

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>10-04-2012</b>	<b>A</b>
Dependencia	Aprobado	Pág.		
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>	<b>I(87)</b>		

### RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>DIEGO ANDREY CONTRERAS NAVARRO</b>		
FACULTAD	<b>INGENIERÍAS</b>		
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERÍA MECÁNICA</b>		
DIRECTOR	<b>JULY ANDREA GÓMEZ CAMPEROS</b> <b>MSc Controles Industriales</b>		
TÍTULO DE LA TESIS	<b>DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FUGAS EN UN BANCO DE PRUEBAS DE TUBERÍAS EN LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>		
<b>RESUMEN</b> (70 palabras aproximadamente)			
<p><b>ESTE PROYECTO SE REALIZÓ CON EL PROPÓSITO DE IMPLEMENTAR UN SISTEMA A TRAVÉS DE UN INSTRUMENTO VIRTUAL EN LABVIEW PARA DETECTAR FUGAS DE MANERA AUTOMÁTICA EN UN BANCO DE PRUEBAS DE TUBERÍAS ELABORADO EN LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA, TENIENDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS NECESARIOS, USANDO LA SENSORICA, PERMITIENDO UN APORTE A LA SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA QUE CONLLEVA UNA FUGA.</b></p>			
<b>CARACTERÍSTICAS</b>			
PÁGINAS: 87	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1

**DESARROLLO DE UN SISTEMA PARA LA DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FUGAS  
EN UN BANCO DE PRUEBAS DE TUBERÍAS EN LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE  
PAULA SANTANDER OCAÑA**

**AUTOR**

**DIEGO ANDREY CONTRERAS NAVARRO**

**Proyecto presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Mecánico**

**Director  
JULY ANDREA GÓMEZ CAMPEROS  
MSc Controles Industriales**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERIA MECANICA**

**Ocaña, Colombia**

**Noviembre de 2018**

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar tengo que agradecer a **Dios** por tan grande oportunidad de ver su amor reflejado en este logro, ver como cerró y abrió puertas según su voluntad simplemente entendiendo que era lo mejor para mí.*

*A mi madre Nery Cecilia Navarro Dodino por su esfuerzo en querer que todo se pudiera lograr a través de su apoyo incondicional en todas mis metas, a quien amo con todo mi corazón y a quien debo mi título de Ingeniero Mecánico.*

*También a mis hermanos Willinton, Lismaidy y Elizain, los cuales nunca dudaron de mí y me acompañaron en todo el proceso y transcurso de mi carrera.*

*Además, a mi directora July Andrea Gómez Camperos y a mi codirector Fernando Jesús Regino Ubarnes quienes depositaron su confianza en mí, dándome de su apoyo, atención y presencia en todo el desarrollo del proyecto.*

*A mis compañeros y maestros, quienes me permitieron crecer de manera profesional, ética y moralmente en cada semestre compartido.*

*Por último, agradecer en gran manera a la **Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña**, por permitir tener hermosas experiencias en toda mi trayectoria, en especial en el área de investigación, además de la Movilidad Internacional en el país de **México** exactamente en el **Instituto Politécnico Nacional ESIME Azcapotzalco** a quien también extiendo mi agradecimiento.*

**DIEGO ANDREY CONTRERAS NAVARRO**

## Índice

	Pág.
<b>Capítulo 1. Desarrollo de un sistema para la detección automática de fugas en un banco de pruebas de tuberías en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña. ....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema. ....	1
1.2 Formulación del problema. ....	2
1.3 Objetivos. ....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos. ....	2
1.4 Justificación.....	3
1.5 Delimitaciones.....	3
1.5.1 Operativa.. ....	3
1.5.2 Conceptual.....	3
1.5.3 Geográfica.. ....	4
1.5.4 Temporal.. ....	4
 <b>Capítulo 2. Marco Referencial.....</b>	 <b>5</b>
2.1 Marco Histórico.....	5
2.2 Marco Conceptual .....	7
2.2.1 Instrumentación virtual.....	7
2.2.1.1 Comparación de un instrumento tradicional y un instrumento virtual.....	9
2.2.2 Tubería de PVC.....	10
2.3 Marco Teórico .....	14
2.3.1 Tipos de fugas de agua.. ....	14
2.3.2 Sistemas comerciales para la detección y localización de fugas. ....	15
2.3.2.1 Sistema acústico directo.. ....	16
2.3.2.2 Sistema acústico por correlación.....	17
2.3.2.3 Sistema de sonda de rastreo.. ....	18
2.3.2.4 Sistema de fotografía termográfica.. ....	20
2.3.2.5 Sistema del gas trazador.....	23

<b>Capítulo 3. Metodología</b> .....	24
3.1 Tipo de investigación. ....	24
3.2 Fases del proyecto. ....	24
3.2.1 FASE I. ....	24
3.2.2 FASE II. ....	25
3.2.3 FASE III .....	25
<b>Capítulo 4. Desarrollo del proyecto por medio de las actividades propuestas</b> .....	26
4.1 Identificar las variables que intervienen en el proceso de detección de fugas. ....	26
4.1.1 Identificar los criterios de operación del sistema, flujo, presión, temperatura, entre otros. ....	26
4.1.1.1 Fugas ocasionados por ordeños. ....	26
4.1.1.2 Fugas ocasionadas por desperfectos. ....	27
4.1.1.3 Eventos provocados en el sistema que no son fuga de producto. ....	28
4.1.1.4 Diseño del banco de pruebas .....	29
4.1.2 Determinar los sensores adecuados para implementar en el banco de pruebas. ....	32
4.1.2.1 Criterios de selección. ....	34
4.1.2.2 Caracterización de los sensores .....	36
4.1.3 Seleccionar el sistema de adquisición de datos para la digitalización de las señales. ....	37
4.2 Diseñar el instrumento virtual que permita visualizar cada una de los variables y detectar la fuga. ....	39
4.2.1 Familiarizarse con herramientas de simulación como Labview, Matlab y Simulink. ....	39
4.2.1.1 LabVIEW. ....	39
4.2.1.2 Matlab y Simulink. ....	41
4.2.2 Análisis y desarrollo del modelo dinámico del sistema en presencia y ausencia de fugas. ....	42
4.2.3 Simulación del modelo dinámico del sistema. ....	42
4.2.3.1 Modelos dinámicos del sistema en ausencia de fugas. ....	42
4.2.3.2 Modelos dinámicos del sistema en presencia de fugas. ....	44
4.2.4 Desarrollo del instrumento virtual por medio de LabVIEW. ....	46
4.2.4.1 Aspectos para el diseño de una interfaz usuario. ....	47
4.2.4.2 Pantalla de bienvenida. ....	48

4.2.4.3	Pantalla de Adquisición y análisis de datos .....	49
4.2.4.4	Pantalla de Animación .....	50
4.2.4.5	Diagrama de bloques de la pantalla de bienvenida .....	50
4.2.4.6	Diagrama de bloques de la pantalla de Adquisición y análisis de datos .....	51
4.2.4.7	Diagrama de bloques de la pantalla de animación.....	53
4.3	Validar el sistema para la detección automática de fugas teniendo en cuenta el modelo desarrollado. ....	54
4.3.1	Metodología experimental para verificar el desempeño del algoritmo para la detección de fugas. ....	54
4.3.2	Implementación del instrumento virtual para validar y evaluar el comportamiento del sistema. ....	59
4.3.3	Desarrollo y sometimiento de evaluación del proyecto de grado.....	60
<b>CONCLUSIONES</b> .....		61
<b>REFERENCIAS</b> .....		62
<b>APÉNDICE</b> .....		66

## Lista de Tablas

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Instrumentación tradicional VS instrumentación virtual. ....	10
<b>Tabla 2.</b> Comportamiento de presión y caudal para diferentes eventos del banco de tuberías....	28
<b>Tabla 3.</b> Características de la bomba. ....	31
<b>Tabla 4.</b> Cotización de sensores de presión. ....	32
<b>Tabla 5.</b> Cotización de sensores de caudal.....	33
<b>Tabla 6.</b> Sistemas de adquisición de datos. ....	38

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Tipos de fugas en las tuberías.....	15
<b>Figura 2.</b> Operación para la detección de la fuga por medio del sistema acústico directo. ....	16
<b>Figura 3.</b> Operación de la detección acústica por medio del sistema acústico de correlación. ...	17
<b>Figura 4.</b> Sonda de rastreo: a) Inalámbrica. b) Alámbrica.....	19
<b>Figura 5.</b> Operación de la detección de la fuga por medio del sistema de sonda de rastreo. a) Sonda alámbrica. b) Sonda inalámbrica.....	19
<b>Figura 6.</b> Operación de la detección de la fuga por medio del sistema de termografía. ....	21
<b>Figura 7.</b> Cámara del sistema de termografía. ....	22
<b>Figura 8.</b> Sistema del gas trazador. a) Operación de la detección de la fuga, b) Equipo de inspección. ....	23
<b>Figura 9.</b> Comportamiento de la fuga ante ordeño. ....	27
<b>Figura 10.</b> Comportamiento de la fuga por desperfectos.....	27
<b>Figura 11.</b> Diseño del banco de pruebas en SolidWorks. ....	29
<b>Figura 12.</b> Banco de pruebas de tuberías. ....	29
<b>Figura 13.</b> Contenedores.....	30
<b>Figura 14.</b> Bomba. ....	30
<b>Figura 15.</b> Base para sostener la tubería. ....	31
<b>Figura 16.</b> Sensor de presión PG2454 .....	35
<b>Figura 17.</b> Sensor de caudal SBG434 .....	35
<b>Figura 18.</b> Caracterización del sensor de presión a través de Curve Fitting, MATLAB.....	36
<b>Figura 19.</b> Caracterización del sensor de caudal a través de Curve Fitting, MATLAB .....	37
<b>Figura 20.</b> a) Chasis NI cDAQ-9178, b) módulo NI 9203. ....	39

<b>Figura 21.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la entrada (sin fuga).	42
<b>Figura 22.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la salida (sin fuga).	43
<b>Figura 23.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la entrada (sin fuga).	43
<b>Figura 24.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la salida (sin fuga).	44
<b>Figura 25.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la entrada (con fuga).	44
<b>Figura 26.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la salida (con fuga).	45
<b>Figura 27.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la entrada (con fuga).	45
<b>Figura 28.</b> Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la salida (con fuga).	46
<b>Figura 29.</b> Pantalla de bienvenida del instrumento virtual.	48
<b>Figura 30.</b> Pantalla de adquisición y análisis de datos.	49
<b>Figura 31.</b> Pantalla de Animación.	50
<b>Figura 32.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de bienvenida.	50
<b>Figura 33.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (1 parte).	51
<b>Figura 34.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (2 parte).	52
<b>Figura 35.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (3 parte).	52
<b>Figura 36.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (4 parte).	53
<b>Figura 37.</b> Diagrama de bloques de la pantalla de animación.	53
<b>Figura 38.</b> Generador de residuos.	56
<b>Figura 39.</b> Algoritmo para detección de la fuga.	58

<b>Figura 40.</b> Interfaz gráfica del VI de detección de fugas.....	59
<b>Figura 41.</b> Interfaz gráfica del VI de detección de fugas (instante en que se detecta la fuga) ....	59

## Lista de Apéndices

	Pág.
<b>Apéndice A:</b> Sensor PG2454.....	66
<b>Apéndice B:</b> Sensor SBG434.....	68
<b>Apéndice C.</b> Cotizaciones de los sensores.....	69
<b>Apéndice D.</b> Evidencias fotográficas.....	73

# Capítulo 1. Desarrollo de un sistema para la detección automática de fugas en un banco de pruebas de tuberías en la Universidad Francisco de

Paula Santander Ocaña

## **1.1 Planteamiento del problema.**

La mayor parte de ductos y tuberías, independientemente de lo que transportan, están diseñados con una vida típica de 25 años, con el pasar de los mismos a pesar de las protecciones como revestimientos aislantes con diferentes polímeros y/o protección catódica, las tuberías se irán deteriorando debido a la corrosión, deslizamientos o asentamientos geológicos, variaciones climatológicas y desgaste provocando eventualmente daño en la tubería y con ello una fuga o derrame de producto que pueden causar graves consecuencias.

Además de las pérdidas económicas que se presentan por el producto perdido, paro de proceso y reparación del daño, pueden presentarse pérdidas ambientales y sociales insalvables como la muerte de seres humanos, perjuicios ambientales irreparables y daño a especies endémicas entre otras.

Pero también hay otras razones para que ocurra una fuga independientemente de la antigüedad de la tubería, y estas son: accidentes, terrorismo, sabotaje y robo. La razón última se presenta con frecuencia y se denomina comúnmente toma clandestina u ordeño de ductos, en los que la delincuencia organizada extrae combustible para venderlo. (Calderon, 2012)

En Cúcuta Norte de Santander, Colombia, para el año 2016 se perdió aproximadamente un millón y medio de metros cúbicos de agua al mes por motivos técnicos (rotura de tubos y goteo de cada unión o acometida bajo tierra), dato que representó el 50 % de todas las pérdidas registradas por el acueducto. (La Opinión, 2016)

## **1.2 Formulación del problema.**

¿Es posible desarrollar un sistema para la detección automática de fugas en un banco de pruebas de tuberías en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, mediante la sensórica y la instrumentación adecuada?

## **1.3 Objetivos.**

**1.3.1 General.** Desarrollar un sistema para la detección automática de fugas en un banco de pruebas de tuberías en la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

### **1.3.2 Específicos.**

- Identificar las variables que intervienen en el proceso de detección de fugas.
- Diseñar el instrumento virtual que permita visualizar cada una de las variables y detectar la fuga.
- Validar el sistema para la detección automática de fugas teniendo en cuenta el modelo desarrollado.

## **1.4 Justificación.**

En Colombia y en el mundo el derrame o pérdidas de fluidos por fugas, ha representado un problema grave en lo ambiental, social y económico, por lo cual se deben implementar métodos o sistemas adecuados para la detección oportuna de las fugas, ocurridas por corrosión externa, golpes a las instalaciones por terceras partes, corrosión interna o tomas clandestinas. Los daños ocasionados por fugas no son solamente al medio ambiente, también las pérdidas económicas, la pérdida del producto independientemente de cual sea, los daños a personas que pueden resultar heridas o en el peor de los casos muertas. Debido a esto, se afirma la necesidad de implementar nuevas estrategias para la detección de las fugas en este caso de manera automatizada y por ende la detención de la problemática planteada.

## **1.5 Delimitaciones.**

**1.5.1 Operativa.** El proyecto se desarrollará con base en las medidas del presente documento y con la asesoría del director y codirector, además de las personas que se necesiten como asesores en el transcurso de la investigación para poder desarrollar los objetivos del proyecto.

**1.5.2 Conceptual.** La temática del proyecto se enmarcará en los siguientes conceptos: automatización, sistemas, fugas, sensores, flujo, presión, señales, herramientas de simulación (Matlab, Labview y Simulink), instrumentos virtuales.

**1.5.3 Geográfica.** El trabajo se realizara en el laboratorio de mecánica de fluidos de la UFPSO sede primavera, con la asesoría de las personas encargadas del mismo y la ayuda del director y el codirector del proyecto, el cual será implementado en el laboratorio de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña.

**1.5.4 Temporal.** El presente proyecto tendrá una duración aproximada de 3 a 5 meses a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

## Capítulo 2. Marco Referencial

### **2.1 Marco Histórico.**

Las tuberías ahora se utilizan comúnmente para transportar fluidos de hidrocarburos a largas distancias, desde el sitio de producción hasta el usuario final. Estas tuberías pueden sufrir fugas debido a la edad, la corrosión o el daño de un tercero. (Zhang et al., 2015)

De los diversos métodos utilizados actualmente para detectar fugas en las tuberías de transmisión, los llamados métodos indirectos (analíticos, internos) parecen tener una importancia fundamental. Estos métodos se basan en mediciones de los parámetros de flujo en la tubería, como el flujo de masa / volumen, la presión y la temperatura.

Pawel Ostapkowicz, propone una solución al problema de detección de fugas en tuberías mediante procedimientos (algoritmos) aplicadas tanto a la onda de presión negativa como a los métodos de gradiente. Estos algoritmos tienen como objetivo lograr un nivel satisfactorio de eficiencia de un solo diagnóstico de fugas. Prueba la metodología utilizando La tubería piloto que está ubicada en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Tecnología de Bialystok. (Pawel Ostapkowicz, 2016)

Shantanu & Shibayan, realizan una revisión sobre diferentes métodos de detección de fallas en tuberías. Entre los cuales anuncian: Análisis de vibración, metodología de eco de pulso, técnicas acústicas, sistema de detección de fugas basado en ondas de presión negativa, detección de fugas basada en la tubería de soporte vectorial, detección de fugas basada en sensores de

fibras interferométricas, método de diagonalización de filtros (FDM), etc. discuten los deméritos de todos los métodos. Encuentra que estos métodos se han aplicado a fluidos específicos como el petróleo, el gas y el agua, para diferentes patrones de disposición, como recto y en zigzag. Para varias longitudes de tubería como corta y larga y también dependiendo de varias condiciones de operación. Por lo tanto, han realizado una comparación entre todos los métodos en función de su aplicabilidad. (Shantanu & Shibayan, 2016)

Guoxi, y otros, proponen un método para simular todo el proceso de fuga y calcular el volumen de fuga de líquido de una tubería presurizada dañada. En este estudio, el proceso de filtración se divide en 4 etapas en función de la intensidad de la presión transitoria. Se establecen 3 modelos para calcular el caudal y el volumen de fuga. Primero, se aplica un modelo de atenuación de la propagación de la onda de presión negativa para calcular los tamaños de los orificios. En segundo lugar, se construye un modelo transitorio de fuga de aceite, que consta de ecuaciones de continuidad, conservación del momento, conservación de la energía y flujo de orificios, para calcular el volumen de fugas. Tercero, se emplea un modelo de fuga de aceite de estado estacionario para calcular la fuga después de que las válvulas y las bombas se apagan. (Guoxi, y otros, 2017)

Arifin, Li, Shah, Meyer, & Colin, propone un novedoso algoritmo de localización y detección de fugas basado en datos, basado en el concepto de distancia de Kantorovich. Las medidas de flujo de masa y presión se utilizan para identificar posibles cambios en el estado de la tubería. (Arifin, Li, Shah, Meyer, & Colin, 2018)

## 2.2 Marco Conceptual

**2.2.1 Instrumentación virtual.** Un dispositivo virtual es un objeto que posee la capacidad de producir un efecto, sin estar presente físicamente. Un instrumento virtual básicamente utiliza un dispositivo usado para medir o controlar una variable física como la presión, la temperatura, la velocidad o la fuerza a través de un hardware y un software usados en un computador personal (PC), el cual puede ser modificado ilimitadamente por el usuario. 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.

Los instrumentos virtuales se consideran “reales” en el sentido de que son capaces de adquirir y procesar datos originados a partir de un fenómeno físico producido en el mundo real, estos instrumentos están constituidos de un ordenador o estación de trabajo equipada con poderosos programas (*software*), tarjetas de adquisición de datos (*hardware*) y drivers que en conjunto completan la funciones de los instrumento tradicionales. Los instrumentos virtuales aprovechan los beneficios de la última tecnología puesto que están basados en el ordenador. Los avances en tecnología y rendimiento incluyen poderosos procesadores y sistemas operativos, debido a los cuales la brecha entre los instrumentos autónomos y los ordenadores personales se está cerrando. Además de incorporar estas poderosas características, esas plataformas también ofrecen un acceso sencillo a herramientas tan importantes como Internet. Los ingenieros y científicos necesitan gran flexibilidad para la creación de sus propias soluciones debido a la rapidez con la que varían las necesidades, aplicaciones y requerimientos de las mismas. Con los instrumentos virtuales, estos construyen sistemas de medición y automatización que se ajustan

exactamente a las necesidades que ellos desean (definidas por el usuario) en lugar de estar limitadas por los instrumentos tradicionales de funciones fijas (definidas por el fabricante).

Un instrumento virtual no está limitado a estar confinado en un ordenador autónomo. En realidad, con los recientes desarrollos en tecnologías de redes e Internet, es más común utilizar la potencia de conectividad de los instrumentos con el objetivo de compartir tareas. Ejemplos típicos incluyen superordenadores, monitoreo distribuido y dispositivos de control, así como también datos o visualización de resultados desde múltiples sitios. Aunque el ordenador personal y la tecnología de circuitos integrados han experimentado avances significativos en las últimas dos décadas, es el software el que realmente tiene la ventaja para construir sobre una potente base de hardware los instrumentos virtuales, proveyendo mejores maneras de innovar y de reducir los costos de manera significativa. Mediante cambios realizados por software el usuario tiene la posibilidad de redefinir, expandir o modificar las funciones existentes de los instrumentos virtuales. La instrumentación virtual aprovecha el bajo costo de los ordenadores personales o las estaciones de trabajo y su alto grado de rendimiento en procesos de análisis para implementar un hardware y un software que permiten al usuario incrementar la funcionalidad del instrumento tradicional. Sin embargo, el que al usuario se le permita establecer las características del instrumento y de esta forma sus potencialidades y limitaciones es la principal característica de esta herramienta. Con la ayuda de la instrumentación virtual se pueden simular distintos instrumentos tales como milímetros, osciloscopios, analizadores de señal, etc. Agregando además características tales como: análisis numérico, visualización, almacenamiento y procesamiento de datos, entre otras. (Marrugo Carreazo, 2012)

**2.2.1.1 Comparación de un instrumento tradicional y un instrumento virtual.** Los argumentos utilizados en los instrumentos tradicionales son similares a la de un instrumento virtual basado en un ordenador personal. La instrumentación virtual como la tradicional necesita de equipos para el procesamiento de datos como lo son los microprocesadores, puertos de comunicación y capacidad de mostrar el fenómeno medido o controlado al usuario final. Los dos instrumentos cuentan con tarjetas para traducir adquirir y registrar esos fenómenos físicos. Lo que los diferencia y proporciona una ventaja al instrumento virtual es la flexibilidad y la posibilidad de que el usuario modifique la funcionalidad del instrumento.

La instrumentación virtual involucra tareas de procesamiento, análisis, almacenamiento y despliegue de datos relacionados con la medición y control de la señal específica, las cuales varían en función del usuario; la instrumentación tradicional en paralelo se caracteriza por realizar funciones específicas, definidas por el fabricante, que son inmodificables. Los instrumentos tradicionales frecuentemente carecen de falta de portabilidad, mientras que los instrumentos virtuales que funcionan en ordenadores portátiles automáticamente incorporan esta naturaleza portátil. Los instrumentos autónomos tradicionales, como osciloscopios o generadores de onda entre otros, son muy poderosos, caros y diseñados para llevar a cabo tareas concretas definidas por el fabricante, sin que el usuario pueda extender o personalizar esas tareas.

Estos instrumentos tradicionales tienen funciones específicas a la naturaleza del instrumento, además son aparatos muy caros y lentos para adaptarlos debido a la tecnología especial y costosos componentes que se necesitan para construirlos.

**Tabla 1.**  
*Instrumentación tradicional VS instrumentación virtual.*

<i>Instrumentación tradicional</i>	<i>Instrumentación virtual</i>
Definida por el fabricante.	Definido por el usuario.
Funcionalidad específica, con conectividad limitada.	Funcionalidad ilimitada, orientado a aplicaciones, conectividad amplia.
Hardware es la clave.	Software es la clave.
Alto costo.	Bajo costo, variedad de funciones, reutilizable.
Arquitectura cerrada.	Arquitectura abierta
Lenta incorporación de nuevas tecnologías.	Rápida incorporación de nuevas tecnologías, gracias a la plataforma PC
Bajas economías de escala, alto costo de mantenimiento.	Altas economías de escala, bajo costo de mantenimiento

**Nota:** En la tabla se especifica un paralelo entre las dos tecnologías de instrumentación utilizadas para la medición y control de un fenómeno físico. **Fuente:** (Marrugo Carreazo, 2012)

**2.2.2 Tubería de PVC.** El material básico para la fabricación de los tubos de P.V.C. será resina de policloruro de vinilo técnicamente pura, es decir con menos del 1% de sustancias extrañas. Al material básico no se le podrá añadir ninguna sustancia plastificante. Se podrá incluir otros ingredientes o aditivos en una proporción tal que, en su conjunto, no supere el cuatro por ciento (4%) del material que constituye la pared del tubo acabado. Estos ingredientes o aditivos pueden ser lubricantes, estabilizadores, modificadores de las propiedades finales del producto y colorantes.

El fabricante de los tubos establecerá las condiciones técnicas de la resina de policloruro de vinilo de forma que pueda garantizar el cumplimiento de las características a corto plazo y a largo plazo (50 años) que se exigen en este pliego. En especial tendrá en cuenta las siguientes características de la resina:

- Peso específico aparente.
- Granulometría.
- Porosidad el grano.
- Índice de viscosidad.
- Colabilidad.
- Color.
- Contenido máximo de monómero libre.
- Humedad.

Estas características se determinarán de acuerdo con las normas UNE correspondientes o, en su defecto, con las normas ISO. (BIZKAIKO FORU )

**Seguridad, durabilidad y ahorro.** En un sector tan exigente como el de la construcción, y especialmente en algo tan delicado como la fontanería, las tuberías plásticas tenían que ser una opción muy interesante para adueñarse como lo han hecho del mercado. Pero, ¿cuáles son las principales ventajas que han aportado? Para Opazo, “la utilización de nuevos sistemas plásticos en las conducciones de edificios supuso principalmente un ahorro en los costes de instalación, ya que se trataba de materiales más baratos, y su utilización también supuso una mayor seguridad en las instalaciones y durabilidad a largo plazo”. Ahondando en sus prestaciones, reflejamos las ventajas que para AseTUB supone la instalación de tuberías plásticas para la conducción de agua, que es la aplicación para la que presentan propiedades cualitativamente superiores de manera más clara.

**Resistencia a la corrosión.** Resisten todo tipo de corrosiones, tanto internas como externas (materiales de obra, electrólisis, par galvánico, corrientes errantes, abrasión...) y son resistentes a aguas con pH agresivo.

**Sin depósitos calcáreos.** No se producen sedimentos en sus paredes, por lo que no hay disminuciones del diámetro interior y su utilización no está limitada por la tipología del agua.

**Mayor capacidad hidráulica.** Mayor caudal a menor diámetro y posibilidad de conducir agua a mayor velocidad.

**Sin ruidos.** No se produce ningún ruido en las instalaciones, incluso a velocidades altas de fluido.

**Bajos coeficientes de conductividad.** Situados en valores de 0,22 a 0,45 W/ m°C, reduce las pérdidas de calor en las instalaciones, logrando un ahorro energético.

**Pesan poco.** Su ligereza hace que sean particularmente manejables para el transporte e instalación.

**Muy flexibles.** Sus características les confieren una gran flexibilidad, lo que las hace adaptables y moldeables a muchas aplicaciones sin necesidad de ir sujetando la instalación a medida que se avanza.

**Versátiles.** Se instalan en las rozas realizadas en el ladrillo y en las paredes de tabiquería seca.

**Unión segura.** La unión resulta rápida, fácil y segura. Al no ser preciso ni fuego ni agentes agresivos para la unión, se favorece la seguridad en obra.

**Idoneidad para aguas potables.** No modifican las propiedades organolépticas del agua (olor, color y sabor) y no favorecen la proliferación de la legionella.

**Resistentes a la presión y altas temperaturas.** Especialmente diseñadas para las instalaciones de fontanería y calefacción e inalterables en las más exigentes condiciones de temperatura y presión a lo largo del tiempo (PROMATERIALES)

**Sistema de control y automatización.** Un aspecto fundamental que debe incluirse en todos los proyectos de agua potable, es la necesidad de implementar dispositivos electrónicos de control y automatización de los controles de arranque y paro de las bombas; medición de gastos de entrada y salida; presiones en la línea de bombeo; niveles de tanques, en especial el nivel máximo del agua, entre otros. Todos estos controles deberán integrarse y ser compatibles. (SIAPA, 2014)

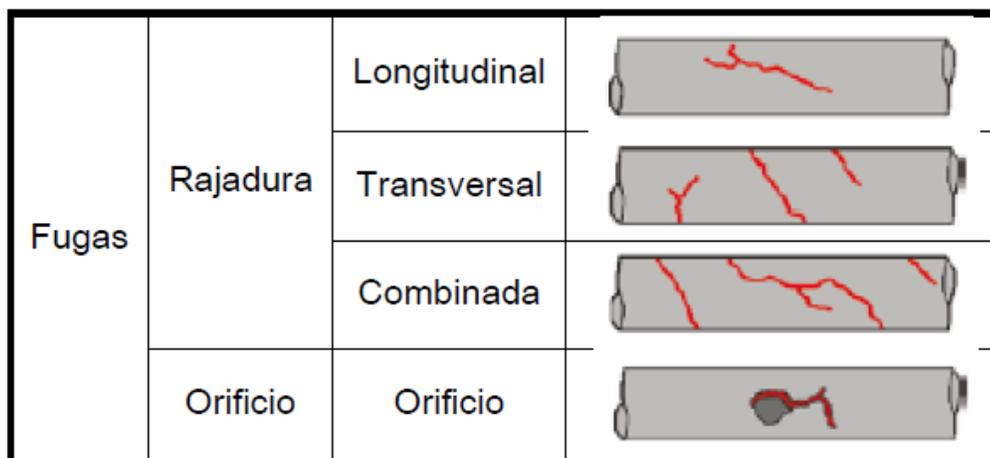
## 2.3 Marco Teórico

Cuando se transportan fluidos en tuberías es común observar la problemática de las fugas, las cuales se presentan tanto en el entorno industrial como en el ámbito doméstico, cargando consigo un gran impacto económico y ambiental.

**2.3.1 Tipos de fugas de agua.** El primero de los tipos son las fugas de agua visibles, se refiere a aquellas que pueden ser detectadas de forma veloz, con una simple ojeada. Es decir, que son perfectamente localizables por cualquier persona, tenga o no experiencia en la materia. Se manifiestan en la superficie y no es demasiado complicado establecer pautas de actuación para repararlas.

En cuanto a las fugas de agua ruidosas, su propio nombre indica su principal característica. Puesto que estas fugas producen un gran estruendo y son localizadas mediante los sistemas de detección acústica. El trabajo de detección en estos casos está basado en la escucha del sonido que generan las fugas de agua. Una complicada tarea para la que los expertos de Dasmé Control emplean sofisticados equipos y herramientas. Como son los geófonos, instrumentos capaces de captar las emisiones acústicas de un modo rápido y eficaz.

El tercero de los tipos de fuga de agua es el de las fugas silenciosas. Se trata de aquellas averías en las tuberías que no pueden detectarse ni visualmente ni acústicamente.



**Figura 1.** Tipos de fugas en las tuberías.

**Fuente:** (Rojas, Pedro, 2017)

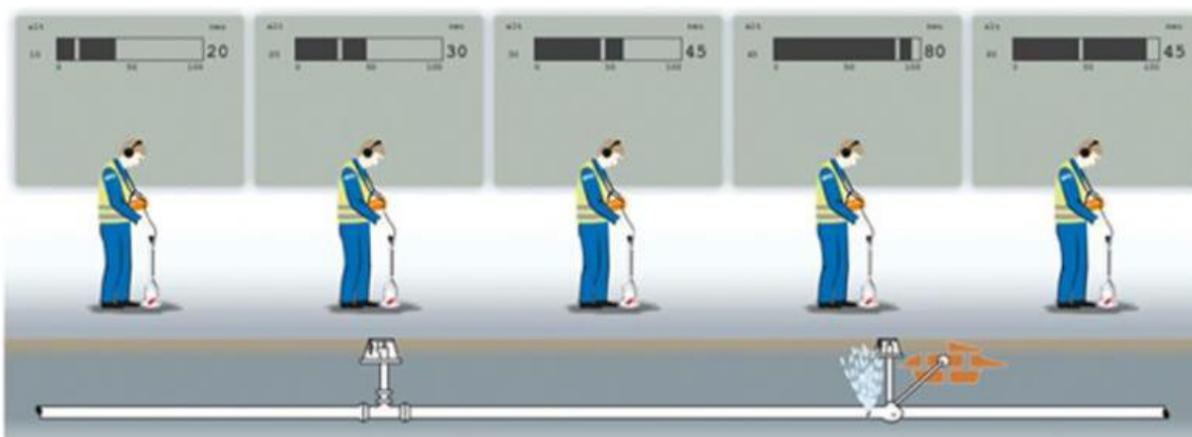
Las fugas se presentan cuando ocurren algunos de los siguientes fenómenos:

- ✓ Presión alta de fluido dentro de la tubería.
- ✓ Corrosión externa en tubos metálicos debido al contacto con el suelo.
- ✓ Corrosión interna por el fluido que transporta el tubo.
- ✓ Paso de vehículos pesados sobre tubos a poca profundidad.
- ✓ Mala calidad de los materiales y accesorios de los tubos.
- ✓ Mala calidad de mano de obra con que se instalan o reparan los tubos.
- ✓ Tuberías con muchos años de antigüedad.
- ✓ Movimientos del suelo (sismos).

**2.3.2 Sistemas comerciales para la detección y localización de fugas.** Existen diversos sistemas de detección de fugas en tuberías, dichos sistemas cuentan con múltiples ventajas y desventajas sobre otros sistemas, por lo que, al haber una amplia gama de necesidades también existe una amplia gama de características propias de cada sistema. Los sistemas comerciales más comunes se describirán a continuación:

**2.3.2.1 Sistema acústico directo.** El sistema acústico directo de detección de fugas es uno de los sistemas más utilizados actualmente, debido a su fácil implementación tanto en fugas domésticas como en industriales. Este sistema consiste en la inspección personal de un operador, el cual cuenta con un equipo que le permite escuchar el sonido emitido por el fluido que escapa de la tubería que lo transporta y así ubicar su posición (Hunaidi, 2000).

Dicho equipo consiste en un par de hidrófonos que en un principio captan la señal acústica y la transmiten a un sistema de amplificación (46 dB), el cual finalmente la transmite a los audífonos que porta el operador. El sistema de amplificación también cuenta con un regulador de volumen para proporcionar protección a la audición del operador, el cual puede observar mediante una pantalla las variaciones en los decibeles que están en función de la posición del hidrófono con respecto de la fuga; a lo largo de la tubería.

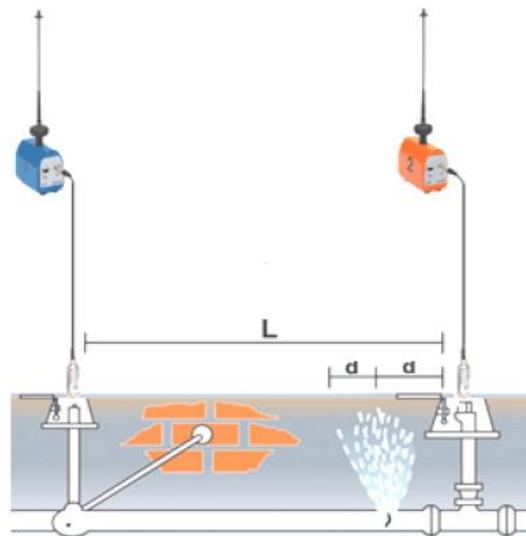


**Figura 2.** Operación para la detección de la fuga por medio del sistema acústico directo.  
**Fuente:** (SEWERIN, AQUAPHON A 100, s.f.)

Este método tiene la ventaja de que solo requiere un operador para el equipo, pero aun así tiene la desventaja de que se requiere que el operador cuente con experiencia en el manejo del equipo, bajo niveles de perturbación en la superficie donde se está censando el sonido de la fuga

y que además esta no ocurra en una tubería de plástico (Hunaidi, 2000), debido a que existen complicaciones en la localización de la fuga, ya que el plástico tiende a amortiguar la emisión acústica de la fuga.

**2.3.2.2 Sistema acústico por correlación.** El sistema acústico de detección de fugas por correlación es un sistema implementado en varias partes del mundo, debido a que es posible recuperar la inversión inicial en poco tiempo determinado. Este sistema consiste en la sujeción en un hidrófono o acelerómetro (dependiendo de la exactitud deseada) a dos terminales de una tubería entre las cuales se espera identificar la fuga. Los hidrófonos captan la señal acústica y vía inalámbrica la envían a un sistema de correlación (FUJITECOM INC., 2010). Dicho sistema llevará a cabo un proceso de correlación basado en los tiempos y distancias que tarda en recorrer la tubería dicha señal acústica captada por cada hidrófono.



**Figura 3.** Operación de la detección acústica por medio del sistema acústico de correlación.  
**Fuente:** (FUGASCUENCA, s.f.)

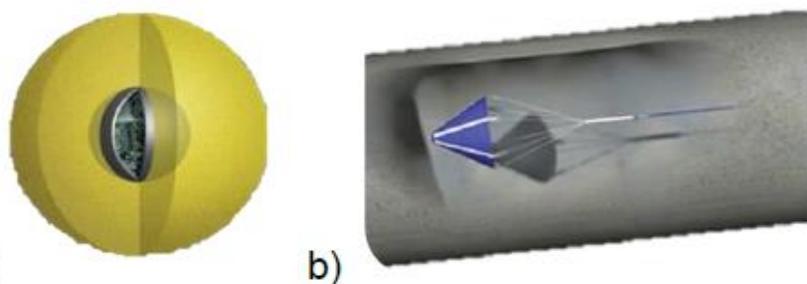
De la figura 3, se puede apreciar como la correlación es posible debido a que existe una diferencia en las distancias que hay entre la fuga y ambas terminales, provocando así un retardo

entre ambas señales, al detectar este retardo y conociendo la velocidad de propagación del sonido dentro de la tubería, se determina la posición de la fuga con respecto a ambas distancias. Una vez detectada la fuga, la pantalla del sistema de correlación muestra la ubicación de la fuga con respecto de ambas terminales, así como el retraso de tiempo que hubo en la señal (Processor, n.d.). Este método tuvo una gran aceptación para las fugas en tuberías de metal, sin embargo, sus resultados están por debajo de lo reportado, en lo que respecta a tuberías de plástico o de diámetro mayor a 1.2 m.

Morefield, llevó a cabo una experimentación en una tubería delimitada por los transmisores a 193 m en la cual se simuló una fuga de 45.42 L/h, en dicha experimentación le fue posible detectar la fuga de 2.83 L/h en 30 segundos y localizarla en 30 minutos; se observó que la exactitud en la localización de la fuga por este método fue del 1% de la distancia que había entre los transmisores. (Morefield & Carlyle, 2008)

**2.3.2.3 Sistema de sonda de rastreo.** El sistema de sonda de rastreo ha sido ampliamente aceptado por la comunidad industrial, debido a que es aplicado a sistemas donde se requiere inspeccionar grandes distancias. La sonda insertada puede ser alámbrica o inalámbrica. Este sistema consiste en insertar la sonda de rastreo en una toma y al finalizar su recorrido, se procede a retirar la sonda por otra toma. La sonda viaja registrando una señal acústica conforme se desplaza a lo largo de la tubería, para que al extraerla se proceda a analizar los datos registrados. Cuando la sonda es inalámbrica viaja a través de la tubería arrastrada por el flujo y al final de su recorrido se extrae por medio de una red.

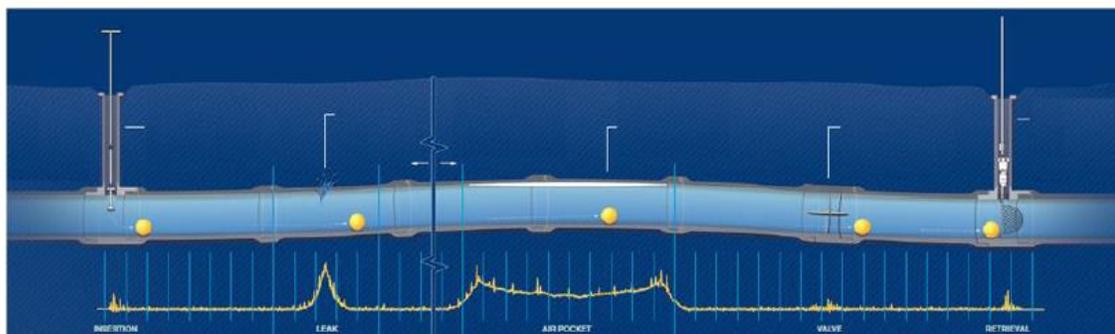
En el caso de que la sonda sea alámbrica, viaja a través de la tubería ayudada por un paracaídas que es arrastrado por el flujo y al final de su recorrido se extrae por medio de un cable retractil. El equipo de este sistema que da lectura a los datos registrados por la sonda que finalmente muestra en una pantalla la posición de la fuga, se encuentra localizado en una vagoneta que apoya al rastreo de la sonda durante su trayecto.



**Figura 4.** Sonda de rastreo: a) Inalámbrica. b) Alámbrica.  
**Fuente:** (Rojas, Pedro, 2017)



a)



b)

**Figura 5.** Operación de la detección de la fuga por medio del sistema de sonda de rastreo. a) Sonda alámbrica. b) Sonda inalámbrica.  
**Fuente:** (Rojas, Pedro, 2017)

En el caso de la sonda inalámbrica se tiene una distancia de rastreo máxima de 25,000 metros y una duración de la pila de hasta 12 horas; una de las condiciones de operación que necesita este sistema es que las tomas donde se va a insertar y a extraer las sondas tengan como mínimo 0.15 m de diámetro y que la velocidad del flujo sea de al menos 0.5 m/s.

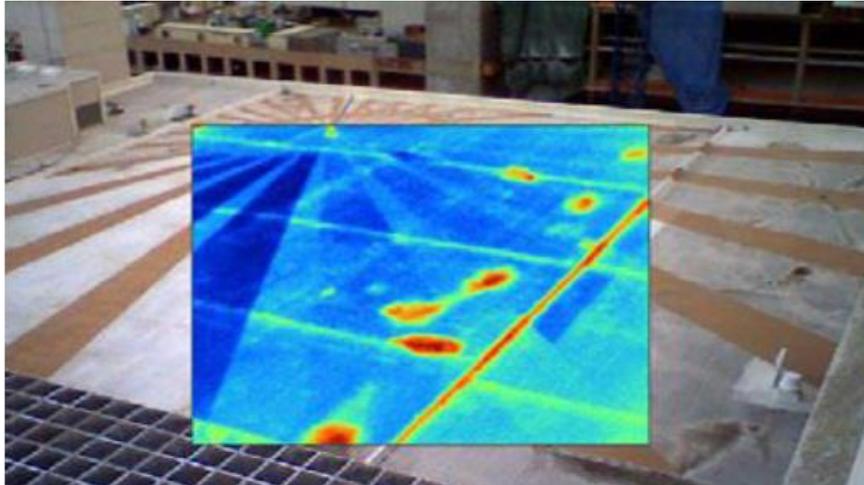
En el caso de la sonda alámbrica se tiene una distancia de rastreo máxima de 1.6 km y una capacidad de detección de fugas de hasta 1.14 L/h. Una de las condiciones de operación que necesita este sistema es que las tomas donde se va a insertar y a extraer las sondas tengan como mínimo 0.05 m de diámetro, aunque si se desea una maniobrabilidad cómoda se recomiendan tuberías de 0.1 m de diámetro y que la velocidad del flujo sea de al menos 0.5 m/s. (Rojas, Pedro, 2017)

Kurtz llevó a cabo una experimentación en campo utilizando la sonda de rastreo inalámbrica, la cual viajó a lo largo de más de 6 km y una velocidad 0.5 m/s. El estudio tardó 3.5 horas y se pudo detectar la fuga de 0.37 L/min a 4.5 m de distancia. (Kurtz, D. W., 2006)

**2.3.2.4 Sistema de fotografía termográfica.** El sistema de fotografía termográfica para detección de fugas es uno de los sistemas más eficaces en cuanto a rapidez de implementación y sobre todo es común ver su aplicación al tratar de inspeccionar las fachadas de los edificios para identificar tanto fugas de agua en intramuros, como fugas en el aire acondicionado en ventanas, techo y demás lugares poco accesibles.

Este sistema que consiste en la detección de fugas por medio de la termografía, la radiación infrarroja emitida por un objeto es detectada y medida por medio de un radiómetro infrarrojo, el

cual contiene un sensor que convierte la radiación emitida por los objetos en señales eléctricas que a su vez son expresadas en una escala de colores, haciendo posible así la detección de la fuga.



**Figura 6.** Operación de la detección de la fuga por medio del sistema de termografía.  
**Fuente:** (FLUKE, s.f.)

Este sistema cuenta con la gran ventaja de que puede localizar más de una fuga al mismo tiempo, así como también no se requiere de gran experiencia para operar la cámara termográfica y que ésta a su vez, permite tomar fotografías de forma continua cada 2 segundos; así como también el hecho de que puede operar en un rango de temperaturas  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $600^{\circ}\text{C}$  del objeto fotografiado con una precisión del 2%.

La desventaja que presenta este sistema radica principalmente en que no puede cuantificar la fuga y que además, el operador debe tener nociones de donde se localiza la fuga, de lo contrario tendría que fotografiar la red de tuberías por completo. Finalmente cabe señalar que la detección de fugas por medio de la cámara termográfica (figura 7) tiene gran versatilidad al poder aplicarse también a la industria de la construcción (detección de fugas en techos, paredes etc. por infiltraciones de aire), a la industria térmica (detección de fugas en aire acondicionado,

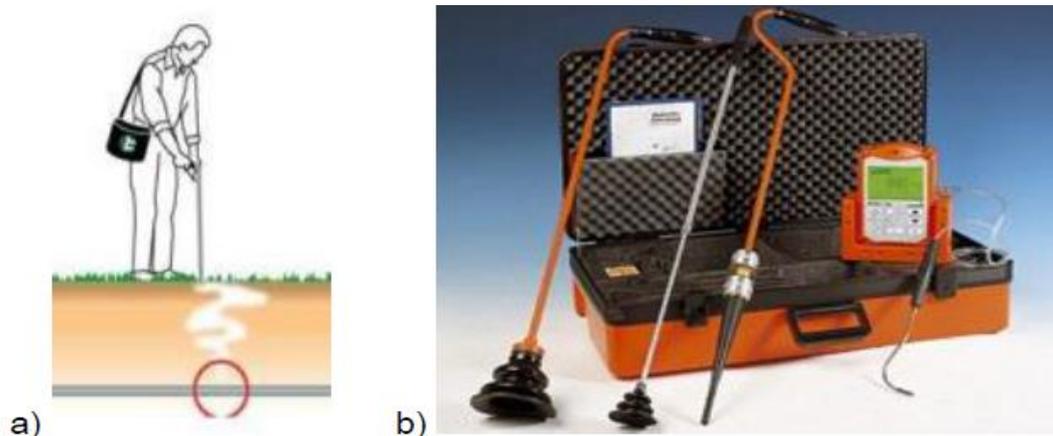
detección de convección en calentadores, fugas en condensadores, etc.), en la industria eléctrica (detección de pérdida de energía por un mal funcionamiento de los rodamientos en los motores, un mal funcionamiento en los sistemas de ventilación, etc.). (FLUKE, s.f.)



**Figura 7.** Cámara del sistema de termografía.  
**Fuente:** (FLUKE, s.f.)

Fahmy (2009) llevó a cabo una inspección en las tuberías subterráneas de Montreal (1.8 m de profundidad) utilizando el método termográfico y logró detectar y localizar la fuga por medio de tomas aéreas. Al mismo tiempo llevó a cabo la detección también por el método de correlación acústica; lo cual le permitió comparar los resultados, donde para un caso en específico el tramo de la tubería estudiada era de 48.7 m, la fuga estaba a 16.8 m del final de la tubería y el método acústico localizó la fuga a 15.41 m del final de la tubería, mientras que el método termográfico localizó la fuga a 14.9 m del final de la tubería, mostrando así un error del 2.85 % y 3.9% respectivamente (Fahmy & Moselhi, 2009). Dicho estudio también reveló que la mejor hora para llevar a cabo una toma aérea de las fotografías fue de las 6:00 am a las 8:00 am.

**2.3.2.5 Sistema del gas trazador.** Este sistema ha sido ampliamente aceptado por la industria que maneja flujo de gas por su gran sensibilidad, debido a su versatilidad en cuanto a la detección de fugas en redes. Este sistema consiste en la detección de fugas por medio de la inspección personalizada de un operador, el cual cuenta con un equipo de medición capaz de censar el gas trazador que previamente es inyectado a la tubería que se desee inspeccionar y que escapa por la fuga.



**Figura 8.** Sistema del gas trazador. a) Operación de la detección de la fuga, b) Equipo de inspección.  
**Fuente:** (SEWERIN, Variotec 460, s.f.)

El equipo consta de un tanque del gas trazador (que comúnmente es hidrógeno por no ser nocivo al medio ambiente), también tiene diversos tipos de bastones con el fin de poder adaptarse a cada condición de muestreo (espacio, humedad, temperatura, etc.) dicho bastón envía la señal registrada a un procesador portátil que muestra en pantalla la magnitud de la fuga en función de las partes por millón.

En el caso de que las tuberías se encuentren enterradas se le puede añadir un colorante al gas trazador a manera de tener una ayuda visual al momento de la inspección. (SEWERIN, Variotec 460, s.f.)

## Capítulo 3. Metodología

### **3.1 Tipo de investigación.**

Esta investigación tiene un enfoque cuantitativo puesto que se basa en una serie de cálculos y mediciones para lograr el sistema correspondiente.

El diseño de esta investigación se describirá como investigación aplicada, debido a que se estará utilizando todos los conocimientos adquiridos en la etapa de formación profesional referente al sistema.

### **3.2 Fases del proyecto.**

**3.2.1 FASE I:** Identificar las variables que intervienen en el proceso de detección de fugas.

**Actividad 1.** Identificar los criterios de operación del sistema, flujo, presión, temperatura, entre otros.

**Actividad 2.** Determinar los sensores adecuados para implementar en el banco de pruebas.

**Actividad 3.** Seleccionar el sistema de adquisición de datos para la digitalización de las señales.

**3.2.2 FASE II:** Diseñar el instrumento virtual que permita visualizar cada una de las variables y detectar la fuga.

**Actividad 1.** Familiarizarse con herramientas de simulación como Matlab, Labview y Simulink.

**Actividad 2.** Análisis y desarrollo del modelo dinámico del sistema en presencia y ausencia de fugas.

**Actividad 3.** Simulación del modelo dinámico del sistema.

**Actividad 4.** Desarrollo del instrumento virtual por medio de LabVIEW.

**3.2.3 FASE III:** Validar el sistema para la detección automática de fugas teniendo en cuenta el modelo desarrollado.

**Actividad 1.** Metodología experimental para verificar el desempeño del algoritmo para la detección de fugas.

**Actividad 2.** Implementación del instrumento virtual para validar y evaluar el comportamiento del sistema.

**Actividad 3.** Desarrollo y sometimiento de evaluación del proyecto de grado.

## Capítulo 4. Desarrollo del proyecto por medio de las actividades propuestas

A continuación, se muestra el resultado de todas las actividades propuestas en la metodología para el desarrollo del proyecto.

### **4.1 Identificar las variables que intervienen en el proceso de detección de fugas.**

Mediante las siguientes actividades se desarrolló el primer objetivo:

**4.1.1 Identificar los criterios de operación del sistema, flujo, presión, temperatura, entre otros.** Para diseñar un sistema de detección de fugas partimos que el producto a transportar es líquido que se encuentra en estado estable previo al inicio de la fuga.

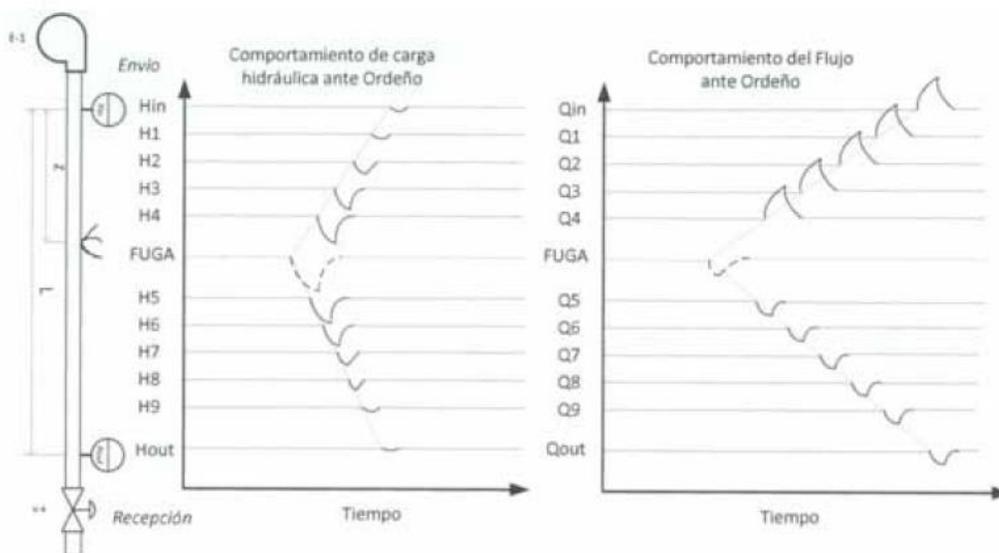
Un oleoducto es un sistema de transporte por bombeo hidráulico cuyo objetivo es enviar el producto de un punto a otro separado por una distancia.

#### **❖ Comportamiento de la fugas en oleoductos**

**4.1.1.1 Fugas ocasionados por ordeños.** Cuando la fuga es ocasionada por ordeño es de corta duración, el flujo de fuga ocurrirá solo durante un intervalo de tiempo y se suspenderá regresando al estado de equilibrio inicial.

Si la duración del ordeño es corta puede ocurrir que las presiones no alcancen a estabilizarse en un nuevo valor antes de regresar al valor original, sin embargo el cambio de

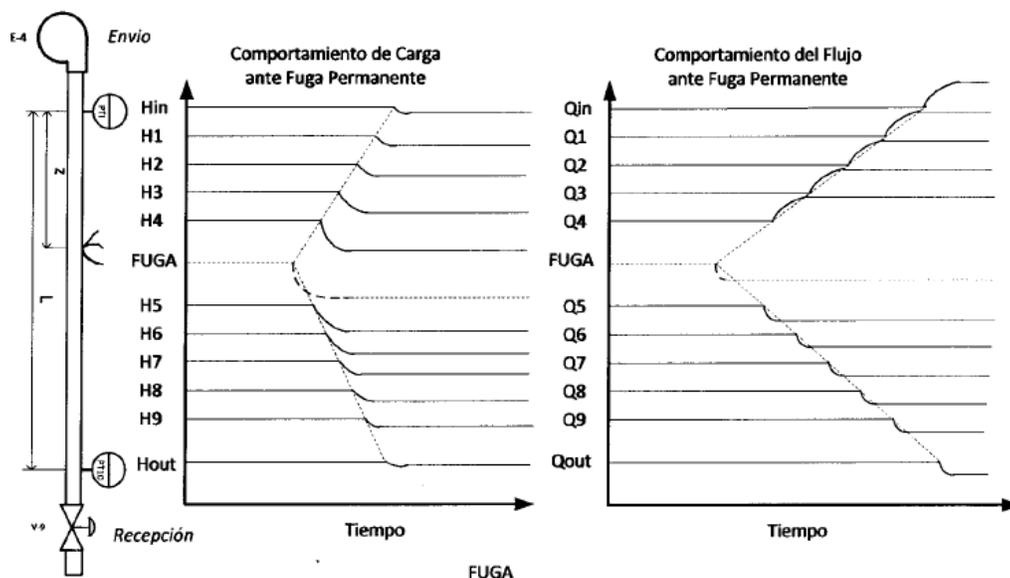
presión iniciara inmediatamente en el punto de la fuga y se propagara hacia el resto del oleoducto como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Comportamiento de la fuga ante ordeño.

**Fuente:** (Calderon, 2012)

**4.1.1.2 Fugas ocasionadas por desperfectos.** Cuando la fuga es ocasionada por un desperfecto se puede asumir que el flujo de fuga es constante y por lo tanto se logra la estabilidad, como se muestra en la figura 10.



**Figura 10.** Comportamiento de la fuga por desperfectos.

**Fuente:** (Calderon, 2012)

**4.1.1.3 Eventos provocados en el sistema que no son fuga de producto.** Durante el funcionamiento del banco de tuberías hay eventos como:

- Arranque y paro de las unidades de bombeo
- Variación en la referencia de envío de caudal y de presión
- Apertura o cierre de válvulas

Estos eventos producen cambios de presión y flujo que pueden confundirse con una fuga, se debe caracterizar la fuga y las variables que influyen en el proceso.

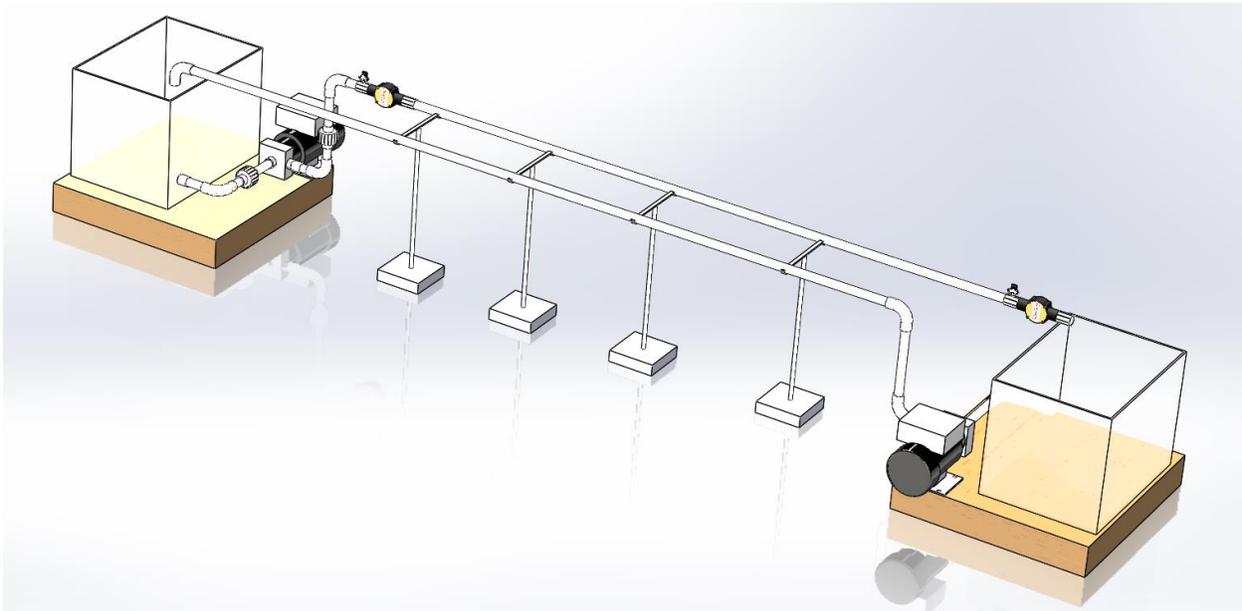
**Tabla 2.**

*Comportamiento de presión y caudal para diferentes eventos del banco de tuberías.*

EVENTO	PRESIÓN DE ENTRADA	CAUDAL DE ENTRADA	PRESIÓN DE SALIDA	CAUDAL DE SALIDA
FUGA	Baja	Sube	Baja	Baja
ARRANQUE	Sube	Sube	Sube	Sube
DEL GRUPO DE BOMBEO				
PARADA DEL GRUPO DE BOMBEO	Baja	Baja	Baja	Baja

**Nota:** La tabla muestra el funcionamiento del caudal y la presión para diferentes eventos realizados en el sistema de banco de tuberías.

#### 4.1.1.4 Diseño del banco de pruebas



**Figura 11.** Diseño del banco de pruebas en SolidWorks.  
**Fuente:** Autor del proyecto

Para el desarrollo de este proyecto se necesitó construir un banco de pruebas de tuberías que permitiera el avance del mismo.



**Figura 12.** Banco de pruebas de tuberías.  
**Fuente:** Autor del proyecto

En la figura 12 se muestra el banco de pruebas realizado en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UFPSO. Para su montaje fue necesario utilizar 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 (figura 13), dos bombas que

trasladaran el fluido de una pecera a otra (figura 14), 4 bases o soportes para mantener un  $\Delta z = 0$  (figura 15), y tuberías y accesorios de  $\frac{1}{2}$  pulgada necesarios para el desarrollo del proyecto.



**Figura 13.** Contenedores.  
**Fuente:** Autor del proyecto



**Figura 14.** Bomba.  
**Fuente:** Autor del proyecto

**Tabla 3.***Características de la bomba.*

WATER PUMP QB - 60			
Q. máx.	35 L/min	H.máx	35 m
Suct.L.máx	9 m	V.	110
kW.	0.33	Hz	60 1 ~ Mot.
Size	25 x 25 mm	r.p.m	3450 1./min

**Nota:** La tabla presenta las características nominales de las bombas que se utilizaron, en donde se tiene en cuenta su caudal máximo y voltaje.

**Figura 15.** Base para sostener la tubería.**Fuente:** Autor del proyecto

Estas bases se hicieron con lámina de acero y perfil cuadrado, estableciendo una altura de 50 cm, con el propósito de soportar las tuberías, permitiendo una altura constante y que estas no se pandearan.

**4.1.2 Determinar los sensores adecuados para implementar en el banco de pruebas.**

**Tabla 4.**  
*Cotización de sensores de presión.*

<b>SENSORES DE PRESIÓN</b>		
<b>Marca</b>	<b>Características</b>	<b>Costo</b>
<b>SITRANS P410</b>	Alimentación: 10,5 a 45 V.c.c, (10,5 a 30 V.c.c en la ejecución EEx ia). Conexión: A 2 hilos. Señal de salida: 4 a 20 mA. Precisión de medida: Mejor de 0,1 % incluidas la histéresis y la Repetibilidad (precisión mejor de 0,07 % bajo demanda).	\$3.251.363
<b>PG2454</b>	Salida analógica de 4 a 20 mA. Tensión de alimentación 24 VDC, rango de medición -1...10bar - 14.4....145psi, temperatura del fluido-25....80°C, grado de protección IP 67 / IP 69K. Exactitud $\pm 0,25$ %, Repetibilidad $\pm 0,1$ %	\$1.564.896
<b>EBCHQ</b>	Transmisor de Presión Industrial, Rango 10 Bar / 145,03 PSI, Precisión 0,5 % F.S, Salida 4-20 mA 2-Hilos, Alimentación 24VDC, Conexión 1/4" NPT, Con conector Industrial. Material del cuerpo: SS 304. Grado de Seguridad: IP65. ORIGEN: CHINA	\$338.300
<b>MPX10DP</b>	Voltaje de operación: 3V~6V Corriente de operación: 6mA Tiempo de respuesta: 1ms Offset: 0mV~35mV Sensibilidad: 3.5mV/kPa Temperatura de operación: -40°C~125°C	\$24.000

**Tabla 5.***Cotización de sensores de caudal.*

<b>SENSORES DE CAUDAL</b>		
<b>Marca</b>	<b>Características</b>	<b>Costo</b>
<b>SITRANS FST020 básico</b>	Un canal. con pantalla y E/S fuente de alimentación 100 - 240 VAC sensor de medida: A2 universal Con juego de perfiles de fijación para diámetro del tubo hasta 127 mm (5"). Campo de aplicación: para diámetros de tubo de 12,7 mm (0,5") hasta 50,8 mm (2") Temperatura: -40 °C a +121 °C. Cable de sensor: camisa de PVC, resistente a la inmersión, longitud 5 metros (16,4 pies) UL, ULc, CE	\$20.019.211
<b>SM6100</b>	Tensión de alimentación 24V DC.PNP/NPN, 4 hilos, temperatura - 10... 70°C, Rango de medición 0,10...25,00 l/min, Grado de protección IP 67.	\$ 2.172.685
<b>SBG434</b>	Salida analógica de 4 a 20 mA, tensión de alimentación 24 V DC 3 hilos, temperatura -10... 100°C, rango de medición 2 a 50 L/min, grado de protección IP 65 / IP 67, Exactitud $\pm 5$ %, Repetibilidad $\leq \pm 1$ %	\$ 906.099
<b>Sensor de Flujo YF-S201</b>	Voltaje de funcionamiento: 5V~18V Corriente de operación: 15mA (5V) Frecuencia de caudal: $f=7.5*Q$ Pulsos por litro: 450 Paso de caudal: 1L/min ~ 30L/min Presión del lí-quido: 1.75Mpa Humedad de almacenamiento: 25%RH~95%RH Temperatura de operación: -25°C~80°C	\$18.000

**Nota:** Estas cotizaciones se hicieron a través de las empresas Sensomatic del Oriente SAS, Eléctricas Bogotá LTDA y en Mercadolibre (**Apéndice 3**)

**4.1.2.1 Criterios de selección.** Para la selección de los sensores se tuvieron en cuenta los siguientes criterios de selección:

❖ **Sensores de presión**

- Salida analógica de 4 a 20 mA
- Rangos de medición: 0 a 60 psi requeridos por la bomba
- Costo ajustado al presupuesto
- Exactitud  $\pm 0,25$  %
- Repetibilidad  $\leq \pm 0,1$  %

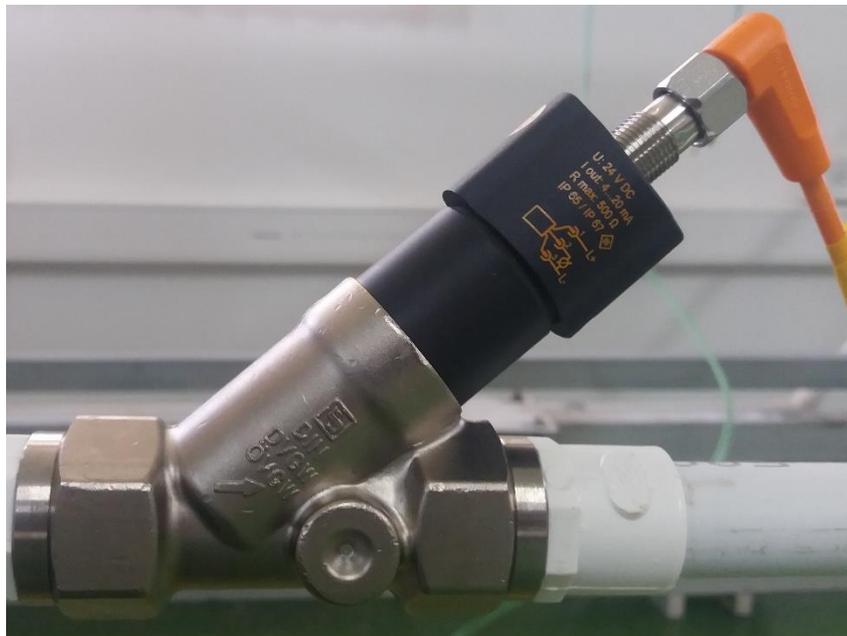
❖ **Sensores de caudal**

- Salida analógica de 4 a 20 mA
- Rangos de medición: 0 a 35 L/min requeridos por la bomba
- Costo ajustado al presupuesto
- Exactitud  $\pm 5$  %
- Repetibilidad  $\leq \pm 1$  %

Según los criterios de selección los sensores que se ajustaban a los requerimientos son PG2454 (de presión, **Apéndice 1**, figura 16) y SBG434 (de caudal, **Apéndice 2**, figura 17), los cuales aportan de manera significativa un amplio ajuste en lo necesario para el desarrollo y avance del proyecto.

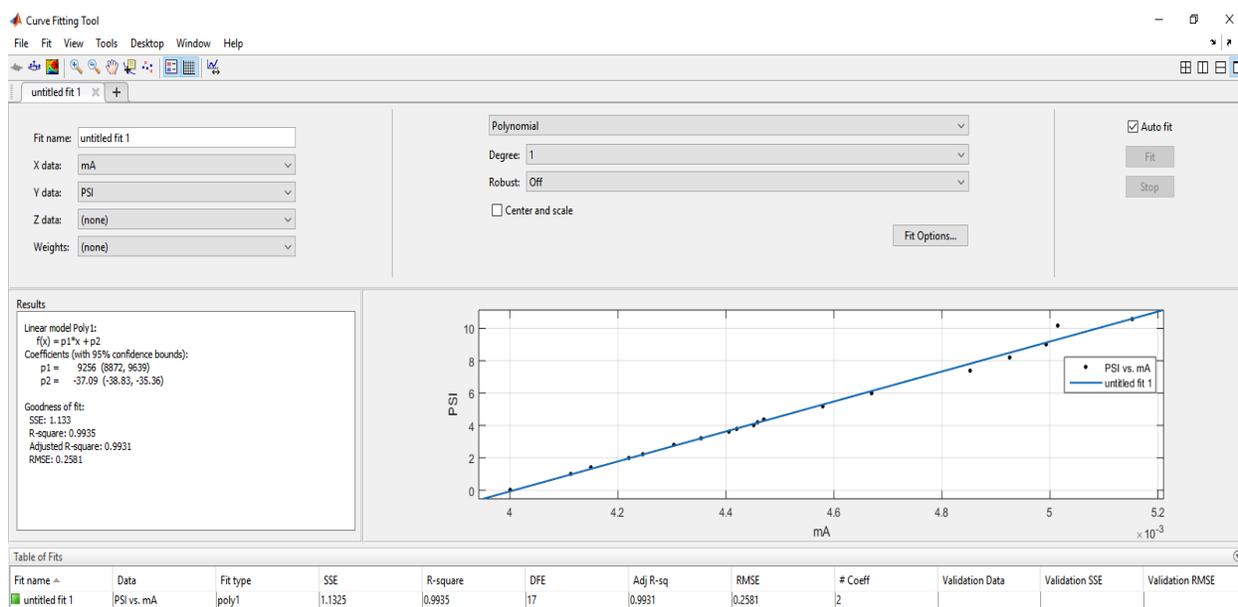


**Figura 16.** Sensor de presión PG2454  
**Fuente:** Autor del proyecto



**Figura 17.** Sensor de caudal SBG434  
**Fuente:** Autor del proyecto

### 4.1.2.2 Caracterización de los sensores



**Figura 18.** Caracterización del sensor de presión a través de Curve Fitting, MATLAB.

**Fuente:** Autor del proyecto

Para poder caracterizar el sensor se realizaron pruebas en donde se le cambió el valor de presión (teniendo en cuenta que este sensor permite una visualización a través de un indicador con un display donde se muestra de manera digital y analógica los datos en tiempo real) y luego se relacionó con los valores obtenidos en mA con el módulo de adquisición de datos, obteniendo a través de *Curve Fitting (MATLAB)*, la siguiente ecuación:

$$f(x) = p_1 * x + p_2 \quad \text{ecuación 1}$$

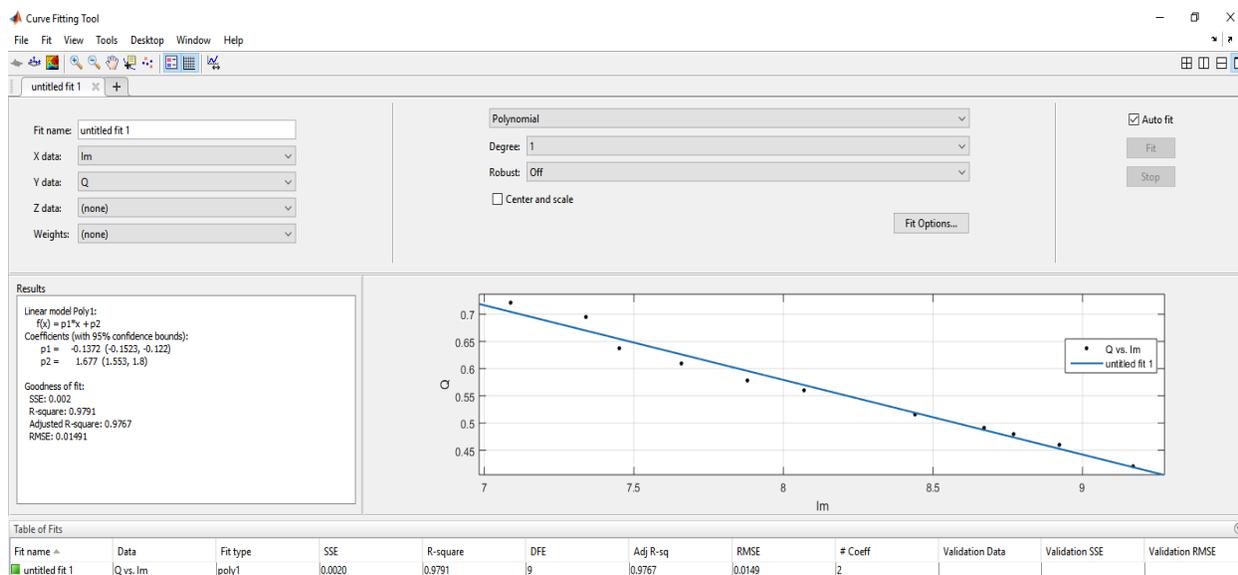
En donde,

$$p_1 = 9256$$

$$p_2 = -37.09$$

Con un ajuste muy bueno de

$$R = 0.9935$$



**Figura 19.** Caracterización del sensor de caudal a través de Curve Fitting, MATLAB

**Fuente:** Autor del proyecto

Para caracterizar el sensor se realizaron pruebas en donde se le cambió el valor de caudal (teniendo en cuenta que este sensor tiene un rango de operación de 2 a 50 L/min y que las salidas son de 4 a 24 mA) y luego se relacionó con los valores obtenidos en mA con el módulo de adquisición de datos, obteniendo a través de *Curve Fitting (MATLAB)*, la siguiente ecuación:

$$f(x) = p_1 * x + p_2 \quad \text{ecuación 2}$$

En donde,  $p_1 = -0.1372$

$$p_2 = 1.677$$

Con un ajuste muy bueno de  $R = 0.9791$

**4.1.3 Seleccionar el sistema de adquisición de datos para la digitalización de las señales.** Para el desarrollo de esta actividad se hizo necesario poder comparar los diferentes sistemas de adquisición de datos, existentes en el mercado teniendo como resultado:

**Tabla 6.**  
*Sistemas de adquisición de datos.*

<b>SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS</b>	<b>Características</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Arduino UNO</b>	La Arduino Uno es una board basada en un microcontrolador Atmega328. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 4 pueden ser utilizados para salidas PWM), 6 entradas análogas, un resonador cerámico de 16 MHz, un conector para USB tipo hembra, un Jack para fuente de Poder, un conector ICSP y un botón reset.	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Bajo costo</li> <li>*Fácil portabilidad</li> <li>*Entorno de programación simple y directo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*El hecho de que la plataforma venga ya ensamblada le quita flexibilidad a los proyectos.</li> <li>*Frecuencia de muestreo baja</li> </ul>
<b>Ni 6001</b>	Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits. Puede conectar fácilmente sensores y señales al USB-6001 con conectividad de terminal de tornillo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Bajo costo</li> <li>*Fácil portabilidad</li> </ul>	No tiene entrada analógica de corriente
<b>PLC</b>	Un PLC (Controlador Lógico Programable) es un dispositivo utilizado en la automatización y control de procesos. Con este dispositivo es posible detectar posiciones en las entradas mediante sensores, para actuar con algo a la salida, como motores, válvulas, o actuadores, entre otros dispositivos mecánicos. Un PLC también tiene su diagrama en bloques, que se puede observar, para un mejor entendimiento del dispositivo. La automatización industrial sería imposible realizar sin un PLC.	<ul style="list-style-type: none"> <li>*No es necesario dibujar el esquema de contactos.</li> <li>*Mínimo espacio de ocupación.</li> <li>*Menor costo de mano de obra de la instalación.</li> <li>*Fácil programar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Es modular</li> <li>*La tarea o el proceso depende totalmente y enteramente del código de la programación.</li> <li>*El costo inicial de lo que implica automatizar una tarea con un PLC es muy elevado.</li> </ul>
<b>Chasis 9178</b>	El cDAQ-9178 es un chasis USB CompactDAQ diseñado para sistemas pequeños y portátiles de medidas de sensor. El chasis brinda la sencillez de conexión rápida (plug-and-play) del USB a sus medidas eléctricas y de sensores. El cDAQ-9178 también tiene cuatro contadores/temporizadores de uso general de 32 bits.- Puede tener acceso a estos contadores, como también compartir relojes y disparos, a través de dos conectores BNC integrados.	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Más robusto.</li> <li>*Controla la temporización, la sincronización y la transferencia de datos entre los módulos de E/S de la Serie C y un servidor externo</li> <li>*Puede usar este chasis con una combinación de módulos de E/S de la Serie C para poder realizar diversas medidas de E/S analógica, E/S digital y contador/temporizador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Es modular y además se debe contar con una tarjeta de pulsos de entradas digitales.</li> <li>*Alto costo.</li> </ul>

Teniendo en cuenta que la Universidad cuenta con un Chasis NI cDAQ-9178 y además con un módulo NI 9203 (Figura 20) de entrada y salida analógica de 4 a 20 mA y que los sensores seleccionados permiten la conexión con el módulo, se determinó a aprovechar lo que se posee y de esta manera gozar las ventajas que este sistema ofrece para el desarrollo del proyecto.



**Figura 20.** a) Chasis NI cDAQ-9178, b) módulo NI 9203.  
**Fuente:** (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018)

## 4.2 Diseñar el instrumento virtual que permita visualizar cada una de los variables y detectar la fuga.

### 4.2.1 Familiarizarse con herramientas de simulación como Labview, Matlab y Simulink.

**4.2.1.1 LabVIEW.** LabVIEW es un software de ingeniería diseñado para aplicaciones que requieren pruebas, medidas y control con acceso rápido a información de datos y hardware.

Ofrece un enfoque de programación gráfica que le ayuda a visualizar cada aspecto de su aplicación, incluyendo configuración de hardware, datos de medidas y depuración. Esta visualización hace que sea más fácil integrar hardware de medidas de cualquier proveedor,

representar una lógica compleja en el diagrama, desarrollar algoritmos de análisis de datos y diseñar interfaces de usuario personalizadas. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2018)

Labview es un entorno gráfico de programación. Los programas desarrollados en Labview se llaman VI's (Virtual Instruments), su origen provenía del control de instrumentos, pero hoy en día su uso se ha expandido más allá. Labview tiene un entorno de programación gráfico, por lo que los programas no se escriben, sino que se dibujan, una labor facilitada gracias a que Labview consta de una gran cantidad de bloques prediseñados.

Los programas se dividen en dos partes bien diferenciadas, una llamada "Panel Frontal", y otra "Diagrama de Bloques".

**Panel Frontal:** es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. En esta interfaz se definen los controles (los usamos como entradas, pueden ser botones, marcadores etc.) e indicadores (los usamos como salidas, pueden ser gráficas, etc.).

**Diagrama de Bloques:** es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan íconos que realizan una determinada función y se interconectan (el código que controla el programa). Suele haber una tercera parte icono/conector que son los medios utilizados para conectar un VI con otros VI's.

En el panel frontal, encontraremos todo tipos de controles o indicadores, donde cada uno de estos elementos tiene asignado en el diagrama de bloques una terminal, es decir el usuario

podrá diseñar un proyecto en el panel frontal con controles e indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas que interactuarán con la terminal del VI. Podemos observar en el diagrama de bloques, todos los valores de los controles e indicadores, como van fluyendo entre ellos cuando se está ejecutando un programa VI. (Estuelectronic, 2012)

**4.2.1.2 Matlab y Simulink.** Matlab combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente.

**Apps interactivas.** Las apps de MATLAB le permiten ver cómo funcionan diferentes algoritmos con sus datos. Realice iteraciones hasta obtener los resultados deseados y, después, genere automáticamente un programa de MATLAB para reproducir o automatizar su trabajo.

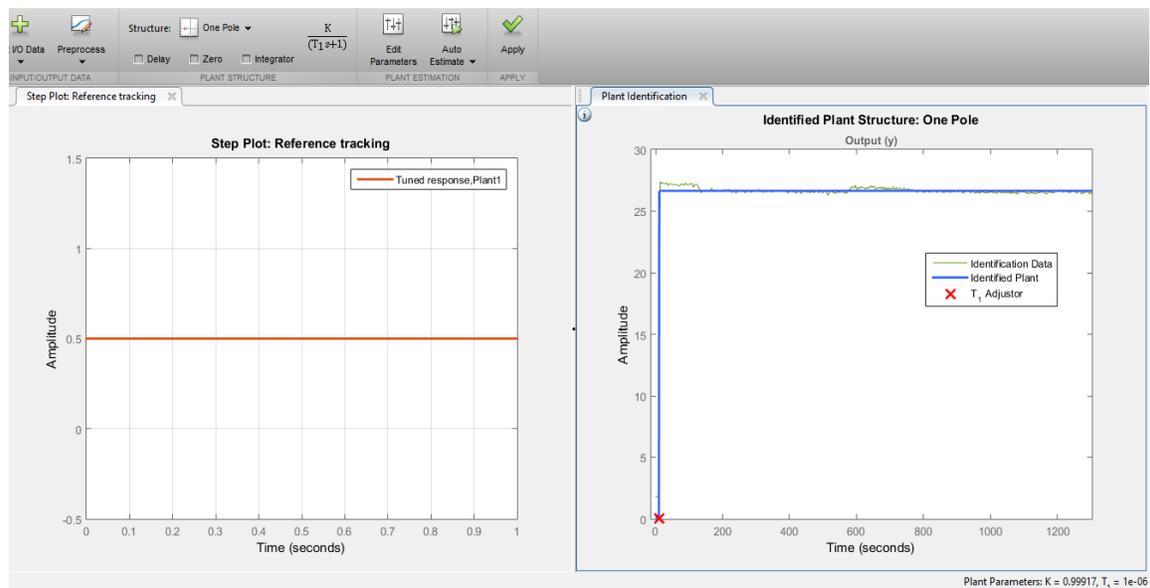
Si se desea analizar datos como también desarrollar algoritmos o crear modelos, MATLAB se ha diseñado para la forma en que piensa y el trabajo que realiza. (MathWorks, 2018)

SIMULINK es una toolbox especial de MATLAB que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Puede simular sistemas lineales y no lineales, modelos en tiempo continuo y tiempo discreto y sistemas híbridos de todos los anteriores. Es un entorno gráfico en el cual el modelo a simular se construye clicando y arrastrando los diferentes bloques que lo constituyen. Los modelos SIMULINK se guardan en ficheros con extensión \*.mdl. (Lazaro Villa, 2018)

**4.2.2 Análisis y desarrollo del modelo dinámico del sistema en presencia y ausencia de fugas.** Esta actividad se relaciona y se desarrolló en conjunto con la siguiente actividad.

**4.2.3 Simulación del modelo dinámico del sistema.** Para el desarrollo de estas actividades se usó la aplicación de PID Tuning de Matlab, permitiendo obtener resultados gráficos vistos a continuación. Se obtuvieron los datos de las variables físicas de los sensores de flujo y de presión tanto a la entrada como a la salida, con estos datos se realizó un modelo dinámico de la tubería vista desde cada sensor, cuando el sistema no presenta fugas, luego se hizo el mismo procedimiento del sistema cuando se presentan fugas y se hacen una comparación entre cada uno de los modelos.

#### 4.2.3.1 Modelos dinámicos del sistema en ausencia de fugas.



**Figura 21.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la entrada (sin fuga).

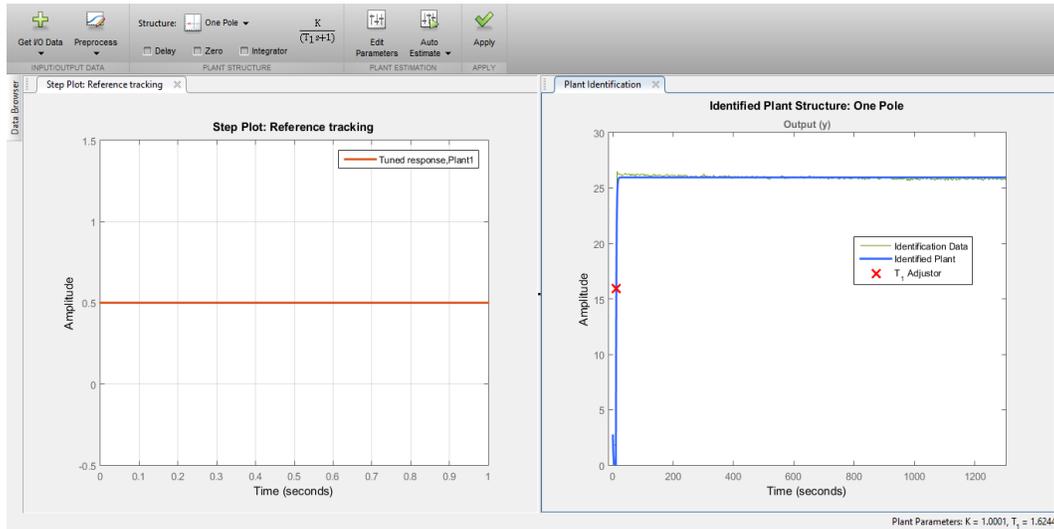
**Fuente:** Autor del proyecto

El sistema visto desde el punto de vista de cada una de las variables fijas se asimila a un comportamiento de un sistema de primer orden, cuya función de transferencia es:

$$F1 = K/(T_1 * s + 1)$$

Para el modelo de sistema visto desde el flujo de entrada, las variables de la función de transferencia son:

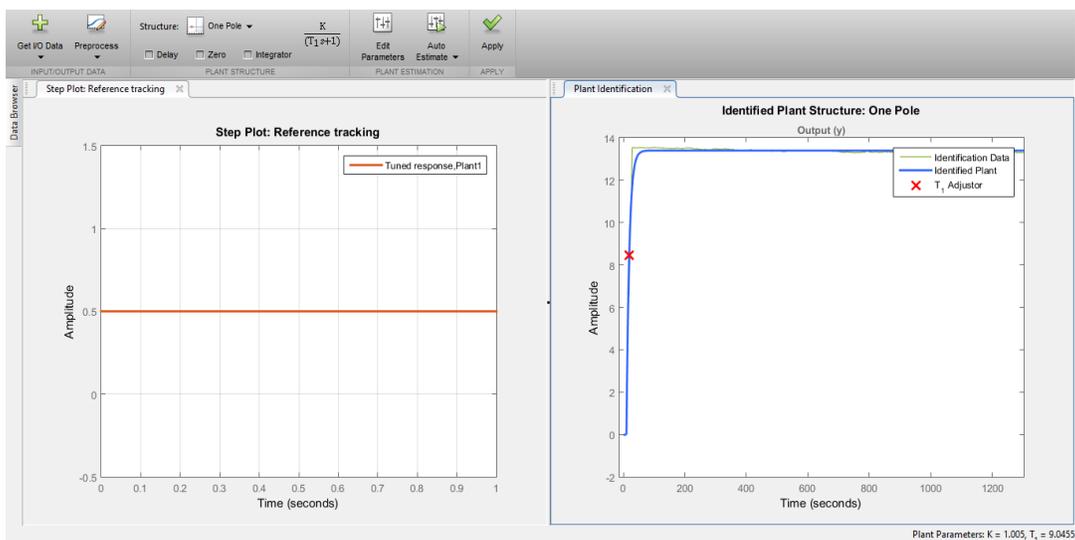
$$K = 0.99917 \quad y \quad T_1 = 1 \times 10^{-6}$$



**Figura 22.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la salida (sin fuga).  
Fuente: Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde el flujo de salida, las variables de la función de transferencia son:

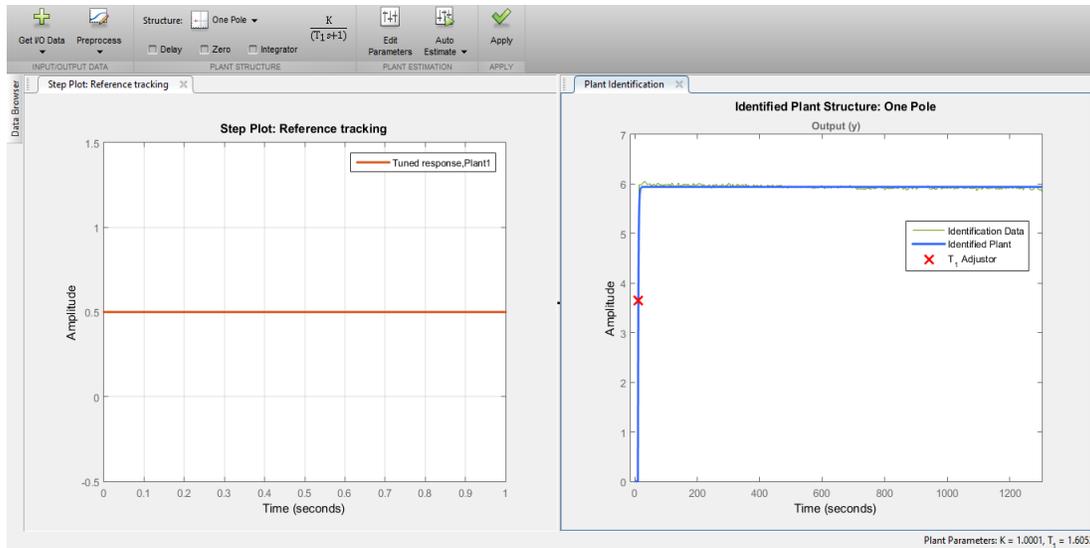
$$K = 1.0001 \quad y \quad T_1 = 1.6244$$



**Figura 23.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la entrada (sin fuga).  
Fuente: Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde la presión de entrada, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.005 \quad y \quad T_1 = 9.0455$$



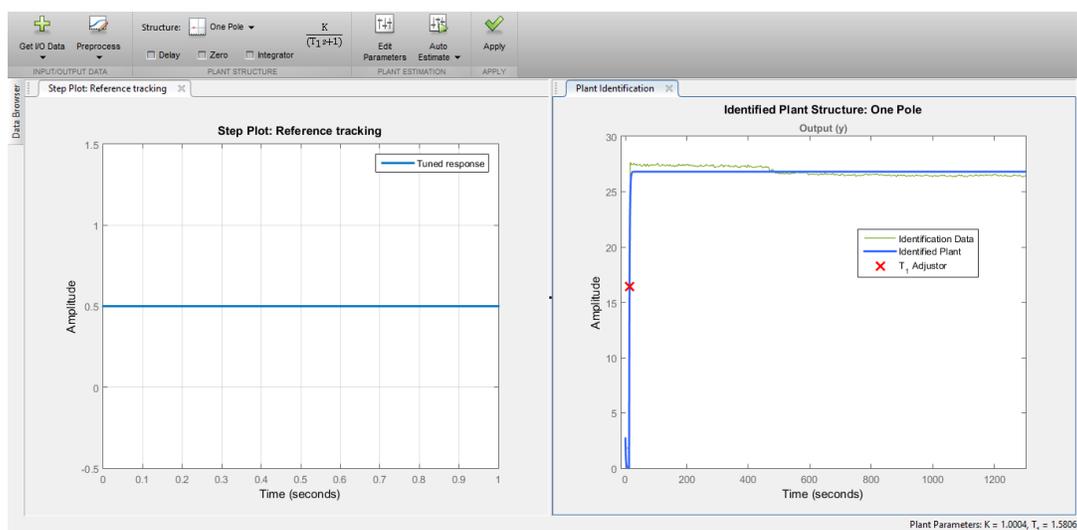
**Figura 24.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la salida (sin fuga).

**Fuente:** Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde la presión de salida, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.0001 \quad y \quad T_1 = 1.6053$$

#### 4.2.3.2 Modelos dinámicos del sistema en presencia de fugas.

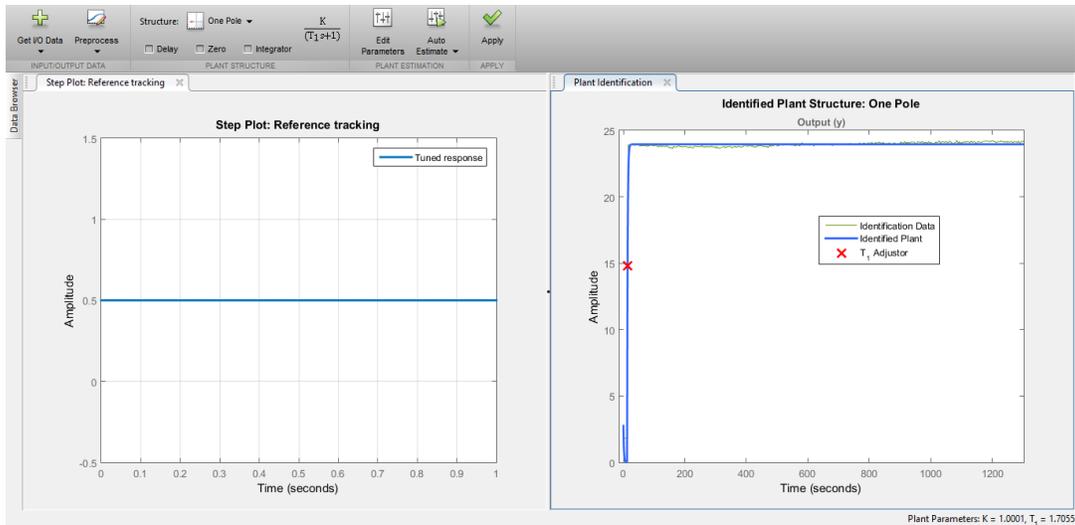


**Figura 25.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la entrada (con fuga).

**Fuente:** Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde el flujo de entrada, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.0004 \text{ y } T_1 = 1.5806$$

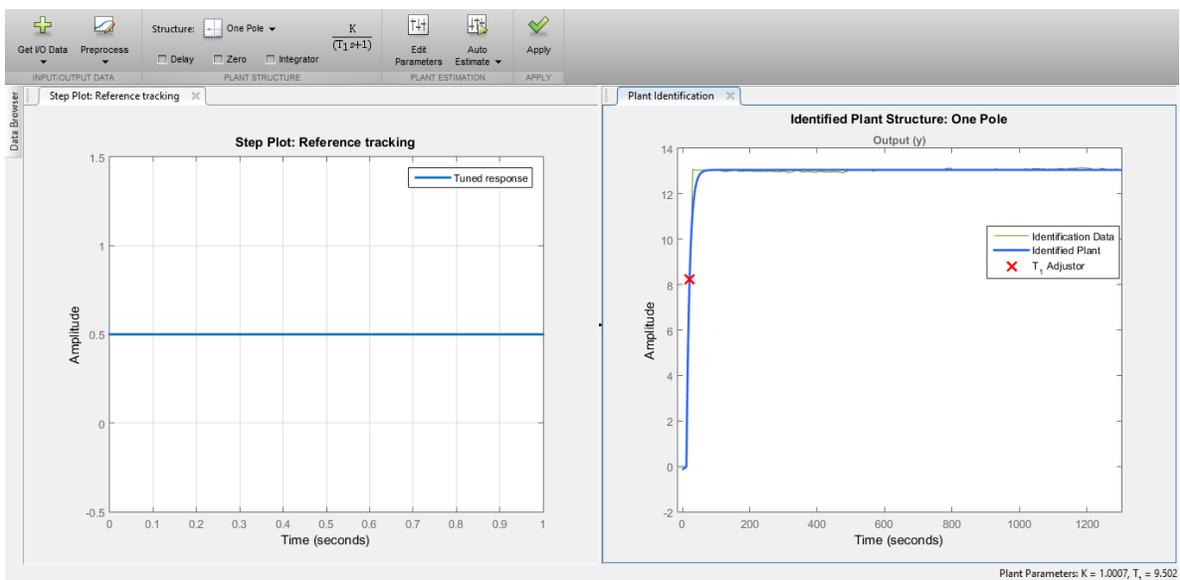


**Figura 26.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de flujo en la salida (con fuga).

**Fuente:** Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde el flujo de salida, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.0001 \text{ y } T_1 = 1.7055$$

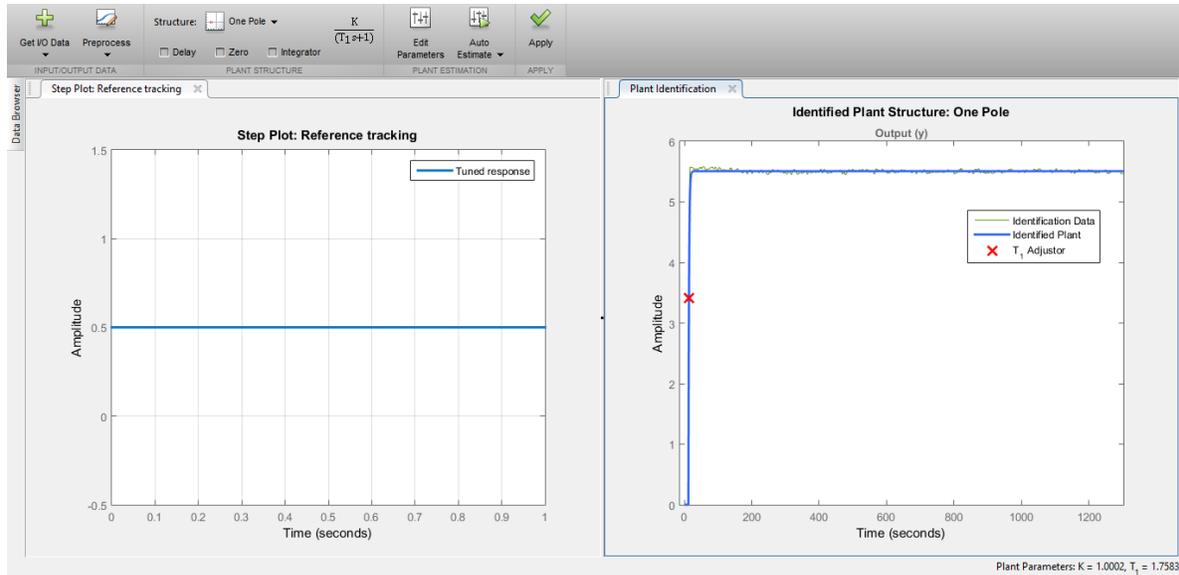


**Figura 27.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la entrada (con fuga).

**Fuente:** Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde la presión de entrada, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.0007 \quad y \quad T_1 = 9.502$$



**Figura 28.** Modelo dinámico del sistema visto desde el sensor de presión en la salida (con fuga).

**Fuente:** Autor del proyecto

Para el modelo de sistema visto desde la presión de salida, las variables de la función de transferencia son:

$$K = 1.0002 \quad y \quad T_1 = 1.7583$$

**4.2.4 Desarrollo del instrumento virtual por medio de LabVIEW.** Para el proyecto 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.

**4.2.4.1 Aspectos para el diseño de una interfaz usuario.** La interfaz usuario debe ser diseñada con los operadores objetivos en mente, no debe ser diseñada exclusivamente para cumplir los requisitos funcionales, sino que también debe ser fácil de usar y debe permitir al operador, seleccionar los ajustes que son variables como ejemplo: tiempo y número de datos a censar.

El diseño de este parámetro debe facilitar el trabajo del operador mostrando completamente el sistema en una pantalla. (*Marrugo Carreazo, 2012*)

Las tres reglas para el diseño de interfaces de usuarios son:

- ✓ Pensar en el usuario final.
- ✓ Evitar el “exceso” de innovación.
- ✓ Menos es más.

#### 4.2.4.2 Pantalla de bienvenida.

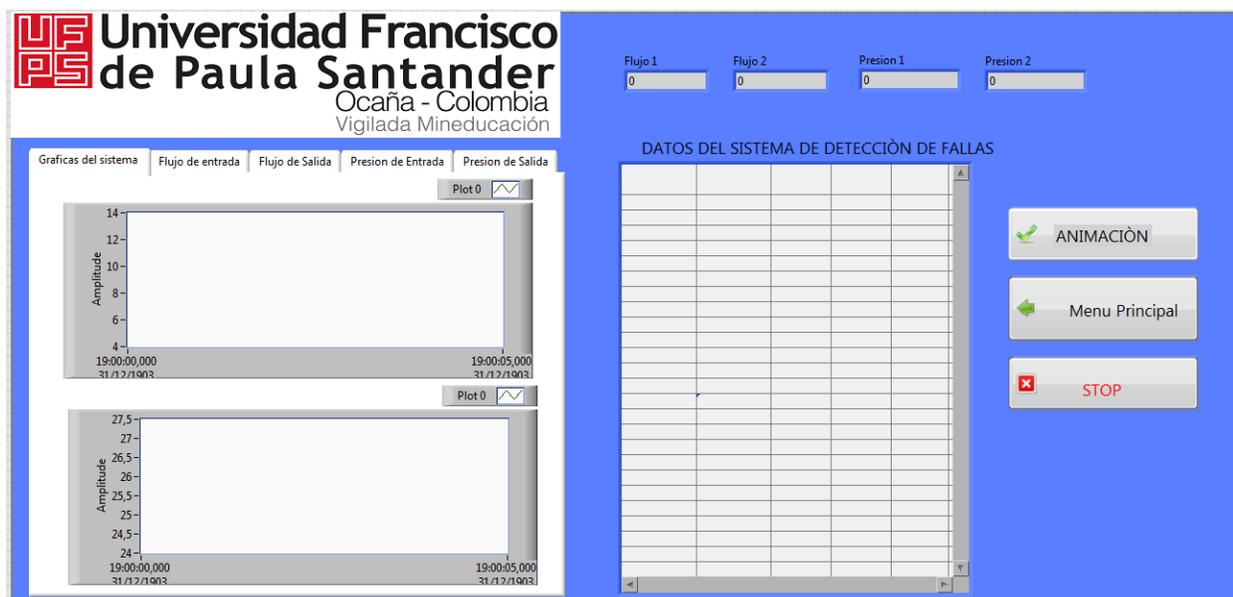


**Figura 29.** Pantalla de bienvenida del instrumento virtual.

**Fuente:** Autor del proyecto

La figura 29 muestra la pantalla de bienvenida. Una pantalla de presentación que contiene toda la información de la aplicación fue pensada para este instrumento, en donde se incluyó el nombre de la aplicación, logotipos, y un esquemático del diseño del experimento del banco de tuberías.

#### 4.2.4.3 Pantalla de Adquisición y análisis de datos

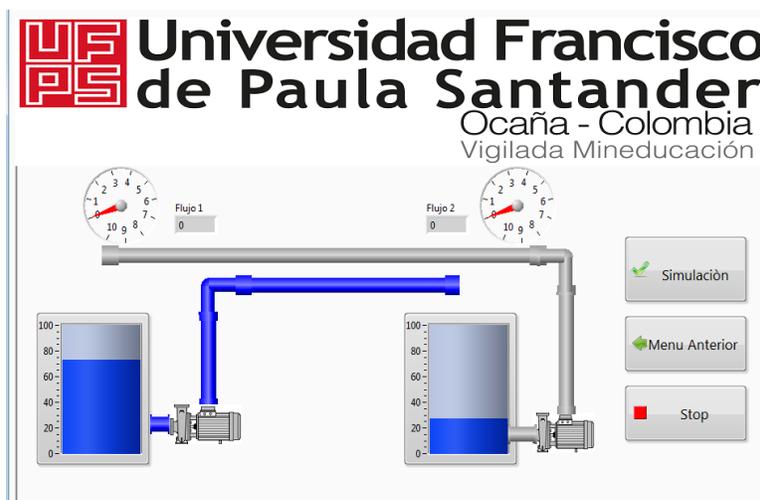


**Figura 30.** Pantalla de adquisición y análisis de datos.

**Fuente:** Autor del proyecto

En esta pantalla se muestran las gráficas del flujo de entrada, el flujo de salida, la presión de entrada, la presión de salida, se puede visualizar independientemente cómo se comporta cada señal y se visualiza en una tabla los datos tomados del sistema. En esta misma pantalla cuando las diferencias de caudales y de presión se bajan del límite inferior establecido en el algoritmo de detección de fugas, se visualiza un mensaje que dice “se ha detectado una fuga”

#### 4.2.4.4 Pantalla de Animación

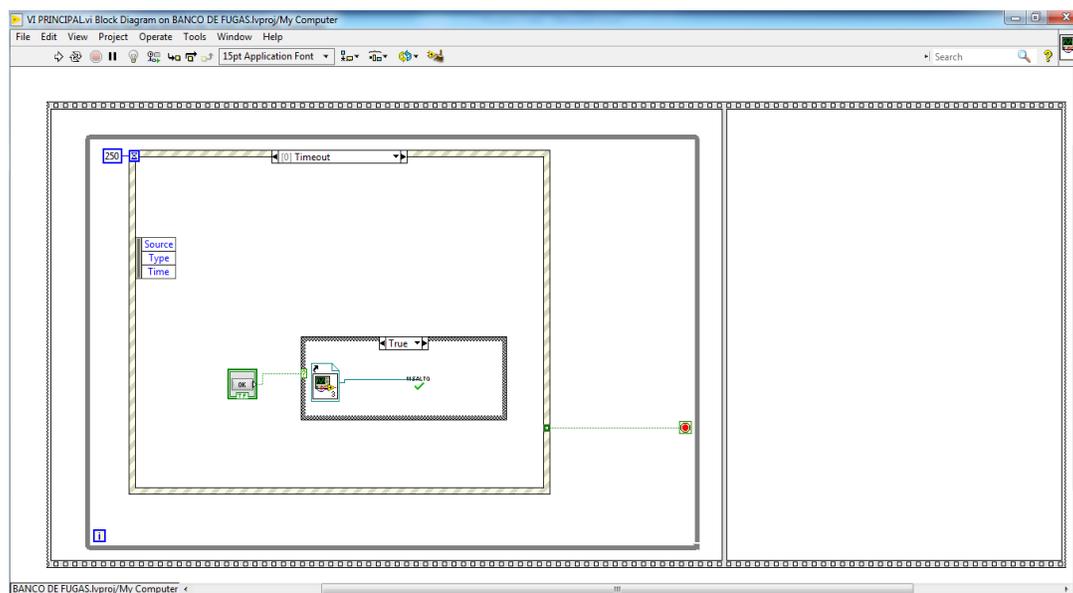


**Figura 31.** Pantalla de Animación.

**Fuente:** Autor del proyecto

En esta pantalla realiza la animación de un sistema esquemático del banco experimental de pruebas de tuberías y toma las presiones y flujos de la pantalla de adquisición y análisis de datos.

#### 4.2.4.5 Diagrama de bloques de la pantalla de bienvenida

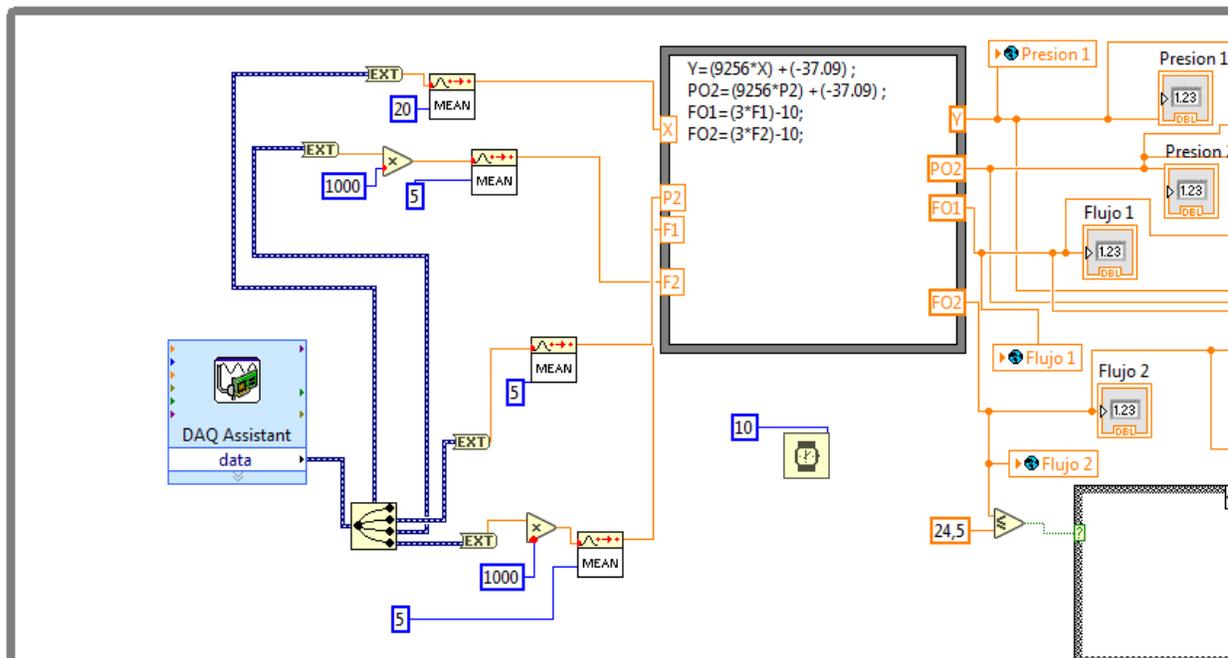


**Figura 32.** Diagrama de bloques de la pantalla de bienvenida.

**Fuente:** Autor del proyecto

Este diagrama contiene una estructura eventos donde se selecciona el menú para pasar a la pantalla de adquisición y análisis de datos, también contiene un SubVI, cuya función es permitir un salto de una pantalla a otra.

#### 4.2.4.6 Diagrama de bloques de la pantalla de Adquisición y análisis de datos

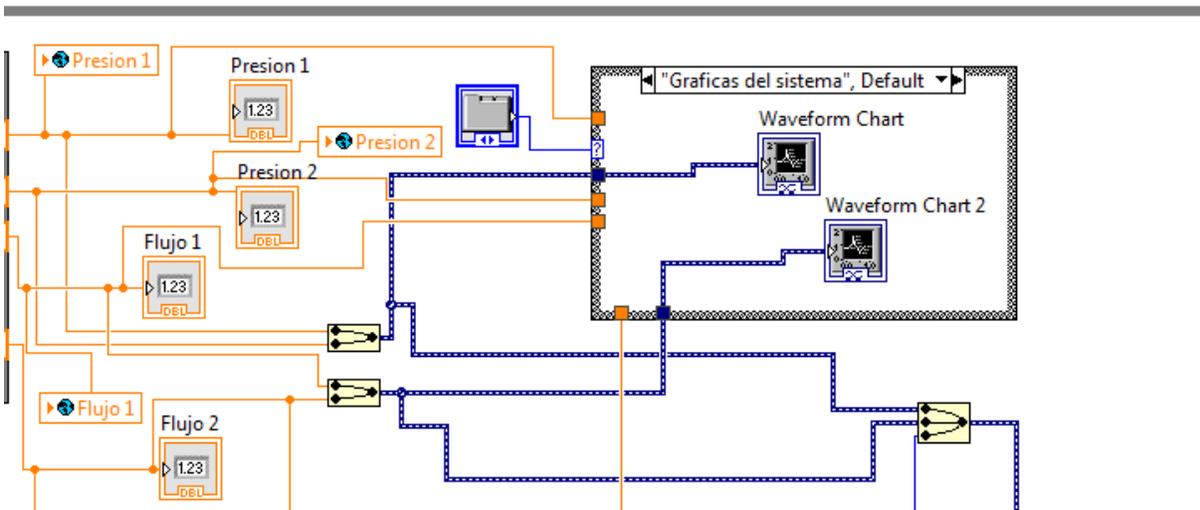


**Figura 33.** Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (1 parte).

**Fuente:** Autor del proyecto

Esta parte del diagrama de bloques muestra la programación de la adquisición de datos, configurando el DAQ asistente para leer los primeros 4 canales análogos de la tarjeta NI 9203, adquiriendo las señales del flujo de entrada, el flujo de entrada el flujo de salida, la presión de entrada y la presión de salida.

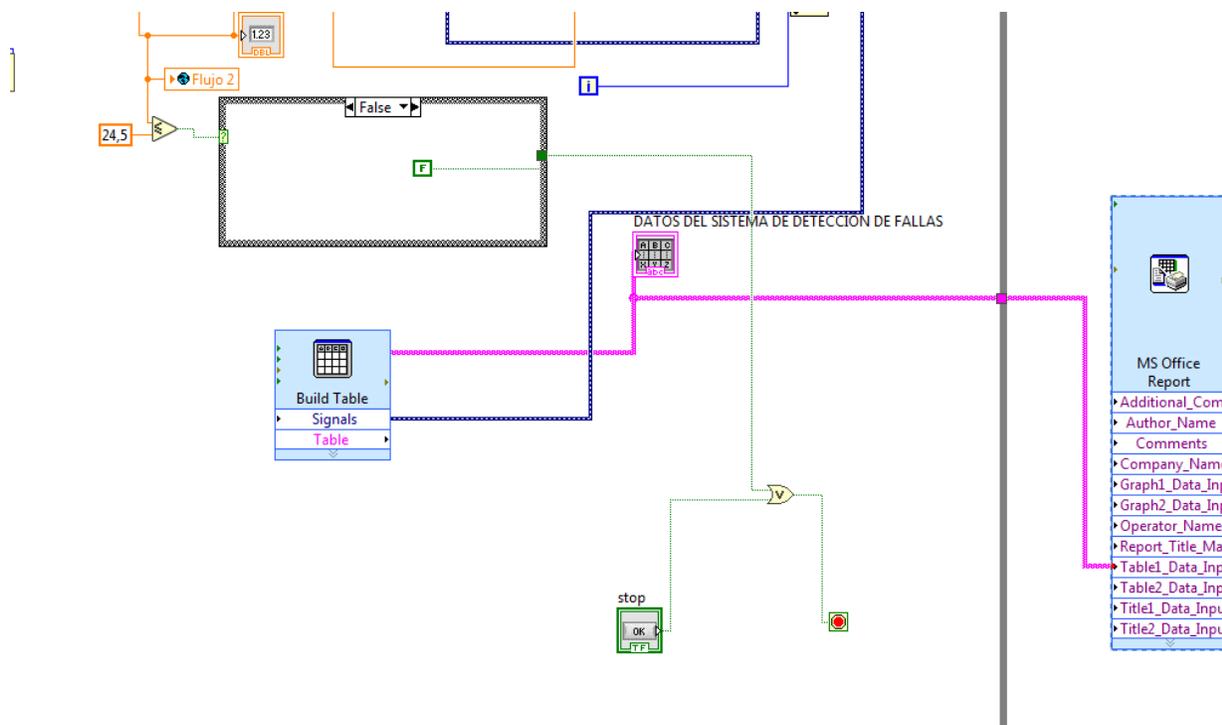
Contiene una formula NODE la cual convierte las señales de entrada que están en miliamperios a señales de flujo (L/min) y presión (Psi).



**Figura 34.** Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (2 parte).

**Fuente:** Autor del proyecto

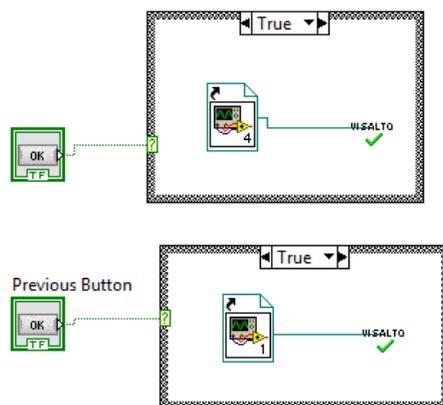
La figura 34 muestra una estructura CASE la cual permite visualizar las gráficas de flujo tanto de entrada como de salida y permite visualizar cada gráfica independientemente.



**Figura 35.** Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (3 parte).

**Fuente:** Autor del proyecto

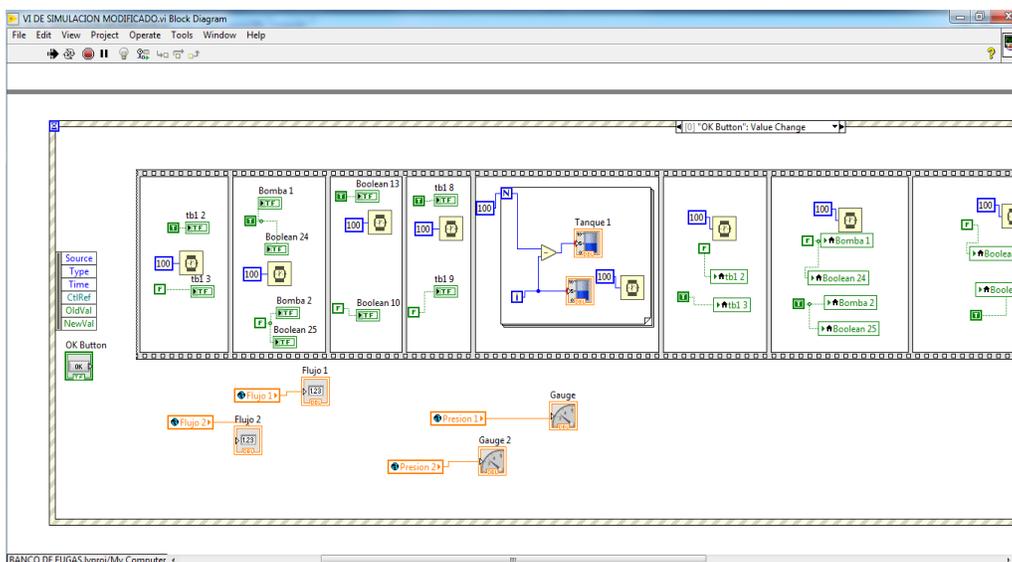
Esta figura contiene la programación de la detección de la fuga por medio de una estructura CASE y por diferencias de señales de los sensores de flujo. Además puede guardar los datos en un documento Excel y en una tabla.



**Figura 36.** Diagrama de bloques de la pantalla de adquisición y análisis de datos (4 parte).  
**Fuente:** Autor del proyecto

En esta figura se muestra una estructura CASE y el SubVI de salto para devolver a la pantalla inicial y a la pantalla de animación.

#### 4.2.4.7 Diagrama de bloques de la pantalla de animación



**Figura 37.** Diagrama de bloques de la pantalla de animación.  
**Fuente:** Autor del proyecto

La figura 37 contiene una estructura FLAT SEQUENCE donde realiza la animación del flujo de agua a través de la tubería y el llenado y vaciado de los tanques. Contiene variables globales que permiten tomar los datos en tiempo real de flujo y presión del sistema de adquisición de datos.

### **4.3 Validar el sistema para la detección automática de fugas teniendo en cuenta el modelo desarrollado.**

**4.3.1 Metodología experimental para verificar el desempeño del algoritmo para la detección de fugas.** El propósito de esta metodología es generar de forma experimental una base de datos que permita llevar a cabo las siguientes funciones:

- Identificar el instante donde ocurre la fuga
- Identificar el tiempo donde se vuelve estable la señal de flujo en el sistema hidráulico
- Verificar si cuando una caída de flujo es muy pequeña puede ocurrir un fallo en la detección debido a la oscilación de la señal de flujo.

Para desarrollar el sistema de detección de fugas se empleó un banco de tuberías experimental.

#### **Características para establecer la fuga**

- La intensidad de la fuga debe ser suficiente para detectar cambios en flujo y presión.

- Puede permanecer constante durante largos periodos de tiempo o puede durar periodos de tiempo tan corto como periodos de hora.

Para el desarrollo del algoritmo que llevara a cabo la detección de la fuga se observó en la recopilación bibliográfica las siguientes situaciones:

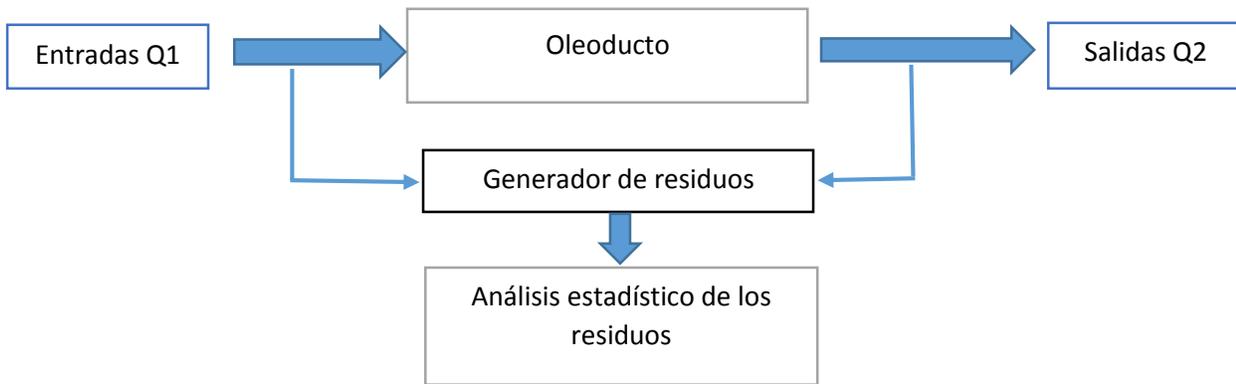
- Obtener un índice bajo de falsas alarmas
- Incorporar una alerta de fuga que determine el momento en el cual existió una caída en la señal flujo, que se registra en forma continua mediante 2 sensores de flujo colocados en la tubería.
- Debe contar con algún elemento que le permita al sistema auto ajustarse de forma automática a la señal de presión y flujo del sistema ya sea antes o después de la fuga.

Se va detectar la fuga por medio de balance de masa mediante un generador de residuos.

El principio de conservación de masa dice que el caudal de entrada a una tubería es igual al caudal de salida. Es decir que su diferencia es 0 como se muestra en la ecuación 3.

$$Q_{in} - Q_{out} = 0 \quad \text{ecuacion 3}$$

Para encontrar el flujo de una posible fuga mediante el balance de masa, debemos encontrar el desequilibrio que ocasiona la fuga es decir un flujo no compensado, para encontrarlo se requiere un generador de residuos como se muestra en la figura 38.



**Figura 38.** Generador de residuos.

**Fuente:** Autor del proyecto

De la ecuación 4 se puede concluir  $\Delta Q_n$  en estado estable sin fugas, sería igual al promedio de flujo de envío antes de la fuga menos el promedio de observaciones del flujo de salida.

$$Q_1 - Q_2 > \Delta Q_n \quad \text{ecuacion 4}$$

**Criterios para establecer la fuga.** Para establecer los límites que la señal de flujo puede oscilar sin considerarse como una característica de la presencia de una fuga se deben establecer varios parámetros.

- Se registra la señal de caudal por medio de un sensor de flujo y un sistema de adquisición de datos durante un periodo de tiempo con el fin de obtener el valor de flujo medio utilizando la ecuación 5.

$$\bar{Q} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \quad \text{ecuacion 5}$$

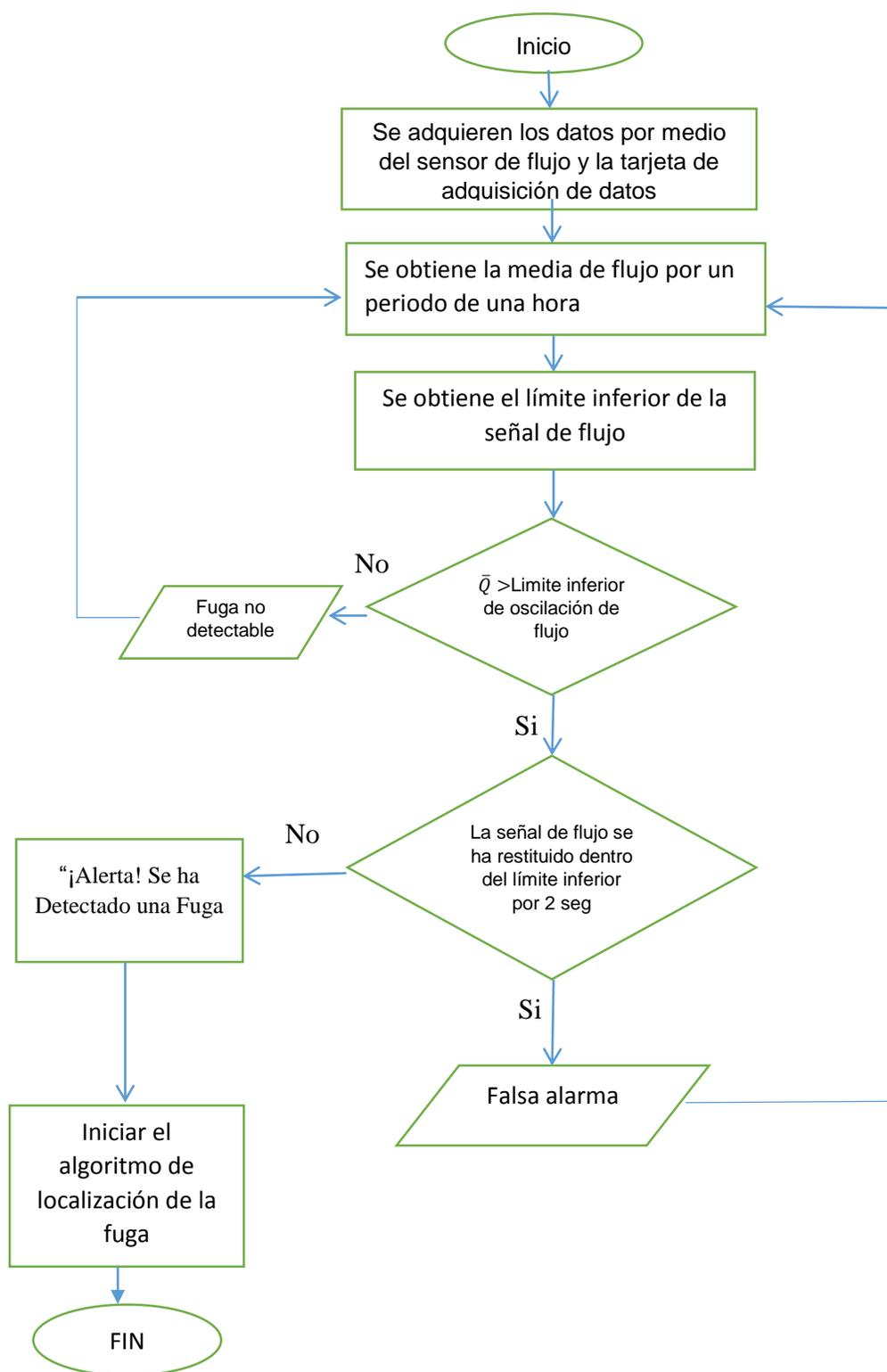
- Se establece la desviación estándar la cual indicara la dispersión permisible en la señal de flujo, para la cual una variación en el valor promedio de la señal de flujo no se declararía como una fuga, como se muestra en la ecuación 6.

$$\sigma_{q^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \text{ ecuacion 6}$$

- Luego se determina el valor límite inferior de la señal de flujo como se muestra en la ecuación 7. Lo cual es punto de partida para determinar la existencia de una fuga. Si el valor de caudal está por debajo del límite inferior establecido por la desviación estándar será declarado como posible fuga.

$$\bar{Q} - \sigma_q = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i \text{ ecuacion 7}$$

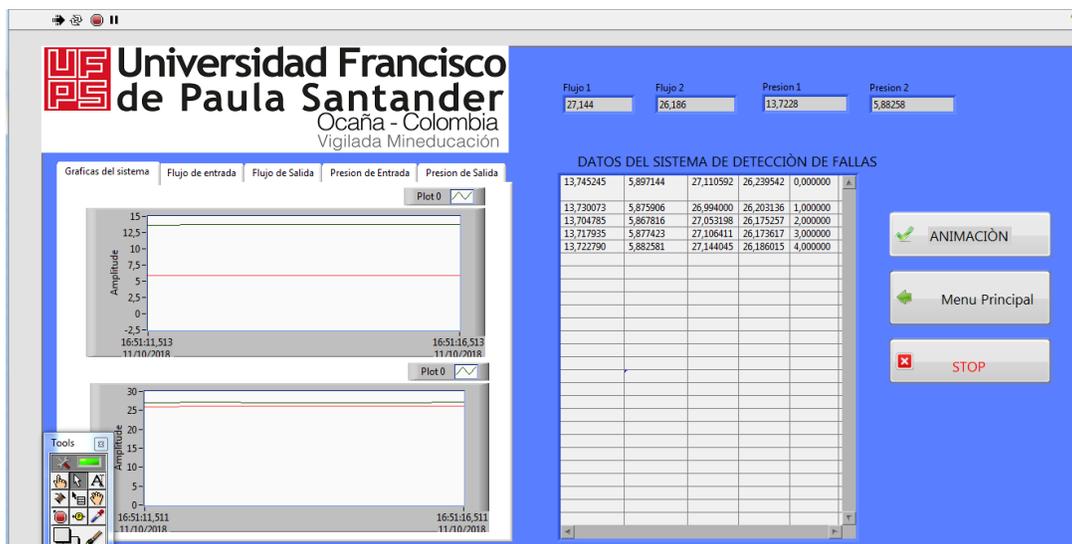
- Para dar por hecho la existencia de la fuga se establece que si la caída de flujo se prolonga por un determinado periodo de tiempo, es decir no se establece la señal, se puede asegurar la existencia de la fuga.



**Figura 39.** Algoritmo para detección de la fuga.

**Fuente:** Autor del proyecto

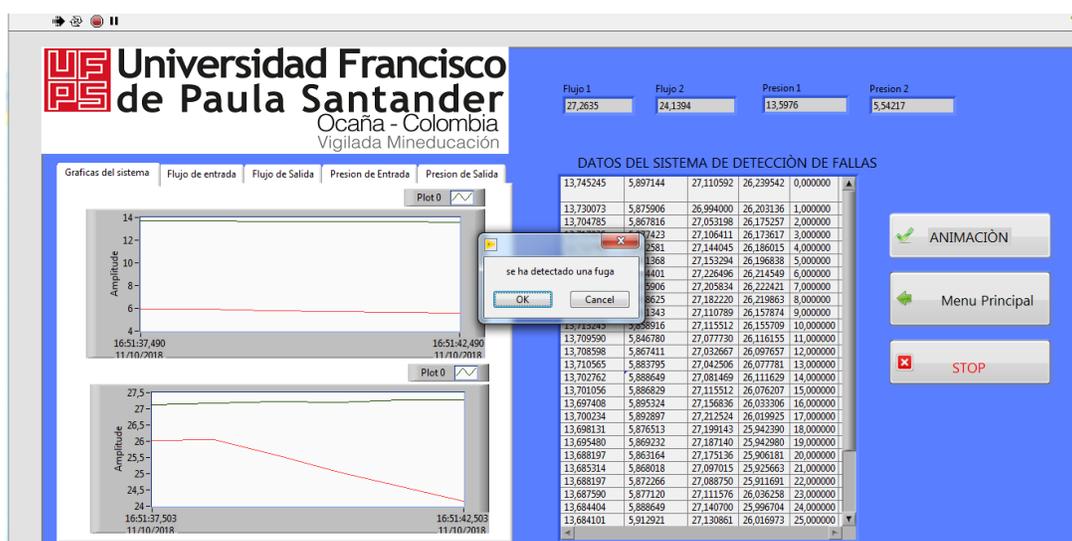
### 4.3.2 Implementación del instrumento virtual para validar y evaluar el comportamiento del sistema.



**Figura 40.** Interfaz gráfica del VI de detección de fugas.

**Fuente:** Autor del proyecto

En esta figura se permite visualizar la interfaz gráfica del VI cuando este está en funcionamiento, permitiendo observar de manera directa los datos obtenidos en tiempo real de los sensores de presión y de caudal tanto de la entrada como de la salida.



**Figura 41.** Interfaz gráfica del VI de detección de fugas (instante en que se detecta la fuga)

**Fuente:** Autor del proyecto

La figura 41 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 a dicho problema.

**4.3.3 Desarrollo y sometimiento de evaluación del proyecto de grado.** Esta actividad está relacionada con los jurados del proyecto de grado.

## CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta la información obtenida, que tenía por objetivo el desarrollo de un sistema para detectar fugas automáticamente, se seleccionaron tanto el sistema como los sensores más idóneos, cumpliendo con los requerimientos de funcionamiento establecidos.

El sistema de adquisición de datos seleccionado es completamente apto para recolectar la información establecida por los sensores, permitiendo el buen desarrollo del proyecto.

Se logró concluir la construcción del banco de pruebas de tuberías, logrando obtener los resultados esperados en su puesta en funcionamiento.

Se hallaron presiones a la entrada alrededor de 13.2 psi y a la salida de 6 psi y flujos a la entrada y a la salida de 27 L/min aproximadamente que marcaban el funcionamiento del banco con ausencia de fugas, sin embargo al presentarse una fuga, el sistema permitía reconocer el alza en la presión y la reducción de flujo, obteniendo datos de hasta 24 L/min aproximadamente a la salida.

El uso de este sistema de adquisición de datos permite detectar una fuga en tiempo real, garantizando su presencia y corrección de manera inmediata, teniendo en cuenta que a través de ello se puede reducir la problemática que surge detrás de una fuga.

Este proyecto permite ser el pilar de futuras ideas o pensamientos que involucren la detección y corrección de fugas en conductos a nivel industrial.

## REFERENCIAS

Arifin, B., Li, Z., Shah, S. L., Meyer, G. A., & Colin, A. (2018). A novel data-driven leak detection and localization algorithm using the Kantorovich distance, In Computers & Chemical Engineering, Volume 108. Canada: ISSN 0098-1354.

BIZKAIKO FORU , A. (s.f.). *PLIEGO DE PRESCRIPCIONES, TECNICAS PARTICULARES.*

Obtenido de [http://www.santurtzi.net/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/perfil2014/2014\\_Obras%20de%20acondicionamiento%20del%20vial%20interi15/129.pdf](http://www.santurtzi.net/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/perfil2014/2014_Obras%20de%20acondicionamiento%20del%20vial%20interi15/129.pdf)

Calderon, J. (2012). *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 (Tesis de Maestría).* Monterrey.

Estuelectronic. (06 de Agosto de 2012). *¿Que es y para que sirve Labview?* Obtenido de <https://estuelectronic.wordpress.com/2012/08/06/que-es-y-para-que-sirve-labview/>

FLUKE. (s.f.). *Cámara termográfica Industrial o Comercial Fluke Ti27.* Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de <http://www.fluke.com/Fluke/mxes/Termograf%C3%ADa/Fluke-Ti27.htm?PID=72281>

FUGASCUENCA. (s.f.). *Localización de fugas de agua por correlación.* Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de <http://www.fugascuenca.com/medios.html>

FUJITECOM INC. (2010). *Cómo trabajar el Noise Correlator LC-2500.* Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de <http://www.fujitecom.com/howto/LC2500.html>

- Guoxi, H., Yongtu , L., Yansong , L., Mengyu, W., Liying , S., Cheng , X., & Feng, L. (2017). A method for simulating the entire leaking process and calculating the liquid leakage volume of a damaged pressurized pipeline, In *Journal of Hazardous Materials*, Volume 332. ISSN 0304-3894.
- Kurtz, D. W. (2006). *Developments in a free-swimming acoustic leak detection system for water transmission pipelines*. USA.
- La Opinión. (24 de Marzo de 2016). *En Cúcuta se pierde un 56 % de agua que entra al acueducto*. Recuperado el 06 de Octubre de 2018, de <https://www.laopinion.com.co/cucuta/en-cucuta-se-pierde-un-56-de-agua-que-entra-al-acueducto-108974>
- Lazaro Villa, J. (2018). *Matlab: Fundamentos y/o Aplicaciones. Tema 5: Simulink*. Barcelona. Obtenido de [https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51427/2011/1/54513/tema\\_5\\_simulink-5156.pdf](https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51427/2011/1/54513/tema_5_simulink-5156.pdf)
- Marrugo Carreazo, D. E. (2012). *DESARROLLO DE INSTRUMENTO VIRTUAL ENFOCADO EN LA ADQUISICIÓN DE DATOS PARA GENERAR PERFILES DE TEMPERATURA EN HORNOS*. (Tesis de Pregrado). Ocaña.
- MathWorks. (2018). *MATLAB*. Obtenido de <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- Morefield, S., & Carlyle, J. (2008). *Acoustic Leak Survey of the Underground Potable Water System at a CONUS Army Installation*. EE UU: *Advanced Materials Research*, Vol. 38.
- NATIONAL INSTRUMENTS. (2018). Obtenido de ¿Qué es LabVIEW?: <http://www.ni.com/es-co/shop/labview.html>

NATIONAL INSTRUMENTS. (2018). *Chasis NI cDAQ-9178 y Módulo NI 9203*. Obtenido de <http://www.ni.com/es-co.html>

Pawel Ostapkowicz. (2016). Leak detection in liquid transmission pipelines using simplified pressure analysis techniques employing a minimum of standard and non-standard measuring devices, In *Engineering Structures*, Volume 113. ISSN 0141-0296.

PROMATERIALES. (s.f.). *Tuberías de Materiales Plásticos*. Obtenido de la evolución de los materiales:

[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Hidraulica/Diapositivas/TuberiasMaterialesPlasticos\\_ProMateriales.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Hidraulica/Diapositivas/TuberiasMaterialesPlasticos_ProMateriales.pdf)

Rojas, Pedro. (2017). *Desarrollo de un sistema para detección de fugas para tuberías horizontales en tiempo real por medio de gradientes de presión. (Tesis de Doctorado)*. Ciudad de México.

SEWERIN. (s.f.). *AQUAPHON A 100*. Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de [https://www.sewerin.com/cms/fileadmin/redakteure/Prospekte/pro\\_aquaphon\\_a100\\_es.pdf](https://www.sewerin.com/cms/fileadmin/redakteure/Prospekte/pro_aquaphon_a100_es.pdf)

SEWERIN. (s.f.). *Variotec 460*. Recuperado el 12 de JUNIO de 2018, de <http://www.sewerin.co.uk/products/water-leak-location/variotec-460>

Shantanu, D., & Shibayan, S. (2016). A review on different pipeline fault detection methods, In *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Volume 41. ISSN 0950-4230.

SIAPA. (Febrero de 2014). *CRITERIOS Y LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA FACTIBILIDADES*. Obtenido de *Sistemas de Agua Potable.*:

[http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo\\_2.\\_sistemas\\_de\\_agua\\_potable-1a.\\_parte.pdf](http://www.siapa.gob.mx/sites/default/files/capitulo_2._sistemas_de_agua_potable-1a._parte.pdf)

Zhang et al. (2015). Una nueva técnica híbrida para detección de fugas y ubicación en tuberías rectas. *Process Ind.*

## APÉNDICE

### Apéndice A: Sensor PG2454

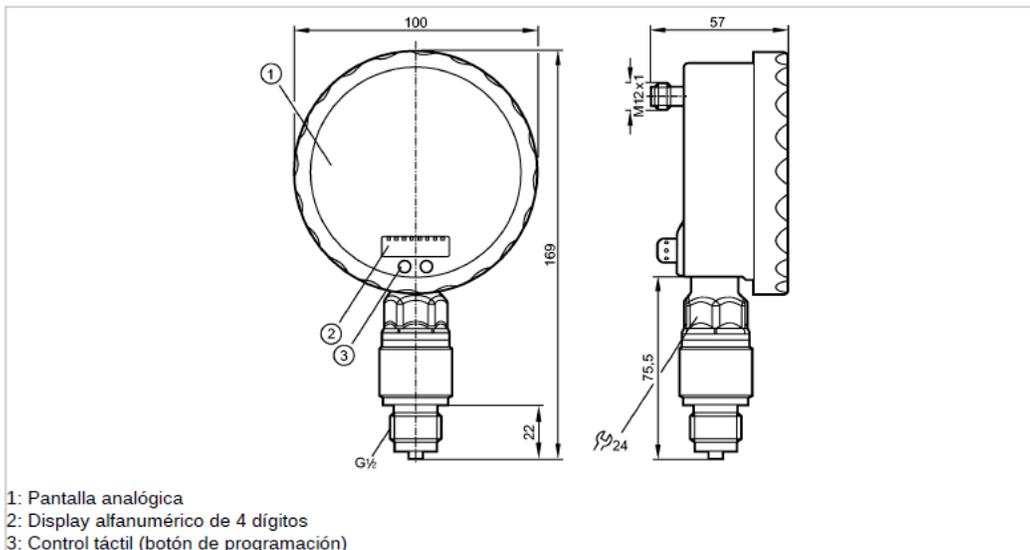
**efectoreso**



**PG2454**

PG-010-REB12-MFRKG/US/ /P

Sensores de presión



- 1: Pantalla analógica  
 2: Display alfanumérico de 4 dígitos  
 3: Control táctil (botón de programación)



#### Características del producto

Sensor electrónico de presión  
 con visualización analógica

Conexión por conector

Pantalla analógica giratoria 0...350°

Resolución del 0,25%

Aguja no visible cuando el equipo no tiene corriente

Sicherheitsmanometer (S) in Anlehnung an DIN EN 837-1

Conexión de proceso: G 1/2 A

2 salidas

OUT1 = salida de conmutación

OUT2 = salida analógica

Pantalla analógica, display alfanumérico de 4 dígitos

Rango de medición: -1...10 bar / -14,4...145 psi

#### Aplicación

Aplicación	Tipo de presión: presión relativa Fluidos líquidos y gaseosos	
Resistencia a la presión	50 bar	725 psi
Presión de rotura mín.	150 bar	2175 psi
PTMA (en las aplicaciones según el NRC)	38 bar	551 psi
Temperatura del fluido [°C]	-25...80	

#### Datos eléctricos

Alimentación	DC PNP/NPN
Tensión de alimentación [V]	18...32 DC
Consumo [mA]	< 70 (24 V)
Resistencia de aislamiento [MΩ]	> 100 (500 V DC)
Clase de protección	III



## PG2454

PG-010-REB12-MFRKG/US/ /P

Sensores de presión

Protección contra inversiones de polaridad	sí	
<b>Salidas</b>		
Salida	2 salidas OUT1 = salida de conmutación OUT2 = salida analógica	
Función de salida	1 x NA / NC programable + 1 x analógica (4...20 / 20...4 mA, graduada)	
Corriente de salida [mA]	250	
Caída de tensión [V]	< 2	
Protección contra cortocircuitos	pulsada	
Resistente a sobrecargas	sí	
Frecuencia de conmutación [Hz]	75	
Salida analógica	I: 4...20 mA (Ineg: 20...4 mA)	
Carga máx. [Ω]	I / Ineg: max. (Ub - 10 V) x 50	
<b>Rango de configuración / medición</b>		
Rango de medición	-1...10 bar	-14,4...145 psi
<b>Margen de ajuste</b>		
Punto de consigna alto, SP	-0,96...16,00 bar	-14,0...232,0 psi
Punto de consigna bajo, rP	-1,00...15,96 bar	-14,4...231,6 psi
Punto inicial analógico, ASP	-1,00...13,50 bar	-14,4...195,8 psi
Punto final analógico AEP	1,50...16,00 bar	21,8...232,0 psi
en intervalos de	0,02 bar	0,2 psi
<b>Precisión / diferencias</b>		
Precisión / diferencias (en % del margen) Turn down 1:1		
Exactitud del punto de conmutación	< ± 0,5	
Exactitud señal analógica *)	< ± 0,25 (BFSL) / < ± 0,5 (LS)	
Histéresis	< ± 0,25	
Repetibilidad **)	< ± 0,1	
Estabilidad a largo plazo ***)	< ± 0,1	
Coeficientes de temperatura (CT) en el rango de temperatura 0...70° C (en % del margen por cada 10 K)		
CT más alto del punto cero	< ± 0,2	
CT más alto del margen	< ± 0,2	
<b>Tiempos de reacción</b>		
Retardo a la disponibilidad [s]	6	
Tiempo de respuesta mínimo de la salida de conmutación [ms]	9	
Amortiguamiento para la salida de conmutación (dAP) [s]	0,01...30	
Amortiguamiento para la salida analógica (dAA) [s]	0,01...30	
Tiempo de respuesta de la salida analógica frente a una variación brusca [ms]	28	
Perro guardián integrado	sí	
<b>Condiciones ambientales</b>		
Temperatura ambiente [°C]	-20...80	
Temperatura de almacenamiento [°C]	-40...100	

## Apéndice B: Sensor SBG434

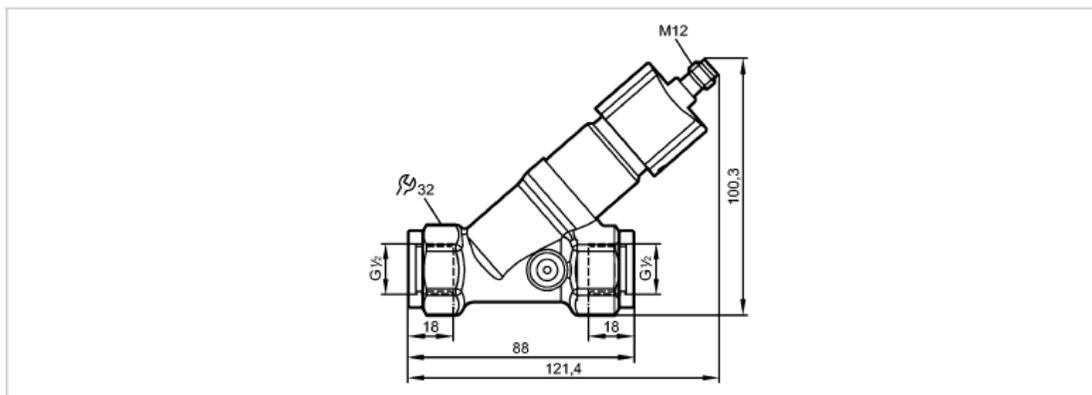
**efector300**



**SBG434**

SBG12HF010KG/US

Sensores de caudal



### Características del producto

Transmisor de caudal	
con válvula de retención	
Conexión de proceso: G 1/2	
Salida analógica	
Rango de medición: 2...50 l/min	

### Aplicación

Aplicación	Fluidos líquidos (agua, soluciones de glicol, aceites, refrigerantes)
Resistencia a la presión [bar]	40
Temperatura del fluido [°C]	-10...100

### Datos eléctricos

Alimentación	DC
Tensión de alimentación [V]	18...32 DC; según MBTS/MBTP
Consumo [mA]	< 35
Clase de protección	III
Protección contra inversiones de polaridad	sí

### Salidas

Función de salida	analógica
Protección contra cortocircuitos	sí
Resistente a sobrecargas	sí
Salida analógica	4...20 mA
Carga máx. [Ω]	500

### Rango de configuración / medición

Rango de medición [l/min]	2...50
---------------------------	--------

### Precisión / diferencias

Repetibilidad [% del valor final]	1
Exactitud [% del valor final]	± 5

## Apéndice C. Cotizaciones de los sensores.



pagina 1/3

<b>Ciudad y Fecha:</b>	Bucaramanga, 03 de Octubre de 2018	<b>Cotización N°.</b>	RTH-156-18
<b>Cliente:</b>	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA	<b>Atención:</b>	DIEGO CONTRERAS
<b>Tele-Fax:</b>	316 641 1161	<b>E-mail:</b>	<a href="mailto:dacontrerasn@ufpso.edu.co">dacontrerasn@ufpso.edu.co</a>
<b>Dirección:</b>		<b>NIT. o C.C.:</b>	

Estimado cliente, agradeciendo su solicitud estamos enviando la oferta de los siguientes equipos:

Item	Descripción	DISPO	Cant	Valor Unitario	Valor Total
1	SITRANS FST020 básico . enchufable, IP65 (NEMA 4X) . Un canal . con pantalla y E/S fuente de alimentación 100 - 240 VAC sensor de medida: A2 universal Con juego de perfiles de fijación para diámetro del tubo hasta 127 mm (5"). campo de aplicación: para diámetros de tubo de 12,7 mm (0,5") hasta 50,8 mm (2") Temperatura: -40 °C a +121 °C. Cable de sensor: camisa de PVC, resistente a la inmersión, longitud 5 metros (16,4 pies) UL, ULc, CE	8 a 10 semanas	1	\$16.822.866	\$16.822.866

<b>SUB-TOTAL</b>	\$16.822.866
<b>I.V.A</b>	\$3.196.345
<b>Fletes</b>	
<b>TOTAL</b>	\$20.019.211



Ciudad y Fecha:	Bucaramanga 03 julio 2018	Cotización N°.	MGM-006-18
Cliente:	July Andrea Gómez Camperos	Atención:	
Tele-Fax:		E-mail:	<a href="mailto:jagomezc@ufpso.edu.co">jagomezc@ufpso.edu.co</a>
Dirección:	Vía Acolsure, Sede Algodonal Universidad Francisco de Paula Santander	NIT. o C.C.:	52 954 669

Estimado cliente, agradeciendo su solicitud estamos enviando la oferta de los siguientes equipos:

Item	Descripción	DISPO	Cant	Valor Unitario	Valor Total
1	SM6100: Sensor de caudal magneto-inductivo, marca Ifm, tensión de alimentación 24V DC.PNP/NPN, 4 hilos, temperatura -10... 70°C, Rango de medición 0,10...25,00 l/min,Grado de protección IP 67.	3 a 4 semanas	2	\$ 2.172.685	\$ 4.345.370
2	SBG434: Transmisor de caudal mecatronico, marca Ifm, tensión de alimentación 24 V DC 3 hilos, temperatura -10...100°C, rango de medición 2 a 50 l/min, grado de protección IP 65 / IP 67	3 a 4 semanas	2	\$ 906.099	\$ 1.812.197
3	Electrobomba periferica de 1/2 hp, modelo PKM60, tensión de alimentación 110V(monofasica) succión y descarga de 1"	2 a 3 dias salvo venta previa	1	\$ 255.000	\$ 255.000
4	6SL3210-5BB13-7UV1: Variador de velocidad, marca siemens, sinamios V20, potencia de 0,5 HP tensión de alimentación de 220V AC.	2 a 3 dias salvo venta previa	1	\$ 399.168	\$ 399.168
5	PG2454: sensor de presión electrónico, con visualización analógica, marca Ifm, tensión de alimentación 24V DC, rango de medición -1...10 bar -14.4...145 psi, temperatura del fluido -25...80 °C grado de protección IP 67 / IP 69K.	3 a 4 semanas	2	\$ 1.564.896	\$ 3.129.792
				<b>SUB-TOTAL</b>	<b>\$ 9.941.527</b>
				<b>I.V.A</b>	<b>\$ 1.888.890</b>
				<b>Fletes</b>	<b>contra entrega</b>
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 11.830.417</b>



pagina 1/3

Ciudad y Fecha:	Bucaramanga, 11 de Octubre de 2018	Cotización N°.	RTH-159-18
Cliente:	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA	Atención:	DIEGO CONTRERAS
Tele-Fax:	316 641 1161	E-mail:	<a href="mailto:dacontrerasn@ufpso.edu.co">dacontrerasn@ufpso.edu.co</a>
Dirección:		NIT. o C.C.:	

Estimado cliente, agradeciendo su solicitud estamos enviando la oferta de los siguientes equipos:

Item	Descripción	DISPO	Cant	Valor Unitario	Valor Total
1	Transmisor para presión relativa o nivel en tanque abierto, Smart, modelo SITRANS P, serie DS III/P410, con manejo local mediante teclado y LCD incluidos de forma estándar y a distancia mediante protocolo HART. Alimentación: 10,5 a 45 V.c.c. (10,5 a 30 V.c.c en la ejecución EEx ia). Conexión: A 2 hilos. Señal de salida: 4 a 20 mA. Precisión de medida: Mejor de 0,1 % incluidas la histeresis y la repetibilidad (precisión mejor de 0,07 % bajo demanda). Funciones especiales: Incluidas (autodiagnóstico, señal de salida forzada, retenida, programada, (*) Relleno de la célula de medida: Aceite de silicona. Limpieza de la célula: Normal. Alcance de medida mínimo/máximo: 0,04 / 4 bar. Límite de sobrecarga: 10 bar. Material de la membrana y del cuerpo del sensor: Acero inoxidable. Rosca interior 1/2 14 NPT Material de la carcasa: Fundición de aluminio. Ejecución estándar. Sin protección antiexplosión. Entrada de cables: Rosca 1/2 NPT-H. Con indicador digital y tapa con minilla. SITRANS P410 mayor precisión de medida 0,04 %	8 a 9 semanas	1	\$2.732.238	\$2.732.238

SUB-TOTAL	\$2.732.238
I.V.A	\$519.125
Fletes	
TOTAL	\$3.251.363



**ELECTRICAS BOGOTA LTDA.**  
**MUEVE LAS INDUSTRIAS**

**NIT: 860 511 571-7**  
Gran contribuyente regimen común  
Actividad económica No. 4659  
Tarifa ICA 11.04/1000



CL 16 12 54 - 56 TEL. 3444888 FAX 3183740

Empresa: UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

NIT:

Contacto: DIEGO CONTRERAS

Departamento: COMPRAS

Tel:

Fax:

VFO-16 No:

0539-18

Ciudad:

OCAÑA

Fecha:

20/06/2018

Email: [dacontrerasn@ufps.edu.co](mailto:dacontrerasn@ufps.edu.co)

CANTIDAD	REF. EBL	FACTORY	DESCRIPCION	MARCA	PRECIO	TOTAL
1	92009	PT2188-10 Bar-1/4NPT-4-20mA	Transmisor de Presión Industrial, Rango 10 Bar / 145,03 PSL Precisión 0,5 % F.S, Salida 4-20 mA. 2-Hilos, Alimentación 24VDC, Conexión 1/4" NPT, Con conector Industrial. Material del cuerpo: SS 304, Grado de Seguridad: IP65. ORIGEN: CHINA.	EBCHQ	321,000	321,000
1	92015	PT2188-40 Bar-1/4NPT-4-20mA	Transmisor de Presión Industrial, Rango 40 Bar / 580,15 PSL Precisión 0,5 % F.S, Salida 4-20 mA. 2-Hilos, Alimentación 24VDC, Conexión 1/4" NPT, Con conector Industrial. Material del cuerpo: SS 304, Grado de Seguridad: IP65. ORIGEN: CHINA.	EBCHQ	321,000	321,000

SUB-TOTAL		\$ 642,000
FLETE		\$ 17,300
TOTAL		\$ 659,300
IVA	19%	\$ 125,267
TOTAL NETO		\$ 784,567

CONDICIONES COMERCIALES	
Entrega:	INMEDIATA SALVO VENTA PREVIA
Forma de Pago:	CONTADO ANTICIPADO
Validez de la Oferta:	8 DIAS
Observaciones:	FACTURACIÓN MÍNIMA \$ 100.000 NETOS MAS IVA - FLETES X CUENTA DEL COMPRADOR CONSIGNACIÓN EN EFECTIVO DESPACHO UN DÍA HÁBIL - CONSIGNACIÓN EN CHEQUE DESPACHO TRES DÍAS HÁBILES CTA CTE BANCOLOMBIA 053 511 571 03 CTA CTE BCO BTA 010 087 096 <b>FAVOR ANEXAR COPIA DEL RUT ACTUALIZADO PARA REGISTRO EN EL SISTEMA</b>

Cualquier información adicional la atenderemos con mucho gusto, solicítela a nuestro correo electrónico [ventas1@electricasbogota.com](mailto:ventas1@electricasbogota.com)

Cordialmente,

JESSICA LONDOÑO  
Asesor Comercial

CARLOS DE LA ROSA  
Asesor Técnico: 3174333261

## Apéndice D. Evidencias fotográficas



