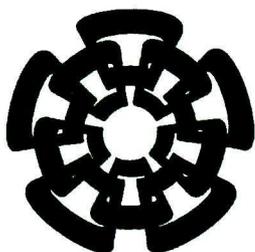


CT-927-551
DON: 7016



Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional
Unidad Guadalajara

Diseño de un Banco de Aisladores de Fugas

Tesis que presenta:

José Eduardo Carvajal Rubio

para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

en la especialidad de:

Ingeniería Eléctrica

Director de Tesis

Dra. Ofelia Begovich Mendoza

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
LIBROS**

CLASIF. CT00828
ADQUIS. CT-927-551
FECHA: 23-05-07016
PROCED. De N. C. 2016
\$

Resumen

En esta tesis se diseñó e implementó en tiempo real un banco de aisladores de fugas, el cual utiliza la información de cinco métodos diferentes de localización de fugas con los cuales por medio de un algoritmo y la información que se recibe de los métodos se estima la posición de la fuga de una manera más fiable. Otra aportación de esta tesis fue el diseño de dos nuevos algoritmos que tienen el objetivo de estimar la posición y presión de una fuga ocurrida en una tubería, ambos están basados en las técnicas de modos deslizantes. Además se verificó su correcto funcionamiento mediante la implementación de ambos en tiempo real.

Abstract

In this thesis it was designed and implemented in real time a bank of leak location algorithms, this bank uses the estimation algorithms to estimate the leak position more reliably than the algorithms working independently. Other contribution was the design of two new leak detection and isolation algorithms based on the Sliding Modes technique and equivalent control. Besides, it was verified their proper operation in real time.

Agradecimientos

Primeramente agradezco a mis padres por su apoyo incondicional.

A toda mi familia que siempre me han apoyado y animado a seguir adelante.

A mis amigos y compañeros del Cinvestav que siempre han sido un gran apoyo.

A mi asesora la Dra. Ofelia Begovich Mendoza por su apoyo y asesoramiento.

A mis compañeros de proyecto por la ayuda que me han brindado.

A mis profesores de todos los niveles de estudio, los cuales siempre han sido una invaluable fuente de conocimiento.

Al CONACYT por la beca otorgada durante la realización de esta maestría.

Índice general

1. Introducción	1
2. Preliminares	3
2.1. Definiciones	3
2.2. Tiempo de estabilización del flujo en una tubería	4
2.3. Cambio de presión producido por un cambio de velocidad	4
2.4. Velocidad de la onda de presión	5
2.5. Ecuaciones Gobernantes	6
2.6. Efectos de una Fuga en Mediciones de una Tubería	7
2.7. Modelo de una Fuga	11
2.8. Discretización Espacial del Modelo	12
2.9. Modelo Extendido	13
2.10. Cálculo del Factor de Fricción en una tubería	13
2.11. Longitud en Equivalente Recto	14
2.12. Parámetros del Modelo Dependientes de la Temperatura	14
2.12.1. Módulo de elasticidad del agua	15
2.12.2. Módulo de elasticidad de la tubería	15
2.12.3. Densidad del Agua	15
2.12.4. Viscosidad del agua	16
2.13. Estabilidad de Sistemas Autónomos	16
3. Prototipo	18
4. Métodos de Detección y Localización de Fugas	20
4.1. Clasificación de los Métodos de Detección y Localización de Fugas	20
4.2. Aproximación Sensitiva a Fallas de Billman	21
4.2.1. Discretización y Representación en Variable de Estados de la Tubería	22
4.2.2. Generación de Residuo por Medio de un Observador de Estados No Lineal	23
4.2.3. Parámetros de Fuga	23
4.3. Detección y Localización de Fugas por medio de Modos Deslizantes	26
4.3.1. Detección y localización de Fugas usando Modos Deslizantes de Primer Orden	26
4.3.2. Detección y localización de Fugas usando el Algoritmo de Super-Twisting	30

4.3.3. Detección y Localización de Fugas por Medio de un Derivador de Modos Deslizantes	33
4.4. Detección y Localización de Fugas Basada en el Método Algebraico	34
4.5. Detección y Localización de Fugas por Medio de un Filtro de Kalman Extendido .	34
4.5.1. Filtro de Kalman Extendido	35
5. Banco de Aisladores	37
5.1. Banco de Aisladores de Fugas	37
5.1.1. Algoritmo utilizado en el Banco de Aisladores	37
5.1.2. Selección de valores de las constantes C	39
6. Resultados	45
6.1. Experimento 1: Implementación en MATLAB	45
6.2. Experimento 2: Implementación en LabVIEW	51
6.3. Experimento 3: Implementación del Banco de Aisladores con la Válvula 1	57
6.4. Experimento 4: Implementación del Banco de Aisladores con la Válvula 3	61
7. Conclusiones y Trabajo Futuro	65
7.1. Conclusiones .	65
7.2. Trabajo Futuro	65

Índice de figuras

2.1. Sistema de Tubería	4
2.2. Caída de presión a través de la tubería	8
2.3. Efectos de una fuga en el gasto volumétrico de una tubería	8
2.4. Recta de la caída de presión desde la entrada de la tubería hasta el punto de fuga.	9
2.5. Recta de la caída de presión desde el punto de fuga hasta la salida de la tubería.	10
2.6. Discretización espacial de la tubería con una fuga.	11
2.7. Adaptación a una Tubería Recta	14
3.1. Diagrama Esquemático del Prototipo	19
4.1. Detección de fugas en la Aproximación Sensitiva a Fallas.	21
4.2. Tubería dividida en N secciones	22
5.1. Algoritmo del banco de aisladores	39
6.1. Gastos volumétricos medidos en la tubería.	46
6.2. Presión de entrada y salida en la tubería.	46
6.3. Gastos volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MDPO.	47
6.4. Gastos volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MDPO.	47
6.5. Errores de estimación del algoritmo MPDO.	48
6.6. Errores de estimación del algoritmo basado en Super-Twisting.	48
6.7. Φ continuas.	49
6.8. Φ equivalentes.	49
6.9. Posición de la fuga.	50
6.10. Presión en el punto de fuga.	50
6.11. λ .	51
6.12. Gastos volumétricos medidos en la tubería.	52
6.13. Presión de entrada y salida en la tubería.	53
6.14. Gastos Volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MD-PO.	53
6.15. Gastos Volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MD-PO.	54
6.16. Errores de estimación del algoritmo MPDO.	54
6.17. Errores de estimación del algoritmo basado en Super-Twisting.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

6.18. Φ equivalentes.	55
6.19. Φ continuas.	56
6.20. Posición de la fuga.	56
6.21. Presión en el punto de fuga.	57
6.22. λ .	57
6.23. Gastos Volumétricos medidos en la tubería.	59
6.24. Presión de entrada y salida en la tubería.	60
6.25. Posición de la fuga estimada por los 5 métodos.	60
6.26. Posición de la fuga estimada por el banco de aisladores.	61
6.27. Gastos Volumétricos medidos en la tubería.	62
6.28. Presión de entrada y salida en la tubería.	63
6.29. Posición de la fuga estimada por los 5 métodos.	64
6.30. Posición de la fuga estimada por el banco de aisladores.	64

Índice de Tablas

3.1. Posición de las válvulas .	19
6.1. Condiciones iniciales y parámetros usados en la implementación fuera de línea.	45
6.2. Condiciones iniciales y parámetros usados en la implementación en línea.	51
6.3. Valores de C.	58
6.4. Parámetros congelados usados en la implementación en línea.	59
6.5. Parámetros congelados usados en la implementación en línea	62

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad el transporte de fluidos a través de tuberías es una práctica muy común, debido a su eficiencia y los bajos costos, una vez ya se ha construido ésta, comparado con otros tipos de transportes. Uno de los principales inconvenientes del transporte de fluidos a través de tuberías es el poco conocimiento del estado de la tubería a excepción de los principales puntos de interés (extremos de la tubería), por lo que una de las mejores maneras de saber si existe alguna fuga en ésta es por medio de la presión y el gasto volumétrico en los extremos de la tubería.

Una fuga en una tubería ocurre por envejecimiento, ruptura de la soldadura, corrosión o a causa de terceros. Cuando una de éstas ocurre se puede generar una pérdida económica asociada al costo del fluido, una de las maneras que usan las empresas para encontrarla es enviar personal a buscarla, lo cual llega a hacer muy ineficiente cuando se trata de una tubería que recorre distancias muy grandes o atraviesa lugares inaccesibles. En la actualidad se buscan métodos de localización de fugas que sean rápidos y fiables.

En la literatura es común encontrar dos clasificaciones de métodos de detección y localización de fugas: internos y externos [1]. Los métodos externos detectan la fuga por fuera de la tubería e incluyen procedimientos tradicionales tales como inspección visual llevada a cabo por patrullas de línea y tecnologías como sensores de hidrocarburo vía fibra óptica y cables dieléctricos, así como tecnologías de ultrasonido, sin embargo éstos pueden ser muy costosos y lentos. Los métodos internos también conocidos como Monitoreo Computacional de Tuberías (MCT), usan instrumentos para monitorear ciertos parámetros internos de la tubería (tales como presión, gasto volumétrico, temperatura, etc.), los cuales son entradas para un procedimiento MCT, el cual se encarga de determinar la ocurrencia de una fuga y su posición. Los métodos internos son baratos, rápidos y proporcionan resultados aceptables.

Los métodos deducidos de las Ecuaciones de Golpe de Ariete, los cuales son métodos internos, pueden ser divididos en dos categorías la Aproximación Sensitiva a Fallas (ASF) y la Aproximación de Falla Modelada (AFM). En la ASF la fuga no está en el modelo y se basa en técnicas de correlación residual, como el método introducido por Billman y Iserman en 1987 [2]. En la AFM la fuga se toma en consideración dentro del modelo y es

usada más comúnmente en investigaciones recientes [3] [4] [5] [6] [7].

En esta tesis se busca realizar e implementar en tiempo real un banco de métodos de localización de fugas para dar una mayor fiabilidad a los resultados obtenidos por éstos. Para asegurar que los métodos usen diferentes enfoques para la localización de la fuga se han diseñado dos nuevos métodos con otro enfoque y basados en las técnicas de modos deslizantes.

Esta tesis está estructurada de la siguiente manera, en el Capítulo 2 se da una introducción a los fenómenos físicos, algunos conceptos básicos que se usarán en posteriores capítulos y se deducirá un modelo de nuestro sistema. En el Capítulo 3 se describirá el prototipo donde se probaron los algoritmos de detección de fugas así como el banco de aisladores. En el Capítulo 4 se explicarán los métodos de detección de fugas que serán implementados, donde se destacan dos nuevos algoritmos propuestos en esta tesis y basados en modos deslizantes. En el Capítulo 5 se explicará el algoritmo propuesto para el banco de aisladores. En el Capítulo 6 se mostrarán los resultados obtenidos al implementar en tiempo real y probar para diferentes fugas los dos nuevos algoritmos propuestos y el banco de aisladores. En el Capítulo 7 se darán las conclusiones del trabajo y se presentarán los puntos del proyecto que no se han resuelto al terminar esta tesis.

Capítulo 2

Preliminares

En este capítulo se discutirá sobre la dinámica del agua al fluir a través de una tubería, además se modelará su comportamiento cuando ocurre una fuga, así como los fenómenos físicos que ocurren en el agua que circula a través de la tubería. Finalmente, se mostrará como calcular varios parámetros que son parte del modelo matemático del agua que circula a través de la tubería.

2.1. Definiciones

Un flujo es estable si su velocidad no varía con respecto al tiempo en punto fijo. Si su velocidad varía con respecto al tiempo en un punto fijo es inestable. Mientras un flujo cambia de un estado estable a otro se encuentra en un estado transitorio.

Consideremos una tubería de longitud L , en la cual fluye agua a un nivel constante, de un depósito aguas arriba a una válvula localizada aguas abajo al final de la tubería, como muestra la Figura 2.1. Supóngase que la válvula es cambiada instantáneamente en un tiempo $t = t_0$ de una posición totalmente abierta a una media abierta. Esto reducirá la velocidad del flujo a través de la válvula, incrementando la presión en la válvula. La presión incrementada producirá una onda de presión que viajará de ida y vuelta en la tubería hasta ser disipada debido a la fricción y que las condiciones de flujo lleguen a ser estables de nuevo. El tiempo en el que las condiciones del flujo se vuelven estables de nuevo, será llamado t_f .

Basado en las definiciones anteriores, podemos clasificar esos regímenes en las siguientes categorías:

1. Flujo estable para $t < t_0$
2. Flujo transitorio para $t_0 \leq t \leq t_f$
3. Flujo estable de nuevo para $t > t_f$

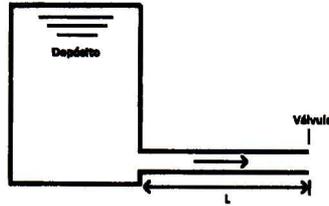


Figura 2.1: Sistema de Tubería

2.2. Tiempo de estabilización del flujo en una tubería

El cálculo para el tiempo en que el flujo se estabiliza después de un cambio de velocidad instantáneo puede ser calculado, como se muestra en [8], con la siguiente ecuación:

$$T_{estable} = \frac{LA}{\left(1 + \frac{fL}{D}\right) Q_0} \left(\ln \left(\frac{1 + \frac{Q}{Q_0}}{1 - \frac{Q}{Q_0}} \right) - \ln \left(\frac{1 + \frac{Q_i}{Q_0}}{1 - \frac{Q_i}{Q_0}} \right) \right) \quad (2.1)$$

donde

- $T_{estable}$ es el tiempo de estabilización del flujo en la tubería [s]
- L es la longitud de la tubería [m]
- f es el coeficiente de fricción
- D es el diámetro de la tubería [m]
- A es el área de la sección transversal [m²]
- Q_0 es el gasto volumétrico en $t = \infty$ [m³/s]
- Q_i es el gasto volumétrico de la tubería en t_0 [m³/s]
- Q es el gasto volumétrico que se considera estable y se obtiene en $t = T_{estable}$ [m³/s]

La ecuación 2.1 es logarítmica y el flujo se estabiliza en tiempo infinito, pero se considera estable para valores de Q muy cercanos a Q_0 .

2.3. Cambio de presión producido por un cambio de velocidad

El cambio de presión generado por un cambio instantáneo de gasto volumétrico al final de la tubería se calcula por la siguiente ecuación:

$$\Delta H = -\frac{b}{g}\Delta V \quad (2.2)$$

mientras que al inicio de la tubería está dado por:

$$\Delta H = \frac{b}{g}\Delta V \quad (2.3)$$

donde

- b es la velocidad de la onda de presión [m/s]
- g es la aceleración de la gravedad [m/s^2]
- ΔH es el incremento en la cabeza de presión [m]
- ΔV es el incremento en la velocidad del flujo [m/s]

Usualmente, la velocidad de la onda de presión en tuberías plásticas es de $330m/s$ por lo que se generan cambios de presión 33 veces mayores al de la velocidad del flujo.

2.4. Velocidad de la onda de presión

Para una tubería como la descrita en la Sección 2.1, la ecuación para la conservación de la masa para flujos unidimensionales es la siguiente:

$$0 = \frac{d}{dx} \int_{x_1}^{x_2} \rho A dx + (\rho V A)_{out} - (\rho V A)_{in} \quad (2.4)$$

donde ρ es la densidad del fluido [kg/m^3]. De la ecuación 2.4, como se muestra en [8], se obtiene que:

$$\Delta V = -\frac{\Delta \rho}{\rho} b \quad (2.5)$$

El módulo de elasticidad del fluido K [N/m^2] puede ser calculado por la siguiente ecuación:

$$K = \rho g \frac{\Delta H}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad (2.6)$$

De las ecuaciones 2.5 y 2.6 se encuentra que la velocidad de la onda de presión viene dada por:

$$b = \frac{K\Delta V}{\rho g\Delta H} \quad (2.7)$$

Utilizando las ecuaciones 2.2 y 2.7 obtenemos:

$$b = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad (2.8)$$

Si suponemos que las paredes del conducto son ligeramente deformables, en lugar de rígidas, entonces la velocidad de la onda de presión se calcula como:

$$b = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \frac{DK}{eE}}} \quad (2.9)$$

donde e es el espesor de la tubería [m] y E es el módulo de elasticidad del material de la tubería [N/m^2].

2.5. Ecuaciones Gobernantes

El modelo que describe el comportamiento de un fluido en una tubería consiste de dos ecuaciones diferenciales parciales, las ecuaciones de Momento y de Continuidad, las cuales son deducidas bajo las suposiciones de que el fluido sea ligeramente compresible, las paredes del ducto ligeramente deformables y un factor de fricción constante a través de la tubería.

Ecuación de Continuidad

La siguiente ecuación es conocida como la ecuación de continuidad

$$\frac{\partial p}{\partial t} + V \frac{\partial p}{\partial z} + \rho b^2 \frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (2.10)$$

donde z son las coordenadas de longitud [m] y t son las coordenadas de tiempo [s].

Ecuación de Momento

La siguiente ecuación es conocida como la ecuación de momento

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + f \frac{V|V|}{2D} = 0 \quad (2.11)$$

Ecuaciones Simplificadas

Como se menciona en [8], en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería los términos $V \frac{\partial p}{\partial z}$ y $V \frac{\partial V}{\partial z}$ son muy pequeño con respecto a los otros términos de las Ecuaciones (2.10) y (2.11), por lo que pueden considerarse despreciables. Debido a que la presión de la tubería se puede expresar como $p = \rho g H$, tenemos que $\frac{\partial p}{\partial t} = \rho g \frac{\partial H}{\partial t}$ y $\frac{\partial p}{\partial z} = \rho g \frac{\partial H}{\partial z}$. Además, la velocidad del fluido puede expresarse como $V = Q/A$, por lo que las Ecuaciones (2.10) y (2.11) pueden simplificarse como:

$$\frac{\partial H(z, t)}{\partial t} + \frac{b^2}{gA} \frac{\partial Q(z, t)}{\partial z} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q(z, t)}{\partial t} + gA \frac{\partial H(z, t)}{\partial z} + \mu Q(z, t) |Q(z, t)| = 0 \quad (2.13)$$

con $\mu = \frac{f}{2DA}$.

2.6. Efectos de una Fuga en Mediciones de una Tubería

Cuando una tubería está trabajando bajo un estado estacionario, la presión y los gastos volumétricos en todos los puntos de la tubería son casi constantes para cualquier tiempo. La caída de presión a través de la tubería es aproximadamente una función lineal.

Con la ocurrencia de una fuga, se genera una caída de presión en el punto de la fuga. En general, se generan los siguientes cambios en la presión y el gasto volumétrico a través de la tubería:

- El gasto volumétrico en la entrada de la tubería Q_{in} se incrementa.
- El gasto volumétrico en la salida de la tubería Q_{out} decrementa.
- La presión en la entrada de la tubería P_{in} decrementa.
- La presión en la salida de la tubería P_{ext} decrementa.

Cuando ocurre una fuga la caída de presión con pendiente constante, la cual está representada como una recta azul en la Figura 2.2, se convierte en dos rectas con diferente inclinación, las cuales se pueden apreciar de color rojo en la Figura 2.2 y se interesectan en z_L que es el punto de fuga en la tubería. Además, el gasto volumétrico de entrada se incrementa y el de salida decrementa como se muestra en la Figura 2.3.

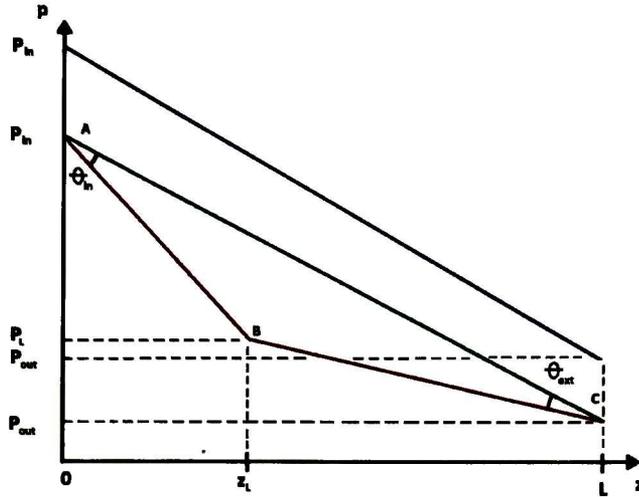


Figura 2.2: Caída de presión a través de la tubería

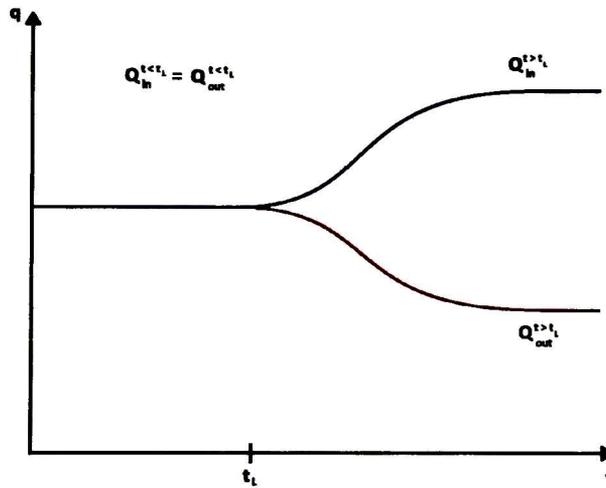


Figura 2.3: Efectos de una fuga en el gasto volumétrico de una tubería

Con el conocimiento del valor de la presión en los extremos de la tubería y de los ángulos θ_{in} y θ_{ext} se puede aproximar la posición y la presión de la fuga. Para demostrarlo primeramente se expresará la recta que une los puntos A y C en función de z_A , el cual es cualquier punto de la tubería, con la siguiente ecuación:

$$h = z_A \left(\frac{P_{out} - P_{in}}{L} \right) + P_{in} \quad (2.14)$$

donde P_{in} y P_{out} son las presiones en la entrada y la salida de la tubería después de la ocurrencia de la fuga.

Como se observa en la Figura 2.4, $\theta_3 = \theta_{in} + \theta_1$. Además, la pendiente de la recta que une los puntos A y B, la cual representa la presión en la tubería cuando ocurre una fuga, para cualquier z_A tal que $0 \leq z_A \leq z_L$, puede expresarse como:

$$m_2 = -\tan(\theta_3) = -\tan(\theta_1 + \theta_{in}) = -\frac{\tan(\theta_1) + \tan(\theta_{in})}{1 - \tan(\theta_1)\tan(\theta_{in})} \quad (2.15)$$

donde m_2 es la pendiente de la recta que une los puntos A y B. Debido a que m_1 , la pendiente de la recta que une los puntos A y C, y la cual es la recta verde en las Figuras 2.2 y 2.4, puede expresarse como:

$$m_1 = \tan(\theta_1) = \frac{P_{out} - P_{in}}{L} \quad (2.16)$$

entonces la pendiente m_2 está dada por:

$$m_2 = \frac{m_1 - \tan(\theta_{in})}{1 - m_1 \tan(\theta_{in})} \quad (2.17)$$

Bajo la suposición de que se tiene una fuga pequeña, que genera una caída de presión pequeña en el punto de fuga, se tiene que θ_{in} es un valor pequeño y si además el valor de m_1 es pequeño se puede hacer la siguiente aproximación $m_1 \tan(\theta_{in}) \approx 0$. Entonces la recta que une los puntos A y B puede aproximarse por la siguiente ecuación:

$$h_1 \approx z_A \left(\frac{P_{out} - P_{in}}{L} - \tan(\theta_{in}) \right) + P_{in} \quad (2.18)$$

donde h_1 es la cabeza de presión en la tubería, dado por la recta roja en la Figura 2.4.

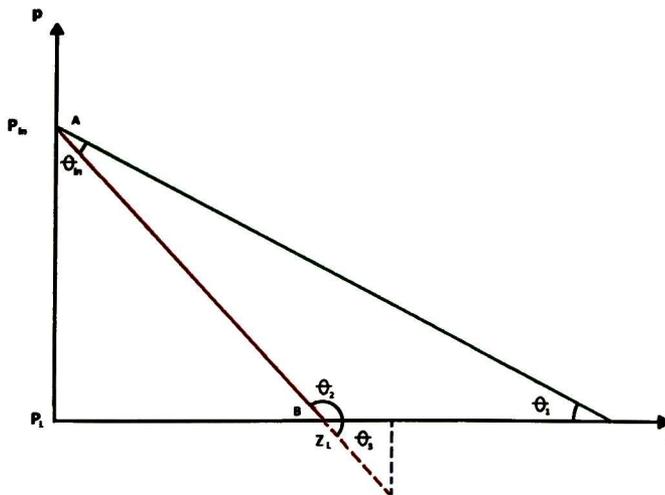


Figura 2.4: Recta de la caída de presión desde la entrada de la tubería hasta el punto de fuga.

Ahora se analizará el comportamiento de la caída de presión desde el punto de fuga hasta el final de la tubería, como se muestra en la Figura 2.5, $\theta_4 = \theta_1 - \theta_{ext}$. Además, la pendiente de la recta que une los puntos B y C, la cual representa la presión en la tubería cuando ocurre una fuga, para cualquier z_A tal que $z_L \leq z_A \leq L$, puede expresarse como:

$$m_3 = -\tan(\theta_4) = -\tan(\theta_1 - \theta_{ext}) = -\frac{\tan(\theta_1) - \tan(\theta_{ext})}{1 + \tan(\theta_1)\tan(\theta_{ext})} \quad (2.19)$$

entonces la pendiente de la recta B y C está dada por:

$$m_3 = \frac{m_1 + \tan(\theta_{ext})}{1 + m_1 \tan(\theta_{ext})} \quad (2.20)$$

Bajo la suposición de que se tiene una fuga pequeña, que genera una caída de presión pequeña en el punto de fuga, se tiene que θ_{ext} es un valor pequeño y si además si el valor de m_1 es pequeño se puede hacer la siguiente aproximación $m_1 \tan(\theta_{ext}) \approx 0$. Entonces la recta que une los puntos B y C puede aproximarse por la siguiente ecuación:

$$h_2 \approx z_A \left(\frac{P_{out} - P_{in}}{L} + \tan(\theta_{ext}) \right) + P_{in} - L \tan(\theta_{ext}) \quad (2.21)$$

donde h_2 es la cabeza de presión en la tubería, dado por la recta roja en la Figura 2.5.

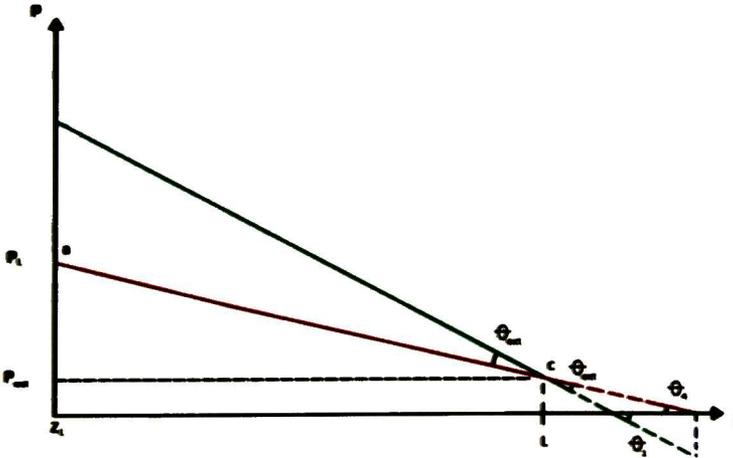


Figura 2.5: Recta de la caída de presión desde el punto de fuga hasta la salida de la tubería.

Debido a que ambas rectas se intersectan en z_L igualando las Ecuaciones (2.18) y (2.21) se puede aproximar el punto de la fuga como:

$$z_L \approx L \left(1 + \frac{\tan(\theta_{in})}{\tan(\theta_{ext})} \right)^{-1} \quad (2.22)$$

además la presión en el punto de fuga puede ser estimada como:

$$P_L \approx L \left(1 + \frac{\tan(\theta_{in})}{\tan(\theta_{ext})} \right)^{-1} \left(\frac{P_{out} - P_{in}}{L} - \tan(\theta_{in}) \right) + P_{in} \quad (2.23)$$

donde P_L es la presión en el punto de fuga.

2.7 Modelo de una Fuga

La ecuación que describe el comportamiento de una fuga, localizada en un punto z_L como se ve en la Figura 2.6, puede ser modelada usando la ecuación de Bernoulli [8] como:

$$Q_L = \lambda \sqrt{H_L} \quad (2.24)$$

donde Q_L es el gasto volumétrico que sale a través de la fuga, H_L es la cabeza de presión en el punto de fuga y el parámetro λ es una constante relacionada a la magnitud de la fuga.

Dado que la dinámica de la tubería es afectada por la fuga, el gasto volumétrico a través de la fuga puede ser representado como un balance de masas:

$$Q_1 = Q_2 + Q_L \quad (2.25)$$

donde Q_1 y Q_2 son los gastos volumétricos antes y después del punto de fuga respectivamente. Mediante las Ecuaciones (2.24) y (2.25), λ puede ser expresada como:

$$\lambda = \frac{Q_1 - Q_2}{\sqrt{H_L}} \quad (2.26)$$

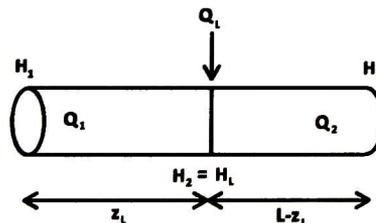


Figura 2.6: Discretización espacial de la tubería con una fuga.

2.8. Discretización Espacial del Modelo

Una discretización espacial es utilizada para obtener una representación en espacio de estado del sistema, las ecuaciones (2.12) y (2.13) son discretizadas con respecto a la variable espacial z , usando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial Q(z,t)}{\partial z} \approx \frac{Q_j - Q_{j-1}}{z_j} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial H(z,t)}{\partial z} \approx \frac{H_{j+1} - H_j}{z_j} \quad (2.28)$$

Suponiendo solamente dos particiones en la tubería, como se muestra en la Figura.2.6, entonces $z_j (j = 1, 2)$ son la distancia desde el inicio de la tubería al punto de fuga (z_L) y desde el punto de la fuga hasta el final de la tubería ($L - z_L$). Aplicando las aproximaciones en (2.27) y (2.28) a las ecuaciones (2.12) y (2.13), bajo la suposición de que cada sección tiene un coeficiente de fricción constante a través de ésta, además de utilizar (2.24) y (2.25) se obtiene el siguiente modelo no lineal:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{gA}{z_L} (x_2 - u_1) - \mu_1 x_1 |x_1| \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b^2}{gAz_L} (x_3 - x_1 + \lambda\sqrt{x_2}) \\ \dot{x}_3 &= -\frac{gA}{L - z_L} (u_2 - x_2) - \mu_2 x_3 |x_3| \end{aligned} \quad (2.29)$$

donde $x_1 = Q_1$, $x_2 = H_2$, $x_3 = Q_2$, $u_1 = H_1$ y $u_2 = H_3$. Si además agregamos las suposiciones de que $x_1 > 0$ y $x_3 > 0$ el modelo no lineal (2.29) se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{gA}{z_L} (x_2 - u_1) - \mu_1 x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b^2}{gAz_L} (x_3 - x_1 + \lambda\sqrt{x_2}) \\ \dot{x}_3 &= -\frac{gA}{L - z_L} (u_2 - x_2) - \mu_2 x_3^2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

Como se menciona en [9] si no existe una fuga en la tubería las derivadas de los estados x_1 y x_3 se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{gA}{L} (u_1 - u_2) - \mu_1 x_1 |x_1| \\ \dot{x}_3 &= \frac{gA}{L} (u_1 - u_2) - \mu_2 x_2 |x_2| \end{aligned} \quad (2.31)$$

2.9. Modelo Extendido

Los parámetros z_L y λ son generalmente constantes en algunos trabajos, por ejemplo en [10], se ha propuesto trabajar con un modelo extendido basado en (2.29), bajo la suposición de que estos son constantes y representandolos como estados, obteniendo el siguiente modelo extendido:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= -\frac{gA}{x_4} (x_2 - u_1) - \mu_1 x_1 |x_1| \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{b^2}{gAx_4} (x_3 - x_1 + x_5 \sqrt{x_2}) \\
 \dot{x}_3 &= -\frac{gA}{L - x_4} (u_2 - x_2) - \mu_2 x_3 |x_3| \\
 \dot{x}_4 &= 0 \\
 \dot{x}_5 &= 0
 \end{aligned} \tag{2.32}$$

donde $x_4 = z_L$ y $x_5 = \lambda$.

2.10. Cálculo del Factor de Fricción en una tubería

El factor de fricción f es un parámetro adimensional y además de utilizarse en los modelos (2.29), (2.30) y (2.32), puede ser utilizado para calcular la caída de presión en una tubería mediante la ecuación de Darcy-Weisbach [11] [8]. El factor de fricción depende de tres parámetros el número de Reynolds Re , el diámetro de la tubería D y la rugosidad de la tubería ϵ [m]. El número de Reynolds puede calcularse como:

$$Re = \frac{QD}{\nu A} \tag{2.33}$$

donde ν es la viscosidad cinemática del fluido [m^2/s].

Para realizar el cálculo del coeficiente de fricción se utilizan las ecuaciones de Swamee-Jain [12] y Haaland [13]. La ecuación de Swamee-Jain está dada por:

$$f = 0.25 \left(\log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right) + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right] \right)^{-2} \tag{2.34}$$

y la ecuación de Haaland está dada por:

$$f = \left(-1.8 \log_{10} \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right)^{-2} \tag{2.35}$$

2.11. Longitud en Equivalente Recto

Las Ecuaciones (2.13) y (2.12) se cumplen para una tubería recta y sin accesorios, lo cual en la mayoría de los casos no se cumple, por lo que es necesario hacer una compensación de su longitud para que los modelos propuestos tengan el mismo comportamiento que una tubería recta, como se muestra en la Figura.2.7, éste fenómeno ocurre debido a la fricción en las tuberías [11] [8]. A esta longitud se le conoce como Longitud en Equivalente Recto, la cual puede ser despejada de la ecuación de Darcy Weisbach:

$$\Delta H = \frac{fLQ^2}{2gDA^2} \quad (2.36)$$

si se miden las presiones en la entrada y la salida de una tubería se conocerá el parámetro ΔH , por lo que la L_{eq} puede calcularse como:

$$L_{eq} = \frac{2DgA^2\Delta H}{fQ^2} \quad (2.37)$$

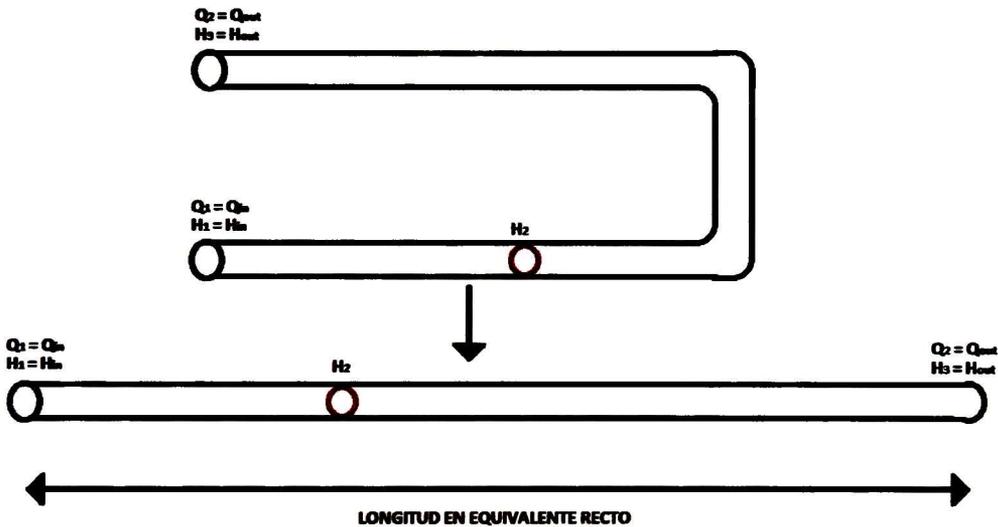


Figura 2.7: Adaptación a una Tubería Recta

2.12. Parámetros del Modelo Dependientes de la Temperatura

La temperatura es un factor muy importante en el cálculo de los parámetros utilizados en los modelos (2.29), (2.30) y (2.32), debido a que varios de ellos son dependientes de ésta. Los parámetros que se modifican debido a la temperatura son el módulo de elasticidad del agua, el módulo de elasticidad de la tubería, la densidad del agua y la viscosidad del agua.

2.12.1. Módulo de elasticidad del agua

Como se muestra en [14] el módulo de elasticidad del agua, el cual es necesario para poder calcular la velocidad de onda de presión, puede ser aproximado mediante la siguiente ecuación:

$$K = 834.147T^3 - 2.13737T^2 \times 10^5 + 1.472T \times 10^7 + 1.965 \times 10^9 \quad (2.38)$$

donde T es la temperatura en la tubería y está dado en $^{\circ}C$.

2.12.2. Módulo de elasticidad de la tubería

Como se muestra en [14] el módulo de elasticidad de la tubería hecha de polipropileno copolímero random tipo 3 se puede estimar por medio de el siguiente polinomio:

$$E = (34.247T_E^5 + 94.874T_E^4 - 323.75T_E^3 + 799.98T_E^2 - 2549.7T_E + 3368.6) g \times 10^4 \quad (2.39)$$

donde $T_E = \frac{T-55}{30.277}$.

2.12.3. Densidad del Agua

La determinación de la densidad del agua se puede realizar por medio de la fórmula del Comité Consultivo de Masa, presentada en 2001 por M.Tanaka, G. girard, R. Davis, A. Peuto y N. Bignell [15]. La ecuación para calcular la densidad es la siguiente:

$$\rho = \left(a_5 \left(1 - \frac{(T + a_1)^2 (T + a_2)}{a_3 (T + a_4)} \right) + C_{ad} \right) f_c \quad (2.40)$$

donde:

$$a_1 = -3.983035^{\circ}C$$

$$a_2 = 301.797^{\circ}C$$

$$a_3 = 522528.9^{\circ}C$$

$$a_4 = 69.34881^{\circ}C$$

$$a_5 = 999.972kg/m^3$$

El Factor de corrección por compresibilidad f_c , se calcula como:

$$f_c = 1 + (K_0 + K_1 * T + K_2 * T^2) (p - p_0) \quad (2.41)$$

donde p es la presión atmosférica en Pa y

$$\begin{aligned}
 p_0 &= 101325 Pa \\
 K_0 &= 50.74 \times 10^{-11} Pa^{-1} \\
 K_2 &= -0.326 \times 10^{-11} C^{-1} Pa^{-1} \\
 K_3 &= 0.00416 \times 10^{-11} C^{-2} Pa^{-1}
 \end{aligned}$$

La corrección por aire disuelto en el agua C_{ad} , se calcula como:

$$C_{ad} = s_0 + s_1 T \tag{2.42}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 s_0 &= -4.612 \times 10^{-3} kg/m^3 \\
 s_1 &= 0.106 T \times 10^{-3} kg / (m^3 \cdot ^\circ C^{-1})
 \end{aligned}$$

2.12.4. Viscosidad del agua

Debido a que el número de Reynolds, el cual se calcula con la ecuación (2.33), es dependiente de la viscosidad del agua es necesario calcularla. La viscosidad del agua puede calcularse como:

$$\nu = e^{(-16.921 + \frac{396.13}{107.41 + T})} \tag{2.43}$$

2.13. Estabilidad de Sistemas Autónomos

Como se menciona en [16], considerese un sistema como (2.44), donde $f : D \rightarrow \mathbb{R}^n$ es un mapeo localmente Lipschitz de un dominio $D \subset \mathbb{R}^n$ a \mathbb{R}^n . Suponer que $\bar{x} \in D$ es un punto de equilibrio de (2.44). Sin pérdida de generalidad, suponer que $\bar{x} = 0$.

$$\dot{x} = f(x) \tag{2.44}$$

Sea $\bar{x} = 0$ un punto de equilibrio para (2.44), entonces es:

- Estable si, para todo $\varepsilon > 0$, hay un $\delta = \delta(\varepsilon) > 0$ tal que $\|x(0)\| < \delta \rightarrow \|x(t)\| < \varepsilon$, $\forall t \geq 0$.
- Inestable si no es estable.
- Asintoticamente estable si es estable y δ puede ser elegido tal que $\|x(0)\| < \delta \rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$

Sea $V : D \rightarrow \mathbb{R}$ una función continuamente diferenciable definida en un dominio $D \in \mathbb{R}$ que contiene el origen. La derivada de V a través de las trayectorias de (2.44) denotadas por $\dot{V}(x)$, están dadas por:

$$\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \tag{2.45}$$

Sea $x = 0$ un punto de equilibrio para (2.44) y $D \in \mathbb{R}$ sea un dominio que contiene $x = 0$. Sea $V : D \rightarrow \mathbb{R}$ sea una función continuamente diferenciable tal que:

$$\begin{aligned} V(0) &= 0 \\ V(x) &> 0; & D - \{0\} \\ \dot{V}(x) &\leq 0; & D \end{aligned} \tag{2.46}$$

entonces $x = 0$ es estable. Si además

$$\dot{V}(x) < 0 \quad D - \{0\} \tag{2.47}$$

entonces $x = 0$ es asintóticamente estable. Como se menciona en [16] si una función cumple las condiciones (2.46) y (2.47) entonces $V(x(t)) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow \infty$.

Una función continuamente diferenciable $V(x)$ que satisface las condiciones (2.46), se le conoce como Función de Lyapunov. Si una función $V(x) > 0$ para $D - \{0\}$ se le conoce como función definida positiva, si $V(x) \geq 0$ para todo $x \neq 0$ entonces se le conoce como función semidefinida positiva. Una función se le conoce como definida negativa o semidefinida negativa si $-V(x)$ es definida positiva o semidefinida positiva respectivamente.

Capítulo 3

Prototipo

En este capítulo se dará una breve descripción del prototipo usado para realizar nuestros experimentos de detección y localización de fugas. El prototipo de tuberías se encuentra en el Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional Unidad Guadalajara. La tubería construida es de un diámetro interior de $0.06271m$, el espesor de la pared de la tubería es de $0.01307m$ y la longitud de la tubería es de $68m$, mientras que el material del que está hecha la tubería es Polipropileno Copolímero Random. El material del que está hecha la tubería fue elegido debido a su bajo costo y peso, así como por su baja fricción. Este material evita las fugas en los codos, ya que las uniones de los tramos se llevan a cabo por medio de termofusión, formando una tubería continua, sin roscas, soldaduras o algún tipo de pegamento. Cabe mencionar que la tubería está al mismo nivel de altura, es decir, no tiene inclinación.

Como se muestra en la Figura 3.1, el prototipo consta con un tanque de 750 litros, una bomba centrífuga de $5Hp$, sensores de gasto volumétrico (F1,F2) y presión (P1,P2) en ambos extremos de la tubería. Además con el fin de poder simular una o varias fugas en distintas posiciones de la tubería se instalaron 3 válvulas (V1, V2 y V3). Para verificar las presiones estimadas por los algoritmos para detectar fugas se instalaron 2 sensores de presión PL1 y PL3 en las válvulas V1 y V3. Además, hay un sensor de temperatura instalado en el tanque, debido a que es necesario conocerla para poder calcular varios parámetros dependientes de la temperatura, como se muestra en la subsección 2.12.

En la Tabla 3 se muestra la distancia de las válvulas (V1,V2 y V3) con respecto a los sensores de presión y gasto volumétrico instalados al inicio de la tubería (P1 y F1).

Los sensores de presión instalados en la entrada y la salida de la tubería son del modelo PMC41 manufacturado por Endress + Hauser. El PMC41 es un sensor cerámico que usa la deflexión de su diafragma cerámico causada por la presión, la cual a su vez se convierte en un cambio en la capacitancia. Los sensores están configurados para un funcionamiento analógico de 4 a 20 mA y con un rango de trabajo de 0-101.9367 metros columna de agua. Los sensores destinados a medir los gastos volumétricos en los extremos de la tubería son Promag 10P de Endress + Hauser, los cuales trabajan siguiendo la ley de Faraday de inducción magnética y proporcionan una salida de corriente continua de 4 a 20 mA en

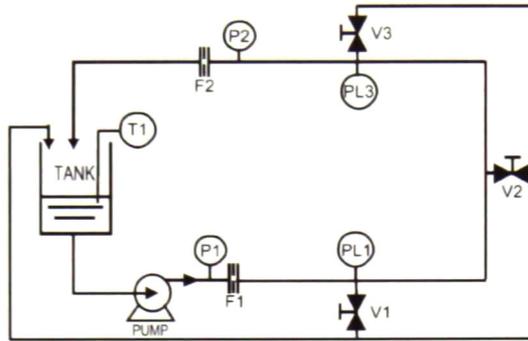


Figura 3.1: Diagrama Esquemático del Prototipo

Tabla 3.1: Posición de las válvulas

	Distancia real desde el inicio de la tubería
Válvula 1	17m
Válvula 2	33.5m
Válvula 3	50m

un rango de trabajo de $0 - 10 \text{ m/s}$, para el caso de nuestra tubería un rango de gasto volumétrico de $0 - 0.0309 \text{ m}^3/\text{s}$. Los sensores PL1 y PL3 instalados en la válvula V1 y V3 respectivamente, son sensores PT 25 fabricados por la compañía WINTERS, los cuales tiene un tiempo de respuesta menor a 10 ms y un rango de presión de $0 - 15.57$ metros columna de agua. El sensor de temperatura es un RTD PT100 conectado a un transmisor de temperatura HART TMT 192, el cual convierte valores de resistencia en una señal de 4 a 20 mA , para así poder introducir dicha señal en el sistema de adquisición de datos.

La bomba que mueve el fluido a través de la tubería es controlada por medio de un variador de frecuencia trifásico de las series ACM1100 fabricado por Minarik, el cual es controlado por medio de un voltaje de 0 a 10 volts, proporcionado por una tarjeta de National Instrument, la NI USB-6229, a la cual también se le introducen todas las mediciones que entregan los sensores y que son utilizadas por el software en el que están programados los algoritmos de detección de fugas. El software donde las mediciones de los sensores son visualizadas fue programado en LabVIEW de National Instrument, pero también las mediciones pueden ser guardadas e importadas a Matlab para posteriores experimentos fuera de línea.

Capítulo 4

Métodos de Detección y Localización de Fugas

En este capítulo se dará una breve explicación del funcionamiento de diversos algoritmos diseñados para la localización de una sola fuga en tuberías donde solo es posible medir el gasto volumétricos y la presión en los extremos de la tubería.

Cabe resaltar que en este capítulo se explicarán y analizarán dos nuevos algoritmos propuestos en esta tesis, que estiman la posición y presión de una fuga. Ambos algoritmos están basados en modos deslizantes y además utilizan el control equivalente para su funcionamiento.

4.1. Clasificación de los Métodos de Detección y Localización de Fugas

En la literatura es común encontrar dos clasificaciones de métodos de detección y localización de fugas: internos y externos [1]. Los métodos externos detectan la fuga por fuera de la tubería e incluyen procedimientos tradicionales tales como inspección visual llevada a cabo por patrullas de línea y tecnologías como sensores de hidrocarburo vía fibra óptica y cables dieléctricos, así como tecnologías de ultrasonido, sin embargo éstos pueden ser muy costosos y lentos. Los métodos internos también conocidos como Monitoreo Computacional de Tuberías (MCT), usan instrumentos para monitorear ciertos parámetros internos de la tubería (tales como presión, gasto volumétrico, temperatura, etc.), los cuales son entradas para un procedimiento MCT, el cual se encarga de determinar la ocurrencia de una fuga y su posición. Los métodos internos son baratos, rápidos y proporcionan resultados aceptables.

Los métodos deducidos de las Ecuaciones de Golpe de Ariete, los cuales son métodos internos, pueden ser divididos en dos categorías la Aproximación Sensitiva a Fallas (ASF) y la Aproximación de Falla Modelada (AFM). En la ASF la fuga no está en el modelo y se basa en técnicas de correlación residual, como el método introducido por Billman y Iserman en 1987 [2]. En la AFM la fuga se toma en consideración dentro del modelo y es

usada más comúnmente en investigaciones recientes [3] [4] [5].

4.2. Aproximación Sensitiva a Fallas de Billman

El método presentado en esta sección logra la detección de fugas por medio de la observación de estados de un modelo no lineal. Sobre este método se pueden encontrar diversos trabajos en la literatura [17] [18] [19] [2].

El método por Aproximación Sensitivo a Fallas de Billman se basa en un observador de estados no lineal, el cual determina el estado de la tubería correspondiente al estatus operacional libre de fugas. Debido a la falta de la representación de una fuga dentro del estado estimado, el esquema es caracterizado como la Aproximación Sensitiva a Fallas de Billman (ASF-Billman). Su metodología es descrita en la Figura 4.1.

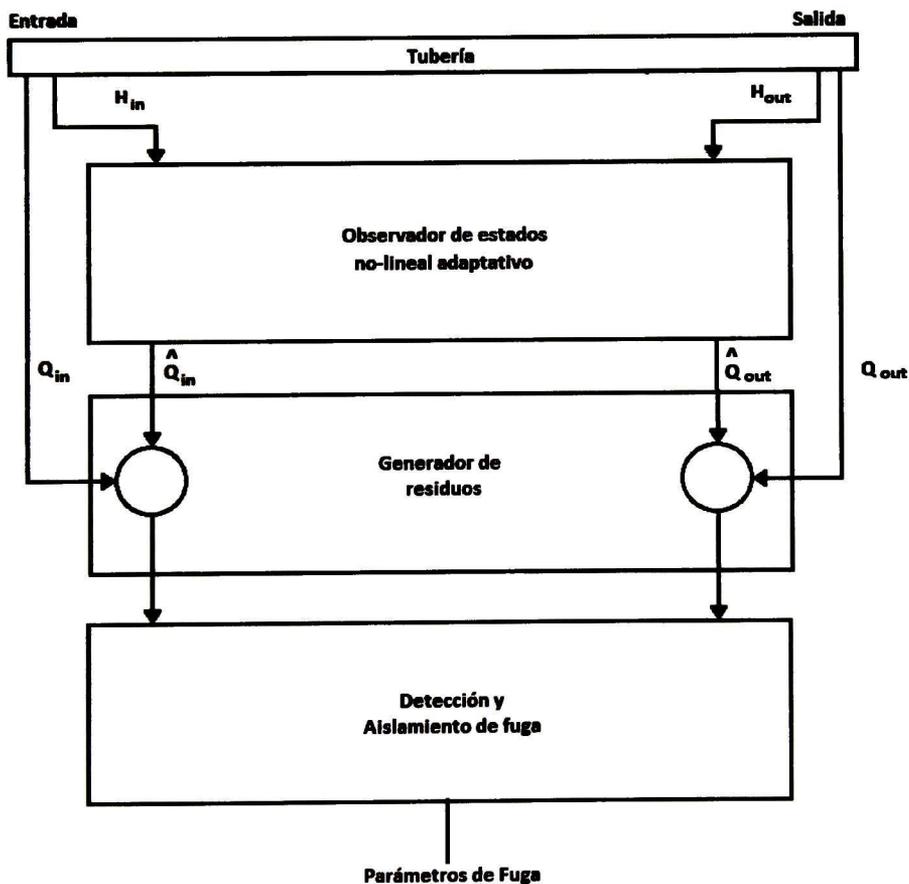


Figura 4.1: Detección de fugas en la Aproximación Sensitiva a Fallas.

Mediciones de presión en los extremos de la tubería P_{in} y P_{out} son las entradas del observador de estados, el cual a su vez genera como salida los estados compensados de la

presión y el gasto volumétrico en lugares predefinidos a través de la tubería. En la medida que los gastos volumétricos de la tubería son estimados $(\hat{Q}_{in}, \hat{Q}_{out})$, se pueden comparar con sus respectivas mediciones (Q_{in}, Q_{out}) así como producir las señales residuales.

4.2.1. Discretización y Representación en Variable de Estados de la Tubería

Considere una tubería de longitud L hipotéticamente dividida en secciones como se muestra en la Figura 4.2.

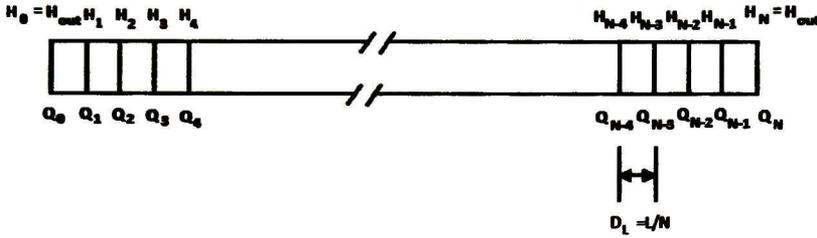


Figura 4.2: Tubería dividida en N secciones

Lo anterior nos permite describir la variable de distancia $l = d(L/N)$, donde N es un número natural par, el superíndice k es el tiempo discreto actual y d es un subíndice para indicar los puntos de discretización. Consecuentemente, medimos las siguientes cantidades de presión y gasto volumétrico en los extremos (en los puntos $d = 0$ y $d = N$):

$$\begin{aligned} H_0^k &= H_{in}^k, & H_N^k &= H_{out}^k \\ Q_0^k &= Q_{in}^k, & Q_N^k &= Q_{out}^k \end{aligned} \quad (4.1)$$

Las dinámicas de una tubería en un punto específico definido por d en un tiempo discreto actual k pueden ser escritas en la forma de la siguiente representación de variables de estado:

$$Ax^k = Bx^{k-2} + C(x^{k-1})x^{k-1} + Du^{k-1} + Eu^k \quad (4.2)$$

donde el vector de estados:

$$x^k = [Q_0^k \ Q_2^k \ Q_4^k \ \dots \ Q_N^k \ | \ H_1^k \ H_3^k \ H_5^k \ \dots \ H_{N-1}^k] \in \mathbb{R}^{N+1} \quad (4.3)$$

tiene dimensiones $(N + 1)$, y el vector de entrada está definido como:

$$u^k = [H_0^k \ H_N^k]^T = [H_{in}^k \ H_{out}^k]^T \in \mathbb{R}^2 \quad (4.4)$$

Y las matrices A , B , C , D y E son funciones de Δt , Δz y otros parámetros (g , D , b) del proceso de la tubería, y adicionalmente la matriz C depende del coeficiente de fricción y otros estados internos Q_a^k y H_a^k . La matriz A , B y C tienen dimensiones $(N+1) \times (N+1)$, la matriz D y E tienen dimensiones $(N+1) \times 2$.

Si todos los parámetros son conocidos, y los dos últimos estados y mediciones de presión en ambos extremos de la tubería están disponibles, entonces el estado actual puede ser calculado en línea con la ayuda de la siguiente ecuación no lineal:

$$x^k = A^{-1} [Bx^{k-2} + C(x^{k-1})x^{k-1} + Du^{k-1} + Eu^k] \quad (4.5)$$

4.2.2. Generación de Residuo por Medio de un Observador de Estados No Lineal

Como se puede ver en la Ecuación (4.2), el estado de la tubería incluye el gasto volumétrico Q_0^k y Q_N^k , los cuales están también disponibles de las mediciones en línea Q_{in}^k y Q_{out}^k . Como el estado estimado x^k nos proporciona una medición de la operación de la tubería libre de fuga, la diferencia entre los gastos volumétricos estimados y medidos se convierte en nuestro residuo de diagnóstico. Como consecuencia, el generador de residuo resultante basado en el observador de estados no lineal puede ser descrito como:

$$\hat{x}^k = A^{-1} [B\hat{x}^{k-2} + C(\hat{x}^{k-1})\hat{x}^{k-1} + Du^{k-1} + Eu^k] \quad (4.6)$$

$$\hat{y}^k = \begin{bmatrix} \hat{Q}_0^k \\ \hat{Q}_N^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \hat{x}^k \quad (4.7)$$

$$e^k = \begin{bmatrix} \Delta \hat{Q}_0^k \\ \Delta \hat{Q}_N^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{in}^k \\ Q_{out}^k \end{bmatrix} - \hat{y}^k \quad (4.8)$$

4.2.3. Parámetros de Fuga

Si el algoritmo anterior hace una evaluación apropiada del vector residual e^k , bajo la operación de la tubería libre de fuga tenemos que

$$e^k = \begin{bmatrix} \Delta \hat{Q}_0^k \\ \Delta \hat{Q}_N^k \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

donde podemos ver que cuando no existe fuga en la tubería, nuestro error de estimación es aproximadamente cero.

Generación de la alarma

Una tarea fundamental del algoritmo es tener una diferenciación precisa entre la ocurrencia de una fuga y otro posible estatus de operación. Para ello se utiliza un algoritmo sensible basado en la correlación cruzada de los residuos de los gastos volumétricos $\Delta\hat{Q}_0^k$ y $\Delta\hat{Q}_N^k$, tomado con el desplazamiento de tiempo τ , y calculando recursivamente con el uso de una memoria desvaneciente, implementada por medio de un factor de peso: $0 < \eta < 1$:

$$\Phi_{0,N}^k(\tau) = \eta\Phi_{0,N}^{k-1}(\tau) + (1 - \eta)(\Delta\hat{Q}_0^{k-\tau}\Delta\hat{Q}_N^k) \quad (4.10)$$

donde un valor grande de τ mejora la suavidad (reducción de ruido), pero retrasa la detección. Adicionalmente se hace una sumatoria para un número restringido de desplazamiento τ (1, 2, ... τ_{max}):

$$\Phi_{\Sigma}^k = \sum_{\tau=1}^{\tau_{max}} \Phi_{0,N}^k(\tau) \quad (4.11)$$

la alarma de fuga se activa si para un instante de tiempo k , Φ_{Σ}^k cae por debajo del umbral seleccionado $\Phi_{\Sigma\epsilon}$:

$$\Phi_{\Sigma}^k < \Phi_{\Sigma\epsilon} \quad (4.12)$$

Para una tubería con un perfil de altura constante, en un estado aproximadamente estable, donde $\partial H/\partial t \rightarrow 0$ y $\partial Q/\partial t \rightarrow 0$, el modelo que describe el comportamiento de un fluido dado por (2.12) y (2.13) puede ser reducido a

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\mu}{gA}Q|Q| \quad (4.14)$$

Suponiendo que los parámetros g , A y μ son constantes para la tubería analizada, resulta de (4.14) que la relación:

$$\Psi = Q|Q| \quad (4.15)$$

es proporcional al ángulo de la caída de presión lineal a lo largo de la longitud de la tubería (Figura 2.2). En base a un razonamiento simple concluimos que también la inclinación observada en las curvas de presión de la tubería con fuga (Figura 2.3) también puede ser descrito por una relación similar, la cual es cuadrática en términos del gasto volumétrico direccionalmente positivo.

Como consecuencia, para un instante de tiempo dado la relación anterior puede ser evaluada a la entrada y salida de la tubería con el uso de los residuos estimados (4.8):

$$\tan(\theta_{in}^k) \propto (\Delta Q_0^k \Delta Q_0^k) \quad (4.16)$$

$$\tan(\theta_{ext}^k) \propto (\Delta Q_N^k \Delta Q_N^k) \quad (4.17)$$

Introduciendo un filtraje apropiado de las anteriores cantidades relacionadas medidas, podemos calcular adecuadamente la localización de la fuga, utilizando la Ecuación (2.22), como:

$$Z_L^k = L \left(1 + \frac{\tan(\theta_{in}^k)}{\tan(\theta_{ext}^k)} \right)^{-1} = L \left(1 + \frac{\Phi_{0\Sigma}^k}{\Phi_{N\Sigma}^k} \right)^{-1} \quad (4.18)$$

donde utilizamos la sumatoria limitada correspondiente (auto-correlación agregada):

$$\Phi_{0\Sigma}^k = \sum_r \Phi_{0,0}^k(\tau) \quad (4.19)$$

$$\Phi_{N\Sigma}^k = \sum_r \Phi_{N,N}^k(\tau) \quad (4.20)$$

cuyos terminos son funciones de auto-correlación calculadas recursivamente con el uso de un factor de paso $0 < \vartheta < 1$:

$$\Phi_{0,0}^k(\tau) = \vartheta \Phi_{0,0}^{k-1}(\tau) + (1 - \vartheta)(\Delta \hat{Q}_0^{k-\tau} \Delta \hat{Q}_0^k) \quad (4.21)$$

$$\Phi_{N,N}^k(\tau) = \vartheta \Phi_{N,N}^{k-1}(\tau) + (1 - \vartheta)(\Delta \hat{Q}_N^{k-\tau} \Delta \hat{Q}_N^k) \quad (4.22)$$

Tamaño de la fuga

Una estimación muy útil del tamaño de la fuga se puede realizar por medio de una simple ecuación de balance de masas, la cual es obtenida de (2.25) y (4.8):

$$Q_L^k = E \{ \Delta Q_0^k - \Delta Q_N^k \} \quad (4.23)$$

donde $E \{ \cdot \}$ denota el operador de valor esperado del proceso ergódico analizado.

4.3. Detección y Localización de Fugas por medio de Modos Deslizantes

Como es bien conocido los algoritmos basados en modos deslizantes han sido usados para la observación de estados dado a sus características de convergencia en tiempo finito, robustez a incertidumbres e insensibilidad ante perturbaciones externas. En trabajos recientes esta técnica ha sido usada para el problema de estimación de la presión y posición de fugas en tuberías. Por ejemplo en [9], donde la posición de una sola fuga es estimada a través del Algoritmo de Super-Twisting en simulaciones. En [6] las cabezas de presión en una tubería son estimadas para múltiples fugas, cuando la posición de éstas son conocidas.

En esta sección, se proponen dos nuevos algoritmos basados en la AFM, los cuales estiman la posición y cabeza de presión de una fuga en una tubería plastica que transporta agua. Estos algoritmos están basados en Modos Deslizantes de Primer Orden (MDPO) y el algoritmo de Super-Twisting. Finalmente se explica un tercer algoritmo basado en modos deslizantes mostrado en [7].

4.3.1. Detección y localización de Fugas usando Modos Deslizantes de Primer Orden

Como se muestra en el Capitulo 2, la dinámica de los gastos volumétricos a través de una tubería recta puede ser modelada con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1) - \mu_1 x_1^2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b^2}{gA} \left(\frac{x_3 - x_1 + Q_F}{z_L} \right) \\ \dot{x}_3 &= -\frac{gA}{L - z_L}(u_1 - x_2) - \mu_2 x_3^2 \end{aligned} \quad (4.24)$$

donde z_L es el punto de fuga de la tubería. Se proponen las derivadas de los estimadores de x_1 y x_3 como:

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_1 &= -\mu_1 \hat{x}_1^2 + \Phi_1 \\ \dot{\hat{x}}_3 &= -\mu_2 \hat{x}_3^2 + \Phi_2 \end{aligned} \quad (4.25)$$

donde \hat{x}_1 y \hat{x}_3 están dados en m^3/s . Además, Φ_1 y Φ_2 son leyes de control virtual. Se definen los errores de estimación como:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= x_1 - \hat{x}_1 \\ \varepsilon_2 &= x_3 - \hat{x}_3 \end{aligned}$$

por lo que las derivadas de los errores están dadas por:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_1 &= -\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1) - \Phi_1 \\ \dot{\varepsilon}_2 &= -\frac{gA}{L - z_L}(u_1 - x_2) - \Phi_2\end{aligned}\quad (4.26)$$

Se proponen las siguientes Funciones de Lyapunov:

$$\begin{aligned}V_1 &= \frac{1}{2}\varepsilon_1^2 \\ V_2 &= \frac{1}{2}\varepsilon_2^2\end{aligned}\quad (4.27)$$

y las derivadas de las Funciones del Lyapunov con respecto al tiempo, están dadas como:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= \varepsilon_1\left(-\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1) - \Phi_1\right) \\ \dot{V}_2 &= \varepsilon_2\left(-\frac{gA}{L - z_L}(u_1 - x_2) - \Phi_2\right)\end{aligned}\quad (4.28)$$

Bajo las suposiciones de que $z_L \in [\delta, L - \delta]$, donde $L/2 > \delta > 0$, y $x_2 \in [u_2, u_1]$ se pueden acotar las derivadas de las funciones de Lyapunov como sigue:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &\leq \varepsilon_1(\xi_1 - \Phi_1) \\ \dot{V}_2 &\leq \varepsilon_2(\xi_2 - \Phi_2)\end{aligned}$$

con $\left|-\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1)\right| \leq \xi_1$ y $\left|-\frac{gA}{L - z_L}(u_1 - x_2)\right| \leq \xi_2$. Ahora se definen Φ_1 y Φ_2 como:

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= \alpha_1 \text{sign}(\varepsilon_1) \\ \Phi_2 &= \alpha_2 \text{sign}(\varepsilon_2)\end{aligned}\quad (4.29)$$

Mediante las Ecuaciones (4.28) y (4.29), las derivadas de las funciones de Lyapunov se pueden acotar como sigue:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &\leq |\varepsilon_1|(\xi_1 - \alpha_1) \\ \dot{V}_2 &\leq |\varepsilon_2|(\xi_2 - \alpha_2)\end{aligned}\quad (4.30)$$

por lo que para valores de α_1 y α_2 mayores a ξ_1 y ξ_2 respectivamente, \dot{V}_1 y \dot{V}_2 son definidas negativas haciendo que como se mencionó en la subsección 2.13, las funciones de Lyapunov tiendan a 0 al igual que nuestros errores de estimación, esto ocurre en tiempo finito ya que para las constantes $\beta_1 = \sqrt{2}(\alpha_1 - \xi_1)$ y $\beta_2 = \sqrt{2}(\alpha_2 - \xi_2)$, se puede acotar las derivadas de las funciones de Lyapunov como:

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &\leq -\beta_1\sqrt{V_1} \\ \dot{V}_2 &\leq -\beta_2\sqrt{V_2}\end{aligned}\tag{4.31}$$

siguiendo la metodología mostrada en [20], separando variables e integrando la Ecuación (4.31) sobre el intervalo de tiempo $0 \leq \tau \leq t$ se obtiene:

$$\begin{aligned}\sqrt{V_1(t)} &\leq -\frac{1}{2}\beta_1 t + \sqrt{V_1(0)} \\ \sqrt{V_2(t)} &\leq -\frac{1}{2}\beta_2 t + \sqrt{V_2(0)}\end{aligned}$$

y el tiempo en que las funciones de Lyapunov llegan a cero está acotado como sigue:

$$\begin{aligned}t_{r1} &= \frac{2\sqrt{V_1(0)}}{\beta_1} \\ t_{r2} &= \frac{2\sqrt{V_2(0)}}{\beta_2}\end{aligned}\tag{4.32}$$

para V_1 y V_2 respectivamente, en base a la ecuación (4.32), se sabe que entre menor sea el valor inicial de las funciones de Lyapunov, menor es el tiempo para que ellas lleguen a cero. Como se menciona en [21], cuando las funciones de Lyapunov tienden a 0 el control equivalente virtual se comportará como la perturbación, en este caso de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\Phi_{1eq} &= -\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1) \\ \Phi_{2eq} &= -\frac{gA}{L - z_L}(u_2 - x_2)\end{aligned}\tag{4.33}$$

Como se muestra en [9], si no hay fuga los estados x_1 y x_3 están dados por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{gA}{L}(u_1 - u_2) - \mu_1 x_1 |x_1| \\ \dot{x}_3 &= -\frac{gA}{L}(u_1 - u_2) - \mu_2 x_3 |x_3|\end{aligned}\tag{4.34}$$

si además $x_1 > 0$ y $x_3 > 0$, entonces la Ecuación (4.34) puede ser reescrita como:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{gA}{L}(u_1 - u_2) - \mu_1 x_1^2 \\ \dot{x}_3 &= \frac{gA}{L}(u_1 - u_2) - \mu_2 x_3^2\end{aligned}\tag{4.35}$$

Debido a que el estimador puede inicializarse incluso si no hay fuga, en este caso cuando las funciones tiendan a cero, los valores de Φ_{eq} seran dados por:

$$\begin{aligned}\Phi_{1eq} &= \frac{gA}{L}(u_1 - u_2) \\ \Phi_{2eq} &= \frac{gA}{L}(u_1 - u_2)\end{aligned}\tag{4.36}$$

y el parámetro L puede ser calculado antes de la ocurrencia de la fuga, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}L &= \frac{gA}{\Phi_{1eq}}(u_1 - u_2) \\ L &= \frac{gA}{\Phi_{2eq}}(u_1 - u_2)\end{aligned}\tag{4.37}$$

Como se menciona en [21], el control equivalente puede ser obtenido por medio de un filtro pasa bajas:

$$\tau \dot{M} + M = u\tag{4.38}$$

donde M es la salida del filtro y u la entrada. Para asegurar que M tienda al control equivalente, es necesario cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}\tau &\rightarrow 0 \\ \Delta/\tau &\rightarrow 0\end{aligned}\tag{4.39}$$

donde Δ es la frecuencia de conmutación de la función *signo*.

Usando la ecuación (4.33), la posición y la presión de la fuga se puede estimar como:

$$\begin{aligned}\hat{z}_L &= \frac{gA(u_1 - u_2) - L\Phi_{2eq}}{\Phi_{1eq} - \Phi_{2eq}} \\ \hat{x}_2 &= \frac{1}{\Phi_{1eq} - \Phi_{2eq}} \left(\frac{-L\Phi_{1eq}\Phi_{2eq}}{gA} + u_1\Phi_{2eq} - u_2\Phi_{1eq} \right)\end{aligned}\tag{4.40}$$

ya que x_2 es conocida y utilizando los estados estimados \hat{x}_1 y \hat{x}_3 , se puede estimar el parámetro λ como:

$$\hat{\lambda} = \frac{\hat{x}_1 - \hat{x}_3}{\sqrt{\hat{x}_2}}\tag{4.41}$$

Debido a que las ecuaciones de (4.40) son dependientes de Φ_{1eq} y Φ_{2eq} , si $\Phi_{1eq} - \Phi_{2eq} = 0$ entonces z_L y x_2 no pueden ser estimados, esto ocurre si x_2 está dada por la siguiente ecuación:

$$x_{2f} = \frac{z_L}{L} (u_2 - u_1) + u_1 \quad (4.42)$$

donde x_{2f} es la presión que debe tener la fuga para no poder estimar la presión y la posición de la fuga, como se muestra en la subsección 2.6, la presión en el punto de fuga está dado por la Ecuación (4.42) solo si no existe una fuga, $z_L = 0$ y $z_L = L$. Entonces (4.40) puede ser usado para estimar x_2 y z_L . Ya que es necesario la existencia de una fuga para iniciar la estimación, la detección de ésta se realiza mediante la diferencia entre x_1 y x_3 , ya que deben ser iguales para antes de la fuga, como se explicó en la Subsección 2.6.

Desde que el estado x_2 y z_L están acotados, la intensidad de la fuga puede ser variable e incluso así el algoritmo puede estimar los parámetros λ , z_L y el estado x_2 .

4.3.2. Detección y localización de Fugas usando el Algoritmo de Super-Twisting

Debido a que al utilizar las funciones *signo* Φ_{1eq} y Φ_{2eq} se estiman por medio de un filtro pasa bajas de Φ_1 y Φ_2 otra alternativa es utilizar el algoritmo de Super-Twisting [21], por lo que se proponen las siguientes Φ :

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \alpha_1 \sqrt{|\varepsilon_1|} \text{sign}(\varepsilon_1) + W_1 \\ \dot{W}_1 &= \gamma_1 \text{sign}(\varepsilon_1) \\ \Phi_2 &= \alpha_2 \sqrt{|\varepsilon_2|} \text{sign}(\varepsilon_2) + W_2 \\ \dot{W}_2 &= \gamma_2 \text{sign}(\varepsilon_2) \end{aligned} \quad (4.43)$$

donde α_1 , α_2 , γ_1 y γ_2 son constantes positivas. La Ecuación 4.26 se puede expresar en forma compacta como:

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_1 &= F_1(x, u) - \Phi_1 \\ \dot{\varepsilon}_2 &= F_2(x, u) - \Phi_2 \end{aligned} \quad (4.44)$$

donde $F_1(x, u) = -\frac{gA}{z_L} (x_2 - u_1)$ y $F_2(x, u) = -\frac{gA}{L-z_L} (u_2 - x_2)$. Entonces, las segundas derivadas de los errores están dadas por:

$$\begin{aligned} \ddot{\varepsilon}_1 &= \dot{F}_1(x, u) - \gamma_1 \text{sign}(\varepsilon_1) - \frac{\alpha_1 \dot{\varepsilon}_1}{2\sqrt{|\varepsilon_1|}} \\ \ddot{\varepsilon}_2 &= \dot{F}_2(x, u) - \gamma_2 \text{sign}(\varepsilon_2) - \frac{\alpha_2 \dot{\varepsilon}_2}{2\sqrt{|\varepsilon_2|}} \end{aligned} \quad (4.45)$$

Ahora se acotará \dot{F}_1 y \dot{F}_2 , de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \left| \dot{F}_1(x, u) \right| &= \left| \frac{b^2}{z_L^2} (x_3 - x_1 + Q_F) + \frac{gA}{z_L} \dot{u}_1 \right| \leq H_1 \\ \left| \dot{F}_2(x, u) \right| &= \left| \frac{b^2}{(L - z_L) z_L} (x_3 - x_1 + Q_F) - \frac{gA}{L - z_L} \dot{u}_2 \right| \leq H_2 \end{aligned} \quad (4.46)$$

donde H_1 y H_2 son constantes positivas. Se proponen las siguientes funciones de Lyapunov:

$$\begin{aligned} V_1 &= 2\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1^2}{2} + \gamma_1 |\epsilon_1|} \\ V_2 &= 2\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2^2}{2} + \gamma_2 |\epsilon_2|} \end{aligned} \quad (4.47)$$

y las derivadas de las funciones de Lyapunov con respecto al tiempo, son expresadas como:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{\ddot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_1 + \gamma_1 \dot{\epsilon}_1 \frac{\epsilon_1}{|\epsilon_1|}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1^2}{2} + \gamma_1 |\epsilon_1|}} \\ \dot{V}_2 &= \frac{\ddot{\epsilon}_2 \dot{\epsilon}_2 + \gamma_2 \dot{\epsilon}_2 \frac{\epsilon_2}{|\epsilon_2|}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2^2}{2} + \gamma_2 |\epsilon_2|}} \end{aligned} \quad (4.48)$$

Mediante la Ecuación (4.45), las derivadas de las funciones de Lyapunov se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{\dot{F}_1(x, u) \dot{\epsilon}_1 - \frac{\alpha_1 \dot{\epsilon}_1^2}{2\sqrt{|\epsilon_1|}}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1^2}{2} + \gamma_1 |\epsilon_1|}} \\ \dot{V}_2 &= \frac{\dot{F}_2(x, u) \dot{\epsilon}_2 - \frac{\alpha_2 \dot{\epsilon}_2^2}{2\sqrt{|\epsilon_2|}}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2^2}{2} + \gamma_2 |\epsilon_2|}} \end{aligned} \quad (4.49)$$

además, se pueden reescribir como:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \frac{\frac{\dot{F}_1(x, u)}{\sqrt{|\epsilon_1|}} \dot{\epsilon}_1 - \frac{\alpha_1 \dot{\epsilon}_1^2}{2|\epsilon_1|}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_1^2}{2|\epsilon_1|} + \gamma_1}} \\ \dot{V}_2 &= \frac{\frac{\dot{F}_2(x, u)}{\sqrt{|\epsilon_2|}} \dot{\epsilon}_2 - \frac{\alpha_2 \dot{\epsilon}_2^2}{2|\epsilon_2|}}{\sqrt{\frac{\dot{\epsilon}_2^2}{2|\epsilon_2|} + \gamma_2}} \end{aligned} \quad (4.50)$$

Bajo la suposición de que se cumplen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
 \frac{\dot{\varepsilon}_1^2}{|\varepsilon_1|} &> \lambda_1^2 \\
 \frac{\dot{\varepsilon}_2^2}{|\varepsilon_2|} &> \lambda_2^2 \\
 \frac{2 \left| \dot{F}_1(x, u) \right| \sqrt{|\varepsilon_1|}}{\alpha_1 \dot{\varepsilon}_1} &\geq \frac{2H_1}{\alpha_1 \lambda_1} < \Omega_1 < 1 \\
 \frac{2 \left| \dot{F}_2(x, u) \right| \sqrt{|\varepsilon_2|}}{\alpha_2 \dot{\varepsilon}_2} &\geq \frac{2H_2}{\alpha_2 \lambda_2} < \Omega_2 < 1
 \end{aligned} \tag{4.51}$$

donde λ_1 , λ_2 , Ω_1 y Ω_2 son constantes positivas, las derivadas de las funciones de Lyapunov están acotadas como sigue:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_1 &\leq -\frac{1}{2} \alpha_1 (1 - \Omega_1) \frac{\lambda_1^2}{\sqrt{\frac{\lambda_1^2}{2} + \gamma_1}} < 0 \\
 \dot{V}_2 &\leq -\frac{1}{2} \alpha_2 (1 - \Omega_2) \frac{\lambda_2^2}{\sqrt{\frac{\lambda_2^2}{2} + \gamma_2}} < 0
 \end{aligned} \tag{4.52}$$

por lo que las funciones de Lyapunov son definidas negativas. Finalmente como se muestra en [21], para asegurar la convergencia en tiempo finito del algoritmo se deben cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned}
 \gamma_1 &> \frac{\alpha_1}{2} \lambda_1 + H_1 \\
 \gamma_2 &> \frac{\alpha_2}{2} \lambda_1 + H_2
 \end{aligned} \tag{4.53}$$

Entonces, si se cumplen las condiciones (4.51) y (4.53), se puede calcular la posición y presión de la fuga como:

$$\begin{aligned}
 \hat{z}_L &= \frac{gA(u_1 - u_2) - L\Phi_2}{\Phi_1 - \Phi_2} \\
 \hat{x}_2 &= \frac{1}{\Phi_1 - \Phi_2} \left(\frac{-L\Phi_1\Phi_2}{gA} + u_1\Phi_2 - u_2\Phi_1 \right)
 \end{aligned} \tag{4.54}$$

De la misma manera que en el método anterior una vez es conocida la presión en el punto de fuga y utilizando los gastos volumétricos estimados, se puede calcular λ como:

$$\hat{\lambda} = \frac{\hat{x}_1 - \hat{x}_3}{\sqrt{\hat{x}_2}} \tag{4.55}$$

Al igual que en el método anterior en éste la intensidad de la fuga puede ser variable e incluso así el algoritmo puede estimar los parámetros λ , z_L y el estado x_2 .

4.3.3. Detección y Localización de Fugas por Medio de un Derivador de Modos Deslizantes

Para poder aplicar la detección y localización de fugas por medio del derivador de modos deslizantes, primero debemos establecer el modelo utilizado, el cual está dado por (2.29).

Una vez que tenemos el modelo debemos despejar los estados y parámetros que se desean estimar para que éstos estén en función de los estados y sus derivadas, así como parámetros conocidos del sistema.

Utilizando la Ecuación (2.29) tenemos que:

$$\dot{x}_3 = -\frac{gA}{L - z_L}(u_2 - x_2) - \mu_2 x_3 |x_3| \quad (4.56)$$

despejando x_2 de la ecuación anterior, se obtiene que se puede expresar como:

$$x_2 = -\frac{L - z_L}{gA}(\dot{x}_3 + \mu_2 x_3 |x_3|) + u_2 \quad (4.57)$$

y sustituyendo (4.57) en la derivada de x_1 ,

$$\dot{x}_1 = -\frac{gA}{z_L}(x_2 - u_1) - \mu_1 x_1 |x_1| \quad (4.58)$$

se puede despejar z_L como:

$$z_L = \frac{-L(\dot{x}_3 + \mu_2 x_3 |x_3|) - gA(u_2 - u_1)}{\dot{x}_1 - \dot{x}_3 + \mu_1 x_1 |x_1| - \mu_2 x_3 |x_3|} \quad (4.59)$$

Como las Ecuaciones (4.57) y (4.59) están dadas por x_1 y x_3 , los cuales son conocidos ya que se pueden medir, solo falta obtener \dot{x}_1 y \dot{x}_3 . Para obtener la derivada de los estados x_1 y x_3 se utilizara un derivador basado en modos deslizantes [22].

De la derivada de x_2 se puede estimar λ como se muestra a continuación:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{x_2}} \left(\frac{gAz_L \dot{x}_2}{b^2} + x_1 - x_3 \right) \quad (4.60)$$

Debido a que se necesita obtener la derivada de x_2 para estimar λ , se utilizara un filtro de primer orden a la estimación para poder derivar x_2 .

4.4. Detección y Localización de Fugas Basada en el Método Algebraico

El método de detección y localización de fugas basado en el método algebraico es una derivación de las ecuaciones de continuidad (2.12) y (2.13) en estado estable. La localización de fugas basada en el método algebraico o modelo estático fue introducido en [23].

Primeramente supondremos que la presión de entrada y salida en la tubería son constantes, por lo que el gasto volumétrico también será constante. Esta suposición se cumple frecuentemente debido a que la intensidad de una fuga generalmente se mantiene constante. Ahora, por medio de las Ecuaciones (4.57), (4.59) y (4.60), y ya que consideramos que $\dot{x}_1 = \dot{x}_2 = \dot{x}_3 = 0$, se puede estimar la posición y la presión de la fuga así como λ con las siguientes ecuaciones.

$$\begin{aligned} z_L &= \frac{-L(\mu_2 x_3 |x_3|) - gA(u_2 - u_1)}{\mu_1 x_1 |x_1| - \mu_2 x_3 |x_3|} \\ x_2 &\doteq -\frac{L - z_L}{gA}(\mu_2 x_3 |x_3|) + u_2 \\ \lambda &= \frac{1}{\sqrt{x_2}} \left(\frac{gAz_L}{b^2} + x_1 - x_3 \right) \end{aligned} \quad (4.61)$$

4.5. Detección y Localización de Fugas por Medio de un Filtro de Kalman Extendido

Uno de los enfoques más usados para la localización de fugas es el del Filtro de Kalman Extendido (FKE). Existen varios trabajos sobre la localización de fugas usando Filtro de Kalman Extendido, uno de los primeros fue el presentado por Benkherouf y Allidina [3], posteriormente se publicaron trabajos como [24] [25] y [10], los cuales fueron solo en simulación a excepción de [10], donde el algoritmo fue aplicado con datos en tiempo real pero fuera de línea.

El filtro de Kalman Extendido está basado en un modelo discretizado tanto en tiempo como en espacio. Para esto se usará el modelo extendido (2.32), en el cual se considera z_L y λ como dos estados adicionales.

Discretización en el tiempo por medio del método de Heun

Para poder hacer la estimación de los estados y parámetros del filtro de Kalman, es necesario hacer una discretización en el tiempo. Dicha discretización se llevara a cabo por el método de Heun.

El método de Heun es un procedimiento numérico para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias con un valor inicial dado. El procedimiento para calcular la solución numérica

para el problema de valor inicial es el siguiente:

$$\dot{x} = f(x, u), \quad x(t_0) = x_0 \quad (4.62)$$

donde primero se calcula el valor intermedio \tilde{x}_{j+1} y después la aproximación final x_{j+1} en el punto de integración siguiente, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{j+1} &= x_j + \Delta t f(t_j, x_j) \\ x_{j+1} &= x_j + \frac{\Delta t}{2} (f(t_j, x_j) + f(t_{j+1}, \tilde{x}_{j+1})) \end{aligned} \quad (4.63)$$

donde Δt es el tamaño de paso y $t_{j+1} = t_j + \Delta t$.

El modelo extendido de nuestro sistema (2.32), discretizado por el método de Heun se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_{1(j+1)} &= x_{1(j)} + \frac{\Delta t}{2} \left(-\frac{gA}{x_{4(j)}} (x_{2(j)} - u_{1(j)}) - \frac{f_1}{2DA} x_{1(j)} |x_{1(j)}| \right) \\ &\quad + \frac{\Delta t}{2} \left(-\frac{gA}{x_{4(j)}} (\tilde{x}_{2(j+1)} - u_{1(j+1)}) - \frac{f_1}{2DA} \tilde{x}_{1(j+1)} |\tilde{x}_{1(j+1)}| \right) \\ x_{2(j+1)} &= x_{2(j)} + \frac{\Delta t}{2} \left(-\frac{b^2 x_{3(j)} - x_{1(j)} + x_{5(j)} \sqrt{x_{2(j)}}}{gA x_{4(j)}} \right) \\ x_{3(j+1)} &= x_{3(j)} + \frac{\Delta t}{2} \left(-\frac{gA}{L - x_{4(j)}} (u_{2(j)} - x_{2(j)}) - \frac{f_2}{2DA} x_{3(j)} |x_{3(j)}| \right) \\ &\quad + \frac{\Delta t}{2} \left(-\frac{gA}{L - x_{4(j)}} (u_{2(j+1)} - \tilde{x}_{2(j+1)}) - \frac{f_2}{2DA} \tilde{x}_{3(j+1)} |\tilde{x}_{3(j+1)}| \right) \\ x_{4(j+1)} &= x_{1(j)} \\ x_{5(j+1)} &= x_{5(j)} \end{aligned} \quad (4.64)$$

donde:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_{1(j+1)} &= x_{1(j)} + \Delta t \left(-\frac{gA}{x_{4(j)}} (x_{2(j)} - u_{1(j)}) - \frac{f_1}{2DA} x_{1(j)} |x_{1(j)}| \right) \\ \tilde{x}_{2(j+1)} &= x_{2(j)} + \Delta t \left(-\frac{b^2 x_{3(j)} - x_{1(j)} + x_{5(j)} \sqrt{x_{2(j)}}}{gA x_{4(j)}} \right) \\ x_{3(j+1)} &= x_{3(j)} + \Delta t \left(-\frac{gA}{L - x_{4(j)}} (u_{2(j)} - x_{2(j)}) - \frac{f_2}{2DA} x_{3(j)} |x_{3(j)}| \right) \end{aligned} \quad (4.65)$$

4.5.1. Filtro de Kalman Extendido

El modelo (4.64) puede ser expresado en forma compacta como:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u)\end{aligned}\tag{4.66}$$

donde $x = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5]^T$ y $y = [x_1, x_3]^T$ El filtro de Kalman para el sistema (4.64) puede ser escrito como:

$$\hat{x}_{j+1} = x_{j-} + \mathbb{K}_j (y_j - h\hat{x}_{j-})\tag{4.67}$$

donde x_{j-} es la estimación del estado x_j a priori:

$$\hat{x}_{j-} = f(\hat{x}_j, u_{j+1}, u_j)\tag{4.68}$$

\mathbb{K} es la ganancia de Kalman:

$$\mathbb{K}_j = P_{j-} - h^T (hP_{j-} - h^T + R)^{-1}\tag{4.69}$$

P_{j-} es la matriz de covarianza a priori:

$$P_{j-} = J_j P_{j-1} J_j^T + \mathbb{Q}\tag{4.70}$$

P_j es la matriz de covarianza a posteriori (la matriz de covarianza del error después de la actualización);

$$P_j = (I - \mathbb{K}_j h) P_{j-}\tag{4.71}$$

I es la matriz identidad, mientras que J_j es la matriz jacobiana:

$$J_j = \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_j}\tag{4.72}$$

Finalmente, R y \mathbb{Q} son conocidas como matrices de covarianza del ruido en la medición y del ruido en los estados respectivamente, donde:

$$P_{0-} = (P_{0-})^T > 0, \quad R = R^T > 0, \quad \mathbb{Q} = \mathbb{Q}^T > 0\tag{4.73}$$

Capítulo 5

Banco de Aisladores

En este capítulo se explicará el funcionamiento del banco de aisladores propuesto en esta tesis. Además se explicará y mostrará los parámetros adecuados para la implementación de este banco.

5.1. Banco de Aisladores de Fugas

Como se ha mostrado en el Capítulo 4, varios de los métodos mostrados hacen suposiciones para lograr la estimación de la posición de una fuga en una tubería, estas suposiciones en algunos casos pueden no llegar a cumplirse dando como resultado una mala estimación de estos métodos, por ejemplo en el método explicado en la Sección 4.5 se supone que la posición y el parámetro λ son constantes y aunque para la posición es así, el parámetro λ puede ser variable generando así una mala estimación de la posición de la fuga. Por esta razón en esta tesis se propone utilizar un banco de aisladores de fuga para estimar la posición de ésta con mayor fiabilidad.

5.1.1. Algoritmo utilizado en el Banco de Aisladores

El Banco de Aisladores propuesto funciona en base a la información obtenida de η número de métodos que estiman la posición de una fuga, donde η es un número impar mayor o igual a 3. El algoritmo que utiliza el banco de aisladores se basa en descartar la estimación de aquellos métodos con valores alejados a los otros. Para un grupo de m métodos, donde m es un número entero positivo tal que $\eta \geq m$, diremos que estiman valores cercanos entre ellos si se cumplen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} |x_{avg}(k) - x_1(k)| &\leq C_m \\ |x_{avg}(k) - x_2(k)| &\leq C_m \\ &\vdots \\ |x_{avg}(k) - x_m(k)| &\leq C_m \end{aligned} \tag{5.1}$$

donde $x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k)$ son los valores estimados de la posición de la fuga por cada

uno de los métodos en la iteración k , C_m es una constante positiva que determina la máxima distancia que puede existir entre los m métodos ($2C_m$) y

$$x_{avg}(k) = \frac{x_1(k) + x_2(k) + \dots + x_m(k)}{m} \quad (5.2)$$

Se utiliza el valor de $x_{avg}(k)$, dado por la Ecuación (5.2), debido a que es el valor que minimiza la siguiente función de error:

$$\varepsilon = \frac{(x_{avg}(k) - x_1(k))^2}{2} + \frac{(x_{avg}(k) - x_2(k))^2}{2} + \dots + \frac{(x_{avg}(k) - x_m(k))^2}{2} \quad (5.3)$$

para demostrar esto solo es necesario derivar la función de error con respecto a $x_{avg}(k)$ e igualar la derivada de la función de error a 0:

$$\frac{d\varepsilon}{dx_{avg}(k)} = (x_{avg}(k) - x_1(k)) + (x_{avg}(k) - x_2(k)) + \dots + (x_{avg}(k) - x_m(k)) = 0 \quad (5.4)$$

$$mx_{avg}(k) - x_1(k) - x_2(k) - \dots - x_m(k) = 0 \quad (5.5)$$

$$x_{avg}(k) = \frac{x_1(k) + x_2(k) + \dots + x_m(k)}{m} \quad (5.6)$$

para demostrar que es un mínimo solo es necesario mostrar que la segunda derivada de la función de error con respecto $x_{avg}(k)$ es positiva

$$\frac{d^2\varepsilon}{dx_{avg}(k)^2} = m > 0 \quad (5.7)$$

Como se muestra en la Figura 5.1, la ventaja del enfoque propuesto es que se asegura que todos los métodos se encuentran en una zona, la cual tiene una longitud constante dada por $2C_m$.

En nuestro caso particular se usarán los métodos mostrados en la Secciones 4.2, 4.4 y 4.5, además de los mostrados en las Subsecciones 4.3.2 y 4.3.3. Se eligen estos cinco métodos debido a que usan diferentes enfoques y suposiciones para la determinación de la posición de la fuga. El algoritmo inicia después de que se detecta la ocurrencia de una fuga y los gastos volumétricos son estables en la tubería, debido a que es una de las suposiciones del algoritmo mostrado en la Sección 4.4, el tiempo para la inicialización del algoritmo es calculado usando la Ecuación (2.1). Una vez que se han estabilizado los gastos volumétricos se verifica si el grupo de η métodos cumple la condición (5.1), si es así la salida del banco está dada por:

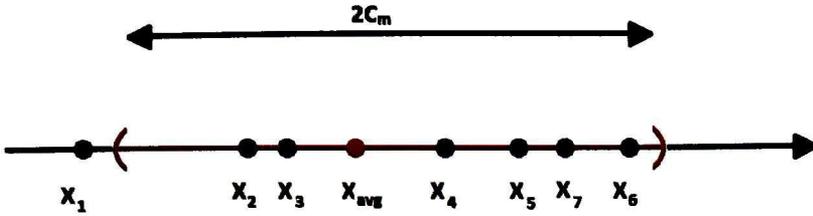


Figura 5.1: Algoritmo del banco de aisladores

$$y(k) = x_{avg}(k) \quad (5.8)$$

si esto no es así, se usan los P posibles grupos diferentes formados por $\eta - 1$ métodos, en este caso $m = \eta - 1$, y se verifica si alguna de las combinaciones cumple la condición (5.1), si es así la salida del banco está dada por (5.8), donde $x_{avg}(k)$ está dado por la Ecuación (5.2). El proceso se repite hasta que alguna combinación de los $m - n$ métodos cumpla la condición (5.1), donde $m = \eta - n$ y n es un número entero positivo tal que $\eta - n > \frac{\eta}{2}$, debido a que para enteros menores puede ocurrir que dos o más combinaciones diferentes del mismo número de métodos cumplan la condición (5.1).

5.1.2. Selección de valores de las constantes C

Debido a que si utiliza el mismo valor C_η para la prueba de cercanía de η y $\eta - 1$ métodos, es decir $C_\eta = C_{\eta-1}$, puede ocurrir que varias combinaciones de $\eta - 1$ cumplan la condición (5.1). Para asegurar que ésto no ocurra solo es necesario cumplir las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} C_\eta &\geq 2C_{\eta-1} > 0 \\ &\vdots \\ C_{\eta-n+1} &\geq 2C_{\eta-n} > 0 \\ \eta &\geq 3 \end{aligned} \quad (5.9)$$

donde η es el número de los métodos utilizado en el banco de aisladores y n es un número entero positivo tal que $\eta - n > \frac{\eta}{2}$. Con el fin de demostrar ésto es necesario utilizar antes los siguientes lemas.

Lema 1

Si para un grupo de η métodos se cumple que $|x_{avg}(k) - x_\eta(k)| > C_\eta$, donde x_η es la estimación de cualquiera de los métodos, η es un número entero mayor o igual a 3 y

$C_\eta \geq 2C_{\eta-1} > 0$, y para un grupo de $\eta - 1$ métodos, al cual pertenece $x_\eta(k)$, se cumple la condición (5.1) entonces se cumple la siguiente desigualdad:

$$|x_\eta(k) - x_l(k)| > 2C_\eta \quad (5.10)$$

donde $x_l(k)$ es el elemento que no pertenece al grupo de $\eta - 1$ métodos que cumple la condición (5.1).

Demostración

Se supondrá, sin pérdida de generalidad, que $(x_{\eta-1}(k) = x_l(k))$, por lo que las siguientes desigualdades se cumplen:

$$\begin{aligned} |x_{avg(\eta-1)}(k) - x_1(k)| &\leq C_{\eta-1} \\ &\vdots \\ |x_{avg(\eta-1)}(k) - x_{\eta-2}(k)| &\leq C_{\eta-1} \\ |x_{avg(\eta-1)}(k) - x_\eta(k)| &\leq C_{\eta-1} \end{aligned} \quad (5.11)$$

donde $x_{avg(\eta-1)}(k)$ está dado por la Ecuación (5.2) para este grupo de $\eta - 1$ métodos. Sumando la primera y ultima desigualdad se obtiene lo siguiente:

$$|x_{avg(\eta-1)}(k) - x_1(k)| + |-x_{avg(\eta-1)}(k) + x_\eta(k)| \leq 2C_{\eta-1}$$

y mediante la desigualdad triángulo se puede reescribir la ecuación anterior como:

$$|x_1(k) - x_\eta(k)| \leq 2C_{\eta-1} \quad (5.12)$$

mediante los mismos pasos se pueden demostrar las siguientes desigualdades para los métodos $x_2(k), \dots, x_{\eta-2}(k)$:

$$\begin{aligned} |x_2(k) - x_\eta(k)| &\leq 2C_{\eta-1} \\ &\vdots \\ |x_{\eta-2}(k) - x_\eta(k)| &\leq 2C_{\eta-1} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Usando la Ecuación (5.2) se puede reescribir la desigualdad $|x_{avg}(k) - x_\eta(k)| > C_\eta$ como:

$$\left| \frac{x_1(k) + \dots + x_{\eta-1}(k) - (\eta - 1)x_\eta(k)}{\eta} \right| > C_\eta$$

$$\left| \frac{x_1(k) - x_\eta(k)}{\eta} + \dots + \frac{x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)}{\eta} \right| > C_\eta$$

usando la desigualdad del triángulo se obtiene lo siguiente:

$$\left| \frac{x_1(k) - x_\eta(k)}{\eta} \right| + \dots + \left| \frac{x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)}{\eta} \right| > C_\eta \quad (5.14)$$

usando las Ecuaciones 5.12, 5.13 y que η es positiva se obtienen las siguientes desigualdades:

$$\frac{C_\eta}{\eta} + \dots + \frac{C_\eta}{\eta} + \left| \frac{x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)}{\eta} \right| > C_\eta$$

$$\frac{C_\eta(\eta - 2)}{\eta} + \left| \frac{x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)}{\eta} \right| > C_\eta$$

$$|x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)| > 2C_\eta \quad (5.15)$$

Lema 2

Si $|A - B| > M$, donde A y B son dos números reales cualquiera y M es una constante positiva, entonces se cumple por lo menos una de las dos siguientes desigualdades:

$$\begin{aligned} |D - A| &> \frac{M}{2} \\ |D - B| &> \frac{M}{2} \end{aligned} \quad (5.16)$$

donde D es cualquier número real.

Demostración

Reescribiendo $|A - B| > M$ y mediante la desigualdad del triángulo se muestra que:

$$|A - B| = |A - D + D - B| > M$$

$$|D - A| + |D - B| = |A - D| + |D - B| \geq |A - D + D - B| > M$$

por lo que se obtiene la siguiente desigualdad:

$$|D - A| + |D - B| > M \quad (5.17)$$

La demostración ahora se dividirá en 2 casos:

Caso 1

$$|D - A| \leq \frac{M}{2}$$

Usando la desigualdad (5.17), se obtiene que:

$$\frac{M}{2} + |D - B| \geq |D - A| + |D - B| > M$$

$$|D - B| > \frac{M}{2}$$

Caso 2

$$|D - A| > \frac{M}{2}$$

En este caso se cumple trivialmente que $|D - A| > \frac{M}{2}$.

Habiendo demostrado éstos lemas se puede demostrar el siguiente Teorema.

Teorema 1

Si un grupo de η métodos no cumplen la condición (5.1), cumple la condición (5.9) y además para un grupo de $\eta - 1$ métodos se cumple la condición (5.1) entonces para ningún otro grupo de $\eta - 1$ métodos cumplirá la condición (5.1).

Demostración

Para realizar la demostración se dividirá en 2 casos.

Caso 1

Para algún método, sin pérdida de generalidad, $x_\eta(k)$ se cumple la siguiente desigualdad:

$$|x_{avg}(k) - x_\eta(k)| > C_\eta$$

y además para un grupo de $\eta - 1$ métodos conformado por $x_\eta(k)$ se cumple la condición (5.1) con un $C_{\eta-1}$ tal que $C_\eta \geq 2C_{\eta-1} > 0$.

Se supondrá, sin pérdida de generalidad, que el grupo de $\eta - 1$ métodos que cumple la condición (5.1) es al que no pertenece $x_{\eta-1}(k)$. Usando el Lema 1 se obtienen las siguientes desigualdades:

$$|x_{\eta-1}(k) - x_\eta(k)| > 2C_\eta \tag{5.18}$$

$$|x_{\eta-1}(k) - x_x(k) + x_x(k) - x_\eta(k)| > 2C_\eta$$

$$|x_{\eta-1}(k) - x_x(k)| + |x_x(k) - x_\eta(k)| > 2C_\eta$$

$$|x_x(k) - x_{\eta-1}(k)| + |x_x(k) - x_\eta(k)| > 4C_{\eta-1}$$

si $x_x(k) = x_{avgx}(k)$:

$$|x_{\eta-1}(k) - x_{avgx}(k)| + |x_\eta(k) - x_{avgx}(k)| > 4C_{\eta-1} \quad (5.19)$$

donde $x_{avgx}(k)$ representa el resultado que se obtiene de la Ecuación (5.2) para cualquier grupo de $\eta - 1$ métodos conformado por $x_\eta(k)$ y $x_{\eta-1}(k)$, y utilizando el Lema 2 se obtiene que para cualquier grupo conformado por $x_\eta(k)$ y $x_{\eta-1}(k)$ no se cumplirá la condición (5.1). Para este caso solo falta demostrar que para el grupo de $\eta - 1$ métodos, donde $x_\eta(k)$ no forma parte del grupo no se cumplirá la condición (5.1). Para ello se utilizará la Ecuación (5.19) donde $x_x(k)$ representará cualquier método diferente de $x_\eta(k)$ y $x_{\eta-1}(k)$, sin pérdida de generalidad, se usará $x_1(k)$, por lo que:

$$|x_1(k) - x_\eta(k)| + |x_1(k) - x_{\eta-1}(k)| > 4C_{\eta-1} \quad (5.20)$$

Como para el grupo de $\eta - 1$ métodos al que no pertenece $x_{\eta-1}$ se cumple la condición (5.1) entonces las siguientes desigualdades se cumplen:

$$\begin{aligned} |x_{avg-(\eta-1)}(k) - x_1(k)| &\leq C_{\eta-1} \\ |x_{avg-(\eta-1)}(k) - x_2(k)| &\leq C_{\eta-1} \\ &\vdots \\ |x_{avg-(\eta-1)}(k) - x_\eta(k)| &\leq C_{\eta-1} \end{aligned} \quad (5.21)$$

donde $x_{avg-(\eta-1)}(k)$ está dado por la Ecuación (5.2) para este grupo de $\eta - 1$ métodos. Sumando dos ecuaciones diferentes cualquiera de (5.21) se obtiene lo siguiente:

$$|x_1(k) - x_{avg-(\eta-1)}(k)| + |x_{avg-(\eta-1)}(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1}$$

$$|x_1(k) - x_{avg-(\eta-1)}(k) + x_{avg-(\eta-1)}(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1}$$

$$|x_1(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1} \leq C_\eta$$

por lo que generalizando el resultado para este grupo de $\eta - 1$ métodos se obtiene lo siguiente:

$$\begin{array}{llll} |x_1(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1} & \dots & |x_{\eta-2}(k) - x_1(k)| \leq 2C_{\eta-1} & |x_\eta(k) - x_1(k)| \leq 2C_{\eta-1} \\ |x_1(k) - x_3(k)| \leq 2C_{\eta-1} & \dots & |x_{\eta-2}(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1} & |x_\eta(k) - x_2(k)| \leq 2C_{\eta-1} \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ |x_1(k) - x_\eta(k)| \leq 2C_{\eta-1} & \dots & |x_{\eta-2}(k) - x_\eta(k)| \leq 2C_{\eta-1} & |x_\eta(k) - x_{\eta-2}(k)| \leq 2C_{\eta-1} \end{array} \quad (5.22)$$

ya que como se muestra en la Ecuación (5.22), $|x_1(k) - x_\eta(k)| \leq 2C_{\eta-1}$ por lo que usando la Ecuación (5.20) se obtienen las siguientes desigualdades:

$$|x_1(k) - x_{\eta-1}(k)| > 2C_{\eta-1} \quad (5.23)$$

mediante los mismos pasos que se usaron en la Ecuación (5.18) para obtener la Ecuación (5.19), y usando el Lema 2 se obtiene que por lo menos una des las siguientes desigualdades se cumplira:

$$\begin{array}{l} |x_{avg(\eta)}(k) - x_{\eta-1}(k)| > C_{\eta-1} \\ |x_{avg(\eta)}(k) - x_1(k)| > C_{\eta-1} \end{array} \quad (5.24)$$

donde $x_{avg(\eta)}(k)$ se calcula usando la Ecuación (5.2) para el grupo de $\eta - 1$ métodos, donde $x_\eta(k)$ no forma parte del grupo. Por lo tanto la condición (5.1) no se cumplirá para este grupo.

Caso 2

Para algún método, sin pérdida de generalidad, $x_\eta(k)$ se cumple la siguiente desigualdad:

$$|x_{avg}(k) - x_\eta(k)| > C_\eta \quad (5.25)$$

además para el grupo de $\eta - 1$ métodos, al cual no pertenece $x_\eta(k)$, cumple la condición (5.1) con un $C_{\eta-1}$ tal que $C_\eta \geq 2C_{\eta-1} > 0$.

Para demostrar esto se hará por contradicción, se supondrá que por lo menos para algún otro grupo de $\eta - 1$ métodos se cumple la condición (5.1). Como para cualquier de estos grupos de $\eta - 1$ métodos pertenece $x_\eta(k)$ entonces se tienen las mismas condiciones que para el caso 1, por lo que el grupo de $\eta - 1$ al cual no pertenece $x_\eta(k)$ no debe cumplir la condición de cercanía (5.1) llegando a una contradicción y demostrando así el Teorema 1.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se mostrarán y analizarán los resultados de los algoritmos propuestos en la Sección 4.3, los cuales son implementados en tiempo real y programados usando los softwares LabVIEW (en línea) y MATLAB (fuera de línea). Además, se mostrarán los resultados del Banco de Aisladores, el cual es explicado en el Capítulo 5. El Banco de Aisladores es implementado en tiempo real y programado usando LabVIEW.

6.1. Experimento 1: Implementación en MATLAB

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por los dos nuevos algoritmos propuestos basados en las técnicas de modos deslizantes mostrados en la Sección 4.3, los cuales fueron implementados en MATLAB utilizando base de datos obtenidos del prototipo con una frecuencia de muestreo de 5 KHz. En la Tabla 6.1 se muestran los parámetros utilizados en la implementación. Dado que $\delta = 1$ entonces los gastos volumétricos estimados por el algoritmo basado en MDPO convergen en tiempo finito. El variador de frecuencia de la bomba operó a una frecuencia constante de 55Hz.

Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
$\hat{x}_1(0)$	0.009	m^3/s	δ	1	m
$\hat{x}_3(0)$	0.009	m^3/s	A	0.003088	m^2
$W_1(0)$	0.0035	m^3/s^2	α_1	0.32	m^3/s^2
$W_2(0)$	0.0035	m^3/s^2	α_2	0.32	m^3/s^2
L	83.2	m	β_1	0.1	$m^{\frac{3}{2}}/s^{\frac{1}{2}}$
g	9.78	m/s^2	β_2	0.1	$m^{\frac{3}{2}}/s^{\frac{1}{2}}$
D	0.06271	m	γ_1	0.005	m^3/s^2
μ_1	41.65	m^{-3}	γ_2	0.005	m^3/s^2
μ_2	41.66	m^{-3}			

Tabla 6.1: Condiciones iniciales y parámetros usados en la implementación fuera de línea.

En este experimento se provocó una fuga con intensidad variable a los 60 s utilizando

la válvula 1 del prototipo. En las Figuras 6.1 y 6.2 se muestran los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería, el ruido del gasto volumétrico medido en la entrada antes de ocurrir la fuga tiene una desviación estandar de $1.6452 * 10^{-5} m^3/s$ mientras que el ruido del gasto volumétrico medido en la salida tiene una desviación estandar de $1.0464 * 10^{-5} m^3/s$. Una fuga de este tipo no ocurre en la realidad, pero se realizó con el fin de probar el funcionamiento del algoritmo. Ambos algoritmos son inicializados antes de que la fuga ocurra para que las condiciones iniciales de las funciones de Lyapunov al momento de ocurrir la fuga sean lo menor posible.

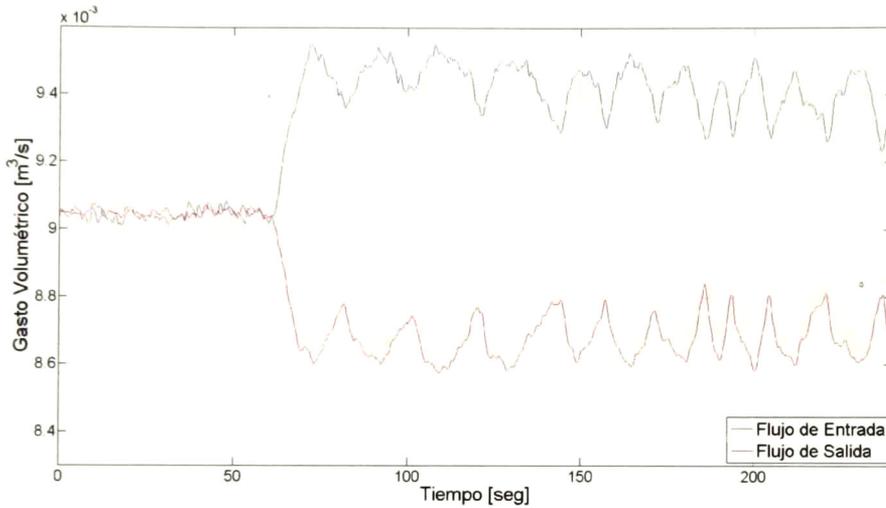


Figura 6.1: Gastos volumétricos medidos en la tubería.

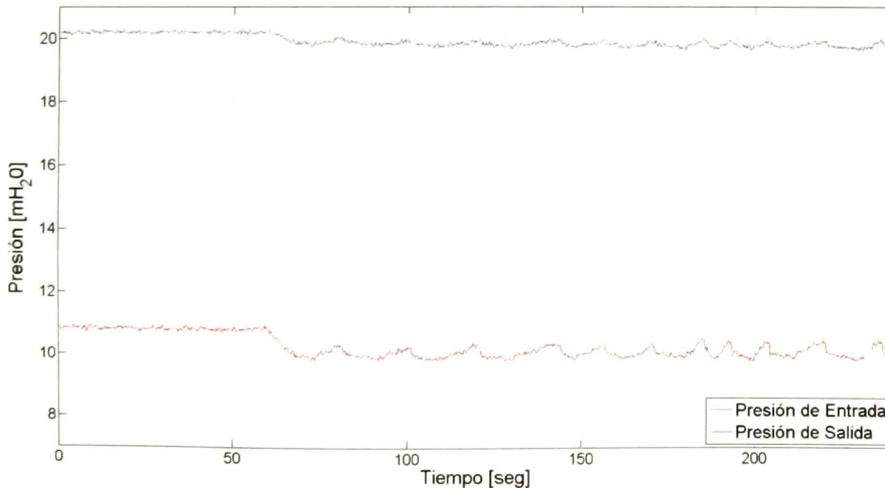


Figura 6.2: Presión de entrada y salida en la tubería.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

En las Figuras 6.3 y 6.4 se muestran los gastos volumétricos estimados por ambos algoritmos. Además, en las Figuras 6.5 y 6.6 se muestran los errores de estimación de ambos algoritmos con respecto a los gastos volumétricos medidos. Las Φ equivalentes y continuas se muestran en las Figuras 6.7 y 6.8 donde se puede observar que ambos algoritmos estiman valores similares. En la Figura 6.9 se muestra la posición estimada de la fuga por ambos métodos, las cuales se obtienen usando las Ecuaciones (4.40) y (4.54). La longitud en equivalente recto de la fuga fue $67.1813m$, las estimaciones promedio por los algoritmos de MDPO y Super-Twisting fueron $60.5074m$ y $62.4171m$ respectivamente.

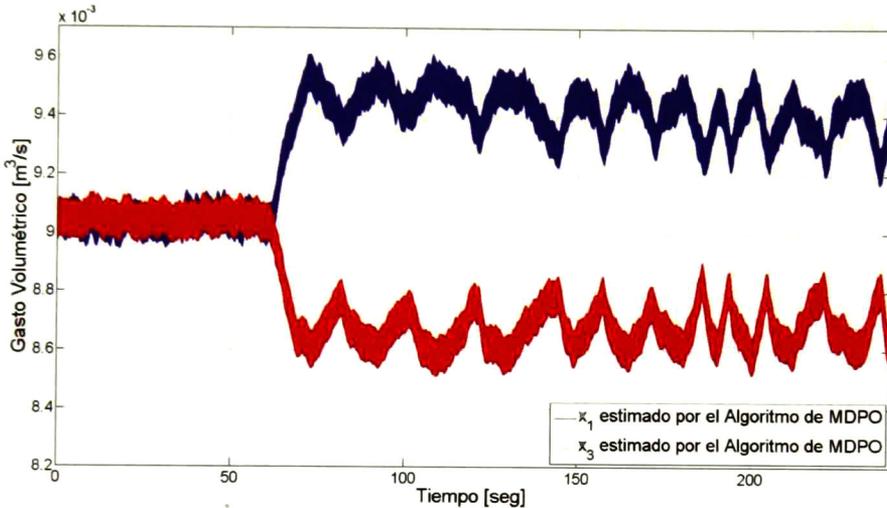


Figura 6.3: Gastos volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MDPO.

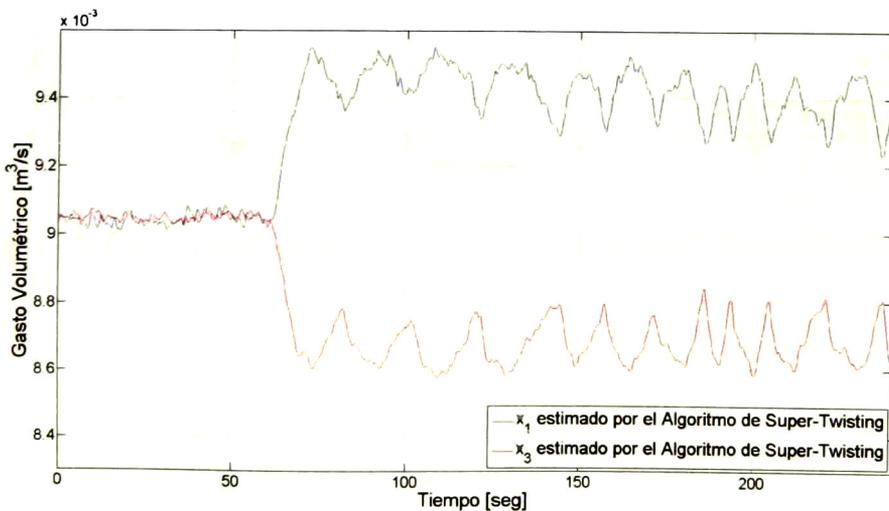


Figura 6.4: Gastos volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MDPO.

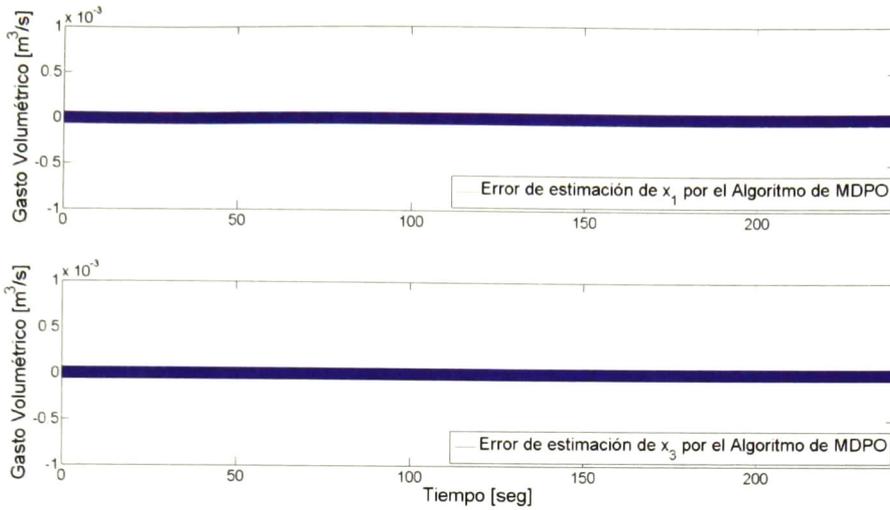


Figura 6.5: Errores de estimación del algoritmo MPDO.

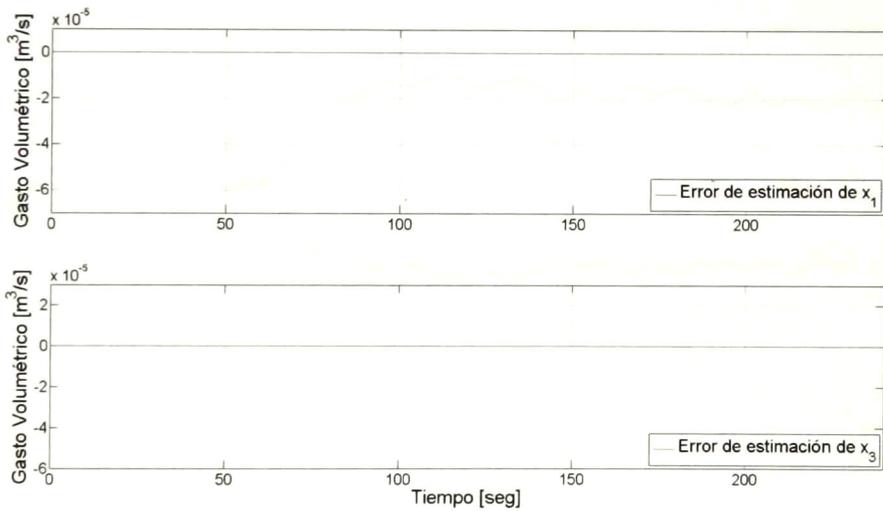


Figura 6.6: Errores de estimación del algoritmo basado en Super-Twisting.

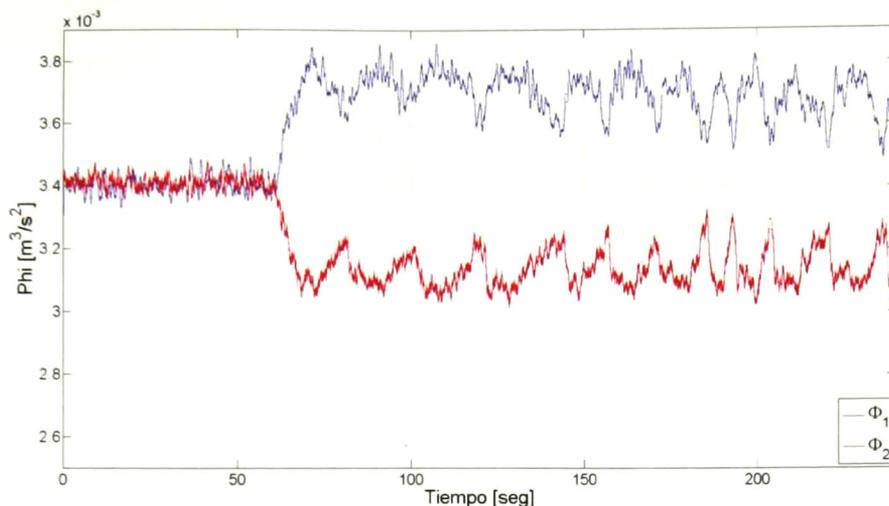


Figura 6.7: Φ continuas.

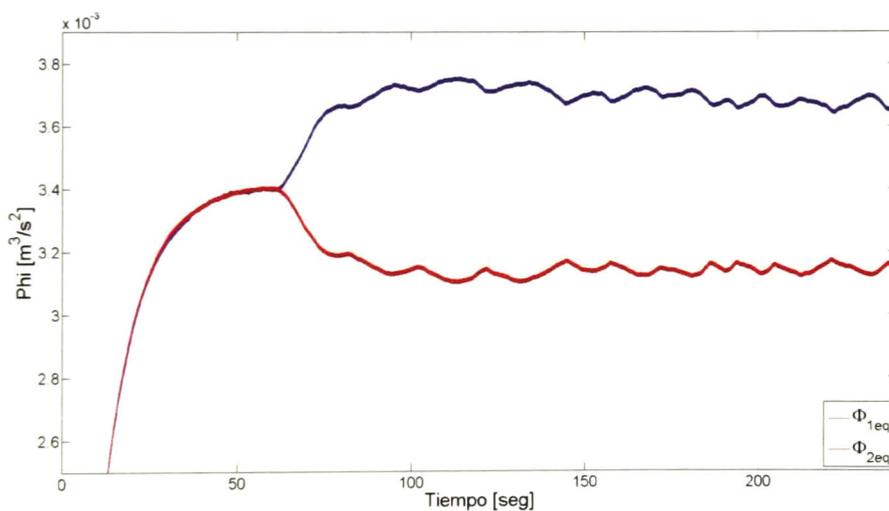


Figura 6.8: Φ equivalentes.

La Figura 6.10 muestra la presión estimada de ambos algoritmos, la cual se obtiene mediante las Ecuaciones (4.40) y (4.54). Finalmente en la Figura 6.11 muestra la estimación del parámetro λ por ambos algoritmos.

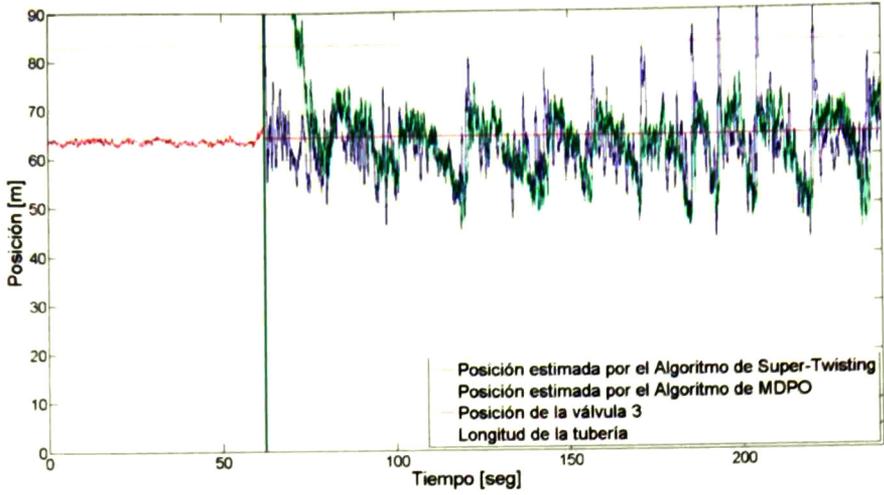


Figura 6.9: Posición de la fuga.

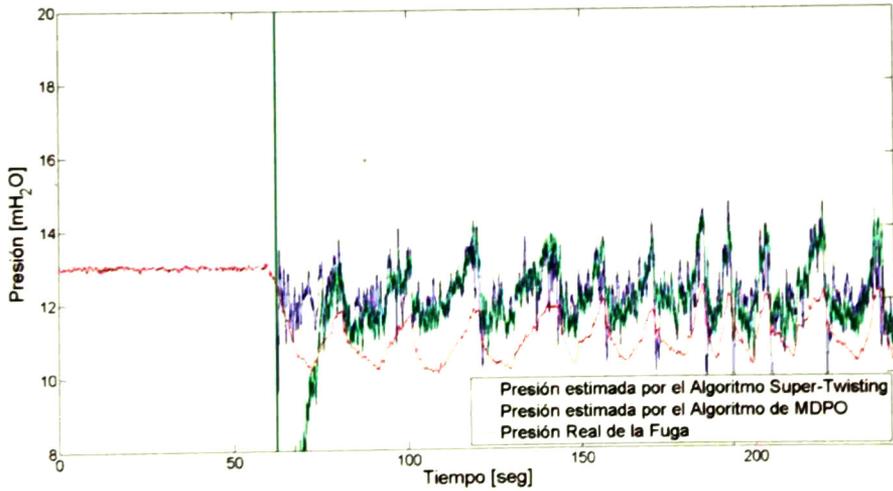


Figura 6.10: Presión en el punto de fuga.

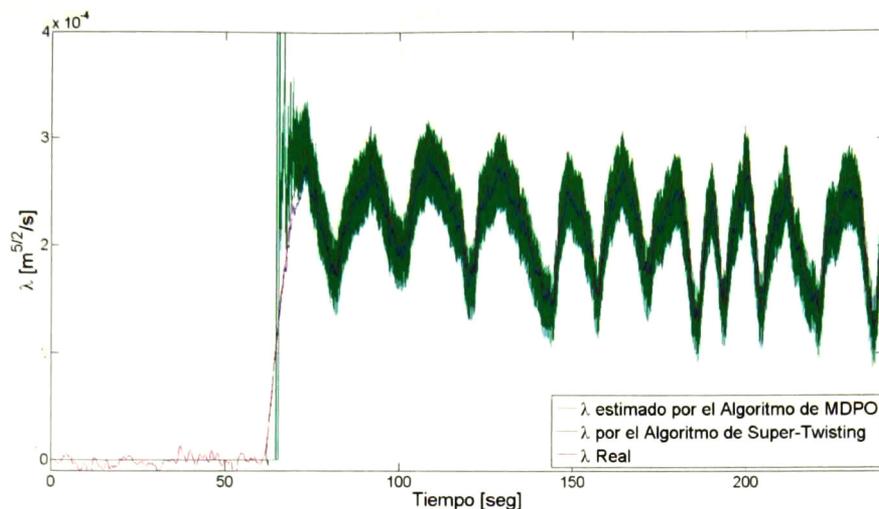


Figura 6.11: λ .

6.2. Experimento 2: Implementación en LabVIEW

En esta sección se muestran los resultados obtenidos por los dos nuevos algoritmos propuestos basados en las técnicas de modos deslizantes mostrados en la Sección 4.3, los cuales fueron implementados en LabVIEW utilizando una frecuencia de muestreo de 100 Hz . En la Tabla 6.2 se muestran los parámetros utilizados para la implementación. Dado que $\delta = 10$ entonces los gastos volumétricos estimados por el algoritmo basado en MDPO convergen en tiempo finito. El variador de frecuencia de la bomba operó a una frecuencia constante de $55Hz$.

Parámetro	Valor	Unidades	Parámetro	Valor	Unidades
$\hat{x}_1(0)$	0.009	m^3/s	δ	10	m
$\hat{x}_3(0)$	0.009	m^3/s	A	0.003088	m^2
$W_1(0)$	0.0035	m^3/s^2	α_1	0.032	m^3/s^2
$W_2(0)$	0.0035	m^3/s^2	α_2	0.032	m^3/s^2
L	83.2	m	β_1	0.01	$m^{\frac{3}{2}}/s^{\frac{1}{2}}$
g	9.78	m/s^2	β_2	0.01	$m^{\frac{3}{2}}/s^{\frac{1}{2}}$
D	0.06271	m	γ_1	0.00005	m^3/s^2
μ_1	42.094	m^{-3}	γ_2	0.00005	m^3/s^2
μ_2	42.32	m^{-3}			

Tabla 6.2: Condiciones iniciales y parámetros usados en la implementación en línea.

En este experimento se provocó una fuga con intensidad constante de $0.0007209m^3/s$ a los 50 s utilizando la válvula 1 del prototipo, la cual representa una fuga del 8.01 % del

gasto volumétrico nominal. La detección de una fuga en el sistema se realiza mediante la diferencia entre los gastos volumétricos, cuando ésta supere un umbral de $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ se activa una alarma, inicializando ambos algoritmos, cabe mencionar que el umbral utilizado es mayor a la desviación estandar del ruido de medición de los gastos volumétricos y representa una fuga de un 1.11% del gasto volumétrico de la tubería. Una vez se ha activado la alarma los valores de L , μ_1 y μ_2 se igualan al promedio de las ultimas 1000 muestras calculadas, los cuales se muestran en la Tabla 6.2 y que son calculados utilizando las Ecuaciones (2.37) y (2.34) hasta antes de la ocurrencia ésta.

En las Figuras 6.12 y 6.13 se muestran los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería, el ruido del gasto volumétrico medido en la entrada antes de ocurrir la fuga tiene una desviación estandar de $1.73 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ mientras que el ruido del gasto volumétrico medido en la salida tiene una desviación estandar de $1.11 * 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Al igual que en el experimento anterior ambos algoritmos son inicializados antes de que la fuga ocurra para que las condiciones iniciales de las funciones de Lyapunov al momento de ocurrir la fuga sean lo menor posible.

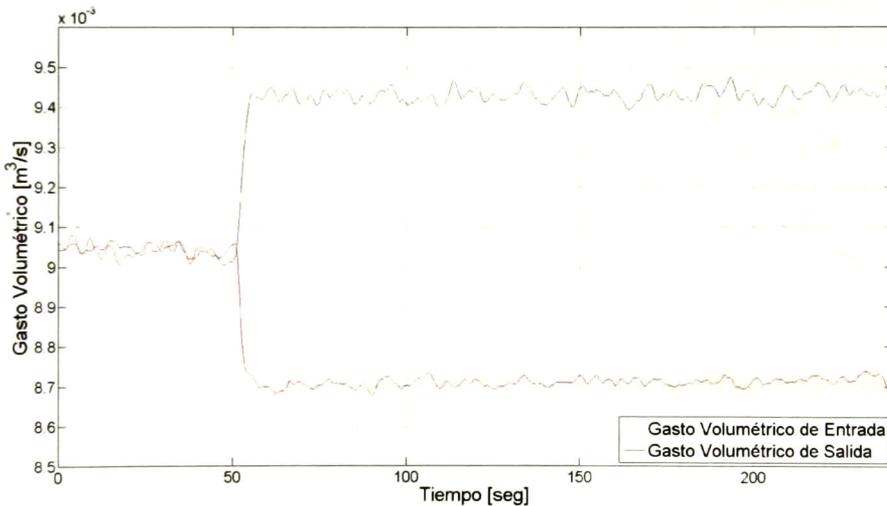


Figura 6.12: Gastos volumétricos medidos en la tubería.

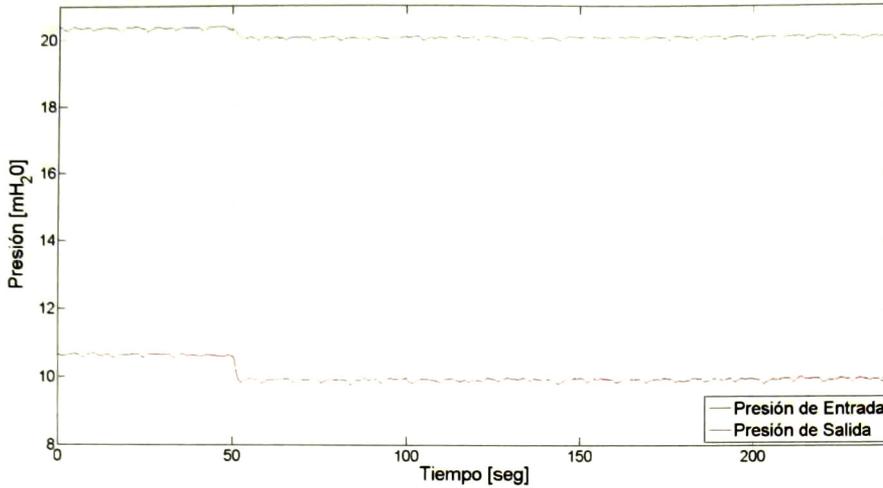


Figura 6.13: Presión de entrada y salida en la tubería.

En las Figuras 6.14 y 6.15 se muestran los gastos volumétricos estimados por ambos algoritmos. Además, en las Figuras 6.16 y 6.17 se muestran los errores de estimación de ambos algoritmos con respecto a los gastos volumétricos medidos. Las Φ equivalentes y continuas se muestran en las Figuras 6.18 y 6.19, donde se puede observar que ambos algoritmos estiman valores similares. En la Figura 6.20 se muestra la posición estimada de la fuga por ambos métodos, ésta es estimada usando las Ecuaciones (4.40) y (4.54). La longitud en equivalente recto de la fuga fue $68.137m$, las estimaciones promedio por los algoritmos de MDPO y Super-Twisting fueron $70.0227 m$ y $67.2232 m$ respectivamente.

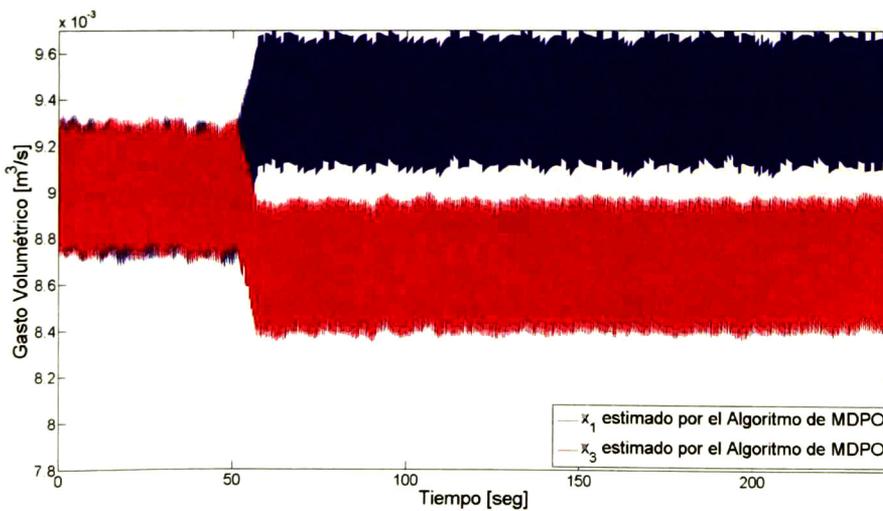


Figura 6.14: Gastos Volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MDPO.

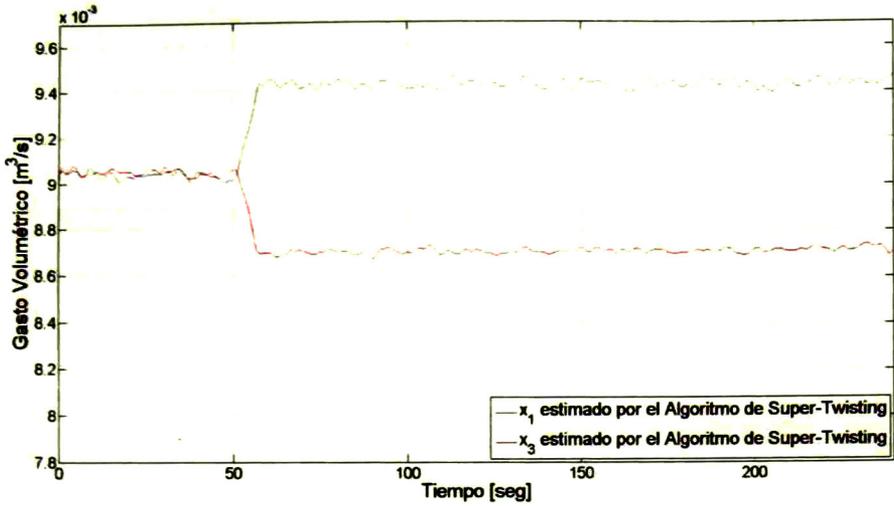


Figura 6.15: Gastos Volumétricos estimados por los algoritmos de Super-Twisting y MD-PO.

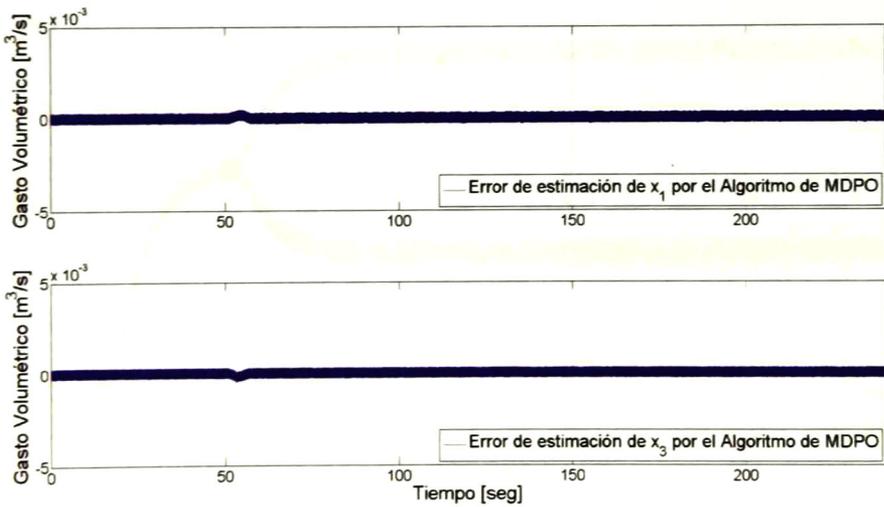


Figura 6.16: Errores de estimación del algoritmo MPDO.

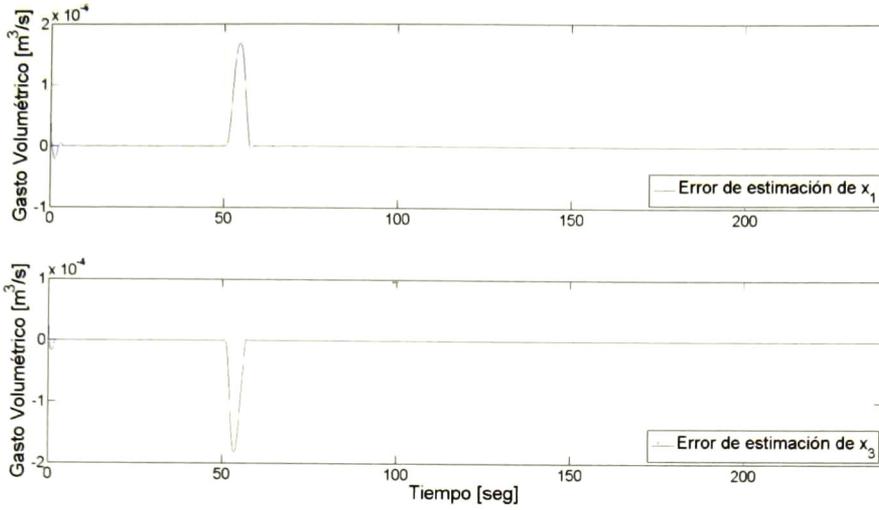


Figura 6.17: Errores de estimación del algoritmo basado en Super-Twisting.

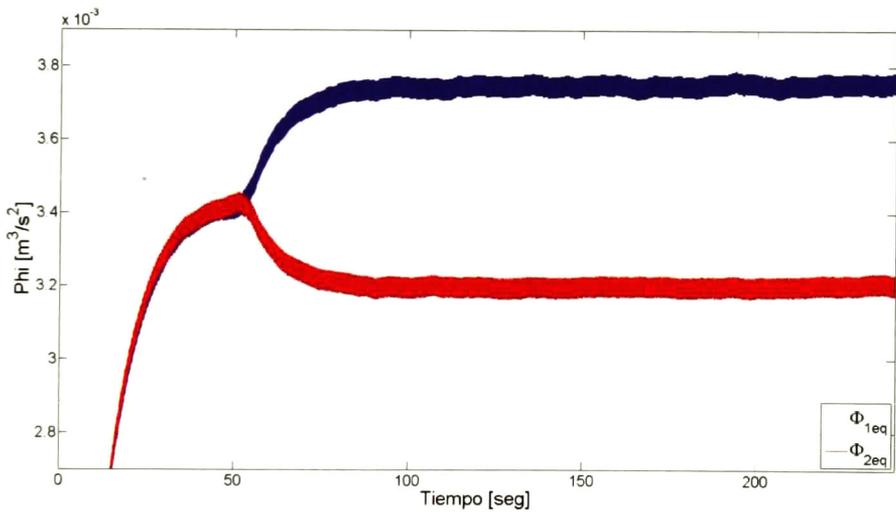


Figura 6.18: Φ equivalentes.

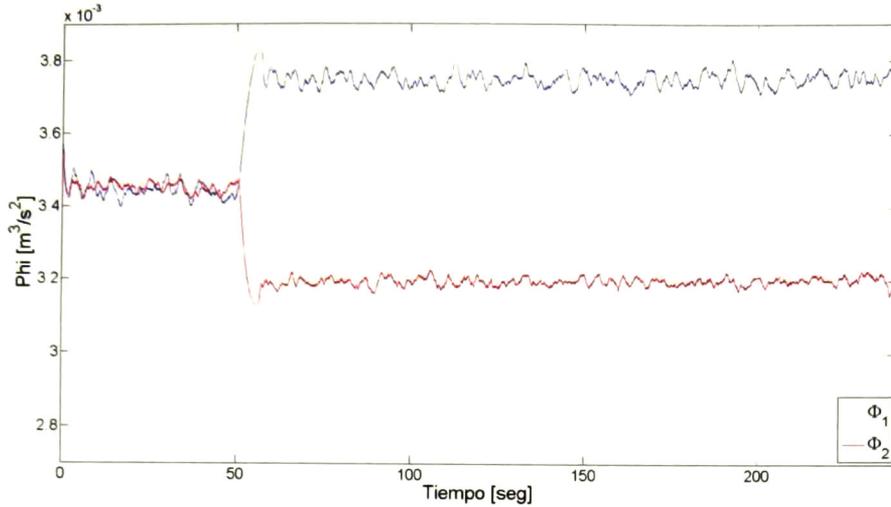


Figura 6.19: Φ continuas.

La Figura 6.21 muestra la presión estimada de ambos algoritmos la cual es estimada usando las ecuaciones (4.40) y (4.54). La presión de la fuga fue de $15.84mH_2O$, el algoritmo de MDPO estimó una presión promedio de $17.3267mH_2O$, mientras que el algoritmo de Super-Twisting estimó una presión promedio de $17.2126mH_2O$. Finalmente en la Figura 6.22 muestra la estimación del parámetro λ por ambos métodos, el parámetro λ tuvo un valor promedio después de la fuga de $0.000131m^{5/2}/s$, el algoritmo de MDPO estimó un valor promedio de λ igual a $0.00012472m^{5/2}/s$, mientras que el algoritmo de Super-Twisting estimó un valor promedio de λ igual a $0.00012516m^{5/2}/s$.

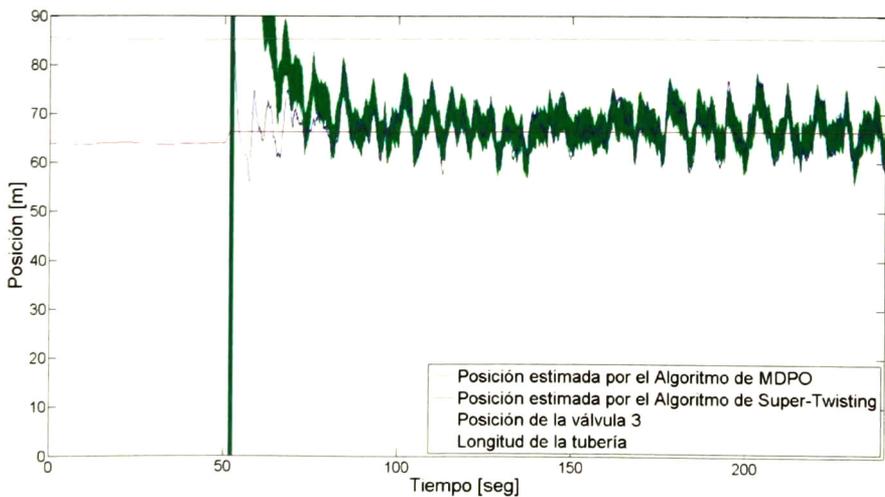


Figura 6.20: Posición de la fuga.

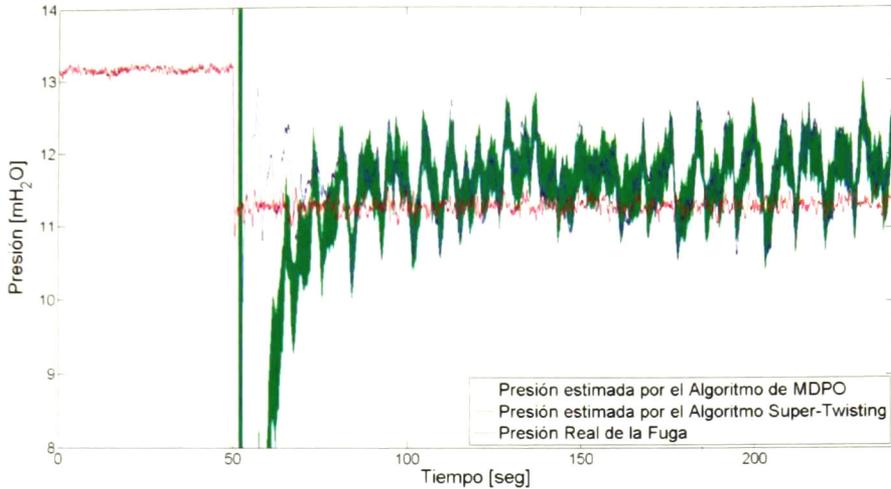


Figura 6.21: Presión en el punto de fuga.

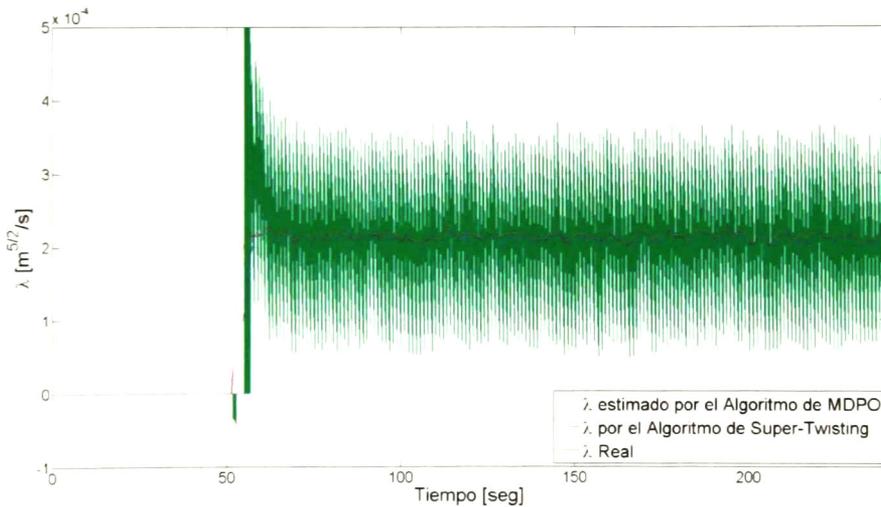


Figura 6.22: λ .

6.3. Experimento 3: Implementación del Banco de Aisladores con la Válvula 1

En el siguiente experimento se muestran los resultados del banco de aisladores implementados en tiempo real en línea a 100 Hz en el prototipo que se describió en el Capítulo 3. Los métodos de localización de fugas implementados son los mostrados en las Subsecciones 4.3.2 y 4.3.3, y los de las Secciones 4.2, 4.4 y 4.5. Dado que todos los métodos a

excepción del Filtro de Kalman Extendido no toman en cuenta el ruido de medición, lo cual genera que no estimen un valor constante, se utilizó un promediador móvil de 20seg en cada uno a excepción del Filtro de Kalman.

Los parámetros y condiciones iniciales utilizados para el algoritmo de Super-Twisting son los mismos que en el experimento anterior. Los valores de C_m utilizados en el experimento se muestran en la Tabla 6.3, se eligen los valores que cumplan con la Ecuación (5.9) y sean dependientes de L para que éstas dependan de la longitud en equivalente recto de la tubería.

Parámetro	Valor	Unidades
C_5	0.012L	m
C_4	0.006L	m
C_3	0.003L	m

Tabla 6.3: Valores de C.

Las matrices de covarianza del ruido en la medición y los estados utilizados en el método basado en el filtro de Kalman usado en este experimento fueron las siguientes:

$$R = \begin{bmatrix} 0.00001 & 0 \\ 0 & 0.00001 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 0.00001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.00001 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000001 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Las condiciones iniciales del filtro de Kalman extendido en el experimento fueron las siguientes:

$$\hat{x}(0) = [0.009m^3/s \quad 13mH_2O \quad 0.009m^3/s \quad 45m \quad 0m^{5/2}/s]^T \quad (6.2)$$

Al igual que en el experimento anterior una vez la diferencia de los gastos volumétricos supere el umbral de $0.0001m^3/s$ los valores de L , μ_1 y μ_2 se igualan al promedio de las ultimas 1000 muestras calculadas. Cuando la fuga es detectada el algoritmo del banco de aisladores espera 20s para asegurar que los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería sean constantes, este tiempo fue calculado usando la Ecuación (2.1).

Parámetro	Valor	Unidades
μ_1	41.2682	m^{-3}
μ_2	41.3335	m^{-3}
L	86.1539	m

Tabla 6.4: Parámetros congelados usados en la implementación en línea.

En este experimento se provocó una fuga con intensidad constante de $0.0004327m^3/s$ a los 50 s utilizando la válvula 1 del prototipo, la cual representa una fuga del 3.89% del gasto volumétrico nominal. Los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería se muestran en las Figuras 6.23 y 6.24, el ruido del gasto volumétrico medido en la entrada antes de ocurrir la fuga tiene una desviación estandar de $2.11 * 10^{-5}m^3/s$ mientras que el ruido del gasto volumétrico medido en la salida tiene una desviación estandar de $1.16 * 10^{-5}m^3/s$.

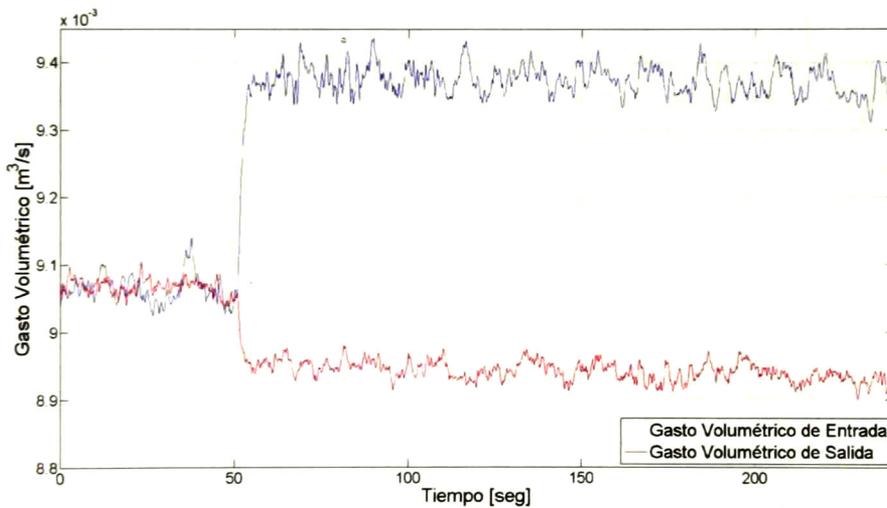


Figura 6.23: Gastos Volumétricos medidos en la tubería.

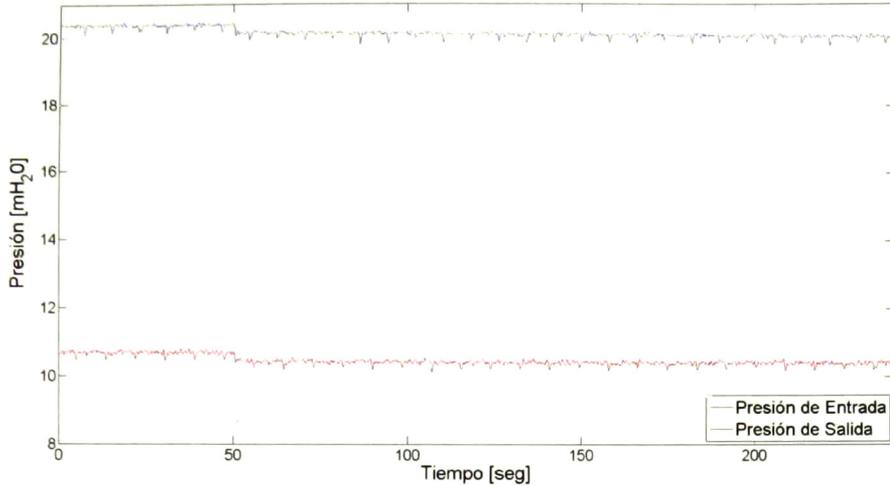


Figura 6.24: Presión de entrada y salida en la tubería.

En las Figuras 6.25 y 6.26 se muestra la estimación de la posición de la fuga hecha por cada uno de los métodos y el banco de aisladores, como se puede observar al momento de inicializarse el Filtro de Kalman aún no estimaba un valor de la posición de la fuga cercano al de los otros métodos por lo que al igual que el método de Billman son descartados. Finalmente cuando el filtro de Kalman estima un valor cercano a los otros 3 métodos este es incluido en el grupo con el que se determina la salida del banco.

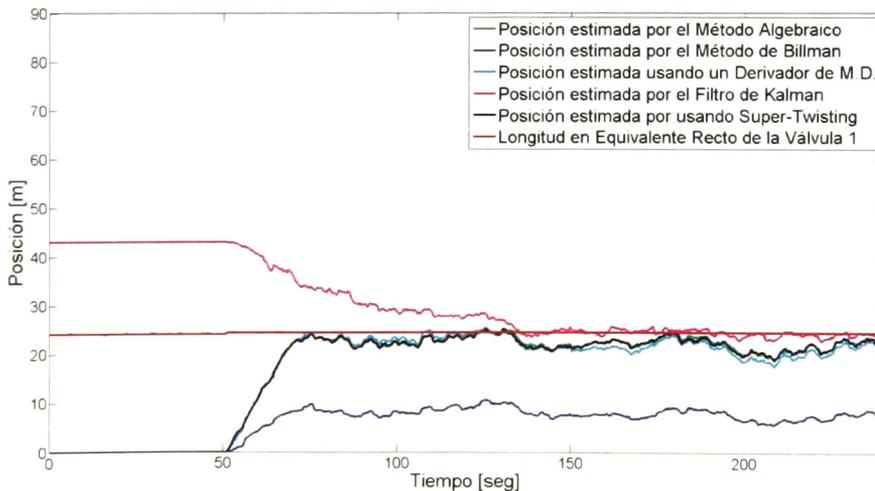


Figura 6.25: Posición de la fuga estimada por los 5 métodos.

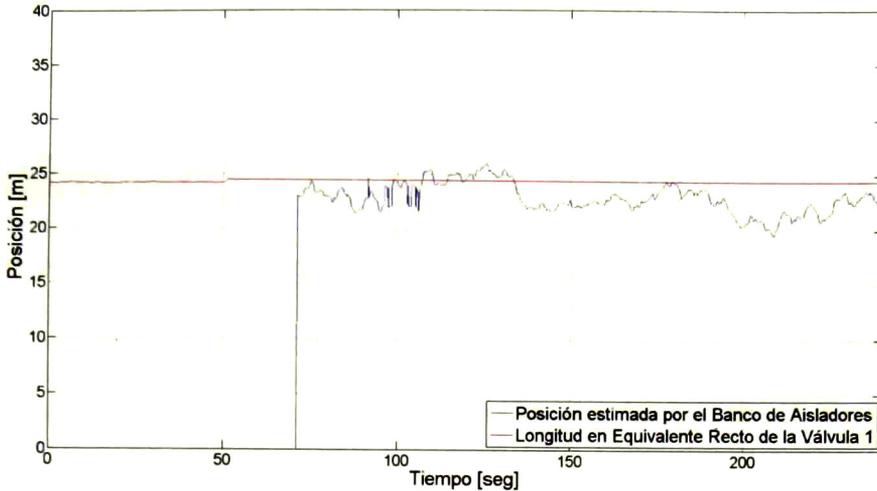


Figura 6.26: Posición de la fuga estimada por el banco de aisladores.

En base a la información recopilada el banco de aisladores llegó a un valor promedio de $22.9135m$, mientras que la posición de la válvula 1 era de $24.4462m$. Este error representa un 1.779% de la longitud en equivalente recto de la tubería.

6.4. Experimento 4: Implementación del Banco de Aisladores con la Válvula 3

En el siguiente experimento se muestran los resultados del banco de aisladores implementados en tiempo real en línea a 100 Hz en el prototipo que se describió en el Capítulo 3. Los métodos de localización de fugas implementados son los mostrados en las Subsecciones 4.3.2 y 4.3.3, y los de las Secciones 4.2, 4.4 y 4.5.

Los parámetros y condiciones iniciales utilizados para el algoritmo de Super-Twisting son los mismos que en el experimento anterior. Los valores de C_m son los utilizados en el experimento anterior. Las matrices de covarianza del ruido en la medición y los estados utilizados en el método basado en el filtro de Kalman usado en este experimento son las que se mostraron en la Ecuación 6.1 y las condiciones iniciales del filtro de Kalman están dadas por la Ecuación 6.2.

Al igual que en el experimento anterior una vez la diferencia de los gastos volumétricos supere el umbral de $0.0001m^3/s$ los valores de L , μ_1 y μ_2 se igualan al promedio de las últimas 1000 muestras calculadas. Cuando la fuga es detectada el algoritmo del banco de aisladores espera $20s$ para asegurar que los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería sean constantes, este tiempo fue calculado usando la Ecuación (2.1)

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Parámetro	Valor	Unidades
μ_1	41.2424	m^{-3}
μ_2	41.3104	m^{-3}
L	86.47	m

Tabla 6.5: Parámetros congelados usados en la implementación en línea

En este experimento se provocó una fuga con intensidad constante de $0.0005505m^3/s$ a los 50 s utilizando la válvula 3 del prototipo, la cual representa una fuga del 6.11 % del gasto volumétrico nominal. Los gastos volumétricos y presiones en los extremos de la tubería se muestran en las Figuras 6.23 y 6.24, el ruido del gasto volumétrico medido en la entrada antes de ocurrir la fuga tiene una desviación estandar de $2.19 * 10^{-5}m^3/s$ mientras que el ruido del gasto volumétrico medido en la salida tiene una desviación estandar de $1.27 * 10^{-5}m^3/s$.

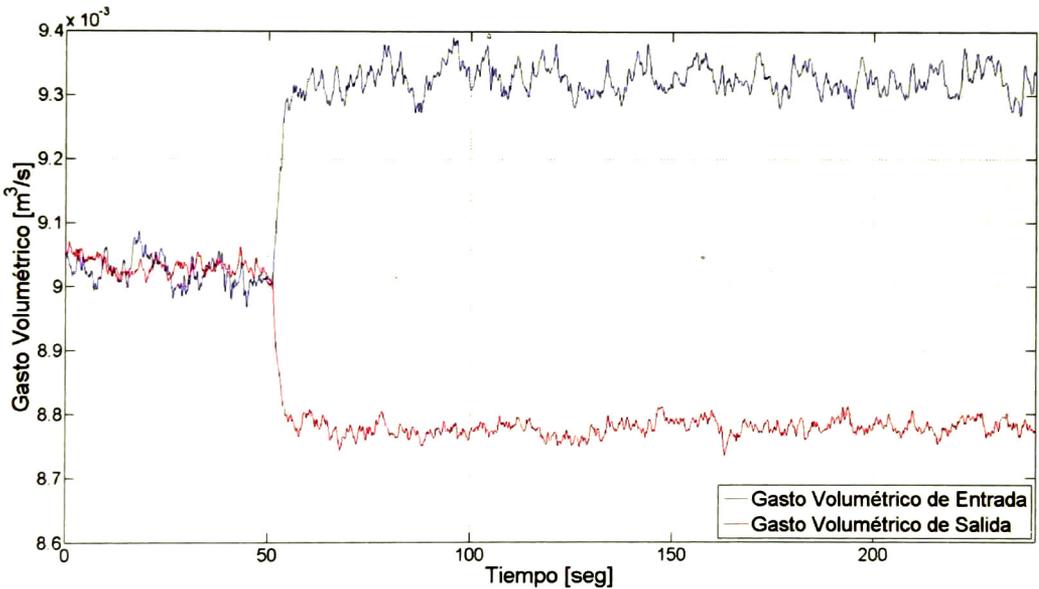


Figura 6.27: Gastos Volumétricos medidos en la tubería.

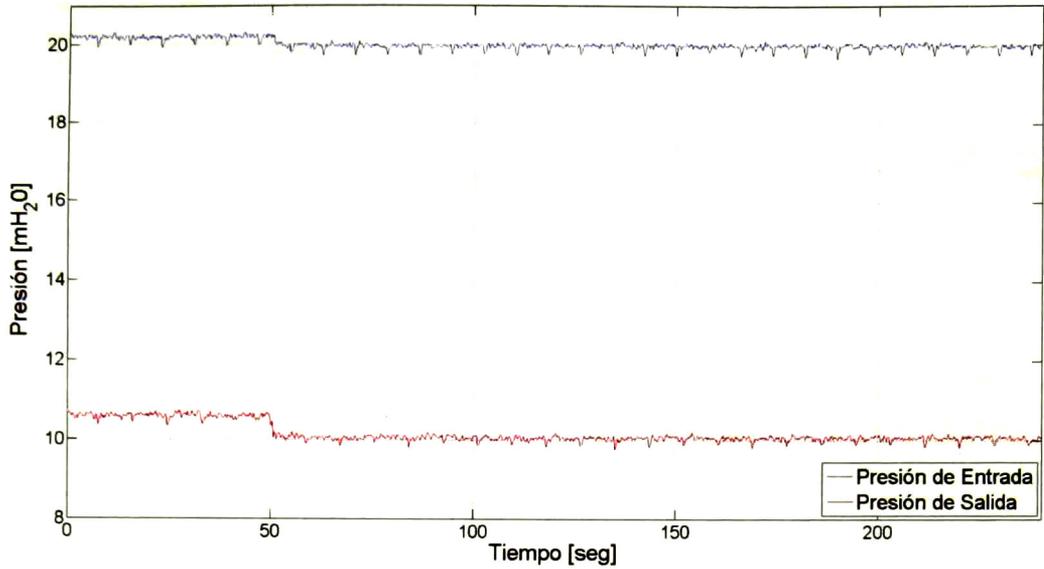


Figura 6.28: Presión de entrada y salida en la tubería.

En las Figuras 6.25 y 6.26 se muestra la estimación de la posición de la fuga hecha por cada uno de los métodos y el banco de aisladores, y como se puede observar los 5 métodos estiman alrededor del mismo valor la posición de la fuga, por lo que la salida del banco es un promedio del valor de los 5 métodos.

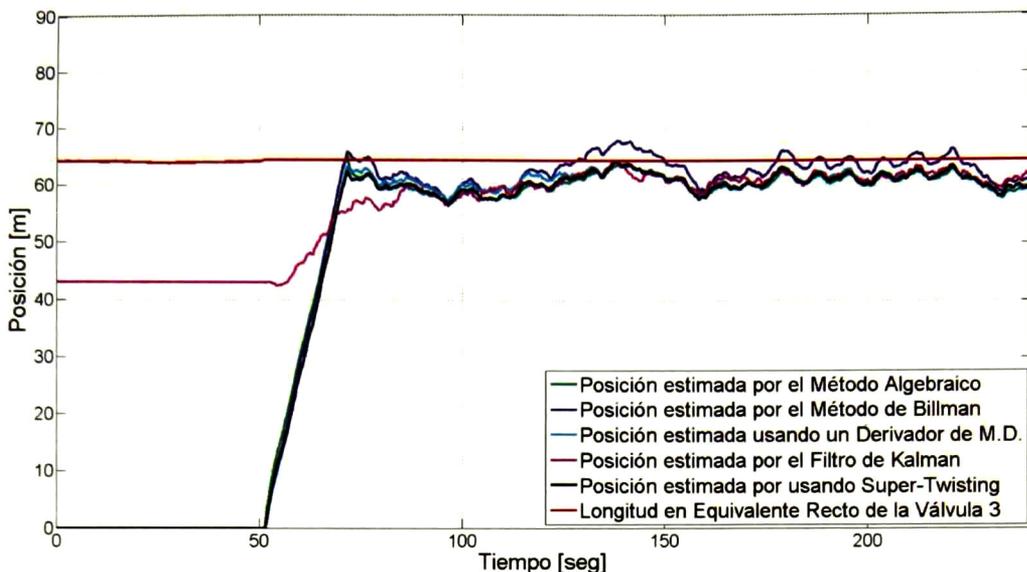


Figura 6.29: Posición de la fuga estimada por los 5 métodos.

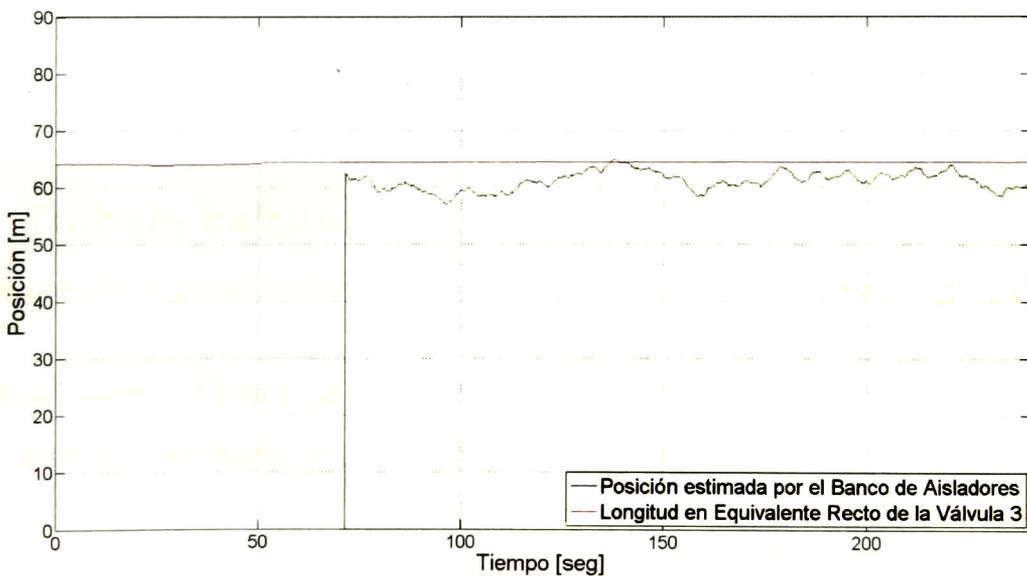


Figura 6.30: Posición de la fuga estimada por el banco de aisladores.

En base a la información recopilada, el banco de aisladores llegó a un valor promedio de $61.0838m$, mientras que la posición de la válvula 3 era de $64.5381m$. Este error representa un 3.994% de la longitud en equivalente recto de la tubería.

Capítulo 7

Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1. Conclusiones

En esta tesis se mostraron los resultados de dos nuevos algoritmos propuestos basados en modos deslizantes (MDPO y Super-Twisting). Ambos algoritmos estimaron valores similares en los experimentos pero el algoritmo basado en Super-Twisting mostró mejores resultados al estimar en menos tiempo la posición y presión de una fuga, debido al control virtual continuo usado en éste y que el algoritmo basado en MDPO usa filtros pasa bajas.

En este trabajo también se propuso un algoritmo basado en un banco de aisladores, el cual como se mostró en el Capítulo 6 y el cual está basado en descartar la estimación de aquellos métodos que estimen valores alejados a los otros. El banco de aisladores dio buenos resultados y mayor fiabilidad de la estimación que utilizar solo un algoritmo de localización de fugas.

7.2. Trabajo Futuro

En esta sección se mencionará los puntos más importantes con los que debe continuar el proyecto

- Transformación de la longitud en equivalente recto a la longitud original de la tubería.
- Adaptación de los algoritmos a tuberías con inclinación constante y variable.

Bibliografía

- [1] Z. Kowalczyk and K. Gunawickrama, "Leak detection and isolation for transmission pipelines via nonlinear state estimation," *4th IFAC Safeprocess00*, vol. 2, pp. 943–948, 2000.
- [2] L. Billmann and R. Isermann, "Leak detection methods for pipelines," *Automatica*, vol. 23, no. 3, pp. 381–385, 1987.
- [3] A. Benkherouf and A. Allidina, "Leak detection and location in gas pipelines," in *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*, vol. 135, no. 2. IET, 1988, pp. 142–148.
- [4] G. Besancon, I. R. Scola, M. Guillén, J.-F. Dulhoste, R. Santos, and D. Georges, "Observer-based detection and location of partial blockages in pipelines," in *2nd International Conference on Control and Fault Tolerant Systems*, 2013.
- [5] C. Verde, "Minimal order nonlinear observer for leak detection," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 126, no. 3, pp. 467–472, 2004.
- [6] M. Negrete and C. Verde, "Multi-leak reconstruction in pipelines by sliding mode observers," in *Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, vol. 8, no. 1, 2012, pp. 934–939.
- [7] G. Espinoza-Moreno, O. Begovich, and J. Sanchez-Torres, "Real time leak detection and isolation in pipelines: A comparison between sliding mode observer and algebraic steady state method," in *World Automation Congress (WAC), 2014*, 2014, pp. 748–753. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6936130>
- [8] J. A. Roberson, J. J. Cassidy, and M. H. Chaudhry, *Hydraulic engineering*. Wiley New York, 1998.
- [9] M. Angulo and C. Verde, "Second-order sliding mode algorithms for the reconstruction of leaks," in *Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol), 2013 Conference on*, 2013, pp. 566–571. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6693874>
- [10] A. Navarro, O. Begovich, G. Besancon, and J. Dulhoste, "Real-time leak isolation based on state estimation in a plastic pipeline," in *Control Applications (CCA)*,

- 2011 *IEEE International Conference on*, 2011, pp. 953–957. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6044397>
- [11] L. F. Moody, “Friction factors for pipe flow,” *Trans. Asme*, vol. 66, no. 8, pp. 671–684, 1944.
- [12] P. K. Swamee and A. K. Jain, “Explicit equations for pipe-flow problems,” *Journal of the hydraulics division*, vol. 102, no. 5, pp. 657–664, 1976.
- [13] S. Haaland, “Simple and explicit formulas for the friction factor in turbulent pipe flow,” *Journal of Fluids Engineering*, vol. 105, no. 1, pp. 89–90, 1983.
- [14] Espinoza-Moreno, “Comparación entre algoritmos de detección y localización de fugas en tiempo real,” Tesis, Cinvestav, Unidad Guadalajara, 2014.
- [15] M. Tanaka, G. Girard, R. Davis, A. Peuto, and N. Bignell, “Recommended table for the density of water between 0 c and 40 c based on recent experimental reports,” *Metrologia*, vol. 38, no. 4, p. 301, 2001.
- [16] H. K. Khalil, “Nonlinear systems, 3rd,” *New Jewsey, Prentice Hall*, vol. 9, 2002.
- [17] O. Begovich and A. Pizano-Moreno, “Application of a leak detection algorithm in a water pipeline prototype: difficulties and solutions,” in *Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2008. CCE 2008. 5th International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 26–30.
- [18] O. Begovich and G. Valdovinos-Villalobos, “Dsp application of a water-leak detection and isolation algorithm,” in *Electrical Engineering Computing Science and Automatic Control (CCE), 2010 7th International Conference on*. IEEE, 2010, pp. 93–98.
- [19] O. Begovich, A. Pizano-Moreno, and G. Besancon, “Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype,” *Latin American applied research*, vol. 42, no. 2, pp. 131–140, 2012.
- [20] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding mode control and observation*. Springer, 2014.
- [21] V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, *Sliding mode control in electro-mechanical systems*. CRC press, 2009, vol. 34.
- [22] E. Cruz-Zavala, J. Moreno, L. M. Fridman, *et al.*, “Uniform robust exact differentiator,” *Automatic Control, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 11, pp. 2727–2733, 2011.
- [23] E. Garcia-Malacara, O. Begovich, and A. Pizano-Moreno, “Diagnosis of multiple non-concurrent leaks in pipelines based on a static model,” in *World Automation Congress (WAC), 2012*. IEEE, 2012, pp. 1–6.

- [24] O. Begovich, A. Navarro, E. N. Sanchez, and G. Besancon, "Comparison of two detection algorithms for pipeline leaks," in *CCA-16th IEEE International Conference on Control Applications*. Singapore: IEEE, 2007, pp. 777–782.
- [25] G. Besancon, D. Georges, O. Begovich, C. Verde, and C. Aldana, "Direct observer design for leak detection and estimation in pipelines," in *Control Conference (ECC), 2007 European*. IEEE, 2007, pp. 5666–5670.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Diseño de un Banco de Aisladores de Fugas

del (la) C.

José Eduardo CARVAJAL RUBIO

el día 25 de Septiembre de 2015.

**Dr. Arturo del Sagrado Corazón
Sánchez Carmona
Investigador CINEVESTAV 3C
CINEVESTAV Unidad Guadalajara**

**Dra. Ofelia Begovich Mendoza
Investigador CINEVESTAV 3B
CINEVESTAV Unidad Guadalajara**

**Dr. Carlos Renato Vazquez Topete
Profesor Investigador
Instituto Tecnológico y de Estudios
Superiores de Monterrey, Campus
Guadalajara**



CINVESTAV - IPN
Biblioteca Central



SSIT0013503