



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA ELÉCTRICA – CONTROL

**MODELOS REFERENCIADOS PARA LOCALIZACIÓN
DE FUGAS EN DUCTOS CON TOMAS LATERALES**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
OMAR GONZÁLEZ GONZÁLEZ

TUTOR PRINCIPAL
DRA. MARÍA CRISTINA VERDE RODARTE, INSTITUTO DE INGENIERÍA

COMITÉ TUTOR
DR. JAIME ALBERTO MORENO PÉREZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DRA. FLOR LIZETH TORRES ORTIZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA
DR. HÉCTOR BENÍTEZ PÉREZ, IIMAS
DR. EFRAÍN ALCORTA GARCÍA, UANL

CIUDAD DE MÉXICO, ABRIL DE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Moreno Pérez Jaime Alberto

Secretario: Dr. Benítez Pérez Héctor

Vocal: Dra. Verde Rodarte María Cristina

1er. Suplente: Dr. Alcorta García Efraín

2do. Suplente: Dra. Torres Ortiz Flor Lizeth

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:
DRA. MARÍA CRISTINA VERDE RODARTE

FIRMA



Agradecimientos

A mi familia, de quienes siempre he recibido apoyo incondicional, afecto y comprensión.

A la Dra. María Cristina Verde Rodarte, quien hizo un extraordinario esfuerzo para la realización y presentación de este trabajo de investigación. Sin su incansable apoyo no habría sido posible concluir este proyecto.

A la Dra. Flor Lizeth Torres Ortiz, por brindarme su amistad y por sus enseñanzas en aspectos técnicos del trabajo de tesis, además de aconsejarme constantemente sobre mis áreas de oportunidad.

A los miembros del jurado, por su valiosa revisión y comentarios de mejora sobre este trabajo de tesis.

A CONACYT-SENER Hidrocarburos, por permitirme participar en el proyecto "Sistema para la Detección de fugas y tomas clandestinas en ductos de gas y líquidos", por el apoyo económico brindado para la realización de mis estudios de Maestría.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, específicamente, al programa de Posgrado en Ingeniería de la UNAM, por brindarme la oportunidad de formarme académicamente, así como utilizar las instalaciones del Laboratorio de Hidrodinámica para realizar los experimentos presentados en este trabajo.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de tesis:

A mi amada esposa, Mónica Belém, por su incondicional apoyo en cada proyecto que emprendo, así como su comprensión por el tiempo y vivencias que no he podido compartir con ella debido a mi trabajo y estudios.

A mi madre, quien con su amor, su apoyo moral y sus consejos, ha sido un factor muy importante en mis decisiones y es sin duda una gran motivación en mi vida.

A mi padre, quien aunque ya no está conmigo; siempre tuvo grandes expectativas sobre mí y me inculcó que no existen los imposibles. Sus enseñanzas siempre estarán presentes en mí.

A mis hermanos, quienes siempre me han apoyado en mis propósitos y gracias a su gran afecto; me han enseñado a valorar a mi familia.

Índice

1	Introducción	1
1.1	Seguridad de procesos físicos	1
1.2	Fundamentos de diagnóstico de fallas	2
1.3	Diagnóstico de fugas en ductos	5
1.3.1	Diagnóstico por <i>software</i>	8
1.4	Objetivo del trabajo	13
1.5	Contribución y resultados	14
1.6	Organización de la tesis	15
2	Modelos del fluido	17
2.1	Modelo por secciones del ducto	17
2.2	Transformación de cabezal de presión a cabezal piezométrico	19
2.2.1	Ejemplo	20
2.3	Modelo con escenario de fugas	22
2.4	Modelo físico piloto	27
3	Esquema de diagnóstico	31
3.1	Residuo vía ramal de referencia	31
3.2	Localizador referenciado	36
3.2.1	Localización aguas arriba	38
3.2.2	Localización aguas abajo	39
3.2.3	Algoritmo de localización	40
3.3	Desempeño del localizador	41
3.3.1	Resultados con datos sintéticos	42
3.3.2	Resultados con datos experimentales	44
4	Localización vía sistemas interconectados	49
4.1	Sistemas interconectados con un estimador estático	49
4.2	Problema de identificación	53

4.3	Localizador55
4.3.1	Formulación del problema	55
4.3.2	Localizador aguas arriba	58
4.3.3	Localizador aguas abajo	61
4.4	Resultados62
4.4.1	Desempeño con datos sintéticos.	63
4.4.2	Desempeño con datos reales	65
5	Conclusiones	71
A	Aspectos prácticos del monitoreo de ductos	73
A.1	Integridad en ductos77
A.2	Identificación de peligros potenciales77
A.3	Regulaciones internacionales y nacionales79
A.4	Escenarios frecuentes de fallas80
B	Apéndice	83
B.1	Variables83
B.2	Prueba83
C	Publicaciones asociadas a la tesis	89
	Referencias	94

1 Introducción

1.1 Seguridad de procesos físicos

La operación de los procesos físicos con alto grado de tecnología involucran, cada vez más, un mayor número de subsistemas interconectados operando de forma automática. Esto se debe, principalmente a que los procesos están fuertemente interconectados, y a las regulaciones y normas internacionales existentes, como lo es una red de transporte de hidrocarburos. Así, la seguridad y la confiabilidad de los procesos ha tomado un papel importante dentro de la disciplina de control automático. Este hecho ha provocado que también la tarea de diseñar los sistemas de control automático sea más compleja y resulte insuficiente un sistema de protección con simples umbrales sin considerar correlación entre variables. Por tanto, además de garantizar un buen desempeño del proceso en condiciones normales de operación, se deben incluir mecanismos de monitoreo en tiempo real, que mejoren la integridad de los sistemas, y que reduzcan el riesgo de accidentes de graves consecuencias a lo largo de la vida útil de la infraestructura.

El menospreciar la seguridad en los procesos ha tenido graves consecuencias en diversos países. Por mencionar algunas de las catástrofes más relevantes alrededor del mundo, se tienen: el accidente nuclear en la central de Chernóbil, en abril de 1986 donde 600,000 personas recibieron dosis de radiación por los trabajos de descontaminación posteriores, cinco millones de personas vivieron en áreas contaminadas; el derrame de petróleo provocado por el petrolero Exxon Valdez, en marzo de 1989, tras encallar con una carga de 41 millones de litros de crudo en Alaska; el desastre de Seveso, Italia, en julio de 1976, que tuvo como consecuencias la contaminación del medio ambiente y el sacrificio de más de 70,000 cabezas de ganado; la catástrofe de Courrière, en marzo de 1906, catalogado como el peor accidente minero en Francia y Europa, y que provocó la muerte de 1099 mineros en el norte de Francia; la explosión de San Juan Ixhuatepec, México, con más de 500 muertos y más de 1000 desaparecidos; el accidente de la plataforma Deepwater Horizon de la compañía British Petroleum en el Golfo de México, en abril de 2010, que provocó el mayor derrame de crudo en el mar, hasta el momento. En consecuencia, gobier-

nos e instituciones de todo el mundo demandan regulación y mayores medidas de seguridad en los procesos, que reduzcan el riesgo de daños para la sociedad, la economía y el medio ambiente.

En la industria petroquímica y ambiental, el transporte de fluidos mediante ductos es uno de los principales medios para el transporte de aguas residuales, hidrocarburos, líquidos industriales, gases, etc. Este medio de transporte es el más económico, con una operación automática segura que permite reducir accidentes y daños severos al medio ambiente. De acuerdo con el Departamento de Transportes (2006) de los Estados Unidos, sólo en 2005 se registraron 492 incidentes en el sistema de la red de gas natural y líquidos peligrosos, incluyendo petróleo, con pérdidas económicas de alrededor de 800 millones de dólares, causando además la muerte de 19 personas. Por otro lado, en México, sólo en el transporte de agua potable, estudios realizados por la Comisión Nacional del Agua (2007) señalan que en el país se pierde más de 30 % del suministro de este recurso debido a las fugas. Esto provoca pérdidas económicas y daños ambientales considerables.

Además de las grandes catástrofes industriales mencionadas, en el caso de redes de ductos es común la ocurrencia frecuente de incidentes y accidentes con alto efecto económico. En 2016, el segundo informe de la ASF de revisión a la Cuenta Pública, refirió que se continúan reportando pérdidas por robo de hidrocarburos, por un costo promedio diario de 54 millones 556.8 pesos, lo que representaría una pérdida anual de 19640 millones 373.8 pesos, cantidad mayor en 3983 millones 175 pesos con respecto al 2015. En consecuencia, tanto por razones económicas como sociales, es necesario dotar a los sistemas automáticos de control de nuevas características de diseño que disminuyan el riesgo de accidentes y paros no previstos.

Resulta evidente entonces, que la seguridad y monitoreo de las redes de ductos es un tema de gran interés, en el que aspectos como las tomas clandestinas, el envejecimiento de la red, la corrosión de los materiales y el difícil acceso para un mantenimiento constante en ductos subterráneos y/o subacuáticos deben ser tomadas en cuenta. Así, el monitoreo y supervisión de las redes de ductos usando nuevas tecnologías de la información y el procesamiento de datos, es un reto en la industria del transporte de fluidos.

1.2 Fundamentos de diagnóstico de fallas

Con objeto de tener un vocabulario común y facilitar el desarrollo del campo de seguridad de procesos, la Federación Internacional de Control Automático (IFAC) definió una terminología

específica del área, que se usa a lo largo del presente trabajo (Patton *et al.*, 2000).

- **Falla:** desviación no permitida de al menos, una propiedad, característica o parámetro de un sistema con respecto a lo usual o estándar. El cambio, puede ser abrupto, si su efecto aparece repentinamente, o incipiente, si su efecto en el sistema ocurre de manera progresiva.
- **Avería:** interrupción permanente de la capacidad de un sistema para realizar una función requerida bajo condiciones de operación específicas.
- **Modos de falla:** descripción de los tipos de falla que puede presentar un componente en el modelo matemático. Cada modo de falla suele tener asociados efectos que se dan en mayor o menor medida según su magnitud.
- **Detección de fallas:** determinación de la presencia de fallas en el sistema, así como el instante de su aparición.
- **Aislamiento de fallas:** determinación del tipo y localización e instante de detección de una falla. Se realiza después de la etapa de detección.
- **Diagnóstico de fallas:** determinación del tipo, tamaño, localización e instante de aparición de una falla. Incluye la detección, el aislamiento y la estimación de la misma.
- **Sistema tolerante a fallas:** sistema que, ante la presencia de una falla, mantiene su función con o sin degradación de su desempeño, pero sin desembocar en una avería del subsistema o sistema.
- **Redundancia:** existencia de más de un conjunto de componentes y datos para conocer el estado y las características de un sistema.
- **Redundancia física:** uso de más de un instrumento independiente para conseguir una función determinada.
- **Redundancia analítica:** uso de dos o más formas, no necesariamente idénticas para determinar una variable, donde una forma utiliza un modelo matemático del sistema de forma analítica.
- **Residuo:** señal que contiene información de la falla basada en la desviación entre las mediciones de variables del sistema y las estimaciones obtenidas mediante un modelo. El residuo describe el grado de consistencia entre el comportamiento real y el modelado del sistema.

- **Umbral:** valor del residuo a partir del cual se genera una alarma debido a la existencia de una falla.

Considerando las definiciones anteriores, se puede decir entonces que la detección de fallas consiste en determinar si el sistema bajo estudio opera satisfactoriamente y bajo las normas para las que fue diseñado. Por otro lado, la tarea de aislamiento de fallas tiene como finalidad localizar la fuente de la falla, por ejemplo, cuál sensor, actuador o qué parte del proceso está en condición de falla. La combinación de ambas tareas se conoce como **detección y aislamiento de fallas FDI** (por sus siglas en inglés) y en general es un esquema de monitoreo que detecta, aísla fallas, evalúa la importancia y severidad del evento y es llamado sistema automático de diagnóstico de fallas (Patton *et al.*, 2000).

Los mecanismos por *hardware* para la detección de fallas, están basados en el concepto de redundancia física, es decir, duplicar o triplicar los sensores y actuadores empleando posteriormente la información obtenida de éstos para evaluar su consistencia. Sin embargo, esta solución no sólo es muy costosa, sino que al aumentar las dimensiones físicas del sistema aumenta también la posibilidad de que ocurra una falla, por lo que en la actualidad es empleada solamente en sistemas de alto riesgo. De manera alternativa, actualmente se prefiere emplear mecanismos por *software* basados en la redundancia analítica, la cual consiste en usar componentes virtuales que jueguen el papel de sensores y actuadores que permitan diagnosticar el estado de algunos componentes del sistema a través de algoritmos que jueguen el papel del *hardware* redundante. Cabe mencionar que la redundancia analítica está basada en el conocimiento del modelo matemático del sistema en cuestión, así como de las señales de entrada y salida del mismo. Por tanto, es fundamental disponer de modelos adecuados del proceso en condiciones normales y caracterizar los efectos de las fallas en dichos modelos.

Los métodos para resolver un problema de FDI dependen básicamente de las fallas a diagnosticar, la disponibilidad de los sensores y del conocimiento que se tenga del proceso tanto en condiciones normales como de falla. De acuerdo con Venkatasubramanian *et al.* (2003), se destacan tres grandes grupos de métodos para atacar el problema de supervisión y diagnóstico; basándose en datos históricos, en herramientas cuantitativas y en herramientas cualitativas. Cuando el comportamiento del proceso puede escribirse como un modelo matemático, determinar la existencia de una falla puede lograrse mediante la obtención de señales indicadoras de fallas conocidas como residuos. La evaluación de dichos residuos proporciona información respecto a la existencia y ubicación de las fallas (Frank, 1990). Dentro de los procedimientos basados en el modelo analítico, destacan los filtros detectores, el espacio de paridad y las

técnicas de estimación paramétrica. Por otro lado, cuando a partir del comportamiento del proceso no puede obtenerse modelos determinísticos, se procesan datos históricos o se ejecutan experimentos para obtener características o atributos estadísticos como el promedio, la correlación, etc., y, los cuales permiten analizar los modos de falla. Esto permite concluir cuáles son los componentes con un comportamiento anormal o dudoso. La comunidad de inteligencia artificial combina en cierto sentido los métodos analíticos y los basados en datos para generar residuos con ayuda de redes neuronales, lógica difusa y algunas otras técnicas de reconocimiento de patrones.

1.3 Diagnóstico de fugas en ductos

En el contexto industrial, el diagnóstico de fugas se realiza mediante el llamado *análisis de integridad de ductos*, lo cual se detalla en el Apéndice A. De manera muy general, este análisis se realiza en tres importantes etapas, las cuales son; el Plan de Evaluación de Riesgos, el Plan de Inspecciones y el Plan de Prevención, Reparación o Mitigación, tal como se ilustra en la Fig. 1.1.

La evaluación de riesgos es un proceso analítico que se debe realizar como máximo cada cinco años, cuando se realicen cambios que puedan afectar la integridad o que se deriven de un accidente mayor. Los objetivos de esta etapa son:

- Identificar y priorizar los riesgos para programar la evaluación y acciones de mitigación.
- Evaluar los beneficios que traen las acciones de mitigación.
- Determinar las acciones más efectivas para una amenaza.
- Evaluar el impacto sobre la integridad que produce una modificación en el intervalo de inspección.
- Evaluar el uso de tecnologías de inspección alternativas.

Dentro de esta etapa, el riesgo se define como el producto entre la probabilidad de falla y las consecuencias. Para su análisis de riesgos, se secciona el ducto y se genera una matriz de riesgos (considerando probabilidad de ocurrencia e impacto), con la finalidad de jerarquizar los mismos y estimar un riesgo total para el ducto completo, donde se identifican las amenazas potenciales, el impacto de las mismas según su área de trazado, las áreas sensibles y se alimenta el Plan de Inspecciones. Este último, busca caracterizar las indicaciones más severas, evaluar las acciones de mitigación requeridas, establecer los intervalos de re-evaluación y documentar

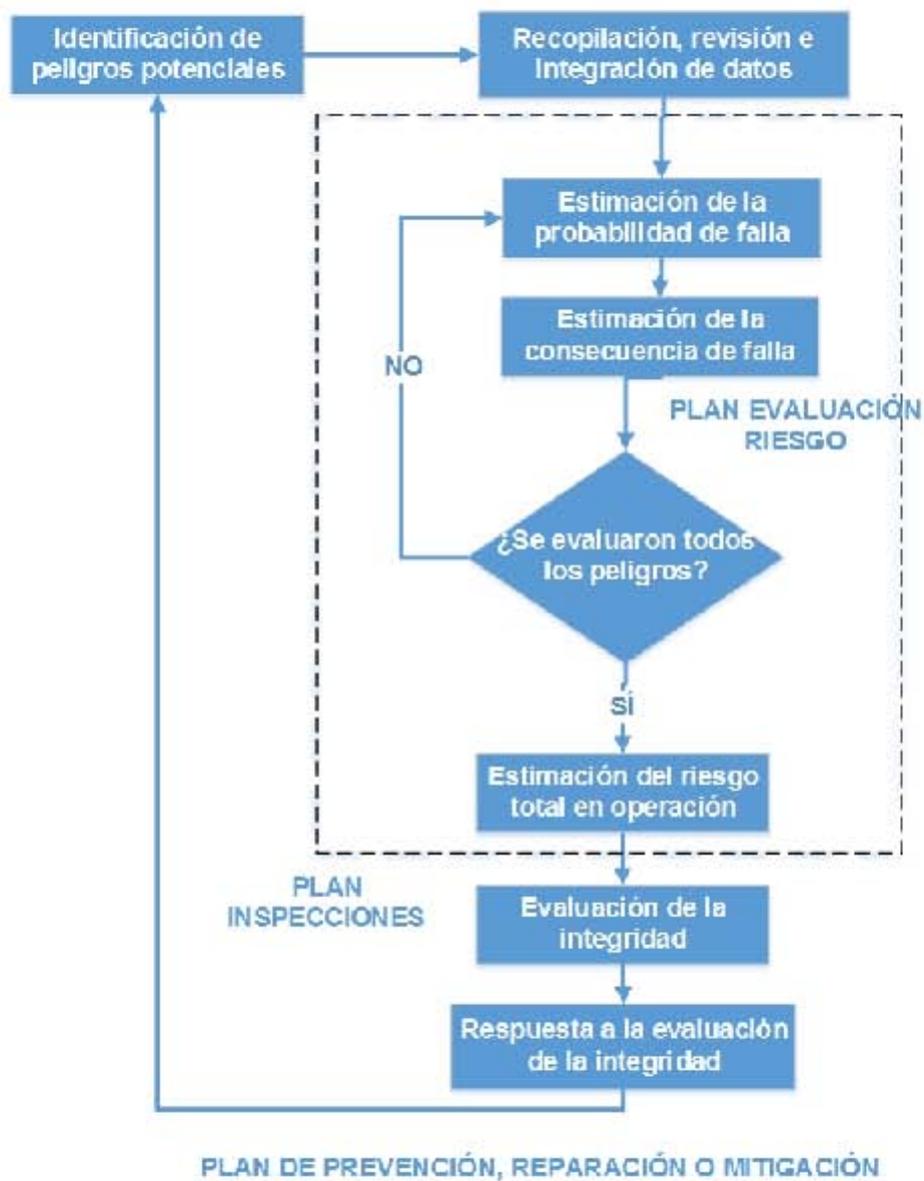


Fig. 1.1 Esquema de Integridad de ductos

los resultados de la evaluación. Para la tercera etapa, las acciones de Prevención, Mitigación y Reparación son fundamentales para disminuir la probabilidad de falla. Se deben analizar las acciones correspondientes con base en cada amenaza detectada, buscando optimizar el programa de prevención y mitigación para prevenir y minimizar el riesgo. Es preciso definir y documentar el tratamiento para cada tipo de defecto, establecer un cronograma de reparaciones basándose en la severidad del defecto y a lo indicado en la norma correspondiente. Las reparaciones deben ser permanentes, los métodos de reparación deben ser parte del manual de mantenimiento y se deben evaluar los resultados de las inspecciones. Para la ejecución del programa de reparación se consideran tres plazos:

- **Acción inmediata.** Se considera en aquellos defectos que pudieran causar fugas o rupturas inmediatas. Se debe disminuir la presión a un nivel donde la falla sea segura y realizar las reparaciones según la sección 9.3 de la NOM-027-SESH-2010.
- **Acción programada.** Aquellas indicaciones significativas que pueden crecer a un punto de falla antes de la próxima evaluación. Se debe elaborar un programa de seguimiento de las fallas en el periodo entre dos evaluaciones y evaluar la tasa de crecimiento; en caso de que pase a crítica, reparar.
- **Acciones preventivas.** Prácticas de prevención de daños, monitorear y reforzar la protección catódica, disminuir la frecuencia de inspecciones, implementar un sistema de detección de pérdidas, aumentar la capacitación, inyectar inhibidores, aplicar protección anticorrosiva y monitorear la tasa de crecimiento de corrosión.
- **Acciones mitigativas.** Instalar válvulas automáticas, implementar un sistema de emergencia y establecer un plan de seguridad.

Con objeto de ubicar el trabajo desarrollado, a continuación se describen los resultados y tecnologías propuestas recientemente en materia de monitoreo y seguridad industrial. Este estado de la tecnología permite juzgar la importancia de complementar la contribución que aquí se presenta con los temas de integridad, peligros potenciales, y la normatividad (nacional e internacional) en ductos. En el Apéndice A se pueden consultar los elementos básicos que se consideran en el campo del mantenimiento y diseño de sistemas automáticos de prevención y detección de fallas.

Dentro de las fallas que se busca diagnosticar con mayor interés en una red de ductos está el de las fugas. Esto se debe a que cuando éstas ocurren en lugares aislados y de difícil acceso, la detección es posible hasta que el efecto de ellas es de gran magnitud. Además no solamente se busca identificar la ocurrencia de éstas, sino también su ubicación para poder repararla de

inmediato. El mantenimiento periódico para el diagnóstico es necesario y se lleva a cabo en los grandes ductos, como medida preventiva, pero esto no es suficiente. Además, este tipo de tarea requiere suspender la operación del ducto, por lo que no puede hacerse frecuentemente; para ello, se aprovechan normalmente periodos de baja productividad y demanda. Así que, el monitoreo resulta muy costoso y sumamente complicado en tuberías de difícil acceso.

Por otro lado, las nuevas tecnologías digitales y de comunicación han hecho factible monitorear la red de forma continua con *software* específico, junto con sensores instalados a lo largo de la red. Para ello se deben considerar los efectos en el comportamiento del fluido ante un derrame o pérdida de flujo.

Colombo *et al.* (2009) presentan una revisión del estado del arte en materia de métodos de detección de fugas basados en el comportamiento transitorio del fluido, donde se analizan varios resultados prácticos, ventajas y desventajas de las principales técnicas actuales, así como los retos que se tienen para la validación experimental de las diversas metodologías existentes. Sin embargo, esta revisión está enfocada a la comunidad de Ingeniería Hidráulica e ignora muchos resultados teóricos ya conocidos en materia de detección y diagnóstico de fallas. Adicionalmente, los métodos reportados no pueden ser aplicados en flujos compresibles.

1.3.1 Diagnóstico por *software*

Las bases para el diseño de métodos de diagnóstico para las fugas en ductos, son: la teoría de dinámica de fluidos descrita para fluidos monofásicos en Chaudhry (2014) y Wylie y Streeter (1978), y la teoría de FDI de procesos dinámicos, introducida por Chen y Patton (1999) e Isermann (2006b). Actualmente existen diversas propuestas de diagnóstico para diversos escenarios de fugas en condiciones del fluido. En general, existen diversas propuestas cuando se consideran medibles el flujo y la presión en ciertos puntos del ducto.

1.3.1.1 Detección vía balance de masa.

El principio de balance de masa es una de las herramientas más utilizadas en la industria para tareas de monitoreo en ductos, debido a que puede llevarse a cabo sin suspender la operación de la red sin involucrar costos adicionales de instrumentación y/o adquisición de datos (Scott y Barrufet, 2003). Otra ventaja es su aplicabilidad en ductos subterráneos y submarinos. El procedimiento se implementa con ayuda del sistema SCADA. Así, los datos del flujo volumétrico suministrado y entregado permiten estimar pérdidas de acuerdo con las condiciones normales de operación del ducto y de la precisión de la instrumentación que se tenga. En este sentido, si solamente se está interesado en el problema de detección de fugas, una manera simple de

realizar esta tarea en un ducto sin extracciones, es mediante el cálculo del residuo base

$$r_1(t) = Q_{in}(t) - Q_{out}(t), \quad (1.1)$$

donde $Q_{in}(t)$ y $Q_{out}(t)$ son los caudales de entrada y salida del ducto, respectivamente, el cual debe ser igual a cero, si la tubería se asume en estado permanente y está libre de fugas. De este modo, la presencia de una condición anormal estaría simplemente indicada cuando el residuo $r_1(t)$ satisface la condición

$$r_1(t) > \rho_1 \quad (1.2)$$

donde ρ_1 es un valor ajustado experimentalmente de acuerdo al ruido y sesgo que tenga el residuo. En un escenario real, aún si el ducto está libre de fugas, no siempre es posible garantizar que la diferencia de las mediciones sean exactamente cero en condiciones normales de operación. Esto se debe a que la variabilidad del flujo, el ruido en los sensores y los cambios de punto de operación del sistema, afectan entre otros la evaluación del residuo $r_1(t)$.

Un residuo generalizado a partir del residuo base (1.1) muy usado en la práctica, es el volumen del fluido perdido a través de la fuga durante cierto intervalo T , es decir

$$r_2(t) = \int_0^T r_1(t) dt > \rho_2, \quad (1.3)$$

donde el valor de ρ_2 es ajustado de acuerdo con un porcentaje de pérdida significativo con respecto al flujo nominal del ducto por unidad de tiempo.

Es preciso resaltar que los residuos $r_1(t)$ y $r_2(t)$, resuelven solamente la tarea de detección de un evento anormal o fuga; sin embargo, la tarea de localización es también importante y es tema central de este trabajo. El problema de la localización se aborda considerando que se dispone de la descripción matemática del modelo del fluido en un ducto, en el cual la presencia de una fuga introduce dos variables que deben ser estimadas, esto es, la posición y el gasto asociados a la fuga.

El problema de una sola fuga en un ducto horizontal con flujo monofásico y sin tomas laterales ha sido resuelto en teoría con diferentes herramientas, sin embargo, la consideración de una extracción fija con gasto conocido genera un mayor número de variables a estimar y resulta de especial interés al tratarse de un escenario industrial común en redes.

Algunos métodos de diagnóstico de fugas usan datos o modelos cualitativos en los que se convierten los datos numéricos en símbolos o en tendencias y se analizan con sistemas expertos. Este tipo de sistemas forman parte del campo de conocimiento de inteligencia artificial, los cuales no se contemplan para este proyecto de investigación.

La comunidad de control ha abordado la tarea de detección de fugas empleando observadores no lineales para generar los residuos y en algunos casos los propios observadores estiman los parámetros asociados a las fugas. Considerando que se cuenta con modelos del fluido, datos de gasto y presión en los extremos del ducto, para el caso de una fuga sin ramales, se han reportado varios métodos que se describen a continuación para contextualizar la contribución de este trabajo.

- Ashton *et al.* (1998) resuelven únicamente la tarea de detección para fluidos no laminares mediante un observador no lineal, probando el desempeño del método sólo para condiciones de fugas simuladas.
- Billman y Isermann (1987) fueron unos de los expertos del área de control que se dieron a la tarea de desarrollar localizadores por *software*, en donde se emplea un observador de estado no lineal en lazo abierto, así como una técnica especial de correlación para detectar y localizar fugas pequeñas en un ducto. Además proponen la estimación en línea del coeficiente de fricción, aunque la tarea de localización con el método propuesto es muy sensible ante incertidumbres. A pesar de reportar el problema de la variabilidad del coeficiente de fricción antes fugas desde los años ochenta, poco se ha avanzado para robustecer el desempeño de los localizadores ante la fricción.
- Kowalczyk y Gunawickrama (2000) proponen un modelo más completo del fluido, aplicando el método de características para resolver las ecuaciones diferenciales parciales del fluido en presencia de fuga. Una desventaja del método es que requiere mediciones adicionales a las de los extremos en el ducto.
- D. Shields y Daley (2001) reportan un generador de residuos o señales detectoras de fugas usando observadores basados en un modelo no lineal del fluido, aunque sin justificación alguna, en dicho trabajo se considera que se tienen mediciones intermedias a lo largo del ducto. El requerimiento de sensores adicionales para obtener dichas mediciones afecta la viabilidad del método en la práctica.
- En Torres *et al.* (2008), se utiliza el método de colocación ortogonal para describir el comportamiento del fluido y se diseña un filtro de Kalman extendido, agregando la posición y magnitud de la fuga como estados desconocidos, probando la utilidad del método propuesto solamente con fugas simuladas.
- Begovich *et al.* (2012) consideran de nuevo el trabajo de Billman y Isermann (1987) haciendo énfasis en la estimación adaptable del coeficiente de fricción. Las pruebas se

realizan en un prototipo de plástico de un ducto de transporte de agua. En este trabajo se resalta la importancia de la calibración y resolución de sensores para la implementación industrial de algoritmos de detección y localización de fugas.

- En el primer trabajo de Verde (2001) se presenta un método basado en observadores con entradas desconocidas, capaz de detectar dos fugas simultáneas con posiciones fijas, considerando un modelo lineal del fluido. Sin embargo, ante comportamientos no lineales severos del ruido; la generación de residuos se realiza con poca precisión. Una desventaja de la propuesta es que este procedimiento no puede ser extendido al caso no lineal. Así, este trabajo deja claro que el problema de múltiples fugas debe ser abordado en un contexto no lineal.

A partir de 2000, el escenario de múltiples fugas ha sido estudiado. Sin embargo, por primera vez en el trabajo de Verde *et al.* (2003) se reporta la ausencia de factibilidad de localizar las posiciones de dos fugas con comportamientos estáticos. Resultados de interés y relacionados con la problemática de múltiples fugas en un ducto se describen a continuación.

- La extensión al trabajo reportado en la referencia de Verde (2001), utilizando un modelo no lineal del fluido con posiciones fijas, se diseña un banco de observadores para la generación de residuos sensibles a una fuga e insensibles al resto, aunque el método aplicado no es robusto a incertidumbres en la posición, por lo que sólo se puede aplicar a FDI en casos muy limitados (Verde y Visairo, 2001).
- En el trabajo presentado por Verde (2002a), se propone un método para generar, a partir de un modelo Hessenberg, un conjunto de sistemas desacoplados de una falla y sensibles al resto, el cual puede emplearse para generar los residuos vía observadores no lineales. Sin embargo, el problema de desacoplamiento requiere la estimación de las derivadas de los gastos, lo cual hace poco factible la aplicación para un sistema de redes.
- Verde (2004) intenta resolver el problema de múltiples fugas 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 detección y aislamiento con múltiples fugas se aborda también en el trabajo de Visairo (2004) empleando herramientas geométricas relacionadas con la observabilidad de un sistema dinámico. Se muestra que no existe una solución general al problema de

detección y localización de múltiples fugas en un ducto con sólo mediciones de gasto y presión en sus extremos para toda entrada de control u , y en particular, sólo dos fugas se pueden detectar con posiciones fijas asumidas de antemano.

- El primer método reportado para resolver el problema de dos fugas es presentado por Verde *et al.* (2007) a través de la identificación de dos fugas en una tubería presurizada donde tanto el comportamiento estático, como el transitorio del fluido en condiciones de fallas son empleados para identificar los parámetros asociados a las fugas. Eso sin el requerimiento de perturbación del sistema. El método se basa en una familia de modelos no lineales de parámetros concentrados con el mismo comportamiento en estado estacionario en condición de fugas y parametrizado en términos de un parámetro desconocido asumiendo mediciones de gasto y presión sólo en los extremos del ducto. La aportación principal del método es la selección automática de una familia específica de modelos a identificar usando la condición de estado estacionario producida por las fugas, lo cual reduce el tiempo de búsqueda y el número de parámetros desconocidos, simplificando la minimización del error entre el modelo y los datos medidos. Un trabajo similar al propuesto por Verde *et al.* (2007) se presenta en Torres (2011), donde se define una clase observadores no lineales para sistemas uniformemente observables, que combina las propiedades de un observador de alta ganancia con las del filtro de Kalman extendido, lo cual permite resolver el problema de la detección en tiempo real de múltiples fallas simultáneas sin requerimientos de perturbación de válvulas, aunque los resultados experimentales presentados carecen de robustez respecto a los puntos de operación.
- El problema de múltiples fugas se aborda en Jiménez y Verde (2012), buscando los efectos de las fugas en la respuesta frecuencial. 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 en 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. Además, se debe considerar un modelo de alta dimensión para el fluido.
- Tulio y Verde (2013) reportan condiciones necesarias y suficientes para la estimación del gasto y posición de una fuga, aunque para el caso de dos fugas sólo pueden estimarse los gastos si se asumen conocidas las posiciones de las mismas. En este trabajo la reconstrucción para una y dos fugas se lleva a cabo con observadores de modos deslizantes.
- Verde *et al.* (2014) identifican dos fallas fuera de línea, a partir de un modelo transitorio

parametrizado, que aprovecha la equivalencia en estado estacionario de los parámetros de una fuga con los de dos fugas, reduciendo el número de parámetros desconocidos. El tiempo de cálculo fuera de línea se reduce debido a limitaciones físicas de los parámetros desconocidos, aunque se precisa analizar el efecto del periodo de muestreo y la sensibilidad de la instrumentación previo a su implementación industrial.

Pese a la cantidad de resultados existentes en materia de detección y aislamiento de fugas en ductos, la mayoría de los trabajos reportados en el ambiente académico abordan el problema considerando que:

- la tubería es horizontal y,
- no se tienen tomas laterales en la misma.

Estas condiciones no son realistas, pues variaciones en la inclinación y tomas laterales (o extracciones como se conocen de forma coloquial) están presentes prácticamente en cualquier ducto.

1.4 Objetivo del trabajo

La aplicación de FDI al transporte de fluidos mediante ductos, que contempla escenarios industriales comunes como tomas laterales y diversos perfiles de elevación, aún es un tema que presenta retos importantes para su implementación en tiempo real. Esto representó una motivación para el trabajo que aquí se presenta, cuyo objetivo principal está enfocado al diseño y a la validación experimental de un sistema para la detección y localización de fugas en ductos, a partir de un modelo matemático del fluido considerando:

- ductos con topologías complejas, es decir, con diferentes perfiles de elevación, y,
- ductos con tomas laterales intermedias.

Una característica de gran importancia es que el sistema de detección y localización que se busca desarrollar, deberá ser no invasivo, es decir, se supone que los sensores no alteran el comportamiento del flujo ya que se cuenta con mediciones de gasto y presión en los extremos del ducto, así como de la posición y gasto de la toma lateral.

De manera específica, la solución que se busca desarrollar involucra la realización de las tareas básicas siguientes:

- Clarificar el uso del llamado cabezal piezométrico para el modelado de un ducto con diversos perfiles de elevación.

- Obtener un modelo general que represente el escenario de una fuga en un ducto con tomas laterales, con mediciones en los extremos y en la toma.
- Aislar los dos posibles casos de fuga (aguas arriba y aguas abajo de la toma lateral) y generar residuos que indiquen la posición relativa de la misma con respecto a la toma.
- Una vez conocida la posición relativa de la fuga, se debe estimar de forma más precisa la posición de la misma, a partir del método seleccionado.
- Validar experimentalmente el sistema de detección-localización con datos generados en la planta piloto del IINGEN-UNAM.

1.5 Contribución y resultados

En este trabajo de tesis, se presenta un esquema de detección y localización de fugas en un ducto de transporte de líquidos mediante métodos no intrusivos. Particularmente, se analiza la ocurrencia de extracciones simultáneas -de una toma lateral con posición y gasto conocidos y de una fuga-, donde se asume que se cuentan con mediciones de gasto y presión en los extremos del ducto. Se evaluaron varios residuos para la tarea de detección, además de que se muestra la posibilidad de explotar el signo de los mismos para conocer la posición relativa de un evento anormal o fuga con respecto a la extracción fija.

En un primer enfoque, se obtiene información de la relación entre el cabezal de presión y la variable piezométrica de un fluido, la cual se utiliza para obtener una expresión estática generalizada que representa la posición de una extracción en una tubería con geometría compleja (diversos perfiles de elevación). Un análisis de sensibilidad para dicha expresión, muestra que la presencia de una segunda extracción origina desviaciones en la estimación de la primera. El sentido de estas desviaciones indica invariablemente la posición relativa de esta última extracción con respecto a la primera. Además, se deducen dos relaciones estáticas que representan, según sea el caso (aguas arriba o aguas abajo), una localización más precisa de la segunda extracción o fuga.

Por otro lado, bajo un segundo enfoque, usando modelos dinámicos del fluido, se diseñaron observadores no lineales que resuelven ambas tareas (detección y localización) y resultan menos sensibles ante cambios de punto de operación de la tubería, lo cual es de gran utilidad para evitar falsas alarmas ante su eventual implementación en tiempo real.

La utilidad de la metodología planteada se ilustra mediante pruebas simuladas y experimentales en la planta piloto del Instituto de Ingeniería-UNAM. Se hace notar que el error máximo en la localización de la fuga obtenido con datos experimentales fue de 4 %.

Como una extensión al trabajo sobre fugas con ramales aquí presentado, actualmente se está desarrollando un método de diagnóstico de múltiples fugas secuenciales con ramales, haciendo uso del modelo de equivalencia entre una y múltiples fugas en estado permanente (Verde y Rojas, 2017). Por otro lado, el modelo del fluido propuesto en el Capítulo 2 puede ser extendido para el escenario frecuente en redes de ductos con múltiples ramales fijos de un ducto cuando se conocen los flujos y presiones en dichos ramales. Esta línea de trabajo se sigue abordando por el grupo de trabajo del Instituto de Ingeniería-UNAM.

Por tanto, la presente tesis es un esfuerzo por profundizar en el estudio del diagnóstico de fallas y su aplicación al monitoreo y supervisión de ductos, considerando escenarios industriales de interés, tales como el uso del cabezal piezométrico para simplificar el análisis de un ducto con diversos perfiles de elevación, así como la detección y localización de fugas en ductos con extracciones fijas, cuya posición se conoce.

1.6 Organización de la tesis

La presentación de la tesis está organizada de la siguiente forma. En el Capítulo 1 se presenta el estado del arte en materia de diagnóstico de fallas, definiendo los conceptos fundamentales del campo de seguridad de procesos, mencionando las principales contribuciones que han aportado recientemente considerando datos de presiones y gastos en los extremos del ducto. Además, se presentan las generalidades del enfoque industrial para analizar la integridad de ductos; las diferentes formas de realizar un diagnóstico y se presentan los resultados más importantes en materia de detección y localización de fugas, los cuales justifican la realización de este trabajo. Al término del capítulo se puntualizan los objetivos marcados en el estudio y se resalta la contribución junto con los resultados del mismo.

En el Capítulo 2 se presentan los modelos matemáticos del fluido en un ducto. Se utiliza la réplica de una tubería real de Pemex para ilustrar la importancia del uso del cabezal piezométrico y se presentan los modelos en presencia de fugas, de acuerdo con los escenarios que se abordan en el trabajo, definiendo también la metodología que se utilizó para la aproximación de la solución de dichos modelos. Al término de este capítulo, se detallan las especificaciones de las

instalaciones en las que se realizó la validación experimental de los resultados aquí presentados.

Los primeros resultados importantes se presentan en el Capítulo 3 donde, basados en modelos estáticos del fluido, se propone un esquema para la detección y localización de una fuga en un ducto con una toma lateral cuya ubicación está fija. Este escenario origina la posibilidad de que dicha fuga se ubique aguas arriba o aguas abajo de la extracción, generando la necesidad del algoritmo propuesto. Al término del capítulo se ilustran las pruebas realizadas tanto con datos sintéticos como experimentales, validando así que su aplicación es realizable.

La principal aportación del trabajo se presenta en el Capítulo 4, donde se aborda con una nueva formulación el problema de la detección de fugas, dividiendo el problema de identificación de fallas mediante el análisis de dos subsistemas que representan los escenarios de fuga contemplados (aguas arriba y aguas abajo de la toma lateral). Estos subsistemas se diseñan con la importante propiedad de aislamiento con respecto a una posible fuga y sensibles con respecto a la otra, lo que permitió resolver la tarea de identificación mediante la generación de residuos. Dichos residuos se generan a partir de observadores no lineales del tipo Observador de Gran Ganancia y Filtro de Kalman Extendido. El uso de los residuos dinámicos, tanto para seleccionar la región de fuga, como para la localización precisa de la misma, es una aportación novedosa en el problema de la localización de fugas en ducto. Al término del capítulo se presenta una colección de los resultados más importantes, contemplando escenarios de interés industrial, tales como: cambios de punto de operación, diversas posiciones de fuga y variaciones en el tamaño de la misma. En el Capítulo 5 se resaltan las conclusiones y perspectivas del trabajo de investigación realizado, puntualizando las tareas que resultan de interés en la continuidad de este estudio.

2 Modelos del fluido

Este capítulo está dedicado a describir los modelos y consideraciones físicas de la planta piloto que se emplean en el desarrollo y validación de los algoritmos de detección y localización de fugas de este trabajo. El punto de partida es el conjunto de ecuaciones diferenciales parciales (PDE, por sus siglas en inglés) que describen el comportamiento de un fluido en una dimensión. En dicho modelo se considera que las condiciones de frontera son las presiones en los extremos del ducto. Para simplificar el manejo del modelo, se presenta la transformación que permite manejar el fluido con una topología compleja como un ducto recto a través de la variable piezométrica. Además, se especifican los escenarios de fallas junto con los modelos aproximados respectivos. Finalmente se describen las características y parámetros del modelo físico piloto de laboratorio que permite, por un lado generar datos sintéticos en los simuladores, y por otro, obtener datos reales en condiciones normales y anormales, vía el propio sistema SCADA de la instalación piloto.

2.1 Modelo por secciones del ducto

Considerando que se desea abordar de forma sistemática el problema de localizar fugas con modelos analíticos, se requiere como punto de partida disponer de la descripción del fluido en el ducto en condiciones normales y cuando están presentes escenarios anormales. Así, asumiendo el movimiento del fluido en una dimensión, las ecuaciones de momento y continuidad en una sección i de un total de n de un conducto cerrado, están descritas por las PDE del tipo hiperbólicas

$$\frac{\partial Q_i(z_i, t)}{\partial t} + gA_i \frac{\partial \tilde{H}_i(z_i, t)}{\partial z_i} + \frac{f_i Q_i(z_i, t) |Q_i(z_i, t)|}{2D^i A_i} + g \sin \alpha_i = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \tilde{H}_i(z_i, t)}{\partial t} + \frac{b^2}{gA_i} \frac{\partial Q_i(z_i, t)}{\partial z_i} = 0 \quad (2.2)$$

tomadas de Chaudhry (2014). En este modelo, el tiempo t , y la coordenada espacial para cada sección z_i , representan las variables independientes, los gastos $Q_i(z_i, t)$ y el cabezal de presión

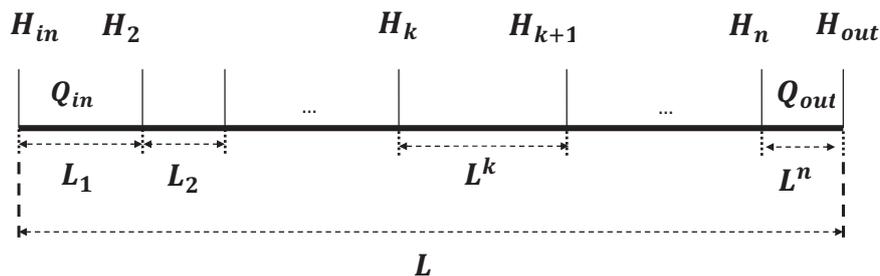


Fig. 2.1 Descripción de las variables en un ducto con n secciones considerando las presiones como variables exógenas.

$\tilde{H}_i(z_i, t)$ son las variables dependientes en cada sección. El superíndice i denota la sección del ducto en cuestión y el ángulo α_i caracteriza la pendiente de la sección i del ducto. La descripción del resto de los parámetros del modelo se incluye en la Tabla B.1 del Apéndice A. Esto es con el objeto de enfocar el capítulo a los aspectos importantes de los modelos para formular la tarea de FDI. Se hace notar, que este modelo es válido para fluidos incompresibles o ligeramente compresibles y se asume que cambios en la velocidad del fluido por convección son despreciables y corresponden a las propiedades hidráulicas del ducto piloto. En este modelo, la no linealidad se debe al término de fricción, donde el parámetro f_i es constante solamente para fluidos completamente turbulentos fluyendo en tuberías rugosas. En ductos con extracciones y fugas, debido a la diferencia de flujos a la largo de una sección i , no siempre es posible considerar que el factor de fricción de f_i es constante. Además el envejecimiento de los ductos provoca incertidumbre en dicho parámetro aún sin extracciones.

Recientemente, Verde y Rojas (2017) presentan un análisis sobre los errores provocados al considerar f_i como un factor constante en el problema de diagnóstico de fugas. Así, los modelos considerados en este trabajo pueden ser aplicados solamente a fallas donde el número de Reynolds permanece constante, a pesar de la presencia de fugas y extracciones. Es decir, fugas pequeñas y extracciones con bajo porcentaje del gasto nominal y flujos completamente turbulentos.

La Fig. 2.1 muestra la descripción de las variables del ducto con n secciones, donde la longitud $L = \sum L_i$.

2.2 Transformación de cabezal de presión a cabezal piezométrico

Con objeto de simplificar el manejo de las ecs. 2.1 y 2.2 en el caso de una red con topografía compleja, se propone transformar el cabezal de presión a lo largo de todo el ducto. Este cambio de variable permite el manejo de un ducto con geometría compleja de manera transparente como si fuera un ducto horizontal.

De acuerdo con los reportes de Saldarriaga (2003) y Bansal (2005), el cabezal de presión está descrito por

$$\tilde{H}_i(z_i) = \frac{P_i(z_i)}{\rho g} \quad (2.3)$$

y puede ser representada en términos de una variable piezométrica denotada $H_i(z_i)$, la cual depende de un valor de referencia arbitrario h . En el caso de un ducto con topografía no uniforme, se puede usar la altura del ducto sobre el nivel del mar del ducto como referencia. Así, la variable piezométrica dada en unidades de metros de columna de agua (*mca*), se reduce a la relación lineal

$$H(z_i) = \tilde{H}_i(z_i) + h(z_i) \quad (2.4)$$

Debido a que la ec. 2.4 es una transformación independiente del tiempo, se puede analizar el comportamiento de la variable piezométrica en las ecs. 2.1 y 2.2 considerando el estado estacionario. Por tanto, asumiendo

$$\frac{\partial H_i(z_i, t)}{\partial t} = 0, \quad \text{y} \quad \frac{\partial Q_i(z_i, t)}{\partial z_i} = 0 \quad (2.5)$$

la ec. 2.1 se reduce a la ecuación diferencial ordinaria

$$\frac{dH_i(z_i)}{dz_i} + \frac{f^i Q_i |Q_i|}{2D_i(A_i)^2 g} = 0 \quad (2.6)$$

la cual puede ser reescrita como

$$\frac{dH_i(z_i)}{dz_i} + \mu_{i_g} Q_i |Q_i| = 0, \quad (2.7)$$

con el parámetro asociado a la fricción

$$\mu_{i_g} = \frac{f^i}{2D_i(A_i)^2 g}. \quad (2.8)$$

Así, la solución analítica de la ec. 2.7 está dada por

$$H_i(z_i) = -\mu_{i_g} Q_i |Q_i| z_i + H_i(0) \quad \text{para} \quad 0 \leq z_i \leq L_i \quad (2.9)$$

y corresponde con la variable piezométrica a lo largo de todo el ducto con $H_i(0)$ la condición de frontera en el extremo aguas arriba de la sección i . Si no hay ningun componente (bomba, válvula, codo, etc.) entre las secciones, las condiciones de frontera para cada sección i se reducen a

$$H_i(z_i = 0) := H_{in_i} \quad H_i(z_i = L_i) := H_{out_i}. \quad (2.10)$$

en términos de las presiones en los extremos de cada sección. Reemplazando estas condiciones en la ec. 2.9, se obtiene

$$H_{in_i} - H_{out_i} = \mu_{i_g} Q_i |Q_i| L_i, \quad (2.11)$$

lo cual quiere decir que la diferencia del cabezal piezométrico en los extremos de la sección i se describe por

$$H_{in_i} - H_{out_i} - \mu_{i_g} Q_i |Q_i| L_i = 0 \quad (2.12)$$

o como diferencia de presión en

$$\Delta H_i = \mu_{i_g} Q_i |Q_i| L_i \quad (2.13)$$

Está ecuación corresponde a la relación reportada por Cayetano (2016) para el cálculo de la *fricción de Darcy-Weisbach*, donde ΔH_i representa la pérdida energética en un ducto de longitud L_i con un gasto Q_i .

Si se considera un ducto con diámetro uniforme, a partir del modelo de la ec. 2.12, se obtiene

$$H_{in_1} - H_{out_n} - \sum_{i=1}^n L_i \mu_{i_g} Q_i |Q_i| = 0 \quad (2.14)$$

y corresponde al modelo estático de la variable piezométrica a lo largo de un ducto general de n secciones sin tomas laterales.

Cabe hacer notar que si los flujos en las secciones no son iguales debido a la presencia de extracciones, tomas laterales o material incrustado en el ducto, es necesario parametrizar al parámetro f_i en función del gasto Q_i de cada sección.

2.2.1 Ejemplo

Para ejemplificar la diferencia del comportamiento del cabezal de presión y la piezométrica, se consideró un ducto transportador de gas líquido (LPG) con el perfil topográfico no constante mostrado en la Fig. 2.2¹. Se nota la aproximación de los perfiles de elevación por rectas entre los puntos de medición (A, B, C, D, E, F, G).

¹Datos suministrados por PEMEX dentro del marco del proyecto SENER-CONACYT *Sistema de detección de fugas y tomas clandestinas en ductos de transporte de gas y líquidos*

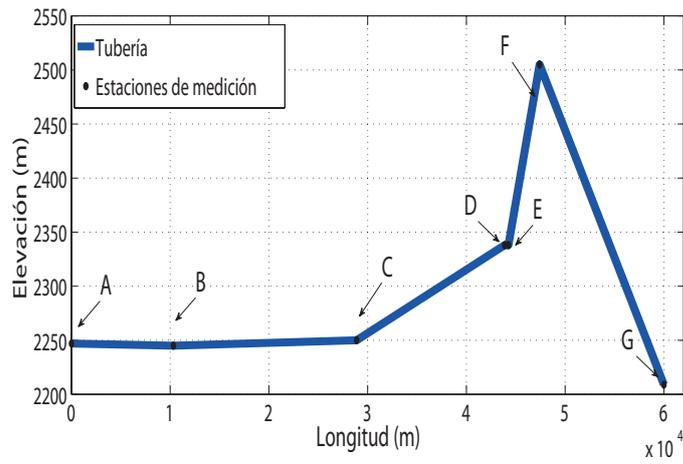


Fig. 2.2 Perfil topográfico de una tubería de gas LPG de 60 [km]

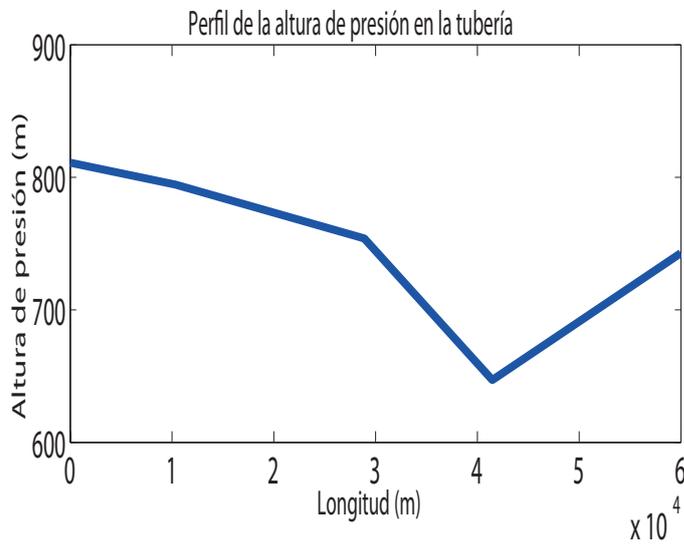


Fig. 2.3 Perfil de la altura de presión

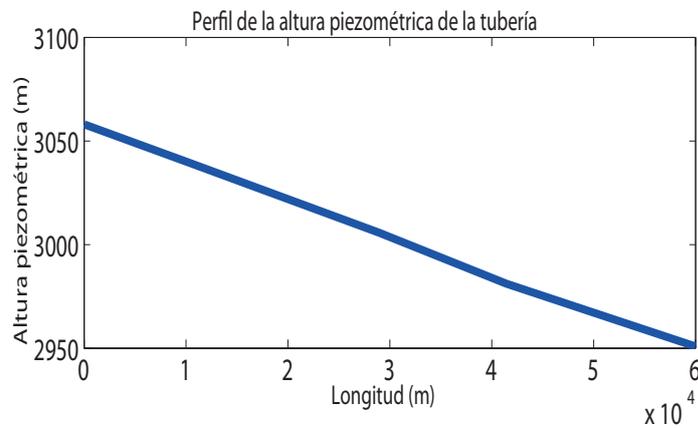


Fig. 2.4 Perfil de presión de una tubería de gas LPG

Se consideraron las mediciones del cabezal de presión $\tilde{H}(z)$ en las estaciones del ducto mostradas en la Fig. 2.3. Estas mediciones fueron registradas en condiciones normales de ducto y tomadas del sistema SCADA. Al aplicar la transformación 2.4 con la referencia asociada a la elevación sobre el nivel del mar del ducto se determina el perfil piezométrico $H(z)$ a lo largo del ducto. La descripción de $H(z)$ en función de la distancia al punto de origen del ducto se muestra en la Fig. 2.4. Se observa la uniformidad en la variable, similar al perfil de presión de una tubería horizontal. En consecuencia, la simple transformación de coordenadas 2.4 permite el manejo de una tubería con diversos perfiles de elevación como una tubería horizontal. En todos los modelos considerados en este trabajo se asume que la variable piezométrica y por tanto el término que depende del ángulo α_i en la ec. 2.1 se cancela. Este hecho no afecta el comportamiento de los localizadores; sin embargo, se requiere conocer el perfil topográfico del ducto, propiedad que no siempre está disponible en una instalación real.

2.3 Modelo con escenario de fugas

Se consideró la configuración hidráulica del ducto ilustrado en la Fig. 2.5, donde el sistema está formado por dos tanques conectados en los extremos del ducto, dos orificios y un ramal localizados en puntos arbitrarios. Este sistema permite describir los diversos escenarios del caso de estudio a tratar a lo largo de este trabajo. Es decir, se desea localizar la presencia de una fuga antes o después del ramal ubicado a una distancia z_b del tanque T_1 conectado en el extremo aguas arriba del ducto.

De acuerdo con Wylie y Streeter (1978), cualquier componente conectado a un ducto, sea válvula, bomba, toma lateral o fuga, por mencionar algunas, rompe la continuidad de las variables Q_i y H_i , en consecuencia, el modelo global del fluido se debe integrar por parejas de PDE del tipo de las ecs. 2.1 y 2.2, con las condiciones de frontera específicas y matrices de transferencia respectivas para cada componente. Por tanto, para obtener el modelo global del sistema de estudio de la Fig. 2.5 se deben conectar los siguientes componentes del caso de estudio:

- Cuatro secciones de longitud L_i para $i = 1, 2, 3, 4$, cuyo flujo está descrito por la pareja de PDE

$$\frac{\partial Q_i(z_i, t)}{\partial t} + a_1 \frac{\partial H_i(z_i, t)}{\partial z_i} + \mu_i Q_i(z_i, t) |Q_i(z_i, t)| = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial H_i(z_i, t)}{\partial t} + a_2 \frac{\partial Q_i(z_i, t)}{\partial z_i} = 0 \quad (2.16)$$

con $a_1 = gA$, $a_2 = \frac{b^2}{gA}$, $\mu_i = \frac{f_i}{2DA}$, donde b es la velocidad de la onda de presión en el fluido, g es la aceleración de la gravedad y f_i es el factor de fricción de Darcy-Weichbach.

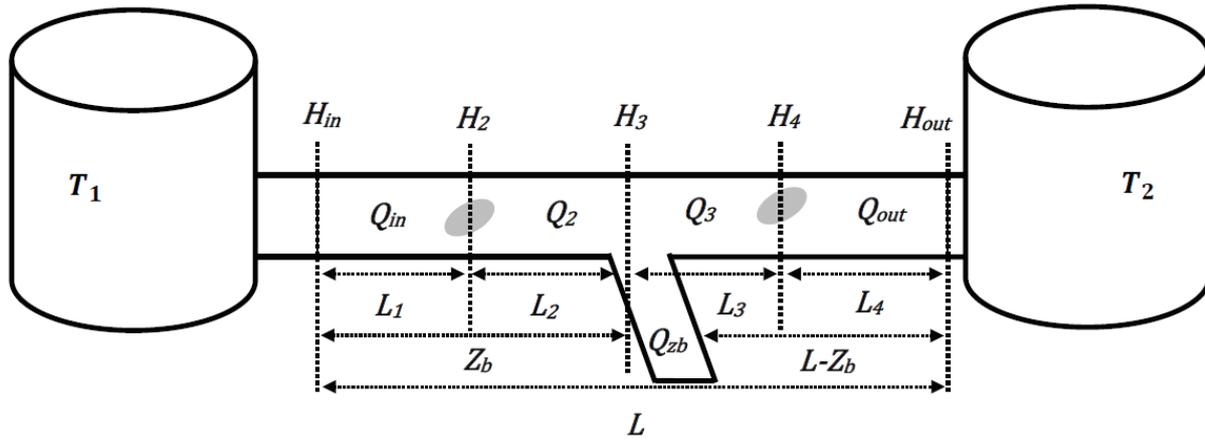


Fig. 2.5 Configuración hidráulica con un ramal en z_b , fugas en posiciones $z^u = L_1$ y $z^d = L - L_4$, y tanques T_1 y T_2 conectados en los extremos de la línea.

Las condiciones de frontera en cada sección corresponden a las variables piezométricas y el modelo respectivo se esquematiza como el cuadripolo no lineal mostrado en la Fig. 2.6.



Fig. 2.6 Cuadripolo asociado a las PDE 2.15 y 2.16 de la sección i de longitud L_i con condiciones de frontera $H_i(0, t)$ y $H_i(L_i, t)$

- Dos puntos geométricos a las distancias $z_u = L_1$ y $z_d = L - L_4$ del tanque aguas arriba asociados con los orificios y flujos de salida

$$\begin{aligned} Q_u(t) &= \lambda_u \sqrt{H_2(t)} \\ Q_d(t) &= \lambda_d \sqrt{H_4(t)} \end{aligned}$$

respectivos; los parámetros λ_u y λ_d dependen del tamaño y geometría del orificio. De acuerdo con Chaudhry (2014), se puede despreciar la caída de presión justo antes y después del orificio, por tanto, el operador matricial del componente fuga se describe por

$$\begin{pmatrix} Q(L_j + \epsilon, t) \\ H_{j+1}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-\lambda_o}{\sqrt{H_{j+1}(t)}} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q(L_j - \epsilon, t) \\ H_{j+1}(t) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

donde ϵ es una distancia infinitesimal y la pareja de subíndices (j, o) se define como $(1, u)$ para la fuga aguas arriba y $(3, d)$ para la de aguas abajo.

- Un punto geométrico asociado al ramal de la Fig. 2.7 a una distancia $z_b = L_1 + L_2$. El modelo estático de este componente, referenciado con respecto al tanque T_1 , está caracterizado por las ecuaciones

$$0 = Q_{b1} - Q_{b2} - Q_{b3}, \quad (2.18)$$

$$H_{b2} = H_{b1} + \kappa_{12}(H_{b2}, H_{b1}), \quad (2.19)$$

$$H_{b3} = H_{b1} + \kappa_{13}(H_{b3}, H_{b1}) \quad (2.20)$$

donde las funciones $\kappa_{1\eta}(\cdot, \cdot)$ con $\eta = 2, 3$ se determinan en función de las pérdidas causadas por fricción y cambio en la dirección del flujo. El ajuste de dichas funciones se llevó a cabo en el caso de estudio considerando el ducto con la topografía del ducto de gas LPG de la Fig. 2.2 y usando el paquete comercial de simulación Pipeline Studio (2013). Los resultados del estudio verifican el resultado reportado por Chaudhry (2014) respecto a la ecuación para el cabezal total, es decir, $H_{b1} = H_{b2} = H_{b3}$, permitiendo despreciar los términos de pérdida de cabezal piezométrico en el ramal, así que el cuadripolo del ramal tiene un flujo exógeno que no depende de la presión en el punto de dicho ramal.

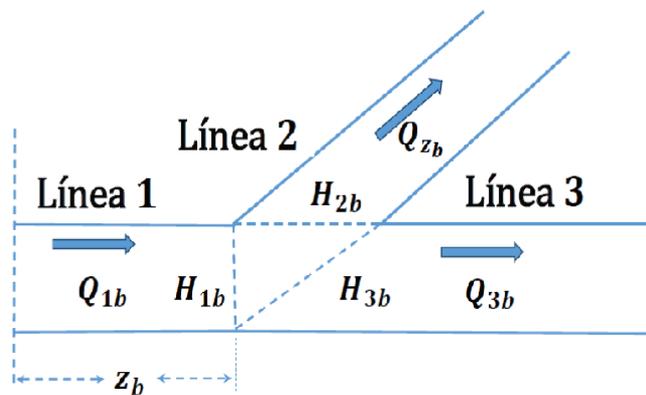


Fig. 2.7 Descripción de las variables involucradas en el punto z_b del ramal considerando la misma área de sección transversal de los ductos primarios $A_1 = A_3$.

Interconectando los componentes arriba escritos, se obtiene el diagrama de cuadripolos de la Fig. 2.8, donde los bloques TFu y TFd corresponden a los bloques asociados a las fugas. Así, el modelo del fluido está formada por siete PDE acopladas que caracterizan las propiedades dinámicas de fluido. Este diagrama permite visualizar que la detectabilidad e identificabilidad

de las fugas es función de los puntos donde se registren los flujos y presiones a lo largo del ducto. Verde (2002b) presentó un estudio usando análisis estructural y la forma Hessenberg del modelo y demuestra la imposibilidad de detectar las fugas si no se conoce el flujo del ramal Q_b y su posición z_b .

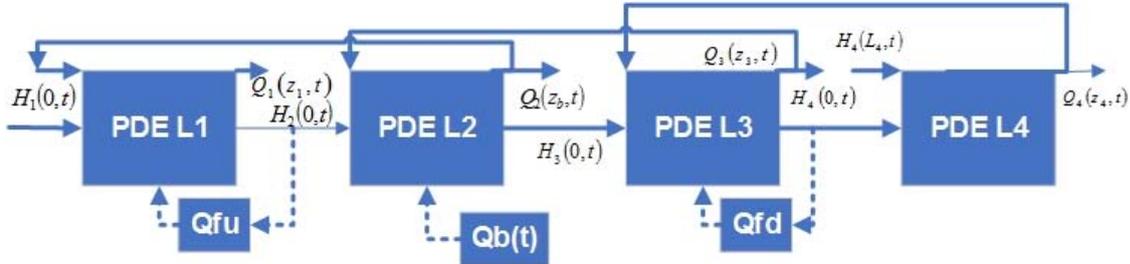


Fig. 2.8 Diagrama general del modelo con modelos de cuadripolos.

Debido a que se busca un modelo analítico simple que permita formular el problema de localización de fugas, se aproxima cada pareja de PDE por una descripción de estado de dimensión finita, manteniendo la no linealidad debida al término de fricción f_i .

Al respecto, pueden usarse diversos métodos de aproximación para representar las PDE del sistema. Se hace notar, que solamente cuando se consideran señales auxiliares discontinuas adicionales para el diagnóstico, la discretización espacial de las PDE es importante y la condición de Courant no es suficiente para tener un modelo con estabilidad numérica robusta (Kowalczyk y Tatara, 2017). En las diferentes simulaciones realizadas para el modelo piloto del II, no se ha observado una clara ventaja, desde un punto de vista de FDI, al usar una aproximación espacial de alto orden. Por tanto, empleando el enfoque implícito en el tiempo, las derivadas parciales espaciales pueden aproximarse mediante la siguiente diferencia finita de primer orden (Polyanin y Zaitsev, 2004):

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} \approx \frac{V(z_j, t) - V(z_{j-1}, t)}{\Delta z_j} = \frac{V_j - V_{j+1}}{\Delta z_j} \quad (2.21)$$

donde el espacio de discretización Δz_j corresponde a la longitud de cada sección en el escenario del caso de estudio. Esta discretización tiene como objeto minimizar la dimensión del espacio de estado. Adicionalmente, se hace la simplificación $\frac{\partial V_i(t)}{\partial t} \approx \dot{V}_i$ para las variación temporal de la variable en la i -ésima sección.

Así el modelo aproximado para cada una de los cuadripolos se reduce a

$$\dot{Q}_i = -a_1 \frac{H_i - H_{i+1}}{L_i} - \mu_i Q_i |Q_i| \quad (2.22)$$

$$\dot{H}_{i+1} = -a_2 \frac{Q_i - Q_{i+1} - Q_{\delta_i}}{L_i} \quad (2.23)$$

donde Q_{δ_i} corresponde a los flujos producidos por los orificios para $i = 1, 3$ y al flujo de extracción en el ramal para $i = 2$. Además las condiciones de frontera entre secciones se reducen a

$$\begin{aligned} Q_{in} &= Q_2 + Q_u \\ Q_2 &= Q_3 + Q_{z_b} \\ Q_3 &= Q_{out} + Q_d \end{aligned}$$

De este modo, el modelo de orden mínimo para representar el escenario con dos fugas localizadas a una distancia z_u y z_d del tanque T_1 y con un ramal en el punto z_b , tal que $z_u < z_b < z_d$ se reduce a

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_{in} \\ \dot{H}_2 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{H}_3 \\ \dot{Q}_3 \\ \dot{H}_4 \\ \dot{Q}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 Q_{in} |Q_{in}| + \frac{a_1}{L_1} (H_{in} - H_2) \\ \frac{a_2}{L_1} (Q_{in} - Q_2 - Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u)) \\ -\mu_2 Q_2 |Q_2| + \frac{a_1}{L_2} (H_2 - H_3) \\ \frac{a_2}{L_2} (Q_2 - Q_3 - Q_{z_b}) \\ -\mu_3 Q_3 |Q_3| + \frac{a_1}{L_3} (H_3 - H_4) \\ \frac{a_2}{L_3} (Q_3 - Q_{out} - Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d)) \\ -\mu_4 Q_{out} |Q_{out}| + \frac{a_1}{L_4} (H_4 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

donde las funciones escalón $\mathcal{U}_u(\tau_u)$ y $\mathcal{U}_d(\tau_d)$ caracterizan el instante de tiempo en que presentan las fugas. Además, las posiciones de las fugas están relacionadas con los tamaños de las secciones con $z_u = L_1$ y $z_d = L_1 + L_2 + L_3$. Por otro lado, la posición del ramal y su complemento con respecto a la longitud total L están relacionadas vía

$$z_b = L_1 + L_2; \quad \bar{z}_b = L - z_b = L_3 + L_4. \quad (2.25)$$

Se observa de estas relaciones que las longitudes de las secciones L_2 y L_4 dependen de las longitudes L_1 y L_3 respectivamente para un ramal dado. En estado permanente, el balance de masas del sistema hidráulico satisface

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_{z_b} + Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u) + Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d). \quad (2.26)$$

En consecuencia, si se asumen conocidos el flujo Q_b y su posición de extracción z_b , existen cuatro parámetros desconocidos en el modelo 2.24 asociados a las fugas; dos para la fuga aguas arriba (L_1, Q_u) y dos para la de aguas abajo (L_3, Q_d).

Se demostró que, usando el modelo 2.24 cuando se suponen conocidas las posiciones de una de las fugas, de la extracción y de las variables del fluido en los extremos del ducto, es posible generar un residuo e identificar la pérdida del flujo por el orificio (Negrete y Verde, 2012). Sin

embargo, este hecho es poco realista en la práctica, por lo que se propone solucionar el problema del diagnóstico por etapas asumiendo conocidas solamente las variables

$$\left(Q_{in} \quad Q_{out} \quad H_{in} \quad H_{out} \quad Q_b \right)$$

Para ello, se considera el modelo 2.24 tanto en su versión estática como dinámica como punto de partida para resolver la tarea de identificar los flujos provocados por los orificios y las posiciones respectivas. En este sentido, los algoritmos de diagnóstico propuestos considerando la Ec. 2.24, son la principal contribución del trabajo.

2.4 Modelo físico piloto

La validación experimental del diagnosticador que se propone, se llevó a cabo empleando el ducto piloto que se encuentra en el laboratorio de Hidrodinámica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el cual consta de los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento con capacidad de 10,000 litros.
- Bomba hidráulica impulsada por un motor de 7.5 *HP*.
- Tubería de hierro galvanizado de 0.1016 *m* de diámetro y longitud de 167.72 *m* reales en una configuración de serpentín vertical (véase la Fig. 2.9).
- Seis válvulas para simular fugas (6), cinco de ellas con un diámetro de 0.0254 *m* y una de 0.01905 *m*.
- Tres servoválvulas para sincronizar eventos y fallas en la planta.
- Sensores de flujo y presión en los extremos del ducto y un sensor de flujo ubicado en la cuarta válvula de fuga.
- Módulo de adquisición de datos Beckhoff BK 9000 con conexión *ethernet*.
- Inversor *Mitsubishi* para el control del motor que impulsa a la bomba hidráulica.
- Computadora portátil conectada vía *ethernet* al módulo de adquisición implementado con el paquete de *Labview* de *National Instruments*.

Los parámetros físicos del ducto piloto se describen en la Tabla 2.1.

La Fig. 2.9 muestra una imagen de la planta junto con el plano de la configuración indicando las medidas del serpentín ilustrado. En la entrada y salida del serpentín, se tienen carretes

Tabla 2.1 Parámetros de la planta piloto

Parámetro	Valores
Diámetro D	.1016 m
Densidad del fluido ρ	1000 $\frac{kg}{m^3}$
Coefficiente de fricción f	0.022
Longitud L	167.725 m
Punto del ramal z_b	98.9 m

instrumentados con sensores de presión y flujo, que corresponden a los extremos del ducto. Adicionalmente, se tienen seis puntos intermedios que tienen soldados tubos de una pulgada de diámetro para provocar las fugas con las posiciones equivalentes indicadas en la Tabla 2.2. En cuatro de estos puntos están instaladas válvulas de esfera que regulan el flujo de fuga de forma manual y en las otras dos, se tienen servoválvulas accionadas desde el SCADA, para sincronizar el tiempo de apertura y controlar la magnitud del flujo de fuga.

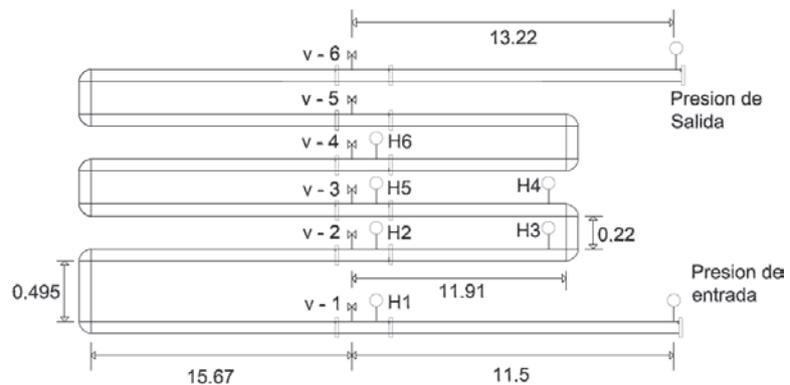


Fig. 2.9 Imagen de la instalación de laboratorio y esquema de las posiciones de las válvulas en el ducto piloto.

Los sensores de flujo basan su funcionamiento en el principio de las fuerzas de Coriolis. Se trata del sensor de flujo *Protomass 83 F* de la compañía *Endress + Hauser*, el cual se ilustra en la Fig. 2.10 y cuyas especificaciones se muestran en la Tabla B.2. Pruebas experimentales reportan un tiempo de respuesta en los flujos de salida de la planta piloto de aproximadamente 4 segundos (Cayetano, 2016). Adicionalmente, se cuenta con un sensor de presión *Promag 10D*

Tabla 2.2 Ubicación de válvulas en la planta piloto

Válvula	Posición m
V_1	11.5 m
V_2	43.3 m
V_3	67.3 m
V_4	98.9 m
V_5	122.9 m
V_6	154.5 m

**Fig. 2.10** Sensor de flujo Protomass 83F colocado en el ducto piloto de cuatro pulgadas.

de tipo electromagnético en la válvula 4, utilizada para emular la extracción. Las mediciones de presión en los extremos del ducto se obtienen mediante los sensores de presión *CerabarPMP71*, también de *Endress + Hauser*.

3 Esquema de diagnóstico

Partiendo de los modelos de dimensión finita derivados en el Capítulo 2, a continuación se reformula el problema de diagnóstico por medio de una secuencia de tareas. La primera tarea consiste en generar un residuo que identifique la orientación de la fuga referenciada con respecto al ramal z_b . Este residuo permite formular como segundo problema el diseño de localizadores de la posición de la fuga asumiendo conocida la orientación de ésta con respecto a la posición del ramal. Esta reformulación del problema es genérica y deja en libertad al diseñador para seleccionar el tipo de modelo empleado tanto en el generador de residuo como en los localizadores. En particular en este capítulo se describe un esquema de localización basado en modelos estáticos del fluido y se analiza el desempeño del esquema con datos sintéticos y reales.

3.1 Residuo vía ramal de referencia

Con objeto de diseñar un generador de residuos que permita identificar la presencia de una fuga sin falsas alarmas provocadas por variaciones en el flujo del ramal, se considera la descripción de variables mostrada en la Fig. 2.5 junto con el modelo dinámico de la Ec. (2.24) escrito a continuación nuevamente para darle claridad a la presentación:

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_{in} \\ \dot{H}_2 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{H}_3 \\ \dot{Q}_3 \\ \dot{H}_4 \\ \dot{Q}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 Q_{in} |Q_{in}| + \frac{a_1}{L_1} (H_{in} - H_2) \\ \frac{a_2}{L_1} (Q_{in} - Q_2 - Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u)) \\ -\mu_2 Q_2 |Q_2| + \frac{a_1}{L_2} (H_2 - H_3) \\ \frac{a_2}{L_2} (Q_2 - Q_3 - Q_{z_b}) \\ -\mu_3 Q_3 |Q_3| + \frac{a_1}{L_3} (H_3 - H_4) \\ \frac{a_2}{L_3} (Q_3 - Q_{out} - Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d)) \\ -\mu_4 Q_{out} |Q_{out}| + \frac{a_1}{L_4} (H_4 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Cuando el fluido está en estado estacionario y el sistema está en condiciones normales de operación, es decir, $\dot{Q}_i = 0$ para $i = 1, 2, 3, 4$, $\dot{H}_i = 0$ para $i = 2, 3, 4$ y $\mathcal{U}_u = 0$ y $\mathcal{U}_d = 0$ en todo

instante, el modelo de ecuaciones algebraicas

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 Q_{in} |Q_{in}| + \frac{a_1}{L_1} (H_{in} - H_2) \\ \frac{a_2}{L_1} (Q_{in} - Q_2) \\ -\mu_2 Q_2 |Q_2| + \frac{a_1}{L_2} (H_2 - H_3) \\ \frac{a_2}{L_2} (Q_2 - Q_3 - Q_{z_b}) \\ -\mu_3 Q_3 |Q_3| + \frac{a_1}{L_3} (H_3 - H_4) \\ \frac{a_2}{L_3} (Q_3 - Q_{out}) \\ -\mu_4 Q_{out} |Q_{out}| + \frac{a_1}{L_4} (H_4 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

describe el fluido en condiciones estáticas con valores arbitrarios de L_1 y L_3 dentro del intervalo $[0, z_b]$ y $[0, L - z_b]$ respectivamente. Por otro lado, en ausencia de fugas, sin pérdida de generalidad, se puede suponer que el factor de fricción aguas arriba satisface las relaciones $\mu_u = \mu_1 = \mu_2$ y aguas abajo $\mu_d = \mu_3 = \mu_4$. Bajo estas consideraciones, si el vector de variables

$$y(t) = \begin{pmatrix} Q_{in} & Q_{out} & H_{in} & H_{out} & Q_b \end{pmatrix}^T, \quad (3.3)$$

es conocido, se puede resolver el sistema de ecuaciones algebraicas (3.2) y expresar la distancia del ramal al tanque por medio de

$$\hat{z}_b = \frac{a_1(H_{in} - H_{out}) - \mu_d L Q_{out} |Q_{out}|}{\mu_u Q_{in} |Q_{in}| - \mu_d Q_{out} |Q_{out}|} \quad (3.4)$$

Esta expresión es sensible a los factores de fricción aguas arriba μ_u y aguas abajo μ_d con respecto al ramal e insensible a los valores asignados a L_1 y L_3 en condiciones normales. Para pequeños flujos de extracción y condición de turbulencia completa, el estimado mediante la ec. (3.4) se puede aproximar, al considerar el factor de fricción constante a lo largo de todo el ducto por

$$\hat{z}_b \approx \frac{a_1(H_{in} - H_{out}) - \mu L Q_{out} |Q_{out}|}{\mu(Q_{in} |Q_{in}| - Q_{out} |Q_{out}|)}. \quad (3.5)$$

en condiciones normales.

En consecuencia, debido a que un ramal es un punto fijo en el ducto, la estimación de z_b con las Ecs. 3.4 o 3.5 es invariante en condiciones normales y cualquier desviación en la estimación indica un comportamiento anormal en el ducto.

De acuerdo con Isermann (2006b), el error en la estimación del punto del ramal

$$r_b = \delta z_b = z_b - \hat{z}_b \quad (3.6)$$

puede ser definido como un residuo estático para diagnóstico, con z_b la posición fija del ramal. Por tanto, se propone usarlo para determinar cuando está presente una falla y la región en que

se ubica; aguas arriba o abajo con respecto a z_b . Este residuo es fundamental en el desarrollo del localizador de fallas.

Para identificar la región donde se ubica la falla, se propone utilizar la teoría de la sensibilidad (Frank, 1990), la cual permite analizar las desviaciones de los sistemas dinámicos con respecto a parámetros inciertos. Específicamente, considerando la expresión del ramal, su desviación puede aproximarse por

$$\Delta z_b \cong S_{H_{in}} \Delta H_{in} + S_{H_{out}} \Delta H_{out} + S_{Q_{in}} \Delta Q_{in} + S_{Q_{out}} \Delta Q_{out} \quad (3.7)$$

en función de las desviaciones ΔH_{in} , ΔH_{out} , ΔQ_{in} y ΔQ_{out} , donde la función de sensibilidad está dada por

$$S_x = \left. \frac{\partial z_b}{\partial x} \right|_0, \quad (3.8)$$

evaluada en valores nominales descritos por 0.

Así, las funciones de sensibilidad (Ec. 3.8) del estimador (Ec. 3.5) con respecto a las cuatro variables que están presentes en z_b se pueden escribir como

$$S_{H_{in}} = (\mu(Q_{in}|Q_{in}| - Q_{out}|Q_{out}|))^{-1} \quad (3.9)$$

$$S_{H_{out}} = -(\mu(Q_{in}|Q_{in}| - Q_{out}|Q_{out}|))^{-1} \quad (3.10)$$

$$S_{Q_{in}} = \frac{2 \frac{\mu Q_{in}|Q_{in}|}{Q_{in}} (L\mu Q_{out}|Q_{out}| - H_{in} + H_{out})}{(\mu(Q_{in}|Q_{in}| - Q_{out}|Q_{out}|))^2} \quad (3.11)$$

$$S_{Q_{out}} = -\frac{2 \frac{\mu Q_{out}^n|Q_{out}^n|}{Q_{out}^n} (L\mu Q_{out}|Q_{out}| - H_{in} + H_{out})}{(\mu(Q_{in}|Q_{in}| - Q_{out}|Q_{out}|))^2} \quad (3.12)$$

$$-\frac{2L\mu Q_{out}|Q_{out}|}{\mu Q_{out}(Q_{in}|Q_{in}| - Q_{out}|Q_{out}|)}.$$

[10pt] Debido a que $Q_{in} > Q_{out}$ cuando el ducto opera en condición normal y $Q_b > 0$, ante una fuga en cualquier punto del ducto se cumple la condición $Q_{in} \gg Q_{out}$. Por tanto, a partir de las funciones de sensibilidad (3.9- 3.13) y la desviación del residuo (3.7), se observa que cualquier desviación positiva en las variables H_{in} y Q_{in} , produce un error positivo Δz_b . Por el contrario, cualquier desviación negativa en H_{out} y Q_{out} , produce un error negativo Δz_b . Entonces, el signo de Δz_b permite identificar la región de la condición anormal en el ducto. Esto es, el residuo satisface la condición

$$r_b(t) \begin{cases} > 0 & \text{Estado anormal aguas arriba del ramal } z_b \\ = 0 & \text{Ausencia de eventos anormales} \\ < 0 & \text{Estado anormal aguas abajo del ramal } z_b \end{cases}$$

Tabla 3.1 Secuencia de datos del experimento

Intervalo de evento (s)	Posición relativa de fuga
0 – 750	Ausencia de fuga
751 – 3750	Aguas arriba
3751 – 4250	Ausencia de fuga
4251 – 7460	Aguas arriba
7461 – 7840	Ausencia de fuga
7841 – 11133	Aguas arriba
11134 – 11545	Ausencia de fuga
11546 – 11495	Aguas abajo
11496 – 15487	Ausencia de fuga
15488 – 18500	Aguas abajo
18501 – 19200	Ausencia de fuga

Con el propósito de demostrar el desempeño de este residuo estático ante fugas en diferentes puntos de un ducto, se realizó un experimento en la planta piloto del Instituto de Ingeniería, generando una secuencia de cinco fugas en diferentes posiciones de acuerdo a los datos presentados en la Tabla 3.1, donde la válvula 4 del ducto piloto representa la extracción fija, y la apertura de las válvulas 1, 2 y 3 emulan fugas aguas arriba y la apertura de las válvulas 5 y 6 la de aguas abajo de z_b . La evolución del residuo r_b ante la series de eventos se ilustra en la Fig. 3.1, y puede apreciarse tanto la presencia de fuga, como la posición relativa de la misma de acuerdo al signo de r_b . Para caracterizar el operador del residuo ante las diferentes posiciones de la fuga, la Fig. 3.2 muestra el comportamiento del residuo en función de los puntos de fuga, generado con datos sintéticos. Se observa de ambas figuras (3.1 y 3.2) lo siguiente:

- $r_b(t)$ es positivo para los tres intervalos de tiempo en los que la fuga está aguas arriba de la extracción.
- $r_b(t)$ es negativo para los dos intervalos de tiempo en los que la fuga se ubica aguas abajo de la extracción.
- El residuo se comporta de forma no lineal con respecto a la distancia entre la fuga y la extracción en ambas secciones. Por tanto, no se puede obtener un buen estimado de la posición de la fuga a partir del valor de éste.
- $r_b(t)$ permanece alrededor de cero en ausencia de fuga durante los intervalos de tiempo en que el ducto opera en condición normal de acuerdo con la Tabla 3.1. La variabilidad

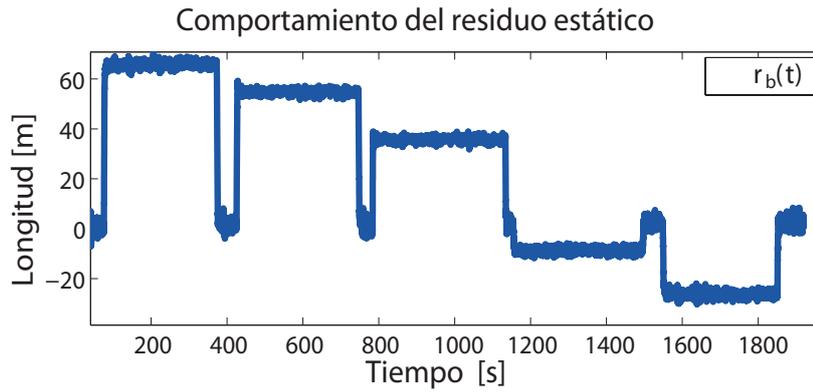


Fig. 3.1 Evolución del residuo $r_b(t)$ para el experimento diseñado.

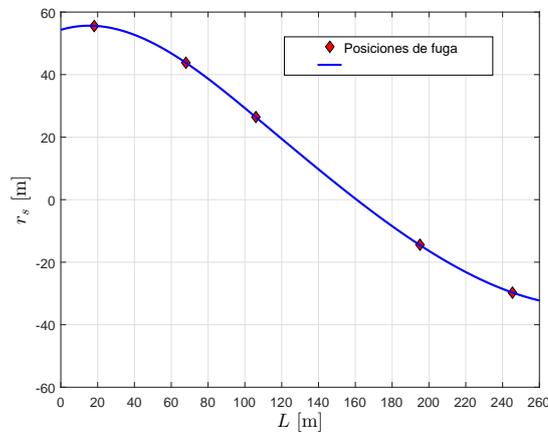


Fig. 3.2 Comportamiento del residuo no lineal r_b vs posición de la fuga.

de alta frecuencia en el residuo, se debe principalmente a ruido en la mediciones. Este podría filtrarse mediante un filtro adaptable como el sugerido por Isermann (2006b).

Los resultados de este experimento confirman que el residuo $r_b(t)$ puede ser usado como detector para determinar la existencia de una fuga, y además permite determinar la orientación de ésta con respecto al punto fijo de referencia dado por la posición del ramal. Sin embargo, no tiene capacidad para localizar de forma más precisa la posición de la fuga. Esta propiedad del residuo fue reportada indirectamente mediante estudios en simulación y con datos experimentales de una tubería de transporte de agua (Verde, 2004). Específicamente, se reportó que una segunda fuga produce una desviación en la estimación y que el signo de dicha desviación depende de la posición de la segunda fuga. Utilizar el signo de la función de sensibilidad del ramal para determinar la orientación de la fuga con respecto al ramal es un procedimiento novedoso y fácil de justificar.

Considerando que se suponen fugas no simultáneas, una vez que se ha determinado la región de la fuga, se propone estimar la posición de ésta usando dos identificadores; uno para el caso de fuga aguas arriba y otro para el caso de fuga aguas abajo. Así, sólo uno de los identificadores está activo a la vez y deberá proporcionar la posición de fuga, mientras que el otro permanece inactivo. La activación de los identificadores se puede lograr usando distintos operadores no lineales. En particular, en el caso de este estudio, se usa la función de Gompertz definida como Juki *et al.* (2004).

- Para la fuga aguas arriba

$$\beta_u = |\theta_1 \exp(-\theta_2 \exp(-\theta_3 r_b))|^m, \quad y \quad (3.13)$$

- Para la fuga aguas abajo

$$\beta_d = |\theta_1 \exp(-\theta_2 \exp(\theta_3 r_b))|^m. \quad (3.14)$$

con los parámetros: $\theta_1 = 1$, $\theta_2 = 100$, $\theta_3 = 0.833$ y $m = 50$. Una ventaja de esta función de activación es que puede evaluarse aún en condiciones normales cuando $r_b = 0$. Si se tiene un residuo cercano a cero en condiciones normales producto de incertidumbres, ruido y sesgo en las mediciones, se sugiere filtrar el residuo con la regla

$$\text{if } |r_b| < \text{thu}, \text{ then } r_b = 0, \text{ else, end} \quad (3.15)$$

donde el umbral thu se calibra de forma experimental. La Fig. 3.3 muestra el comportamiento de las funciones de activación β_u y β_d ante el residuo r_b .

3.2 Localizador referenciado

De acuerdo con Verde *et al.* (2003), el problema de aislabilidad de dos fugas en condiciones estacionarias no tiene solución, cuando únicamente se miden los gastos y presiones en los extremos del ducto. Por otro lado, Kowalczyk y Gunawickrama (2000) demostraron que existe una familia de modelos estáticos equivalentes para el escenario de múltiples fugas. Así que la condición anormal del caso de estudio mostrado en la Fig. 2.5 puede identificarse con un modelo estático si se asume conocidos los parámetros (z_b y Q_b) del ramal y sólo una fuga está presente a la vez.

Estos hechos motivaron a usar el residuo que ubica la dirección de una fuga con respecto al punto de referencia z_b por medio de la Ec. 3.5 como un detector selector y a proponer el esquema de la Fig. 3.4 para la identificación de la fuga en cualquiera de las condiciones posibles; aguas arriba o abajo del ramal.

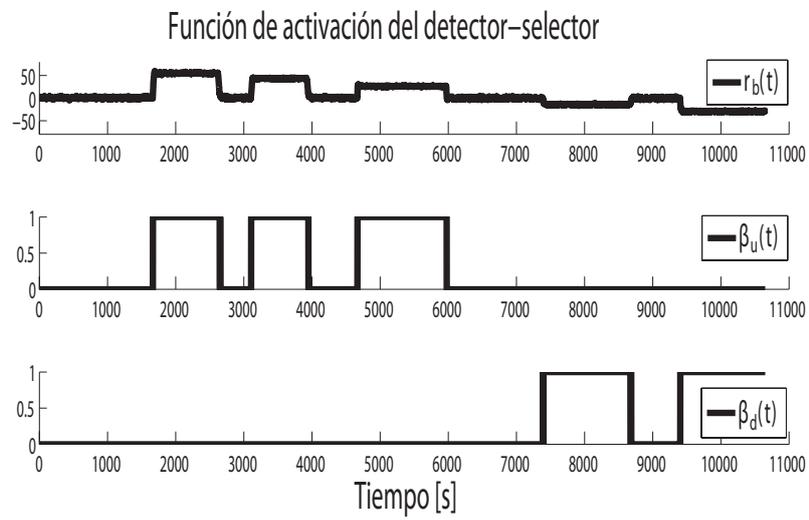


Fig. 3.3 Evolución de las funciones de activación para una secuencia de fallas alternadas.

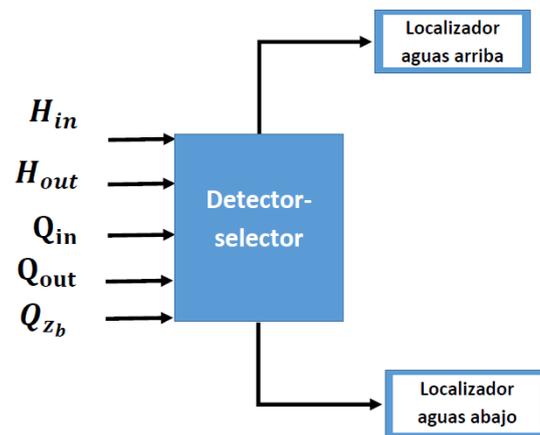


Fig. 3.4 Esquema general del identificador de fugas con dos localizadores independientes.

Una ventaja del esquema de la Fig. 3.4 es que permite abordar la tarea de identificación en combinación con un **detector-selector** como dos problemas independientes de localización. Por otro lado, además de revelar la presencia de una fuga, permite generar una señal de orientación, referenciada a la extracción con posición fija. En consecuencia, se reduce la dimensión del espacio de parámetros a estimar en cada localizador. Así cada uno de ellos debe estimar la distancia del ramal a la fuga y el gasto de fuga correspondiente, conociendo las presiones y gastos en los extremos del ducto, así como el gasto en la extracción.

3.2.1 Localización aguas arriba

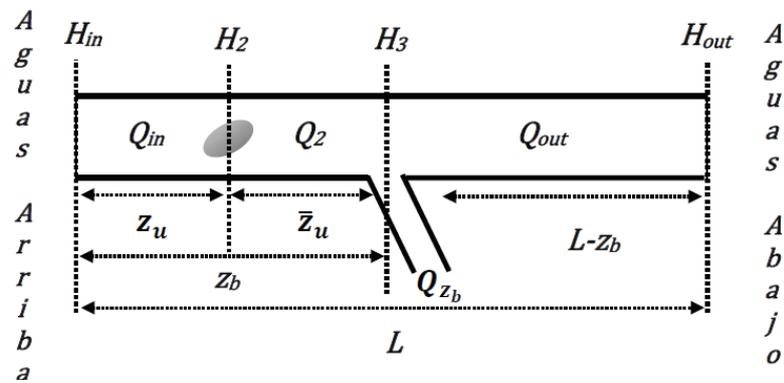


Fig. 3.5 Fuga aguas arriba (z_u) y ramal ($z_b = z_u + \bar{z}_u$ y complemento $\bar{z}_b = L - z_b$)

Se consideró el escenario mostrado en la Fig. 3.5 de una fuga aguas arriba con los parámetros Q_b y z_b conocidos. Debido a la ausencia de la fuga en el intervalo $L - \bar{z}_b$ aguas abajo, se puede reducir la dimensión del espacio de estado del modelo dado por la Ec. 3.1. Definiendo $z_u + \bar{z}_u = z_b$, y $z_d = z_b + L_3$ y eliminando los estados H_4 y Q_3 el modelo se reduce al Modelo 3.16.

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_{in} \\ \dot{H}_2 \\ \dot{Q}_2 \\ \dot{H}_3 \\ \dot{Q}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu Q_{in}|Q_{in}| + \frac{a_1}{z_u}(H_{in} - H_2) \\ \frac{a_2}{z_u}(Q_{in} - Q_2 - Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u)) \\ -\mu Q_2|Q_2| + \frac{a_1}{\bar{z}_u}(H_2 - H_3) \\ \frac{a_2}{\bar{z}_u}(Q_2 - Q_{out} - Q_{z_b}) \\ -\mu Q_{out}|Q_{out}| + \frac{a_1}{\bar{z}_b}(H_3 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Así, si el fluido se encuentra en estado estacionario, a partir de la Ec. 3.16, se obtienen las

relaciones de balance de masas en condiciones de fuga

$$\begin{aligned} \frac{a_1(H_{in} - H_2)}{z_u} - \mu Q_{in}|Q_{in}| &= 0 \\ \frac{a_1(H_2 - H_3)}{z_u} - \mu Q_2|Q_2| &= 0 \\ \frac{a_1(H_3 - H_{out})}{\bar{z}_b} - \mu Q_{out}|Q_{out}| &= 0. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Finalmente, considerando $|Q|Q = Q^2$ dado que $Q > 0$, a partir de este conjunto de ecuaciones, se obtiene la expresión de la posición de la fuga en términos de variables medibles, la posición del ramal z_b , y su complemento \bar{z}_b . Así, la posición de la fuga estimada se reduce a

$$\hat{z}_u = \frac{a_1(H_{out} - H_{in}) + \mu [z_b(Q_{out} + Q_{z_b})^2 + \bar{z}_b Q_{out}^2]}{\mu((Q_{out} + Q_{z_b})^2 - Q_{in}^2)}. \quad (3.18)$$

3.2.2 Localización aguas abajo

De manera análoga al escenario con la fuga aguas arriba del ramal, se puede considerar el escenario ilustrado en la Fig. 3.6, con una fuga aguas abajo del punto z_b .

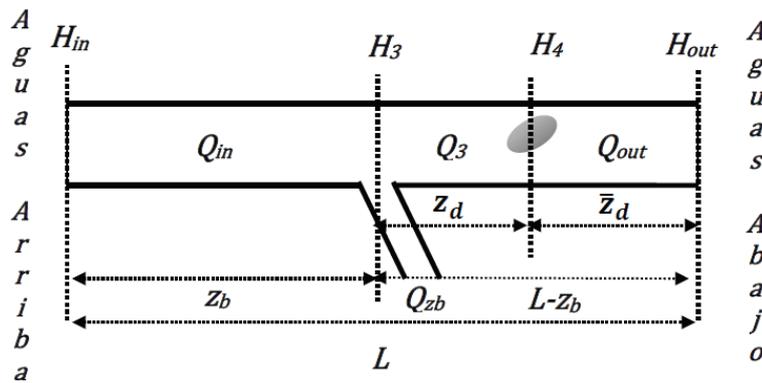


Fig. 3.6 Fuga aguas abajo del ramal en la posición $\bar{z}_d = z_b + z_d$ y $\bar{z}_b = \bar{z}_d + z_d$.

Definiendo en este caso $\bar{z}_d = z_d + z_b$ y $\bar{z}_b = \bar{z}_d - z_d$ y eliminando el estado asociado a la segmentación aguas arriba del ramal, es decir H_2 y Q_2 , se tiene

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_{in} \\ \dot{H}_3 \\ \dot{Q}_3 \\ \dot{H}_4 \\ \dot{Q}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu Q_{in}|Q_{in}| + \frac{a_1}{z_b}(H_{in} - H_3) \\ \frac{a_2}{z_b}(Q_{in} - Q_3 - Q_{z_b}) \\ -\mu Q_3|Q_3| + \frac{a_1}{z_d}(H_3 - H_4) \\ \frac{a_2}{z_d}(Q_3 - Q_{out} - Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d)) \\ -\mu Q_{out}|Q_{out}| + \frac{a_1}{\bar{z}_d}(H_4 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

De forma similar al caso de aguas arriba asumiendo conocidos el gasto Q_b y su posición z_b , así como las mediciones de gasto y presión en los extremos del ducto (H_{in} , H_{out} , Q_{in} , Q_{out}), se obtienen las siguientes relaciones entre variables del fluido en estado permanente

$$\begin{aligned} \frac{a_1(H_{in} - H_3)}{z_b} - \mu|Q_{in}|Q_{in} &= 0 \\ \frac{a_1(H_3 - H_4)}{z_b} - \mu|Q_3|Q_3 &= 0 \\ \frac{a_1(H_4 - H_{out})}{\bar{z}_b} - \mu|Q_{out}|Q_{out} &= 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

En consecuencia, a partir del Modelo 3.20, se obtiene la distancia entre el ramal y la fuga aguas abajo, reemplazado $|Q|Q$ por Q^2 .

$$z_d = \frac{a_1(H_{in} - H_{out}) - \mu\bar{z}_b(Q_{in} - Q_{z_b})^2}{\mu((Q_{in} - Q_{z_b})^2 - Q_{out}^2)}. \quad (3.21)$$

por tanto, la distancia del tanque a la fuga se puede estimar en términos de variables medidas vía

$$\bar{z}_d = z_b + \frac{a_1(H_{in} - H_{out}) - \mu(\bar{z}_b(Q_{in} - Q_{z_b})^2)}{\mu((Q_{in} - Q_{z_b})^2 - Q_{out}^2)}. \quad (3.22)$$

En conclusión, los modelos de dimensión finita no lineales 3.16 y 3.19 permiten estimar la posición de la fuga según sea el caso. De acuerdo al signo del residuo r_b se emplea el estimado 3.18 o 3.22. Una desventaja de estos estimados es que únicamente son aplicables para el escenario en que fueron concebidos. Para el caso libre de fugas y que la extracción en el ramal sea cero, ambas expresiones se indeterminan, lo que implica que la condición de pérdida de flujo en el ducto debe estar activa cuando se estiman las posiciones en tiempo real. Este hecho motivó la búsqueda de localizadores dinámicos, donde dicha limitación desaparezca. Para ello se puede usar un residuo generado vía observadores, como los que se presentan en el Capítulo 4.

3.2.3 Algoritmo de localización

Con base en el generador de residuo y selector de orientación, a través de las funciones β_u y β_d definidas en las Ecs. 3.13 y 3.14, y los estimadores 3.18 y 3.22 de las posiciones de las fugas, se propone el algoritmo de diagnóstico mostrado en la Tabla 3.2. En el algoritmo se incluye, la generación de dos residuos básicos haciendo uso del balance de masa y volumen perdido en el ducto. Éstos permiten complementar el residuo y orientador de la sección de la fuga con:

- El residuo base asociado al flujo perdido con umbral β_1

$$r_1(t) = Q_{in}(t) - Q_b(t) - Q_{out}(t) > \beta_1, y \quad (3.23)$$

- El residuo asociado al volumen perdido por unidad de tiempo T con umbral β_2

$$r_2 = \int_0^T r_1(t)dt > \beta_2. \quad (3.24)$$

Tabla 3.2 Algoritmo para la localización de fugas.

Algoritmo
<p>Parámetros: $L, D, z_b, \beta_1, \beta_2$</p> <p>Entradas: $H_{in}, H_{out}, Q_{in}, Q_{out}, Q_{z_b}$</p> <p>Calcular r_1 y r_2 mediante (3.23) y (3.24) respectivamente</p> <p>if $r_1 < \beta_1$ and $r_2 < \beta_2$</p> <p>síntoma = 0</p> <p>else</p> <p>síntoma = 1</p> <p>if $Q_b = 0$</p> <p>Estimar \hat{z}_u, mediante (3.5)</p> <p>else</p> <p>Estimar \hat{z}_b, β_u y β_d mediante (3.5) y (3.13), (3.14) respectivamente</p> <p>if $\beta_u > 0$</p> <p>Estimar la posición de la fuga aguas arriba z_u mediante (3.18)</p> <p>else</p> <p>if $\beta_d < 0$</p> <p>Estimar la posición de fuga aguas abajo z_d mediante (3.22)</p> <p>end</p> <p>end</p> <p>end</p> <p>end</p>

3.3 Desempeño del localizador

A continuación se analiza el desempeño del localizador propuesto ante diversas condiciones de operación. Los datos sintéticos fueron generados con el simulador comercial Pipeline Studio (2013) y los experimentales corresponden a registros del sistema SCADA de la planta piloto descrita en el Capítulo 2.

3.3.1 Resultados con datos sintéticos

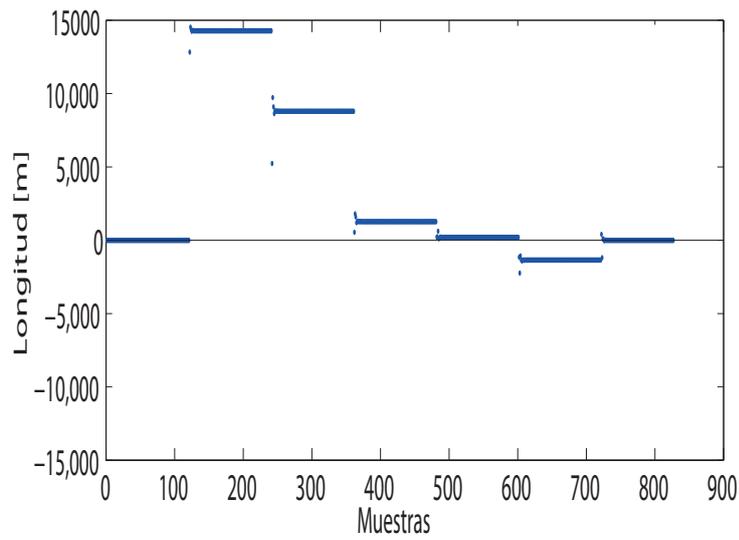
Para evaluar el desempeño del algoritmo, se consideró el ducto de gas LPG de dos pulgadas con la topografía mostrada en la Fig. 2.2 con el ramal localizado en la estación **E** a 41,796 m del origen y del cual se extrae un flujo de $0.15 \frac{m^3}{s}$. El conjunto de fugas fueron simuladas con orificios de 0.0254 m de diámetro durante un tiempo de 840 minutos. Los tiempos de activación de la secuencia de fugas están registrados en la primera columna de la Tabla 3.3. Las posiciones respectivas se muestran en la segunda columna y en todos los casos los datos fueron capturados con un periodo de $h = 1 \text{ min}$. Los resultados de la estimación de la posición se presentan en la tercera columna y corresponden a valores medios de los estimados \hat{z}_u y \hat{z}_d . La comparación entre los datos simulados y los estimados arroja un error de estimación inferior a 1% en todos los casos. En esta prueba se seleccionaron los valores de los umbrales de los residuos bases $\beta_1 = \beta_2 = 10$.

Tabla 3.3 Secuencia de datos de fugas.

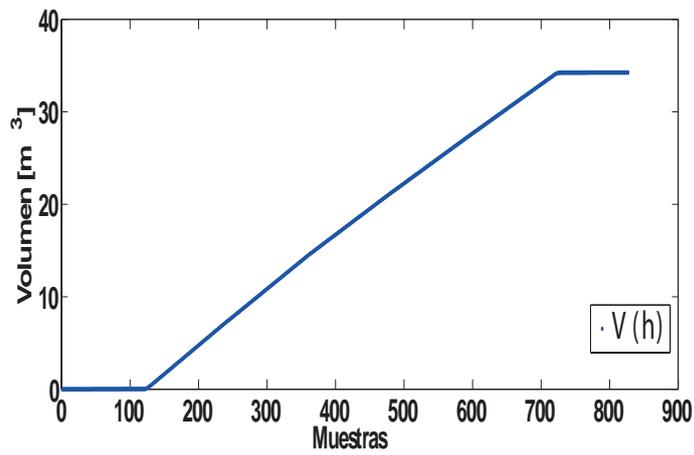
$t_{z_f} \text{ min}$	$z_f \text{ m}$	$\hat{z}_f \text{ m}$
0 : 120	0	0
121 : 240	5000	4908
241 : 360	19326	19132
361 : 480	38770	38485
481 : 600	41634	41352
601 : 720	50796	50634
721 : 840	0	0

La Fig. 3.7a describe el comportamiento del residuo r_b durante toda la secuencia del experimento. La Fig. 3.7(b) muestra el incremento en el residuo asociado al volumen faltante. La Fig. 3.7c muestra la evolución de las posiciones estimadas a lo largo de todo el experimento. La Fig. 3.7d muestra la evolución del error del flujo de fuga (producida por una fuga pequeña de aproximadamente $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$) recordando que la tubería tiene un diámetro de 0.0254 m . La Fig. 3.8 muestra un acercamiento de la respuesta transitoria del residuo r_b ante un cambio en la posición de la fuga de 5000. m a 19,826. m a los 240 minutos. Se observa la rápida velocidad de respuesta del residuo ante cambio en la posición de la fuga. A partir de la evolución de las variables involucradas en el localizador se pueden observar los siguientes hechos:

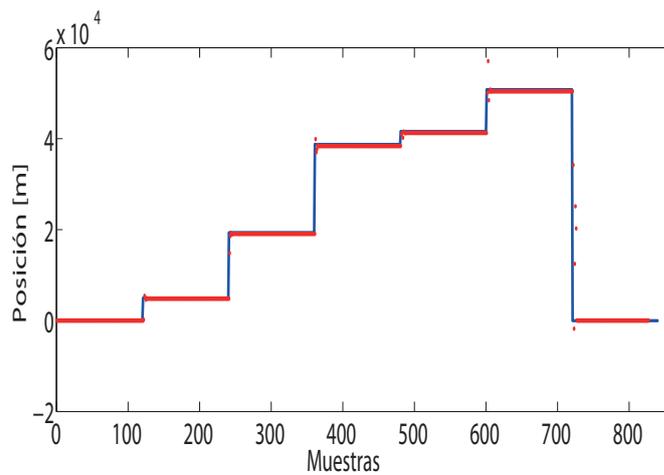
1. Durante los primeros 120 m , el residuo es cero, indicando ausencia de fugas, y éste se desvía de cero durante la ocurrencia de fugas.



a) Evolución del residuo $r_b(h) = z_b - \hat{z}_b(h)$.



b) Evolución del residuo asociado al volumen derramado $V(h)$.



c) Evolución de los estimados z_f línea continua y $\hat{z}_f(h)$ línea punteada.

Fig. 3.7 Residuos y parámetros estimados para la secuencia de simulación de la Tabla 3.3 durante 840 minutos.

2. En el intervalo de 122 m - 480 m el residuo es positivo, indicando que la condición anormal ocurre aguas arriba de la extracción fija. Durante este intervalo de tiempo, la posición de la fuga es estimada mediante la Ec. 3.18. Se aprecia del transitorio amplificado mostrado en la Fig. 3.8 que el residuo responde rápidamente a cambios en las posiciones de la fuga.
3. A partir del instante de tiempo 482 min , el residuo se vuelve negativo, indicando la ocurrencia de un evento anormal ubicado aguas abajo del ramal. A partir de este instante, la posición de la fuga se estima mediante la Ec. 3.22.
4. El comportamiento del residuo es coherente con la evolución del volumen de pérdida. Este hecho confirma que se puede detectar la existencia de fugas incipientes y pequeñas con el residuo r_2 asociado al volumen de pérdida.
5. Durante los transitorios provocados por la conmutación de las fugas, los errores de la estimación del flujo derramado son menores a 20% y en estado estacionario dichos errores son prácticamente despreciables.

Por tanto, de la evolución de los estimados y de los valores medios registrados en la Tabla 3.3, se confirma el desempeño satisfactorio del sistema estático de localización.

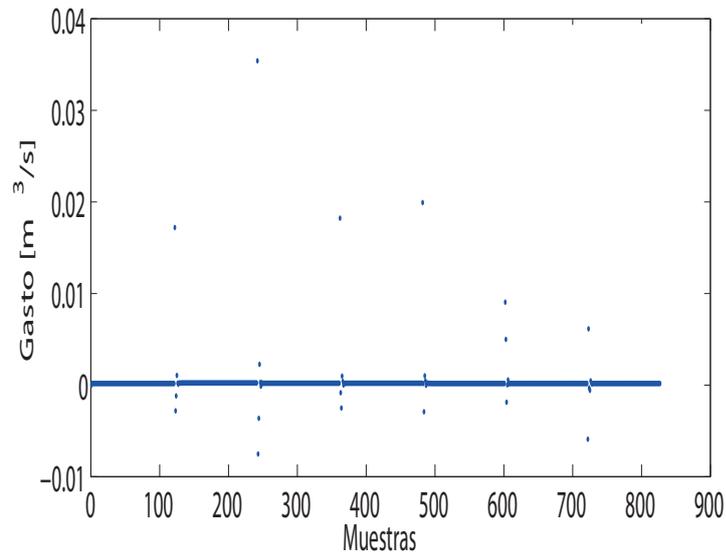
3.3.2 Resultados con datos experimentales

Dada la importancia del comportamiento de residuo r_b para el detector de fallas, se consideró importante analizar el comportamiento del residuo r_b con datos reales. Para ello se diseñó un experimento provocando cambios en el punto de operación del ducto, variando la frecuencia de trabajo de la bomba y reduciendo paulatinamente la válvula asociada al flujo de extracción en el ramal a partir de los 4300 s . En este experimento la extracción es función de la presión en el ramal, ya que no se tiene control del gasto de extracción. Las variables captadas por el sistema SCADA con un periodo de 1 s se muestran en la Fig. 3.9.

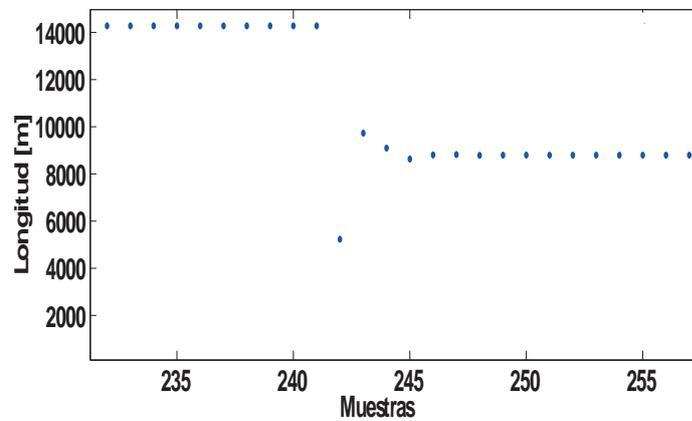
La Fig. 3.10 describe la evolución del estimado de la posición del ramal \hat{z}_b . Se observa de las gráficas la sensibilidad de \hat{z}_b durante el transitorio ante los cambios en el punto de operación, a pesar de la ausencia de fugas. Sin embargo, se tiene un buen desempeño en estado permanente y además entre menor sea el flujo de extracción mayor es la variabilidad en la estimación. Este resultado era esperado dado que el generador de residuo está basado en un modelo estático del fluido. Este hecho motivó la propuesta de residuo robusto a transitorios provocados por eventos

distintos a las fugas y que se aborda en el Capítulo 4.

Finalmente, la Fig. 3.11 describe la posición estimada por el algoritmo de localización ante una secuencia de fallas colocadas tanto aguas arriba como abajo del ramal. Cabe destacar que en este experimento no se dispuso de la medición del flujo provocado por las fugas y que se mantuvo constante la apertura de las válvulas emuladora del ramal a lo largo de todo el experimento. Se observa de la estimación que los errores máximos ocurrieron durante el transitorio y en estado permanente, sin embargo los porcentajes de error son para todas las posiciones menores a 4 % con respecto a la longitud del ducto.

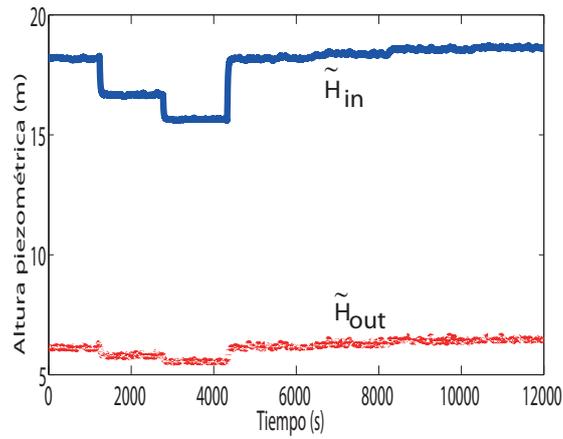


a) Evolución del error de estimación del flujo de fuga $Q_L(h) - \hat{Q}_L(h)$.

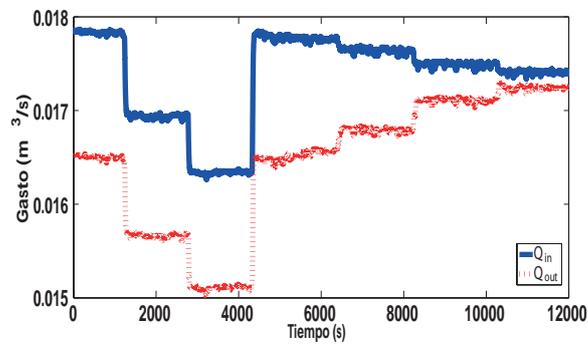


b) Amplificación de $r_b = z_b - \hat{z}_b(h)$ a 240 *min* de iniciado el experimento

Fig. 3.8 Residuos y error para la secuencia de simulación de la Tabla 3.3.



a) Evolución de la presiones en los extremos del ducto.



b) Flujos en los extremos del ducto.

Fig. 3.9 Evolución de flujos, variables piezométricas ante variaciones en el punto de operación y flujo de extracción con datos experimentales.

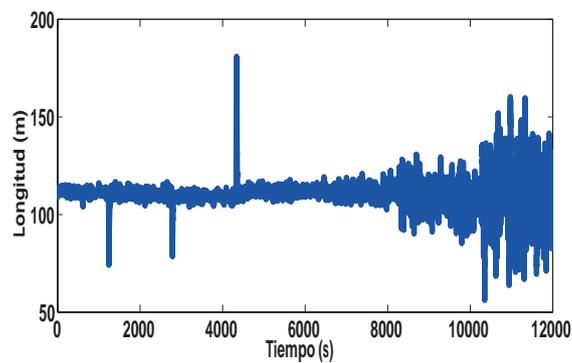


Fig. 3.10 Estimación de la posición del ramal \hat{z}_b .

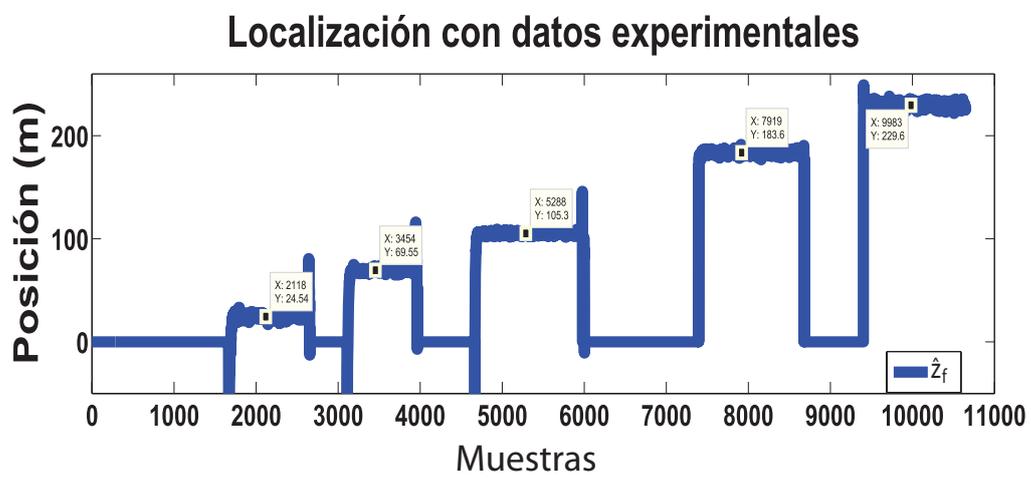


Fig. 3.11 Estimador de posiciones de fugas activadas durante distintos intervalos de tiempo.

4 Localización vía sistemas interconectados

Partiendo de los modelos dinámicos de orden mínimo para los dos escenarios de fuga, aguas arriba o abajo del punto de extracción, este capítulo presenta un esquema general para detectar y localizar fugas en un ducto cuando se conoce el flujo de extracción en un ramal. Como primer paso se identifica la orientación de la fuga o posición relativa con respecto a la extracción. El objetivo de conocer la orientación es estimar con ayuda de una pareja de observadores con distintos modelos, la posición exacta de la fuga con un procedimiento similar al caso de una sola fuga en un tramo. Es decir, un observador se usa para estimar las fugas aguas arriba del ramal y el otro estima las fugas aguas abajo. Los resultados muestran que los observadores estiman de forma más suavizada la posición de la fuga.

4.1 Sistemas interconectados con un estimador estático

Del análisis del localizador presentado en el capítulo anterior, se vió la necesidad de mejorar sus propiedades y reducir tiempos y errores en la identificación de la fuga ante cambios en los puntos de operación y flujos del ramal. Por tanto, a continuación se presenta una formulación del problema partiendo del modelo dinámico no lineal del fluido con dos fugas (2.24) reescrito a continuación.

$$\begin{pmatrix} \dot{Q}_{in} \\ \dot{H}_2 \\ \dot{Q}_3 \\ \dot{H}_3 \\ \dot{Q}_4 \\ \dot{H}_4 \\ \dot{Q}_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu_1 Q_{in} |Q_{in}| + \frac{a_1}{L_1} (H_{in} - H_2) \\ \frac{a_2}{L_1} (Q_{in} - Q_2 - Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u)) \\ -\mu_2 Q_2 |Q_2| + \frac{a_1}{L_2} (H_2 - H_3) \\ \frac{a_2}{L_2} (Q_2 - Q_3 - Q_{z_b}) \\ -\mu_3 Q_3 |Q_3| + \frac{a_1}{L_3} (H_3 - H_4) \\ \frac{a_2}{L_3} (Q_3 - Q_{out} - Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d)) \\ -\mu_4 Q_{out} |Q_{out}| + \frac{a_1}{L_4} (H_4 - H_{out}) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

En este modelo, las parejas (z_u, Q_u) y (z_d, Q_d) corresponden a los parámetros desconocidos

con $Q_u = \lambda_u \sqrt{H_2}$, $Q_d = \lambda_d \sqrt{H_4}$. Las posiciones están relacionadas con sus complementos vía

$$z_u + \bar{z}_u = z_b, \quad z_b + \bar{z}_b = L, \quad z_d + \bar{z}_d = \bar{z}_b, \quad z_d + z_b = \bar{z}_d.$$

Tomando en cuenta, que una variedad de problemas de diagnóstico de fallas asociados a sistemas físicos no tienen solución analítica, principalmente debido a la ausencia de sensores que permitan garantizar las condiciones de diagnosticabilidad (Niejmeijer y Fossen, 1999) o a la gran dimensión del espacio de estado que dificulta la generación de los residuos, se recomienda descentralizar los sistemas antes de formular las tareas de FDI. Ferrari *et al.* (2012) han desarrollado un procedimiento para ello. El análisis estructural es otra alternativa que permite reducir la dimensión de los subsistemas y sirvió para reformular el problema de fallas en un ducto, como se reporta en Verde *et al.* (2012). Esto conlleva, a diseñar residuos cooperativos y funciones de activación por etapas para la localización de las fallas. De hecho, el localizador estático presentado en el Capítulo 3, podría considerarse como un esquema FDI estático cooperativo.

En particular, con base en el modelo 4.1 se propone dividir la tarea de identificación de fallas generando dos subsistemas y reformular la tarea de localización de una fuga para cada subsistema. Considerando que el escenario del caso de estudio no contempla fugas simultaneas, los modelos con fuga:

$$\text{Aguas arriba en la posición } z_u \quad (4.2) \quad \text{Aguas abajo en la posición } z_d \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{in} &= -\mu_1 |Q_{in}| Q_{in} + \frac{a_1}{z_u} (H_{in} - H_2) & \dot{Q}_{in} &= -\mu_1 |Q_{in}| Q_{in} + \frac{a_1}{z_b} (H_{in} - H_3) \\ \dot{H}_2 &= \frac{a_2}{z_u} (Q_{in} - Q_2 - Q_u \mathcal{U}_u(\tau_u)) & \dot{H}_3 &= \frac{a_2}{z_b} (Q_{in} - Q_3 - Q_{z_b}) \\ \dot{Q}_2 &= -\mu_2 |Q_2| Q_2 + \frac{a_1}{z_u} (H_2 - H_3) & \dot{Q}_3 &= -\mu_3 |Q_3| Q_3 + \frac{a_1}{z_d} (H_3 - H_4) \\ \dot{H}_3 &= \frac{a_2}{z_u} (Q_2 - Q_{out} - Q_{z_b}) & \dot{H}_4 &= \frac{a_2}{z_b} (Q_3 - Q_{out} - Q_d \mathcal{U}_d(\tau_d)) \\ \dot{Q}_{out} &= \mu_3 |Q_{out}| Q_{out} + \frac{a_1}{z_b} (H_3 - H_{out}) & \dot{Q}_{out} &= -\mu_4 |Q_{out}| Q_{out} + \frac{a_1}{z_b} (H_4 - H_{out}) \end{aligned}$$

en sus espacios respectivos, pueden ser usados para resolver la tarea de FDI localmente. Las Figs. 4.1 y 4.2 describen los escenarios asociados a dichos modelos con dos parámetros a identificar para cada fuga. Más aún, considerando como vector de entrada

$$u = \begin{pmatrix} H_{in} & H_{out} & Q_{z_b} \end{pmatrix}^T$$

y que los flujos en los extremos del ducto son medibles

$$y = \begin{pmatrix} Q_{in} & Q_{out} \end{pmatrix}^T,$$

se observa que las estructuras de 4.2 y 4.3 son equivalentes. Por tanto, el estudio de la detectabilidad e identificabilidad de las fallas se puede realizar con cualquiera de los dos modelos.

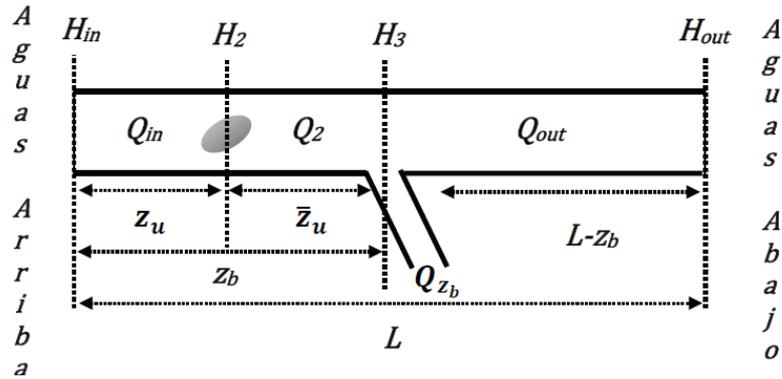


Fig. 4.1 Fuga aguas arriba del ramal con parámetros a identificar Q_u y z_u .

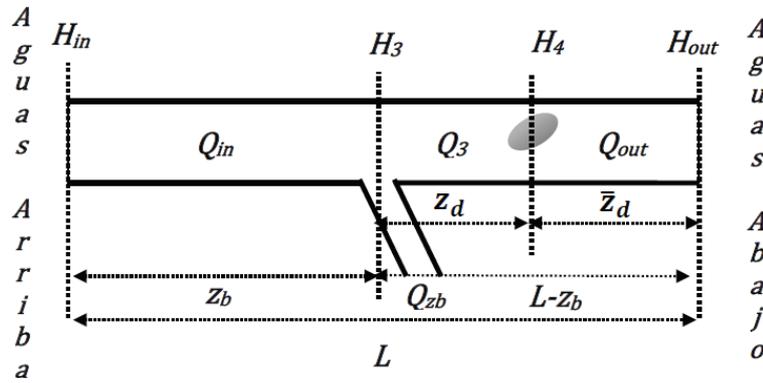


Fig. 4.2 Fuga aguas abajo del ramal con parámetros a identificar Q_d y z_d .

Sugerido por Verde (2004), si se realizan los siguientes cambios de variables

$$x_u = \begin{pmatrix} Q_{out} \\ H_3 \\ z_u Q_{in} + \bar{z}_u Q_2 \end{pmatrix} \quad (4.4) \quad x_d = \begin{pmatrix} Q_{in} \\ H_3 \\ \bar{z}_d Q_{out} + z_d Q_3 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

en los sistemas 4.2 y 4.3 respectivamente, se pueden extraer subsistemas desacoplados de la presión H_2 y H_4 en el punto de fuga. Estos modelos tienen la propiedad de ser independientes del flujo de la fuga Q_u y Q_d . Asumiendo el factor de fricción μ constante, entonces el problema de localización de las fugas se puede reformular con los siguientes modelos:

$$\text{Aguas arriba} \begin{pmatrix} \dot{x}_{u_1} \\ \dot{x}_{u_2} \\ \dot{x}_{u_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu |x_{u_1}| x_{u_1} + \frac{a_1}{\bar{z}_b} (x_{u_2} - u_2) \\ \frac{a_2}{z_u} \left(\frac{x_{u_3} - z_u y_1}{\bar{z}_u} - x_{u_1} - u_3 \right) \\ -\mu |y_1| y_1 z_u - \mu \frac{|x_{u_3} - z_u y_1| (x_{u_3} - z_u y_1)}{\bar{z}_u} + a_1 (u_1 - x_{u_2}) \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

con z_u único parámetro desconocido y como salida medible $y_u = x_{u_1}$,

y

$$\text{Aguas abajo} \begin{pmatrix} \dot{x}_{d_1} \\ \dot{x}_{d_2} \\ \dot{x}_{d_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\mu|x_{d_1}|x_{d_1} - \frac{a_1}{z_b}(x_{d_2} - u_1) \\ -\frac{a_2}{z_b} \left(\frac{x_{d_3} - \bar{z}_d y_2}{z_d} - x_{d_1} + u_3 \right) \\ -\mu|y_2|y_2 \bar{z}_d - \mu \frac{|x_{d_3} - \bar{z}_d y_2|(x_{d_3} - \bar{z}_d y_2)}{z_d} - a_1(u_2 - x_{d_2}) \end{pmatrix}. \quad (4.7)$$

con z_d como parámetro desconocido y salida medible $y_d = x_{d_1}$.

Con objeto de disponer de modelos de referencia en condición nominal en ausencia de fugas, se define

$$z_u := \alpha_u + \delta_u \quad \text{y} \quad z_d := \alpha_d + \delta_d \quad (4.8)$$

donde α_u y α_d se ajustan en función de las regiones del ducto con mayor probabilidad de eventos. Así, δ_u y δ_d corresponden a los parámetros incrementales a estimar con respecto a la posición relativa denotada nominal. La Fig. 4.3 describe la relación entre la posición real y la incremental para el caso aguas arriba. Por simplicidad en la presentación se consideran $\alpha_u = 0.5z_b$ y $\alpha_d = 0.5\bar{z}_b$.

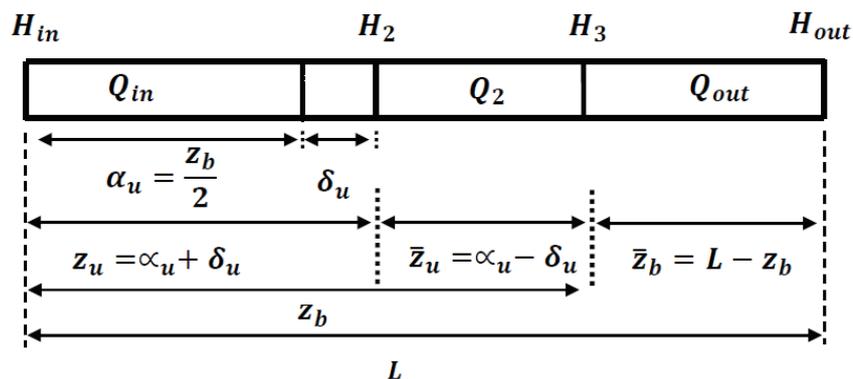


Fig. 4.3 Descripción de los segmentos aguas arriba con el parámetro incremental δ_u .

Por otro lado, haciendo un balance de masas en el ramal en condiciones de equilibrio, se tiene $Q_2 = y_1 + u_3$ tomando en cuenta que el tercer estado está definido como $x_{u_3} = z_u y_1 + \bar{z}_u Q_2$, al sustituir Q_2 en dicho estado se obtiene la relación lineal

$$x_{u_3} = \alpha_u(y_1 + u_3 + y_u) + \delta_u(y_1 - u_3 - y_u) \quad (4.9)$$

la cual es función de variables conocidas y del parámetro δ_u asociado a la posición de la fuga.

Similarmente, para el escenario aguas abajo $x_{d_3} = \bar{z}_d y_2 + z_d Q_3$, considerando $Q_3 = y_1 - u_3$ se obtiene la relación lineal en el parámetro desconocido δ_d

$$x_{d_3} = \alpha_d(y_d + u_3 - y_2) + \delta_d(y_d - u_3 - y_2). \quad (4.10)$$

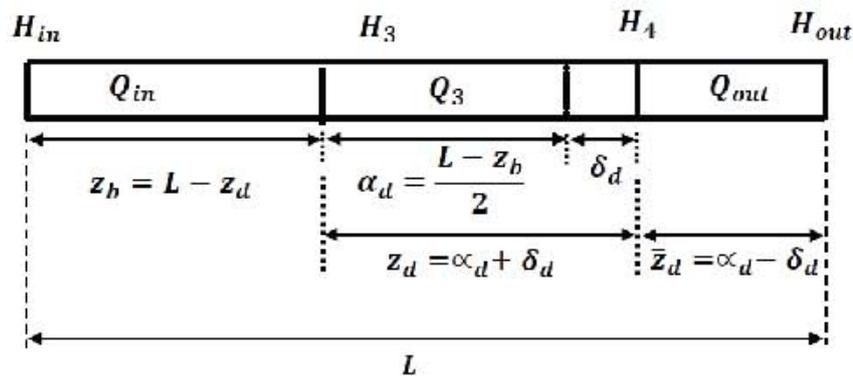


Fig. 4.4 Descripción de los segmentos aguas abajo con el parámetro incremental δ_d .

Estas relaciones hacen suponer que si, es posible estimar el estado x_{u_3} o x_{d_3} según sea el caso, la posición incremental de la fuga δ_u o δ_d se obtiene con ayuda de de las Ecs. 4.9 o 4.10. Esta idea se explota usando los modelos nominales con fallas, vía estimadores de estados.

4.2 Problema de identificación

La identificación de parámetros de sistemas dinámicos requiere de señales de entrada que cambian de forma periódica, estocástica o tienen formas específicas de prueba. Estas señales pueden corresponder a señales normales de operación y señales auxiliares introducidas una vez que las fallas se han detectado, o durante pruebas de mantenimiento (Isermann, 2006 *a*). En el caso del localizador de fugas en un ducto, diversos grupos de ingeniería civil (Ferrante y Brunone, 2003) sugieren usar técnicas de reflectometría a través de maniobras en las válvulas e identifican los parámetros de fuga en la onda de presión provocada por las perturbaciones. Sin embargo, estas técnicas de diagnóstico no se ejecutan en línea y en el caso de hidrocarburos, es difícil identificar a partir de la onda de presión la posición de la fuga correspondiente (Colombo *et al.*, 2009).

Una desventaja del problema que nos ocupa desde el punto de vista de adaptación e identificación de sistemas es que los modelos 4.6 y 4.7, con los parámetros δ_u y δ_d a determinar, no puede llevarse fácilmente a la forma de un regresor o de aproximadores polinomiales (Isermann y Münchhof, 2011), (Bastin y Gevers, 1988). Adicionalmente, la selección del método de identificación debe considerar las siguientes características:

1. Los intervalos de identificabilidad de las posiciones están acotados por arriba y por abajo

por

$$|\alpha_u| > \delta_u + \epsilon \quad \text{y} \quad |\alpha_d| > \delta_d + \epsilon$$

con ϵ como una distancia pequeña en relación con la longitud total L del ducto. En consecuencia, es necesario usar algoritmos de identificación en tiempo real que permitan manejar espacios de búsqueda restringidos.

2. En ausencia de fugas los parámetros δ_u y δ_d pueden tomar cualquier valor dentro de sus espacios de búsqueda respectivos, debido a que esto es un artificio para incluir el estado que se asocia a la fuga en el tramo en el modelo nominal.
3. La presencia de una fuga en la sección aguas arriba o aguas abajo introduce una perturbación en los modelos 4.7 o 4.6. Este hecho se debe a que se asumió solamente la presencia de una fuga al seleccionar la transformación en cada uno de los espacios en \mathbb{R}^5 .
4. La función de sensibilidad de la salida de los subsistemas con respecto a la posición nominal son siempre positivas para fugas aguas arriba del ramal z_b (es decir, $\delta_u \neq 0$) y negativa en el caso contrario ($\delta_d \neq 0$).
5. El tercer estado x_{u_3} y x_{d_3} de los dos modelos respectivos está linealmente relacionado en estado permanente con variables conocidas y la posición incremental respectiva δ_u y δ_d . Si $\alpha_u = z_b/2$ y $\alpha_d = \bar{z}_b/2$ las relaciones están dadas por las Ecs. 4.9 y 4.10.
6. La función no lineal $|v|v$ en el modelo puede asumirse del tipo cuadrática y localmente Lipschitz dado que el rango de operación de los flujos está acotado por arriba y siempre es positivo (Rajamani y Cho, 1998). Para el caso de estudio, los flujos toman valores alrededor de 10^{-3} , por lo que la condición siempre se satisface.
7. Tanto el vector de entrada u , como el de salida y están acotados y son siempre positivos. Además $u_3 < y_1$ y $u_1 > u_2$, aún en condiciones de la fuga.

Estas características fueron tomadas en cuenta, entonces, se pueden usar las siguientes propuestas para localizadores:

Loc1: Diseñar un generador de residuos con capacidad de identificar, por un lado, la orientación de la fuga con respecto al ramal vía el signo del residuo, y por el otro, la posición de ésta. Se busca un observador que tenga ambas capacidades.

Loc2: Usar el selector estático desarrollado previamente para identificar la orientación de la fuga y generar un modelo aumentado con el parámetro a identificar como nuevo estado,

tal que se pueda diseñar un observador para cada posición. Tomando en cuenta que los observadores también pueden ser usados como identificadores (Isermann y Münchhof, 2011), se puede reformular el problema de estimar la fuga directamente con un observador. Para ello es necesario extender el vector de estado en los modelos inciertos y suponer una dinámica del parámetro a identificar. En el caso de la posición de la fuga se consideraría $\dot{\delta}_u = 0$ o $\dot{\delta}_d = 0$ según corresponda. Esto lleva al problema de diseñar un observador para el espacio extendido, pero con el modelo incierto en lugar del nominal. Esto implica que debe verificarse que el sistema incierto y aumentado puede transformarse a la forma canónica observable no lineal, antes de diseñar el observador. Verde *et al.* (2016) han reportado el diseño de un EKF considerando el espacio extendido para identificar la posición directa de la fuga. Sin embargo, no se dispone de la prueba formal de la observabilidad local del sistema aumentado.

Loc3: Usar el selector estático desarrollado en el capítulo 3 para identificar la orientación de la fuga y estimar vía el observador respectivo la posición de la fuga.

En particular, se ha seleccionado el procedimiento Loc3 para el diseño. Esto implica que se diseñan dos observadores cada uno con capacidad de estimar correctamente la posición de la fuga aguas arriba δ_u o la de aguas abajo δ_d , y a partir de un estimador independiente de la orientación de la fuga con respecto al ramal, se selecciona cuál de las dos posiciones estimadas identifica correctamente la fuga presente.

4.3 Localizador

4.3.1 Formulación del problema

Considerando que los flujos están acotados y son unidireccionales, las estructuras 4.6 y 4.7, con la matriz de salida $C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, se pueden llevar a la forma de un sistema nominalmente localmente observable (Gauthier *et al.*, 1992). Es decir, pueden escribirse como

$$\dot{\xi} = A\xi + Bu + Gy_1 + \bar{\varphi}(\xi, u, y_1) \quad (4.11)$$

donde, la matriz A tiene la forma triangular superior, el campo vectorial no lineal $\bar{\varphi}(\xi, u, y_1)$ tiene una estructura triangular y localmente Lipschitz en ξ .

Por tanto, existe un observador nominal identidad para el modelo (4.11)

$$\dot{\hat{\xi}} = A\hat{\xi} + Bu + Gy_1 + \bar{\varphi}(\hat{\xi}, u, y_1) + K(\hat{\xi}, u)(y_1 - C\hat{\xi}) \quad (4.12)$$

donde la ganancia $K(\hat{\xi}, u)$ se debe diseñar de tal forma que el error de observación $e = \xi - y_1$, converga a cero. En el caso de diagnóstico de fugas, el modelo 4.12 puede ser visto como un generador de residuos con el residuo igual al error del observador $r = e$ (Frank *et al.*, 1999). Para ello se requiere que el mapeo del espacio de la posición de la fuga al espacio del residuo r sea diferente de cero; es decir, el sistema interconectado con el observador debe ser entrada-observable con respecto a la posición de la fuga. Dado que, tanto el modelo nominal como el incierto son estables para los valores permitidos de δ_u y δ_d , según corresponda, el observador identidad con $K = 0$, es estable. Así que se puede obtener la región del residuo para las posiciones físicas permitidas. En particular, la Fig 4.5 muestra el comportamiento de dos residuos con observadores en lazo abierto. Uno para el escenario de fuga aguas arriba denotado r_u y para fugas aguas abajo denotado r_d . Se presenta además como residuo secundario la suma de ambos residuos bases, es decir $r_u + r_d$. El comportamiento de estos residuos vistos como salidas, en cada caso, es sensible a las posiciones de las fugas respectivas, por tanto, implica que existen observadores detectores de fallas. Una propiedad del error de salida de los observadores de la forma 4.12 pueden ser usados como detectores de la orientación de la fuga con respecto al ramal. Esto último, debido a que los residuos son positivos para fugas aguas arriba y negativos para aguas abajo. Esta propiedad de los errores de la salida de los observadores es muy particular del problema de detección planteado y no siempre se cumple.

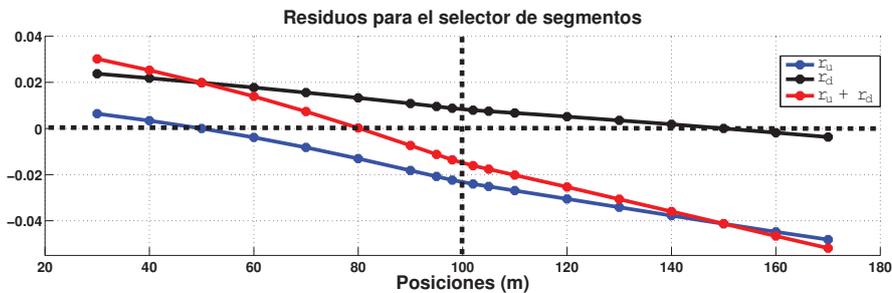


Fig. 4.5 Comportamiento estático de los errores de salida, tanto aguas arriba como abajo del ramal con un observador en lazo abierto para todo el rango posible de posiciones de la fuga.

Existen diferentes métodos para diseñar un observador del tipo 4.12. A continuación se presentan los procedimientos considerados para generar el residuo y estimar la posición de la fuga ya sea aguas arriba o aguas abajo del ramal.

4.3.1.1 Observador de gran ganancia.

Los observadores de sistemas dinámicos son herramientas típicas para recobrar su estado inicial a partir de $\dot{x} = f(x, u)$ con el vector de entrada u y el de salida $y = h(x)$, si el modelo satisface ciertas condiciones (Besançon, 2007). Para el diseño de un observador de gran ganancia, a partir del modelo nominal (4.11), se puede verificar que se satisfacen las hipótesis clásicas, es decir:

- El sistema 4.11 es observable sin alguna desviación, es decir, con $\delta_u = 0$.
- El campo vectorial de no linealidades $\bar{\varphi}(u, \xi)$ es triangular. En otras palabras, cada uno de sus componentes se puede reescribir en la forma $\bar{\varphi}_i(\xi) = \bar{\varphi}_i(\xi_1, \dots, \xi_i)$ para $i = 1, \dots, n$.
- Además, el campo vectorial $\bar{\varphi}(u, \xi)$ es localmente Lipschitz con respecto al estado, es decir $\|\bar{\varphi}(\xi_1, u) - \bar{\varphi}(\xi_2, u)\| \leq \ell_{\bar{\varphi}} \|x_1 - x_2\|$.
- Existe una transformación, Γ , que permite llevar el sistema (4.11) a la forma observable para $\delta_z = 0$.

Por tanto, se puede diseñar un observador clásico de gran ganancia con la estructura siguiente:

$$\dot{\hat{\xi}} = A\hat{\xi} + Bu + Gy_1 + \bar{\varphi}(u, \hat{\xi}, y_1) + \left[\frac{\partial \Gamma}{\partial \hat{\xi}} \right]^{-1} P^{-1} C^T (y - C\hat{\xi}), \quad (4.13)$$

donde S es la solución única de

$$\lambda P + A^T P + PA = C^T C. \quad (4.14)$$

Si el ducto está en condiciones nominales, o incluso si se tiene una fuga en la posición prescrita α_u (o α_d), el error de estimación convergerá exponencialmente a cero. De otra manera, el error de estado $\xi - \hat{\xi}$ convergerá a un error. En la sección B.2 del apéndice, se prueba que dicho error está acotado por la máxima constante de Lipschitz y puede ser definida como el residuo $r(t) = \xi - \hat{\xi}$.

4.3.1.2 Filtro de Kalman extendido.

El sistema (4.11) puede reescribirse como (Gelb, 1994)

$$\dot{\xi} = f(\xi, u) + w(t), \quad w(t) \sim \mathcal{N}(0, Q), \quad (4.15)$$

con ruido aleatorio de media cero $w(t)$ con matriz espectral de densidad $W(t)$, cuya salida está dada por

$$y(t) = C\xi + v(t), \quad v(t) \sim \mathcal{N}(0, R(t)),$$

también con un ruido aleatorio $v(t)$ que no está correlacionado con $w(t)$.

Además, considerando que la condición inicial $x(0) \sim \mathcal{N}(\hat{\xi}_u(0), P(0))$ y la expansión en series de potencia de $f(\xi, u, t)$ conlleva a

$$f(\xi, u, t) - f(\hat{\xi}, u, t) = F(t)(\xi - \hat{\xi}_u) + \gamma(\xi, \hat{\xi}_u, u),$$

donde la matriz Jacobiana $F = \frac{\partial f(\xi, u)}{\partial \xi}$ es evaluada en $\xi = \hat{\xi}$ y $\gamma(\xi, \hat{\xi}, u)$ incluye los términos de orden superior. Entonces, la estimación del estado del sistema alrededor del punto $\hat{\xi}$ está dada por

$$\dot{\hat{\xi}}(t) = f(\hat{\xi}, u, t) + K(t)(y - C\hat{\xi}), \quad (4.16)$$

donde la matriz de ganancia de Kalman se calcula mediante $K(t) = P(t)C^T R^{-1}(t)$, y la matriz de error de covarianza satisface la ecuación dinámica de Riccati:

$$\dot{P}(t) = (F(t) + I\eta)P(t) + P(t)(F(t) + I\eta)^T + Q(t) - P(t)CR^{-1}(t)CP(t), \quad (4.17)$$

evaluando en cada momento la matriz Jacobiana $F(t)$. El término $\eta > 0$ prescribe un grado de estabilidad e incrementa el dominio de convergencia de la estimación (Reif *et al.*, 1998). Además, se tiene que el sistema (B.12) es un observador exponencial de (4.15) si la ecuación diferencial

$$\dot{e} = (F(t) - K(t)C)e + \gamma(\xi, \hat{\xi}, u)$$

del error de estimación $e = \xi - \hat{\xi}$ tiene un punto de equilibrio exponencialmente estable en el origen (Reif *et al.*, 1998).

A continuación, se describe con detalle el procedimiento usando ambos observadores (HGO y EKF) para determinar la posición de la fuga para el localizador aguas arriba, que debido a la similitud de las estructuras 4.6 y 4.7, para el escenario aguas abajo se describe solamente la expresión de la posición de fuga $\hat{z}_d = z_b + \alpha_d + \hat{\delta}_d$, con respecto a la posición preestablecida α_d .

4.3.2 Localizador aguas arriba

Tomando como punto de partida el escenario de fuga aguas arriba de la toma lateral, se tiene el siguiente modelo nominal e incierto.

Para el caso nominal, $\delta_u = 0$

$$\begin{aligned} \dot{x}_u &= A_u x_u + B_u u + G_u y_1 + \varphi_u(x_u, u, y_1) \\ y_u &= x_{u_1} \end{aligned} \quad (4.18)$$

en donde

$$A_u = \begin{pmatrix} 0 & \frac{a_1}{\bar{z}_b} & 0 \\ -\frac{a_2}{\alpha_u} & 0 & \frac{a_2}{\alpha_u^2} \\ 0 & -a_1 & 0 \end{pmatrix}; \quad B_u = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{a_1}{\bar{z}_b} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_2}{\alpha_u} \\ a_1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad G_u = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{a_2}{\alpha_u} \\ 0 \end{pmatrix}; \quad (4.19)$$

$$\varphi_u(x_u, u, y_1) = \begin{pmatrix} -\mu|x_{u_1}|x_{u_1} \\ 0 \\ -\mu\alpha_u\left|\frac{x_{u_3}}{\alpha_u} - y_1\right|\left(\frac{x_{u_3}}{\alpha_u} - y_1\right) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu\alpha_u|y_1|y_1 \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

y cuando $\delta_u \neq 0$,

$$\begin{aligned} \dot{x}_u &= A_u x_u + B_u u + G_u y_1 + \varphi_u(x_u, u, y_1) + \Delta_{\varphi_u}(x_u, u, y_1, \delta_u) \mathcal{U}_u(\tau_u) \\ y_u &= x_{u_1} \end{aligned} \quad (4.21)$$

con el campo vectorial $\Delta_{\varphi_u}(x_u, u, y_1, \delta_u)$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ -a_2 \left(\frac{1}{\alpha_u^2} - \frac{1}{(\alpha_u - \delta_u)^2} \right) x_{u_3} + a_2 \left(\frac{1}{\alpha_u} - \frac{1}{\alpha_u - \delta_u} \right) (u_3 + x_{u_1}) + a_2 \left(\frac{1}{\alpha_u} - \frac{\alpha_u + \delta_u}{(\alpha_u - \delta_u)^2} \right) y_1 \\ -\mu\delta_u|y_1|y_1 - \mu\frac{(\alpha_u + \delta_u)^2}{\alpha_u - \delta_u} \left| \frac{x_{u_3}}{\alpha_u + \delta_u} - y_1 \right| \left(\frac{x_{u_3}}{\alpha_u + \delta_u} - y_1 \right) + \mu\alpha_u \left| \frac{x_{u_3}}{\alpha_u} - y_1 \right| \left(\frac{x_{u_3}}{\alpha_u} - y_1 \right) \end{pmatrix} \quad (4.22)$$

Independientemente del método usado para calcular la ganancia $K(z, u)$ del observador (4.12) que garantice la convergencia del error a cero en condiciones normales, la ecuación dinámica del error de observación $e_u = x_u - z$ en condiciones de fuga para el modelo incierto 4.21 se puede escribir como

$$\dot{e}_u = A_u e_u + K(z, u) C e_u + \underbrace{\varphi_u(u, x_u, y_1) - \varphi_u(u, z, y_1) + \Delta_{\varphi_u}(x_u, u, y_1, \delta_u) \mathcal{U}_u(\tau_u)}_{\Theta_u(u, x_u, z, y_1, \delta_u)} \quad (4.23)$$

con el vector Θ_u asociado a los términos inciertos y no lineales

$$\begin{aligned} \Theta_{u_1} &= -\mu(|x_{u_1}|x_{u_1} - |z_1|z_1) \\ \Theta_{u_2} &= a_2 \left(\frac{1}{(\alpha_u - \delta_u)^2} - \frac{1}{\alpha_u^2} \right) x_{u_3} + a_2 \left(\frac{1}{\alpha_u} - \frac{1}{\alpha_u - \delta_u} \right) (u_3 + x_{u_1}) + a_2 \left(\frac{1}{\alpha_u} - \frac{\alpha_u + \delta_u}{(\alpha_u - \delta_u)^2} \right) y_1 \\ \Theta_{u_3} &= \mu\alpha_u \left| \frac{z_3}{\alpha_u} - y_1 \right| \left(\frac{z_3}{\alpha_u} - y_1 \right) - \mu\delta_u|y_1|y_1 - \mu \left(\frac{(\alpha_u + \delta_u)^2}{\alpha_u - \delta_u} \right) \left| \frac{x_{u_3}}{\alpha_u + \delta_u} - y_1 \right| \left(\frac{x_{u_3}}{\alpha_u + \delta_u} - y_1 \right) \end{aligned}$$

con el residuo $r_u = x_{u_1} - z_{u_1}$.

Tomando en cuenta que las ganancias de los observadores diseñados son constantes, los puntos de equilibrio de los errores de observación se pueden obtener directamente en función de la incertidumbre δ_u igualando a cero la Ec. 4.23 y resolviendo el sistema de ecuaciones algebraicas resultantes. A continuación se analizan las propiedades de los puntos de equilibrio.

4.3.2.1 Selector y estimador de δ_u .

Considerando el caso de una fuga aguas arriba, con un observador nominal con K_u constante, y tomando en cuenta que Δ_{φ_u} es un vector acotado en el intervalo de búsqueda, los puntos de equilibrio del error de observación en términos de δ_u se obtienen resolviendo directamente el sistema de ecuaciones no lineales

$$\begin{pmatrix} K_{u_1} & -\frac{a_1}{\bar{z}_b} & 0 \\ K_{u_2} + \frac{a_2}{\alpha_u} & 0 & -\frac{a_2}{\alpha_u^2} \\ K_{u_3} & a_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{u_1} \\ e_{u_2} \\ e_{u_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Theta_{u_1} \\ \Theta_{u_2} \\ \Theta_{u_3} \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Al sustituir el estado x_{u_3} por su valor en estado permanente expresado por la Ec. 4.9, el sistema se reduce a

$$\begin{aligned} 0 &= -\mu(|y_u|y_u - |y_u - e_{u_1}|(y_u - e_{u_1})) - K_{u_1}e_{u_1} + \frac{a_1}{\bar{z}_b}e_{u_2} \\ 0 &= -(K_{u_2} + \frac{a_2}{\alpha_u})e_{u_1} + \frac{a_2}{\alpha_u^2}e_{u_3} + \frac{a_2\delta_u}{\alpha_u^2}(u_3 + y_u - y_1) \\ 0 &= -K_{u_3}e_{u_1} - a_1e_{u_2} - \delta_u\mu y_1^2 - \mu(\alpha_u - \delta_u)|u_3 + y_u|(u_3 + y_u) \\ &\quad + \frac{\mu}{\alpha_u}|e_{u_3} - (u_3 + y_u)(\alpha_u - \delta_u) - \delta_u y_1|(e_{u_3} - (u_3 + y_u)(\alpha_u - \delta_u) - \delta_u y_1) \end{aligned} \quad (4.25)$$

Se observa que el punto de equilibrio e_u es función de la incertidumbre δ_u y de variables medibles, de forma no lineal, y se acota cuando $|\delta_u| < \alpha_u$. Tomando en cuenta que e_{u_1} corresponde al residuo y se genera vía el observador, se pueden expresar e_{u_2} y e_{u_3} en términos de e_{u_1} , δ_u directamente de la primera y segunda ecuación del sistema 4.25. Por otro lado, despejando el valor del parámetro desconocido δ_u en términos del residuo $r = e_1$ en la última ecuación se obtiene

$$\delta_u = \frac{a_2^r(K_1^u \bar{z}_b + K_3^u) + 2a_2(\alpha^u)^2 r_1^u K_2^u \mu (u_4^u + y^u) - (\alpha^u)^3 (r_1^u)^2 (K_2^u)^2 \mu}{a_2^2 \mu (u_4^u - u_3^u + y^u)(u_3^u + u_4^u + y^u)}. \quad (4.26)$$

Si se consideran los peores escenarios de la posición δ_u tanto el segundo como el tercer término del numerador de la expresión (4.26) pueden ser despreciados, así que se puede usar la aproximación

$$\hat{\delta}_u \cong \frac{a_2^r (K_1^u \bar{z}_b + K_3^u)}{a_2^2 \mu (u_4^u - u_3^u + y^u)(u_3^u + u_4^u + y^u)} \quad (4.27)$$

para estimar δ_u . Esto implica que la Ec. 4.27 puede ser utilizada para estimar la posición real $z_u = \alpha_u + \hat{\delta}_u$ de la fuga aguas arriba del ramal. Esta relación puede usarse independientemente de la ganancia del observador, siempre y cuando su ganancia sea constante y se tenga convergencia

a cero en el caso nominal. Obviamente, el comportamiento dinámico del observador determina la rapidez del tiempo de convergencia del estimado de δ_u . Por ello, es importante considerar los dos tipos de observadores, el HGO y el EKF.

Los valores utilizados para el diseño del observador aguas arriba con el modelo nominal 4.18 fueron:

- Ganancia para el observador HGO $K = [\partial\Gamma/\partial\hat{x}]^{-1} P^{-1} C^T$ con $\delta_u = 0$,

$$K = \left(\frac{1}{\lambda}, \quad -\frac{\bar{z}_b}{\lambda^2 a_1}, \quad \frac{(\alpha_u)^2 \bar{z}_b}{\lambda^3 a_1 a_2} \right)^T. \quad (4.28)$$

- Matrices de peso del Filtro de Kalman Extendido con el parámetro de estabilidad robusta $\eta = 0.05$

$$P(0) = I, \quad W = I \quad y \quad R = 10. \quad (4.29)$$

4.3.3 Localizador aguas abajo

De forma similar al escenario de una fuga aguas arriba, para una fuga ubicada aguas abajo se parte del modelo nominal con $\delta_d = 0$

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u + G_d y_2 + \varphi_u(x_d, u, y_2) \\ y_d = x_{d_1} \end{cases} \quad (4.30)$$

donde

$$A_d = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{a_1}{z_b} & 0 \\ \frac{a_2}{z_b} & 0 & -\frac{a_2}{\alpha_d z_b} \\ 0 & a_1 & 0 \end{pmatrix}; \quad B_d = \begin{pmatrix} \frac{a_1}{z_b} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a_2}{z_b} \\ 0 & -a_1 & 0 \end{pmatrix}; \quad G_d = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{a_2}{z_b} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

$$\varphi_d(x_d, u, y_2) = \begin{pmatrix} -\mu |x_{d_1}| x_{d_1} \\ 0 \\ -\mu \alpha_d \left| \frac{x_{d_3}}{\alpha_d} - y_2 \right| \left(\frac{x_{d_3}}{\alpha_d} - y_2 \right) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\mu \alpha_d |y_2| y_2 \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

Para el caso incierto, $\delta_d \neq 0$

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_d x_d + B_d u + G_d y_2 + \varphi_d(x_d, u, y_2) + \Delta_{\varphi_d}(x_d, u, y_2, \delta_d) \mathcal{U}_d(\tau_d) \\ y_d = x_{d_1} \end{cases} \quad (4.33)$$

con el campo vectorial $\Delta_{\varphi_d}(x_d, u, y_2, \delta_d)$ que caracteriza la incertidumbre

$$\begin{pmatrix} 0 \\ \frac{a_2 x_{d_3}}{z_b} \left(\frac{1}{\alpha_d} - \frac{1}{\alpha_d + \delta_d} \right) + \frac{a_2 y_2}{z_b} \left(\frac{\alpha_d - \delta_d}{\alpha_d + \delta_d} - 1 \right) \\ \mu \delta_d |y_2| y_2 + \frac{\mu}{\alpha_d} |x_{d_3} - \alpha_d y_2| (x_{d_3} - \alpha_d y_2) - \frac{\mu}{\alpha_d + \delta_d} |x_{d_3} - (\alpha_d - \delta_d) y_2| (x_{d_3} - (\alpha_d - \delta_d) y_2) \end{pmatrix} \quad (4.34)$$

Independientemente del tipo de observador empleado, el error para el caso de fuga aguas abajo de la extracción se reduce a

$$\dot{e}_d = A_d e_d + K(z, u) C e_d + \underbrace{\varphi_d(u, x_d, y_2) - \varphi_d(u, z, y_2) - \Delta_{\varphi_d}(x_d, u, y_2, \delta_d) \mathcal{U}_d(\tau_d)}_{\Theta_d(u, x_d, \hat{x}_d, y_2, \delta_d)} \quad (4.35)$$

con el vector Θ_d asociado a los términos inciertos y no lineales

$$\begin{aligned} \Theta_{d_1} &= -\mu(|x_{d_1}|x_{d_1} - |z_1|z_1) \\ \Theta_{d_2} &= \frac{a_2 x_{d_3}}{z_b} \left(\frac{1}{\alpha_d} - \frac{1}{\alpha_d + \delta_d} \right) + \frac{a_2 y_2}{z_b} \left(\frac{\alpha_d - \delta_d}{\alpha_d + \delta_d} - 1 \right) \\ \Theta_{d_3} &= \mu \delta_d |y_2| y_2 + \frac{\mu}{\alpha_d} |z_3 - \alpha_d y_2| (z_3 - \alpha_d y_2) - \frac{\mu}{\alpha_d + \delta_d} |x_{d_3} - (\alpha_d - \delta_d) y_2| (x_{d_3} - (\alpha_d - \delta_d) y_2) \end{aligned}$$

con el residuo $r_d = x_{d_1} - z_1$. Siguiendo un procedimiento similar al escenario de fuga aguas arriba, para el cálculo del selector y la estimación de δ_d , se puede estimar a partir del residuo $r = y_d - z_1$ la posición relativa de la fuga a través de

$$\hat{\delta}_d = \frac{r_1^d (a_2^2 (-\alpha^d \mu r_1^d - 2\alpha^d \mu (u_4^d - y^d) + K_1^d z_b + K_3^d)) + \alpha^d \mu K_2^d z_b (2a_2 (u_4^d + r_1^d - y^d) - K_2^d r_1^d z_b)}{a_2^2 \mu (u_3^d + u_4^d - y^d) (u_3^d - u_4^d + y^d)} \quad (4.36)$$

Si se consideran los peores escenarios de la posición δ_d , la expresión 4.36 se puede aproximar mediante

$$\hat{\delta}_d \cong \frac{r_1^d (K_3^d) + K_1^d z_b}{\mu (u_3^d + u_4^d - y^d) (u_3^d - u_4^d + y^d)} \quad (4.37)$$

determinando así la posición real $z_d = z_b + \alpha_d + \hat{\delta}_d$ de fuga. En este caso, se realiza el cálculo de r empleando tanto un HGO como un EKF, diseñados con el modelo nominal (4.30). Las matrices de ganancia de ambos observadores se seleccionaron con los mismos valores que para el caso de fugas aguas arriba, es decir usando las Ecs. 4.28 y 4.29.

4.4 Resultados

Esta sección presenta los resultados del comportamiento de los localizadores tanto con el HGO como el EKF. Se consideran como escenarios de fuga alternadamente el caso de aguas abajo y aguas arriba. Se incluyen resultados obtenidos con datos sintéticos y con datos reales tomadas del ducto piloto de cuatro pulgadas de diámetro ubicado en el laboratorio de hidromecánica del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

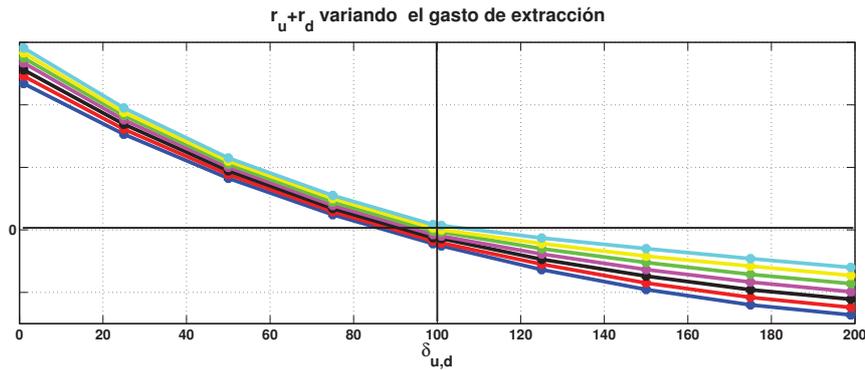


Fig. 4.6 Comportamiento de la suma de residuos $r_u + r_d$ con distintos flujos de extracción en la posición 100 [m] y diversas posiciones de fuga con datos sintéticos.

4.4.1 Desempeño con datos sintéticos

En la Sección 4.3, se mencionó que era posible utilizar un residuo-selector estático para conocer la posición relativa de la misma con respecto a la extracción y hacer uso de éste para la selección del localizador correcto. Sin embargo, también se puede generar un residuo función de los dos errores de los observadores para aguas arriba y abajo. La Fig. 4.6 muestra el comportamiento de la suma de los dos residuos obtenidos vía el EKF para diferentes puntos de operación. Se aprecia de la familia de residuos que reflejan vía su signo, la posición relativa de la fuga con respecto al ramal. Es decir $r_u + r_d$ mayor que cero implica que la fuga está a la izquierda del ramal y el caso contrario cuando la suma es negativa. Así que $r_u + r_d$ representa un residuo dinámico apropiado para determinar la posición relativa de la fuga con respecto al ramal. Se aprecia de la familia de gráficas el comportamiento ante cambios de operación en el gasto del ramal prevaleciendo el signo indicando la posición relativa de la fuga en cada caso.

La Fig. 4.7 ilustra el comportamiento de los estimados de las posiciones de una fuga aguas arriba de la toma lateral a ($z_u = 50\text{ m}$) del tanque obtenidos con un EKF y con un HGO para datos sintéticos simulados en Matlab. Se considera el sistema en equilibrio y de manera adicional se provoca un cambio de operación para analizar el desempeño de los dos estimadores a los 150 s. Puede apreciarse que los localizadores dinámicos logran estimar bien la posición simulada de fuga. El HGO converge más rápido al valor predefinido, aunque el EKF es menos sensible ante el cambio del punto de operación. Al comparar estos cálculos con los obtenidos con un modelo estático en el Capítulo 3, Fig. 3.7, donde la expresión de la posición no puede aplicarse en ausencia de fuga y ante cambios en el punto de operación, se concluye que el cálculo de la posición indirecta con el estimador dinámico es menos sensible ante variaciones en la operación del fluido y ausencia de fugas, por tanto, reduciría las falsas alarmas en caso

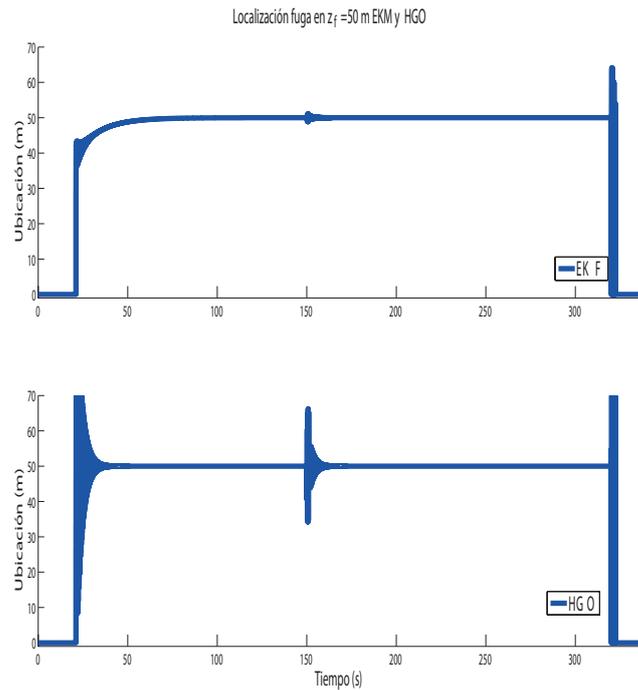


Fig. 4.7 Comportamiento de estimador de la posición de la fuga aguas arriba con un HGO y un EKF para datos sintéticos.

de su implementación en un sistema real.

Con el propósito de analizar el desempeño de los localizadores ante diversas posiciones de fuga, se realizó una prueba con los mismos parámetros del ducto dados en la Tabla 2.1, considerando la longitud de 200 m y ubicando la extracción justo en el punto medio, es decir 100 m . Se simularon diez intervalos de fugas, la mitad aguas arriba y el resto aguas abajo de la extracción. Las posiciones de las fugas simuladas se muestran en la Tabla 4.1, donde se presenta también el valor en estado permanente al que convergen los localizadores. En todos los casos, los errores de las posiciones son despreciables. El comportamiento temporal de los localizadores puede apreciarse en la Fig. 4.8, donde se muestra tanto el residuo detector de posición relativa como el localizador de la fuga.

Tabla 4.1 Posiciones simuladas $z_{u,d}$ y estimadas $\hat{z}_{u,d}$ para diez fugas.

$z_{u,d}\text{ m}$	10	30	50	70	90	110	130	150	170	190
$\hat{z}_{u,d}\text{ m}$	9.9	29.9	49.9	69.8	89.2	110.	130.	150.	169.9	189.8

Para analizar la evolución de los residuos ante cambios en los puntos de operación, se realizó

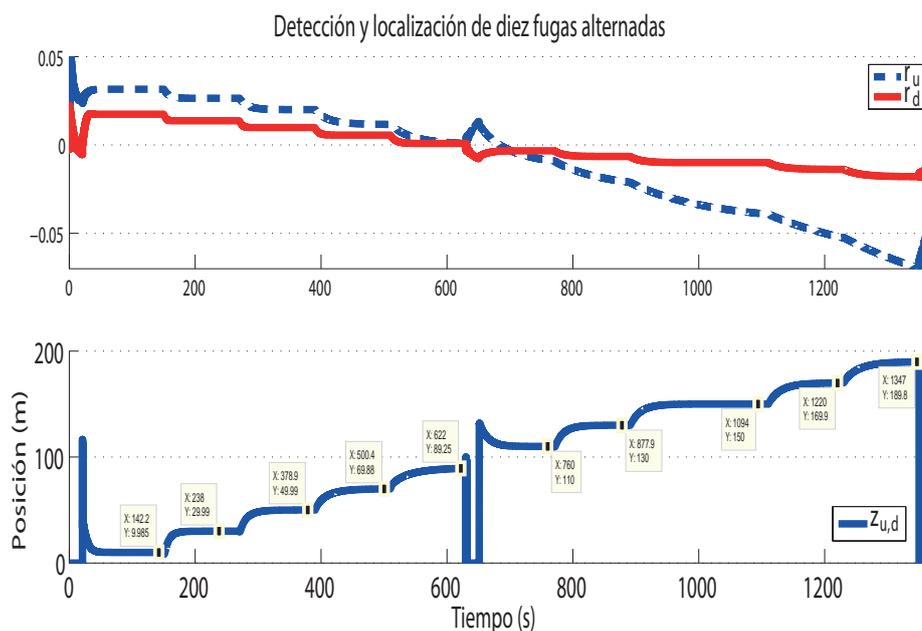


Fig. 4.8 Comportamiento de los dos residuos diseñados con un EKF y de los localizadores para las diez fugas alternadas con datos sintéticos.

una simulación considerando dos fugas alternadas ubicadas a $30m$ y $130m$ respectivamente del origen del ducto. El cambio en el punto de operación se produjo haciendo variar el gasto en la extracción con posición conocida con valores de 20 %, 40 %, 60 % y 80 % con respecto al gasto nominal del flujo de entrada. La Fig. 4.9 muestra la evolución del gasto del ramal y de las posiciones, también se aprecia en general que el detector es poco sensible ante los cambios de operación de los flujos de extracción, como es deseable.

4.4.2 Desempeño con datos reales

Con objeto de validar los localizadores con datos experimentales se realizaron pruebas con diversas condiciones de fuga. Estas pruebas se realizaron en la planta piloto del Instituto de Ingeniería de la UNAM, cuyas características y especificaciones se describieron en la Sección 2.4. A continuación se describen los resultados más interesantes que permiten visualizar detalles que deben mejorar para robustecer los localizadores y que se analizan en las conclusiones de este trabajo.

Primeramente, se realizó un experimento emulando el escenario de un ducto con una fuga y un ramal, es decir, el caso de una fuga en un ducto con una extracción fija o ramal. Para este fin,

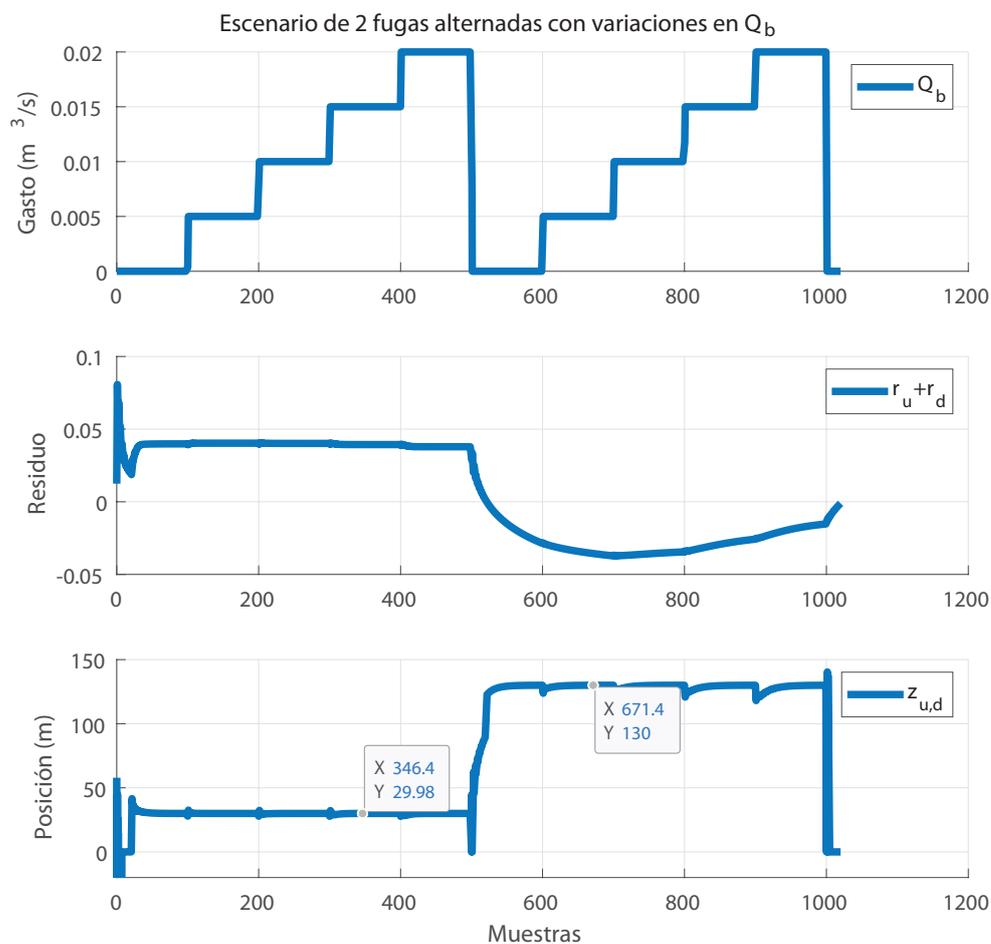


Fig. 4.9 Evolución del gasto de extracción, de los residuos y la posición estimada de dos fugas alternadas aguas arriba y abajo con datos sintéticos.

se consideró la válvula 4 como la de extracción y se fue abriendo y cerrando de manera secuencial cada una de las otras cinco válvulas, de modo que se provocaron tres fugas aguas arriba y otras dos aguas abajo de la extracción fija. Los datos de este experimento fueron capturados en un periodo de muestreo de 0.1 s, las posiciones de las válvulas se pueden consultar en la Tabla 2.2. En cada caso, la estimación de la posición se llevó a cabo mediante las expresiones 4.27 o 4.37, según corresponda y con un EKF. En las Figuras 4.10 y 4.11, se presenta la evolución de los residuos y posiciones de las fugas ante la siguiente secuencia de acciones sobre las válvulas.

Experimento 1:

1. Durante las primeras 1668 muestras, es decir durante 166.8 s la tubería se mantuvo en

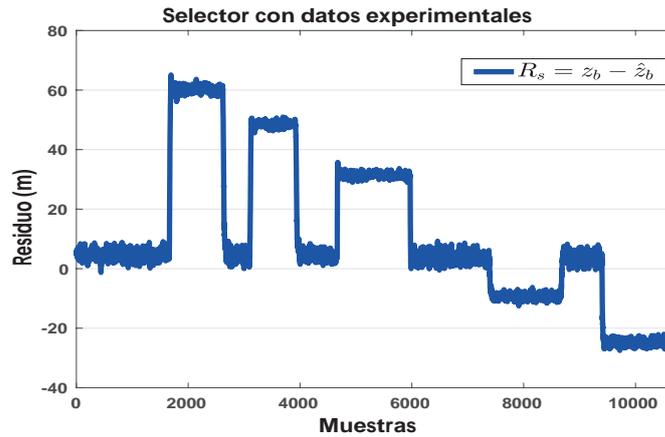


Fig. 4.10 Evolución del residuo estático $r_b(t)$ con la secuencia alternada de fugas implementada experimentalmente con periodo de muestreo de 0.1 s.

condiciones de operación normal sin fugas.

2. Durante el siguiente intervalo de los 166.9 s a los 261 s se abrió la válvula $V1$ dejando 50 s el ducto de nuevo en condición normal.
3. Durante los intervalos de tiempo de los 312 s a los 392.7 s y de los 467 s a la 597.2 s, se mantuvieron las válvulas $V2$ y $V3$ abiertas respectivamente con un intervalo entre maniobra y maniobra.
4. Durante los intervalos de 739 s a 866.9 s y de 940 s a 1065 s, se abrieron las válvulas $V5$ y $V6$ y se dió por terminado el experimento.

Se observa de los estimados del selector vía $r_b(t)$ y de la localización de cada fuga que el comportamiento transitorio ante cada fuga no es el mismo. Sin embargo, en estado estacionario los errores en las posiciones son relativamente satisfactorios.

Experimento 2: Para analizar el desempeño de los localizadores ante cambios en el flujo de fuga, se realizó un segundo experimento en el que la válvula $V2$ se abrió completamente y se fue cerrando de manera paulatina. Los estimados tanto de la posición de la fuga como del gasto de fuga se muestran en las Figs. 4.12 y 4.13, respectivamente. En este caso los datos también fueron muestreados cada 0.1 s. Debido a que en el momento que se realizó el experimento no se tenía disponible un medidor del flujo de fuga en la instalación, no fue posible verificar el mínimo valor de flujo detectado por el residuo. Lo que sí se pudo comprobar de las gráficas es que, siempre y cuando el residuo responda adecuadamente seleccionando el tramo donde se

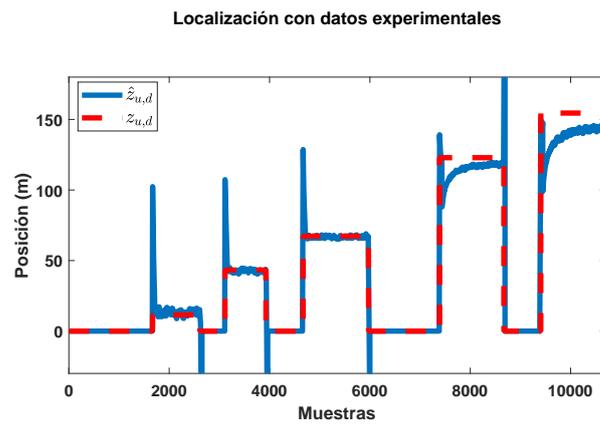


Fig. 4.11 Localización de la secuencia alternada de fugas con datos experimentales muestreados cada 0.1 s.

ubica la fuga, el detector ubica correctamente la posición.

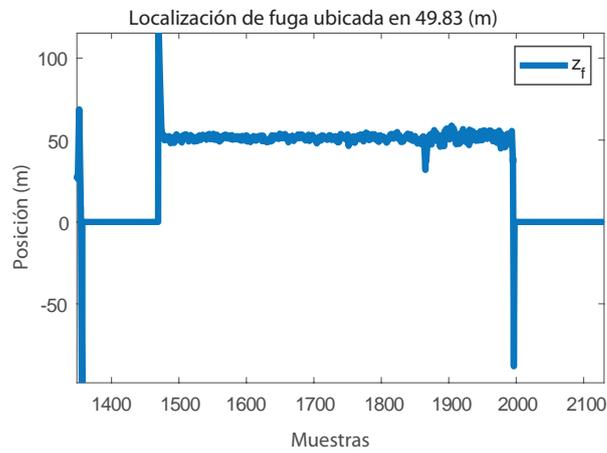


Fig. 4.12 Comportamiento del localizador con diferentes aperturas de la válvula de fuga y periodo de muestreo de 0.1 s

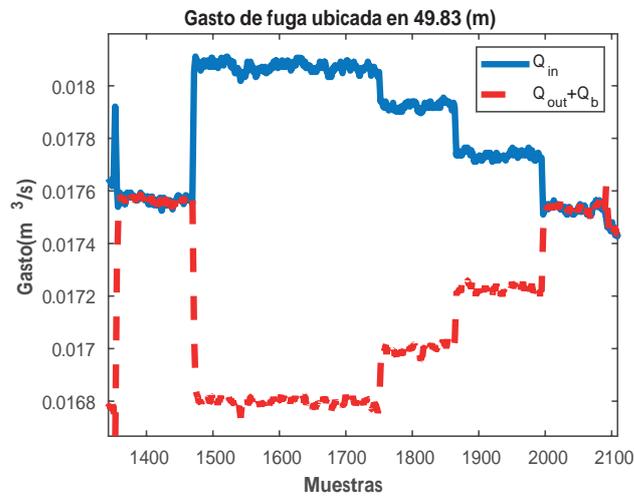


Fig. 4.13 Evolución de los gastos estimados para diferentes aperturas de la válvula de fuga y periodo de muestreo de 0.1 s

5 Conclusiones

En este trabajo de tesis, se propone una nueva metodología para detectar y localizar fugas en un ducto con extracciones, escenario poco estudiado hasta el momento pero muy común en instalaciones industriales. Lo novedoso del esquema propuesto, es la localización de los dos casos de fuga a partir de una desviación, δ_u o δ_d , según sea el caso, con respecto a una posición nominal predefinida. La estimación de dichas desviaciones se realizó utilizando dos observadores dinámicos de tercer orden (HGO y EKF), diseñados a partir de modelos nominales aproximados del comportamiento del fluido para ciertos escenarios de fugas. En particular, se considera que exista una fuga aguas arriba y otra aguas abajo de la extracción fija. Es importante resaltar el uso de los errores de observación, cuyos signos simplifican la tarea de detección y hacen las veces de selectores de la posición relativa de fuga ante los dos casos considerados. Tomando en cuenta que existen múltiples propuestas para generar un residuo a partir de un síntoma; en este trabajo se explotaron las características de los residuos para extraer información adicional de las condiciones de fallas, como es la ubicación de la fuga con respecto a la extracción.

Así, la idea de usar los errores de observación como detectores-selectores, es una contribución original que se encuentra reportada en las publicaciones derivadas de esta tesis, misma que ha sido muy poco explotada para el caso de la detección de fugas en ductos.

El escenario de fugas en un ducto con extracciones, se abordó en este trabajo mediante un enfoque estático, con expresiones algebraicas que estiman las respectivas posiciones de fuga. Estas expresiones tampoco se habían reportado previamente y las pruebas realizadas evidencian su utilidad. Sin embargo, las pruebas experimentales analizadas, revelan mejor desempeño ante cambios de operación del sistema, del esquema dinámico basado en observadores. Evidentemente, la implementación del enfoque dinámico requeriría mayor esfuerzo computacional para su implementación en tiempo real.

Existe gran cantidad de aplicaciones industriales donde se tiene la necesidad de detectar y localizar fugas en ductos, aunque, la implementación de una u otra de éstas, está siempre limitada por la topología del ducto, el análisis de riesgo de la instalación, el costo y la instrumentación, entre otros factores. En este sentido, no puede hablarse de un mejor método en general,

pero sí puede encontrarse una metodología (o conjunto de éstas) que ofrezca los mejores resultados para un conjunto de condiciones reales de las instalaciones. Esta visión de procedimientos hechos a medida de las necesidades de una aplicación para FDI, permitió el desarrollo de este trabajo que ha complementado el esfuerzo de otros desarrollados en el Instituto de Ingeniería en el tema de diagnóstico de fugas en ductos.

En particular, mi participación en el proyecto SENER-CONACYT-PEMEX titulado "*Sistema para la Detección de fugas y tomas clandestinas en ductos de gas y líquidos*", me motivó a formular un problema específico dentro del área de detección de fugas en ductos con ramales y proponer una solución realizable acorde con las metas del proyecto, con la colaboración de académicos del IMP, CICESE, UAM y de la UNAM.

Finalmente quiero hacer notar que en el contexto de FDI, aún existe gran cantidad de retos interesantes en el caso de transporte de fluidos por ductos y redes de ductos. Sin embargo, el éxito de los procedimientos basados en modelos analíticos está fuertemente ligada a la obtención de modelos precisos y a la adquisición de datos confiables del sistema, lo cual a su vez, depende de la instrumentación implementada en el sistema. Aspectos prácticos como, el transporte de fluidos multifase, redes con una demanda incierta, ducto con deterioro interno considerable y las condiciones de operación que alteran los gradientes de presión nominales, aún representan un reto para efectos de aplicabilidad de aportaciones teóricas.

En conclusión, este trabajo de tesis, utilizando herramientas conocidas dentro del campo de sistemas dinámicos, logró validar una metodología útil para detectar y localizar fugas ante escenarios industriales comunes. El principal beneficio de la metodología propuesta, es que su implementación puede realizarse mediante un simple algoritmo de FDI, sin requerimientos adicionales de instrumentación y sin afectar la operación de las instalaciones, lo cual representa una solución alcanzable a muy bajo costo ante problemas asociados a fugas y tomas clandestinas, problemas cada vez más frecuentes en el transporte de hidrocarburos en nuestro país.

A Aspectos prácticos del monitoreo de ductos

Actualmente existen diversas tecnologías con las que se pueden detectar y localizar fugas, las cuales dependen del tipo de fluido, régimen de operación de este, medio ambiente en que se encuentren la instalación y dimensión del flujo de fuga, por mencionar algunas. De acuerdo con Scott y Barrufet (2003), de manera general se puede decir que los métodos de detección se dividen en sistemas externos (o basados en *hardware*), los cuales buscan detectar el fluido que se fuga del ducto y sistemas internos (o basados en *software*), los cuales miden flujo, temperatura y/o presión del fluido en ciertos puntos del ducto e infieren a partir de dichos datos el volumen del flujo perdido y donde ocurre.

Considerando esta división, las técnicas de diagnóstico de fugas se pueden caracterizar como aquéllas que emplean sensores de líquidos y gases en operación normal, y las que requieren sensores especiales para identificar el fluido dispersado. Este apéndice describe las herramientas y procedimientos existentes a nivel comercial para la detección; se incluyen sus principales ventajas y desventajas (NeoPetrol, 2015).

Monitoreo basados en *hardware*

- *Dispositivos Acústicos*: las técnicas acústicas emplean la señal de ruido generada por la fuga. Dicha señal es captada por sensores acústicos instalados en la parte exterior de la tubería.
- *Cable Sensor*: estos sensores son hechos a base de materiales poliméricos, los cuales sufren una deformación (se inchan) en presencia de hidrocarburos.
- *Sensores de Fibra Óptica*: las fugas pueden ser detectadas mediante la identificación de cambios de temperatura alrededor de las mismas usando cable de fibra óptica. También puede detectarse una fuga por medio de cambios inducidos por la misma en las propiedades ópticas del cable de fibra óptica.

- *Monitoreo del Suelo*: mediante esta técnica, las fugas son detectadas analizando la concentración de gas o restos de sustancias en el suelo alrededor de la tubería.
- *Medidores de Flujo Ultrasónico*: se emplea una tecnología de transmisión patentada para inducir una onda sonora axial a la pared de la tubería, mediante la cual es detectada la fuga.
- *Sistema de Monitoreo de Vapor*: si el producto dentro de la tubería es altamente volátil, entonces el sistema absorbe los vapores y los hace pasar a través de un tubo sensor especial a base de polietileno de baja densidad, el cual puede detectar rastros de concentraciones o componentes específicos de hidrocarburos.

Monitoreo basados en *software*

- *Balance de Masa o Volumen*: esta técnica emplea mediciones de masa en dos secciones de la tubería para la detección de fugas en la misma.
- *Modelado Transitorio en Tiempo Real*: este método matemático modela el flujo del fluido dentro de la tubería. Las ecuaciones empleadas para modelar el flujo son conservación de masa, conservación de momento, ecuación de estado del fluido y respuesta transitoria del flujo.
- *Análisis de Punto de Presión*: para detectar una fuga se realiza una comparación entre la señal de presión actual y la tendencia de la misma tomada en cierto periodo. Entonces, el *software* patentado aplica un análisis estadístico para determinar si existe una diferencia significativa entre las dos señales, indicando entonces la presencia de una fuga.

Cada una de estas metodologías ofrece ventajas y desventajas, las cuales se resumen en las Tablas A.1 y A.2.

Como puede verse de las características mostradas en las tablas, no existe una metodología y/o tecnología ideal para la detección y localización de fugas en ductos. Los factores que determinar su aplicabilidad son múltiples; sin embargo, para una instalación específica en función del costo de un accidente, sí es posible determinar metodologías con un bajo riesgo, considerando siempre que cualquier método ayudará a reducir los riesgos, mas no excluirlos.

Tabla A.1 Métodos basados en *hardware*

Método	Ventajas	Desventajas
Acústico. Una fuga genera una señal de ruido (acústico) que es detectada por un sensor externo. Se requiere minimizar el ruido externo. La señal acústica incrementa de acuerdo al tamaño de la fuga, lo cual a su vez puede estimarse por la amplitud de la onda acústica.	La localización de fugas puede realizarse mediante el método de emisión acústica utilizando técnicas interrogatorias. Dado que el sensor se instala fuera del ducto, no se requiere sacar de operación el sistema, su instalación o calibración.	Para gastos muy grandes, el ruido asociado al sistema puede enmascarar el <i>sonido</i> de la fuga.
Cable sensor. Sensor eléctrico construido con algún polímero, el cual cambia su volumen o sus propiedades eléctricas en presencia de hidrocarburos.	Puede utilizarse como un sensor distribuido y su naturaleza es no metálica. El uso de fibra óptica puede utilizarse para la detección en ductos submarinos. Esta tecnología puede utilizarse en condiciones de frío extremo.	No es útil en aguas profundas o en fluidos multifase. La máxima profundidad a la que puede utilizarse es de 20 pies. El cable debe secarse por aire después de la exposición a gasolina u otros hidrocarburos volátiles. El sensor puede interferir con la protección catódica del ducto.
Fibra óptica. Tiene la propiedad de detectar una amplia gama de propiedades físicas y químicas que permiten detectar y localizar fugas.	Puede utilizarse como sensor puntual o distribuido, su naturaleza es no metálica. Puede ofrecer grandes ventajas para la detección submarina de fugas.	Su comercialización aún es un poco limitada y muy costosa.
Monitoreo de suelos. Es un sistema de monitoreo de vapor para analizar la concentración de hidrocarburos en fase vapor alrededor del ducto.	Puede monitorear ductos con fluidos multifase. Las falsas alarmas son minimizadas pues la detección no es afectada por fugas abruptas.	Se aplica sólo en ductos pequeños, pues sería muy costoso para grandes ductos debido al número de sensores requeridos. No es útil en ductos subterráneos o submarinos, así como para gases cromatográficos en condiciones de frío extremo.
Medidores de flujo ultrasónico. Consiste en segmentar el ducto y contar con una estación de medición en cada extremo, donde se analiza la velocidad de propagación de la onda del sonido, otros parámetros del fluido y condiciones ambientales para detectar fugas.	Es un dispositivo electrónico no intrusivo, el cual ofrece buena velocidad de respuesta y puede ser implementado en ambientes submarinos, así como en condiciones de frío extremo.	El sistema está limitado para la detección en caso de grandes fracciones de volumen de gas.
Monitoreo de vapor. Se coloca un tubo sensor paralelo al ducto. En caso de fuga, el vapor del hidrocarburo penetra el tubo sensor, en el cual se bombea aire de manera periódica hacia la estación de medición. La fuga es ubicada de acuerdo al tiempo pico de llegada al detector, comparado con el tiempo de llegada del gas de prueba inyectado.	Este sistema puede detectar fugas pequeñas, puede aplicarse a ductos con fluidos multifase y ductos submarinos, así como en condiciones de frío extremo.	El tiempo de detección depende de la capacidad de bombeo. Es un sistema muy costoso. El sistema puede no ser efectivo a grandes profundidades en las que el gas puede ser soluble.

Tabla A.2 Métodos basados en *software*

Método	Ventajas	Desventajas
<p>Métodos de balance de masa. Se basa en el principio de conservación de masa, es decir, se mide el gasto que entra y sale en un ducto y se estima la masa del fluido a partir de las dimensiones del ducto, así como variables de flujo volumétrico, presión y temperatura.</p>	<p>Es el método más utilizado en la industria, generalmente implementado en la instrumentación y sistema SCADA de los ductos, lo cual no genera costos adicionales de adquisición de datos e instrumentación adicional. Puede utilizarse en condiciones de frío extremo y ductos subterráneos y/o submarinos.</p>	<p>No es de utilidad en ductos con fluidos multifase. El tiempo de respuesta está limitado por el tiempo en el que la onda de presión viaja a los extremos del ducto, lo cual a su vez, depende del tamaño de fuga. Depende de la precisión de la instrumentación instalada en el ducto.</p>
<p>Método transitorio en tiempo real (RTTM por sus siglas en inglés). Emplea ecuaciones de estado, de momento, de balance de masas y de energía para algoritmos que determinen la tasa de gasto en el ducto. La diferencia entre los valores medidos y los estimados denota la existencia de fuga(s).</p>	<p>Permite monitorear el ducto en operaciones de carga y descarga. Permite minimizar falsas alarmas ajustando umbrales de acuerdo a las condiciones de operación del ducto. Permite la detección de fugas pequeñas y se puede utilizar en ambientes submarinos, subterráneos y en condiciones de frío extremo.</p>	<p>Es una tecnología muy costosa, requiere bastante instrumentación para la colección de datos en tiempo real. A menudo requiere de modelos complejos, entrenamiento de los operarios y puede requerir soporte SCADA permanentemente.</p>
<p>Análisis de punto de presión. Es una tecnología patentada, la cual se basa en la premisa de que las propiedades estadísticas de una serie de mediciones de presión tomadas de un ducto son diferentes antes y después de la ocurrencia de una fuga.</p>	<p>Ha sido probada en ambientes de frío extremo, en ductos subterráneos y submarinos, así como en fluidos multifase. Hay <i>software</i> que combina esta tecnología con balance de masa para diseñar un sistema de detección más efectivo.</p>	<p>Esta tecnología se ve afectada por procesos complejos con aperturas y cierres de válvulas y/o variaciones de gasto, generando que en algunos periodos la detección no sea posible.</p>

A.1 Integridad en ductos

Un concepto ámpliamente utilizado en el ambiente industrial es el de integridad, el cual se puede definir de la siguiente manera:

Definición A.1 *Integridad.*- Capacidad del sistema para desempeñar la función para la cual fue diseñado, en forma segura y confiable, sin afectar la seguridad de las personas y el medio ambiente.

El objetivo de la integridad es asegurar la continuidad del proceso y la reducción de los impactos a las personas, medio ambiente y del negocio por fallas en el sistema de ductos.

Asociado a la integridad, está la gestión de la misma, lo cual se define como el conjunto de acciones coordinadas para asegurar la integridad, administrando eficientemente el riesgo, la probabilidad de ocurrencia de falla y sus consecuencias.

Para diseñar un *plan de gestión de la integridad*, lo cual es imperativo en muchas organizaciones industriales, es necesario conocer los peligros potenciales de la instalación, así como la identificación de *áreas sensibles*, lo cual se detalla en el siguiente apartado.

A.2 Identificación de peligros potenciales

Para identificar y evaluar los peligros potenciales de una línea de transmisión, se debe recopilar, revisar, integrar y analizar la mayor cantidad de datos e información del ducto. La información recolectada debe ser conservada durante la vida útil de la tubería y debe permitir la identificación de los riesgos y sus consecuencias.

Al recopilar los datos, se debe utilizar un sistema de referencia común y consistente. Es necesario llevar un registro estadístico de todos los incidentes durante la operación del ducto (ubicación, causa, etc.). Adicionalmente, según sea la importancia de la información, se deberán realizar inspecciones y mediciones de campo adicionales.

Algunos de los peligros potenciales para un ducto o red de ductos se mencionan en la Tabla A.3.

De manera adicional, es preciso tener bien identificadas las áreas sensibles, las cuales son áreas donde una fuga o rotura produciría daños considerables a las personas o al medio ambiente. Para considerar los efectos hacia las personas o al medio ambiente, se debe segmentar el ducto según su *clase de trazado*, lo cual a su vez se determina por el número de viviendas, tal como se ilustra en la Tabla A.4.

Tabla A.3 Categorías y peligros potenciales

Categoría	Peligros potenciales
Corrosión externa	Corrosión exterior
Corrosión interna	Corrosión interior
Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos	Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos
Defectos de fabricación	Costura defectuosa Metal base defectuoso
Construcción	Soldadura circunferencial defectuosa Falla por alineamiento Doblez por flexión o pandeo
Equipo	Falla de los empaques o anillos tipo O Componente rayado o roto Mal funcionamiento del equipo de control o relevo Falla del sello/bomba
Daño por terceros	Falla instantánea/inmediata Modo de falla retardado Vandalismo Impacto de objetos arrojados sobre el ducto
Operaciones incorrectas	Procedimientos incorrectos o no aplicados
Clima y fuerzas externas	Tormentas eléctricas Viento, tormentas o inundaciones Sismos Deslaves Huracanes Erosión Deslizamiento del lecho marino o del ducto

Tabla A.4 Clases de trazado

Clase de trazado	Cantidad de viviendas (CV)
1	≤ 10
2	$10 < CV < 46$
3	≥ 46
4	Edificios de 4 o más pisos

Entonces, para considerarse áreas sensibles, respecto a daños a las personas, deben ser ductos que atraviesan clase de trazado 3 o 4; respecto a daños al medio ambiente, ductos que atraviesan:

- cursos de agua o cauces temporales,
- sitios de interés ecológico,
- áreas naturales o reservas, lagunas, playas o salinas,
- sitios de interés arqueológico, históricos, cultural o paleontológico,
- zonas declaradas como áreas sensibles por estudios ambientales.

A.3 Regulaciones internacionales y nacionales

En el plano internacional, el manejo, instalación, mantenimiento e inspección de los ductos está regulado por:

- 49 CFR 195 *Transportation of Hazardous Liquids by Pipeline*
- 49 CFR 192 *Transportation of Natural Gas and other Gas by Pipeline*
- ASME B31.8 *Gas Transmission and Distribution piping System*
- ASME B31.4 *Pipeline Transportation System for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids*
- BS 14161 *Petroleum and natural gas industries Pipeline transportation systems*
- 49 CFR 195 Subpart F 195.450 & 195.452 *Pipeline Safety: Liquid Pipeline Integrity Management in High consequences Areas*
- 49 CFR 192 Subpart O *Pipeline Safety: Pipeline Integrity Management in High consequences Areas (Gas Transmission Pipeline)*
- API 1160 *Managing System Integrity for Hazardous Liquid Pipelines*
- ASME B31.8 S *Managing System Integrity of Gas Pipelines*
- NACE STANDARD RP0502 – 2002 *Pipeline External Corrosion Direct Assessment*
- API 570 *Piping Inspection Code: Inspection, Repair, Alteration and Reconstruction*

- API 579 *Fitness for Service*
- API 581 *Risk-Based Inspection*
- NACE STANDARD RP0102 – 2002 *In-Line Inspection of Pipelines*
- NACE STANDARD RP0204 – 2002 *Stress Corrosion Cracking Direct Assessment*

En el ámbito nacional se tiene la NOM-027-SESH-2010, *Norma Oficial Mexicana para la administración de ductos de recolección y Transporte de Hidrocarburos*, cuya aplicación y observancia se consideran obligatorias para las personas que realicen actividades de operación de ductos, incluyendo ductos marinos o terrestres dentro del territorio nacional que recolectan y transportan hidrocarburos líquidos, gaseosos y sus derivados. Esta norma excluye a los sistemas de transporte de Gas Natural y LPG por ductos permitidos.

A.4 Escenarios frecuentes de fallas

Como se ha mencionado en este trabajo de tesis, un aspecto fundamental para abordar el problema de detectar y localizar fugas, consiste en obtener un buen modelo del ducto. Esto involucra algunos aspectos prácticos como los que se describen a continuación:

- Clases de fugas. Usando datos generados con el simulador comercial Pipeline Studio (2013)© y tomados de pruebas experimentales realizadas en la planta piloto del Instituto de Ingeniería, se verificó que existe una diferencia en las mediciones de gasto y presión en los extremos, asociada a la consideración de una extracción o de una fuga. Además, una fuga podría ubicarse en varias posiciones (superior, inferior o en posiciones laterales) de una misma coordenada espacial del ducto. Estos aspectos impactan considerablemente en la correcta caracterización del parámetro de fricción del ducto (Cayetano, 2016) y pueden afectar la precisión en la tarea de localización.
- Envejecimiento del sistema. Un aspecto que muy pocas veces se menciona en trabajos de investigación, es que parámetros como el espesor y la rugosidad, se ven afectados por el envejecimiento del ducto y dificultan la tarea de caracterizar de manera precisa un modelo del sistema. En muchos casos, es necesario monitorear permanentemente el sistema en condiciones libres de fallas, de modo que se cuente con un modelo ajustado del mismo para lograr de manera más precisa la localización.
- Estimación en línea de la fricción. Un problema ya mencionado y que debe ser considerado, es la dificultad para caracterizar el parámetro de fricción de la tubería, el cual se ve

afectado, entre muchos otros, por los factores antes mencionados. En muchas ocasiones, se estima este parámetro para la tubería operando en condición libre de fugas y se toma el valor medio del mismo en el modelo empleado para las tareas de detección y localización. Sin embargo, en pruebas experimentales se ha notado que (Cayetano, 2016), aún en el caso libre de fugas, este parámetro registra variaciones que pueden atenuarse mediante su estimación en línea, lo cual puede ser explotado para fines de localización.

B Apéndice

B.1 Variables

En esta sección, en la Tabla B.1, se describen las variables y parámetros involucrados en este trabajo, así como sus respectivas unidades de medida.

Las pruebas experimentales presentadas en este trabajo, han sido realizadas en la planta piloto del Instituto de Ingeniería de la UNAM. En la Tabla B.2 se describen las especificaciones técnicas de los sensores más importantes de la estructura, pues permiten obtener mediciones muy precisas de las variables de interés para la caracterización y prueba de los modelos empleados.

B.2 Prueba

En este apartado, se mostrará que el error generado por el observador de gran ganancia, utilizado para estimar la posición de una fuga desviada de una posición preestablecida, es acotado. Para simplificar la notación, definiremos el vector del subsistema (4.18) como $x := x_u$ y concentraremos las incertidumbres en el vector: $\Theta(u, x, \delta_z) := \Delta Ax + \Delta Bu + \Delta \varphi(x, u, \delta_z)$; entonces, el sistema (4.18) puede reescribirse como

$$\dot{x} = A_0x + B_0u + \varphi_0(x, u) + \Theta(u, x, \delta_z). \quad (\text{B.1})$$

Además, si $\Psi(u, x, \delta_z) := \varphi_0(x, u) + \Theta(u, x, \delta_z)$, el sistema (B.1) puede expresarse como:

$$\dot{x} = A_0x + \Psi(u, x, \delta_z). \quad (\text{B.2})$$

Ahora, considérese que se cumple lo siguiente:

- El vector $\Theta(u, x, \delta_z)$, el cual contiene la desviación δ_z , es una función Lipschitz con respecto a x , i.e. $\|\Theta(u, x_1, \delta_z) - \Theta(u, x_2, \delta_z)\| \leq \ell_\Theta \|x_1 - x_2\|$.

Tabla B.1 Nomenclatura empleada

Variable	Descripción	Unidades
$Q^i(z^i, t)$	Flujo en la sección i en el punto z en el tiempo t	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
$\tilde{H}^i(z^i, t)$	Altura de presión en la sección i en el punto z en el tiempo t	$[m]$
$H^i(z^i, t)$	Variable piezométrica de la sección i en el punto z en el tiempo t	$[m]$
ρ	Densidad	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
$z^i \in (0, L_i)$	Coordenada espacial de la sección i	$[m]$
$t \in (0, \infty)$	Coordenada temporal	$[s]$
h	Periodo de muestreo	$[min]$
A^i	Área de sección transversal de la sección i	$[m^2]$
μ^i	Parámetro asociado a f en la sección i	$\left[\frac{s^2}{m^4}\right]$
$Q_{z_b^i}^i$	Flujo de la toma lateral en la sección i	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$
z_b^i	Posición, toma lateral en la sección i	$[m]$
D^i	Diámetro de la sección i	$[m]$
g	Aceleración de la gravedad	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
α^i	Elevación de la sección i	$[^\circ]$
f^i	Factor de fricción de Darcy-Weisbach en la sección i	[adimensional]
b	Velocidad del sonido en el fluido	$\left[\frac{m}{s}\right]$
L^i	Longitud de la sección i	$[m]$
$L = \sum_{i=1}^n L^i$	Longitud total de la tubería	$[m]$
n	Número de secciones de tubería	
A_0^s	Matriz de estado en modelo nominal \sum^s	
B_0^s	Matriz de entrada en modelo nominal \sum^s	
g	Aceleración de la gravedad	$[ms^{-2}]$
H_{in}	Cabezal piezométrico aguas arriba del ducto	$[m]$
H_{out}	Cabezal piezométrico aguas abajo del ducto	$[m]$
H_{j+1}	Cabezal piezométrico al final de la sección j	$[m^3s^{-1}]$
j	Subíndice asociado al gasto y presión en una sección de ducto	
Q_j	Gasto Q a lo largo de la sección j	$[m^3s^{-1}]$
Q_{in}	Gasto en el extremo aguas arriba del ducto	$[m^3s^{-1}]$
Q_{out}	Gasto en el extremo aguas abajo del ducto	$[m^3s^{-1}]$
Q_f	Gasto producido por una fuga	$[m^3s^{-1}]$
t	Tiempo	$[s]$
thu	Umbral	
β^s	Función de activación de la fuga en la sección s	
$\delta(z)$	Delta de Dirac espacial	
Δ^s	Desviación espacial de la fuga en la sección s	$[m]$
$\varphi_0^s(x^s, u^s)$	Campo vectorial no lineal con incertidumbres	

Tabla B.2 Especificaciones técnicas del sensor de flujo

Característica	Valores
Principio de medición	Fuerza de Coriolis
Variable medida	Flujo másico Densidad de flujo Temperatura del fluido
Rango	0 a 180000 <i>Kg/h</i>
Rango de Flujo Operable	1000 : 1
Corriente de Salida	4 – 20 <i>mA</i>
Resolución	0 : 5 μA
Frecuencia de Salida	2 – 10000 <i>Hz</i> Ancho de pulso max. 2 <i>s</i>
Pulso de Salida	Configurable (0 : 05 – 2000 <i>ms</i>)
Max. Error Medido	Flujo Másico $\pm 0.05\%$ Densidad $\pm 0.01\text{ g/cc}$ Temperatura $\pm 0.5^\circ C \pm 0.005 * T^\circ C$
Estabilidad de punto cero	9 <i>Kg/h</i>
Repetibilidad	Flujo Másico $\pm 0.025\%$ Densidad $\pm 0.00025\text{ g/cc}$ Temperatura $\pm 0.25^\circ C \pm 0.0025 * T^\circ C$

- El vector $\Psi(u, x, \delta_z)$, el cual contiene las no linealidades y la desviación δ_z , es una función Lipschitz con respecto a x , i.e. $\|\Psi(u, x_1, \delta_z) - \Psi(u, x_2, \delta_z)\| \leq \ell^* \|x_1 - x_2\|$, donde ℓ^* es la máxima constante de Lipschitz; para este trabajo, será calculada de acuerdo al máximo valor permisible de la incertidumbre δ_z .

En consecuencia, utilizando la desigualdad del triángulo, se tiene que

$$\begin{aligned} & \|\Psi((u, x_1, \delta_z)) - \Psi((u, x_2, \delta_z))\| \leq \\ & \|\varphi_0(x_1, u) - \varphi_0(x_2, u)\| + \|\Theta(u, x_1, \delta_z) - \Theta(u, x_2, \delta_z)\| \leq \\ & \ell_\varphi \|x_1 - x_2\| + \ell_\Theta \|x_1 - x_2\| \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

entonces $\ell_\varphi + \ell_\Theta \leq \ell^* \rightarrow \ell_\Theta \leq \ell^* - \ell_\varphi$. Dada la hipótesis anterior, si se define el residuo como el error de estimación $r := x - \hat{x}$; entonces, la dinámica del residuo está dada por

$$\dot{r} = (A_0 - KC_0)r + \Psi(x, u, \delta_z). \quad (\text{B.4})$$

Por otro lado, se define la ecuación de Lyapunov $V = r^T P r$, donde P es una matriz simétrica positiva definida ($P = P^T > 0$) que satisface

$$(A_0 - KC_0)^T P + P(A_0 - KC_0) = -I \quad (\text{B.5})$$

Calculando la derivada de la función de the Lyapunov $V = r^T P r$ con respecto al tiempo y utilizando la dinámica del residuo (B.4), se obtiene

$$\begin{aligned} \dot{V} &= r^T P \dot{r} + \dot{r}^T P r = r^T [(A_0 - KC_0)^T P + P(A_0 - KC_0)] r \\ &+ 2r^T P [\Psi(u, x, \delta_z)]. \end{aligned}$$

Reemplazando (B.5) y la constante de Lipschitz ℓ^* de Ψ en la ecuación previa, se obtiene

$$\dot{V} = r^T P r + \dot{r}^T P r = r^T [-I] r + 2r^T P [\Psi(u, x, \delta_z)] \quad (\text{B.6})$$

es decir,

$$\dot{V} \leq -\|r\|^2 + 2\lambda_{max}(P)\ell^*\|r\|^2 \quad (\text{B.7})$$

donde $\lambda_{max}(P)$ es el máximo eigenvalor de la única solución de la ecuación de Lyapunov.

Cálculo de la máxima constante de Lipschitz ℓ^*

Para calcular el valor de la máxima constante de Lipschitz que acota $\|\Psi(u, x, \delta_z)\|$, es preciso encontrar las cotas inferior y superior de cada uno de sus componentes, es decir

$$\sigma_i^- \leq \Psi_i \leq \sigma_i^+; \quad \forall i = 1, 2, 3 \quad (\text{B.8})$$

Para este propósito, es preciso conocer la cota de la incertidumbre δ_z , que en el caso de fuga aguas arriba de la extracción fija, está acotada por

$$-\frac{z_e}{2} + \varepsilon \leq \delta_z \leq \frac{z_e}{2} - \varepsilon \quad (\text{B.9})$$

para un predefinido $\varepsilon > 0$ cuyo propósito es evitar que la incertidumbre tome los valores de la frontera.

Definiendo $\delta_z^- = -\frac{z_e}{2} + \varepsilon$ y $\delta_z^+ = \frac{z_e}{2} - \varepsilon$, entonces la ecuación previa se deviene en

$$\delta_z^- \leq \delta_z \leq \delta_z^+, \quad (\text{B.10})$$

Reemplazando el valor de balance de masa $x_{u_3} = \alpha_u(y_1 + u_3 + y_u) + \delta_u(y_1 - u_3 - y_u)$, así como los valores mínimo y máximo de δ_z en los componentes de $\Psi(u, x, \delta_z)$ diferentes de cero, es decir, $\Psi_2(u, x, \delta_z)$ y $\Psi_3(u, x, \delta_z)$, se obtienen los valores mínimo y máximo de las cotas, los cuales resultan ser iguales, i.e. $\sigma_2^- = \sigma_2^+$ y $\sigma_3^- = \sigma_3^+$.

Evaluando estas cotas (en MAPLE[®]) donde $\varepsilon \rightarrow 0$, entonces $\sigma_2 \rightarrow \infty$ y $\sigma_3 \rightarrow 0$. Para evitar esta situación, i.e. para definir la mínima y máxima posición de fuga que puede estimarse, el valor de ε debe predefinirse. De hecho, debe predefinirse el valor de la máxima constante de Lipschitz λ^* . Para predefinir el valor de ε deben considerarse las condiciones técnicas de la implementación del observador, tal como el *paso de discretización* usado para resolver las ecuaciones diferenciales.

Diseño del EKF

Considere el sistema no lineal (Gelb, 1994)

$$\dot{x} = f(x, u, t) + w(t); \quad w(t) \sim \mathcal{N}(0, W(t)), \quad (\text{B.11})$$

con $w(t)$, ruido Gaussiano de media cero con matriz de densidad espectral $W(t)$ y el modelo de mediciones

$$y(t) = Cx + v(t), \quad v(t) \sim \mathcal{N}(0, R(t))$$

con $v(t)$, ruido Gaussiano de media cero con matriz de densidad espectral $R(t)$.

Además, asumiento lo siguiente:

- Las condiciones iniciales del estado $x(0) \sim \mathcal{N}(\hat{x}(0), P(0))$.
- La matriz $E[w(t)v^T(\tau)] = 0$ para todo t y todo τ .

- La expansión del vector de campo $f(x, u, t)$ en series de potencias origina

$$f(x, u, t) - f(\hat{x}, u, t) = F(t)(x - \hat{x}) + \gamma(x, \hat{x}, u)$$

donde $\gamma(x, \hat{x}, u)$ incluye los términos de orden superior, y la matriz Jacobiana

$$F(t) = \frac{\partial f(x, t)}{\partial x}$$

está evaluada en $x = \hat{x}$.

Entonces, la estimación de estado del sistema alrededor del punto \hat{x} , está dada por

$$\dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}, u, t) + K(t)(y - C\hat{x}), \quad (\text{B.12})$$

donde la matriz de ganancia es calculada mediante

$$K(t) = P(t)C^T R^{-1}(t)$$

. De manera adicional, la matriz del error de covarianza satisface la ecuación dinámica de Riccati

$$\dot{P}(t) = (F(t) + I\eta)P(t) + P(t)(F(t) + I\eta)^T + Q(t) - P(t)CR^{-1}(t)CP(t)$$

con la matriz Jacobiana $F(t)$ evaluada cada iteración. El valor positivo real se introduce para provocar un grado prescrito de estabilidad, así como una mayor convergencia del filtro. Además, puede decirse que el sistema (B.12) es un observador exponencial de (B.11) si la ecuación diferencial

$$\dot{e} = (F(t) - K(t)C)e + \gamma(x, \hat{x}, u)$$

del error de estimación $e = x - \hat{x}$ tiene un punto de equilibrio estable en el origen (Reif *et al.*, 1998). Debido a que el sistema (B.12) representa el estimador lineal mínimo para el sistema en presencia de incertidumbres, entonces puede estimarse el parámetro incierto δ_z alrededor de un punto de operación estimado en general.

C Publicaciones asociadas a la tesis

- O. González, C. Verde, L. Torres, *Leak estimation method for complex pipelines with branch junctions*, Journal of Pressure Vessel Technology ASME. Abril de 2017.
- C. Verde, L. Torres, O. González, *Decentralized Scheme for Leaks' Location in a Branched Pipeline*, Journal of Hydraulic Research, Elsevier. Abril de 2016.
- L. Torres, C. Verde, G. Besançon and O. González. *High gain observers for leak location in subterranean pipelines of liquefied petroleum gas*, INTERNATIONAL JOURNAL OF ROBUST AND NONLINEAR CONTROL. 2012.

Bibliografía

- Ashton, S. A., D. N. Shields y S. Daley (1998). Fault detection in pipelines using nonlinear observers. En: *UK ACC International Conference on Control'98*. pp. 135–140. IEE-455.
- Bansal, R. K. (2005). *Fluid mechanics and hydraulic machines*. Laxmi Publication, LTD.
- Bastin, G. y M. Gevers (1988). Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems. *IEEE- Trans. Automatic Control* **33-7**, 650–657.
- Begovich, O., A. Pizano y G. Besançon (2012). Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype. *Latin American Applied Research* **42**, 131–140.
- Besançon, G. (2007). *Nonlinear Observers and Applications*. Springer.
- Billman, L. y R. Isermann (1987). Leak detection methods for pipelines. *Automatica* **23(3)**, 381–385.
- Cayetano, Raúl (2016). Identificación de parámetros de fricción en ductos con tomas laterales. Tesis de maestría. Posgrado en Ingeniería UNAM.
- Chaudhry, Hanif M. (2014). *Applied Hydraulic Transients*. Springer. New York, USA.
- Chen, J. y R. J. Patton (1999). *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers. Boston, USA.
- Colombo, A. F., P. Lee y B. W. Karney (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-Environment Research* **2**, 212–227.
- Comisión Nacional del Agua (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*.
- D. Shields, S. Ashton y S. Daley (2001). Design of nonlinear observers for detecting faults in hydraulic subsea pipelines. *Control Engineering Practice* **9**, 297–311.

- Departamento de Transportes (2006). Accident summary statistics by year. Reporte técnico . US Office of Pipeline Safety.
- Ferrante, Marco y Bruno Brunone (2003). Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis. *Advances in Water Resources* **26**, 107–116.
- Ferrari, Riccardo, Thomas Parisini y Marios Polycarpou (2012). Distributed fault detection and isolation of large-scale discrete-time nonlinear systems: An adaptive approximation approach. *IEEE Transactions on Automatic Control* **57**(2), 275–290.
- Frank, P. (1990). Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy. *Automatica* **26**(2), 459–474.
- Frank, P., G. Schreier y E. Alcorta-García (1999). *New directions in Nonlinear Observer Design*. Cap. Nonlinear Observers for fault detection and Isolation, pp. 399–422. Springer.
- Gauthier, J. P., H. Hammouri y S. Othman (1992). A simple observer for nonlinear systems-applications to bioreactors. *IEEE Transactions on Automatic Control* **37**(6), 875–880.
- Gelb, Arthur (1994). *Applied Optimal Estimation*. MIT Press.
- Isermann, R. (2006a). *Fault Diagnosis System*. Springer.
- Isermann, R. (2006b). *Fault-Diagnosis Systems*. Springer. Berlin.
- Isermann, R. y M. Münchhof (2011). *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Springer. Berlin.
- Jiménez, Laura y Cristina Verde (2012). Multi-fault discrimination with fault model and periodic signal. En: *8th IFAC Symposium SafeProcess* (J. Lunze, Ed.). Vol. 1. IFAC. pp. 49–54.
- Juki, Dragan, Gordana Kralikb y Rudolf Scitovskia (2004). Least-squares fitting Gompertz curve. *Journal of Computational and Applied Mathematics* **169**, 359–375.
- Kowalczyk, Z. y K. Gunawickrama (2000). Leak detection and isolation for transmission pipelines via nonlinear state estimation. En: *4th IFAC SAFEPROCESS*. Vol. 2. pp. 943–948.
- Kowalczyk, Zdzisław y Marek Tatara (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Cap. Numerical Issues and Approximated Models for the Diagnosis of Transmission Pipelines. Springer.

- Negrete, M. A. y C. Verde (2012). Multi-leaks reconstruction in pipelines by sliding mode observer. En: *8th IFAC Safeprocess2012*,.
- NeoPetrol (2015). Capacitaci3n petrolera internacional. En: *Programa Intensivo de Integridad en Ductos prevenci3n y detecci3n de fallas*.
- Niejmeijer, H. y Fossen, T.I., Eds. (1999). *New directions in nonlinear observer design*. Lectures Notes in Control and Information Sciences, Springer, 244.
- Patton, R., P. Frank y R. Clark (2000). *Issues of Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Springer. Berlin.
- Pipeline Studio (2013). Software. En: *Pipeline*. Energy Solutions International.
- Polyanin, A. D. y V. F. Zaitsev (2004). *Handbook of nonlinear partial differential equations*. CRC press.
- Rajamani, R. y Y.M. Cho (1998). Existence and design of observers for nonlinear systems: relations to distance to unobservability. *Int. J. of Control* **69**(5), 717–731.
- Reif, K., F. Sonnenmann y R. Unbehauen (1998). An EKF-based nonlinear observer with a prescribed degree of stability. *Automatica* **34**(9), 1119–1998.
- Saldarriaga, J. (2003). *Hidri3n ulica de acueductos*. Mc. Graw Hill.
- Scott, Stuart L. y Maria A. Barrufet (2003). Worldwide assessment of industry leak detection capabilities for single and multiphase pipelines. Project Report Prepared for the Minerals Management Service Under the MMS/OTRC Cooperative Research Agreement 1435-01-99-CA-31003 task Order 18133. Department of Petroleum Engineering Texas A&M University. Texas, USA.
- Torres, L. (2011). Modèles et observateurs pour les systèmes d'écoulement sous pression. Extension aux systèmes chaotiques. Tesis de doctorado. Université de Grenoble.
- Torres, L., G.. Besancon y D. Georges (2008). A collocation model for water-hammer dynamics with application to leak detection. En: *47th IEEE-Conference on Decision Control, Cancun*.
- Tulio, Marco y C. Verde (2013). Second-order sliding mode algorithms for the reconstruction of leaks. En: *Nice, Systol2013*. IEEE.

- Venkatasubramanian, V., R. Rengaswamy, R. Yin y S. Kavuri (2003). A review of process fault detection and diagnosis: Part iii: Process history-based methods. *Computers and Chemical Engineering* **27**, 326–346.
- Verde, C. (2001). Multi-leak detection and isolation in fluid pipelines. *Control Engineering Practice* **9**, 673–682.
- Verde, C. (2002a). Fault diagnosis for nonlinear hessenberg systems. En: *15th IFAC World Congress, July 21-26*. Barcelona, Spain.
- Verde, C. (2002b). Robust fault detection for nonlinear hessenberg systems. En: *ACC'02 Proceedings, Anchorage, Alaska*. pp. 3287,3292.
- Verde, C. (2004). Minimal order nonlinear observer for leak diagnosis in pipelines. *Journal of Dynamics Systems Measurements and Control, ASME* **126**, 467–472.
- Verde, C., L. Molina y L. Torres (2014). Parametrized transient model of a pipeline for multiple leaks location. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **29**, 177–185.
- Verde, C, L. Torres y O González (2016). Decentralized scheme for leaks' location in a branched pipeline. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* **43**, 18–28.
- Verde, C., N. Visairo y S. Gentil (2007). Two leaks isolation in a pipeline by transient response. *Applied Water Resources*, **30**, 1711–1721.
- Verde, C., S. Gentil y R. Morales (2012). *Monitoreo y Diagnóstico Automático de Fallas en Sistemas Dinámicos*. Instituto de Ingeniería UNAM. Mexico City, Mexico.
- Verde, C. y N. Visairo (2001). Bank of nonlinear observers for detection of multiple leaks in a pipeline. En: *2001 IEEE Conference on Control Application*. pp. 673–682.
- Verde, Cristina, G. Bornard y S. Gentil (2003). Isolability of multi-leaks in a pipeline. En: *Proceedings 4th MATHMOD, Vienna*. ARGESIM Verlag, ISBN-3-901608-24-9.
- Verde, Cristina y Jorge Rojas (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks*. Cap. Recursive Scheme for Sequential Leaks' Identification, pp. 150–160. Springer.
- Visairo, Nancy (2004). Detección y Localización de Fugas en Ductos. Tesis de doctorado. SEP-CENIDET-MEXICO.
- Wylie, E. B. y V. L. Streeter (1978). *Fluid Transients*. McGraw-Hill International Book Co.