducto que se monitorea. También se tienen seis puntos intermedios donde se pueden provocar fugas; estos puntos de fuga están constituidos también por carretes y soldados a ellos tubos de una pulgada de diámetro y válvulas de esfera para regular el flujo de fuga, dos de estas válvulas pueden ser sustituidas por servoválvulas, que pueden ser actuadas desde el SCADA, para sincronizar tiempo de fuga y magnitud de la misma.

2.1 Ubicación de los puntos de fuga

A lo largo de la tubería se tienen seis puntos donde se pueden emular fugas. Esto se hace por medio de válvulas

de esfera de una pulgada de diámetro o servo-válvulas, colocadas en los puntos V_i , $i = 1, \dots, 6$ que muestra la figura 2.

2.2 Perfil topográfico y modificación de presiones

El prototipo tiene una distribución de la tubería como se muestra en la figura 2. Debido a que el área y la fricción son constantes a lo largo del ducto, entonces la cabeza de presión según Bansal (2005) es

$$\tilde{H}(x) = \frac{P(x)}{\rho g} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad del líquido y g la constante de gravedad, la ecuación (1) puede escribirse en términos de una carga piezométrica $H(x) = \tilde{H}(x) + h(x)$ en donde $h(x)$ es la altura del ducto con respecto a una referencia que puede ser la altura sobre el nivel mar o cualquier otra, x es la coordenada espacial.

Es posible manejar las presiones de esta tubería como si estuviera en un plano horizontal. Esto se realiza con tan sólo sumar a la cabeza de presión medida $\tilde{H}(x)$ la altura $h(x)$ con respecto a la referencia ($0 m$, tomando el ducto de entrada como referencia), si es que las presiones se están manejando como altura de columna de agua (Siebert and Isermann (1977)); que no es otra cosa más que la suma de la presión por gravedad (debida a la diferencia de alturas con respecto a la referencia) con la cabeza de presión medida.

3. CÁLCULO DE PARÁMETROS

En esta sección se presentan las expresiones para determinar de forma experimental dos de los parámetros más significativos del modelo del flujo en una tubería, a saber: velocidad de la onda de presión b y la fricción D'Arcy-Weissbach f . También se obtiene la expresión para el cálculo de la ubicación de una fuga. El cálculo se basa en las ecuaciones dinámicas que describen el comportamiento de un flujo turbulento en una tubería elástica (Chaudhry (2014)). Las ecuaciones de momento y conservación de masa, respectivamente, son

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q}{A^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{f}{2DA^2} Q |Q| + g \sin \alpha = 0 \quad (2)$$

$$gA \frac{\partial H}{\partial t} + b^2 \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

donde Q es el flujo volumétrico (m^3/s) o gasto, H es la presión en términos de altura de columna de agua (m), A es el área de la tubería (m^2), g la constante de gravedad local (m^2/s), D el diámetro de la sección transversal de la tubería (m), f la fricción D'Arcy-Weissbach (adimensional), α el ángulo de inclinación de la tubería con respecto a la horizontal (*radian*), b la velocidad de la onda de presión (m/s).

3.1 Velocidad de la Onda de Presión

A continuación se presentan dos técnicas para calcular la velocidad de la onda de presión, una teórica y la otra experimental:

D	0.0762 m
e	0.4762 cm
K	$2.19 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
ρ	$999 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
E	$212 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
L	163.72 m

Tabla 1. Parámetros de la tubería.

1. De acuerdo con el desarrollo realizado por Chaudhry (2014), la expresión para la velocidad de la onda de presión de un fluido en un tubo es

$$b^2 = \frac{K/\rho}{1 + DK/eE} \quad (4)$$

donde K es el módulo de compresibilidad del agua, E es el módulo de elasticidad de Young, ρ la densidad del líquido, e el espesor de la pared del tubo y D el diámetro del tubo. Se calculó (4) con los valores de la tabla 1, obteniéndose el siguiente valor de $b = 1,479 \text{ m/s}$.

2. Es posible calcular la velocidad de la onda de presión de forma experimental. En una tubería de longitud L , con base en un registro de un transitorio de presión (como puede ser la apertura o cierre instantáneo de una válvula), la onda de presión completa un ciclo en ΔT segundos, por lo que, para un ducto abierto en uno de sus extremos:

$$b = \frac{4L}{\Delta T} \quad (5)$$

La figura 3 muestra un registro del comportamiento de la presión cuando la válvula (V4) se cierra; en ella se indican los tiempos en que aparecen las dos primeras crestas del transitorio (una oscilación completa), por lo que $\Delta T = 44.28 - 43.86 = 0.42 \text{ s}$; de la Tabla 1 se tiene que $L = 163.72 \text{ m}$, al aplicar la ecuación (5) resulta $b = 1,559.24 \text{ m/s}$.

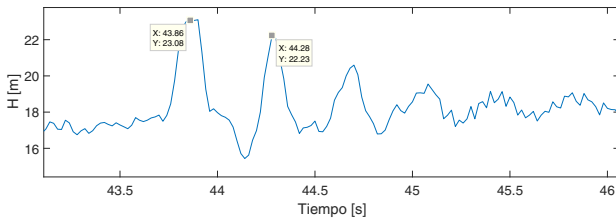


Figura 3. Registro del transitorio de presión al cierre de V3

3.2 Fricción de D'Arcy-Weissbach

Para estimar la fricción, se emplea la ecuación dinámica (2) en estado estacionario, además, se considera que la derivada espacial del flujo no es significativa (Chaudhry (2014)), es decir: $\frac{\partial Q}{\partial x} \cong 0$.

Aplicando las condiciones anteriores a (2) se obtiene

$$g \frac{dH}{dx} + \frac{f}{2DA^2} Q |Q| + g \text{sen} \alpha = 0$$

que al ser resuelta la integral, considerando que H_0 , Q_0 y H_L , Q_L son las presiones y gastos al inicio y al final de la tubería y L la longitud de la misma, y con $Q_0 = Q_L = Q_\infty$ se obtiene

$$f = \frac{2DA^2 g (H_0 - H_L - L \text{sen} \alpha)}{L Q_\infty^2} \quad (6)$$

Como se observa en la ecuación (6), la fricción f está en función de la diferencia de presión en sus extremos, la inclinación de la tubería y del flujo en el estado estacionario.

La expresión anterior es válida en estado estacionario, ya que el gasto es constante, por lo que la fricción también lo es, pero cuando el gasto no permanece constante en el ducto la fricción varía, entonces es conveniente usar expresiones como la propuesta por Rojas and Verde (2017) donde la fricción es función sólo del gasto en el ducto, $f(Q)$.

3.3 Ubicación de la fuga

Si bien existe una gran cantidad de métodos para localización de fugas con diferentes grados de complejidad, Torres et al. (2014), en este trabajo se usa uno relativamente sencillo. Para la ubicación de la fuga se usan las ecuaciones (2) y (3); se parte de la hipótesis de un ducto horizontal en estado permanente, el flujo es en una sola dirección, Verde et al. (2011). La expresión resultante es

$$Z_f = \frac{2gDA^2 (H_0 - H_L)}{f (Q_0^2 - Q_L^2)} - L \frac{Q_L^2}{Q_0^2 - Q_L^2} \quad (7)$$

4. INSTRUMENTACIÓN Y EQUIPO

A continuación se presentan las características generales de los sensores empleados para las mediciones de flujo y presión, así como el equipo empleado en la instalación: inversores, bombas, servoválvulas y computadora personal.

Sensores de flujo: Promass 83F de Endress+Hauser, E+H (2018b), sensor basado en el efecto de Coriolis.

Sensores de presión: Cerabar PMP71 de Endress + Hauser, E+H (2018a), sensor piezoresistivo.

Inversores: Variadores de frecuencia F800 y E740 de Mitsubishi, Mitsubishi (2018).

Bombas centrífugas: Siemens 10 HP y 7.5 HP, Barmesa (2018)

Sistema de adquisición de datos: cRIO 9067, NI9265 y NI9203 de National Instruments, NI (2018a).

Servoválvulas: Georg Fischer tipo 133, GF (2018), y Remote Control RCE 15, Specialtyvalve (2018).

Computadora personal: Lenovo ThinkPad x260, Lenovo (2018), con procesador de 64 bits, reloj de 2.3 GHz, HD de 367 GB y 8 GB RAM

Todos los sensores, servoválvulas e inversor se conectan a las tarjetas DAQ del cRIO por medio de lazos de corriente de 4-20 mA. La PC se conecta al cRIO vía conector USB.

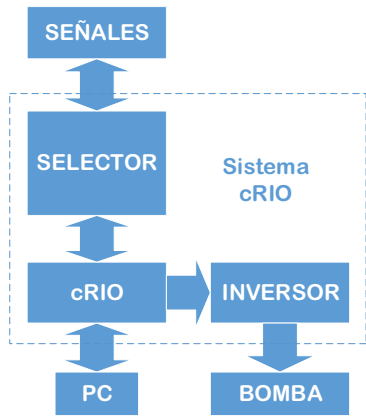


Figura 4. Diagrama de bloques del sistema completo

5. SISTEMA SCADA VIVI

El sistema SCADA ViVi (Supervisory Control And Data Acquisition Vigilante Virtual) se compone de dos bloques: el Sistema de Adquisición de Datos y el programa ViVi que lleva a cabo toda la operación de supervisión y detección de fugas. El sistema es una combinación de una aplicación de LabVIEW, NI (2018b), con el controlador cRIO, NI (2018c), y los módulos de adquisición de datos que estén insertos en él.

El Sistema de Adquisición de Datos es el hardware que realiza la adquisición de datos, es una combinación del controlador cRIO -que contiene dos tarjetas de adquisición de datos-, la PC y los actuadores en la tubería. El controlador tienen la característica de tener un procesador embebido y un arreglo FPGA, el procesador realiza la programación del FPGA.

El programa ViVi permite monitorear las variables de presión y flujo en la tubería, así como establecer la velocidad del motor de la bomba, abertura y cierre de servoválvulas de extracción de flujo y de salida, así como ejecutar el algoritmo de detección y ubicación de la fuga. Todas las variables son registradas en un archivo que se crea al final de la operación. Este programa base consta de dos subprogramas, uno que corre off-line (trasfondo) en el FPGA (*FPGA target*) y otro que corre en el ambiente de Windows (*Host*). El programa en FPGA sólo se carga una vez y el programa en Windows es el programa de trabajo y es el que interactúa con el usuario.

5.1 Sistema de Adquisición de Datos

El sistema consta de tres componentes principales: el controlador **cRIO**, el **INVERSOR** y un **SELECTOR**, en la configuración mostrada en la figura 4.

Las señales, lazos de corriente, de sensores y actuadores se conectan a los módulos de adquisición de datos vía el **SELECTOR**, que es un conjunto de interruptores 1T2P que permiten el paso de las señales al cRIO o a otra aplicación. El programa de supervisión y control corre en la PC, procesa la información y envía comandos al **INVERSOR** de la **BOMBA** y a las servoválvula vía el cRIO.

5.2 FPGA Target

El programa *FPGA Target* es un programa que se compila una vez y se corre de manera velada en el arreglo FPGA. Se encarga de la comunicación con los módulos de entrada-salida, y actualiza las lecturas y escrituras en cada periodo de muestreo. En el *ALGORITMO 1* se describe su funcionamiento. T_m es el periodo de muestreo, AO_i son las salidas analógicas, F_{bomba} es la frecuencia de la bomba, *Servo 1* y *Servo 2* son las servoválvulas usadas para provocar fugas y *Servo OUT* regula el gasto en la tubería.

ALGORITMO 1: Programa target en FPGA: lectura de sensores y salida de comandos a inversor y válvulas

Entrada: $T_m, AO_i, i = 1 - 4$

Salida: $AI_i, i = 1 - 6$

Set rango (0-20 mA) en AI's

for k

$[AI_1, \dots, AI_6](k) \rightarrow \text{FIFO}$

$AO_0(k) = F_{bomba}$

$AO_1(k) = \text{Servo } 1$

$AO_2(k) = \text{Servo } 2$

$AO_3(k) = \text{Servo } OUT$

end

En cada periodo se actualizan los valores, provenientes del programa *Host*, de abertura de las válvulas y la frecuencia del inversor, también los valores de flujo y presión son leídos y guardados en un registro FIFO para que los datos estén disponibles para el programa *Host*.

Nótese que cuando se tiene la versión definitiva del programa *Target*, éste se compila y queda grabado en el FPGA cuando se corre por primera vez. Este programa no necesita ser ejecutado cada vez que se corra el programa *Host*, en la siguiente sección se explica cómo se conectan el *Host* y el *Target*.

5.3 Host

El programa *Host* interactúa al mismo tiempo con el programa *Target* FPGA y con el usuario. Con el *Target* intercambia valores de entrada/salida y al usuario le permite en todo momento cambiar la frecuencia de la bomba y el porcentaje de abertura de todas las servoválvulas. El algoritmo 2 muestra *grosso modo* su funcionamiento. H es presión y Q es gasto, el subíndice 0 indica entrada y L salida.

ALGORITMO 2: Establece el *setpoint* de frecuencia y porcentaje de apertura de válvulas, trayectoria y nombre del archivo de datos. Registra flujos, presiones y vector de tiempo. Ejecuta algoritmo de detección y ubicación de fuga

Entrada: $Servo\ 1 - 2, F_b, F_m$, archivo de datos

Salida: $AI_i\ i = 1, 2, 4, 5$

Establece rango (0-20 mA) en AI's

for k

$[AI_1, AI_2, AI_4, AI_5](k) \rightarrow [H_0, H_L, Q_0, Q_L](k)$

$AO_0(k) \leftarrow F_{bomba}$

$AO_1(k) \leftarrow Servo\ 1$

$AO_2(k) \leftarrow Servo\ 2$

$AO_3(k) \leftarrow Servo\ OUT$

Ejecuta ALGORITMO 3

end

Entre los elementos que componen al programa o instrumento virtual (vi) *Host* están los bloques que programan el funcionamiento del *Target FPGA*, como son el periodo de muestreo, rango de los canales de entrada, nombre y trayectoria del archivo de datos, así como la elección del programa que debe correr en el arreglo FPGA y establecer con cuantas muestras por segundo se va a trabajar.

Las lecturas de corriente son convertidas a unidades de flujo (l/s) y presión (metros de columna de agua, mca). Los datos que se graban en el archivo de datos se concatenan y son ordenados de la siguiente manera:

Nº	Variable
1	Presión de entrada
2	Presión de salida
3	Presión intermedia
4	Flujo de entrada
5	Flujo de salida
6	Flujo de fuga
7	Vector de tiempo
8	% Abertura Servo 1
9	% Abertura Servo 2
10	Ubicación de la fuga

Una vez conformado el vector de datos es enviado a un archivo tipo hoja de datos.

Algoritmo de detección y ubicación de la fuga El algoritmo para localizar fugas sólo se corre si hay una fuga. Para ello se define el residuo $r = Q_0 - Q_L$ que es cero cuando no hay fuga y mayor que cero cuando la hay. r se compara continuamente con umbral adaptable U_{ad} , Isermann (2011), generado con la señal de flujo de entrada; a continuación se presenta la expresión para calcular U_{ad}

$$U_{ad} = \alpha Q_0 + \beta \dot{Q}_0 + \gamma \quad (8)$$

donde α , β y γ son constantes empíricas que dependen de las características de la planta. Cuando r es mayor que U_{ad} activa una alarma de fuga, $F = 1$, y calcula la ecuación (7) para ubicar la fuga. A continuación se describe el ALGORITMO 3 que realiza las actividades aquí mencionadas.

ALGORITMO 3: Lee variables de gasto y presión, calcula el residuo y el umbral adaptable y los compara. Si el residuo es mayor que el umbral entonces calcula la ubicación de la fuga.

Entrada: $[H_0, H_L, Q_0, Q_L]$

Salida: Bandera de fuga F y Z_f

$r = Q_0 - Q_L$

Calcula U_{ad} , ec. (8)

Calcula la fricción f , ec. (6)

if $r > U_{ad}$

Calcula ec. (7)

$F \leftarrow 1$

else

$Z_f \leftarrow 0$

$F \leftarrow 0$

Panel frontal El panel frontal del programa *Host*, ver figura 5, está dividido en tres ventanas: Controles, Indicadores y Gráficas.

Controles: Aquí se especifica la frecuencia de muestreo en muestras por segundo (mps), la frecuencia de la bomba (0 - 60 Hz) y apertura de las servoválvulas (0 - 100%). El nombre del archivo de datos es ExpHoy.tdms y la tabla con los datos del experimento es la que se pone en el control *Nombre del Experimento*, con el formato *eDDMMAAa*, donde *e* es fija y *DDMMAA* son los datos de la fecha del día del experimento y *a* corresponde al primer experimento, *b* al segundo y así sucesivamente. Al dar un click en *Stop* se detiene el programa y el archivo se guarda en el disco del cRIO.

Indicadores: Muestra el tiempo de la duración del experimento, las presiones, en metros de columna de agua, de la entrada, salida y móvil (sensor que puede ser instalado en diversos puntos del ducto); así como las lecturas de flujos (l/s) de entrada, salida y fuga (*Fmovil*).

Gráficas: Son tres, en las superiores se encuentran las gráficas de presiones y flujos, en la inferior la ubicación de la fuga.

6. RESULTADOS

Una de las ventajas del prototipo es que nos permite operarlo bajo diferentes formas de operación, con falla o sin ella, y obtener registros de todas las variables involucradas, para después, fuera de línea, realizar experimentos en otras computadoras y así probar diferentes algoritmos de diagnóstico. Evidentemente la mayor ventaja de este sistema es la realización de experimentos en los que se simulan fugas en diferentes puntos y nos permite correr algoritmos de identificación y localización de fugas en tiempo real.

Como resultado de la experiencia en lograr una ubicación precisa del lugar de la fuga, hemos observado que el factor de fricción es un parámetro relevante, que no es un valor constante, sino que depende de las condiciones de operación, por lo que hay que identificarlo todo el tiempo (Rojas et al. (2018)). Lo anterior ha llevado a que

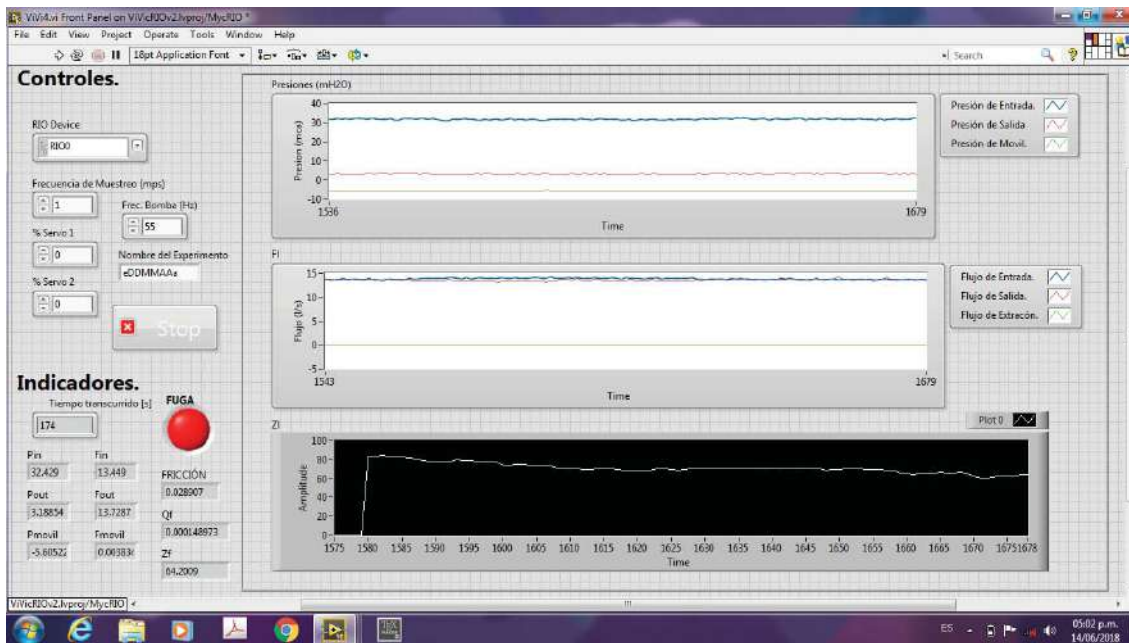


Figura 5. Panel frontal del programa Host

actualmente se está siguiendo una línea de investigación en la identificación en línea de este parámetro.

En el panel frontal, figura 5, se muestra una corrida de detección y ubicación de fuga. Se abrió la válvula V3 que está en la posición 64.62 m y el algoritmo la ubica en una posición promedio de 62.2 m, lo que nos arroja un error de localización de 1.5 %

En este documento se presenta nuestra primera experiencia con controladores embebidos y programación de arreglos FPGA. Se sugiere que en versiones futuras, para una ejecución más rápida del programa correr en el FPGA segmentos de programa que actualmente corren en el Host y que esos cambios sean transparentes a la operación global.

REFERENCIAS

- Bansal, R. (2005). *Fluid mechanics and hydraulic machines*. Laxmi Publications (P) LTD.
- Barmesa (2018). Centrifugas mediana presión. URL <http://www.barnes.com.mx/productos>.
- Carrera, R. and Verde, C. (2010). Prototipo para detección de fugas en tuberías: Manual de uso. In *Internal Report*. Instituto de Ingeniería-UNAM, Ciudad Universitaria, México.
- Chaudhry, M.H. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Springer, third edition.
- E+H (2018a). Cerabar s pmp71. URL <https://portal.endress.com/wa001/d1a/5000268/0123/000/04>.
- E+H (2018b). Proline promass 80f, 83f. URL <https://portal.endress.com/wa001/d1a/5000275/1921/000/00>.
- GF (2018). Type 130/133 electrically actuated ball valve. URL <http://www.gfps.com/>.
- Isermann, R. (2011). *Fault-Diagnosis Applications*. Springer-Verlag.
- Lenovo (2018). Thinkpad x260. URL <https://www3.lenovo.com/mx/es/laptops/thinkpad/serie-x/ThinkPad-X260/p/22TP2TX2600>.
- Mitsubishi (2018). Inversores freqrol. URL <https://mx.mitsubishielectric.com/fa/es/products/drive-products/inverters-freqrol>.
- NI (2018a). Configurador compactrio. URL <http://ohm.ni.com/advisors/crio/pages/common/classic/controller.xhtml?conversationContext=1>.
- NI (2018b). Labview. URL <http://www.ni.com/labview/>.
- NI (2018c). Qué es compact rio? URL <http://www.ni.com/es-mx/shop/compactrio.html>.
- Rojas, J., Verde, C., and Torres, L. (2018). On-line head loss identification for monitoring of pipelines. In *10th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*.
- Rojas, J.L. and Verde, C. (2017). Caracterización estática de la pérdida de carga en un ducto con una función polinomial. In *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2017*, 207.
- Siebert, H. and Isermann, R. (1977). Leckerkennung und -lokalisierung bei pipelines durch on-line-korrelation mit einem prozessrechner. *Regelungstechnik*, 25, 69–74.
- Specialtyvalve (2018). Remote control electric actuators. URL <http://www.specialtyvalve.com/valves>.
- Torres, L., Verde, C., Carrera, R., and Cayetano, R. (2014). Algoritmos de diagnóstico para fallas en ductos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, V(4), 57–78.
- Verde, C., Molina, L., and Carrera, R. (2011). Practical issues of leaks diagnosis in pipelines. In *18th World Congress of the International Federation of Automatic Control*.