

SUBSECRETARÍA DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN
SUPERIOR TECNOLÓGICA
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

**“Diseño de un sistema de instrumentación
y supervisión para un sistema piloto
(Benchmark) de detección de fugas en
redes hidráulicas”**

RESIDENTE: RUIZ GÓMEZ SERGIO ALBERTO

INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ASESOR INTERNO: Dr. Héctor Ricardo Hernández de León

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS A ENERO 2017

Índice general

1. ANTECEDENTES	7
1.1. Antecedentes	7
1.2. Justificación	7
1.3. Objetivos	9
1.3.1. Objetivo General	9
1.3.2. Objetivos específicos	9
1.4. Característica del área	9
1.4.1. Misión del ITTG	10
1.4.2. Visión	10
1.4.3. Laboratorio de Control y Automatización	11
2. PROBLEMA A RESOLVER	14
2.1. El problema de las fugas	14
2.2. Clasificación de las fugas	14
2.2.1. Fugas superficiales	14
2.2.2. Fugas de fondo	15
2.2.3. Fugas de fisura	15
2.2.4. Fugas de picadura	15
2.2.5. Fugas por rotura	15
2.3. Causas de las fugas	16
2.4. Relación de la presión y las fugas	17
2.5. La presión y el abastecimiento	18
2.6. Estadísticas de fugas y/o roturas de tubería como indicador de necesidad de rehabilitación	18
2.7. Alcances y limitaciones	18

3. FUNDAMENTO TEÓRICO	20
3.1. Comportamiento de un fluido cuando viaja dentro de una tubería y cuando se presentan eventos no deseados, en este caso, una falla	20
3.1.1. Principales propiedades de los fluidos	21
3.1.1.1. Viscosidad	21
3.1.1.2. Esfuerzo cortante	21
3.1.2. Flujo en tuberías. Tipo de flujo con respecto al tiempo y con respecto al comportamiento	23
3.1.2.1. 1. Flujo permanente.	23
3.1.2.2. 2. Flujo no permanente.	23
3.1.2.3. 3. Flujo transitorio.	23
3.1.2.4. Flujo Laminar.	23
3.1.2.5. Flujo Turbulento.	24
3.1.3. Pérdidas de carga	24
3.1.4. Pérdidas de carga por fricción	24
3.1.5. Rugosidad	25
3.1.5.1. Rugosidad absoluta	25
3.1.6. Rugosidad relativa	26
3.1.7. Pérdidas de Carga Locales	26
3.1.7.1. Depósito a una tubería	26
3.2. Presión	26
3.2.1. Medición de la presión	27
3.2.2. Paradoja de Pascal	28
3.2.3. Manómetros	29
4. MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS	30
4.1. Investigación acerca de algunos métodos con fundamento científico para detección de fugas y localización de fallas en una red de tuberías	30
4.1.1. Modelación numérica de fugas y consumo en redes de agua potable (Tzatchkov e Izurieta 1996)	30
4.1.2. EPANET	32
4.1.3. KYPipe	34
4.1.4. SCADRED	36
4.1.5. Modelo matemático del sistema. Ecuaciones que describen el flujo y presión de fluidos	36

5. SISTEMA DISEÑADO PARA DIAGNOSTICAR E IDENTIFICAR FALLAS DE UN SISTEMA DE TUBERÍAS MEDIANTE OBSERVADORES DE ESTADO	38
5.1. Diseño del sistema de tuberías y sus características- Implementación del sistema de diagnóstico de fallas en el Benchmark.	38
5.1.1. Descripción y características de la tubería diseñada.	40
5.1.2. Ubicación de sensores	41
5.1.3. <i>Construcción de fugas</i>	43
5.1.4. El sensor virtual utilizado para observar sucesos en el sistema de tuberías. Características	44
5.1.5. Sensores utilizados en la red hidráulica. Sensor de flujo.	48
5.1.6. Configuración del sensor	51
5.1.7. <i>Factor K</i>	53
5.1.8. <i>Sensor de Presión YOKOGAWA EJA530A DPSharp</i>	54
5.2. Características del software utilizado. El LABVIEW	57
5.3. Elaboración de la interfaz gráfica	60
5.3.1. Diseño de la interfaz final	65
5.3.2. Implementación de función a señal	68
5.4. Detección de fugas en el sistema de tuberías.	71
5.5. Resultados:	72
5.5.1. Experimento #1 “Gráficas al accionar una válvula”	73
5.5.2. Experimento #2 “Gráficas al accionar dos válvulas”	73
5.5.3. Experimento #3 “Gráficas al accionar tres válvulas”	74
5.5.4. Experimento #4 “Gráficas al accionar cuatro válvulas”	76
5.5.5. Experimento #5 “Gráficas al accionar cinco válvulas”	77
6. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES	78
6.1. Conclusiones	78
6.2. Fuentes de información	79
6.2.1. Referencias	79
6.2.2. Bibliografía	79

Índice de cuadros

3.1. Unidades del SI para cantidades comunes manejadas en mecánica de fluidos	21
5.1. Valores indicados para cada sensor	47
5.2. Especificaciones/Características electrónicas del Signet 2537 Caudalímetro de rueda de paleta. <i>Paddlewheel Flow Sensor</i>	49
5.3. Sensor de presión Yokogawa modelo EJA350A	55
5.4. Ejemplo de montura del sensor	55
5.5. Válvula manual para activar o desactivar la lectura del sensor	56
5.6. Conexión del sensor Yokogawa	56
5.7. Características electrónicas del sensor Yokogawa	56
5.8. Requerimientos del NI USB-6008	58
5.9. Características del NI USB-6008	59
5.10. Conexiones de nuestra interfaz gráfica	61
5.11. Compensación de señal	70
5.12. Datos sin fugas	72

INTRODUCCIÓN

Este documento contiene la información relacionada con el diseño de un sistema de instrumentación y supervisión para un sistema piloto (Benchmark) de detección de fugas en redes hidráulicas, trabajo que desempeñé en mi Residencia profesional durante los meses comprendidos entre agosto y diciembre de 2016 en el Laboratorio de Control y Automatización del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

En el Capítulo Uno, *Antecedentes*, se explica que este proyecto es una innovación en el ITTG, sin embargo, es un trabajo que ya se ha estado desarrollando en otros países y en el caso de México, específicamente en la UNAM. Incluye este capítulo la justificación de nuestro proyecto, donde se explica la importancia de trabajar para controlar la presión del agua como fluido en tuberías y disminuir las fugas. Se exponen también los objetivos propuestos para alcanzarlos con el proyecto.

Asimismo, se anotan las características del área específica del ITTG donde desarrollé mi residencia profesional.

En el Capítulo Dos, *Problema a resolver*, se expone la relación existente entre la presión y el problema de las fugas, se explica que, aunque las fugas de agua en tuberías pueden tener múltiples causas, es la relación presión-fugas la que explica mayormente el problema y donde se tiene que trabajar más para resolverlo. Además, en este capítulo se hace mención de los alcances que tiene este proyecto para nuestra formación como ingenieros y las limitaciones que debemos observar para mejorar nuestro desempeño en el trabajo.

En el Capítulo Tres, *Fundamento teórico*, se describe la operación de una red de tuberías y las partes que integran los sistemas hidráulicos que conducen el agua potable en las localidades, el comportamiento de un fluido cuando viaja dentro de una tubería o sistema hidráulico y cuando se presentan eventos no deseados como las fugas. Asimismo, se hace una explicación de la presión y algunas formas existentes para medirla.

En el Capítulo Cuatro, *Métodos de detección de fugas*, se presenta una investigación acerca de algunos métodos de detección de fugas en sistemas de tuberías, con la finalidad de conocer avances que se han tenido en otras partes para resolver este problema. Se exponen el método llamado Modelación numérica de fugas y consumo en redes de agua potable, relacionado con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA); el método denominado EPANET, de la EPA (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés) del gobierno de los Estados Unidos; el método llamado KYPipe desarrollado como motor de análisis hidráulico por profesores de Ingeniería Civil de la Universidad de Kentucky, y el método que se llama SCADRED también relacionado con el IMTA. También en este capítulo se incluye el modelo matemático del sistema, las ecuaciones que describen el flujo y la presión de fluidos.

En el Capítulo Cinco, *Sistema diseñado para diagnosticar e identificar fallas de un sistema de tuberías mediante observadores de estado*, se describe el diseño del sistema de tuberías y sus características y la implementación del sistema de diagnóstico de fallas en el Benchmark, el sensor virtual utilizado para observar sucesos en el sistema de tuberías, las características del software utilizado, el LABVIEW, la detección de fugas en el sistema de tuberías y los resultados.

En el Capítulo Seis, se presentan la *Conclusión y las recomendaciones*, además de las competencias que como alumnos del ITTG desarrollamos en este proyecto.

Finalmente, se encuentran las *referencias* en las que me apoyé para redactar el presente reporte, *bibliografía* mencionada por los autores consultados y *referencias electrónicas* donde se obtuvo también información, además de los índices de figuras y tablas.

Capítulo 1

ANTECEDENTES

1.1. Antecedentes

A nivel internacional existe una preocupación por la conservación de los recursos, como el agua, y se ha decidido buscar en la tecnología una posibilidad para salvarla (BBC, 2016).

Se ha creado incluso un sistema llamado FDI (Fault Detection and Isolation) Detección de fallas y su Aislamiento, donde se procura detectar, aislar y diagnosticar el mal desempeño de sensores, actuadores, controladores, componentes de proceso o elementos de transmisión, y realizar las acciones necesarias para que estas anomalías afecten lo menos posible la operación del proceso (Cipriano, Aldo, 2006).

En nuestro país, existe el Laboratorio de Hidrodinámica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, donde se tiene plantas piloto, con redes experimentales de tuberías, con bombas y sensores de flujo y presión y computadoras para el procesamiento de datos, seguramente con un gran número de experimentos y resultados.

En nuestro Estado, el proyecto de *diseño de un sistema de instrumentación y supervisión para un sistema piloto (Benchmark) de detección de fugas en redes hidráulicas* es una innovación y una posibilidad de aplicar y probar conocimientos de los estudiantes del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG) en problemas que se presentan en la vida cotidiana, específicamente en el diseño y operación del servicio de transportación de agua potable, que fue el caso que atendimos.

1.2. Justificación

El planteamiento del proyecto diseño de un sistema de instrumentación y supervisión para un sistema piloto (Benchmark) de detección de fugas en redes hidráulicas está relacionado con la falta de un procedimiento tecnológico en nuestro estado, que apoye con información sistematizada a los

sistemas encargados de trasladar el agua desde un punto de origen hacia múltiples puntos que la necesitan para actividades industriales o domésticas.

Las redes hidráulicas son bastante complejas y cada vez crece más su complejidad y de esa misma manera sus problemas de operación. No es posible operar una red en este tiempo, con las prácticas tradicionales. Por ejemplo, es imposible que los pocos empleados de los sistemas puedan tener en corto tiempo la localización de fugas de agua, con las supervisiones que hacen de manera visual y manual, por ello las decisiones tardan en tomarse, es fácil observar el desperdicio de agua por varios días en diversos lugares.

Según la Gerencia de Estudios y Proyectos de la Comisión Nacional del Agua (2002), Un indicador fundamental de un sistema de agua potable es el número de tomas registradas, del que se deriva un índice que puede calcularse como la relación entre el número de tomas y el de empleados. De ésta, se obtuvo un índice de 5.4 empleados por cada 1000 tomas en una muestra de cinco empresas latinoamericanas visitadas por consultores del Banco Mundial, en contraparte, se detectaron índices de 2.2, 2.9 y 2.0 en compañías europeas, estadounidenses y canadienses, respectivamente.

Una posible respuesta a este problema es el desarrollo de proyectos tecnológicos como el que creó el ITTG, un sistema piloto con el que se puede supervisar, aunque sea de manera inicial, un sistema complejo de tuberías, no se trata de sustituir la supervisión humana, sino de complementarla para que las pérdidas de agua sean en menor cantidad.

El sistema piloto significaría un Benchmark, es decir, una referencia o nivel con el cual puede medirse la eficiencia de los sistemas que pidieran ser apoyados con sistemas basados en la tecnología de sensores de presión y flujo.

El proyecto también se justifica por la necesidad de que los estudiantes del ITTG tengamos posibilidades de resolver problemas reales aplicando los conocimientos adquiridos, en mi caso, aplicar los conocimientos de Ingeniería Electrónica.

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) dice que se deben proponer metodologías que permitan diagnosticar o evaluar el estado que guarda la tubería de una red de distribución y con base en ellas aplicar modelos de decisión, sobre temas relacionados con el deterioro de tubería, por ejemplo; estimación del tiempo óptimo de trabajo de una tubería, esperanza de vida útil de la tubería, número esperado de fallas de tubería en el tiempo, tasa media de fallas, modelos económicos de decisión que ayuden a elegir; entre no hacer nada, reemplazar o rehabilitar (G. Tzatchkov, Velitchko, Alcocer Yamanaka, Víctor H. Bourguett Ortiz, Víctor J., Arreguín Cortés, Felipe I., 2014).

De acuerdo con Visairo Cruz, Nancy, (2004), la demanda de detección y monitoreo automático de fallas en las redes hidráulicas, ha aumentado por la complejidad y extensión de esas redes. Dice que una falla, o fuga en este caso, se refiere a una anomalía que provoca el mal funcionamiento de la red, lo cual puede causar la caída parcial o completa de ésta con consecuencias que van

desde pérdidas económicas, hasta catástrofes ecológicas o accidentes de grandes dimensiones. Por lo tanto, la meta de los esquemas de detección y aislamiento de fallas, conocido como FDI por sus siglas en inglés (Fault Detection and Isolation), es la localización e identificación de fallas de manera automática del sistema.

Por su parte, el IMTA dice que deben obtenerse datos técnicos en que se debe apoyar la toma de decisiones para renovar o rehabilitar la tubería. Estos datos técnicos conformarían el historial de fugas y roturas de una tubería. El historial de fugas es el factor que en mayor medida condiciona la decisión de renovar o rehabilitar.

Es aproximadamente en este sentido que se desarrolló nuestro Proyecto de Residencia profesional.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Instrumentar y diseñar un sistema de supervisión en LABVIEW para un sistema hidráulico piloto de detección de fugas, de 60 m de largo.

1.3.2. Objetivos específicos

Desarrollar un sistema óptimo de adquisición, análisis y diagnóstico de datos de un sistema de distribución de agua potable, al igual que la detección (ubicación de la fuga) en base a sensores de flujo.

1.4. Característica del área

El desarrollo de este proyecto se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez (ITTG).



Figura 1.1: Ubicación del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

Trabajamos específicamente en el Laboratorio de Control y Automatización ubicado en el edificio Z del mismo instituto, asimismo dentro de un espacio dependiente del edificio I, ubicado detrás de este último edificio.

1.4.1. Misión del ITTG

El ITTG establece como misión “*Formar de manera integral profesionistas de excelencia en el campo de la ciencia y la tecnología con actitud emprendedora, respeto al medio ambiente y apego a los valores éticos*”.

1.4.2. Visión

Tiene como visión “*Ser una institución de excelencia en la educación superior tecnológica del sureste, comprometida con el desarrollo socioeconómico sustentable de la región*”.



Figura 1.2: Aspecto de la entrada al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez

1.4.3. Laboratorio de Control y Automatización

El Laboratorio de Control y Automatización es un espacio donde alumnos de carreras de Ingeniería Electrónica realizan actividades con el fin de desarrollar, mejorar y aplicar nuevas tecnologías a favor del desarrollo tecnológico.

Dentro de este laboratorio se llevó a cabo la construcción de los circuitos utilizados para el funcionamiento de los sensores. Se tomó la decisión de construirlos aquí debido a que en este laboratorio se cuenta con los elementos necesarios para su elaboración, tales como fuentes de poder, generadores de señal y cautín entre otros elementos. De igual manera cuenta con Impresora 3D, osciloscopios y drones (realizados por alumnos de la misma carrera).



Figura 1.3: Entrada al Laboratorio de Control y Automatización



Figura 1.4: Aspecto del interior del Laboratorio de Control y Automatización

El espacio dependiente del edificio I (Ubicado detrás del edificio I)

La construcción del sistema de tuberías se llevó a cabo en un espacio dependiente del edificio I, ubicado precisamente detrás de este edificio I del ITTG. Se tomó la decisión de construir el sistema en esta área, debido a que se necesitaba un lugar con un amplio espacio. Otras razones por las que se tomó esta decisión están referidas a que este espacio estaría ocupado solamente por los que llevamos a cabo este proyecto y por alumnos que realizaban otro trabajo, además de que por

razones de seguridad y el carácter delicado y costoso de los materiales que se usaron, se instalaron cámaras de seguridad para evitar cualquier incidente.

Capítulo 2

PROBLEMA A RESOLVER

(Información basada en Ojeda Ramírez, Maricela, 2012, salvo cuando se indique otra referencia)

2.1. El problema de las fugas

Los sistemas de agua potable utilizan una forma de medir su eficiencia con la revisión de sus finanzas. Observan las cantidades de agua que proporcionan y las cantidades reales de agua que cobran. La fórmula de medición es sencilla: $A = C + P$, donde A es el abastecimiento, C , el consumo y P las pérdidas. Las pérdidas son inversiones que estos organismos no recuperan y por lo tanto reducen su eficiencia.

Las pérdidas se clasifican en pérdidas físicas como las fugas y tomas clandestinas, y las pérdidas comerciales conocidas como volumen no facturado o consumos no cobrados.

Las fugas son aberturas en cualquier punto de la red, de las que no se tiene control y con frecuencia se desconoce su ubicación y a veces su existencia. Estas representan aproximadamente el 95 % de las pérdidas totales, mientras que el resto de los factores (como las tomas clandestinas) representan tan sólo el 5 % del volumen no facturado.

2.2. Clasificación de las fugas

2.2.1. Fugas superficiales

Son las visibles, las que aparecen en la superficie a través de las grietas o por la humedad en el terreno. Estas pueden ser reportadas o no reportadas, por lo general las reportadas son de gran caudal. Las no reportadas, generalmente están en sitios de bajo tránsito o difícil acceso, su caudal

y duración dependen de los programas de control de fugas, son fugas que con el tiempo pueden crecer.

Estas fugas pueden localizarse mediante inspecciones visuales simples.

2.2.2. Fugas de fondo

Estas fugas no se manifiestan en la superficie, no se notan fácilmente porque los usuarios siguen recibiendo el servicio, por lo que no se percatan del desperdicio. El agua de estas fugas busca salida por el drenaje o por los terrenos, afectando cimentaciones y las bases de las estructuras de construcciones. Generalmente son de bajo caudal y larga duración.

Por otro lado, en las tuberías rígidas, ya sean de acero o pvc, se presentan 3 tipos de fallas fundamentalmente: fisura, picadura y rotura, que se explican enseguida:

2.2.3. Fugas de fisura

Las fisuras se clasifican en longitudinales, transversales y combinadas, de acuerdo al sentido de la fractura con respecto al tubo

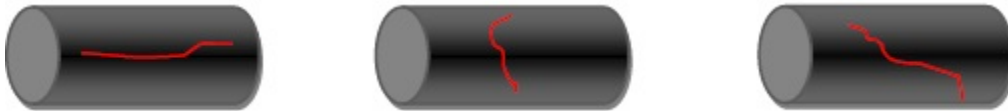


Figura 2.1: Fisuras en tuberías: longitudinales, transversales y combinadas

2.2.4. Fugas de picadura

Las picaduras son simplemente perforaciones en el tubo, causadas por corrosión del material o por un objeto duro que impacte al tubo



Figura 2.2: Fugas de picadura

2.2.5. Fugas por rotura

En el caso de las roturas, se consideran como el colapso de la tubería, ocurridas generalmente por fuerzas de tensión o torsión.

También existen las fallas en los accesorios de la tubería, como codos, tes, tuercas, uniones, válvulas, etcétera. En las uniones de las tuberías, las fallas pueden ser por desgaste de empaques, cristalización de la soldadura o algún elemento. Se considera que la falla total de una unión térmica es una rotura del tubo. Es común, además, las fallas en las partes mecánicas de las válvulas. En ocasiones ocurre la fatiga o desgaste del vástago, la tuerca bocina guía, el estopero o el empaque, que se ven en la figura siguiente.



Figura 2.3: Partes de una válvula y puntos de fallas

2.3. Causas de las fugas

Estas pueden ser las causas de las fugas:

1. Discontinuidad en el suministro, fatigan la tubería, provocan fisuras, picaduras y hasta el colapso, además, provocan las fallas en sus partes mecánicas

2. Longitud de las tuberías, el tener mayor cantidad de instalaciones aumenta la probabilidad de tener fugas en ellas
3. Número de conexiones de servicio
4. Inadecuado manejo de la presión
5. El material y edad de la tubería, aunque no es determinante porque muchas veces la tubería nueva presenta fallos
6. La corrosión. Ocurre en el exterior de la tubería, según el tipo de suelo y las condiciones de humedad, salitre y cargas eléctricas en que se encuentre; en el interior de la tubería, influye la calidad del agua
7. La calidad en las prácticas constructivas
8. La calidad del material de la tubería
9. El golpe de ariete, sucede cuando se instalan accesorios que cortan el flujo muy rápidamente (grifos de cierre automático, válvulas de bola, válvulas de aire simples) o por la presencia de aire en las tuberías. La para y arranque de bombas genera grandes golpes de ariete, por eso no son convenientes los tandeos o racionamientos del agua (Arnalich Castañeda, Santiago, 2008).

Sin hacer a un lado ninguna de las anteriores causas, todos los documentos que se consultaron coinciden en que es el efecto de las altas presiones el factor fundamental para que las fugas aparezcan.

2.4. Relación de la presión y las fugas

La presión y el gasto se relacionan de manera proporcional, el gasto que escapa por las fugas en la red también responde a este comportamiento.

El gasto o caudal es la cantidad de materia o masa de agua que atraviesa una tubería en cierta unidad de tiempo (Rodríguez Castro, Jesús Alberto, S/f).

Efecto en la reparación de fugas. Las experiencias de los sistemas de agua potable indican que al eliminar una fuga aumenta la presión de sistema, esto transmite el problema de la fuga reparada a otro punto. Por esto, es importante no atacar de manera aislada cada fuga, sino verificar que las condiciones de la red sean óptimas para liberar la presión que eventualmente aumentará al reparar una fuga.

Una posibilidad de controlar las presiones es la sectorización, un procedimiento que implica separar una red de distribución en secciones con una fuente de abastecimiento propia y de capacidad suficiente para cubrir la demanda, lo que permite controlar el comportamiento hidráulico por separado.

2.5. La presión y el abastecimiento

El IMTA dice que el abastecimiento debe garantizar en la toma domiciliaria del usuario, como mínimo, 15 metros de columna de agua (mca) como presión útil, además de 3.5 metros por cada planta hasta un máximo de 5 plantas. Esto significa que si, de acuerdo con plan de ordenación urbana de la ciudad, las alturas permitidas en una calle son cinco o más, la presión mínima exigida en hora punta será de 32.5 metros de columna de agua (G. Tzatchkov, Velitchko, et al., 2014).

2.6. Estadísticas de fugas y/o roturas de tubería como indicador de necesidad de rehabilitación

(Información basada en G. Tzatchkov, Velitchko, et al., (2014), salvo que se indique otra fuente)

El IMTA sugiere que deben obtenerse datos técnicos en que se debe apoyar la toma de decisiones para renovar o rehabilitar la tubería. Es el historial de fugas y roturas de una tubería el factor que en mayor medida condiciona la decisión de renovar o rehabilitar. Ello se analiza a través de tres indicadores básicos, los dos primeros complementarios entre sí:

1. El número de fallas/unidad de longitud/año que se generan.
2. Volumen de agua fugado por unidad de longitud y tiempo (generalmente m³/Km/hora)
3. El crecimiento anual de las fallas. Tasa de reparación por edad

2.7. Alcances y limitaciones

Alcances

- Es el primer diseño de una red hidráulica, al menos en el ITTG, lo que significa que con esta red se acerca a los estudiantes la posibilidad de aplicar los conocimientos teóricos obtenidos en diversas materias de las carreras que ofrece el Instituto.
- Ofrecer a localidades que presenten problemas relacionados con la distribución del agua potable esta posible solución.

- Oportunidad de trabajar interdisciplinariamente, entre las carreras ofrecidas por el ITTG.

Limitaciones

- A causa de ser un proyecto nuevo en el ITTG, no existían experiencias anteriores, en las cuales basarse para resolver problemas que se fueron presentando y ocasionando gastos de tiempo.
- Recurso económico, ya que será muy importante que se adquirieran más sensores para detectar con mejor precisión entre qué puntos se encuentra una fuga. Trabajamos con 2 pares de sensores, 2 de presión y 2 de flujo en una tubería de 60 metros, lo que dificulta saber con menos margen de error donde está una fuga. Sería importante disponer de 4 pares por lo menos, un par en la entrada de la tubería, otro en la salida y otros dos esparcidos en la tubería, con ellos se tendrían 4 lecturas y se podría saber con más aproximación el lugar de la fuga.

Capítulo 3

FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Comportamiento de un fluido cuando viaja dentro de una tubería y cuando se presentan eventos no deseados, en este caso, una falla

La Mecánica de fluidos es la ciencia que estudia las leyes del movimiento de los fluidos y sus procesos de interacción con los cuerpos sólidos. Esta ciencia establece que la característica fundamental de los fluidos es la fluidez (recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/37703849/Esfuerzo-cortante>).

Un fluido es cualquier sustancia que ofrece pequeña, o nula resistencia a las fuerzas tangenciales, o cortantes, que se le aplican. La capacidad de fluir hace que el fluido sea incapaz de soportar un esfuerzo cortante, lo que más adelante se explica. A las sustancias que presentan una resistencia muy pequeña o nula, a ser deformados se les conoce como fluidos newtonianos (fluidos en el que el gradiente de velocidad es directamente proporcional al esfuerzo cortante o de cizalladura, Diccionario de Física, 2008), son newtonianos el agua, el alcohol y los gases, por ejemplo. En cambio, las sustancias que presentan mayor resistencia se les llaman fluidos no newtonianos (en algunos de estos la viscosidad aumenta al aumentar el gradiente de velocidad, Diccionario de Física, 2008), son no newtonianos las pastas, las mulsiones y las suspensiones, por ejemplo. Como un fluido es completamente deformable, toma la forma del recipiente que lo contiene. El recipiente ejerce una fuerza sobre el fluido.

Un fluido cambia de forma de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste, es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse durante ningún intervalo de tiempo. Unos líquidos se moverán más lentamente que otros, pero ante un esfuerzo cortante se moverán siempre. La medida de la facilidad con que se mueve está

dada por la viscosidad (recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/37703849/Esfuerzo-cortante>).

Estas son las unidades del SI para cantidades comunes manejadas en mecánica de fluidos (Mott, 2006).

Cantidad	Unidades estándar del SI	Otras unidades manejadas con frecuencia
Longitud	Metro (m)	Milímetro (mm); kilómetro (km)
Tiempo	Segundo (s)	Hora (h) minuto (min)
Masa	Kilogramo (kg)	$N \cdot s^2/m$
Fuerza o presión	Newton (N)	$kg \cdot m/s^2$
Presión	N/m^2 o pascal (Pa)	Kilopascales (kPa); bar
Energía	$N \cdot m$ o Joule (J)	$kg \cdot m^2/s^2$
Potencia	$N \cdot m/s$ o J/s	Watt (W), kW
Volumen	M^3	Litro (L)
Área	M^2	mm^2
Flujo volumétrico	M^3/s	L/s; L/min; m^3/h
Flujo en peso	N/s	kNs; kN/min
Flujo másico	Kg/s	kNs; kN/min
Peso específico	N/m^3	$Kg/m^2 \cdot s^2$
Densidad	Kg/m^3	$N \cdot s^2/m^4$

Cuadro 3.1: Unidades del SI para cantidades comunes manejadas en mecánica de fluidos

3.1.1. Principales propiedades de los fluidos

3.1.1.1. Viscosidad

La viscosidad es la oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Un fluido que no tiene viscosidad se llama fluido ideal, en realidad todos los fluidos conocidos presentan algo de viscosidad Viscosidad dinámica (μ). Es la propiedad de un fluido que determina su resistencia al esfuerzo cortante.(Rodríguez Castro, Jesús Alberto, S/f)

3.1.1.2. Esfuerzo cortante

Un esfuerzo es una fuerza distribuida sobre un área. Cuando esta fuerza es paralela al área se le llama esfuerzo cortante (δ).

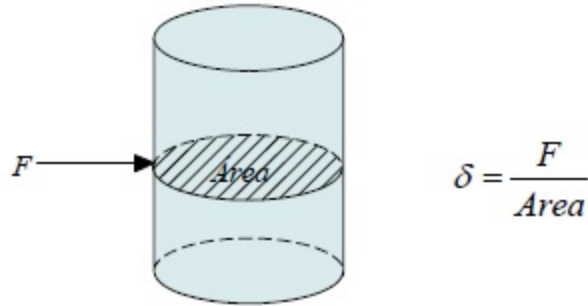


Figura 3.1: Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante es la fuerza por unidad de superficie requerida para mantener una velocidad constante de movimiento de un fluido.

La siguiente figura ilustra el concepto de cambio de velocidad en un fluido con el esquema de una capa delgada de fluido entre dos superficies, una de las cuales es estacionaria, en tanto que la otra está en movimiento. Una condición fundamental, cuando un fluido real está en contacto con una superficie de frontera, es que el fluido tenga la misma velocidad que ésta. Entonces, en la siguiente figura, la parte del fluido en contacto con la superficie inferior tiene una velocidad igual a cero, y aquélla en contacto con la superficie superior tiene una velocidad v . Si la distancia entre las dos superficies es pequeña, entonces la tasa de cambio de la velocidad con posición y es lineal. Es decir, varía en forma lineal (Mott, 2006).

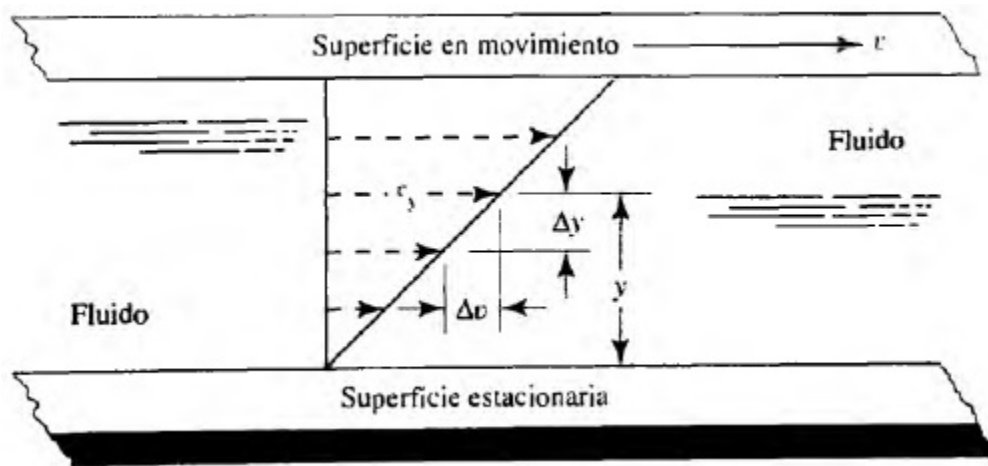


Figura 3.2: Cambio de velocidad en un fluido

3.1.2. Flujo en tuberías. Tipo de flujo con respecto al tiempo y con respecto al comportamiento

Tipo de flujo con respecto al tiempo (A la variación temporal del flujo)

3.1.2.1. 1. Flujo permanente.

Se presenta cuando las características de velocidad y presión del flujo permanecen constantes en el tiempo. Por ejemplo, el flujo en una tubería conectada a un tanque de carga constante. (Rodríguez Castro, Jesús Alberto, S/f)

3.1.2.2. 2. Flujo no permanente.

Ocurre cuando las condiciones de flujo cambian continuamente en el tiempo, como es el caso del vaciado de recipientes a través de un orificio, donde el nivel del líquido desciende continuamente hasta llegar al fondo y como consecuencia la velocidad y el gasto disminuyen hasta llegar a cero. (Rodríguez Castro, Jesús Alberto, S/f)

3.1.2.3. 3. Flujo transitorio.

Es un flujo de transición entre dos flujos permanentes. Por ejemplo, el cerrar parcialmente una válvula en una tubería por la que fluye un líquido a una velocidad, causa que el flujo cambie de su estado original a un estado final que depende de la abertura de la válvula. Entre el estado inicial y el final, ocurre el régimen de flujo transitorio y la velocidad cambia de V_o (velocidad inicial) a V_f (velocidad final). (Rodríguez Castro, Jesús Alberto, S/f)

Tipo de flujo con respecto al comportamiento

Entre 1880 y 1884, Osborne Reynolds de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, logró describir la existencia de 2 tipos de flujo, los cuales se diferenciaban por su comportamiento y los definió de la siguiente manera:

3.1.2.4. Flujo Laminar.

Cuando el flujo se desarrolla de manera ordenada como si estuviera compuesto de capas que se desplazan a diferentes velocidades. Es ordenado, estratificado, suave, de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse. Las capas adyacentes del fluido se deslizan suavemente entre sí. Se dice que este flujo es aerodinámico. Ocurre a velocidades relativamente

bajas o viscosidades altas En una tubería, el flujo se desarrolla en forma de cilindros concéntricos, como se muestra en la siguiente figura:

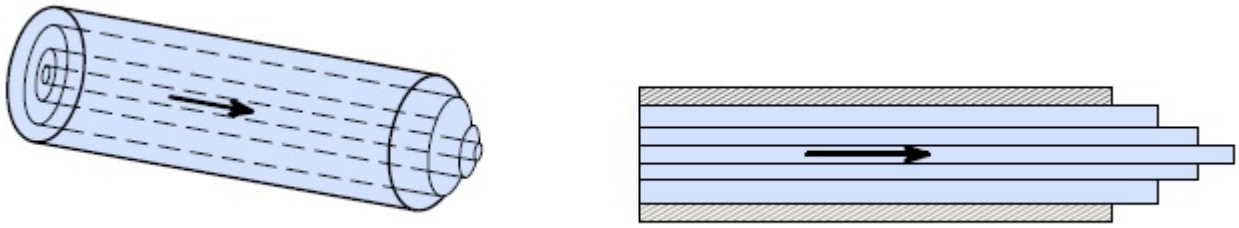


Figura 3.3: Flujo laminar

3.1.2.5. Flujo Turbulento.

Cuando el flujo presenta intercambio de “paquetes” de fluido entre las masas que se mueven a diferente velocidad y las partículas siguen una trayectoria irregular y caótica y no es posible distinguir patrones definidos de las velocidades por lo que se debe hablar de una velocidad promedio del flujo. Aparece a velocidades altas o cuando aparecen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido.



Figura 3.4: Flujo turbulento

3.1.3. Pérdidas de carga

Un fluido, al desplazarse en el interior de un conducto, encuentra resistencia debido a la fricción con las paredes y entre las mismas partículas del fluido, así como a los obstáculos (válvulas, cambios de dirección, codos, tes, etcétera) colocados a lo largo del conducto, lo que ocasiona, invariablemente, una disminución en la energía disponible. A esta disminución de energía se le conoce como pérdidas de carga. Estas pueden ser pérdidas distribuidas (por fricción), o pérdidas locales (causadas por accesorios).

3.1.4. Pérdidas de carga por fricción

Las pérdidas de carga por fricción se deben a la viscosidad del fluido y a las colisiones, ya sea entre partículas o con las paredes interiores del conducto. Cuando el régimen de flujo es laminar,

la viscosidad tiene un gran efecto en la definición de pérdidas de carga por fricción, ya que entre las capas o cilindros concéntricos que forman este flujo, se desarrollan fuerzas que se oponen al movimiento. En flujo turbulento, la viscosidad tiene menor efecto ya que las colisiones ocurren con mayor frecuencia, debido a la naturaleza desordenada de este régimen de flujo.

3.1.5. Rugosidad

3.1.5.1. Rugosidad absoluta

En el interior de los tubos comerciales existen protuberancias o irregularidades de diferentes formas y tamaños cuyo valor medio se conoce como rugosidad absoluta (K), y que puede definirse como la variación media del radio interno de la tubería.

Para determinar el valor de esta rugosidad absoluta las empresas fabricantes realizaron experimentos que consistieron en producir una rugosidad artificial pegando en el interior de un tubo de vidrio (liso) áridos de diferentes granulometrías tamizados, es decir, de rugosidad conocida, hasta conseguir una pérdida de carga igual que la producida en un tubo comercial de un material determinado con igual longitud y diámetro que el de vidrio. Estos tubos artificialmente preparados se conocen como tubos arenisca.

Cuando una casa comercial da el valor de rugosidad K es en realidad la rugosidad media equivalente, lo que significa que se comporta del mismo modo que una tubería artificialmente preparada con la rugosidad absoluta K . Debido a que la distribución de irregularidades en la pared de un conducto es muy compleja, como se puede apreciar en la figura siguiente, es necesario simplificar mediante una medida promedio de la rugosidad, a la cual se le denomina rugosidad absoluta (ϵ).

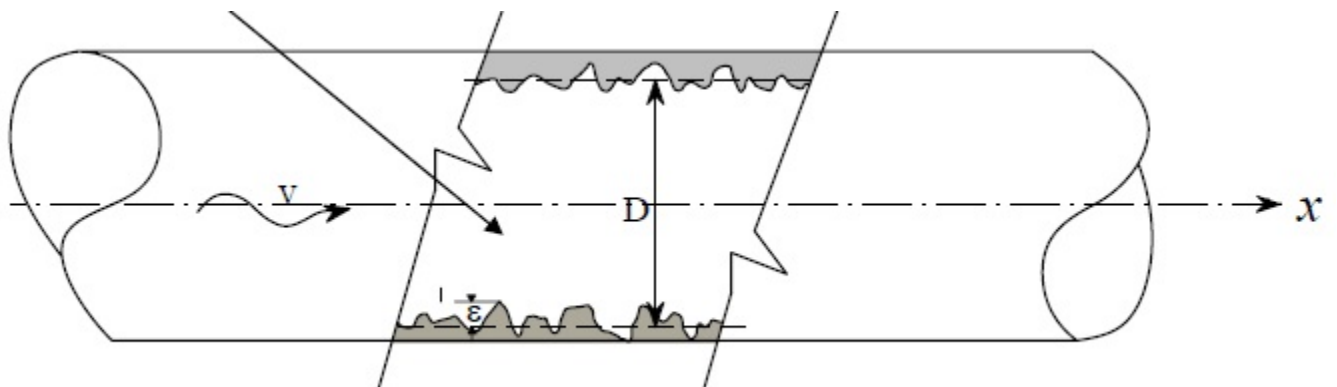


Figura 3.5: Rugosidad absoluta (ϵ)

3.1.6. Rugosidad relativa

Un mismo valor de rugosidad absoluta puede ser muy importante en tubos de pequeño diámetro y ser insignificante en un tubo de gran diámetro, es decir, la influencia de la rugosidad absoluta depende del tamaño del tubo. Por ello, para caracterizar un tubo por su rugosidad resulta más adecuado utilizar la rugosidad relativa (ϵ), que se define como el cociente entre la rugosidad absoluta y el diámetro de la tubería.

A la relación entre la rugosidad absoluta y el diámetro del conducto, se le conoce como rugosidad relativa.

3.1.7. Pérdidas de Carga Locales

Este tipo de pérdidas se distinguen de las de fricción, porque ocurren en un punto de la tubería y se originan por diversas causas tales como un cambio en la dirección del flujo causado por un codo; una reducción o ampliación del conducto; obstrucciones producidas por válvulas o rejillas, bifurcaciones del flujo y por la entrada y salida a un depósito (Sagarpa, S/f).

3.1.7.1. Depósito a una tubería

El flujo de un fluido, al entrar de un depósito a una tubería, experimenta una pérdida de energía ya sea por ampliación o disminución de la tubería, ya que debido a la contracción de la región de flujo, se generan zonas de separación en el conducto cerca de la conexión con el depósito. Por lo tanto, la forma de la conexión tiene una gran influencia en la magnitud de estas pérdidas.

3.2. Presión

Se define como la cantidad de fuerza que se ejerce sobre una unidad de área de una sustancia, o sobre una superficie.

Los fluidos están sujetos a variaciones grandes de presión, en función del sistema en que se les utiliza. El agua en un sistema de tuberías doméstico está a una presión más grande que la presión atmosférica para que salga con rapidez del grifo.

Blas Pascal describió dos principios que se conocen como *leyes de Pascal*:

1. *La presión actúa sobre un volumen pequeño de fluido de modo uniforme y en todas direcciones.*

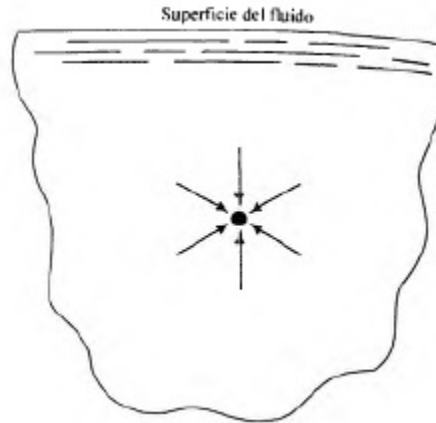


Figura 3.6: La presión actúa de modo uniforme y en todas direcciones

1. En un fluido confinado por fronteras sólidas, la presión actúa de manera perpendicular a la pared.

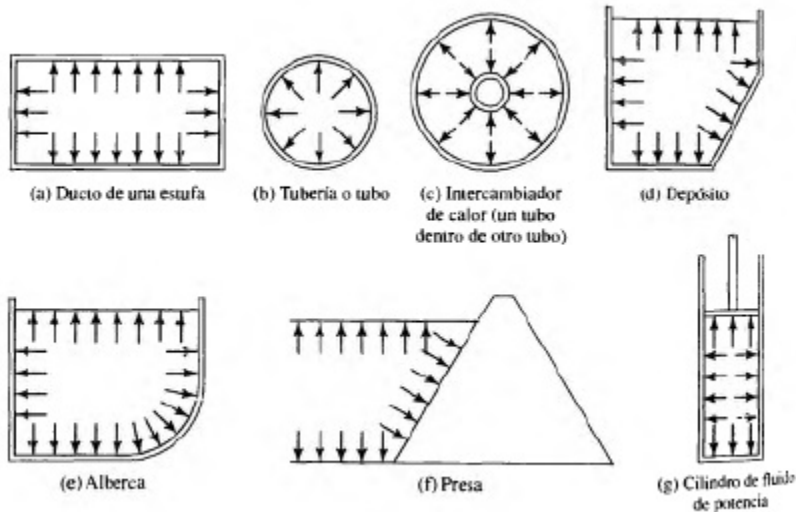


Figura 3.7: Dirección de la presión del fluido sobre las fronteras

3.2.1. Medición de la presión

La atmósfera es la referencia para hacer cálculos de la presión de un fluido. Así, la presión que arroja la medición del fluido con respecto a la presión atmosférica local se llama presión manométrica o relativa. La presión que se mide en relación con un vacío perfecto se llama presión absoluta.

3.2.2. Paradoja de Pascal

La presión solo depende del cambio en la elevación y el tipo de fluido, no del tamaño del contenedor del fluido. A este fenómeno se le llama la paradoja de Pascal.

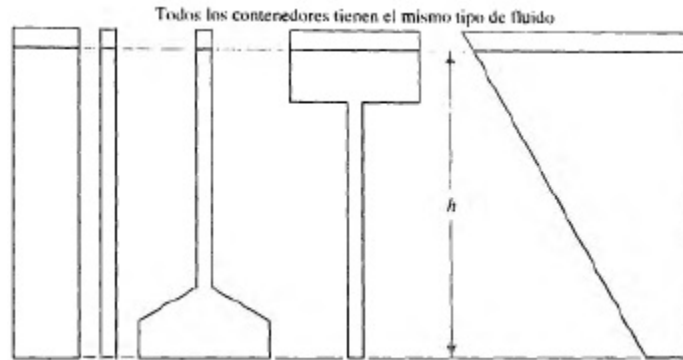


Figura 3.8: Paradoja de Pascal. La presión es la misma en todos los contenedores

Este fenómeno es útil cuando se trata de producir una consistente presión elevada en los sistemas de tuberías y tanques interconectados. Es frecuente que los sistemas hidráulicos urbanos incluyan torres de agua ubicadas en colinas altas. Además de proporcionar una reserva de agua para el suministro, el propósito esencial es mantener una presión lo suficientemente alta en el sistema hidráulico para lograr una distribución satisfactoria a casas, comercios e industrias.

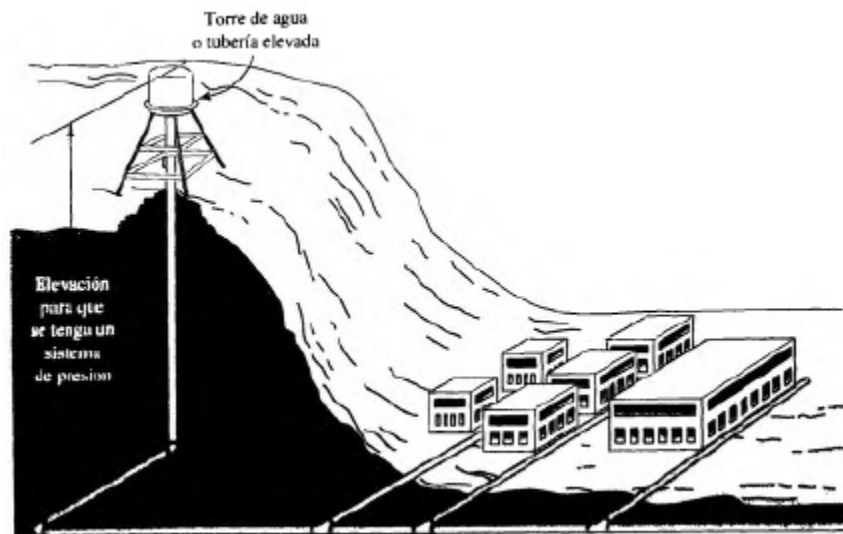


Figura 3.9: Elevación para lograr presión alta en la distribución

En aplicaciones industriales o de laboratorio se usa una tubería elevada que contiene un líquido estático, con objeto de crear una presión estable sobre un proceso o sistema. Se coloca en una

posición elevada con relación al sistema y se conecta a éste por medio de tubos. Al aumentar o disminuir el nivel de fluido en la tubería elevada se cambia la presión del sistema (Mott, 2006).

3.2.3. Manómetros

Son dispositivos que emplean una columna líquida para medir la presión. El manómetro más elemental consiste en un tubo conectado a un recipiente o tubería a presión con uno de sus extremos expuesto a la atmósfera como se muestra en las figuras siguientes:

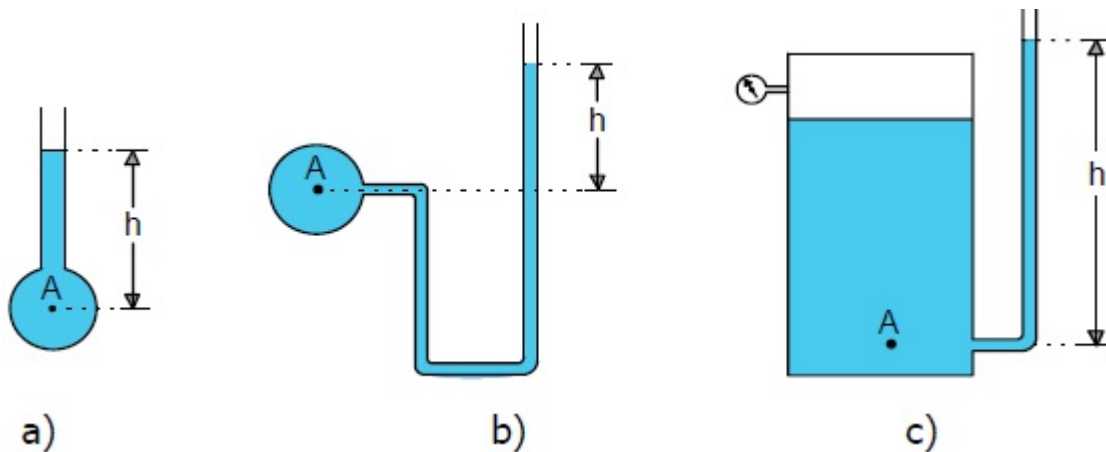


Figura 3.10: Manómetros o piezómetros

Este tipo de manómetros se conocen generalmente como piezómetros y miden la presión en función de la altura de la columna h .

Capítulo 4

MÉTODOS DE DETECCIÓN DE FUGAS

4.1. Investigación acerca de algunos métodos con fundamento científico para detección de fugas y localización de fallas en una red de tuberías

En esta parte de mi reporte, presento una investigación bibliográfica de métodos de detección de fugas y localización de fallas en redes de tuberías, únicamente con el propósito de mostrar el avance que hay en este tipo de trabajos a nivel nacional e internacional. Debo aclarar que por falta de tiempo los métodos y sus modelos matemáticos no se pusieron en práctica y por lo tanto no son de mi dominio. Se presentan porque muestran algo de similitud en lo que trabajé en mi residencia profesional.

4.1.1. Modelación numérica de fugas y consumo en redes de agua potable (Tzatchkov e Izurieta 1996)

Tzatchkov e Izurieta (1996) plantean que las fugas en las redes de agua potable son directamente proporcionales a la presión que opera la red, es decir, con mayor presión en la misma se tienen más fugas y viceversa. En esta relación, una de las posibles medidas para reducir las pérdidas de agua potable consiste en reducir las presiones excesivas. Esa reducción en la presión generalmente puede realizarse de varias maneras, tales como reubicar los tanques en elevaciones más bajas, sectorizar la red de forma tal que en cada sector no se tenga un desnivel topográfico importante y que sea abastecido por su propio tanque, o instalar válvulas reductoras de presión o cajas rompedoras de presión en la red, entre otras. La técnica de usar válvulas reductoras de presión en la red con fines de reducir fugas, por ejemplo, ha sido usada básicamente en países de Europa, y en los últimos años se ha propuesto aplicarla en México

Con el objeto de obtener una disminución de las fugas rentable y más adecuada a las condiciones particulares de la red, cualquier estudio o proyecto de control de fugas por medio de la presión, debe de considerar las posibles formas de reducir la misma, de manera que el ahorro de agua que se obtenga soporte las inversiones necesarias para hacer los arreglos y sus necesidades de mantenimiento. Para llevar a cabo ese análisis se requiere de un modelo matemático de la red capaz de considerar de qué forma las fugas y el consumo en la red cambian con la presión.

Dicen que los programas de cómputo existentes para el cálculo hidráulico de redes, como por ejemplo KYPIPE, EPANET, AH, CYBERNET/ WaterCAD, Scadred, REDINA y otros no consideran una relación presión-fugas en sus algoritmos, o tienen posibilidades bastante limitadas para hacerlo.

Los autores presentan las bases de un modelo numérico de redes de agua potable que considera que el consumo de agua y las fugas dependen de la presión. Los resultados de este modelo los comparan con resultados del programa EPANET. Este modelo se incluye en el sistema de cómputo Scadred-2002 del IMTA.

■ *Relación presión-fugas*

Estos investigadores dicen que, dada la naturaleza de las fugas (escape del agua a presión a través de ciertas aperturas), éstas se consideran en su modelo matemático por medio de la ecuación de descarga a través de un orificio, que tiene el aspecto siguiente:

$$Q_{fugas} = Cpe$$

Donde:

Q_{fugas} = es el gasto perdido en fugas

P = es la presión

C = es una constante cuyo valor se determina con base en el área del orificio, y

e = es otra constante (exponente) que depende del tipo de descarga.

En los modelos de redes de agua potable la presión p se obtiene en los nodos de la red, por lo tanto la ecuación $Q_{fugas} = Cpe$ será aplicada a cada nodo y se obtendrá un valor para las fugas en cada uno de ellos. La constante C será en general diferente para los diferentes nodos (mayor para aquellos donde hay mayor volumen de fugas), y el exponente e tendrá el mismo valor para todos los nodos. La ecuación de descarga de un orificio de área constante corresponde a la ecuación $Q_{fugas} = Cpe$ con $e = 0.5$.

Dicen que esta ecuación de descarga de un orificio de área constante se utiliza de manera indirecta en algunos programas de cómputo que no pueden modelar las fugas directamente, en los que se pueden simular las fugas conectando a cada nodo un tubo ficticio que descarga a otro nodo ficticio de cota piezométrica fija igual a la cota del nodo. En algunos estudios llevados a cabo en México, dirigidos a la reducción de las pérdidas de agua y que usan el programa EPANET, se emplea esta forma de simular las fugas.

La manera más certera, dicen los autores, de definir la relación presión-fugas sin embargo es la experimental, es decir, la de someter la red a diferentes presiones de operación y medir las fugas que se producen para cada nivel de presión en la red. Goodwin (1980) y Germanopoulos (1985) realizaron experimentos de ese tipo. Sus resultados muestran que el exponente e en la ecuación $Q_{fugas} = Cpe$ tiene valores mucho más altos que 0.5, y llega a ser igual a 1.18. Tucciarelli y Termini (1998) proponen y aplican un método numérico para determinar las constantes C y e . Los valores de e que se obtienen en los ejemplos que ellos presentan son mayores de 1, con un promedio también cercano a 1.18. Martínez et al. (1999) resumen brevemente los estudios existentes para determinar e , y también señalan 1.18 como el valor que debe de usarse.

■ *Relación presión-consumo*

En los cálculos hidráulicos de redes de agua potable normalmente se asume que el consumo no depende de la presión en la red. Se determina el consumo, se asigna a los nodos de la red y se corre el modelo para obtener las presiones correspondientes a ese consumo. De esta manera el problema se reduce a revisar si se tendrían ciertas presiones mínimas en los nodos, supuestamente necesarias para que se pueda suministrar la demanda de agua potable requerida. Prácticamente todos los programas conocidos para cálculo hidráulico de redes de agua potable, incluyendo EPANET, manejan ese modelo de consumo prefijado que no depende de la presión. En ocasiones esos programas obtienen presiones negativas en algunos nodos, algo que es físicamente imposible. El consumo real de agua potable sin embargo depende de la presión. Esta influencia es más fuerte cuando la presión no es suficiente, dado que los usuarios no pueden usar toda el agua que quisieran por tener poca presión. El consumo incluso llega a ser cero cuando la presión es igual a cero. La presión demasiado alta también genera un consumo elevado (más de lo normal), aparte de las fugas, por la facilidad de tener el agua y su abundancia.

4.1.2. EPANET

(Información tomada de EPANET 2.0 en español. Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua. Manual del usuario, escrito por Rossman A. Lewis, 2002)

EPANET es un método de la EPA (Environmental Protection Agency, por sus siglas en inglés) Agencia para la Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos, es un modelo de simulación por computadora que predice el comportamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de distribución de agua durante periodos de operación prolongados, trata de satisfacer la necesidad creciente por comprender las transformaciones que experimenta el agua tratada, cuando se introduce en las redes de distribución.

Efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nudos, los niveles en los depósitos, y la concentración de las especies químicas presentes en el agua,

a lo largo del periodo de simulación en múltiples intervalos de tiempo. Además, puede también simular el tiempo de permanencia del agua en la red.

Puede diseñar programas de muestreo, la calibración de un modelo hidráulico o el análisis del cloro residual. Puede evaluar estrategias de gestión para mejorar la calidad del agua tales como alternar la toma de agua desde diversas fuentes de suministro, modificar el régimen de bombeo, o de llenado y vaciado de los depósitos, implantar estaciones de tratamiento secundarias, tales como estaciones de recloración o depósitos intermedios y establecer planes de limpieza y reposición de tuberías.

Proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y de la calidad del agua, y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas (curvas que conectan los puntos en que la función tiene un mismo valor constante).

Contiene un simulador hidráulico muy avanzado que tiene las características siguientes: no existe límite en cuanto al tamaño de la red que puede procesar, las pérdidas de carga pueden calcularse mediante las fórmulas de Hazen- Williams, de Darcy-Weisbach o de Chezy-Manning, contempla pérdidas menores en codos, accesorios, admite bombas de velocidad fija o variable y determina el consumo energético y sus costos, considera varios tipos de válvulas, tales como válvulas de corte, de retención, y reguladoras de presión o caudal., admite depósitos de geometría variable, cuyo diámetro varíe con el nivel, considera diferentes tipos de demanda en los nudos, cada uno con su propia curva de modulación en el tiempo y modela tomas de agua cuyo caudal dependa de la presión, por ejemplo rociadores.

- *Componentes físicos*

EPANET modela un sistema de distribución de agua como un conjunto de líneas conectadas por sus nudos extremos. Las líneas representan tuberías, bombas, o válvulas de control. Los nudos representan puntos de conexión entre tuberías o extremos de las mismas, con o sin demandas que los denomina nudos de caudal, y también depósitos o embalses. La figura siguiente muestra cómo se interconectan todos estos objetos entre sí para formar el modelo de una red.

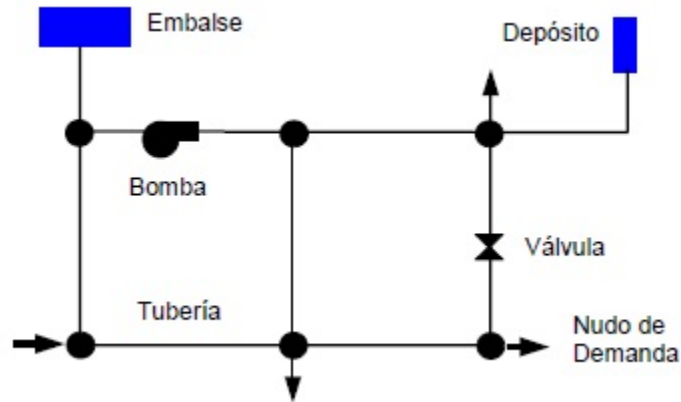


Figura 4.1: Componentes físicos de un Sistema de Distribución de Agua en EPANET

- *Nudos de caudal*

Los nudos de caudal son los puntos de la red donde confluyen las tuberías o bien sus extremos, y a través de ellos el agua entra o sale de la misma (también pueden ser sólo puntos de paso). Los datos básicos relacionados con los nudos son: la cota respecto a un nivel de referencia (usualmente el nivel del mar), la demanda de agua (flujo que abandona la red), la calidad inicial del agua. Los resultados obtenidos para los nudos, en cada uno de los periodos de simulación, son: la altura piezométrica (energía interna por unidad de peso del fluido, o bien suma de la cota más la altura de presión), la presión, y la calidad del agua

- *Análisis Hidráulico*

El método que emplea EPANET para resolver simultáneamente las ecuaciones de continuidad en los nudos y las ecuaciones de comportamiento hidráulico de las tuberías, para un instante dado, puede clasificarse como un método híbrido de nudos y mallas.

4.1.3. KYPipe

(Información recuperada de <http://kypipe.com/products>)

Es un sistema desarrollado por profesores de Ingeniería Civil de la Universidad de Kentucky, y se ha mantenido durante más de 40 años como motor de análisis hidráulico.

Pipe2016: KYPipe genera cálculos de parámetros directos, de la bomba y de las curvas del sistema.

Estudia sistemas de agua, petróleo, productos refinados, productos químicos, refrigerantes, y sistemas de alcantarillado. Se puede utilizar para la selección y dimensionamiento de las tuberías, bombas, válvulas, depósitos y otros dispositivos.

KYPipe resuelve parámetros de diseño, funcionamiento y calibración de redes de distribución de tubería. Estos parámetros los calcula para satisfacer los requerimientos de presión establecidos en los lugares designados en el sistema de tuberías para una gama de condiciones de funcionamiento. Proporciona apoyo cuantificable para la toma de decisiones, y elimina los ensayos repetitivos de diferentes posibilidades de diseño.

Pipe2016 emplea menús simplificados para la entrada de datos para esta función. Campos de entrada de texto lógicas permiten al usuario especificar limitaciones para responder a preguntas de diseño tales como, "¿Cuál es el (la demanda, velocidad de la bomba, ajuste de la válvula, etc.) necesarios para mantener una presión dada en este nodo?".

Los elementos y dispositivos que incluye son cruces, tanques, depósitos, bombas, rociadores, aspersores de rack, válvulas de regulación, elementos de pérdida, elementos de pérdida definidos por los datos del fabricante de una biblioteca, equipos de presión variables, válvulas activas, válvulas de retención, hidrantes, válvulas, nodos intermedios, medidores de línea y los dispositivos definidos por el usuario.

Proporciona una herramienta de ubicaciones del sensor de calidad del agua (OWQSPT). Dice que es una guía simplificada para la colocación óptima de los sensores en las redes de distribución de agua pequeñas y medianas. Después de que el usuario configura un modelo del sistema por un período extendido de simulación, el análisis de la colocación del sensor óptima calidad del agua se puede realizar.

Tiene una característica llamada período extendido de simulación (EPS) que permite al usuario realizar cambios en el estado de los elementos de control (on / off) y los tubos (abierto / cerrado) en base a los niveles de presión de agua o en los nodos sensores. El usuario también puede especificar los niveles del tanque que activan los interruptores de control, y alterar los patrones de demanda. El EPS se lleva a cabo durante un período de 24 a 144 horas o más. El usuario configura y pone en marcha esta característica especificando los datos de EPS, tales como la duración y el periodo de simulación computacional, y uno o más de los siguientes tipos de datos: Datos del tanque, modelo de demanda de datos, interruptor de control data o costo de energía. Cuando el usuario especifica un costo de energía, el EPS devuelve el costo incremental para cada periodo de cálculo, así como el costo total acumulado y el costo total de la simulación.

KYPipe proporciona un análisis de descarga para calcular qué tubos alcanzan la velocidad de descarga deseada cuando las válvulas especificadas son OFF y bocas de riego especificados están fluyendo. El análisis final generará un conjunto especial de etiquetas de mapas, tubos codificados por colores, y un informe de descarga.

Introduce el número de cada tipo de accesorio de una lista desplegable y los coeficientes de pérdida K se suman de forma automática para cualquier sección de la tubería.

4.1.4. SCADRED

(Texto tomado de G. Tzatchkov, Velitchko e Izurieta, Jorge,1996).

El Sistema de cómputo para análisis y diseño de redes de distribución, SCADRED integra los programas AH, AHPE y DR con la posibilidad de digitalizar el esquema de la red, el diseño automatizado de cruceros, el cálculo del costo y el dibujo de los planos de un proyecto ejecutivo. El sistema automatiza el proceso de diseño y permite en un tiempo breve elaborar un proyecto integral de agua potable. La ejecución del sistema se realiza dentro de AutoCAD.

El sistema posibilita: La digitalización de los planos de agua potable, incluyendo la planimetría de calles y el trazo de tuberías, actualización de la información digitalizada, y edición de los datos sobre el dibujo de AutoCAD o en tablas, extracción automática de la información digitalizada para fines de cálculo hidráulico y diseño, análisis estático de la red digitalizada, selección de diámetros de tramos nuevos en redes nuevas o rehabilitaciones, manejo de hasta mil nodos y mil tramos de red primaria en los cálculos hidráulicos., consideración de tanques y bombeo directo en los cálculos, diseño automático de los cruceros, edición manual de los cruceros, cuantificación y costo de piezas especiales y tuberías, isolíneas de terreno, presión y elevación piezométricas, superficies piezométricas tridimensionales, gráficos de evolución de presión en el tiempo, dibujo de planos del proyecto ejecutivo e impresión de los resultados.

Hasta 1994 contaban con dos versiones del sistema: el SCADRED V1 que maneja la Red, en un solo plano y el SCADRED V2 que brinda la posibilidad de dividir, según una escala determinada, el plano de la ciudad en un mosaico cuyas secciones se manejan por separado con sus respectivos nodos, trazo de tuberías, plano de cruceros y cuantificación. El sistema integra la información de la red, contenida en los planos del mosaico, en una red global para fines de cálculo hidráulico. El sistema puede manejar mosaicos que incluyen hasta mil planos, con lo que es posible realizar el diseño y los planos de proyecto de grandes ciudades.

4.1.5. Modelo matemático del sistema. Ecuaciones que describen el flujo y presión de fluidos

Una expresión práctica que permite una evaluación rápida del valor de la celeridad cuando el fluido circulante es agua, es la determinada por la ecuación siguiente.(Ecuación de Allievi).

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3+k\frac{D}{E}}}$$

Donde:

- D = Es el diámetro interior de la tubería
- E = Es el espesor de la tubería

- a = Es la velocidad de propagación de la onda de presión
- K = Coeficiente función del módulo de elasticidad (E) del material constitutivo de la tubería, que representa principalmente el efecto de la inercia del grupo motobomba, cuyo valor es:

$$K = \frac{10^{10}}{E}$$

La siguiente tabla muestra los valores de K , de acuerdo a los materiales

Material de la tubería	ϵ (Kg/m^2)	K
Palastros de hierro y acero	$2 * 10^{10}$	0.5
Fundición	10^{10}	1
Hormigón	$2 * 10^9$	5
Fibrocemento	$1.85 * 10^9$	5.5(5-6)
PVC	$3 * 10^8$	33.3(20-50)
PE baja densidad	$2 * 10^7$	500
PE alta densidad	$9 * 10^7$	111.11

Figura 4.2: Valores K

Resolviendo la ecuación mostrada anteriormente obtenemos el siguiente resultado.

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48.3 + 20\left(\frac{0.052}{0.0039}\right)}} = 1143.41m/s$$

Posteriormente se obtienen los resultados para cada incognita necesaria como se muestra en la siguiente tabla de resultados

Propiedades	Valores
Aceleración de la gravedad	$9.81 m/s^2$
Longitud del tubo (descarga)	$58.412m$
Diámetro interior del tubo	$0.052m$
Coefficiente de fricción	$f = 0.017$
Caudal en el ducto	$0.004375 m^3/s$
Presión	$1.8m. c. a$
Velocidad de propagación de onda de presión	$1143.41 m/s$

Figura 4.3: Valores Obtenidos

Capítulo 5

SISTEMA DISEÑADO PARA DIAGNOSTICAR E IDENTIFICAR FALLAS DE UN SISTEMA DE TUBERÍAS MEDIANTE OBSERVADORES DE ESTADO

5.1. Diseño del sistema de tuberías y sus características- Implementación del sistema de diagnóstico de fallas en el Benchmark.

Para el diseño del sistema de tuberías se tuvieron que realizar ciertos cálculos matemáticos, los cuales se presentan a continuación:

- Longitud equivalente a tubería recta de los accesorios

Se dice que, en caso de que los accesorios a analizar sean codos de 180° y 90° se hace uso de la siguiente ecuación

$$\frac{L}{D} = R_t + (R_l + \frac{R_b}{2})(n - 1)$$

En donde:

1. n = número de curvas de 90° del serpentín en L/D R_t
2. R_t = Resistencia total debida a una curva de 90° en $\frac{L}{D}$

3. R_l = Resistencia debida a la longitud de una curva de 90° en $\frac{L}{D}$
4. R_b = Resistencia debida a la curvatura de 90° en $\frac{L}{D}$
5. $\frac{r}{D}$ = Razón entre el radio de curvatura del accesorio y el diámetro interior del ducto

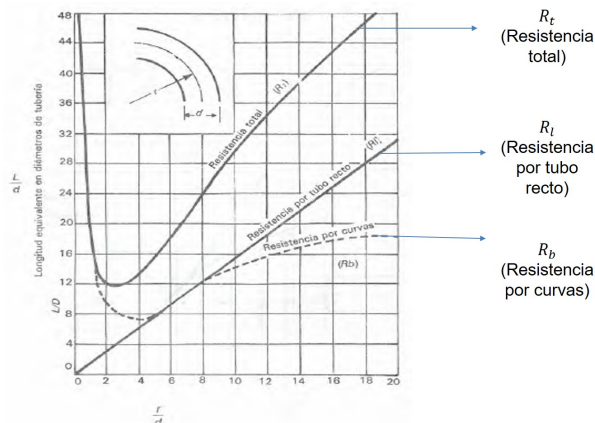
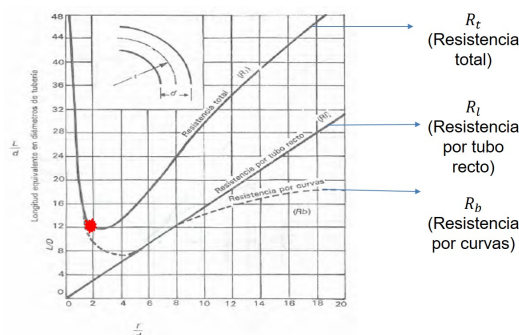


Figura 5.1: Gráfica diámetro de tubería

- Se multiplica por el número de accesorios de 180° R_t por el número de codos de 90°
- Se multiplica por el diámetro interior del tubo
- La longitud entre sensores es $52.12m$ (sin contar la longitud que equivalen los 10 codos de 90° que se encuentran en el espacio de trabajo)
- El radio de curvatura de los codos de 90° son $10cm$ y el diámetro interior del ducto son $5.2cm$, la razón de $r/D=1.92308$
- De la gráfica de resistencias el valor de R_t de acuerdo a la razón $r/D=1.92308$ es 12.1
- Ahora multiplicando 12.1 por el número de codos de 90° que en este caso son 10 es igual a 121



- El valor de los 121 se multiplica por el diámetro interior del ducto $0.052m$, es igual a $6.292m$, que corresponde a la longitud equivalente de acuerdo a los accesorios. Por lo tanto la longitud total de trabajo para el sistema es 52.12 mas 6.292 , que corresponde a $58.412m$

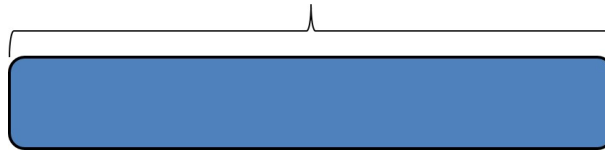


Figura 5.2: Longitud de la tubería (58.412 aproximadamente)

5.1.1. Descripción y características de la tubería diseñada.

El sistema de tuberías, fue diseñado con la siguiente estructura.

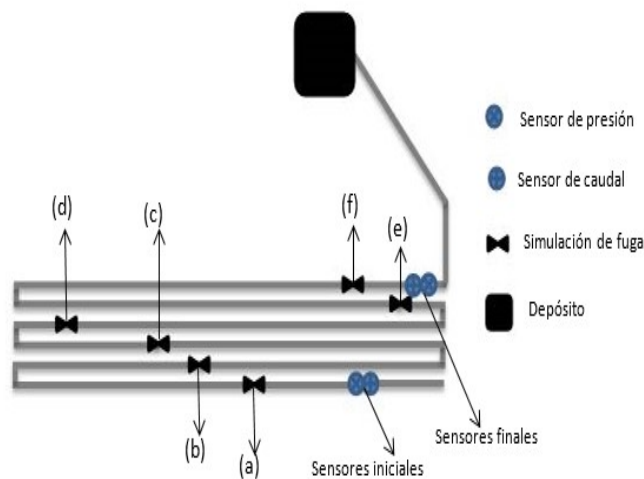


Figura 5.3: Sistema de tuberías diseñado para el proyecto

El ITTG destinó recursos económicos para construir este sistema de conducción de agua que cuenta con un total de 60 metros de longitud, donde cada tramo, está constituido por 10 metros de tubo PVC (Policloruro de vinilo), unidos por codos de 90 grados para así darle la forma que se deseaba.

Se dispuso de un tanque de almacenamiento de 1000 litros, el cual está ubicado fuera del espacio donde se construyó el sistema de tuberías, y de la misma manera, está conectado al sistema de la tubería mediante un tubo PVC.

El sistema de conducción de agua está alimentado de este líquido mediante una bomba de 5 hp de fuerza, la cual se encarga de dar la potencia necesaria para introducir el agua en el siste-

ma, para que ésta pueda recorrer toda la distancia (60m) hasta llegar nuevamente al tanque de almacenamiento.

- *Variador de frecuencia*

Se instaló un Variador de frecuencia, con el objetivo de que controlara la velocidad del motor de la bomba.



Figura 5.4: Variador de frecuencia

Gracias a este variador pudimos observar el comportamiento de la bomba y sistema, a diferentes frecuencias, estas podían ir desde 0 hasta los 50hz.

Para poder variar la frecuencia era necesario entrar a la configuración del variador, y así acceder al parámetro 1080 (1080p) como se puede observar en la imagen, una vez realizado esto, las frecuencias pueden variarse aun cuando el sistema se encuentra en funcionamiento.

5.1.2. Ubicación de sensores

Una vez construido el sistema de tuberías, se procedió a localizar los puntos en donde se ubicarían los sensores de flujo y presión. De inicio se había previsto colocar un juego de sensores (flujo y presión) justo en el inicio del recorrido de las tuberías. Se perforaron los agujeros correspondientes

y se introdujeron los sensores, pero más adelante nos dimos cuenta que esto ocasionaría problemas a la hora de la lectura debido a la vibración que producía la bomba, esta vibración ocasionaba mucho ruido en la lectura del sensor de presión, del cual no se obtenían lecturas, debido que, como se mencionará más adelante, no es recomendable colocar este tipo de sensores justo después de un codo.

Por estas razones, se tuvo la necesidad de mover los sensores, perforar nuevos agujeros y así volver a introducirlos a una distancia de 1 metro alejados del primer codo (ambos en un tramo recto).

El otro juego de sensores fue ubicado al final de este recorrido, a una distancia de 58 metros del primer juego de sensores intercambiando posiciones, con la finalidad de que hubiera la misma distancia entre sensor y sensor (presión-presión, flujo-flujo).



Figura 5.5: Ubicación de Sensores

La longitud entre sensores es de aproximadamente $52.12m$ (sin contar la longitud que equivalen los 10 codos de 90° que se encuentran en el espacio de trabajo)

5.1.3. *Construcción de fugas*

En el tema de fugas, se construyeron 5 fugas alrededor de todo el sistema de tuberías, buscando que cada una de estas se encontrara en cada tramo de tuberías. Para esto, hubo la necesidad de perforar cada tramo.

Las fugas se simularon utilizando válvulas las cuales eran activadas manualmente, como se observa en la imagen.



Figura 5.6: Ubicación de las válvulas

El flujo de salida que se presentaba al activar dichas válvulas, viajaba a través de una manguera la cual desembocaba a un tubo extra, ubicado fuera del espacio de trabajo, a una altura considerable para que este pudiera desembocar nuevamente en el tanque de almacenamiento y no se desperdiciara.



Figura 5.7: Desembocadura de flujo “fugas”

5.1.4. El sensor virtual utilizado para observar sucesos en el sistema de tuberías. Características

- *Circuito propuesto*

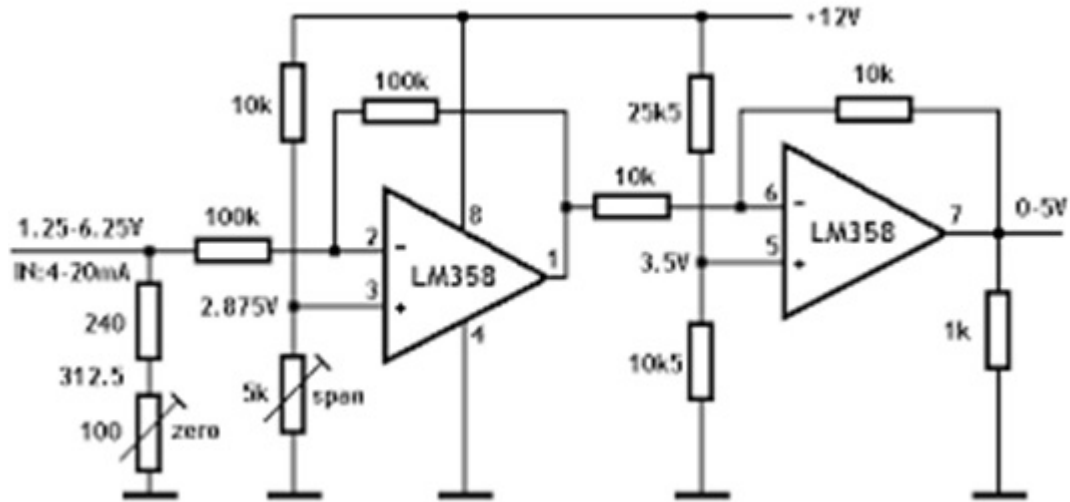


Figura 5.8: Circuito que se diseñó

Se había previsto la utilización del circuito anterior, como convertidor de corriente a voltaje para cada uno de los sensores utilizados en la red hidráulica. Debido a que cada sensor entregaba corriente como señal, lo que ocasionaba un problema a la hora de adquirir los datos para su posterior uso.

Dado que el Amplificador Operacional 358, al igual que el Amplificador Operacional 741 son de propósito general, y la utilización de cualquiera de estos dos serviría para llevar a cabo el diseño circuito, por decisión propia se hizo uso del Amplificador Operacional 741.

Para hacer esto, como es de nuestro saber, cada Amplificador Operacional tiene sus “patas” definidas, tales como la salida, voltaje negativo, voltaje positivo, pata inversora y no inversora, por lo que fue necesario ver las características de cada uno de estos para hacer las modificaciones necesarias al circuito. Estas se muestran a continuación.

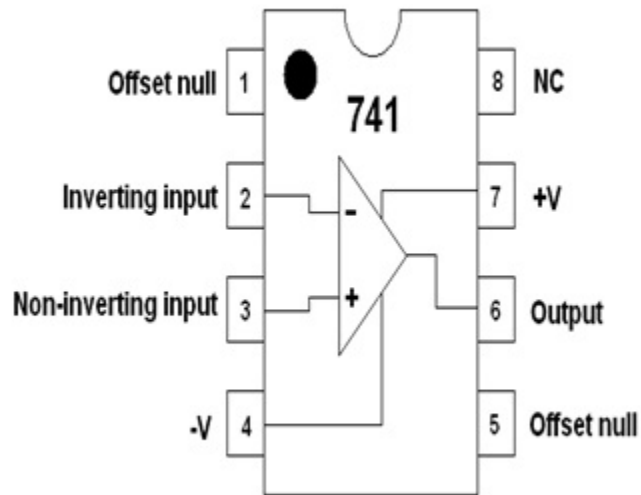


Figura 5.9: Amplificador Operacional 741

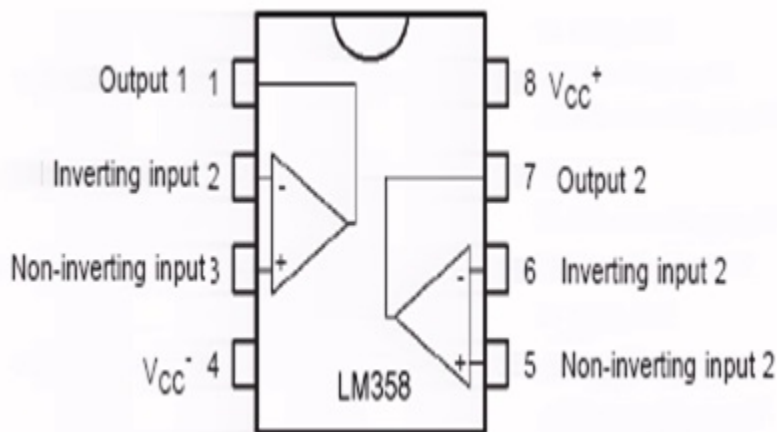


Figura 5.10: Amplificador Operacional 358

Es importante notar que, el amplificador operacional 358 contiene dentro de él 2 amplificadores operacionales, por lo que para su uso, hubiera sido necesario utilizar únicamente 1 de estos componentes. Debido a que en este proyecto se utilizó el amplificador operacional 741, fue necesario la utilización de dos 741 para poder obtener el mismo funcionamiento.

Una vez armado el circuito, se procedió a realizar las pruebas para ver y comprobar que este realizaba su correcto funcionamiento.

Sin embargo, el circuito no funcionaba como se tenía previsto, por lo que se empezó a buscar la razón de esta falla. Al estar investigando y observando videos que pudieran servir de apoyo para

resolver este problema, encontramos que en el diagrama utilizado le hacía falta algo, pues para que el circuito funcionara correctamente era necesario alimentarlo con un voltaje negativo, es decir, hacer uso de una fuente simétrica, alimentando con este voltaje negativo (-V) la pata número 4 del Amplificador operacional 741.

En este circuito se hizo uso de 4 potenciómetros, cada uno con una función en específica.

El potenciómetro de 1 kΩ funcionó como “Zero”, es decir, define el valor inferior entregado por el sensor (0v aproximado). El potenciómetro de 5 kΩ, actuó como “Span”, éste a diferencia del primer potenciómetro, definió el valor máximo entregado por el sensor (5v aproximadamente).

Debido a que en el circuito se presentan 2 resistencias con valores de 25.5 kΩ y 10.5 kΩ respectivamente, y en el mercado no es posible encontrar estos valores exactos, existían 2 posibles soluciones para esto. La primera era comprar resistencias de valores que al colocarse en serie dieran el valor más aproximado al deseado (22 kΩ + 3.3 k para la resistencia de 25kΩ y 10 kΩ + 550 Ω para la resistencia de 10.5 kΩ).

La segunda opción era el uso de potenciómetros con valores de 50 kΩ y 25 kΩ respectivamente. Esto para ajustar manualmente el valor de los potenciómetros y dieran un valor más exacto y preciso. Lo anterior presentaba una desventaja, puesto que al usar estos componentes se corre el riesgo de que cualquier movimiento o cambio al potenciómetro hará que su valor varíe y será necesario un reajuste para volver al valor que proporcione un funcionamiento óptimo a este.

A pesar de esa pequeña desventaja, se hizo uso de los potenciómetros para llevar a cabo este proyecto, de los cuales fueron utilizados 2 circuitos para cada tipo de sensor que se presentan más adelante.

■ *Valores de potenciómetros*

Como se mencionó cada circuito correspondería a cada sensor, por lo que se tuvieron que realizar las pruebas correspondientes hasta lograr que cada sensor marcara los valores indicados que estamos buscando.

Después de una búsqueda de valores, a prueba y error, se encontraron los valores indicados para cada sensor. Estos valores varían como se muestra en la siguiente figura.

Sensores	# de placa	Potenciómetro 1 kΩ	Potenciómetro 5 kΩ	Potenciómetro 50 kΩ	Potenciómetro 25 kΩ
Flujo	0	0.737 kΩ	2.4 Ω	15.34 kΩ	2.072 kΩ
Flujo	1	0.737 kΩ	2.4 Ω	15.34 kΩ	0.638 kΩ
Presión	2	0.700 kΩ	1.276 kΩ	8,48 kΩ	5.952 kΩ
Presión	3	0.607 kΩ	1.267 kΩ	2.327 kΩ	5.950 kΩ

Cuadro 5.1: Valores indicados para cada sensor

5.1.5. Sensores utilizados en la red hidráulica. Sensor de flujo.

En nuestra red hidráulica, utilizamos 2 distintos tipos de sensores, esto para poder obtener los datos necesarios de la propia red y posteriormente corroborarlos con los resultados del modelo matemático que con anterioridad se había realizado.

Dentro de los sensores, encontramos 2 sensores de flujo, los cuales, como su nombre lo indica, su objetivo fue detectar el flujo que circulaba en ese momento dentro de la tubería, para ello se hizo uso del dispositivo 2537 Paddlewheel Flow Sensor, que por su traducción al español sería, Signet 2537 Caudalímetro de rueda de paleta. Para su correcto uso y funcionamiento fue necesario seguir una serie de recomendaciones, tales como aliviar la presión del sistema y ventilarlo antes de instalarlo o desmontarlo, confirmar la compatibilidad química antes de utilizarlo, no exceder los valores máximos especificados de temperatura y presión, utilizar gafas de seguridad y careta durante los procedimientos de instalación y servicio, no modificar el montaje del producto, usarlo de la manera especificada por el fabricante e instalarlo en áreas no peligrosas.

■ Características físicas

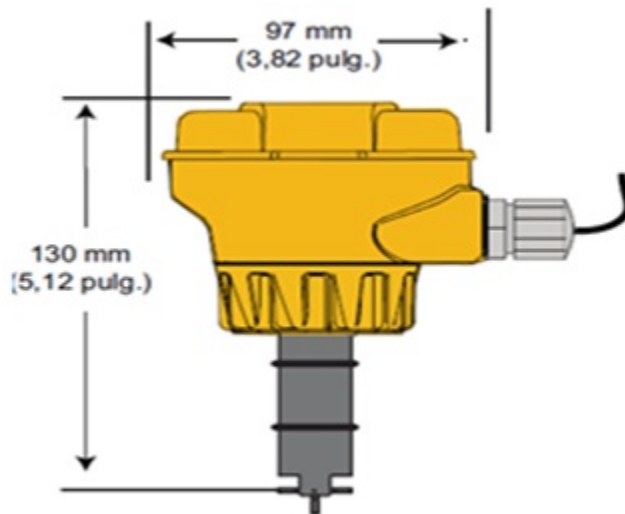


Figura 5.11: Caudalímetro de rueda de paletas 2537 para tubos de ½ a 4 pulg.

■ Descripción

La serie de caudalímetros de rueda de paletas 2537 ofrecen características de caudal bajo, potencia baja y alta resolución con varias opciones de salida tales como impulsos volumétricos, divisor de impulsos, conmutador de caudal, digital (S3L) o 4 a 20 mA. Esta unidad puede configurarse en el propio lugar de operación directamente a través de la interfaz de usuario incorporada.

1. El modelo de 4 a 20 mA proporciona una salida ciega del circuito de corriente.

2. El modelo Múltiple proporciona una salida digital (S3L) para utilizarse con el controlador de multiparámetros Signet 8900 o transmisor Signet 9900.
3. El modelo Conmutador de impulsos utiliza un solo relé (mecánico o de estado sólido) y tiene tres modalidades de operación seleccionables.
4. La modalidad Divisor reduce la escala de frecuencia de la rueda de paletas para admitir dispositivos de entrada de baja frecuencia.
5. La modalidad Total produce un impulso por volumen fijo de fluido.
6. La modalidad Conmutador de caudal usa un solo relé para la operación de alarma alta o baja.

Dispone de una pantalla LCD pequeña que permite programar el 2537 sin necesidad de equipos externos; la pantalla no es visible durante la operación normal.

■ *Especificaciones / Características Electrónicas*

POWER REQUIREMENTS MULTI	
With Dry-Contact Relay	24 VDC nominal $\pm 10\%$, regulated, 30 mA max. Current
With Solid-State Relay	5 to 24 VDC nominal $\pm 10\%$, regulated, 30 mA max. Current
Digital (S3 L)	5.0 VDC min. to 6.5 VDC max., 30 mA max. Current (1.5 mA nominal)
4 to 20 mA	400 mV max. Ripple voltage, 30 mA max. Current
Short Circuit Protected	Up to 40 V, 1 hour
Over-Voltage Protection	40 VDC over 1 hour
OUTPUT	
Signal Averaging	Programmable 0 to 100 seconds
Sensitivity Response	Programmable 0 to 9 scale

Cuadro 5.2: Especificaciones/Características electrónicas del Signet 2537 Caudalímetro de rueda de paleta. *Paddlewheel Flow Sensor*

■ *Montaje (Condiciones de montaje)*

Fue necesario cumplir ciertas condiciones para garantizar que el sensor de flujo funcionara correctamente, entre ellas está su montaje.

1. Seleccionar una posición con suficiente distancia del tubo recto inmediatamente aguas arriba del sensor.

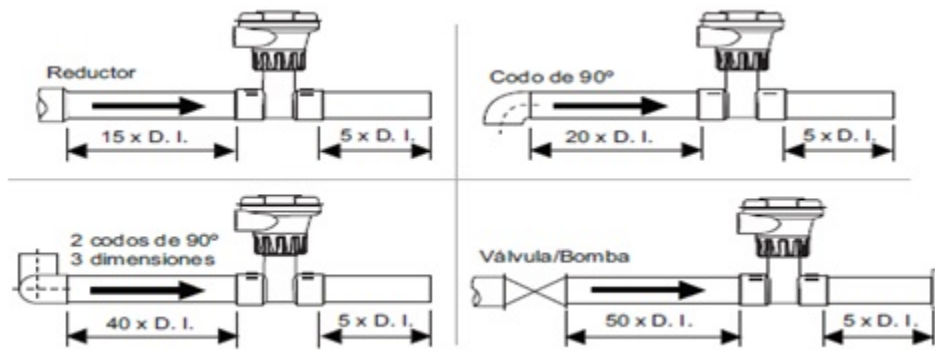


Figura 5.12: Posición del sensor de flujo con suficiente distancia de tubo recto

2. El sensor debe colocarse en un interceptor o en un sitio de flujo ascendente, para que así pueda estar protegido contra la exposición a burbujas de aire cuando el sistema esté funcionando.



Figura 5.13: Colocación del sensor de flujo en un interceptor o en un sitio de flujo ascendente

3. No colocar el sensor de las maneras siguientes

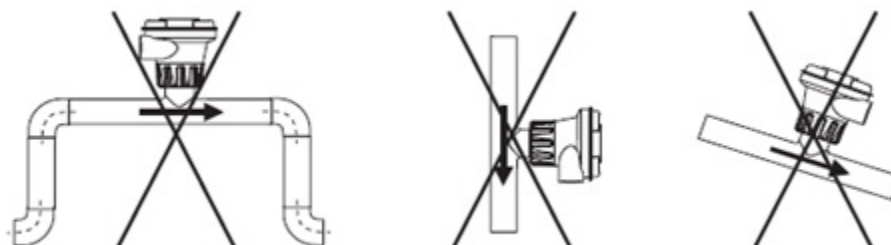


Figura 5.14: Colocación incorrecta del sensor de flujo

- *Conexiones internas del sensor de flujo*

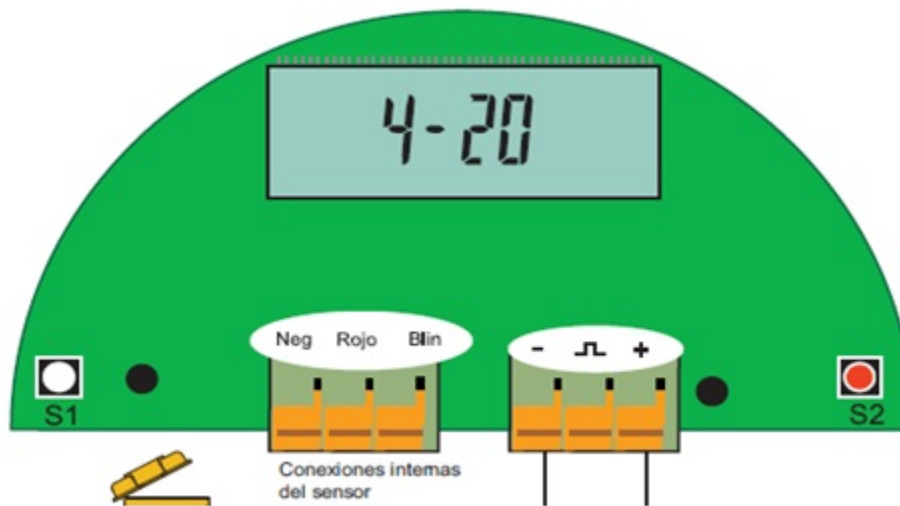


Figura 5.15: Conexión del sensor de flujo (terminales de salida)

Como se puede observar en la imagen, tenemos 3 terminales, positiva, negativa y una tercera donde podemos observar una onda cuadrada la cual se puede suponer como la “señal”. En un inicio se conectó de esa manera, se conectó la terminal positiva al circuito (donde se alimenta con +V) y la “señal” en la entrada del circuito.

Se procedió a realizar las pruebas, pero observábamos que los sensores no marcaban nada, por lo que se supuso un problema en los circuitos sin pensar que el problema podría encontrarse dentro de la conexión del sensor.

Después de investigar, se encontró que el error se encontraba en la manera en que se había conectado el sensor, debido a que la conexión de los sensores de corriente es distinta.

Lo que se toma como “señal” es la terminal negativa del mismo sensor. Por lo que se hicieron los cambios necesarios y se conectó esta terminal a la entrada del circuito. Hecho esto, se obtuvo un correcto funcionamiento de los sensores.

El primer sensor fue ubicado a un metro del inicio del recorrido de la tubería, por el contrario, el otro sensor fue ubicado en el final de todo el recorrido de nuestra red hidráulica, dejando una distancia de 58 metros entre sensor y sensor.

5.1.6. Configuración del sensor

Es importante mencionar que, generalmente, resulta imposible lograr condiciones ideales de caudal, debido a que este es muy irregular o inestable. Para controlar, o mejorar la lectura del caudal, es importante corregir cualquier deficiencia en la tubería que pudiera estar ocasionando

esta inestabilidad.

Por otro lado, el Sensor Signet 2537, otorga soluciones alternativas para intentar corregir esta irregularidad, por lo que fue necesario modificar su configuración en los siguientes aspectos:

1. 4Set y 20Set: Configurados para establecer los intervalos de lectura mínima y máxima que el Sensor Signet 2537 puede leer.
2. Sensibilidad (Sensitivity): Anula el promedio para grandes cambios de caudal. La sensibilidad puede configurarse desde un intervalo de 0 hasta 9, en donde 9 significa que el o los datos obtenidos del sensor variarán con cualquier cambio de caudal, aun así sea pequeño.
3. Promediado (Average): Estabiliza condiciones de caudal irregulares. El promediado establece el tiempo que el sensor utilizará como periodo de muestreo, este va de 0 hasta 100 segundos.

Estas dos configuraciones (Sensibilidad y Promediado) sirven, en conjunto, como papel importante para la lectura de caudal, debido a que, con los valores adecuados, se obtendrá una lectura más estable. Se hicieron distintas pruebas y se observó la respuesta. Después de algunas pruebas se encontraron, este caso, al configurar nuestros sensores 2537 Paddlewheel Flow Sensor una Sensitivity de 7 y un Average de 05 segundos, haciendo la obtención de datos mucho más estable como puede observarse.



Figura 5.16: Configuración de nuestros sensores 2537 Paddlewheel Flow Sensor con una Sensitivity (sensibilidad) de 7 y un Average (promediado) de 05 segundos, para la obtención de datos estables

5.1.7. Factor K

El factor K tiene un papel muy importante en el funcionamiento/lectura del sensor, debido a que este factor cambia según la estructura en la que esté, y la forma en que este fue instalado.

¿Qué es el factor K?

En términos simples, este factor representa el número de giros que la paleta del sensor debe dar para representar una cantidad de caudal que pasa a través de la tubería (dependiendo que unidad de flujo se configuró).

De fábrica se tiene un factor K de 60, esto significa que la paleta tendrá que girar 60 veces, y esos 60 giros significaran la cantidad de flujo, por ejemplo 1 litro.

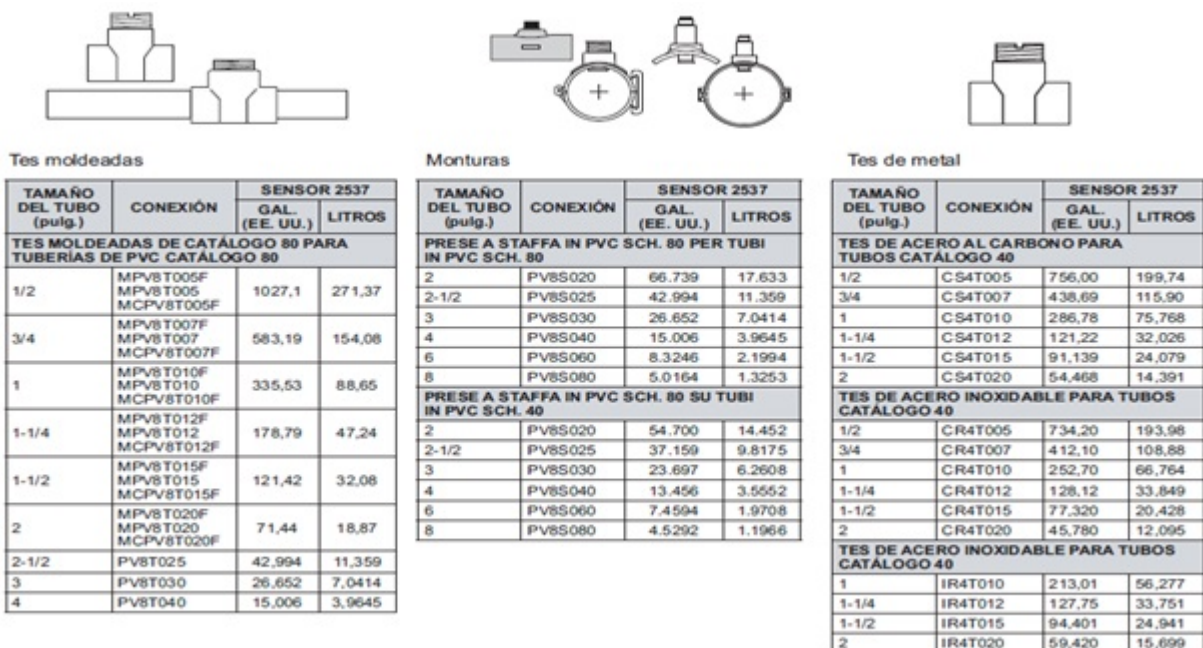


Figura 5.17: Condiciones del tipo y dimensiones del tubo, tes y monturas para configurar el factor K del sensor de flujo, las cuales van desde el tipo y dimensiones del tubo

K-Factors

Tes de unión			
TAMAÑO DEL TUBO	CONEXIÓN	SENSOR 2537	
		GAL. (EE. UU.)	LITROS
CONEXIONES DE POLIPROPILENO (DIN/ISO Y BS Y ANSI)			
DN 15	PPMT005	952,87	251,75
DN 20	PPMT007	563,10	148,77
DN 25	PPMT010	291,60	77,042
DN 32	PPMT012	169,22	44,709
DN 40	PPMT015	103,90	27,450
DN 50	PPMT020	60,789	16,060
DN 65	PPMT025	41,498	10,964
DN 80	PPMT030	26,786	7,0769
DN 100	PPMT040	17,415	4,6011
DN 125	PPMT050	10,168	2,6864
DN 150	PPMT060	7,3119	1,9318
DN 200	PPMT080	3,9946	1,0554

Tes de unión			
TAMAÑO DEL TUBO	CONEXIÓN	SENSOR 2537	
		GAL. (EE. UU.)	LITROS
CONEXIONES DE PVDF (DIN/ISO Y BS Y ANSI)			
DN15	SFMT005	827,26	218,56
DN20	SFMT007	489,87	129,42
DN25	SFMT010	283,55	74,915
DN32	SFMT012	158,59	41,899
DN40	SFMT015	86,980	22,980
DN50	SFMT020	50,385	13,312
CONEXIONES DE PVC (DIN/ISO) (SÓLO EUROPA)			
DN15	PVMT005	972,37	256,90
DN20	PVMT007	485,69	128,32
DN25	PVMT010	297,27	78,540
DN32	PVMT012	170,25	44,980
DN40	PVMT015	103,71	27,400
DN50	PVMT020	59,500	15,720
DN65	PVMT025	34,973	9,2400
DN80	PVMT030	24,981	6,6000
DN100	PVMT040	16,275	4,3000
DN150	PVMT060	8,1756	2,1600
DN200	PVMT080	4,0878	1,0800

Conexiones soldadas weldolets y brazolets			
TAMAÑO DEL TUBO (pulg.)	CONEXIÓN	SENSOR 2537	
		GAL. (EE. UU.)	LITROS
WELDOLETS DE ACERO INOXIDABLE PARA TUBOS CATÁLOGO 40			
2-1/2	CR4W025	37,600	9,9339
3	CR4W030	24,340	6,4306
4	CR4W040	13,920	3,6777
5	CR4W050	10,860	2,8692
6	CR4W060	7,5200	1,9868
8	CR4W080	4,3400	1,1466
WELDOLETS DE ACERO AL CARBONO PARA TUBOS CATÁLOGO 40			
2-1/2	CS4W025	37,600	9,9339
3	CS4W030	24,340	6,4306
4	CS4W040	13,920	3,6777
5	CS4W050	10,860	2,8692
6	CS4W060	7,5200	1,9868
8	CS4W080	4,3400	1,1466
BRAZOLET DE COBRE/BRONCE PARA TUBOS CATÁLOGO 40			
2-1/2	BR4B025	37,600	9,934
3	BR4B030	24,340	6,431
4	BR4B040	13,920	3,678
5	BR4B050	10,860	2,869
6	BR4B060	7,5200	1,987
8	BR4B080	4,3400	1,147

Monturas de hierro			
TAMAÑO DEL TUBO (pulg.)	CONEXIÓN	SENSOR 2537	
		GAL. (EE. UU.)	LITROS
MONTURAS DE HIERRO CATÁLOGO 80 PARA TUBOS CATÁLOGO 80			
2	IR85020	64,720	17,099
2-1/2	IR85025	42,480	11,223
3	IR85030	26,420	6,980
4	IR85040	14,700	3,884
5	IR85050	12,180	3,218
6	IR85060	8,4400	2,230
8	IR85080	4,9000	1,295

Figura 5.18: K-factores para tes de unión, conexiones y monturas

Este factor se tuvo que modificar debido, a que hay que observar una serie de tablas que el manual del sensor presenta para su posterior configuración.

Como puede observarse, hay muchas condiciones para configurar el factor K del sensor, las cuales van desde el tipo y dimensiones del tubo, así mismo como la montura que se puso para introducir el sensor, entre otras cosas.

Al estudiar estas tablas y compararlas con el sistema construido para este proyecto, se obtuvo que el Factor K óptimo para el sensor es Factor K = 5. Este valor hace referencia a que la paleta de nuestros sensores de flujo 2537 Paddlewheel Flow Sensor cada vez que esta gire 5 veces, marcarán una unidad de medida (Litro), la cual podrá observarse en el display.

5.1.8. Sensor de Presión YOKOGAWA EJA530A DPSharp

Para medir la presión en el sistema de tuberías, se hizo uso de sensores de presión de la marca DPSharp, específicamente el YOKOGAWA EJA350A Pressure sensor.

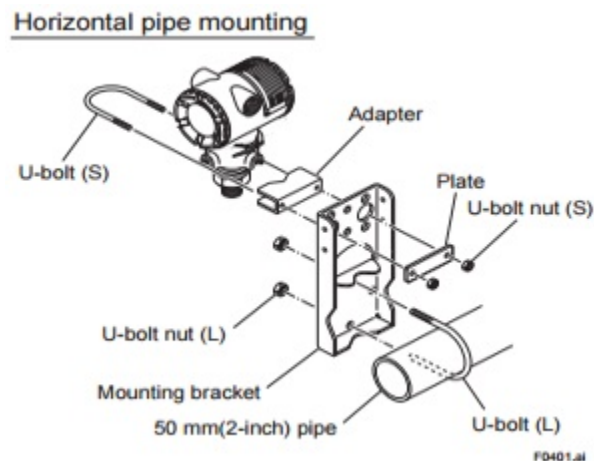


Cuadro 5.3: Sensor de presión Yokogawa modelo EJA350A

Instalación

Para la instalación de este sensor se procedió a realizar y tomar en cuenta las mismas recomendaciones que el sensor de flujo Signet 2537.

La única diferencia entre estos dos es que este sensor necesita tener una base o montura más fuerte, con el objetivo de evitar cualquier vibración posible. Debido a que estas vibraciones producirían mucho ruido a la hora de la lectura, y de la misma manera datos posiblemente erróneos.



Cuadro 5.4: Ejemplo de montura del sensor

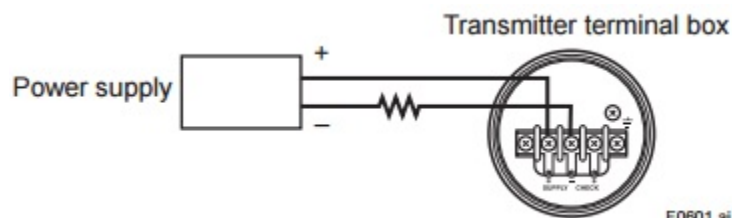
Debido a que no contábamos con los materiales necesarios para realizar la instalación recomendada, se procedió a instalar los sensores usando como base una abrazadera y posteriormente una pequeña válvula para mantener una distancia considerable entre el tubo y el sensor, reduciendo de esta forma cualquier vibración proveniente de las tuberías.

Además, está válvula manual servía para activar o desactivar la lectura del sensor, debido que si esta se encontraba cerrada no podría detectar ninguna presión proveniente del recorrido del flujo.



Cuadro 5.5: Válvula manual para activar o desactivar la lectura del sensor

Este sensor al igual que el sensor de flujo, eran sensores de corriente, por lo que la conexión se realizaba de la misma manera, terminal positiva a +V y terminal negativa (señal) a la entrada del circuito.



Cuadro 5.6: Conexión del sensor Yokogawa

Características electrónicas

CARACTERÍSTICAS ELECTRÓNICAS DEL SENSOR YOKOGAWA	
Voltaje de alimentación	24 – 40 VDC nominal $\pm 10\%$, regulated, 30 mA max. Current 4 to 20 mA
Short Circuit Protected	Up to 40 V, 1 hour
Over-Voltage Protection	40 VDC over 1 hour

Cuadro 5.7: Características electrónicas del sensor Yokogawa

La señal de salida que proporciona este sensor es de 4-20mA, lo mismo que el sensor de flujo, por lo que el circuito empleado a estos sensores fue el mismo mencionado con anterioridad (Convertidor 4-20mA a 0-5v).

Este Sensor a diferencia del utilizado en la medición de flujo, no cuenta con un display en el cual pudiéramos modificar o configurar su funcionamiento. Por lo que desconocíamos la cantidad de presión que este marcaba. Esto no ocasionó ningún problema, debido a que la presión que obtenemos en los sensores la podemos obtener mediante cálculos matemáticos.

(Aquí irían los cálculos. Los simples.)

5.2. Características del software utilizado. El LABVIEW

Para poder llevar a cabo la interfaz gráfica de este proyecto, fue necesario utilizar un software que nos otorgara los componentes necesarios. Para ello utilizamos el software conocido como LabVIEW.

Como se sabe LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado para la ingeniería y la ciencia. El lenguaje de programación gráfica (G) que utiliza LabVIEW es un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que permite escribir un código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja a su proceso de pensamiento.

Algunas de las características principales de este software consisten en lo siguiente:

- Utiliza una sintaxis de programación gráfica diseñada para asemejarse a la forma en la que un ingeniero traduce sus pensamientos a código.
- Adquiere datos desde cualquier hardware de medida por cualquier bus.
- Desarrolla interfaces de usuario rápidamente, para visualización de datos e ingreso de información con una interfaz de clic y arrastre.

Para la obtención de datos de los sensores, y utilizar dichos datos para la representación en forma gráfica, se hizo uso de una tarjeta de adquisición de datos, específicamente la National Instrument USB-6008 que es compatible con el software de LabVIEW, para que ésta, a su vez, vía USB transfiriera los datos hacia nuestra Computadora.



Figura 5.19: Tarjeta de adquisición de datos de la National Instrument USB-6008

Este dispositivo cuenta con las siguientes características:

- 8 entradas analógicas (12 bits, 10 kS/s)
- 2 salidas analógicas estáticas (12 bits); 12 E/S digitales; contador de 32 bits
- Energizado por bus para una mayor movilidad, conectividad de señal integrada
- Compatible con LabVIEW, LabWindows™/CVI y Measurement Studio para Visual Studio .NET
- Considera el USB-6001 para resolución de 14 bits y velocidades de muestreo más altas.

Requerimientos y compatibilidad

OS information	Driver information	Software compatibility
Mac OS X	NI-DAQmx	ANSI C/C++
Windows 2000XP	NI-DAQmx Base	labVIEW
Windows 7		LabWindows/CVI
Windows CE		Measurement Studio
Windows MOBILE		SignalExpress
Windows VISTA 32-BIT		Visual Basic NET
Windows VISTA 64-BIT		Visual C#

Cuadro 5.8: Requerimientos del NI USB-6008

Product	Analog inputs	Input resolution	Max sampling rate	Analog outputs	Output resolution	Output rate (Hz)	Digital I/O lines	32-bit counter	Triggers
USB-6008	8 single-ended/4 differential	12	10	2	12	150	12	1	Digital

Cuadro 5.9: Características del NI USB-6008

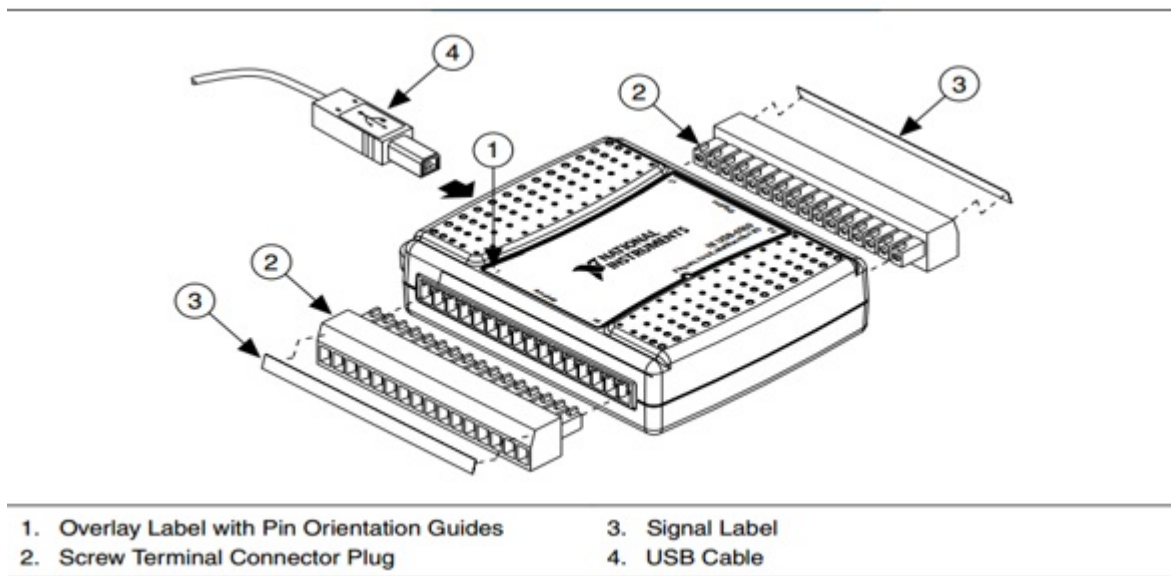


Figura 5.20: Diagrama de aplicación

Terminales del NI USB-6008

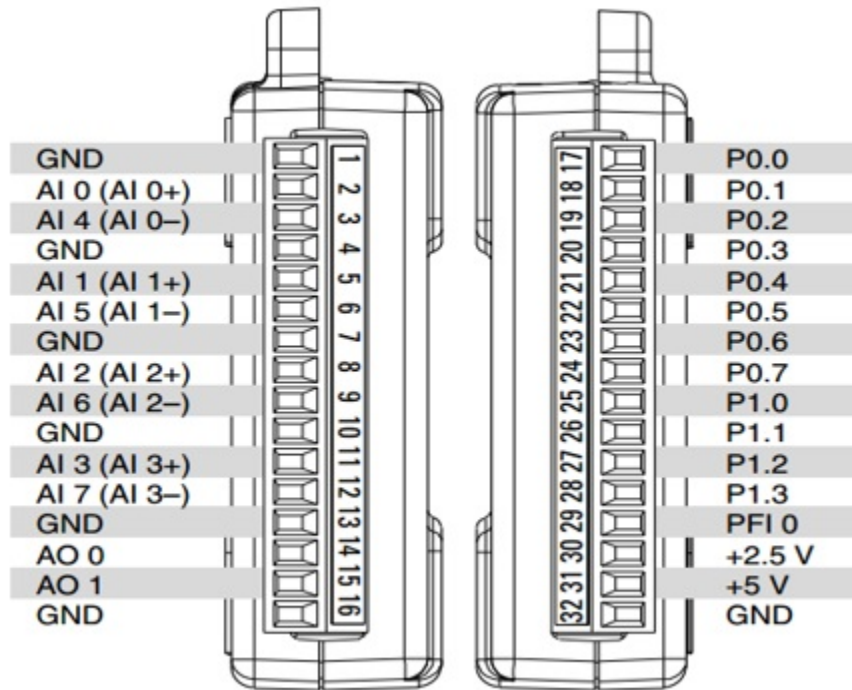
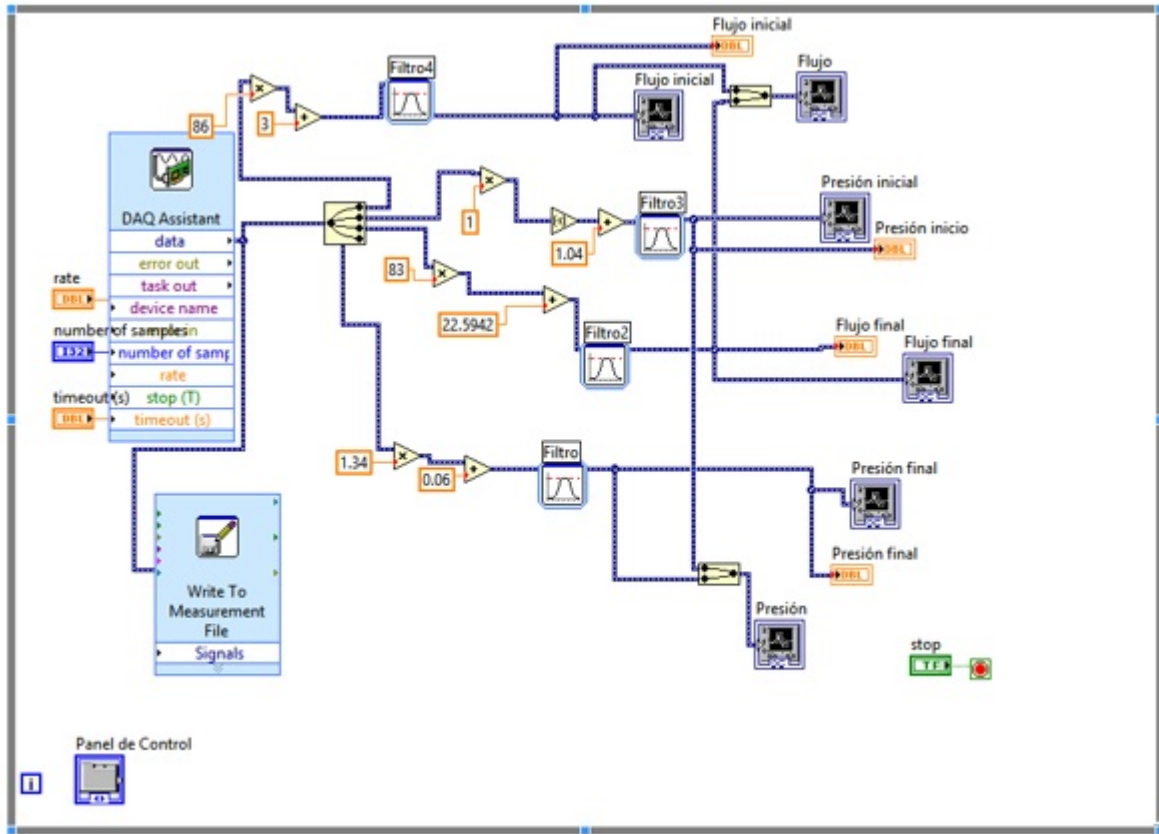


Figura 5.21: Terminales del NI USB-6008

5.3. Elaboración de la interfaz gráfica

Estas son las conexiones de nuestra interfaz gráfica.



Cuadro 5.10: Conexiones de nuestra interfaz gráfica

Debido a que la tarjeta de adquisición de datos era de National Instrument, simplifiqué la construcción de la interfaz gráfica, ya que LabVIEW dentro de sus componentes tiene bloques específicos para funcionar en conjunto con dispositivos NI.

Como puede observarse se hizo uso de un DAQ Assistant, el cual se tuvo que configurar para que funcionara correctamente. La configuración se llevó de la siguiente manera.

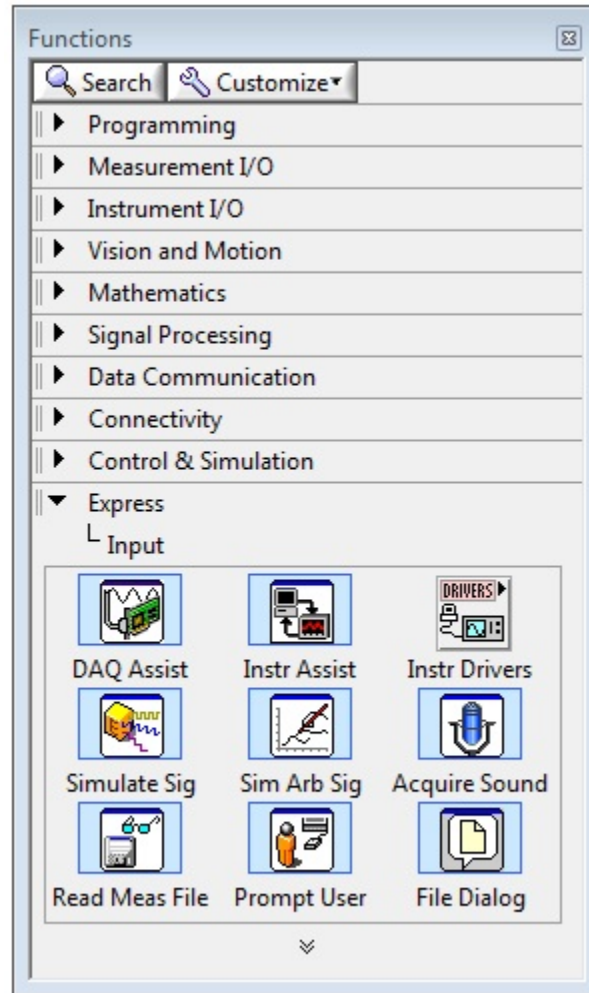


Figura 5.22: Configuración de la DAQ

Dentro de nuestra paleta de opciones, accedimos a Express y seleccionamos la opción DAQ Assist. Posteriormente seleccionamos el dispositivo con el cual trabajaríamos, en este caso se seleccionó NI USB-6008. Una vez hecho esto, elegimos la opción de “adquirir señal” y debido a que trabajaríamos con Voltajes seleccionamos “entradas analógicas” como se muestra a continuación.

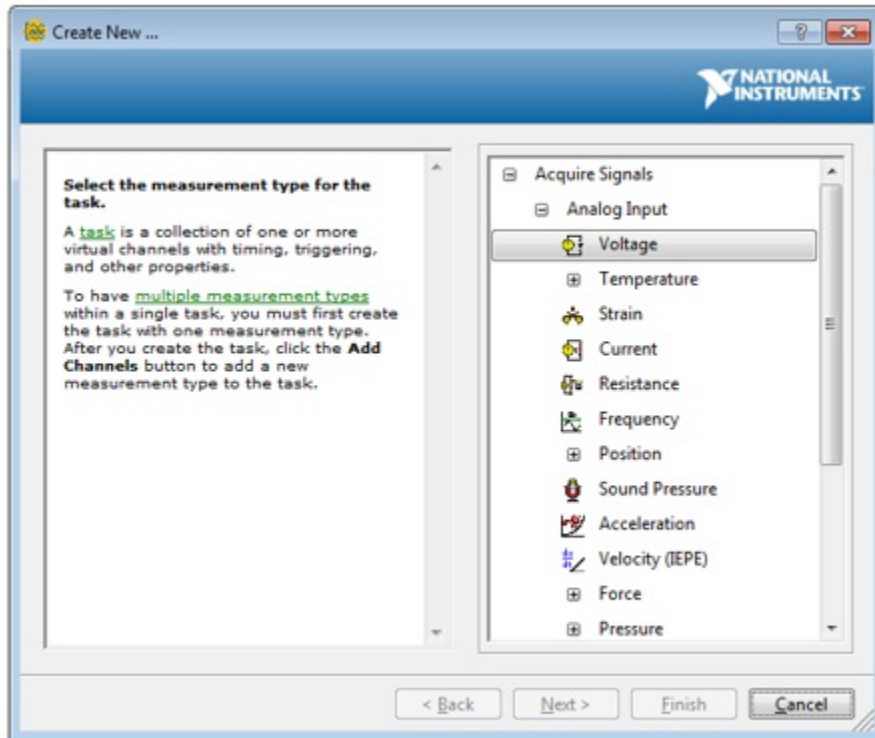


Figura 5.23: Entradas analógicas

Posteriormente, se seleccionan una a una, las terminales que se tomarán como entrada y se configura cada una de ellas. En este caso solo utilizamos 3 entradas desde ai0 hasta ai3. Donde ai0 y ai2 se configuraron para los sensores de flujo, de lo contrario a01 y a03 se configuraron para los sensores de presión. Estas configuraciones se muestran a continuación.

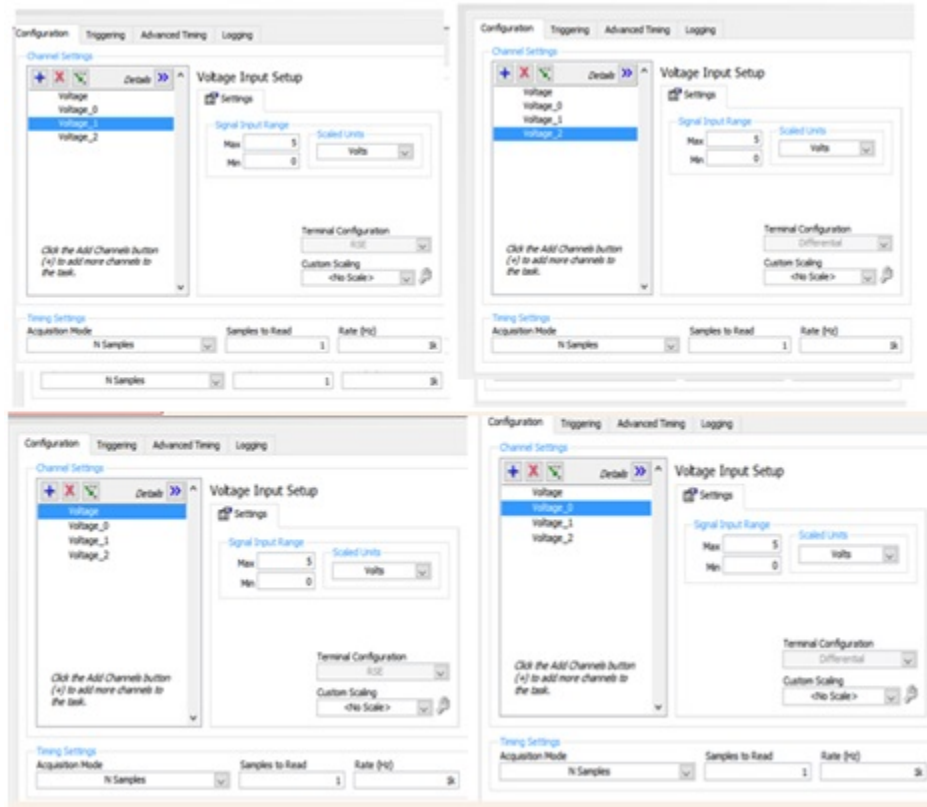


Figura 5.24: Configuración de las entradas de voltaje ai0 a ai3

Siguiendo el diagrama de conexión anteriormente mostrado de la NI USB-6008, se realizaron las conexiones correspondientes de acuerdo a las terminales que se seleccionaron (ai0, ai1, ai2, ai3).

Una vez hecho esto seguimos con los ajustes necesarios para mostrar los datos correctos en las gráficas. Para ello utilizamos los valores que el sensor de flujo nos otorgaba, esto se lograba viendo el display del sensor.

En el display el sensor marcaba a 50Hz (se usaba esta frecuencia pues era necesaria para poder corroborar el modelo matemático) la cantidad de 449 litros/minuto.

Como nosotros estábamos leyendo voltaje, en nuestras gráficas nos marcaba los 5 v, pero como era necesario convertir esos 5v en las unidades que se estaban manejando, se hicieron uso de multiplicadores y sumadores para convertir esa cantidad a la deseada. Esto se realizó como se puede observar en la siguiente imagen.

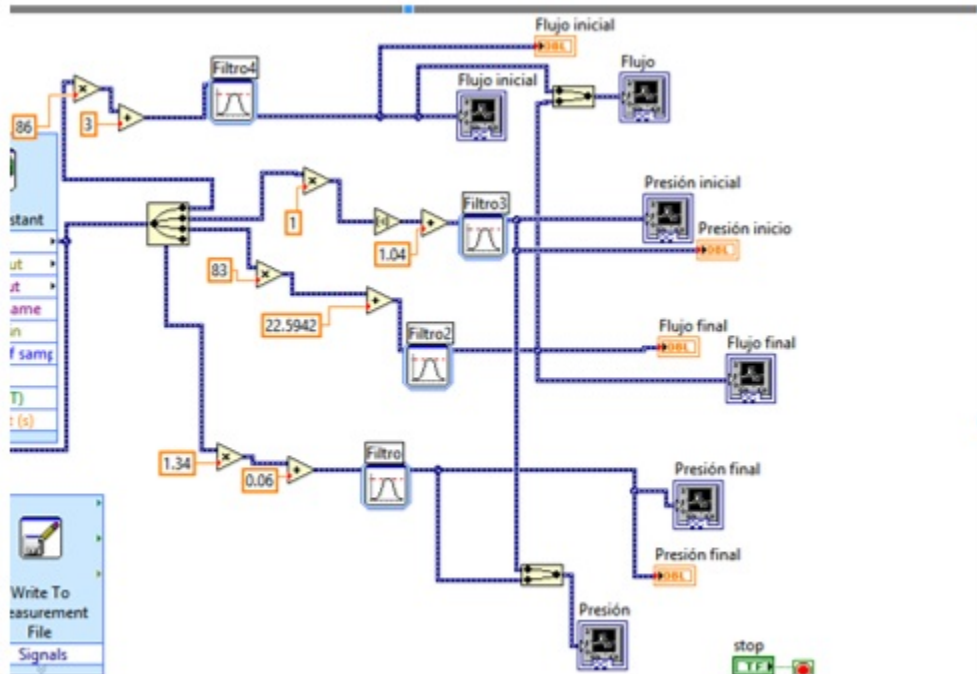


Figura 5.25: Conversiones realizadas

De lo contrario, hablando de los sensores de presión, estos sensores no cuentan con un display en el cual se observe la cantidad de presión leída. Pero esta presión, dada en metros columna de agua (MCA), podía ser obtenida tomando en cuenta la estructura del sistema de tuberías. Realizando las operaciones necesarias se obtiene que la presión de nuestro sistema de tuberías es de 1.82 MCA, del mismo modo que los dato de flujo, se realizaron los arreglos correspondientes para que se observara la cantidad en las unidades indicadas.

Posteriormente, una vez convertida la señal leída, en unidades deseadas, a cada una de estas señales se les puso un filtro pasa bajos, con el fin de disminuir el ruido de las señales. Y esta señal filtrada es la que se manda hacia nuestras gráficas.

5.3.1. Diseño de la interfaz final

El diseño de la Interfaz principal quedó de la siguiente manera.

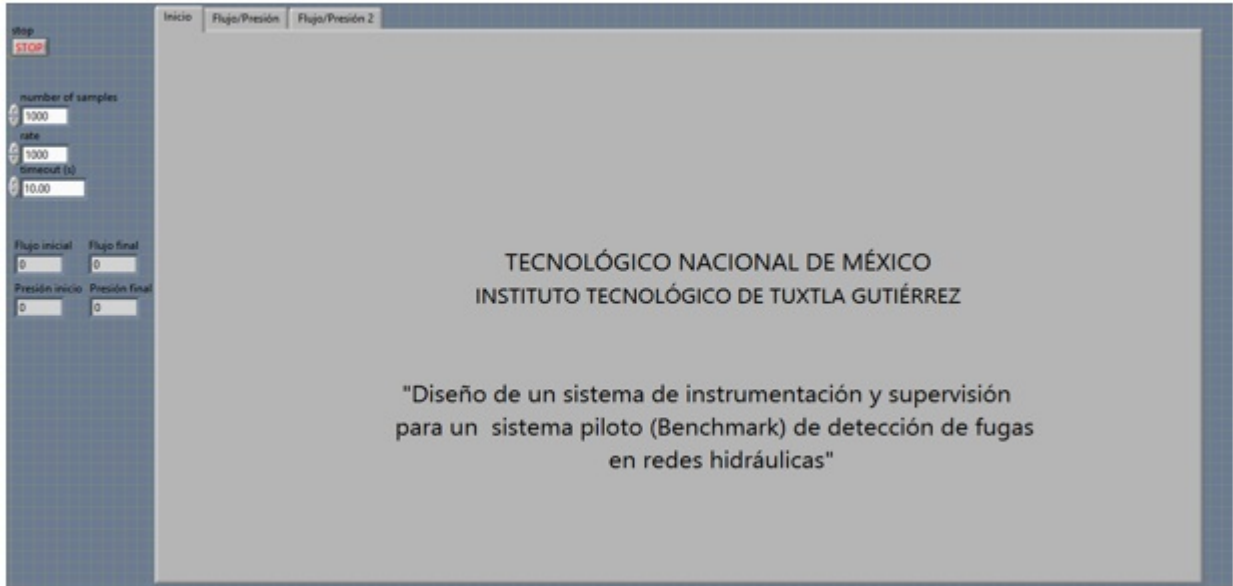


Figura 5.26: Portada de la interfaz gráfica

Esta cuenta con 3 pestañas, en la primera podemos encontrar una pequeña presentación del proyecto, en el cual se hace mención al Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez que fue donde se llevó a cabo este proyecto.

En la segunda pestaña, encontramos las gráficas por separado de cada sensor. Esta pestaña se añadió con el fin de que el observador pueda apreciar, si así lo desea, el comportamiento de estos de manera individual.

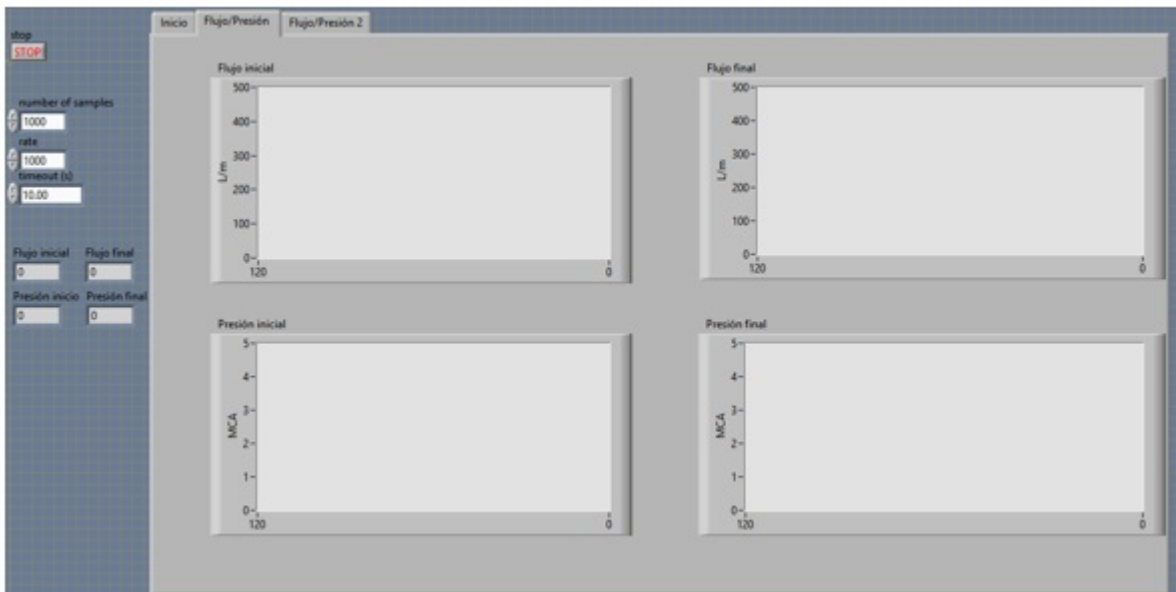


Figura 5.27: Segunda pestaña de la interfaz

Por último, se realizó la pestaña en donde se puede observar de manera constante y en conjunto, el comportamiento de los sensores de flujo en una sola gráfica, así mismo como los sensores de presión.

Está gráfica hace de manera más sencilla observar el cambio que ocurre a la hora de simular las fugas. A continuación se presenta este cambio, al simular una fuga.

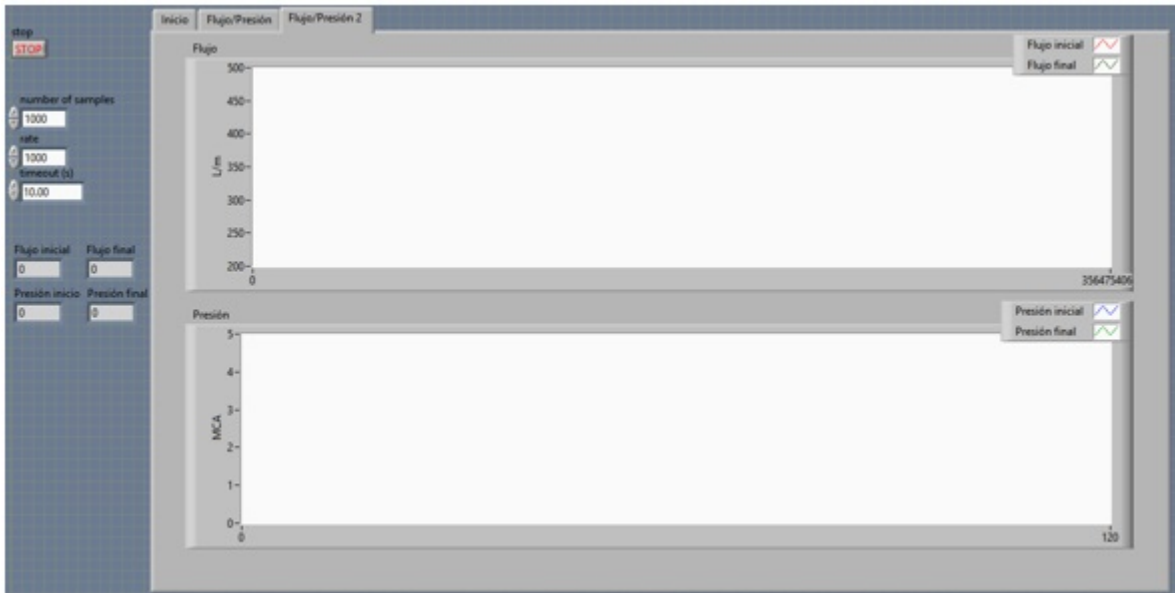


Figura 5.28: Gráficas en conjunto

Cambio de flujo al simular una fuga.

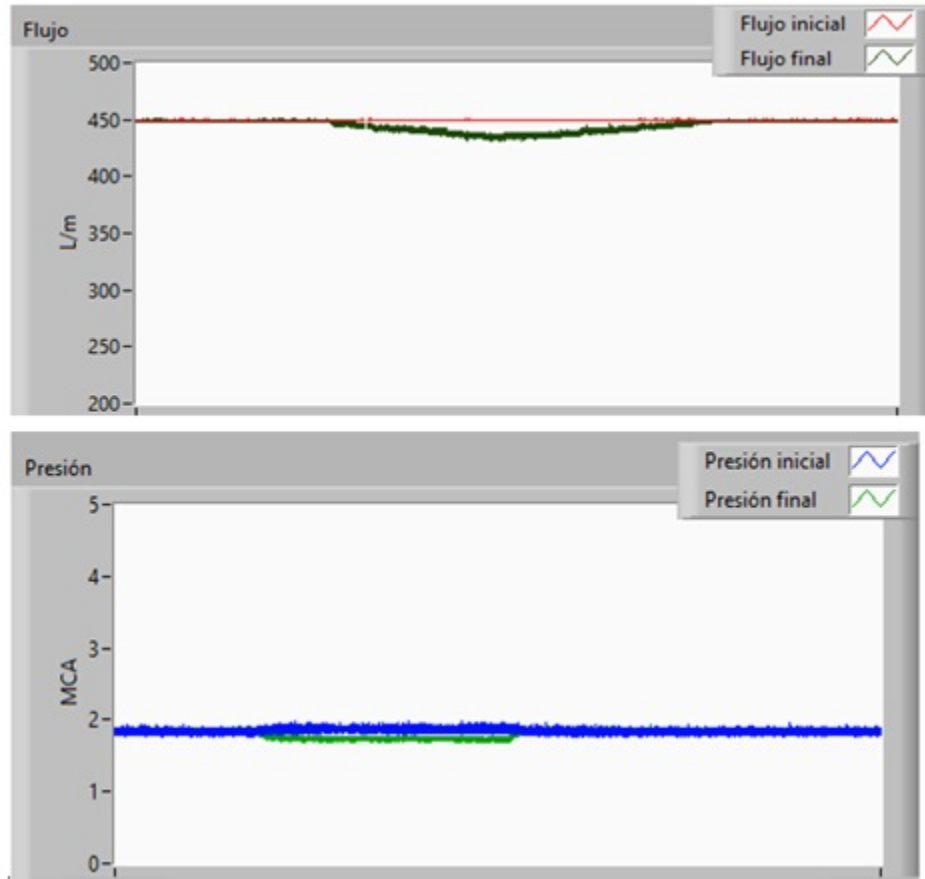


Figura 5.29: Gráfica de flujo y presión al simular una fuga

5.3.2. Implementación de función a señal

Como se habló en apartados anteriores, se realizaron ciertas configuraciones a la señal, estas se hicieron mediante operadores numéricos.

Durante el desarrollo de la interfaz, al momento de realizar las pruebas se observó un error, el cual era que la señal del sensor de flujo final (al permanecer el sistema en funcionamiento y sin fugas) no marcaba la misma cantidad de flujo con respecto al sensor de flujo inicial. Pero esto no era un problema de los sensores, dado que al revisar los datos que marcaban mediante el display, estos marcaban la misma cantidad de flujo en ambos, por lo que se supuso que el error podría estar en la cantidad de voltaje que los circuitos nos entregaban, en donde uno de estos circuitos (inicial) no daba 5.1v y el circuito para el sensor final daba 4.9v, esta podría ser la razón por la que al momento de obtener las lecturas, se hacía presente una diferencia de flujo en las lecturas.

Este problema se puso a experimentos, bajando la frecuencia de la bomba mediante el variador de 5 en 5hz hasta llegar a 0 para observar el comportamiento. Se observó que la diferencia de lecturas no era lineal, si no que esta con respecto a la frecuencia iba cambiando, ante esto, se tuvo

que buscar una función la cual compensara esta diferencia en cada momento.

- $f = [50:-5:0]'$; (Frecuencias de 50 hasta 0 hz)
- $d = [23,30,31,26,16,16,13,8,0,0,0]'$; (Datos obtenidos en la lectura final desde 50 hasta 0 Hz)
- `plot(f,d,'*')` (Se gráfica los datos, señalando con un asterísco la ubicación de cada punto)

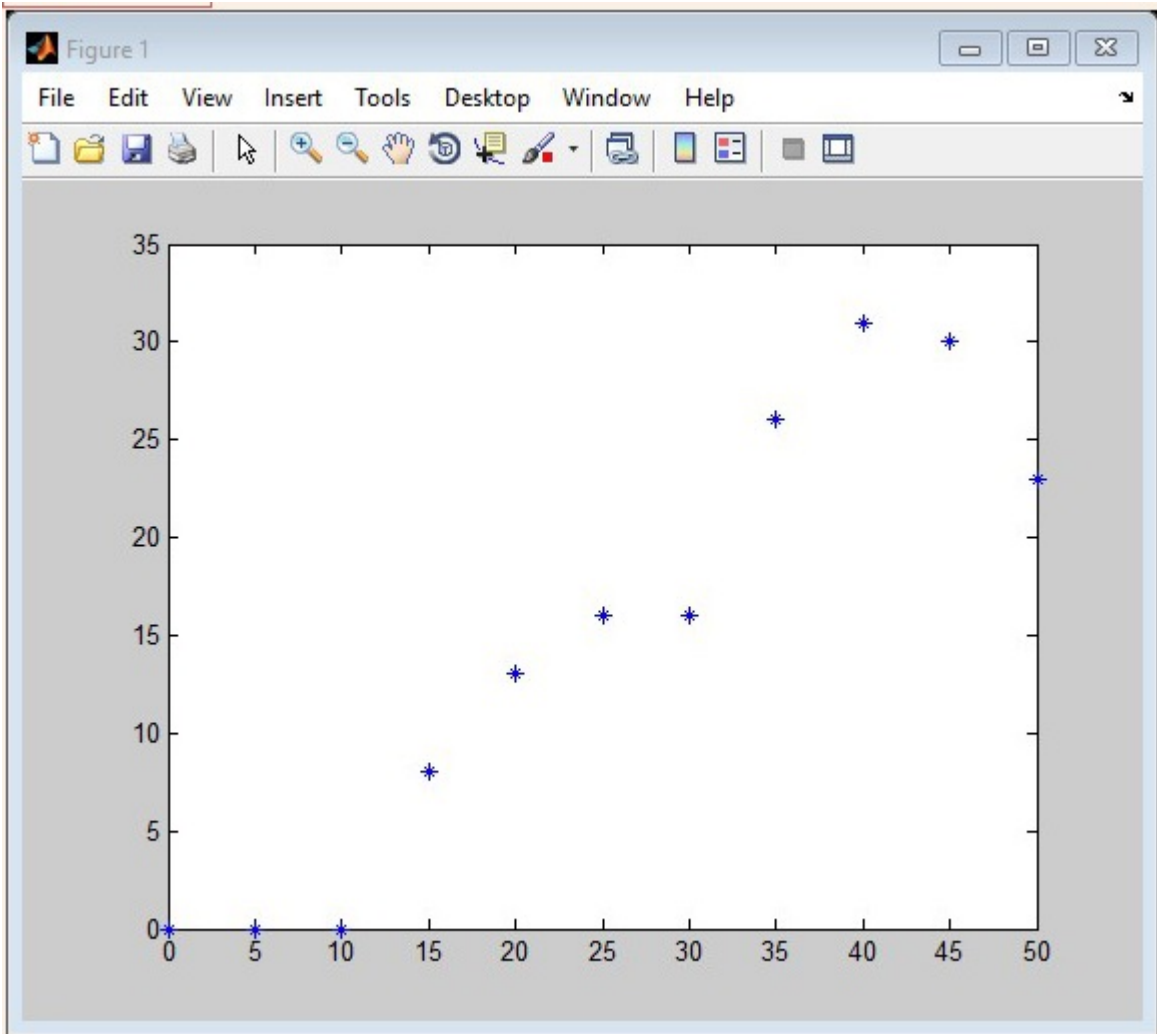


Figura 5.30: Gráfica de diferencias

- $c = \text{polyfit}(f,d,5)$ (Se propone un polinomio de grado 5 para esta función)

$c =$

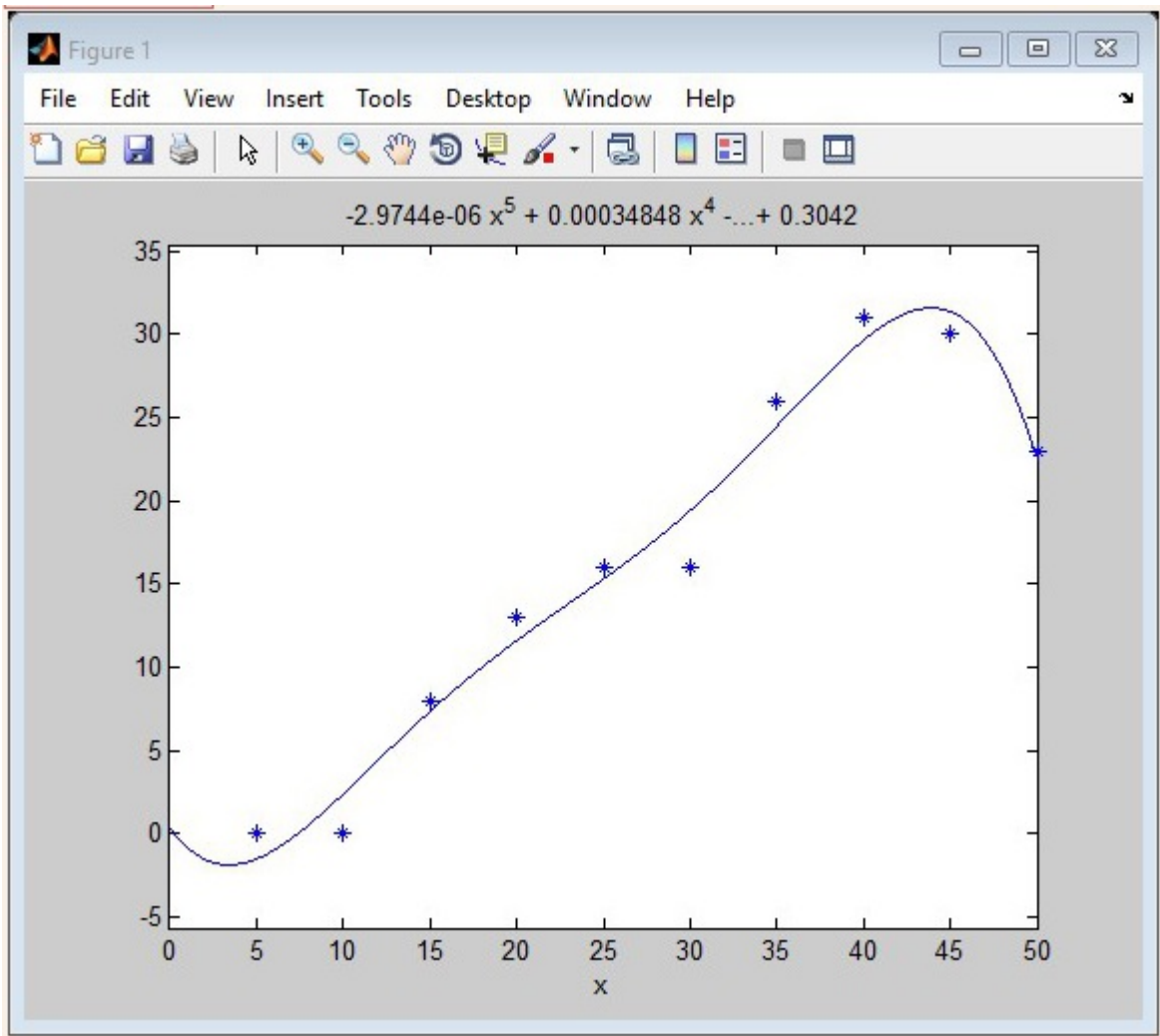
-0.0000 0.0003 -0.0149 0.2824 -1.4432 0.3042

- `poly2str(c,'x')`

ans =

$$-2.9744e-06 x^5 + 0.00034848 x^4 - 0.01488 x^3 + 0.28238 x^2 - 1.4432 x + 0.3042$$

- hold on (se mantiene la gráfica, para posteriormente graficar una nueva sobre esta misma)
- ezplot(' -2.9744e-06*x^5 + 0.00034848*x^4 - 0.01488*x^3 + 0.28238*x^2 - 1.4432*x + 0.3042',[0,50]) (Se gráfica la función polinomial propuesta, junto a la original para observar el comportamiento)



Cuadro 5.11: Compensación de señal

Como puede observarse, al proponer el polinomio de grado 5 y graficarlo, se obtiene una nueva gráfica la cual pasa por todos los puntos o muy aproximados a ellos, lo que hace de esta función, una función óptima para este problema.

- $-2.9744e-06*x^5 + 0.00034848*x^4 - 0.01488*x^3 + 0.28238*x^2 - 1.4432*x + 0.3042$

Esta función se introdujo en la señal del sensor de flujo de salida, en donde la variable X es la frecuencia máxima a la cual el sistema se trabaja (50Hz). Para evitar el problema de meter toda esta función en Labview, y así ahorrar espacio dentro de la misma, antes, se resolvió dicha función y posteriormente el resultado se sumó a la señal del sensor.

Este valor puede observarse en este pequeño bloque de suma.

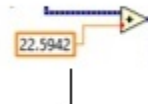


Figura 5.31: Función reducida e integrada a LabVIEW

5.4. Detección de fugas en el sistema de tuberías.

Para buscar esta función se hizo uso de MATLAB, en el cual se introdujeron los datos de cada lectura y se procedió a graficar tuberías.

Se procedió a la realización de experimentos con el fin de comprobar si el sistema de tuberías funcionaba de manera correcta. De manera visual se puede observar el comportamiento de la presión al abrir 2 distintas válvulas.

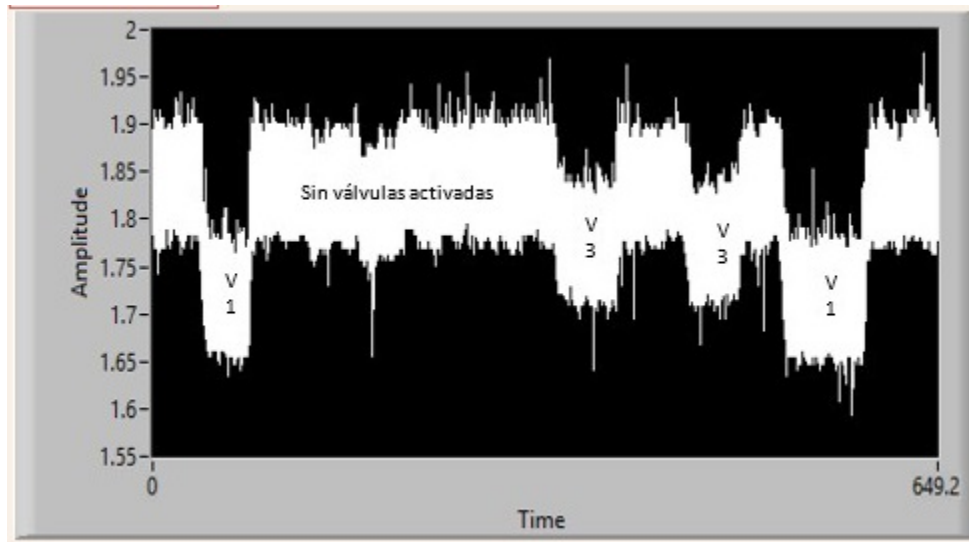


Figura 5.32: Detección de fugas

Se realizó dicho experimento a lo largo de casi 11 minutos, en donde se fueron accionando de manera aleatoria 2 válvulas (Válvula 1 y Válvula 3), con el objetivo de observar la diferencia de

presión que estas ocasionaban.

En la imagen anterior se observa que existe una diferencia en la presión al abrir una válvula con respecto a la otra. En el caso de la primera válvula la presión baja hasta un aproximado de 1.7 m. c. a. de lo contrario a lo que sucede al accionar la válvula 3, la presión baja a un aproximado de 1.77 m. c. a.

Ambas válvulas, al cerrarse, la presión vuelve a su presión original, 1.82 m. c. a. Obteniendo como resultado la parametrización de nuestro sistema y acreditando de esta manera la detección de fugas.

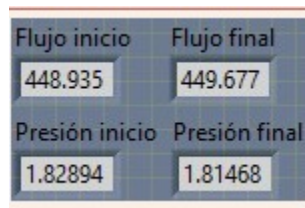
Es importante mencionar que la cantidad de ruido que se logra observar en la imagen, es debida al margen con la que esta se observó, en los resultados se mostrarán los cambios de lecturas con un margen más amplio.

5.5. Resultados:

Una vez comprobada la funcionalidad del sistema, se realizaron los experimentos necesarios, en los cuales se tuvieron que ir accionando las válvulas de manera consecutiva hasta llegar al número máximo de válvulas existentes en el sistema.

Estos fueron visualizados en la interfaz creada, utilizando la tercer pestaña del panel de control, donde se observa el comportamiento de ambos flujos con respecto al tiempo en una sola gráfica, así mismo los datos de presión.

A continuación se presentan los resultados:



Flujo inicio	Flujo final
448.935	449.677
Presión inicio	Presión final
1.82894	1.81468

Cuadro 5.12: Datos sin fugas

Como se mencionó con anterioridad, el flujo y presión en el sistemas de tuberías cuando no se presenta ningún tipo de fugas, el valor de estas lecturas son las mismas obtenidas por medio de los cálculos matemáticos realizados, los cuales pueden observarse en la imagen. Teniendo esto presente, se realizaron los experimentos necesarios, activando una a una las fugas hasta tener todas las fugas posibles activadas a la vez. Estos experimentos se presentas a continuación.

5.5.1. Experimento #1 “Gráficas al accionar una válvula”

Se activó la primer válvula, con el objetivo de visualizar en la interfaz gráfica el comportamiento de la lectura de flujo y presión a lo largo de un periodo de tiempo.

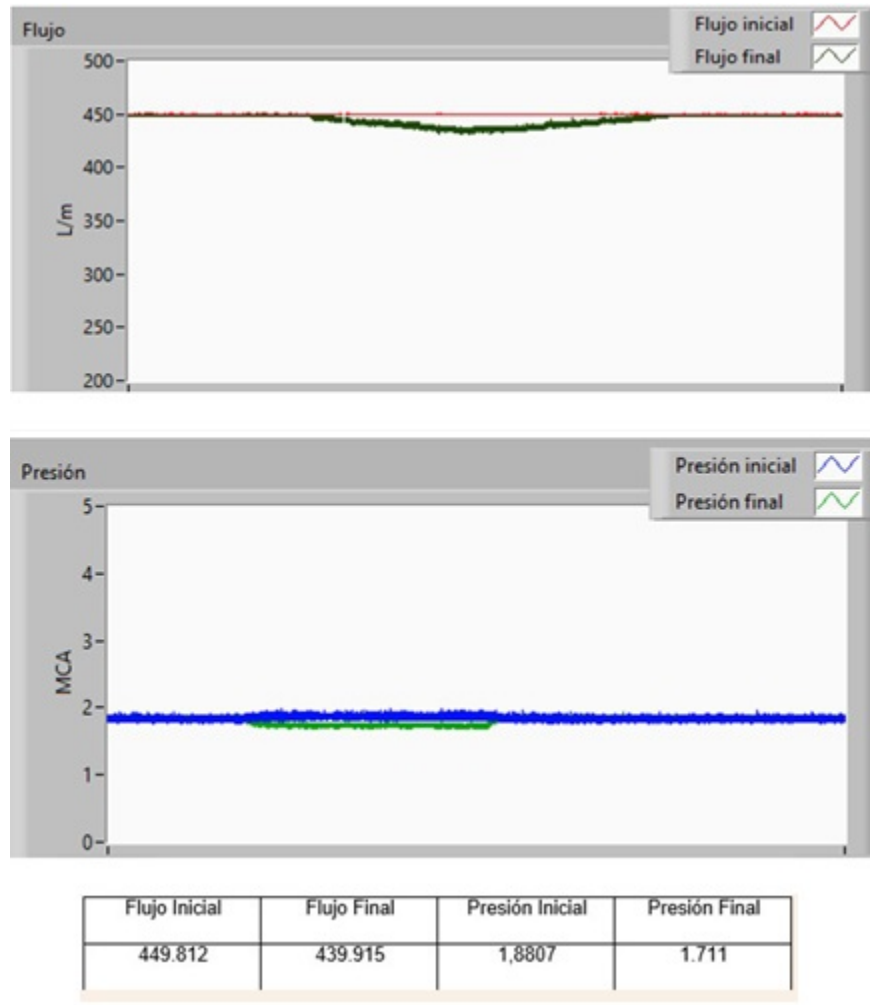


Figura 5.33: Gráficas al accionar una válvula

5.5.2. Experimento #2 “Gráficas al accionar dos válvulas”

Sin cerrar la primer válvula, se procedió a activar una segunda válvula y observar su comportamiento.

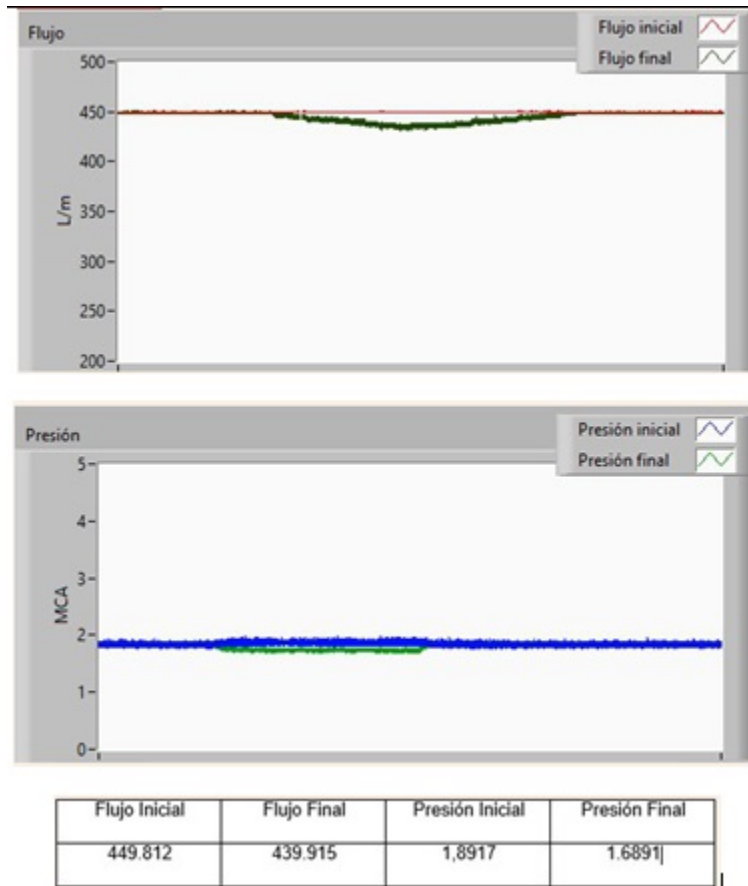


Figura 5.34: Gráficas al activar 2 válvulas

5.5.3. Experimento #3 “Gráficas al accionar tres válvulas”

Comportamiento de las lecturas al activar una tercer válvula.

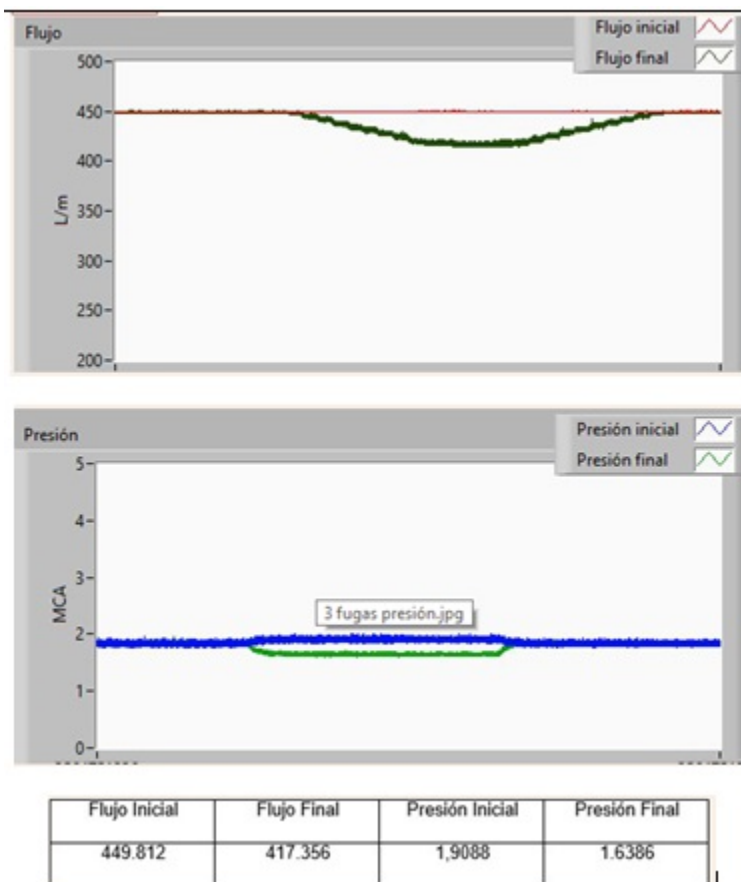


Figura 5.35: Gráficas al activar 3 válvulas

5.5.4. Experimento #4 “Gráficas al accionar cuatro válvulas”

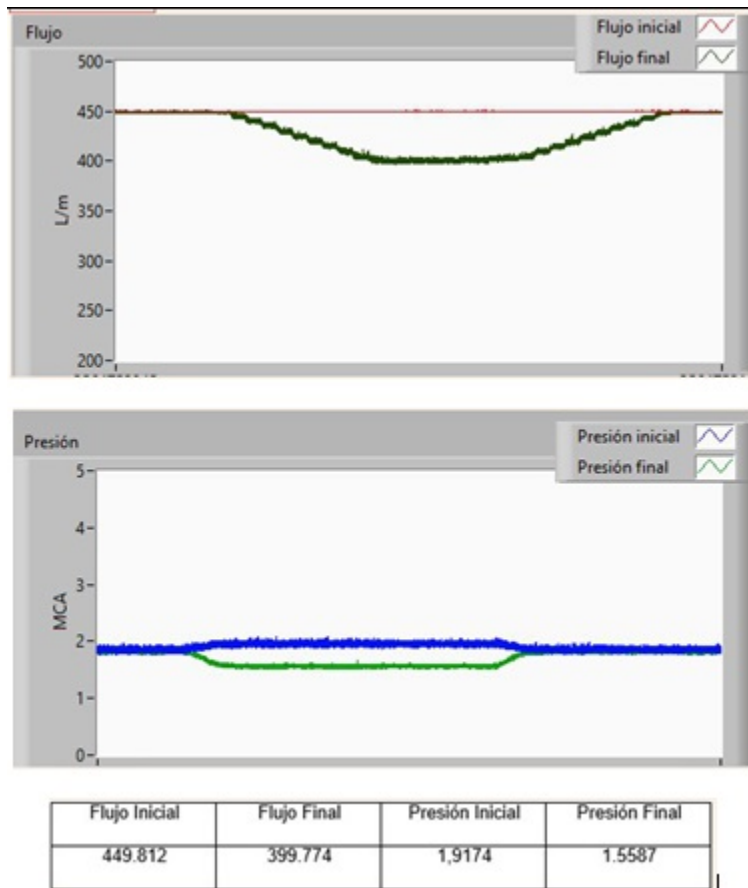


Figura 5.36: Gráficas al activar cuatro válvulas

5.5.5. Experimento #5 “Gráficas al accionar cinco válvulas”

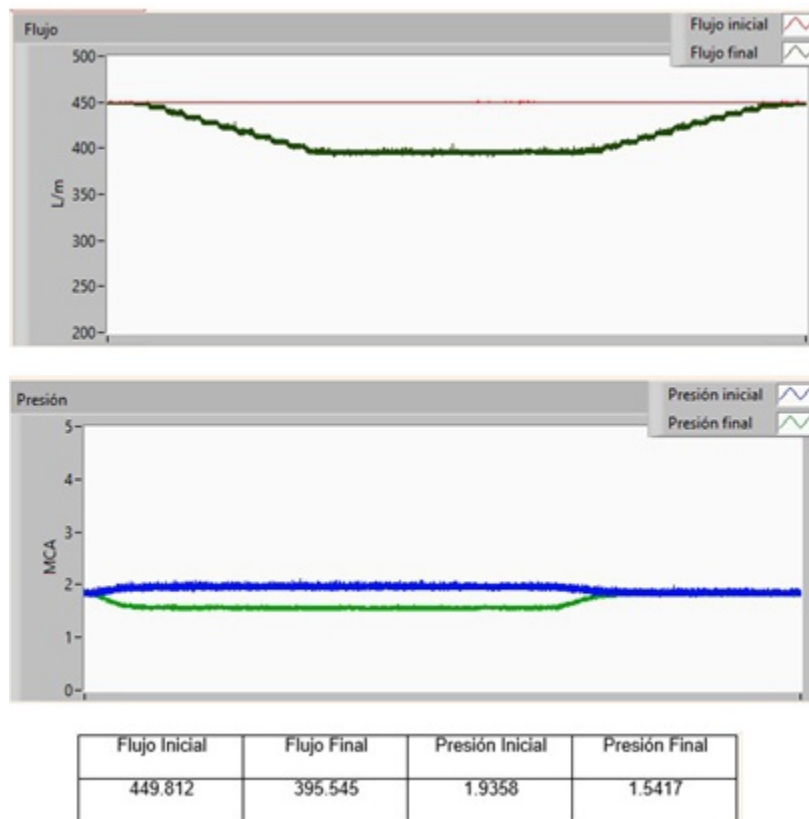


Figura 5.37: Gráficas al activar cinco válvulas

Cada gráfica viene con 2 diferentes lecturas, distinguidas por colores distintos, en donde se aprecia el dato inicial comparado con el dato final como se puede observar en las cotas indicadas en la esquina superior derecha de cada una de ellas. Hablando sobre la presión, conforme la válvulas se van accionando, la presión tiene un ligero aumento en la lectura de entrada.

Como puede observarse, cada experimento se llevó en un lapso de tiempo, mientras más válvulas se abrían, mayor era el tiempo de experimento pues era necesario esperar que la gráfica se definiera totalmente, para así, poder observar correctamente su funcionamiento.

Capítulo 6

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

1. Se encontró que las fugas en una red hidráulica pueden tener diversos orígenes, sin embargo, la principal causa es la presión con la que se transporta el fluido. Entonces, concluimos que es la relación presión – fuga la que debe atenderse mayormente para disminuir el número de fugas en un sistema de distribución de agua.
2. Es prácticamente imposible obtener un 100 % de eficacia en cuanto a la cantidad de agua entregada a los usuarios con relación al agua obtenida en las fuentes de captación. No se trata de eliminar todas las fugas en un sistema de distribución, sino de disminuir su número a través de sistemas tecnológicos que impliquen menos costos en la operación del sistema. Debe recordarse que, contradictoriamente, después de localizar una fuga y arreglarla, la presión aumenta y provoca otra fuga en otro lado de la tubería. La relación fuga – presión estará siempre presente.
3. Por ello, la creación de un benchmark resulta importante, se trata de obtener una presión ideal que los sistemas locales de distribución de agua lo tomaran como criterio en sus decisiones para controlar la presión del envío del líquido.
4. La implementación de más sensores al sistema de tuberías, otorgará una mayor eficiencia a la lectura de datos correspondiente, dándole al usuario la capacidad de poder observar con una mayor precisión en que lugar de la tubería se encuentra la fuga.

6.2. Fuentes de información

6.2.1. Referencias

Arnalich Castañeda, Santiago, (2008), Abastecimiento de agua por gravedad, concepción, diseño y dimensionado para proyectos de cooperación, Arnalich, Water and hábitat.

Cipriano, Aldo (2006) FDI/FTC en identificación de sistemas, Pontificia Universidad Católica de Chile Departamento Ingeniería Eléctrica.

Curia, L. y Gómez; S. (2001), Resolución de redes de distribución hidráulica mediante redes neuronales, Información Tecnológica, 12 (4), Centro de Información Tecnológica, Buenos Aires.

Ferro, Gustavo, Lentini, Emilio y A. Romero, Carlos (2011), Eficiencia y su medición en prestadores de servicios de agua potable y alcantarillado, ONU, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Santiago de Chile.

Franco Torres, Ignacio, (2013), Detectores, sensores y transductores, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica.

Fuentes-Mariles, O.A., Rodríguez-Vázquez K. y Palma-Nava A. (2011), Estimación y localización de fugas en una red de tuberías de agua potable usando algoritmos genéticos, Ingeniería Investigación y Tecnología.

González G., Mahuli A. (S/f), Tema No. 1 Flujo de fluidos en fase líquida.

Jiménez Terán, José Manuel, (S/f), Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario, Facultad de Ingeniería Civil, Campus Xalapa, Universidad Veracruzana

Mott, Robert, Mecánica de fluidos, (2006) Pearson Educación, México.

Ojeda Ramírez, Maricela, (2012), Metodología para la reducción de pérdidas en redes de agua potable y su puesta en práctica en la red de Ciudad Universitaria de la UNAM, Tesis para obtener el título de Ingeniera Civil.

Rossman A. Lewis, (2002) EPANET 2.0 en español. Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua.

Rodríguez Castro, Jesús Alberto (S/f), Apuntes de hidráulica básica, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.

V. G. Tzatchkov y L.A. Noda R.,(2002) Modelación numérica de fugas y consumo en redes de agua potable, Avances en la hidráulica de redes de distribución de agua potable, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

6.2.2. Bibliografía

Bahve, P. (1991), Analysis of flow in water distribution networks. Technomic Publishing Co. Lancaster, (Citado por Curia, L. y Gómez; S. (2001)).

Boulos, P. Ormsbee, (1993), Explicit network calibration for multiple loading conditions Civil Engineering Systems, (Citado por Curia, L. y Gómez; S. (2001).

Germanoupulus, G. (1985), “A technical note on the inclusión of pressure dependent demand and leakage in wáter supply networks”, Civ. Eng. Syst. 2, p. 171 – 179 (citado por Tzatchkov e Izurieta, 1996).

Goodwin, S. J. (1980) The results of the Experimental Program of Leakage and Leakage Control, Informe Técnico TR154, Water Research Center (citado por Tzatchkov e Izurieta, 1996).