



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**LOCALIZACIÓN DE FUGAS CON UNA EXTRACCIÓN FIJA**

**TESIS**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO**

**PRESENTA:**

Luis Alfonso Martínez Serret

**DIRECTOR DE TESIS:**

Dra. María Cristina Verde Rodarte



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016**





# Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. Objetivos	9
1.2. Logros o contribuciones	9
1.3. Estado del arte sobre diagnóstico y detección de fallas, FDI, y su aplicación a la detección y localización de fugas	10
1.4. Marco conceptual	11
1.5. Metodologías para la detección y aislamiento de fallas	12
1.5.1. Métodos basados en modelos matemáticos	14
2. GENERACIÓN ESTÁTICA DE RESIDUOS EN UN DUCTO CON EXTRACCIONES	18
2.1. Modelo del fluido	18
2.2. Modelo de extracción por secciones	22
2.3. Modelo generalizado de la extracción	24
2.4. Cálculo de una fuga con una extracción conocida	26
2.4.1. Análisis de sensibilidad	26
2.4.2. Localización estática de fugas	28
3. DESCRIPCIÓN DEL DUCTO Y LA INSTRUMENTACIÓN	31
3.1. Funcionamiento de la tubería	31
3.1.1. Control de la presión a la entrada	31
3.1.2. Toma lateral fija y posiciones de fuga	31
3.1.3. Parámetros de la tubería	32
3.2. Descripción de la tubería	32
3.2.1. Sensor de coriolis	35
3.2.2. Sensor de presión	39
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES	41
4.1. Expresión estática para una toma lateral o fuga	41
4.1.1. Experimento 1	42
4.1.2. Experimento 2	44
4.1.3. Posiciones de fuga	45
4.1.4. experimento 3	45
4.1.5. experimento 4	46
4.2. Experimento 5	50
4.2.1. Evaluación de residuos	54
4.2.2. Umbrales adaptables	54
4.2.3. Implementación de umbrales adaptables	56
4.2.4. Experimento 6, implementación de un umbral	57
5. CONCLUSIONES	62

6. BIBLIOGRAFÍA	63
1. ANEXO 1	65
1.1. Código de matlab . . . . .	65

## Índice de figuras

1.1. Procedimiento de diagnóstico a partir de mediciones del proceso a) con un modelo matemático, b) con modelo de señales para $n_f$ escenarios o clases de fallas considerando el características y una matriz de datos históricos $Y$ . . . . .	13
1.2. Descripción general del sistema de diagnóstico a partir del conjunto de entradas $U$ y de salidas $Y$ del proceso. En el primer nivel se generan señales de diagnóstico y a partir de éstas se determina el estado del proceso y de las fallas existentes . . . . .	17
2.1. Perfil topográfico de la tubería . . . . .	21
2.2. Perfil del cabezal de presión de la tubería . . . . .	21
2.3. Perfil del cabezal piezométrico de la tubería . . . . .	22
2.4. Descripción de variables de una tubería con una sola extracción . . . . .	24
2.5. Variables de tubería con dos extracciones en el punto $z_1 + z_2$ y $Q_{in} = Q_2 = Q_{out}$ . . . . .	27
3.1. Diagrama de la tubería experimental para detección de fugas . . . . .	33
3.2. vista lateral de la tubería . . . . .	34
3.3. Vista lateral de la tubería . . . . .	35
3.4. sensor de coriolis usado en la tubería . . . . .	36
3.5. Sensor de coriolis a la entrada de la tubería . . . . .	37
3.6. Sensor de coriolis a la salida de la tubería . . . . .	37
3.7. Comportamiento de los flujos ante un cambio súbito en la válvula 3 . . . . .	38
3.8. Sensor de presión a la entrada de la tubería . . . . .	39
3.9. Sensor de presión a la salida de la tubería . . . . .	40
3.10. Comportamiento de las presiones ante un cambio súbito en la válvula 3 . . . . .	40
4.1. gráfica del flujo de entrada vs flujo de extracción mas flujo de salida . . . . .	42
4.2. Comparación entre el flujo de entrada $Q_{in}$ y el flujo de salida $Q_{out}$ a lo largo de todo el experimento . . . . .	43
4.3. En la gráfica se puede observar el cálculo de la $z$ equivalente a lo largo del experimento 1 y 2. . . . .	44
4.4. . . . . .	46
4.5. Evolución del residuo . . . . .	48
4.6. $z$ equivalente . . . . .	49
4.7. $z$ equivalente . . . . .	50
4.8. $z$ estimada con fugas antes de la extracción conocida . . . . .	52
4.9. $z$ estimada con fugas después de la extracción conocida . . . . .	53
4.10. evolución del residuo . . . . .	53
4.11. Implementación de un umbral adaptable simétrico . . . . .	55
4.12. Evolución del residuo y sus umbrales adaptables . . . . .	55
4.13. Modelo en simulink del generador de umbrales . . . . .	57
4.14. Evolución de los umbrales adaptables con una apertura de válvula del 100 % de la válvula . . . . .	58
4.15. Evolución del residuo y de los umbrales adaptables, con una apertura del 75 % de la válvula . . . . .	59

4.16. Evolución del residuo y de los umbrales adaptables, con una apertura del 50 % de la válvula . . . . . 60

# 1. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, grandes redes de tuberías han sido construidas con el propósito de transportar agua potable, líquidos industriales y gases, éstas han sido el principal método de transporte de fluidos. Por tal motivo se requiere un manejo adecuado de las tuberías esto para prevenir pérdidas económicas, accidentes fatales y daños al ambiente. El diagnóstico de fugas para líquidos peligrosos es un reto ya que un mal manejo puede tener consecuencias fatales. Las causas de fugas son atribuidas a diversas causas tales como el envejecimiento, corrosión, variaciones climatológicas, grietas y defectos en las uniones de la tubería

A medida que las redes de tuberías crecen, la cantidad total de energía y material que se está siendo manejado aumenta, por tal motivo la detección de fugas se hace de una manera más eficiente así como el diagnóstico, visto desde un punto de vista de seguridad y de reducción de costos.

En términos de costo, Un estudio canadiense reporta un gasto promedio de 82 millones de dólares por año para reparar tuberías averiadas; además, una de las causas de la pérdida de volumen son las fugas [4]

En Estados Unidos, es necesaria una inversión estimada de 200 billones de dólares es para el mantenimiento de tuberías por las siguientes décadas, específicamente una de las principales problemáticas en las tuberías de agua es remplazar las tuberías antiguas.

En el trabajo presentado por (Verde 2001), se propone un método para generar; a partir del modelo no lineal, con múltiples fallas, del fluido; un conjunto de sistemas desacoplados de una falla y sensibles al resto, el cual puede emplearse para generar los residuos vía observadores no lineales.

En (Verde 2004) el problema de detección se resuelve asumiendo un modelo de dimensión finita no lineal del fluido con incertidumbres en la posición de la falla y generando el residuo mediante dos observadores no lineales de orden mínimo. Se determina además la relación estática entre cada componente del residuo y el error de posición, lo cual permite aprovechar la ventaja de la ecuación residual para aislar una falla.

El problema de múltiples fugas se aborda también en (Jiménez y Verde, 2012), donde, analizando la respuesta en frecuencia para una y para dos fugas, se diseñan generadores de residuos utilizando como estructura nominal el modelo de una fuga en una tubería, de modo que el residuo resultante sea robusto al caso de una fuga y sensible ante la presencia de más de una fuga. En este trabajo se resalta la limitación en el ancho de banda de sensores de gasto y presión para su aplicación práctica.

En (Tulio y Verde, 2013), se aborda el problema de reconstrucción para los casos de una y de dos fugas, mediante observadores en modos deslizantes, presentando condiciones necesarias y suficientes para la estimación del gasto y posición de una fuga; aunque para el caso de dos fugas; solo pueden estimarse los gastos, si se asumen conocidas las posiciones de las mismas.

## 1.1. Objetivos

En el artículo Reference model-based observers for locating leaks in a branched pipeline IFAC 9th Safeprocess escrito por C. Verde y L. Torres, hacen referencia a un algoritmo, cuya finalidad es la de hacer el cálculo de la posición, exacta, de una fuga. Lo innovador de esta metodología es que se puede ubicar la falla aun existiendo otra extracción en la tubería, solo que dicha toma debe de ser conocida.

El objetivo principal de este trabajo será validar experimentalmente el algoritmo de fuga con extracción conocida que se presenta en el artículo antes mencionado, para esto se tendrán que plantear objetivos parciales ya que se diseñaran varios experimentos, con la finalidad de hacerlo más entendible.

El primer objetivo es el calcular la ubicación exacta de una fuga; ante diversos escenarios, como son: diferentes gastos del fluido y cambios en el punto de operación, así como verificar el correcto funcionamiento del algoritmo de localización de una fuga.

El segundo objetivo es ubicar la falla; es decir si se encuentra antes o después de la extracción conocida, sin perder de vista que no solo se debe de posicionar correctamente la fuga si no que se debe de hacer la estimación correcta de la  $z$  calculada.

Como último objetivo será implementar un umbral, debido a la naturaleza del propio experimento, a las mediciones ruidosas y para evitar falsas alarmas se estableció un umbral adaptable.

## 1.2. Logros o contribuciones

Los logros que se esperan obtener son el cumplir cada uno de los objetivos planteados para todos los experimentos implementados a lo largo de la elaboración de este trabajo. De la siguiente manera se espera hacer la contribución de rectificar el algoritmo de fuga con extracción conocida que se hace mención con anterioridad en el trabajo.

Con base al primer objetivo planteado, cambios en el punto de operación y flujo, se obtuvo un resultado favorable, el algoritmo se comportó de una manera estable ante cambios en el punto de operación. En contraparte en el momento en el cual se presentarán cambios en la cantidad de flujo el cálculo tiende a hacerse erróneo. Cuando la apertura de la válvula es del 30% o menos el cálculo deja de ser confiable.

Los resultados obtenidos en el segundo experimento, localización de fuga aguas arriba o aguas abajo, fueron los esperados el algoritmo no solo demostró ser capaz de ubicar la fuga con respecto a la extracción conocida sino también hacer el cálculo de la localización de la falla.

El último experimento, implementación de un umbral, también se obtuvieron resultados positivos, es decir, se logró establecer un umbral adaptable evitando falsas alarmas en el cálculo de la z estimada.

El objetivo general de este trabajo se cumplió de manera total ya que se pudo verificar el algoritmo e implementar un umbral.

### 1.3. Estado del arte sobre diagnóstico y detección de fallas, FDI, y su aplicación a la detección y localización de fugas

Los primeros antecedentes de los sistemas de diagnóstico se tienen desde la década de los años 30's y surgen de una manera empírica ante la demanda de la ingeniería de procesos en refinería y petroquímica.

Desde los años setentas existió un interés muy grande por parte de la comunidad de control automático y aprovechando herramientas ya consolidadas, basadas en modelos analíticos como el diseño de observadores y los métodos de identificación la idea era que éstos métodos reemplazaran al método de redundancia física, éste método consiste en duplicar sensores, actuadores o incluso algunas partes del proceso y a partir de la información y acciones de éstos discernir las condiciones de operación. Además se empezaron a implementar algoritmos de control más sofisticados, usando computadoras para aplicaciones en la ingeniería de procesos, éste avance hizo posible la inclusión de sistemas de protección implementados por algoritmos de software en los sistemas automatizados, se puede decir que estos son los antecedentes de los sistemas de protección actuales.

La década de los años ochenta fue muy importante para la teoría de control ya que hubo un gran avance en las técnicas de diagnóstico, abriendo las opciones de los algoritmos que se podrían implementar y el tipo de aplicaciones. Se incluyeron en sistemas mecánicos, redes de distribución, la industria del transporte.

Dentro de éste marco de referencia se propusieron tres herramientas; usar un observador para generar señales representativas de las fallas de los instrumentos (Clark, 1978), generar directamente relaciones redundantes a partir de las mediciones de un sistema (Chow y Willsky, 1984) y buscar las desviaciones de éstos en condiciones de fallas vía identificación de parámetros (Isermann, 1993).

La primera reunión de la IFAC (International Federation of Automatic Control) en 1991 dio origen al Comité Técnico de Safeprocess, fue sobre temas específicos de seguridad de procesos, se resaltó la importancia de los métodos basados en modelos analíticos.

## 1.4. Marco conceptual

El comité de Safeprocess de la IFAC ha establecido un vocabulario común y preciso, el cual está publicado en diversos libros en inglés (Isermann, 2006; Blanke et al., 2003). La terminología usada en español fue publicada por (Puig et al., 2004), sustituyendo la palabra fallo por falla del léxico latinoamericano. Las definiciones fundamentales usadas en el contexto de seguridad son el concepto de falla y de avería.

Una falla(fault) consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándares de operación. El modo de falla es la forma observable de la falla o de la disfunción, y describe de manera precisa, la manera en la cual el sistema no cumple su función. Por ejemplo: paro posible, arranque imposible, pérdida de función, funcionamiento degradado, por mencionar algunas.

Una avería(failure) corresponde a la interrupción permanente de la capacidad del sistema, para cumplir una función requerida en condiciones específicas.

Una disfunción, (malfunction), se denota cuando el sistema es incapaz de cumplir con alguna de las funciones para las que fue diseñado, de manera intermitente.

Cuando se considera la dependencia temporal de las fallas se les clasifica de la siguiente forma:

1. Falla abrupta: La falla se manifiesta con un cambio repentino en el funcionamiento y puede ser modelada mediante una función tipo escalón, donde se desconoce el tiempo de ocurrencia.
2. Falla incipiente: Esta falla se manifiesta como un cambio de magnitud en las variables del sistema que va aumentando paulatinamente con respecto al tiempo y puede modelarse mediante una función tipo rampa con un tiempo de ocurrencia desconocido. Un ejemplo de este tipo de falla son la que producen un deterioro paulatino en el proceso a través del tiempo como es el desgaste de una válvula.
3. Falla intermitente: Este tipo de falla se considera que no tiene una evolución determinada en el tiempo y frecuentemente se presenta solamente en ciclos de trabajo de manera aleatoria y desaparece también de la misma forma.

Existen cuatro aspectos fundamentales para la correcta operación de un sistema de tuberías: seguridad, abastecimiento continuo, eficiencia económica y cumplimiento de las leyes y regulaciones. A pesar de las continuas mejoras implementadas en el aspecto de seguridad, específicamente en los procesos de supervisión e inspección, accidentes y fallas en gaseoductos y oleoductos continúan ocurriendo; ya sea debido a errores internos (materiales, proceso de manufactura, diseño) o por interferencia externa (desastres naturales, excavaciones por terceras partes, sabotaje). Estos accidentes deben ser tomados en cuenta muy seriamente, no sólo debido a las pérdidas económicas que

se pueden originar, sino sobretodo a la posibilidad de generar pérdida de vidas humanas y daños irreparables al medio ambiente. En este sentido, en el año 2005, sólo en los Estados Unidos, se registró un total de 492 incidentes en el sistema nacional de tuberías de transporte de gas natural y líquidos peligrosos, incluyendo petróleo, generando pérdidas económicas de alrededor de 800 millones de dólares y causando la muerte de 19 personas.

En este trabajo, se presentan algunos resultados interesantes sobre diagnóstico de fallas, aplicados a la detección y localización de fugas en ductos, considerando que se cuenta con mediciones de gasto y presión en los extremos del ducto. Las técnicas aquí presentadas se desarrollan en su mayoría bajo la consideración de que se cuenta con un modelo analítico del proceso.

### 1.5. Metodologías para la detección y aislamiento de fallas

Partiendo del hecho de que diagnosticar significa genéricamente recoger y analizar datos para evaluar problemas de diversa naturaleza, las funciones que el sistema de diagnóstico debe realizar son múltiples. Describiendo las funciones que éste debe realizar de manera automática y presentando lineamientos de cómo se puede llevar a cabo. Para una presentación detallada de las tareas que integran un diagnóstico, en función de la información disponible del sistema por diagnosticar, (Venkatasubramanian et al. 2003a).

El proceso de diagnóstico está formado por varias tareas que pueden realizarse por etapas.

La Figura 1.1. describe los dos caminos que pueden seguirse a partir de las mediciones para obtener el conjunto mínimo de componentes dañados, gracias al conocimiento sobre el proceso y sus modos de falla.

La separación de los métodos es consecuencia de la disponibilidad del conocimiento, el cual condiciona al conjunto de algoritmos de diagnóstico posible de usar. Cuando el comportamiento del proceso puede escribirse bajo la forma de un modelo matemático explícito, la secuencia a seguir se muestra en el diagrama a) de la Figura 1.1. Por otro lado, el diagrama b) de la misma figura, describe otro tipo de procedimiento, donde por medio de las características de mediciones, seleccionadas a priori, considerando el tipo de fallas que se buscan determinar, o de un arreglo de datos históricos de las señales o secuencia de datos y se deben reconocer  $n_f$  clases de fallas. No olvidar que una falla es la desviación de una característica de un sistema con respecto a un comportamiento normal; y el punto de partida para diagnosticarlas son las mediciones y señales brutas del proceso, indicadas por las flechas más a la izquierda en ambos procedimientos en la Figura 1.1.

En el caso del procedimiento con modelo matemático, secuencia a), primero hay que detectar la existencia de una falla. Esto se hace gracias a señales específicas llamadas indicadores de fallas conocidas comúnmente como residuos. Estos indicadores se generan usando las mediciones de las entradas y salidas reales del proceso con ecuaciones específicas, deducidas del modelo, que se llaman relaciones de redundancia analítica. Estos indicadores se convierten en síntomas, que son

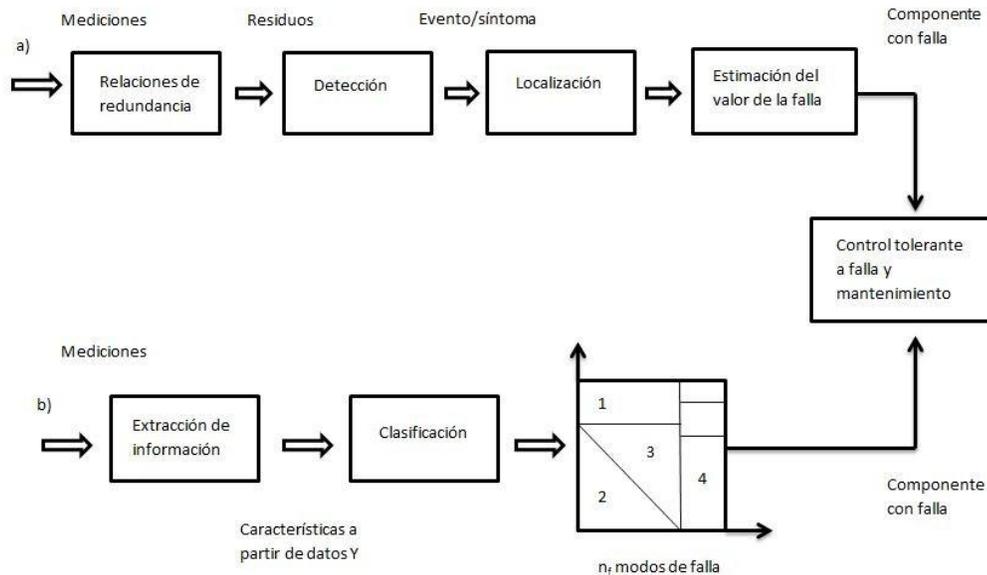


Figura 1.1: Procedimiento de diagnóstico a partir de mediciones del proceso a) con un modelo matemático, b) con modelo de señales para  $n_f$  escenarios o clases de fallas considerando  $c_l$  características y una matriz de datos históricos  $Y$

eventos resultantes de la interpretación de su valor; esta etapa se conoce como detección. En el caso más sencillo, esta interpretación es booleana y examina el valor del residuo respecto a un umbral. Si el residuo es más pequeño que este umbral, no hay síntoma de falla. Se puede comparar esto con la generación de alarmas, pero aquí no se analiza directamente una medición, sino una señal que puede no tener significado físico y que está diseñado específicamente para tener buenas propiedades desde el punto de vista del diagnóstico. La localización es la segunda etapa y consiste en usar uno o varios indicadores o síntomas para determinar precisamente el conjunto de componentes físicos de operación dudosa o anormal. Este conjunto debe ser lo más pequeño posible, para hablar de que se llevó a cabo un diagnóstico mínimo. La identificación de la falla significa determinar qué elemento del sistema está fallando y cómo se manifiesta.

En el caso del procedimiento con modelos de señales, secuencia b) del diagrama, se procesan conjuntos de datos históricos o experimentos para conseguir características o atributos, como pueden ser promedios, correlaciones, presencia de armónicos o una combinación de señales, las cuales deben ser relevantes para el diagnóstico de las  $n_f$  clases de fallas. En este caso, se parte del conocimiento de las alteraciones o cambios de las señales, bajo el efecto de una falla. Este conocimiento proviene del conjunto de experimentos registrados a lo largo de la vida del proceso, y de la experiencia y observación del ingeniero encargado de éste. Estos atributos son considerados por una clasificación o un análisis estadístico de una o más variables que permite, en el espacio definido

por los atributos, determinar el modo de falla correspondiente a la situación analizada, y entonces concluir cuales son los componentes con un funcionamiento anormal o dudoso. En esta familia de procedimientos, se pasa directamente de los atributos a los modos de falla, cuando se han determinado correctamente las fronteras de las clases o el límite que hace que se prefiera una hipótesis estadística u otra.

Habiendo determinado los componentes con operación anormal o dudosa, se puede prever su mantenimiento tratando de manejar la instalación en operación en lo posible, si la seguridad no corre peligro. La tarea de identificación de una falla se refiere a la determinación del comportamiento preciso de ésta. En este caso, se estima la forma de su evolución y su amplitud.

El mayor problema al que se enfrenta la etapa de detección, es el de asegurar que cuando el proceso no se comporta de la manera prevista, se debe a una falla. Esto podría deberse a una perturbación importante, que lleva al proceso a un punto de funcionamiento fuera de lo normal, pero no es una falla. Discernir entre fallas y perturbaciones que no se pueden medir, es un problema difícil y muy pocos métodos de diagnóstico tienen capacidad para ello, sobre todo cuando hay poca información del estado interno del proceso. Otra dificultad durante la detección surge cuando el efecto de una falla no se percibe fácilmente. Esto puede ocurrir cuando los sensores son poco sensibles o cuando el propio sistema de control retroalimentado corrige y los errores entre las variables a regular y las señales de referencia son muy pequeñas. En algunas aplicaciones, como en aeronáutica, se diseñan dispositivos e indicadores específicos para alertar a los usuarios y operadores sobre la presencia de fallas, a pesar de que el sistema sigue funcionando, aparentemente de manera normal, dado que el control enmascara las fallas (Goupil, 2009).

Se tiene entonces que el diagnóstico puede usar modelos de señales o modelos analíticos para describir el comportamiento del sistema. En el primer caso, se necesita disponer de grandes bases de datos que revelen tanto el comportamiento normal como el de la falla; mientras que en el segundo caso se necesita un conocimiento profundo del sistema. Dependiendo del proceso estudiado, y de la información existente, se debe seleccionar la forma de abordar el problema de diagnóstico.

#### 1.5.1. Métodos basados en modelos matemáticos

En el contexto de lógica booleana, los conceptos básicos de diagnóstico basados en modelos de comportamiento del sistema, fueron formulados por Reiter (1987) y Poole (1988). Así, el principio del diagnóstico consiste en usar el modelo de funcionamiento normal y alimentarlo con observaciones tomadas del sistema físico real a partir de una incoherencia entre el modelo y los datos observados, se deduce el modo de funcionamiento anormal del sistema.

Otra alternativa, con este tipo de lógica, es partir de modelos de fallas fundamentados en el principio de diagnóstico. En este caso, si se conoce el modelo del funcionamiento bajo la hipótesis de un

modo de falla particular y las observaciones no son coherentes con este modelo, se puede deducir que el proceso no se encuentra trabajando en dicho modo. En estas condiciones, sin embargo, no se puede decir que opera en condición normal, ya que los modos posibles de fallas son en principio, infinitos y es un problema intratable.

Es preciso notar que el principio de coherencia entre las observaciones y el modelo de funcionamiento normal no permite deducir que el proceso esté en su modo normal, desde un punto de vista puramente teórico. Casos de fallas que se compensen, o fallas cuyos efectos se manifiestan mucho tiempo después de su ocurrencia, o fallas muy pequeñas, no siempre son detectadas. A pesar de esta desventaja, el uso de esta metodología se realiza con éxito en muchos casos prácticos. Este tipo de hipótesis se dice que es de exoneración, ya que el indicador de coherencia descarga o exonera de la presencia de fallas al proceso, implicando un funcionamiento normal de éste.

En la mayoría de las aplicaciones, se usa el modelo del funcionamiento normal, dado que son pocos los modelos de fallas que se encuentran disponibles.

Los modelos matemáticos considerados normalmente en la ingeniería de control, como son función y matriz de transferencia, representación en el espacio de estados para sistemas lineales y no lineales, y modelos algebrodiferenciales, por mencionar algunos, también han sido usados con éxito para resolver problemas de diagnóstico (Gertler, 1997; Patton et al., 2000; Frank y Ding, 1997; Frank et al., 2000). Una ventaja de este tipo de métodos es que en ocasiones se pueden integrar con el sistema de control automático, el cuál emplea un modelo analítico (Kinaert, 2003).

En general se han propuesto dos marcos de referencia que no alteran considerablemente el modelo analítico nominal de base, uno de ellos, supone que las fallas son entradas exógenas adicionales introducidas en el modelo funcional del sistema. Por ejemplo, una entrada específica tipo escalón o rampa adicionada a la salida de un sensor se considera como una deriva o sesgo en la medición. Bajo estas condiciones, se considera a la falla de manera similar a una perturbación y se denota falla aditiva. El otro marco de referencia consiste en suponer que la falla corresponde a cambios en los parámetros del modelo del sistema y se denota falla multiplicativa.

Para modelos lineales sin incertidumbres se pueden generar modelos de detección, suponiendo los dos marcos de referencia de fallas. Por ejemplo, el modelo en estado lineal

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + \Delta_A)x(t) + (B + \Delta_B)u(t) + E_1 \tilde{f}(t) + F_1 f(t) + w(t) \\ y(t) &= (C + \Delta_C)x(t) + (D + \Delta_D)u(t) + E_2 \tilde{f}(t) + F_2 f(t) + v(t)\end{aligned}\tag{1}$$

permite tratar ambos tipos de fallas: las que afectan los parámetros y las que afectan directamente los estados y las salidas. En este modelo  $x(t)$  es el estado de dimensión  $n$ ,  $u(t)$  el vector de entradas de dimensión  $m$ ,  $y(t)$  el vector de salidas de dimensión  $p$ , las matrices nominales  $A$ , de dimensión

$n \times n$ ,  $B$ , de dimensión  $n \times m$ ,  $C$ , de dimensión  $p \times n$ ,  $D$ , de dimensión  $p \times m$ . Las señales  $w(t)$  y  $v(t)$  representan perturbaciones estocásticas asociadas al ruido del proceso y de las mediciones. Las señales  $\tilde{f}(t)$  corresponden a las perturbaciones no medidas, consideradas normales o sin interés desde un punto de vista de diagnóstico. Las fallas en los parámetros se describen a través de las matrices  $\Delta_M$  con  $M \in \{A, B, C, D\}$ ; el vector de entradas  $f(t)$  se asocia a las fallas en el sistema. De manera más compacta la matriz de transferencia del modelo genérico con fallas asociado al sistema de ecuaciones anterior (1) se describe en el dominio de Laplace como:

$$Y(s) = (G(s) + \Delta_G)U(s) + (H_f(s) + \Delta_{H_f})\tilde{F}(s) + (H_f(s) + \Delta_{H_f})F(s) + V(s) + G_w(s)W(s) \quad (2)$$

donde se observa de manera clara que el vector de salidas  $Y(s)$  está afectado por parámetros y señales desconocidas.

Suponiendo que se conoce  $G(s)$  y  $U(s)$  se puede estimar la salida, denotada  $\hat{Y}(s)$  de la ec. (2) en condiciones ideales; si además, se dispone de la salida a través de otros medios, denotada  $Y_m(s)$ , se tiene la misma información dos veces, es decir hay redundancia. Por el contrario, suponiendo condiciones anormales, la salida  $Y_m(s)$  es incoherente con la calculada  $\hat{Y}(s) = G(s)U(s)$ , pues se usa el modelo nominal y no el asociado al comportamiento anormal, dado por la ecuación (2); este razonamiento es clave para el diagnóstico de fallas.

A las ecuaciones que pueden obtenerse a partir de la redundancia de información del modelo analítico y de la incoherencia de un modelo en condiciones de falla, se les llama relaciones redundantes analíticas, (RRA). En otras palabras, una RRA es una expresión obtenida a partir del modelo nominal, que depende únicamente de variables medibles y cuya evaluación genera un indicador de falla llamado residuo. Por analogía con las señales de alarma y para simplificar el diagnóstico, se acostumbra usar el valor cero para el residuo en ausencia de fallas y un valor diferente de cero, en el caso contrario. El modelo de estados, dado por el sistema de ecuaciones (1) o el equivalente en el dominio de Laplace, presentado en la ecuación (2) para el caso lineal, se usa para diseñar relaciones de redundancia analítica, las cuales generan residuos.

El diseño de las relaciones de redundancia, o los generadores de residuos a partir de modelos, es una tarea que requiere de herramientas de análisis de sistemas, pues no se trata sencillamente de comparar una variable simulada con una salida medida, sino que el residuo se genera cambiando varios elementos del vector de entradas y salidas.

Cabe aclarar que se pueden usar los modelos matemáticos para diseñar simuladores como procesos en paralelo del sistema, o para estimar y predecir las salidas teniendo en cuenta entradas y salidas reales en instantes anteriores. La Figura 1.2 presenta el esquema básico para generar las señales de diagnóstico donde la información disponible para la detección de fallas son conjuntos

de entradas  $U$  y salidas  $Y$  del proceso, que pueden estar en distintos dominios.

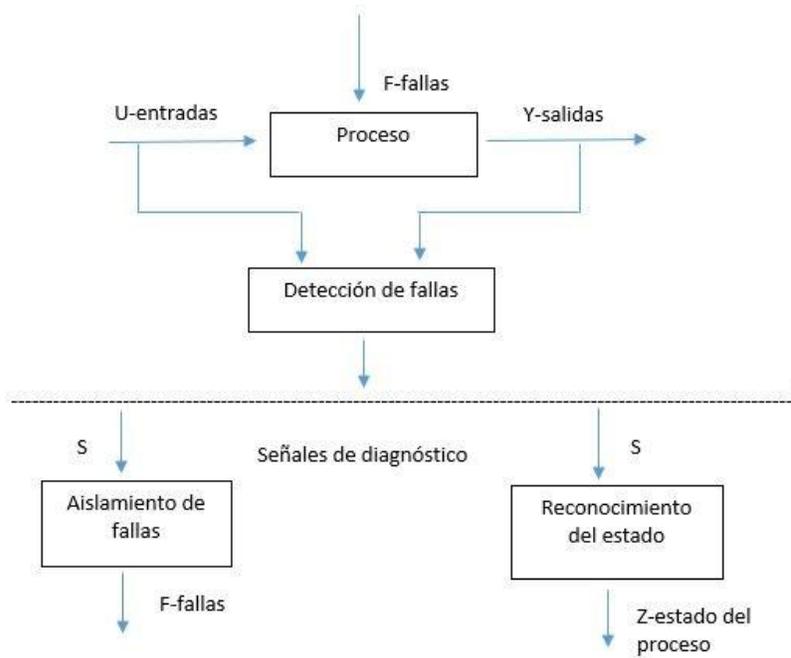


Figura 1.2: Descripción general del sistema de diagnóstico a partir del conjunto de entradas  $U$  y de salidas  $Y$  del proceso. En el primer nivel se generan señales de diagnóstico y a partir de éstas se determina el estado del proceso y de las fallas existentes

## 2. GENERACIÓN ESTÁTICA DE RESIDUOS EN UN DUCTO CON EXTRACCIONES

En este capítulo se presenta un modelo genérico del fluido para una tubería con geometría compleja. El modelo para cada una de las secciones es considerando un fluido en estado estacionario y descrito en terminos de la presión  $H(t, z)$  o cabezal piezométrico  $\hat{H}(t, z)$ . La generalización de este modelo para el caso de extracción en la tubería, así como una ecuación general para la estimación de la posición de la extracción  $\hat{Z}_e$  del fluido y la presión en los extremos de cada sección de la tubería. Este cálculo junto con una tubería equivalente son usados para detectar eventos anormales, tales como fugas, incluso en una tubería con geometría compleja o variaciones de perfil topográfico.

### 2.1. Modelo del fluido

Considerando el siguiente modelo no lineal unidimensional de parámetros distribuidos para un fluido en una tubería (Chaudry(1979))

$$\frac{\partial Q^i(z^i, t)}{\partial t} + gA \frac{\partial H^i(z^i, t)}{\partial z^i} + \frac{f Q^i(z^i, t) |Q^i(z^i, t)|}{2D^i(A^i)} + A g \sin \alpha^i = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial H^i(z^i, t)}{\partial t} + \frac{b^2}{gA^i} \frac{\partial Q^i(z^i, t)}{\partial z^i} = 0 \quad (4)$$

el cual se obtiene suponiendo un fluido incomprensible y que los cambios convectivos debidos a la velocidad del fluido, son despreciables, el superíndice  $i = 1, 2, \dots, n$  denota el índice de la sección de la tubería caracterizada por un cambio en el nivel con el ángulo  $\alpha^i$ , y  $n$  denota el número total de secciones de la tubería. El significado de cada uno de los parámetros usados para escribir el sistema (3-4) están dados en la tabla número 1.

Se debe tener en cuenta que una tubería completa de longitud  $L$  está compuesta por  $n$  secciones de longitud  $L_i$ , cada una es representada por (3) y (4). Por lo tanto, la dinámica de toda la tubería está representada por  $n$  pares de ecuaciones (3) y (4).

Para determinar el comportamiento de la presión  $H^i(z^i, t)$  a lo largo de una sección de la tubería, asumiendo que el fluido se encuentra en estado estacionario y sin presencia de extracciones, para cada sección  $n$ , se tiene

Variable/Parámetro	Descripción	Unidades
$Q^i(z^i, t)$	flujo volumétrico	$[\frac{m^3}{s}]$
$H^i(z^i, t) = \frac{P^i(z^i, t)}{\rho g}$	perfil de presión	[m]
$P^i(z^i, t)$	presión	$[\frac{kg f}{cm^2}]$
$\rho$	densidad	$\frac{kg}{m^3}$
$t \in (0, \infty)$	tiempo de coordenada	[s]
$A^i$	área sección transversal	$[m^2]$
$D^i$	diámetro	[m]
$g$	constante gravitacional	$[\frac{m}{s^2}]$
$\alpha^i$	ángulo	grados
$f^i$	coeficiente de fricción	adimensional
$b$	velocidad de onda en el fluido	$[\frac{m}{s}]$
$L^i$	longitud	[m]
$L = \sum_{i=1}^N L^i$	longitud total de la tubería	[m]

Cuadro 1: Variables y parámetros de la tubería

$$\frac{\delta Q^i(z^i, t)}{\delta z^i} = 0 \Rightarrow Q^i \text{ es constante}$$

combinando las ecuaciones (3) y (4) y bajo la condición anterior se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dH^i(z^i)}{dz^i} + \frac{f^i Q^i |Q^i|}{2D^i (A^i)^2 g} + \sin \alpha^i = 0 \quad (5)$$

la cual puede reescribirse de la siguiente forma:

$$\frac{dH^i(z^i)}{dz^i} + M^i(Q^i) = 0 \quad (6)$$

donde la función:

$$M^i(Q^i) = \mu^i Q^i |Q^i| + \sin \alpha^i = m^i(Q^i) + \sin \alpha^i \quad (7)$$

es independiente de la coordenada espacial  $z^i$  con:

$$\mu^i = \frac{f^i}{2D^i (A^i)^2 g}$$

Entonces, se tiene que, la solución analítica de (6) está dada por:

$$H^i(z^i) = -m^i(Q^i)z^i - \sin\alpha^i z^i + H^i(0) \text{ para } 0 \leq z^i \leq L^i \quad (8)$$

con  $H^i(0)$  el cabezal de presión en el inicio de la sección  $i$ .

Ahora, definiendo las condiciones de frontera para cada sección  $i$  en términos de la presión en los extremos:

$$H^i(z^i = 0) := H_{in}^i \quad H^i(z^i = L^i) := H_{out}^i \quad (9)$$

entonces, sustituyendo la expresión (9) en la ecuación (8), se tiene:

$$H_{in}^i - H_{out}^i = (m^i(Q^i) + \sin\alpha^i)L^i = m^i(Q^i)L^i + \Delta H_i \quad (10)$$

donde  $\Delta H_i$  es la diferencia de elevación entre los extremos de la sección. De acuerdo con (Saldarriaga, 2003), el cabezal de presión  $H = \frac{P}{\rho g}$  puede ser escrito en términos de un cabezal piezométrico,  $\tilde{H}$ , que depende de una referencia  $h$  (por ejemplo el nivel del mar), este es  $\tilde{H} = (H + h)$ . Por lo tanto el perfil de presión (10) se puede escribir como:

$$\tilde{H}_{in}^i - \tilde{H}_{out}^i = m^i(Q^i)L^i \quad (11)$$

para cada sección  $i$ .

Por otro lado, las condiciones de frontera entre las secciones están relacionadas por:

$$\tilde{H}_{out}^i = \tilde{H}_{in}^{i+1} \quad (12)$$

pudo ser deducidas de las ecuaciones (10) y (11) que el perfil de presión a lo largo de una tubería de  $n$  secciones sin extracción, su modelo es:

$$\tilde{H}_{in}^1 = \tilde{H}_{out}^n = \sum_{i=1}^n L^i m^i(Q^i) \quad (13)$$

para el caso de usar un cabezal piezométrico

$$H_{in}^1 - H_{out}^n = \sum_{i=1}^n L^i M^i(Q^i) \quad (14)$$

para el caso de usar cabezal de presión.

Para finalizar esta sección, un punto culminante en el funcionamiento idóneo en el manejo de las unidades del cabezal piezométrico es mostrado. Primeramente, considerando una tubería con las mismas características físicas y el mismo perfil de elevación dado en la Figura 2.1. Entonces, usando la ecuación (13) y la ecuación (14), el cabezal de presión y el perfil piezométrico es evaluado y se muestra en la Figura 2.2 y la Figura 2.3. A partir de estos perfiles se puede notar que el perfil piezométrico de la tubería es uniforme y similar al perfil de presión de una tubería horizontal. Por consecuencia, mediante el uso de un cabezal piezométrico se puede tratar el problema de localización de fugas en tuberías con cualquier elevación esto con un cambio de variables.

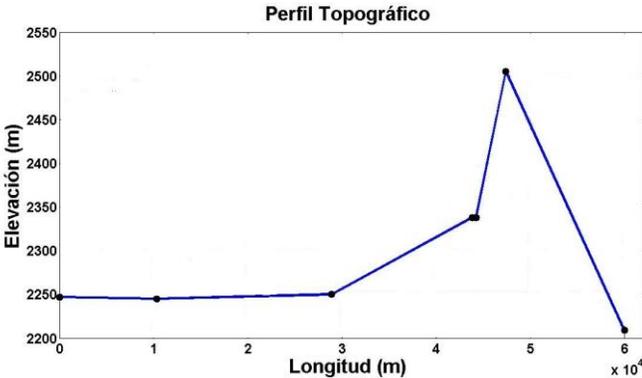


Figura 2.1: Perfil topográfico de la tubería

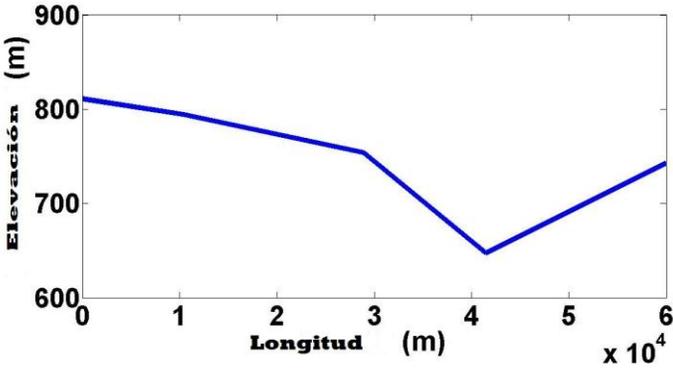


Figura 2.2: Perfil del cabezal de presión de la tubería

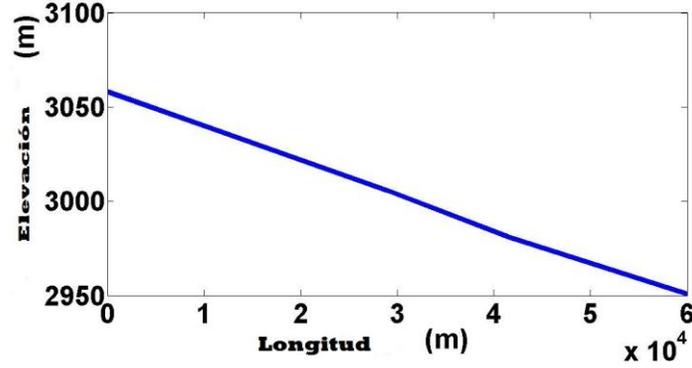


Figura 2.3: Perfil del cabezal piezométrico de la tubería

## 2.2. Modelo de extracción por secciones

Una extracción en cualquier punto de la sección  $i$  rompe la continuidad de las dos ecuaciones diferenciales parciales (3)-(4) debido a que el fluido variable es discontinuo en el punto de extracción de modo que la función  $\frac{\partial Q^i(z^i, t)}{\partial z^i}$  no puede ser evaluada. En particular si la extracción es localizada en la posición  $z_e^i$ , el flujo de extracción puede ser modelado por  $Q_{z_e^i}^i = \lambda_e^i \sqrt{2g(\tilde{H}_{z_e^i}^i - H_{OS})}$ , donde  $\tilde{H}_{z_e^i}^i$  es el cabezal piezométrico,  $H_{OS}$  es la presión afuera de la tubería y  $\lambda_e^i > 0$  es el coeficiente de extracción. Por tanto, el modelo del fluido en la sección  $i$  debe ser manejada como 2 subsecciones con la condición de frontera en la posición de extracción dada por:

$$Q^{i-1} = Q^{i+1} + Q_{z_e^i}^i \quad (15)$$

con  $Q^{i-1}$  y  $Q^{i+1}$  siendo el fluido de la sección antes y después de la extracción  $Q_{z_e^i}^i$ . Entonces el comportamiento del perfil piezométrico está dado por la ecuación (6) tiene que satisfacer el conjunto de ecuaciones

$$\begin{aligned} \frac{d\tilde{H}^i(z^i)}{dz^i} - m^i(Q^i) &= 0 \quad \text{para} \quad 0 \leq z^i \leq z_e^i \\ \frac{d\tilde{H}^i(z^i)}{dz^i} - m^i(Q^{i+1}) &= 0 \quad \text{para} \quad z_e^i < z^i \leq L^i \end{aligned} \quad (16)$$

ya que el conjunto de ecuaciones (16) tienen la misma forma que la ecuación (6), sus soluciones tienen la forma de la ecuación (8) entonces, considerando las condiciones de frontera

$$\begin{aligned} \text{BC1: } \tilde{H}^i(z^i = 0) &= \tilde{H}_{in}^i \\ \text{BC2: } \tilde{H}^i(z^i = L^i) &= \tilde{H}_{out}^i \\ \text{BC3: } Q_{in}^i &= Q_{out}^i + Q_{z_e^i}^i \end{aligned}$$

La solución del conjunto (16) evaluadas bajo las 3 condiciones  $i = 1, 2, 3$  satisface

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{H}_{in}^i - \tilde{H}_e^i}{z_e^i} - m^i(Q_{in}^i) &= 0 \\ \frac{\tilde{H}_e^i - \tilde{H}_{out}^i}{L^i - z_e^i} - m^i(Q_{out}^i) &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

A partir de (17) la variable  $z_e^i$  asociada a la posición de la extracción puede ser determinada mediante operaciones algebraicas, de donde se obtiene que:

$$z_e^i = \frac{\mu^i L^i Q_{out}^i |Q_{out}^i| + \tilde{H}_{out}^i - \tilde{H}_{in}^i}{\mu^i (Q_{out}^i |Q_{out}^i| - Q_{in}^i |Q_{in}^i|)} \quad (18)$$

En unidades del cabezal piezométrico o en términos del cabezal de presiónse tiene:

$$z_e^i = \frac{L^i \sin \alpha^i + \mu^i L^i Q_{out}^i |Q_{out}^i| + H_{out}^i - H_{in}^i}{\mu^i (Q_{out}^i |Q_{out}^i| - Q_{in}^i |Q_{in}^i|)} \quad (19)$$

Debido a que  $z_e^i$  está asociada con una posición de extracción fija de la tubería, cualquier desviación de la estimación, usando (18) o (19) representa una discrepancia en el patrón de operación de la tubería que permite la detección de escenarios anormales que podrían suceder en la sección  $i$ . Una desventaja de la utilización de dichas ecuaciones es el requerimiento de la instrumentación de presión y el flujo en los límites de cada sección, lo cual no siempre es posible.

La ecuación (18) es una generalización del modelo reportado en Verde (2005) para una tubería horizontal.

### 2.3. Modelo generalizado de la extracción

Considerando la longitud  $L$  de la tubería dividida en  $n$  secciones descrita en la Figura 2.4. con el parámetro físico  $\mu$  constante a lo largo de toda la tubería (mismo diámetro y mismo coeficiente de fricción), y una sola extracción en el punto  $z_c^k$  en la sección  $k$ . De la ecuación (12) el conjunto de ecuaciones del cabezal piezométrico en la frontera de cada sección sin extracción  $i = 1, 2, \dots, n$  con  $i \neq k$ , puede ser expresada como

$$\tilde{H}_{in}^i - \tilde{H}_{out}^i = m(Q^i)L^i \quad (20)$$

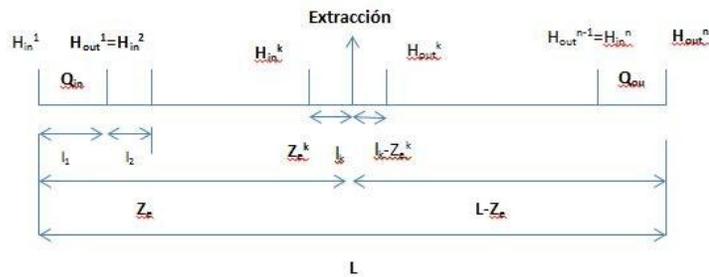


Figura 2.4: Descripción de variables de una tubería con una sola extracción

con

$$Q^i = Q_{in}^i = Q_{in}^k, \text{ si } i < k$$

y

$$Q^i = Q_{out}^i = Q_{out}^n, \text{ si } i > k$$

Para describir el perfil piezométrico de la sección k se requiere una discretización espacial. La posición de la extracción  $z_e^k$  define los puntos mínimos discretizados. sección k discretizada:

$$\tilde{H}_{in}^k - \tilde{H}_{ze}^k = m(Q_{in}^k)z_e^k \quad (21)$$

$$\tilde{H}_{ze}^k - \tilde{H}_{out}^k = m(Q_{out}^k)(L^k - z_e^k)$$

Con los respectivos fluidos  $Q^{k-1} = Q_{in}^k$  y  $Q^{k+1} = Q_{out}^k$  y el flujo de extracción  $Q_e^k = Q_{in}^k - Q_{out}^k$ . Por cancelación de el término  $H_{ze}^k$  en este par de ecuaciones, nos queda

$$(m(Q_{in}^k) - m(Q_{out}^k))z_e^k + m(Q_{out}^k)L^k = \tilde{H}_{in}^k - \tilde{H}_{out}^k \quad (22)$$

En general, suponiendo que son conocidas las variables de la sección antes y después del punto k de extracción, los cabezales piezométricos  $\tilde{H}_{in}^k$  y  $\tilde{H}_{out}^k$ , pueden ser evaluados usando la expresión (20), en terminos de cada variable conocida. Si el cabezal piezométrico y el fluido al final de la tubería son medibles, el cabezal piezométrico en los límites de la sección k puede ser calculado mediante:

$$\tilde{H}_{in}^k = \tilde{H}_{in}^1 - \sum_{i=1}^{k-1} m(Q_{in}^1)L^i \quad (23)$$

$$\tilde{H}_{out}^k = \tilde{H}_{out}^n + \sum_{i=k+1}^n m(Q_{out}^n)L^i \quad (24)$$

sustituyendo ambas ecuaciones en la ecuación (22), resulta

$$z_e^k = \frac{\tilde{H}_{in}^1 - \tilde{H}_{out}^n - m(Q_{in}^1) \sum_{i=1}^{k-1} L^i - m(Q_{out}^n) \sum_k^n L^i}{m(Q_{out}^1) - m(Q_{in}^n)} \quad (25)$$

expresión que puede ser referenciada con respecto al cero de la tubería  $z_e = z_e^k + \sum_{i=1}^{k-1} L^i$  obteniendo

$$z_e = \frac{m(Q_{out}^n)L + \tilde{H}_{out}^n - \tilde{H}_{in}^1}{m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n)} \quad (26)$$

La ecuación (26) es la expresión que representa posición de una extracción fija en una tubería, aún considerando un ducto con geometría compleja. En lo sucesivo se buscará sacar provecho de la ecuación (26) con fines de la localización de fugas.

## 2.4. Cálculo de una fuga con una extracción conocida

### 2.4.1. Análisis de sensibilidad

Una herramienta fácil y poderosa para el estudio de las desviaciones de una variable con respecto a un parámetro incierto es la teoría de sensibilidad (Frank, 1978). Específicamente, para la posición de extracción conocida  $z_e$  la expresión aproximada

$$\Delta z_e \cong S_{H_{in}} \Delta \tilde{H}_{in}^1 + S_{H_{out}} \Delta \tilde{H}_{out}^n + S_{Q_{in}} \Delta Q_{in}^1 + S_{Q_{out}} \Delta Q_{out}^n \quad (27)$$

describe la posición del error  $\Delta z_e$  con respecto a las incertidumbres en donde la función de sensibilidad está dada por

$$S_x = \frac{\delta z_e^0}{\delta x}$$

evaluada en el valor nominal 0, considerando la ecuación (26) se obtienen las funciones

$$S_{H_{in}} = (m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n))^{-1} \quad (28)$$

$$S_{H_{out}} = -(m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n))^{-1} \quad (29)$$

$$S_{Q_{in}} = \frac{2 \frac{m(Q_{in}^1)}{Q_{in}^1} (Lm(Q_{out}^n) - \tilde{H}_{in}^1 + \tilde{H}_{out}^n)}{(m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n))^2} \quad (30)$$

$$S_{Q_{out}} = -\frac{2 \frac{m(Q_{out}^n)}{Q_{out}^n} (Lm(Q_{out}^n) - \tilde{H}_{in}^1 + \tilde{H}_{out}^n)}{(m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n))^2} - \frac{2Lm(Q_{out}^n)}{Q_{out}^n (m(Q_{in}^1) - m(Q_{out}^n))} \quad (31)$$

Dado  $Q_{in}^1 > Q_{out}^n$  se puede ver que a partir de las funciones de sensibilidad anteriores y de la ecuación (27) que cualquier desviación positiva en las variables  $H_{in}$  o  $Q_{in}$  antes de la extracción conocida, produce un error positivo  $\Delta z_e$ . Por lo contrario, cualquier desviación positiva en los datos después de la extracción conocida produce un error negativo  $\Delta z_e$ . Por lo tanto, el signo de  $z_e$  permite detectar la condición anormal en la tubería, esto indica si la condición anormal es antes o después de la extracción fija  $z_e$ .

Si se produce más de una extracción se requiere una discretización mayor de la variable  $z$  para describir el comportamiento del fluido. Sin embargo, el incremento de nodos o variables hace que sea necesario una mayor discretización en el sistema, esto hace imposible el determinar la posición de la extracción sin instrumentación intermedia, Verde et al (2003) señalado este hecho en el marco de referencia de la ubicación de fugas múltiples.

Una extracción adicional o un sesgo en la instrumentación siempre producirá un error en el cálculo de  $z_e$  con la ecuación (26). De la ecuación (27) se puede demostrar que el signo del error no es arbitrario y se asocia con el lugar relativo de la fuga con respecto al punto de extracción fija  $z_e$ . Esta idea simple es la clave para estimar la posición de la fuga en una tubería con una extracción conocida.

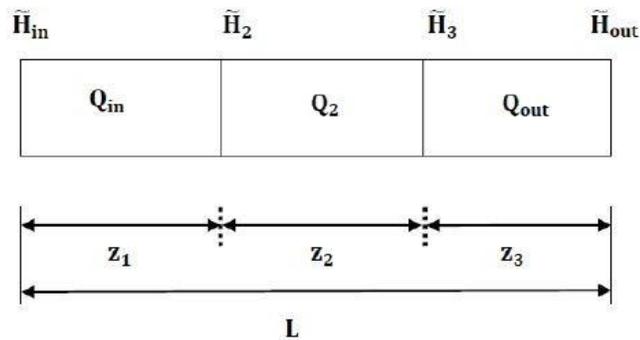


Figura 2.5: Variables de tubería con dos extracciones en el punto  $z_1 + z_2$  y  $Q_{in} = Q_2 = Q_{out}$

#### 2.4.2. Localización estática de fugas

Considérese una tubería con longitud  $L$  discretizada en tres secciones, como se ilustra en la figura 2.5., con  $Q_{in}^1 = Q_{in}$ ,  $Q^3 = Q_{out}$ . Esta representación espacial es la mínima para dos extracciones localizadas en  $z_1$  y  $z_1 + z_2$  cuyo modelo en estado estacionario en espacio de estados puede ser escrito de la siguiente forma:

$$\frac{\tilde{H}_{in} - \tilde{H}_2}{z_1} - m(Q_{in}) = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\tilde{H}_2 - \tilde{H}_3}{z_2} - m(Q_2) = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\tilde{H}_3 - \tilde{H}_{out}}{L - z_1 - z_2} - m(Q_{out}) = 0 \quad (34)$$

Suponiendo como conocida la posición del flujo  $Q_{ze}$  de la extracción y que está equipada con sensores en los extremos  $(\tilde{H}_{in}, \tilde{H}_{out}, Q_{in}, Q_{out})$ , pueden ocurrir dos escenarios.

##### Escenario 1.

Extracción desconocida a la izquierda de la extracción conocida. En este caso el punto de extracción conocido con fluido  $Q_{ze}$  es asociado con la posición  $Z_e = z_1 + z_2$  mientras que la otra extracción es localizada en  $z_1$  con un fluido  $Q_2 = Q_{ze} + Q_{out}$ . Por otra parte la presión de entrada disminuye con respecto al caso nominal. Puesto que la ganancia de sensibilidad de  $z_e$  con respecto  $H_{in}$  es positivo (verificar la ecuación (28)), una disminución en la presión producida por la extracción en  $z_1$  genera un decremento en la ecuación (26). Este hecho se formaliza mediante

$$C1 : H_{in}^0 - H_{in} > 0, \text{ implica } \Delta z_e = z_e^0 - \tilde{z}_e > 0$$

Entonces, una desviación de  $\Delta z_e$  puede ser usada para detectar una fuga ubicada aguas arriba del punto de extracción. Además, del sistema (32) obtenemos la posición de la extracción adicional con la expresión siguiente

$$z_f = z_b = \frac{\mu (\tilde{H}_{in} - \tilde{H}_{out})}{\frac{Q_{in}^2}{2} - (Q_{out} + Q_{ext})} (z_e (Q_{out} + Q_{ext})^2 + Q_{out}^2 (L - z_e)) \quad (35)$$

Escenario 2.

Extracción desconocida a la derecha de la extracción conocida. En esta situación el punto de extracción conocido con fluido  $Q_{ze}$  es asociado con la posición  $z_e = z_1$ , mientras el punto desconocido es localizado en  $z_1 + z_2$  con fluido  $Q_{in} = Q_{ze} + Q_2$ . En este caso la presión aguas abajo disminuye con respecto al caso nominal. Dado que la sensibilidad de  $z_e$  con respecto  $H_{out}$  es negativo (verificar ecuación (29)), una disminución en la presión producida por la extracción en  $z_1 + z_2$  genera un incremento en la evaluación de la ecuación (26). Este hecho se puede formalizar como

$$C2 : H_{out}^0 - H_{out} > 0, \text{ implica } \Delta z_e = z_e^0 - \tilde{z}_e < 0$$

Entonces, una desviación negativa de  $\Delta z_e$  puede ser usada para detectar una fuga a la derecha del punto de extracción. Mediante el sistema (32) se obtiene la posición de la extracción adicional

$$z_f = z_a = \frac{\frac{g(\tilde{H}_{in} - \tilde{H}_{out})}{\mu} - LQ_{out}^2 - z_e Q_{ext}^2 (2Q_{in} - Q_{out})}{(Q_{in} - Q_{ext})^2 - Q_{out}^2} \quad (36)$$

En conclusión, se puede estimar la posición de una fuga  $z_f$  usando la ecuación (33) o ecuación (34), de acuerdo con la región de fuga indicada por el signo del error

$$r(t) = z_e^0 - \tilde{z}_e(t) \quad (37)$$

con  $\tilde{z}_e(t)$  estimada en línea. En el marco de FDI, las relaciones (35) y (26) definen un generador de residuos para el cual proporciona información acerca de si una fuga es localizada a la derecha o a la izquierda del punto de extracción (Isermann, 2006). Verde(2005) reportó esta propiedad por simulación y los resultados experimentales en una tubería de agua, pero no había sido reportada de manera analítica como se presenta en este trabajo.

Las expresiones (33) y (34) permiten localizar una fuga en una tubería con una extracción fija conocida, cuando se tiene una desviación en el balance de masa

$$Q_{in}(t) = Q_{ext}(t) + Q_{out}(t) \quad (38)$$

Adicionalmente, se puede establecer un umbral con la finalidad de evitar falsas alarmas para el cálculo de la posición de la fuga, este umbral estaría dado por:

$$Q_L(t) := Q_{in}(t) - Q_{ext}(t) - Q_{out}(t) > \alpha_3 \quad (39)$$

donde el valor de  $\alpha_3$  se sintoniza a través del conocimiento de la operación normal y la precisión de la instrumentación. Una forma de robustificar el residuo ante mediciones ruidosas es mediante

el volumen de residuos de pérdida.

$$V(t) = \int_0^Z Q_L(t) dt > \alpha_4 \quad (40)$$

donde T es una ventana de tiempo y  $\alpha_4$  es ajustado según el volumen significativo de residuos.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL DUCTO Y LA INSTRUMENTACIÓN

Este capítulo representa la aportación principal de este trabajo, pues presenta la validación experimental de las ecuaciones estáticas para la localización de fugas con una extracción fija conocida. También se describen las características físicas de la planta piloto ubicada en el II-UNAM, así como de los instrumentos de medición instalados en el ducto, el cual ha sido empleado para la validación experimental que se presenta en este trabajo.

#### 3.1. Funcionamiento de la tubería

Los puntos a tratar en esta sección del trabajo serán acerca del funcionamiento del sistema y de cómo se desarrollaron cada una de las pruebas para la validación de las relaciones estáticas desarrolladas previamente en este trabajo.

##### 3.1.1. Control de la presión a la entrada

El punto de operación del fluido se consigue manipulando la bomba de entrada la cual es activada con un motor eléctrico trifásico Siemens de 5[HP], instalado a un costado de la cisterna. El elemento de control utilizado para esta bomba es un inversor de frecuencia marca Mitsubishi modelo A500. El inversor puede ser operado en diferentes modos: externo, local y combinado.

En la computadora se genera una señal digital cualquiera ésta es convertida en una señal analógica de corriente mediante un módulo Beckhoff, de esta manera se controla el inversor, este elemento también llamado variador de velocidad rectifica la corriente alterna, por tal motivo cuenta con un circuito de rectificadores formados por diodos, resistencias y capacitores que permiten obtener una señal lo más plana posible, es decir sin rizo.

Posteriormente, esta señal se transforma en un tren de pulsos de esta manera se puede modificar la frecuencia nominal de 60 ciclos por segundo a otra diferente según la frecuencia deseada para el motor.

##### 3.1.2. Toma lateral fija y posiciones de fuga

A lo largo de la tubería se encuentran 2 servoválvulas ubicadas en las posiciones 2 y 3 y 4 válvulas de tipo manual ubicadas en las posiciones 1, 4, 5 y 6 como se puede observar en la Figura 3.1 y en el cuadro 2. La toma lateral o extracción conocida se encuentra ubicada en la posición de la 4<sup>a</sup> servoválvula ya que ésta cuenta con un sensor de flujo. Partiendo de lo anterior, se pueden simular fugas tanto aguas arriba como aguas abajo. Dependiendo del experimento que se desee realizar, se pueden hacer diversas combinaciones, se pueden simular fugas aguas arriba, abriendo la válvula 1 y las servoválvulas 2 y 3, por otro lado, se pueden simular fugas aguas abajo, abriendo las válvulas 5 y 6.

### 3.1.3. Parámetros de la tubería

Los parámetros del ducto que serán considerados para la validación experimental, se describen en la siguiente tabla

Parametros de la tubería

Parámetros	Valores
D	.1016[m]
$\rho$	1000[ $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ]
f	0.022
L	200.016[m]
$Z_{\text{ext}}$	118.365[m]
$H_{\text{in}}$	18[mca]
$H_{\text{out}}$	5.7[mca]

### 3.2. Descripción de la tubería

El sistema piloto para la detección de fugas consiste en una tubería de acero colado de 4 pulgadas de diámetro, cédula 40, en forma de espiral sobre un plano vertical como se muestra en la figura 3.1. La entrada se ubica en la parte inferior y la salida se ubica en la parte superior. Consta de una cisterna de 10,000 [l] con agua potable, una bomba hidráulica de 7.5 [HP] y válvulas de paso en la entrada y en la salida. Los sensores de flujo y presión se hallan en dos carretes de 1.5 [m] de longitud, en la entrada y en la salida. Aproximadamente en la parte media de cada tubo horizontal se haya una válvula de 1 pulgada de diámetro para simular fugas.

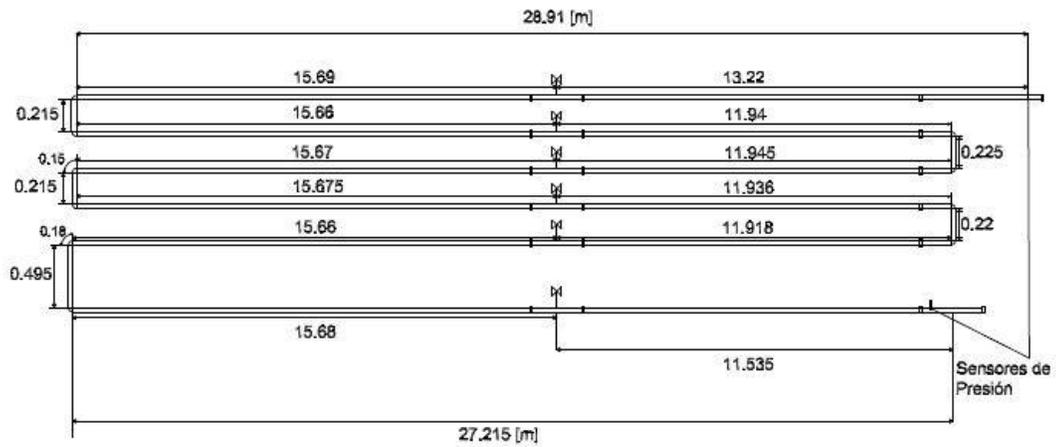


Figura 3.1: Diagrama de la tubería experimental para detección de fugas

No. Válvula	Distancia Real [m]	Distancia Equivalente [m]
V1	11.54	11.54
V2	43.70	49.83
V3	68.07	80.36
V4	99.93	118.37
V5	124.34	148.93
V6	156.21	186.95
Longitud Total	169.43	200.17

Cuadro 2: Posiciones de las válvulas

En la tabla número 2 se muestran las distancias reales y equivalentes, considerando una longitud equivalente de codo de 3.23 [m].



Figura 3.2: vista lateral de la tubería

A continuación se da una lista de los elementos que componen en la tubería piloto.

- Cisterna de agua de 10,000 [l].
- Bomba hidráulica de 5 HP.
- Tubería de hierro.
- Válvulas de compuerta para regular el flujo del agua y simular fugas.
- Sistema de adquisición de datos.
- Sensor de coriolis a la entrada y salida.
- Sensores de presión.



Figura 3.3: Vista lateral de la tubería

### 3.2.1. Sensor de coriolis

El principio de medición de coriolis funciona independientemente de las propiedades físicas del fluido, tales como viscosidad y densidad. Algunas características de los sensores que aplican este principio son:

Medición, extremadamente precisa, de líquidos y gases, tales como aceites, lubricantes, combustibles, gases licuados, los solventes, los productos alimenticios y los gases comprimidos (GNC).

Las temperaturas del fluido de hasta +350 °C (662 °F).

Presiones de proceso de hasta 100[bar] (1450[psi]).

Medición de caudal másico de hasta 2.200  $\frac{\text{t}}{\text{h}}$  (80850  $\frac{\text{libras}}{\text{min}}$ ).

Con mediciones en estado permanente, es decir con un flujo nominal fijo y una frecuencia de 60 [Hz] se realizaron las gráficas de desviación estandar  $\sigma$  versus flujo, en las gráficas 3.5 y 3.6 se muestran los resultados.

Las curvas punteadas son las mediciones y las rectas, son curvas ajustadas de grado uno. Si bien es un instrumento de gran precisión, las irregularidades de la tubería como son los codos provocan desviaciones hasta cuatro veces mayores que el error nominal del equipo; la desviación es mayor en los flujos menores como se aprecia en las gráficas.

El tiempo que se muestra en la gráfica 3.7 no es estrictamente el tiempo de asentamiento de la señal física, ya que ese tiempo incluye tanto el tiempo que el instrumento tarda en hacer el pro-



Figura 3.4: sensor de coriolis usado en la tubería

cesamiento de la información, como el verdadero tiempo de asentamiento de la señal física. En la gráfica 3.7 se muestra el comportamiento de los flujos cuando la válvula número 3 es abierta repentinamente. La apertura es del 100 %, la línea vertical indica el momento en que se abre la válvula. El tiempo de asentamiento es de 4 segundos.

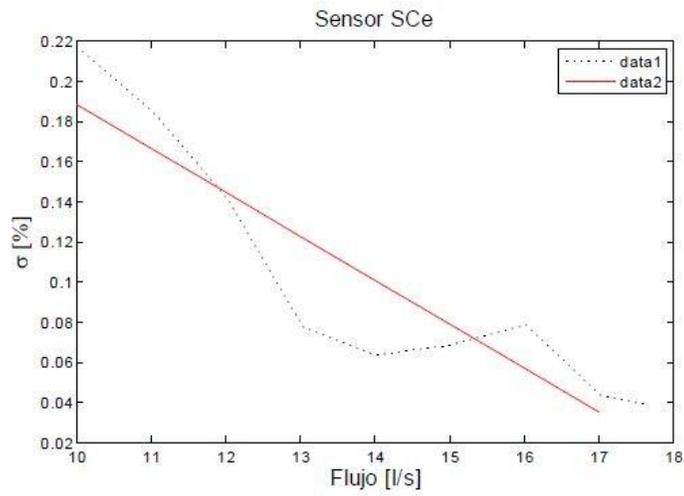


Figura 3.5: Sensor de coriolis a la entrada de la tubería

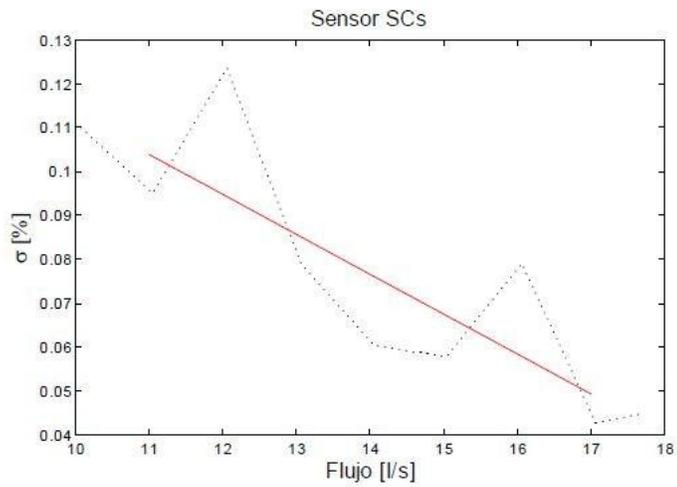


Figura 3.6: Sensor de coriolis a la salida de la tubería

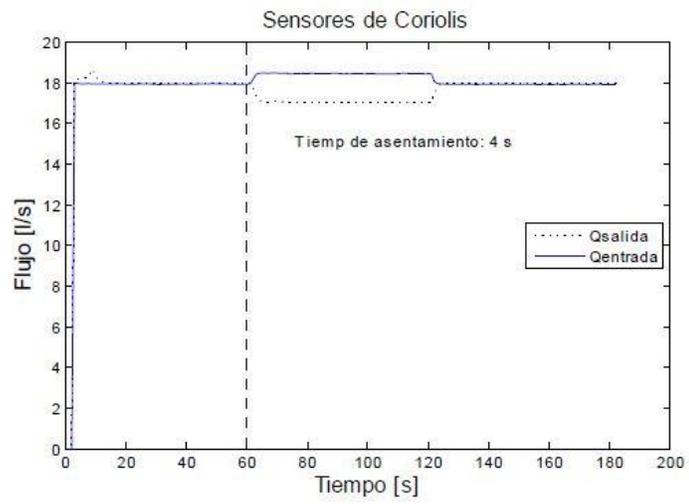


Figura 3.7: Comportamiento de los flujos ante un cambio súbito en la válvula 3

### 3.2.2. Sensor de presión

El sensor de presión se utiliza normalmente en el proceso y la industria; garantiza alto grado de seguridad del sistema gracias a la cerámica resistente al vacío, tiene una configuración rápida con rango de medición ajustable libremente, como se puede observar en la Figura 3.8 el sensor de presión usado en la tubería.

Con mediciones en estado permanente, es decir con un flujo nominal fijo y una frecuencia de 60 [Hz] se realizaron las gráficas desviación estandar  $\sigma$  versus presión, en las Figuras 3.9 y 3.10 se muestran los resultados.

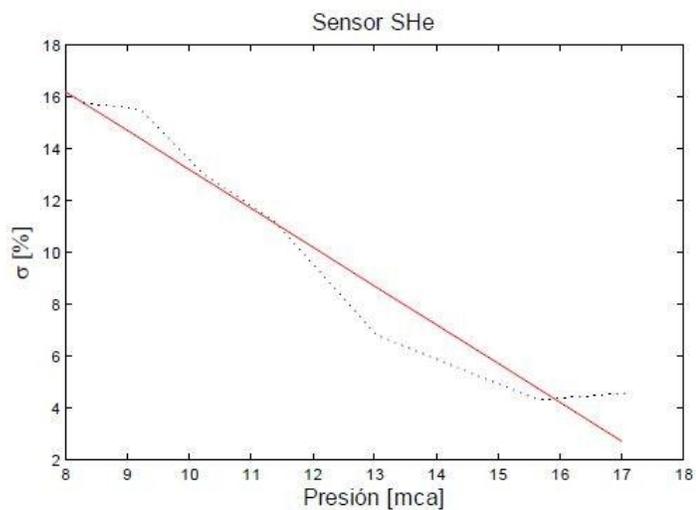


Figura 3.8: Sensor de presión a la entrada de la tubería

Las curvas punteadas son las mediciones y las rectas son curvas ajustadas de primer grado, se puede notar la diferencia entre las desviaciones a la entrada y a la salida, en la salida la desviación es menor, esto se debe a lo largo de la tubería los transitorios se atenuan entregando una señal suavizada a la salida.

El la Figura 3.11 se muestra el comportamiento de las presiones cuando la tercer válvula es abierta repentinamente. La apertura es del 100 %. La línea vertical indica el momento en el cual se abre la válvula. El tiempo de asentamiento es de 4 segundos.

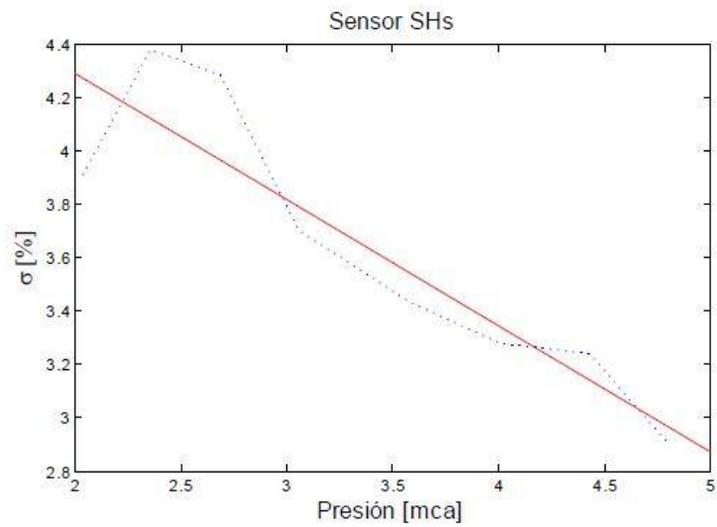


Figura 3.9: Sensor de presión a la salida de la tubería

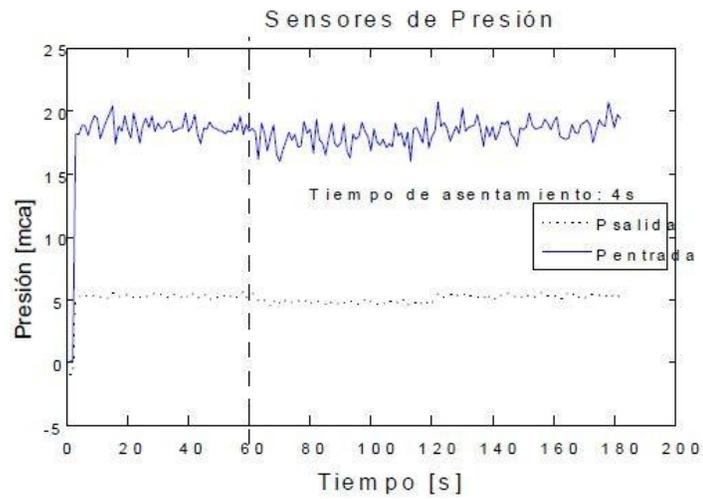


Figura 3.10: Comportamiento de las presiones ante un cambio súbito en la válvula 3

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se presentan los resultados experimentales para validar las expresiones estáticas de fuga. En primer lugar se presenta un experimento que muestra la estimación de la posición de la toma lateral fija para validar el algoritmo con una fuga. Además se describe la implementación de umbrales adaptables simétricos, con la finalidad de evitar falsas alarmas, mediante el método de elaboración de residuos. Y finalmente, el objetivo principal de este trabajo es el validar el algoritmo para una fuga desconocida teniendo una extracción conocida.

### 4.1. Expresión estática para una toma lateral o fuga

En el capítulo 2 se presentó el algoritmo para la localización de una fuga en una tubería de geometría compleja con extracciones.

Adicionalmente se presentan las expresiones para calcular la ubicación de una fuga en una tubería con extracción fija de dicha tubería.

Para el cálculo de la posición de una fuga o extracción se define:

$$z_f = \frac{mQ_{out}L + H_{out} - H_{in}}{mQ_{out} - mQ_{in}} \quad (41)$$

donde:

$H_{in}$  = perfil piezométrico de entrada

$H_{out}$  = perfil piezométrico de salida

$Q_{in}$  = flujo de entrada

$Q_{out}$  = flujo de salida

$m$  = constante de fricción

$L$  = longitud de la tubería

Con la finalidad de validar experimentalmente esta expresión se realizó la actividad que se describe a continuación

#### 4.1.1. Experimento 1

Para analizar el comportamiento de la expresión (41), cuando existen cambios en el punto de operación nominal, considerando una apertura de válvula del 100 %; se siguió el procedimiento que a continuación se describe:

1) Se puso a funcionar la tubería, dejando transcurrir un periodo de 1,000 segundos, ésto con la finalidad de que el sistema alcance a operar en un estado estacionario, como se puede observar en la Figura 4.1, en condiciones de operación nominal, a 60[Hz].

En la Figura 4.1 se puede observar el flujo en  $Q_{in}$ , mientras que en la Figura 4.1 se puede observar el flujo de salida más el flujo de fuga; tenemos que se cumple la siguiente igualdad, como se puede observar  $Q_{in} = Q_{ext} + Q_{out}$

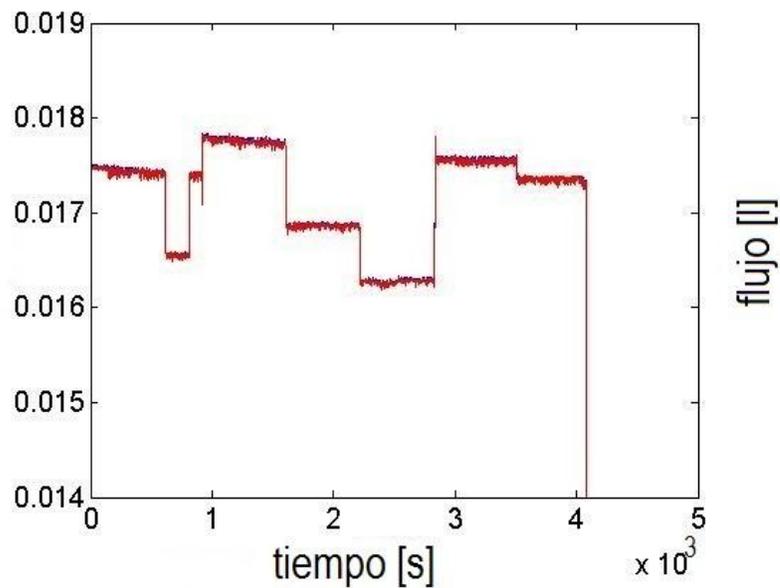


Figura 4.1: gráfica del flujo de entrada vs flujo de extracción mas flujo de salida

- 2) Inmediatamente después, se provocó una extracción, es decir se abrió en un 100% la válvula número 4, localizada a  $z_f = 118.365$ [m].
- 3) Partiendo de condiciones de funcionamiento nominal 60[Hz] se varió el punto de operación en 57[Hz] y 55[Hz]tal como se ilustra en la Figura 4.2, con la finalidad de analizar las variaciones que se producen en las mediciones, al cambiar el punto de operación del sistema en la estimación de la posición de la extracción.

La Figura 4.2 muestra un comparativo entre los flujos de entrada,  $Q_{in}$ , y de salida,  $Q_{out}$  a lo largo de todo el experimento y se puede observar el momento exacto en el cual se presenta la fuga, aproximadamente a los 1,000 segundos. También se observa cuando sucedieron los cambios en el punto de operación y los cambios en el flujo de fuga.

Del experimento número uno se puede concluir que el cálculo de la  $z$  estimada ante cambios en el punto de operación sigue teniendo una exactitud muy buena ya que no sufre cambios en el cálculo. Como se puede observar en la Figura 4.1 Sin embargo es posible apreciar que ante gastos muy pequeños de extracción, la estimación de la posición se dificulta.

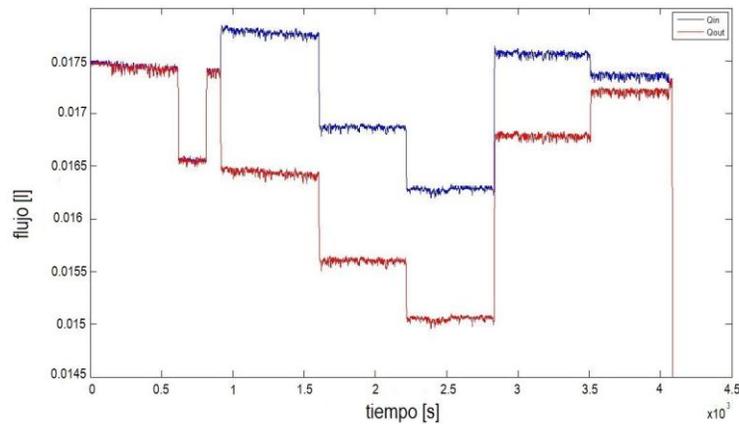


Figura 4.2: Comparación entre el flujo de entrada  $Q_{in}$  y el flujo de salida  $Q_{out}$  a lo largo de todo el experimento

#### 4.1.2. Experimento 2

Este experimento es el complemento del experimento número uno, lo que en esta prueba se quiere verificar es el comportamiento de la  $z$  estimada ahora ante los cambios en el gasto de fuga.

- 1) Partiendo de un punto de operación nominal a 60[Hz], se modificó la apertura de la válvula de extracción, esta variación fue de un 50 % y ocurrió a los 28 minutos.
- 2) 10 minutos después se volvió a modificar la apertura de la válvula de extracción, ahora a un 12 % aproximadamente, se dejó 10 minutos en lo que el sistema se estabilizó.

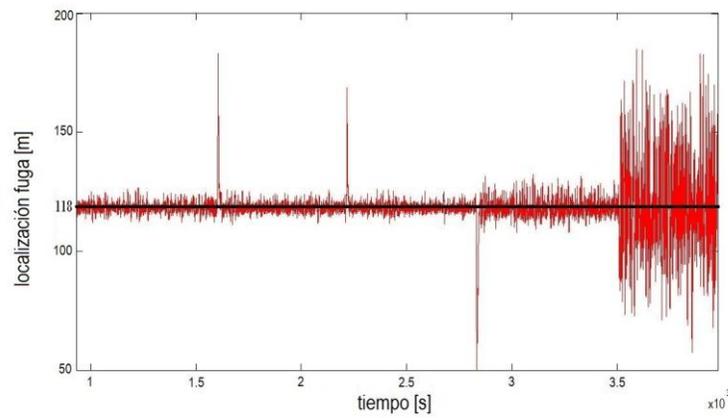


Figura 4.3: En la gráfica se puede observar el cálculo de la  $z$  equivalente a lo largo del experimento 1 y 2.

En la Figura 4.3 se pueden observar los experimentos 1 y 2. En la gráfica se observa la ubicación de la  $z$  estimada así como también el momento en el que se presentan los cambios de operación, los picos en la gráfica; el primer cambio de operación se presentó a los 16,000 segundos; el segundo cambio de operación se presentó a los 22,000 segundos y por último el tercer cambio de operación se presentó a los 29,000 segundos. También se observa el momento justo en el cual suceden los cambios en el flujo de fuga; la primera disminución en el flujo fue del 50 % del fluido y se presentó a los 29,000 segundos, el segundo corte en el flujo se presentó a los 35,000 segundos y éste fue del 30 % con respecto al flujo inicial.

Frecuencia [Hz]	Apertura válvula [% ]	Distancias estimadas [m]
60	100	115 - 121
57	100	115 - 121
55	100	115 - 121
60	50	112.5 - 126
60	30	88 - 159

Cuadro 3:

Del experimento número 2 se concluye que la z estimada ante gastos considerables tiene una exactitud bastante exacta como se muestra en la Figura 4.3 y en la tabla, pero en presencia de flujos despreciables el cálculo de la z estimada empieza a hacerse erróneo, como se observa en la gráfica 4.3.

#### 4.1.3. Posiciones de fuga

Es importante resaltar que las ecuaciones (35) y (36) son usadas para la generación de residuos, lo cual permite discriminar para hacer la selección de la ecuación que se habrá de utilizar, dependiendo el evento, aguas arriba (35) o aguas abajo (36). Además fue necesaria la elaboración de un umbral; se explicará más adelante en este mismo trabajo, este umbral es el que nos servirá como discriminante para la elección de la expresión a usar.

$$r_s = Z_b - \hat{Z}_b$$

si  $r_s > 0 \implies \exists Z_{fa}$   
si  $r_s < 0 \implies \exists Z_{fb}$   
si  $r_s = 0$  ausencia de condición anormal.

El siguiente experimento se elaboró para analizar el comportamiento de las ecuaciones (33) y (34) en presencia de una fuga, además de la toma lateral conocida, con la finalidad de validar las ecuaciones antes mencionadas.

#### 4.1.4. experimento 3

- 1) Se puso en funcionamiento el sistema y se dejó operar hasta que alcanzara el estado estacionario, esto ocurrió a los 500 segundos.
- 2) Pasando los 500 segundos, inmediatamente después, se abrió la válvula 4, ésta simuló a la extracción conocida.
- 3) Se dejó funcionar hasta los 850 segundos; a partir de este momento se abrió la válvula 3, ésta simula una fuga, aguas arriba y con este procedimiento se verifica la ecuación (34).

4) En el segundo 1,125 se cerró la válvula 3 y de inmediato se abrió la válvula 5, esta simuló ser una fuga aguas abajo; con esta prueba se valida la ecuación (35).

En la Figura 4.4 se observa el cálculo de la  $z$  estimada a lo largo de todo el experimento, este cálculo se ve en la gráfica 1; en la gráfica 2 se observa el momento en el cual se produce una fuga aguas arriba, además se muestra la ubicación de la misma; en la gráfica 3 se muestra cuando existe una fuga aguas abajo, tanto en el momento en el cual se presenta, así como su ubicación.

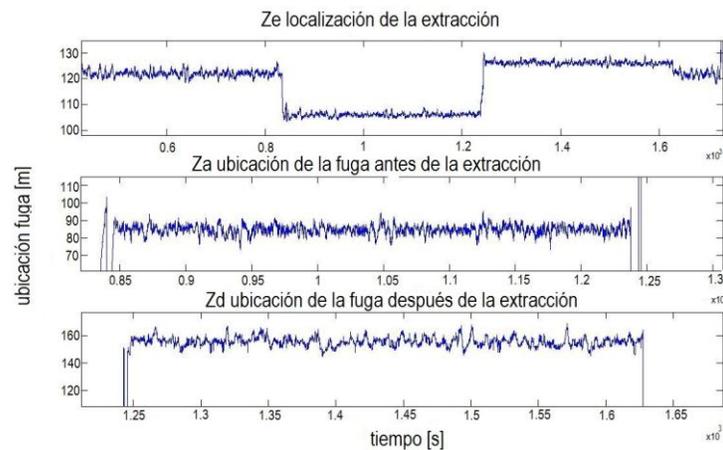


Figura 4.4:

Después de haber realizado el experimento número 3 se puede llegar a la conclusión de que las expresiones estáticas (34) y (35) tienen un buen desempeño ya que efectivamente se logró una precisión bastante significativa para ambos casos, aguas abajo y aguas arriba.

#### 4.1.5. experimento 4

La finalidad de este experimento fue la de comprobar las expresiones (34) y (35) pero a diferencia del experimento anterior en donde solamente se simularon fugas en 2 posiciones diferentes, una aguas arriba y otra aguas abajo, en éste se hizo, ante la presencia de una fuga en múltiples posiciones, esto con la finalidad de poder comprobar la precisión de las ecuaciones en cada una de los 5 puntos de la tubería en donde se simularon fugas.

A continuación se describe el experimento que se realizó:

- 1) Se puso en funcionamiento el sistema y se dejó hasta que alcanzó el estado estacionario, esto ocurrió a los 500 segundos.
- 2) Transcurridos los 500 segundos se abrió la válvula 4, la cual representa a la extracción conocida.
- 3) Se dejó funcionar hasta los 700 segundos, a partir de este momento se abrió la servoválvula 1, con la finalidad de simular una fuga.
- 4) Se dejó operar por 200 segundos inmediatamente después se cerró la servoválvula 1. Se dejó un intervalo de 10 segundos, para abrir la servoválvula 2.
- 5) Se dejó funcionar 300 segundos y se cerró la servoválvula 2, se dejó un intervalo de 10 segundos para inmediatamente después aperturar la válvula 3.
- 6) Se operó por 300 segundos con la válvula 3, inmediatamente después se aperturó la válvula 5.
- 7) Pasadas los 300 segundos se cerró la válvula 5, para inmediatamente después aperturar la válvula 6 por aproximadamente 300 segundos, pasado este tiempo se cerró la válvula.

En la figura 4.5 se puede observar como va cambiando el signo del residuo a lo largo del experimento, de acuerdo a la ubicación de las fugas, es decir, se ve el cambio del residuo para así poder hacer el cálculo de la ubicación precisa de la fuga con  $Z_{fa}$  o  $Z_{fb}$ , según sea el caso.

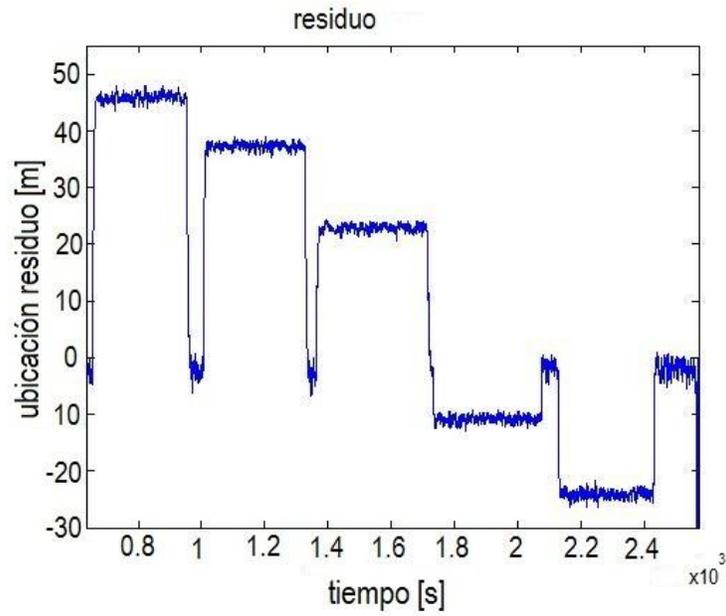


Figura 4.5: Evolución del residuo

En la figura 4.6 se puede observar la estimación  $Z_{fa}$  cuando existe fuga aguas arriba.

En la figura 4.7 se observa la  $z$  estimada comparada con la posición real de las tres primeras válvulas, estas simularon una fuga aguas arriba, se observa que existe una exactitud considerable.

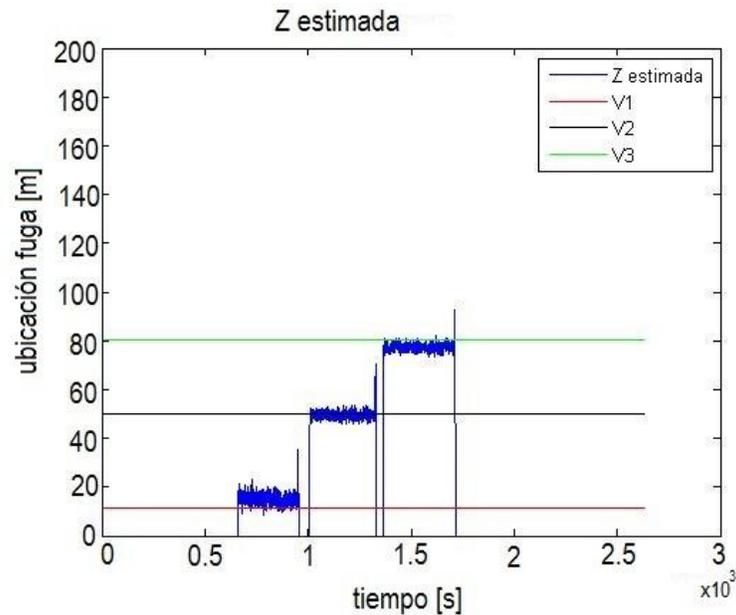


Figura 4.6: z equivalente

En la figura 4.8 se observa el cálculo de  $Z_{fb}$  cuando existe fuga aguas abajo.

En la figura 4.9 se observa el comparativo de la Z estimada con las válvulas cinco y seis, éstas simularon ser una fuga aguas abajo.

Se puede concluir, en base a los resultados anteriores, que las ecuaciones (34) y (35) en presencia de una fuga en múltiples posiciones, mantiene una exactitud bastante buena cabe destacar que en algunos puntos se logró una mejor exactitud de las ecuaciones, como se puede observar en las Figuras 4.7 y 4.9 en éstas se encuentra la ubicación estimada y se remarca la posición real de cada uno de los puntos en donde se simuló una fuga.

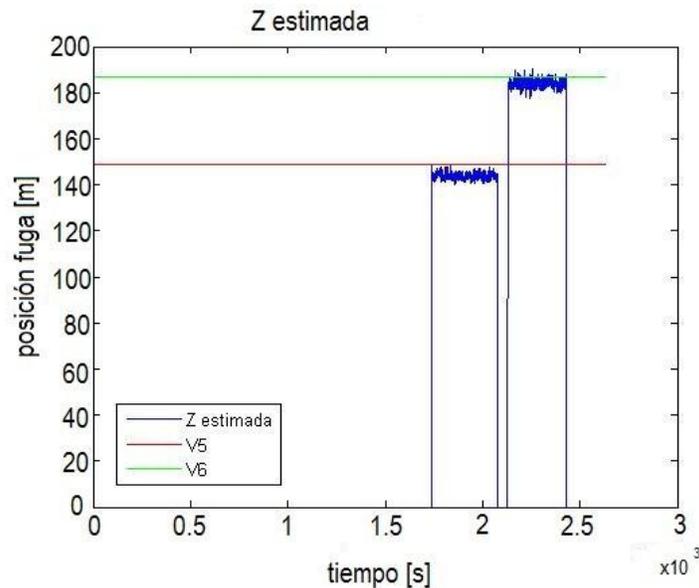


Figura 4.7: z equivalente

## 4.2. Experimento 5

La finalidad de este experimento fue la de validar las expresiones (34) y (35) a diferencia del experimento anterior en donde solamente se simularon fugas en múltiples posiciones, en éste se hizo, ante la presencia de una fuga en múltiples posiciones y cambios en el punto de operación, éste con la finalidad de poder comprobar la precisión de las ecuaciones en cada una de los 5 puntos de la tubería en donde se simularon fugas.

A continuación se describe el experimento que se realizó:

- 1) Se puso en funcionamiento el sistema y se dejó hasta que alcanzó el estado estacionario.
- 2) Una vez funcionando en estado estacionario se abrió la válvula 4, la cual representa a la extracción conocida.
- 3) Se hicieron cambios en el punto de operación, a los 220 segundos se hizo el primer cambio de frecuencia, se pasó de 60 a 57 [Hz], el segundo cambio ocurrió a los 315 segundos se pasó a una frecuencia de 55 [Hz]. A los 420 segundos se regresó a la frecuencia nominal, 60 [Hz].
- 4) Se hará una reducción en el flujo de la extracción conocida, a los 510 segundos se cerró en un 50% , a los 610 segundos se dejó a un 30% del flujo total y a los 720 segundos se cerró en su

totalidad.

5) A los 810 segundos se volvió a abrir en su totalidad la válvula 4.

6) A los 920 segundos se abrió la servoválvula 1, en paralelo con la válvula 4, a los 1050 segundos se cerró en su totalidad la servoválvula 1.

7) A los 1150 segundos se abrió a un 100% la servoválvula 2. a los 1270 segundos se cerró un 20%, a los 1360 segundos se cerró 40% del total, a los 1550 segundos se cerró un 60% del total, a los 1640 segundos se cerró un 70% del total, a los 1750 segundos se cerró 80% del total, a los 1844 segundos se cerró a un 85% del total y por último a los 1944 segundos se cerró a un 100%.

8) A los 2038 segundos se abrió a un 100% la válvula número 3, misma que fue cerrada a los 2134 segundos.

9) A los 2190 segundos se abrió a un 100% la válvula número 5, misma que a los 2365 segundos se cerró en un 50%, a los 2480 segundos se cerró en su totalidad.

10) A los 2560 segundos se abrió en un 100% la válvula número 6, la misma fue cerrada en su totalidad a los 2663 segundos.

11) Se provocó fuga del 100% en cada una de las válvulas, a los 2773 segundos ocurrió la fuga en la servoválvula 1, a los 2900 segundos ocurrió en evento en la servoválvula 2, a los 3010 segundos se presentó la fuga en la válvula 3, a los 3110 segundos se provocó la fuga en la válvula número 5 y por último a los 3210 segundos se presentó la falla en la válvula número 6.

En la Figura 4.8 se muestra la  $z$  estimada con fugas antes de la extracción conocida, es decir la falla se encuentra en la posición de la válvula 1, 2 y 3.

La Figura 4.9 muestra la  $z$  estimada con fuga después de la extracción conocida, la falla se encuentra en la válvula 5 y 6.

En la Figura 4.10 se muestra como va cambiando el signo del residuo a lo largo de todo el experimento, este signo determinará la localización de la falla.

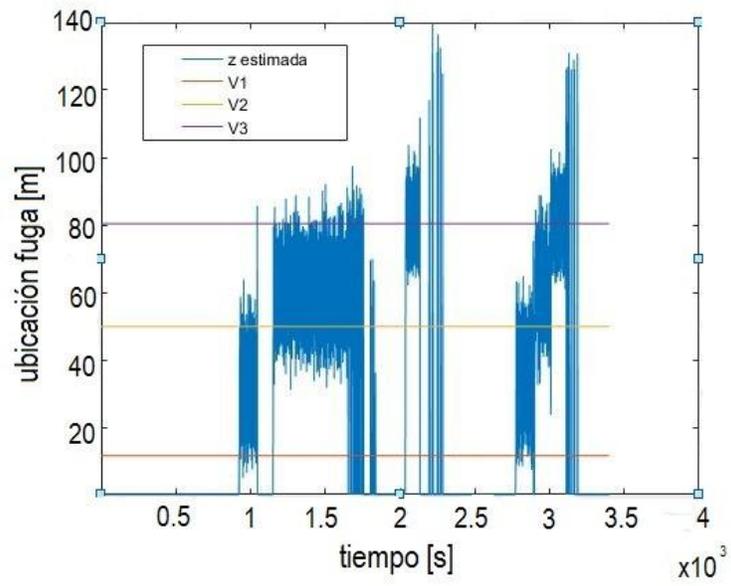


Figura 4.8:  $z$  estimada con fugas antes de la extracción conocida

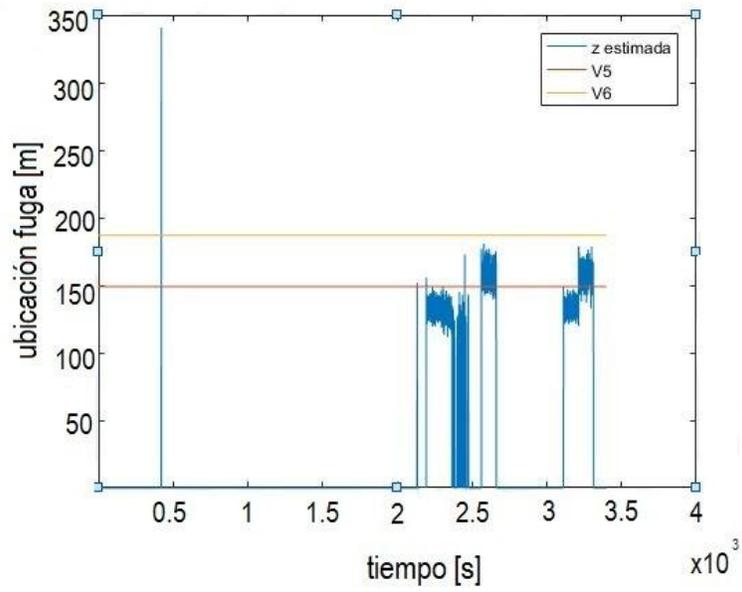


Figura 4.9: z estimada con fugas después de la extracción conocida

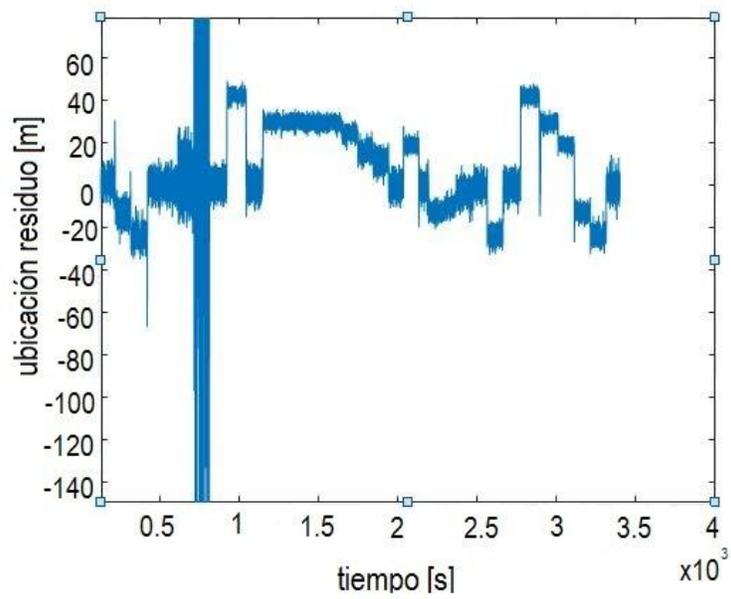


Figura 4.10: evolución del residuo

#### 4.2.1. Evaluación de residuos

En condiciones ideales, cualquier desviación de un residuo, diferente de cero, es un indicador de falla o síntoma; sin embargo, esta condición ideal de decisión produce falsas alarmas, aún en condiciones de experimentos controlados. La etapa de diagnóstico, llamada evaluación de los residuos, involucra aspectos prácticos y tiene como objeto determinar las condiciones que permiten diagnosticar la presencia de las fallas en tiempo real con ayuda de umbrales mínimos  $U_{\min}(r_i)$  y máximos  $U_{\max}(r_i)$  para cada residuo  $i$  considerando condiciones reales del proceso. Para tener indicadores confiables, los umbrales se calibran a priori en función de errores e incertidumbres en condiciones normales, y el cambio del residuo en condiciones de falla con magnitudes realistas. En general, los umbrales son expresados ya sea en términos de funciones de cada residuo, las cuales pueden ser variantes en el tiempo, antisimétricas o en términos de funciones por intervalos; por ejemplo, uno para valores positivos y otro para negativos. Esta tarea depende del número de residuos disponibles  $m_r$  y del tipo de dominio del conjunto  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  ya que cada residuo tiene su propio dominio (reales, positivos, enteros, por mencionar algunos), y es función del tiempo continuo o discreto.

Un problema crítico para evaluar los residuos, en casos reales, es el hecho de que los umbrales son ajustados con datos simulados en condición de falla, y por lo tanto, puede ocurrir que estos sean poco realistas. Además, el comportamiento de un residuo ante varias fallas, puede ser completamente diferente, en órdenes de magnitud. En consecuencia, hay que seleccionar con cuidado los elementos cuantificables del conjunto  $R$ . Se recomienda, en lo posible, unificar los dominios de la representación de los residuos; normalizar los residuos ante fallas y perturbaciones patrón; y contar con un entendimiento claro del tipo de fallas que se desea diagnosticar.

#### 4.2.2. Umbrales adaptables

La técnica de umbrales adaptables para activar los síntomas, fue propuesta inicialmente por Clark quien sugirió una relación empírica entre el punto de operación y el correspondiente umbral para la detección y se encuentra reportada en el libro de Patton et al. (1989). Posteriormente, Frank y Kiupel (1996) propusieron utilizar técnicas basadas en reglas borrosas para obtener umbrales adaptables.

Un generador de umbrales adaptables muy simple, y usado frecuentemente, se muestra en la figura 4.10, el cual involucra algunas de las funciones de evaluación. El sistema consiste en generar un promedio móvil del residuo  $\bar{r}(t)$  con un filtro pasa bajas para eliminar las desviaciones de alta frecuencia y después obtener el valor absoluto del residuo.

Finalmente se acondiciona la señal  $|\bar{r}|$ . Al umbral máximo se le adiciona únicamente un valor

$a_1$  y para el umbral mínimo, deberá además multiplicarse con el parametro  $a_2$ . El parámetro  $a_1$  permite abrir la franja de los disparos y el de  $a_2$  se encarga en abrir el umbral para valores negativos. La figura 4.11, tomada de Salinas (2010), presenta la evolucion del residuo y las variaciones

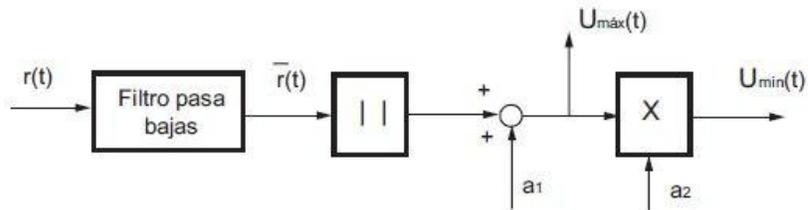


Figura 4.11: Implementación de un umbral adaptable simétrico

de los umbrales del sistema de diagnóstico con  $a_1 = 0.001$  y  $a_2 = -1$ . La falla fue provocada a los 600[s] y se aprecia que los umbrales simétricos de valores  $\pm 0.2$  no son alcanzados por el residuo sin fallas y una vez que éste aumenta, producto de la falla, los umbrales también aumentan pero en menor proporción que él, logrando que el residuo sobrepase al umbral en unos 10[s]. El costo que se paga es el de una respuesta lenta en el diagnóstico, dado que la fuga ocurre a los 600[s] y el residuo no sobrepasa el umbral inmediatamente.

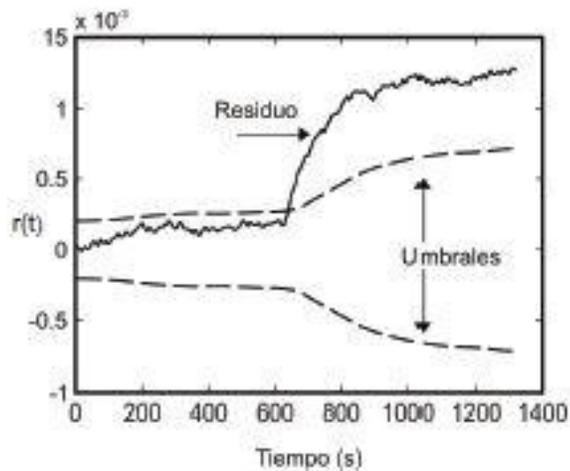


Figura 4.12: Evolución del residuo y sus umbrales adaptables

Las alarmas, en el contexto de diagnóstico, se consideran eventos discretos activados cuando una variable, o una función de ella, sobrepasa ciertos límites de operación y es ésta la información más utilizada para el monitoreo automático. Cuando el operador controla una instalación, a partir de las señales de alarmas, se habla de un control basado en umbrales. Para cada variable de importancia se definen un conjunto de valores de umbral; pueden ser uno, dos, y a veces cuatro valores que delimitan el intervalo de valores aceptables. Así, mientras la variable se encuentre entre los umbrales, se considera que todo está operando normalmente, pero en el momento en que el valor medido sobrepase el umbral en cualquiera de las dos direcciones, se activa una alarma, la cual se muestra en la pantalla del sistema SCADA. Para el caso de estudio, debido a incertidumbres y ruido propio del fluido, los residuos se desviaban de cero en algunos intervalos de tiempo, en ausencia de fugas. Por esta razón se utilizó un umbral adaptable, ya que, al tratar de seguir la entrada, hace que los límites de los umbrales sean dinámicos y flexibles y se adecúen al comportamiento de la señal. El umbral que fue adaptado a los algoritmos es una propuesta de (Iserman, 2006). El esquema reportado es aplicable para una señal de excitación continua, por lo que se tuvieron que hacer adecuaciones para lograr ingresar los datos discretos que el sistema SCADA entrega.

#### 4.2.3. Implementación de umbrales adaptables

En la implementación de umbrales adaptables, para nuestro sistema, es necesario el cálculo del residuo, éste se obtiene mediante la diferencia de la posición exacta del punto de extracción menos la Z calculada, ecuación (1), en cada una de las iteraciones.

$$r_s = Z_b - \hat{Z}_b \quad (42)$$

$r_s$  =residuo

$Z_b$  =longitud del origen a la extracción

$\hat{Z}_b$  =ubicación extracción calculada

En nuestro sistema se implementó el algoritmo antes descrito, umbrales adaptables, esto con la finalidad de eliminar el inconveniente de generar falsas alarmas, umbrales fijos.

En la figura 4.12 se puede observar el modelo en Simulink, usado para la generación de umbrales.

A la entrada del generador se tiene la señal del residuo, esta señal pasa a un filtro paso bajas; con la finalidad de eliminar el ruido de alta frecuencia, a la salida del filtro este valor se multiplica por su valor absoluto, a este valor se le suma una constante, esta es para abrir el umbral positivo, después se multiplica por una constante, esta constante tiene la función de abrir el umbral negativo.

La justificación de los valores usados en la implementación de los umbrales simétricos es la si-

guiente:

Al haber implementado umbrales adaptables simétricos los valores que abren la ventana, tanto positiva como negativa, deben de ser del mismo valor en magnitud solo que con diferente signo, es decir, la constante que abre el umbral negativo es negativa. Los valores asignados fueron en base al experimento que se describe a continuación, el valor 1 y  $-1$  y en los umbrales abre una ventana en la cual no se crean falsas alarmas y funciona eficientemente para el experimento.

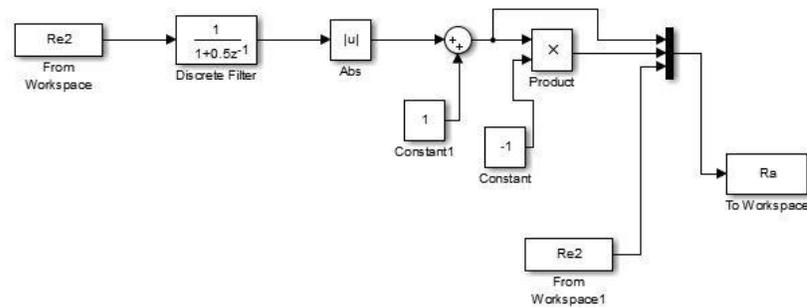


Figura 4.13: Modelo en simulink del generador de umbrales

En la Figura 4.12 se muestra el generador de residuos usado en este trabajo. El primer bloque invoca el residuo generado en cada iteración, el segundo bloque es un filtro paso bajas de ahí pasa al siguiente bloque que es de valor absoluto. Al valor resultante se le suma una constante a1 ésta hará que el umbral positivo abra, después se le multiplicará un valor a2 éste hará que el umbral se abra para valores negativo.

#### 4.2.4. Experimento 6, implementación de un umbral

Con el siguiente experimento se describe la implementación de umbrales adaptables para nuestro sistema:

- 1) Se puso a funcionar la tubería, se dejó operando un lapso de 200 segundos, esto fue con la finalidad de que el sistema opere bajo estado estacionario.
- 2) Pasados los 200 segundos, se abrió la válvula 4 con una apertura del 100%, ésta se encuentra ubicada a una distancia de 118.365 [m]; se dejó abierta a lo largo de todo el experimento. El

flujo de esta válvula simulará la extracción conocida.

3) Después de 250 segundos se abrió la válvula 3 con una apertura del 100 % ; manteniendo abierta en un 100 % la válvula 4, ésta se encuentra ubicada a una distancia de 80[m]. El flujo de esta válvula simulará la condición de falla, fuga aguas arriba, todo ésto por un lapso de 250 segundos.

4) Pasados las 250 segundos se cerró la válvula 3 y al mismo tiempo se abrió la válvula 5 a un 100 %, esta válvula simulará una fuga aguas abajo. Se dejó abierta por una ventana de tiempo de 350 segundos.

El experimento anterior tiene un par de objetivos el primero y más importante es el de implementar umbrales adaptables y el segundo es verificar para que cantidad de gasto funcionan correctamente los umbrales. Se simularon los 2 escenarios posibles, el primero toma lateral y fuga aguas arriba y el segundo extracción conocida y fuga aguas abajo.

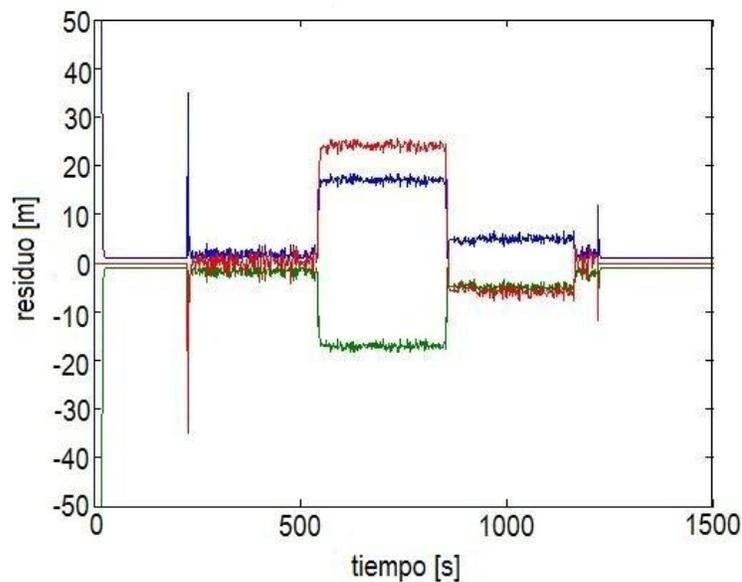


Figura 4.14: Evolución de los umbrales adaptables con una apertura de válvula del 100 % de la válvula

En la figura 4.13 se observa la evolución del residuo, línea roja, y de los umbrales, umbral superior línea azul, y umbral inferior línea verde, de nuestro sistema a lo largo de todo el experimento, cabe resaltar que el experimento fue elaborado con datos reales y una apertura del 100 % de la válvula.

El experimento antes descrito fue replicado en 2 ocasiones más. Las variantes a estas pruebas fueron la apertura en las válvulas de fuga; las aperturas seleccionadas fueron del 75 % y del 50 % esto fue con la finalidad de determinar la sensibilidad del sistema ante cambios en el flujo y poder tener un umbral adaptable que no provoque falsas situaciones de alarma.

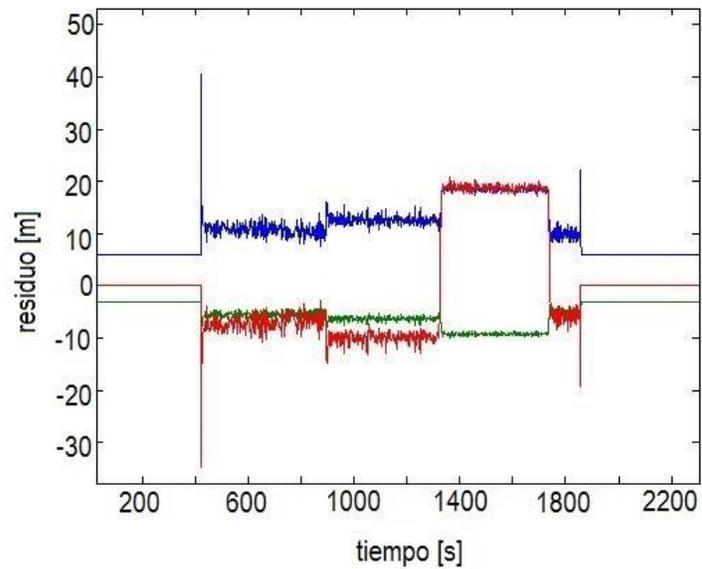


Figura 4.15: Evolución del residuo y de los umbrales adaptables, con una apertura del 75 % de la válvula

En la figura 4.14 se observa la evolución del residuo así como de los umbrales adaptables, todo este experimento fue realizado con una apertura en la válvula de fuga del 75 %. Podemos observar que tenemos un umbral que para nada se ajusta a nuestro sistema, desde que se presenta la extracción observamos que el residuo se sale del umbral, ésto nos puede causar un evento de falsa alarma.

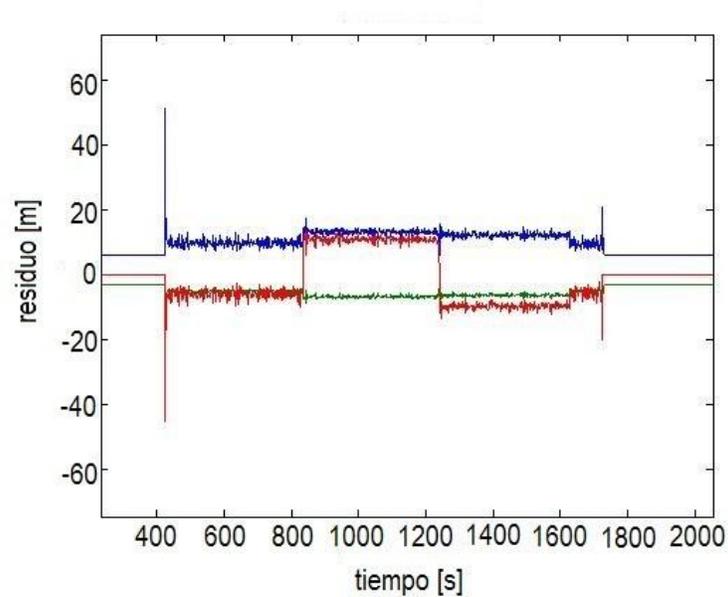


Figura 4.16: Evolución del residuo y de los umbrales adaptables, con una apertura del 50% de la válvula

En la figura 4.15 se observa la evolución del residuo así como de los umbrales adaptables, el experimento fue realizado con una apertura en la válvula de fuga del 50%. Se puede observar que los umbrales en nada se ajustan con el residuo, el residuo desde el inicio del experimento se muestra fuera de los umbrales, esto da como consecuencia una situación de falsa alarma. Cuando se presentó una fuga aguas arriba no fue detectada por los umbrales como consecuencia de la presencia de fuga antes de la extracción, la alarma se mantuvo desactivada.

Se puede concluir a partir del experimento anterior que los umbrales dependen del flujo de fuga, es decir cuando existe una fuga con un flujo inferior al 70% los umbrales no alcanzan a detectar la fuga.

Apartir de los resultados experimentales se elaboró la tabla siguiente:

$Z_{ext}$	$\hat{Z}_{ext}$	%	$Z_{eq}$	$Q_{eq}$	$Q_{ext}$	$Q_2$	$Z_2$	$\hat{Z}_2$
118	120.5	100	95.6	.0027	.001257	.00144	80.35	74.0615
118	120.5	100	128.5	.00232	.001277	.001045	143.509	138.0301
118	127	75	94.5	.00238	.000923	.001455	80.35	74.0131
118	127	75	134	.00199	.000937	.001055	143.509	139.9630
118	129	50	93.5	.00225	.000764	.001462	80.35	76.4836
118	129	50	135.5	.001835	.000776	.001065	143.509	139.4728

Los datos expresados en la tabla anterior se obtuvieron mediante las siguientes expresiones:

$Z_{ext}$  = posición de la extracción

$\hat{Z}_{ext}$  = posición de extracción estimada

% = porcentaje de apertura de la válvula de extracción

$Q_{eq} = Q_{in} - Q_{out}$

$Q_2 = Q_{in} - Q_{out} - Q_{ext}$

$Z_2$  posición real de la válvula, válvulas 3 y 5

$\hat{Z}_2$  posición estimada de la fuga

Mediante la tabla anterior y la realización del experimento número 5 se puede concluir lo siguiente:

Como se ha podido observar a lo largo de todo este trabajo la z estimada está en función del flujo de extracción, se llega a la conclusión de que para cualquier cálculo en este algoritmo se depende totalmente del flujo de extracción; es decir para que se tenga una z estimada se debe tener un flujo de extracción bastante significativo, y a medida de que el flujo de extracción se haga menor el cálculo de la z será erróneo; mientras la variación del flujo de extracción se haga menor el cálculo de la posición será más erróneo.

## 5. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue el de validar el algoritmo presentado en el artículo "Leak estimation method for complex pipelines with extractions." escrito por O. González, C. Verde, L. Torres, en este trabajo se presentan 2 algoritmos; el primero describe un evento en el cual se presenta una fuga, este caso está documentado, validado y comprobado su funcionamiento adecuado. El principal objetivo fue el de validar el segundo algoritmo de este artículo, el cual fue diseñado para un evento en específico en el cual se presenta una fuga con una extracción conocida, además de implementar un umbral adaptable, éste con la finalidad de evitar falsas alarmas.

Para poder validar los algoritmos presentados en el artículo mencionado, previamente se necesitó estudiar todo sobre el tema y hacer una cantidad de experimentos considerables además de que se implementó un programa en Matlab para los cálculos.

Los resultados obtenidos para el primer algoritmo fueron los esperados, sólo que existe un detalle: se verificó que el cálculo de la  $z$  equivalente depende del flujo de extracción, es decir a un flujo mayor del 40 % se tiene un cálculo muy certero, caso contrario cuando el flujo es menor al 40 % . Para la validación del segundo algoritmo se necesitó más trabajo ya que éste no ha sido implementado aún y no existen resultados previos que nos pudieran servir de comparación. Nos encontramos con la dificultad, de que a un flujo de extracción menor del 35 % el cálculo de la  $z$  equivalente es erróneo ya que este cálculo es demasiado importante para la ubicación de la  $z_a$  y la  $z_d$  así como para la implementación de los umbrales.

Con base en los objetivos planteados al principio del trabajo y de los experimentos antes descritos en el mismo, se puede concluir la efectividad de ambos algoritmos, también la implementación de umbrales simétricos adaptables. En base a lo anterior se obtuvo una conclusión general muy importante, la  $z$  equivalente es totalmente dependiente del flujo de extracción.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

### Referencias

- [1] Billman, L., Isermann, R. (1987). Leak detection methods for pipelines.
- [2] Blanke, M., M. Kinnaert, J. Lunze y M. Staroswiecki (2003). Diagnosis and Fault Tolerant Control. Springer. Berlin.
- [3] C. Verde y L. Torres. Reference model-based observers for locating leaks in a branched pipeline IFAC 9th Safeprocess, París, Francia, 1-3 Sep 2015.
- [4] Chaudry, H. M. (1979). Applied hydraulic transients. Von Nostrand Reinhold Co. New York, USA.
- [5] Chow, E. y A. Willsky (1984). Analytical Redundancy and the design of robust failure detection systems. IEEE-Trans. Automatic Control
- [6] Clark, R.N. (1978). Instruments fault detection. IEEE Trans. on Aeroesp. and Elec. Sys.
- [7] Frank, P. M. (1978). Introduction to System Sensitivity. Academic Press. New York.
- [8] Frank, P. M., S. X. Ding y B Koppen-Seliger (2000). Current Developments in the theory of FDI. En: IFAC conference on SAFEPROCESS 2000
- [9] Frank, P. y X. Ding (1997). Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems. Journal Proc. Control.
- [10] Frank, P. y Kiupel, N. (1996). Fuzzy supervision for an anaerobic waste water plant.
- [11] Gertler, J. (1997). Fault detection and isolation using parity relations. Control eng. Practice.
- [12] Goupil, P. (2009). AIRBUS state of the art and practices on fdi and ftc. En: 7th IFAC International Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of technical Processes, Barcelo.
- [13] Isermann, R. (1993). Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing
- [14] Isermann, R. (1997). Supervision, fault-detection and fault-diagnosis methods: an introduction. Control En. Practices
- [15] Isermann, R. (2006). Fault Diagnosis. Editorial Springer.
- [16] Kinnaert, M. (2003). Fault diagnosis based on analytical models for linear and nonlinear systems a tutorial. En: Proceedings IFAC Safeprocess. Washington, DC.

- [17] Patton, R.(1989).Development and evaluation of a friction model for spark-ignition engines.
- [18] Patton, R., P. Frank y R. Clark (2000). Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Springer. Berlin.
- [19] Poole, D. (1988). Normality and faults in logic-based diagnosis. En: Proceedings. En: Proceedings International Joint Conference on Artificial Intelligence, Detroit.
- [20] Puig, V., J. Quevedo, T. Escobet, B. Morcego y C. Ocampo (2004) Control tolerante a fallas (parte i): Fundamentos y diagnóstico de fallas. Revista Iberoamericana de Automática en Informática Industrial.
- [21] Reiter, T. (1987). A theory of diagnosis from first principles. Artificial Intelligence.
- [22] Rumiche, F. y Indacochea, E. Estudio de caso de fallas y accidentes en gasoductos y Oleoductos. daños tuberías
- [23] Saldarriaga, J. (2003). Hidráulica de acueductos. MC Graw Hill.
- [24] Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, R. Yin y S. Kavuri(2003a). A review of process fault detection and diagnosis; part i: Quantitative model based methods; part ii: Quantitative model and search strategies; part iii: Process history based methods. Computers and Chemical Engineering
- [25] Verde, C. (2001). Multi-Leak detection and isolation in fluid pipelines
- [26] Verde, Cristina, Gentil, Sylviane, Moralez-Mendez, Ruben. (2012). Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos. Editorial Trillas. México.
- [27] Verde, C.(2004). Minimal order nonlinear observer for leak detection.
- [28] Verde, C. (2005). Accomodation of multi-leaks positions in a pipeline. Control Engineering Practice 13, 1071-1078
- [29] Verde, C., Bornard, G., Gentil, S. (2003), Isolability of multileaks in a pipeline, in: Proceedings 4th MATHMOD, Vienna, Austria.
- [30] Verde, C., Visairo, N., Gentil, S. (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response. Adv. Water Resour. 30, 1711-1721.

# 1. ANEXO 1

## 1.1. Código de matlab

En este capítulo se hará una breve explicación del código, en Matlab, usado para cada uno de los experimentos antes descritos en este trabajo.

El programa en Matlab fue ejecutado en un archivo .m y también fue necesario ocupar Simulink, como se explicó antes. El código es el siguiente:

Esta primera parte del código lo único que se define son algunas variables para después ser usadas.

```
clear all clc g= 9.81; Aceleracion de la gravedad (m/s2)
L=200.165; Longitud tubo (m)
D=.1016; Diametro tubo (m)
A=pi*(D/2)2; Area de corte transversal (m2)
b=1284; Velocidad del sonido (m/s)
a1=g*A;
a2=b2/(g * A);
Lext=118.3; Ubicación del punto de extracción
Q=Lext*ones(40957,1);
P=118.365*ones(1,40957);
```

Define los archivos de datos, tomados desde excel.

```
Hen=xlswread('completo','completa','A1:H40957'); t=Hen(:,8);n=length(t);
Qin=Hen(:,3)*0.001;Qout=Hen(:,4)*0.001;Qext=Hen(:,5)*0.001;Hin=Hen(:,1);Hout=Hen(:,2);
```

```
K=ones(n,1);
H12(1)=Hin(1);H22(1)=Hout(1);alfa=0.05;
for i=2:n
H12(i)=alfa*Hin(i)+(1-alfa)*H12(i-1);
H22(i)=(1-alfa)*H22(i-1)+alfa*Hout(i);
end
```

Cálculo de la Z estimada, para cada ciclo, también se declaran constantes como la fricción, el coeficiente de fricción  $\mu$ .

```
Hin2=H12';Hout2=H22';
for i=1:n
```

```

f(i)=0.0263*K(i);
m(i)=16.125*K(i);
zf(i)=(m(i)*L*Qout(i)^2+a1*(Hout(i)-Hin(i)))/(m(i)*(Qout(i)^2 - Qin(i)^2));
zf2(i)=(m(i)*L*Qout(i)^2+a1*(Hout2(i)-Hin2(i)))/(m(i)*(Qout(i)^2 - Qin(i)^2));
M(i)=a1*(Hout(i)-Hin(i))/(((Qout(i)^2-Qin(i)^2)*118.3)-(Qout(i)^2 * L));
end

```

Se hace el cálculo de la Z estimada con presencia de fuga conocida.

```

for i=2:n
Za(i)=((a1*(Hin(i)-Hout(i))/m(i))-(118.03*(Qout(i)+Qext(i))^2+Qout(i)^2*(200.165-
(118.03))))/(Qin(i)^2-(Qout(i)+ Qext(i))^2);
Zd(i)=((a1*(Hin2(i)-Hout2(i))/m(i))-200.165*Qout(i)^2-118.03*Qext(i)*(2*Qin(i)-
Qext(i)))/((Qin(i)-Qext(i))^2-Qout(i)^2 );

```

Se hace el cálculo del residuo.

```

S(i)=Qin(i)-(Qout(i)+Qext(i));
R(i)=Q(i)-zf2(i);

```

```

if R(i)>alfa1
Zf(i)=Za(i);
end
if Qin(i)>.0177
Za(i)=0;
end
if Qout(i)>.0161
Zd(i)=0;
elseif Qout(i)>.0158
Zd(i)=0;

```

```
end
```

```

if Zd(i)>110
Zd(i)=0;
end

```

```

if Qout(i)>.0170
zf2(i)=0;
end

```

end

Presentación de los resultados mediante gráficas

```
for i=1:n
```

```
Re(i)=P(i)-zf2(i);
```

```
if Re(i) < 60
```

```
Re(i)=0;
```

```
end
```

```
end
```

```
for i=1:n
```

```
Qf(i)=(Qin(i)+Qout(i)+Qext(i))./2; mf(i)=g*(Hin(i)-Hout(i))./(L * Q(i).^2);
```

```
f(i) = 2 * D * A^2 * m(i);
```

```
end
```

```
subplot(3,1,1);
```

```
plot(zf2);
```

```
title('Ze localización de la extracción');
```

```
xlabel('número de muestras');
```

```
ylabel('ubicación de la extracción [m]');
```

```
subplot(3,1,2);
```

```
plot(Za);
```

```
title('Za localización con una fuga antes de la extracción');
```

```
xlabel('número de muestras');
```

```
ylabel('ubicación de la extracción [m]');
```

```
subplot(3,1,3);
```

```
plot(Zd);
```

```
title('Zd localización con una fuga después de la extracción');
```

```
xlabel('número de muestras');
```

```
Re2=[t,Re'];
```