

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN Y
LOCALIZACIÓN DE FUGAS BASADO EN FILTRO DE KALMAN
EXTENDIDO PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE DE
PETRÓLEO CRUDO APLICADO AL TRAMO I DEL
OLEODUCTO NORPERUANO

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en
Ingeniería de Control y Automatización
que presenta:

Franklin Andree Salas Camacho

Asesor:

Carlos Gustavo Perez Zuñiga, Dr.

Lima, 2022

RESUMEN

La detección y localización de fugas en ductos de transporte de crudo de petróleo es un tema de suma relevancia debido a que estos eventos conllevan a cuantiosas pérdidas a nivel económico, contaminación ambiental y conflictos sociales. Este estudio propone el diseño de un sistema de detección y localización de fugas basado en el Filtro de Kalman Extendido aplicado a un modelo no lineal en tiempo discreto con ruido de medición y proceso correlacionado. Se desarrolla la solución numérica del modelo matemático para el transporte de crudo de petróleo en el Tramo I del Oleoducto Norperuano (ONP), considerando; el perfil hidráulico, las características físicas del ducto y las propiedades del crudo transportado, empleando el método de características (MOC), método que facilita la implementación del modelo sobre un controlador industrial.

La simulación del algoritmo de detección de fugas considera las mediciones de los sensores de presión y flujo en los extremos del oleoducto, y junto al filtro diseñado garantizan un error porcentual en la ubicación de fuga igual a 0.918 % (169.27 metros) y un error porcentual en la magnitud igual a 1.028 % ($4.53 \times 10^{-3} m^3/s$). Asimismo, se realizaron pruebas para magnitudes de fuga repentina del 1%, 2%, 5% y 10% con respecto al flujo nominal transportado en diferentes ubicaciones dentro del recorrido.

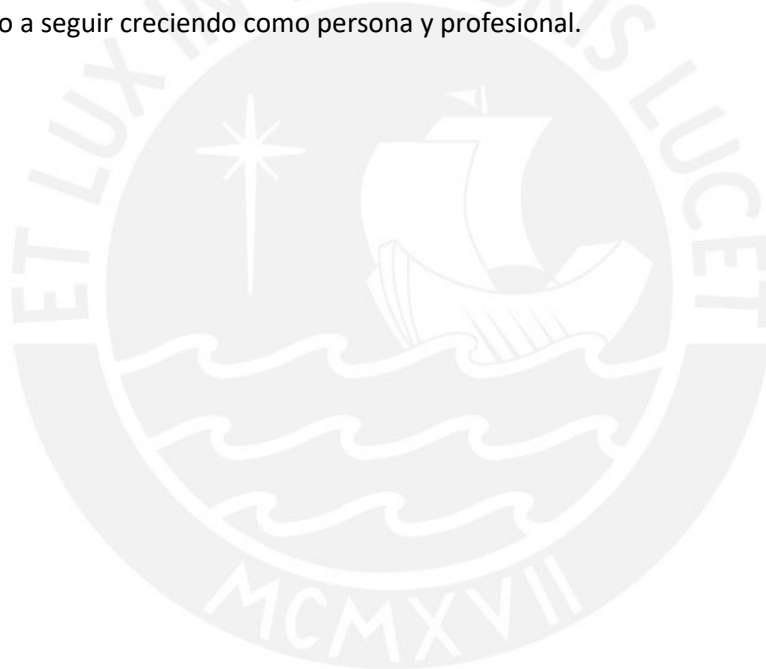
Se concluye el trabajo con una propuesta de implementación del sistema de detección de fugas sobre un controlador PLC CompactLogix, de Allen Bradley, y las consideraciones para la interconexión con el sistema SCADA existente en la operación del Oleoducto Norperuano (ONP).

Palabras clave: Detección de fugas, Modelado de transporte en oleoductos, Filtro de Kalman Extendido, Oleoducto Norperuano.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo de tesis, Franklin Andree Salas Camacho, agradece el apoyo del Proyecto de Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica 8682-PE, Banco Mundial, CONCYTEC y PROCIENCIA a través del contrato E041-01[N48-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU], en el marco del cual se desarrolló la presente tesis.

Asimismo, quisiera agradecer al Dr. Gustavo Pérez Zuñiga por su ayuda y asesoramiento en la elaboración de la presente tesis. Gracias también a mis padres, a mi abuela Elvira y tía Yolanda por todo el apoyo brindado a lo largo de esta etapa, quienes siempre me han motivado a seguir creciendo como persona y profesional.



CONTENIDO

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
NOMENCLATURA	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DEL TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO Y LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Estudio del arte del sistema de transporte de petróleo crudo y el ONP.....	3
1.2.1. Aspectos técnicos del transporte de petróleo crudo	3
1.2.2. Transporte de petróleo crudo por el oleoducto norperuano	4
1.2.2.1. Tramo I del ONP.....	5
1.2.2.2. Oleoducto Ramal Norte.....	7
1.2.2.3. Tramo II del ONP.....	7
1.2.2.4. Perfil de elevación del oleoducto norperuano	8
1.3. Problemática del transporte de petróleo por el ONP.....	10
1.4. Estudio del arte de los sistemas de detección y localización de fugas.....	14
1.4.1. Métodos para la detección y localización de fugas	14
1.4.1.1. Sistema de detección de fugas basado en ondas de presión negativa.....	14
1.4.1.2. Detección de fugas basada en sensor de fibra	14
1.4.1.3. Detección de fugas en tuberías basada en SVM.....	16
1.4.1.4. Sensores piezoeléctricos acústicos –eléctricos.....	16
1.4.1.5. Transformada Rápida de Fourier.....	16
1.4.1.6. Análisis wavelet armónica.	16
1.4.1.7. Simulación dinámica de fluidos computacional (CFD).	16
1.4.1.8. Filtros de Kalman	16
1.4.1.9. Redes Neuronales.	17
1.4.1.10. Análisis Estructural.....	17
1.5. Propuesta y Objetivos de Tesis.....	17
1.5.1. Propuesta de Tesis.	17
1.5.2. Objetivos de la Tesis.....	17
CAPÍTULO II: MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL DUCTO.	19
2.1. Introducción.....	19
2.2. Método de las características (MOC)	19
2.2.1. Velocidad de onda.....	22
2.2.2. Condiciones iniciales y de frontera.....	24

2.2.3.	Reservorios.....	24
2.2.4.	Válvula.....	25
2.2.5.	Bomba Centrífuga.....	26
2.3.	Método en diferencias finitas.....	28
2.3.1.	Modelo de fuga.....	29
2.4.	Análisis de los modelos.....	29
2.5.	Características del modelo para el Tramo I del ONP.....	33
2.6.	Conclusiones del capítulo.....	34
CAPÍTULO III: DISEÑO DE SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO.....		
3.1.	Introducción.....	36
3.2.	Filtro de Kalman.....	36
3.2.1.	Filtro de Kalman Discreto.....	36
3.3.	Filtro Extendido de Kalman.....	40
3.4.	Implementación del Filtro Extendido de Kalman para la detección y localización de fugas en MATLAB.....	42
3.4.1.	Modelo en espacio de estados del sistema.....	43
3.4.2.	Matrices Jacobianas para el Filtro de Kalman Extendido.....	44
3.4.3.	Detección de fugas bajo el enfoque de fugas ficticias.....	46
3.5.	Resultados de la simulación con el Filtro de Kalman Extendido.....	49
3.5.1.	Simulación para un segmento del Tramo I del ONP.....	50
3.6.	Conclusiones del capítulo.....	55
CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO.....		
4.1.	Introducción.....	57
4.2.	Hardware de propuesto para el sistema de detección de fugas.....	57
4.2.1.	Unidad de Terminal Remoto (RTU).....	58
4.2.2.	Transmisores de presión.....	60
4.3.	Arquitectura del sistema de detección de fugas propuesto.....	60
4.4.	Propuesta de implementación del algoritmo en el controlador o computador industrial.....	61
4.5.	Consideraciones de la implementación del sistema de detección de fugas.....	63
4.6.	Conclusiones del capítulo.....	64
CONCLUSIONES.....		
RECOMENDACIONES.....		
BIBLIOGRAFÍA.....		

NOMENCLATURA

A	Área de la sección transversal del ducto
B	Constante del modelo para el método de características
c	Velocidad de onda en el fluido
D	Diámetro del ducto
e	Rugosidad absoluta del ducto
\mathcal{E}	Modulo de elasticidad de Young de las paredes del ducto
f	Coefficiente o factor de fricción
g	Aceleración de la gravedad
\mathbf{H}_k	Matriz de salida del modelo discreto
$H(t)$	Altura de presión manométrica
\mathbf{J}	Matriz Jacobiana
\mathbf{K}	Ganancia del filtro de Kalman
K_e	Modulo de elasticidad del fluido
λ	Coefficiente de fuga del modelo
$\mathbf{\Gamma}_k$	Matriz de entrada del modelo discreto
ℓ, L	Longitud del ducto
m	Exponente para el modelo de válvula
n	Nodo interno para la segmentación del ducto
\mathbf{P}_k	Matriz de covarianza
$p(t)$	Presión manométrica del sistema
$\mathbf{\phi}_k$	Matriz de transición del modelo discreto
ψ	Parámetro adimensional sobre propiedades elásticas del ducto
$Q(t)$	Flujo volumétrico en el ducto
Q_L	Flujo volumétrico de fuga
\mathbf{Q}_i	Matriz de pesos para el ruido de proceso
\mathbf{R}_k	Matriz de pesos para el ruido de medición
R	Constante del modelo para el método de características
Re	Número de Reynolds

ρ	Densidad del fluido
t	Tiempo
t_c	Tiempo de cierre de válvula
\mathbf{u}_k	Vector de entrada del modelo
$v(t)$	Velocidad media del fluido en el sistema
\mathbf{v}_k	Vector de ruido de medición
\mathbf{w}_k	Vector de perturbación del proceso
\mathbf{x}_k	Vector de estados del modelo
z	Posición de referencia en el sistema
\mathbf{z}_k	Vector de salida del modelo



INTRODUCCIÓN

Los oleoductos se emplean para transportar petróleo crudo e hidrocarburos líquidos procedentes de las estaciones y pozos de extracción hacia las diferentes unidades de almacenamiento y refinerías, para luego ser comercializados y distribuidos tanto en el territorio nacional como internacional, estos ductos durante su operación están sujetos a algunos factores como; condiciones climáticas y geodinámicas, fallas de soldaduras o juntas, corrosión, envejecimiento, e intrusiones de terceros o sabotaje, que pueden dañar las instalaciones y causar fugas. Algunos de estos factores pueden ser atendidos con el mantenimiento preventivo y correctivo, sin embargo, otros factores no controlados como golpes externos por deslizamientos de material, el robo de crudo, entre otros, no se pueden prevenir, para estos casos es necesario implementar algún sistema de monitoreo o en línea para detectar y localizar las fugas. Algunas normas tales como el D.S N° 081-2007-EM y la API RP 1130, constituyen un marco legal y técnico para el Transporte de Hidrocarburos por Ductos y el Monitoreo Computacional de Tuberías para Líquidos, las cuales se deben implementar a través de los Sistemas de Detección de Fugas, que son un conjunto de tecnologías empleadas para monitorear la integridad de los ductos, a través de la aplicación de algoritmos, sistemas de control y alarmas, atendiendo de forma rápida y confiable ante una eventual fuga de crudo.

Las fugas y derrames de petróleo ocasionan cuantiosas pérdidas a nivel económico, conflictos sociales y contaminación ambiental, llegando en algunos casos a presentarse como un riesgo para la salud de los pobladores que viven en los alrededores de las instalaciones. A nivel nacional, en los últimos años se registraron diferentes incidentes de derrames por fugas de crudo en el Oleoducto Norperuano, a lo largo de su recorrido por selva, sierra y costa, principalmente focalizados en el Tramo I de este oleoducto, como resultado de estos incidentes se aplicaron en algunos casos, la paralización temporal de su operación y la imposición de elevadas multas económicas para la reparación del daño ambiental y social. Esta problemática puede ser resuelta con estudios dedicados a la detección y localización de fugas en los sistemas de transporte de petróleo crudo, ya que se atendería desde una perspectiva científica y tecnológica.

Para implementar las diferentes metodologías de detección y localización de fugas basado en modelos y en datos, es necesario construir un modelo matemático con cierto nivel de detalle y precisión, que refleje el comportamiento dinámico del transporte de crudo, tanto

en su régimen transitorio como en estado estacionario, partiendo de los principios y leyes de conservación de materia y energía, con la finalidad de mejorar la comprensión del proceso.

En este entender, el objetivo principal de la presente investigación es modelar el sistema de transporte de petróleo crudo para la detección y localización de fugas en el Tramo I del Oleoducto Norperuano, implementando y comparando dos soluciones numéricas para las ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales resultantes de los balances de masa del sistema, posteriormente se selecciona la metodología y algoritmo para detectar lo más rápido posible, la presencia y ubicación de la fuga en el oleoducto, con un mínimo de instrumentación, finalmente se propone la implementación y arquitectura de este sistema de detección de fugas.



CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE DEL TRANSPORTE DE PETRÓLEO CRUDO Y LOS MÉTODOS DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FUGAS

1.1. Introducción

En este capítulo se presenta una introducción a los conceptos de transporte de petróleo crudo a través del Oleoducto Norperuano, citando los aspectos técnicos de la infraestructura y aquellas condiciones hidráulicas a tomar en consideración para el posterior modelado del sistema, asimismo se expone la problemática social, económica y ambiental que arrastran los derrames de petróleo durante su operación. Además, se estudia el estado del arte de los sistemas de detección de fugas y métodos frecuentemente empleados en la detección y localización de fugas de fluidos. Finalmente, se plantea la propuesta de investigación, así como el objetivo principal y los objetivos específicos.

1.2. Estudio del arte del sistema de transporte de petróleo crudo y el ONP

1.2.1. Aspectos técnicos del transporte de petróleo crudo

El petróleo crudo cubre una amplia variedad de componentes o mezclas de hidrocarburos conformados por carbono (85% - 90%), hidrogeno (10% - 14%) y otros compuestos tales como azufre (0.2% - 3%), nitrógeno (<0.1 - 2%), oxígeno (1% - 1.5%), y trazas de metales pesados como el níquel, vanadio y arsénico, que pueden variar dependiendo de su gravedad API (siglas en inglés del *American Petroleum Institute*) y el contenido de azufre (Chaudhuri, 2011). (Speight, 2016) muestra una diferenciación simplificada del petróleo crudo por su gravedad API; petróleo crudo convencional (API > 25°), petróleo crudo pesado (API 10° – 20°), petróleo crudo extra pesado (API < 10°).

Los oleoductos constituyen la modalidad de transporte terrestre más eficiente, económica y segura para llevar el crudo desde los pozos de explotación hasta las baterías de producción, también si se consideran como variables la inversión inicial y el costo por distancia transportada (Tamayo et al., 2015). Este crudo se acopia en las estaciones y posteriormente se bombea a los terminales portuarios y a las refinerías. El transporte por ductos permite salvar las grandes distancias y las dificultades geográficas que separan ambas unidades operativas, trasladando grandes volúmenes de crudo en corto tiempo.

1.2.2. Transporte de petróleo crudo por el oleoducto norperuano

En el Perú, la empresa estatal Petróleos del Perú – Petroperú S. A. es una de las encargadas de la actividad de transporte de petróleo crudo y para ello cuenta con la infraestructura del oleoducto norperuano (ONP) que viene operando desde 1977 hasta la actualidad, siendo la más importante del Perú; este oleoducto atraviesa selva, sierra y costa, y está dividido de tres secciones; el Tramo I, Tramo II y el Oleoducto Ramal Norte; sumando una longitud total de 1106 kilómetros desde la selva norte al terminal Bayóvar en la costa. El ONP tiene una capacidad de transporte de 200 000 barriles por día y se tiene pensado incrementar dicha capacidad hasta los 500 000 barriles por día. El ONP es considerado como un activo crítico nacional, por ello la importancia de mantener dicha infraestructura de transporte de manera; integra, segura y eficiente (Petroperú, 2021).

Tabla 1.1. Características de los ductos del ONP

Característica	Unidad de medida	Tramo I	Tramo II	Ramal Norte
Año de construcción	-	1976	1976	1978
Longitud	km	306	548	252
Diámetro	Pulgadas	24 ^a	36 ^b	16 ^a
Capacidad de diseño	MBD ¹	70	200	105
Recubrimiento de la tubería	-	Epóxico ²	Poliken ³	Epóxico

Nota: ^a espesor mínimo de 6.35 mm, ^b espesor mínimo de 7.93 mm. Fuente: Adaptada de MINEM (2002)

Tabla 1.2. Características de diseño para los tramos del ONP para el transporte del petróleo crudo

Tramo	Grados API ⁴	Gravedad específica	Viscosidad (cSt@18°C)
Tramo I	24.85°	0.905	52.0
Tramo II	26.60°	0.895	38.0
O. Ramal Norte	26.60°	0.895	12.1

Fuente: Adaptado de (Petroperú, 2010).

¹ Miles de barriles diarios.

² Se trata de resina que se utiliza para cubrir y proteger la superficie de la tubería.

³ Cinta de polietileno negra de 20 milésimas de pulgada, que, además, está cubierta con una cinta blanca del mismo material, de 25 milésimas de pulgada de espesor.

⁴ La gravedad API es una relación de la gravedad específica en los derivados del petróleo.

El sistema de transporte se diseñó para una temperatura de circulación de 18°C con las siguientes especificaciones mostradas en la tabla 1.2, aunque a la fecha el Tramo I y II se emplean para transportar diferentes calidades de crudo.

1.2.2.1. Tramo I del ONP

El Tramo I inicia en la Estación Uno cerca al Centro Poblado de San José de Saramuro en el departamento de Loreto, avanzando en dirección oeste paralelo al río Marañón se dirige hasta la Estación Cinco. Este tramo del oleoducto transporta el crudo de tres diferentes calidades, bajo el sistema de *batching*⁵, un primer batch proveniente de PLUSPETROL es la combinación de 3 tipos de crudos (Residual Maquila, crudo Yanayacu y Mayna Pesado), los otros dos batches (Residual de Primaria) proviene de la Refinería de Iquitos propiedad de PETROPERU, las cuales son bombeadas a la Estación Cinco. En la tabla 1.3 se especifican cada uno de los batches transportados.

Tabla 1.3. Calidades y características de crudos transportadas en el Tramo I del Oleoducto Norperuano

Batch	Volumen (MB ^a)	Propietario	Grados API	Viscosidad (cSt@87°F)
Batch 1	60	PLUSPETROL	21° - 22°	286
Batch 2	60	PETROPERU	20°	446
Batch 3	40	PETROPERU	24.8°	40

Nota: ^a Miles de barriles. **Fuente:** Adaptado de (Petroperú, 2010)



Figura 1.1. Distribución y desplazamiento de batches en el Tramo I del ONP.

⁵ Sistema de transporte por lotes usando la misma tubería para diferentes tipos de grados de crudo, separados por raspatubos o por densidades y viscosidades.

El oleoducto puede transportar más de un batch; mientras se espera recibir la finalización de un batch en la Estación 5, se puede iniciar el bombeo de otro tipo de petróleo en la Estación 1, tal como se muestra en la figura 1.1. Para tener control de las cantidades transportadas se hace uso de boletas de recepción y despacho registrando la hora y fecha de inicio y finalización de bombeo, esto permite comparar el total de petróleo saliente de la Estación 1 y recibido en la Estación 5.

Cabe resaltar que el cambio de batch provoca una caída de presión de forma transitoria en el bombeo de petróleo al ofrecer mayor resistencia a ser bombeado, esto se debe principalmente al cambio de características del petróleo crudo, como la viscosidad, grados API o el mayor contenido de parafinas.

Características de los equipos de bombeo de la estación 1

A continuación, se detallan las características de los equipos de bombeo (motobomba y turbobomba) que se encuentran en la Estación N° 1.

Tabla 1.4. Características de la bomba Motobomba 1 MB – 1

MOTOR	Caterpillar
Modelo	D – 398
Potencia (hp)	825
Velocidad (rpm)	1200
BOMBA	Bingham
Modelo	MSD 8x10x3A
Etapas	3
Velocidad (rpm)	3600
Caudal (gpm)	750

Tabla 1.5. Características de la turbobomba Turbobomba 1 GT – 2

TURBINA	Rouston
Modelo	TA1750
Potencia (hp)	1600
Velocidad (rpm)	1200
BOMBA	Bingham
Modelo	MSD 8x10x3A
Etapas	3
Velocidad (rpm)	3600
Caudal (gpm)	2590

Bajo condiciones normales de operación se emplea la motobomba centrífuga 1MB1, en caso de recibir mantenimiento o cumplir con los inventarios elevados se hace uso la turbina 1GT2.

1.2.2.2. Oleoducto Ramal Norte

La Estación Andoas en el departamento de Loreto, es el inicio de oleoducto Ramal Norte, se ubica en el distrito de Nuevo Andoas, esta estación recibe el crudo proveniente del Lote 192 previamente fiscalizado a través de un sistema de medición se almacena en tres tanques con capacidad de 160 000 barriles. La Estación Morona se ubica en el distrito Morona en el departamento de Loreto, y rebombee el crudo proveniente de la Estación Andoas hacia la Estación Cinco.

1.2.2.3. Tramo II del ONP

El Tramo II inicia en la Estación 5 ubicado en el distrito de Manseriche en el departamento de Loreto, es confluencia del Tramo I y el Ramal Norte, en esta estación se controla y monitorea la llegada del crudo que es bombeado hacia las siguientes estaciones, siguiendo al suroeste de la Estación Cinco se llega a la Estación Seis cercana al distrito de Imaza en el departamento de Amazonas, desde ese punto el oleoducto sigue en dirección suroeste y llega a la Estación Siete ubicada en el distrito de El Milagro en el departamento de Amazonas,



Figura 1.2. Trazo del Oleoducto Norperuano y estaciones de bombeo, Tramo I (azul), Tramo II (amarillo) y Oleoducto Ramal Norte (rojo).

continuyendo el recorrido se llega hasta la Estación Ocho ubicada en el distrito de Pucará en el departamento de Cajamarca, tomando rumbo noroeste se llega a la Estación Nueve que

se ubica a una altura de 1120 m.s.n.m. ubicada en el distrito Huarmaca en el departamento de Piura, esta estación cuenta con cinco turbobombas que impulsan el crudo hasta el Abra de Porcuya a 2137 m.s.n.m. desde donde inicia el descenso hacia la costa, culminando el recorrido del oleoducto se llega al Terminal Bayóvar ubicada en el distrito de Sechura en el departamento de Piura.

1.2.2.4. Perfil de elevación del oleoducto norperuano

El Oleoducto Norperuano tienen una distribución geográfica bastante accidentada con pendientes positivas y negativas en su recorrido, algunas más pronunciadas que otras, tal como se muestra en la figura 1.3. Según (Petroperú, 2013) el 85% de los 306 kilómetros de la tubería de 24" que abarca el TRAMO I, se ubican en el fondo de un canal/zanja de flotación y la longitud restante se encuentra enterrada. Los perfiles ayudarán posteriormente en el cálculo de las pendientes para las ecuaciones de flujo en el ducto.

Existe un fenómeno frecuente en el transporte de fluidos líquidos por tuberías, conocido como *slack flow*, esto ocurre en tramos donde la presión manométrica llega a alcanzar a la presión de vapor del fluido también conocida como presión de saturación (Henrie, Carpenter, & Nicholas, 2016), en este escenario una fracción del fluido comienza a vaporizarse al interior de la tubería pasando a un estado de flujo bifásico (líquido – vapor), representa entonces un problema cuando el perfil de elevación cambia de pendiente positiva a negativa, dando como resultado una mayor aceleración del flujo y por ende una discontinuidad en el volumen de flujo transportado.

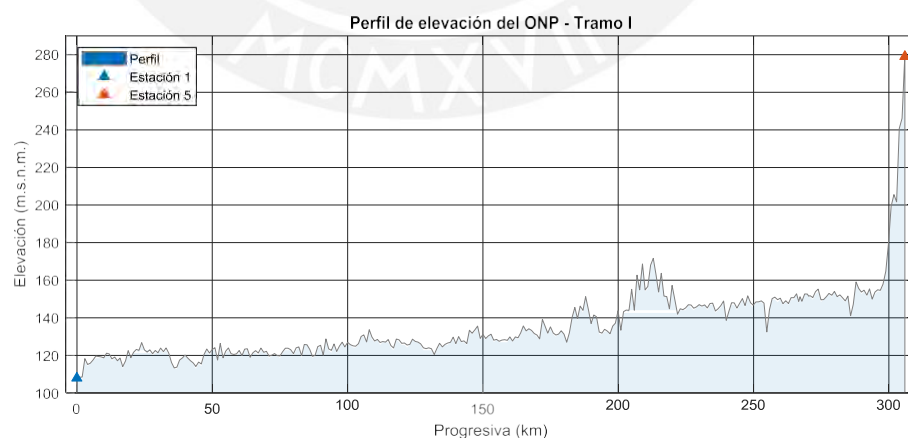


Figura 1.3. Perfil de elevación del Tramo I.

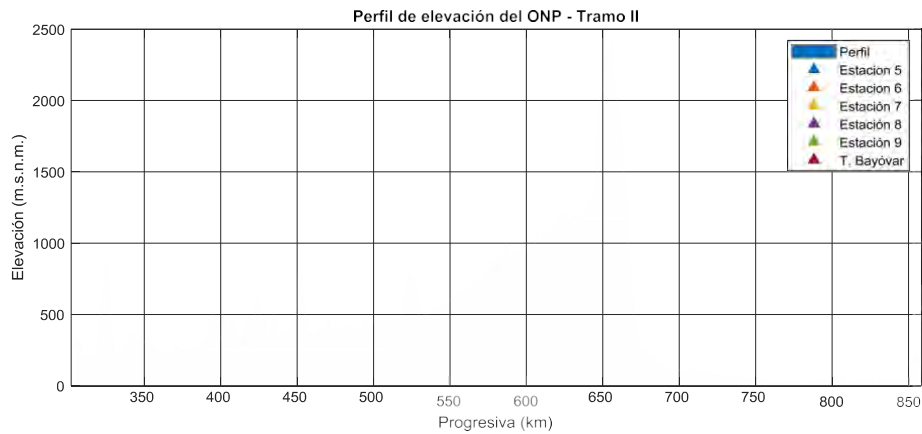


Figura 1.4. Perfil de elevación del Tramo II.

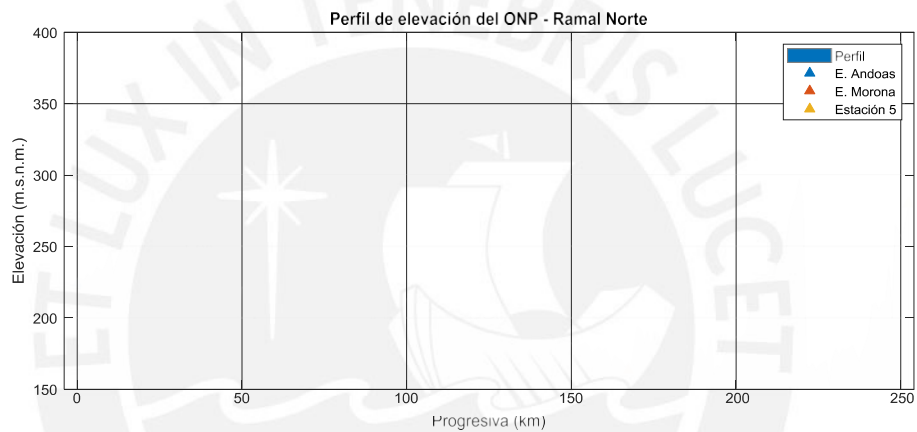


Figura 1.5. Perfil de elevación del Ramal Norte.

Según el Manual de diseño definitivo del ONP bajo la dirección del Ing. Douglas P. Sowell en 1974, indica que la infraestructura del ONP está diseñado para trabajar en condiciones de *slack flow* en las cercanías a las progresivas; 323, 458 y 671, pertenecientes al Tramo II del oleoducto. Este fenómeno se presenta como un desafío para la detección de fugas ya que el flujo bifásico causa una disminución de la efectividad en los sistemas de detección basados en gradientes de presión, por lo tanto, es necesario contar con instrumentación adicional en las zonas donde se produce este fenómeno, también el flujo bifásico altera el comportamiento de los efectos transitorios de presión en el ducto, principalmente en la velocidad de propagación de onda.

1.3. Problemática del transporte de petróleo por el ONP

La problemática en el transporte de petróleo crudo tiene un impacto en el marco social, económico, ambiental, entre otros, por los años comprendidos entre 2011 a 2018 se han reportado 56 derrames de petróleo crudo a lo largo del ONP, con un volumen derramado aproximado de 29 000 barriles, y pérdidas económicas para Petroperú cercanas a los 213 millones de soles en el periodo 2016 – 2017⁶. Las causas frecuentes relacionadas a los eventos de fugas son; la interferencia externa o actividades de terceros, defectos del material o al momento de la construcción, corrosión, movimientos del suelo, desastres naturales y el cierre intempestivo de las válvulas.

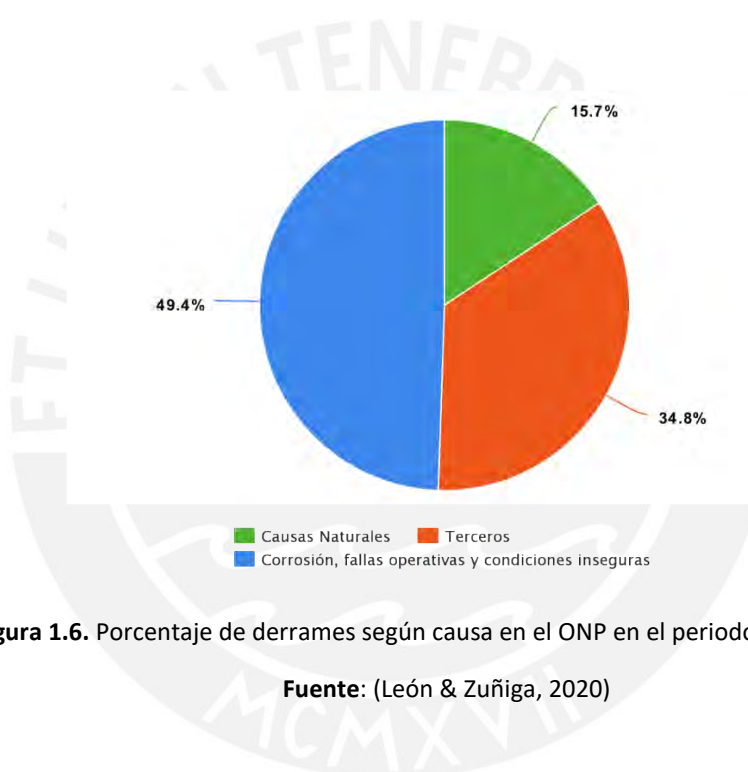


Figura 1.6. Porcentaje de derrames según causa en el ONP en el periodo (2000 – 2019).

Fuente: (León & Zuñiga, 2020)

Las fugas ya sea una pequeña y gradual o grande y repentina, traen consecuencias que pueden ser graves dependiendo de su localización y las circunstancias en las que se produce el evento.

Según (Inga-Aparcana, 2021), durante el periodo de 2014 al 2019 se han registrado 47 contingencias de las se muestran en la figura 1.7. La mayoría de contingencias producto de

⁶ Según el Informe de la Comisión Multisectorial del Congreso de la República del Perú en 2017, encargada de investigar y determinar las responsabilidades detrás de los derrames de petróleo ocurridos en la Amazonía peruana.

actos delictivos fueron realizadas en el Tramo I (15), seguidas del Tramo II (13) y Ramal Norte (2). El tramo más afectado por fenómenos geodinámicos y por corrosión fue el Tramo II.



Figura 1.7. Contingencias producidas en Oleoducto Norperuano durante los años 2014 – 2019.

Fuente: (Inga-Aparcana, 2021)

En agosto de 2016, el gobierno de Perú ordenó el cierre del oleoducto luego del tercer derrame del oleoducto en un período de cinco meses. Reabriendo en septiembre del 2017. Los tres derrames de 2016 fueron:

- El 25 de enero de 2016, se produjo un derrame en la provincia de Bagua, en el Amazonas, a ocho millas de un arroyo que alimenta al río Morona, un importante afluente del río Amazonas (El Comercio, 2016).
- El 3 de febrero de 2016 se produjo un segundo derrame en la provincia de Datem del Marañón en el vecino estado de Loreto (El Comercio, 2016). Junto con el derrame de enero, se estimó que se liberaron aproximadamente 3.000 barriles.
- El 24 de junio de 2016 se produjo un tercer derrame de 600 barriles en la provincia de Maynas, en el estado de Loreto. Petro Perú recibió una multa de 3,5 millones de dólares y el presidente de Petroperú, Germán Velásquez, fue despedido.
- Otro derrame significativo ocurrió el 18 de junio de 2019, contaminando el agua potable de 1230 familias indígenas (Gestión, 2019).

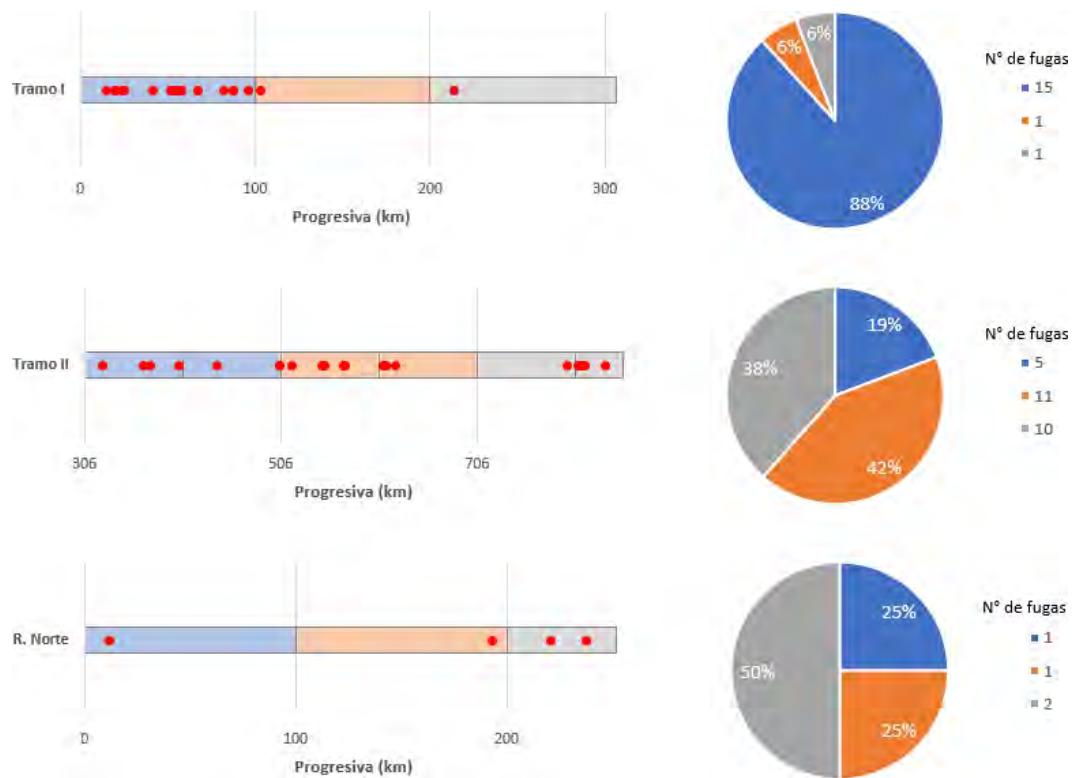


Figura 1.8. Cantidad y porcentaje de fugas por kilómetro en cada tramo del ONP durante el periodo 2014 – 2019.

Los derrames han sido polémicos por varias razones, incluido su impacto en las aldeas locales que dependen del río para obtener agua potable y otros usos esenciales. Petroperú también fue criticada luego de los derrames de enero y febrero de 2016 luego de la publicación de fotografías que mostraban a niños trabajando para limpiar los derrames, y Petroperú pagó 2 dólares americanos por cubo de petróleo recolectado (El Comercio, 2016).

El reglamento nacional vigente de Transporte de Hidrocarburos por Ductos (D.S. 081-2007-EM) exige la implementación de una serie de medidas y herramientas tecnológicas para prevenir y predecir condiciones que produzcan derrames, así como también el uso de un Sistemas de Integridad de Ductos que se encuentre incorporado en el sistema SCADA, en el caso del ONP se viene implementando 19 válvulas de bloqueo y la instalación de transmisores de presión en el Ramal Norte, Tramo I y Tramo II (Inga-Aparcana, 2021), siendo una iniciativa en la mejora de su sistema de detección de fugas.



Figura 1.9. Distribución de las nuevas válvulas de bloqueo (puntos azules) en los tramos del ONP.

Tabla 1.6. Ubicación referencial de las nuevas válvulas de bloqueo

Tramo	Ítem	Equipo	Progresiva (km+m)
ORN	1	Válvula/Transmisor	55+111
	2	Válvula	55+767
	3	Válvula/Transmisor	96+823
	4	Válvula	97+402
	5	Válvula	166+334
	6	Válvula	166+869
	7	Válvula	167+870
	8	Válvula/Transmisor	228+465
Tramo I	1	Válvula	3+000
	2	Válvula	75+553
	3	Válvula	176+300
	4	Válvula	255+175
	5	Válvula	285+641

Tramo	Ítem	Equipo	Progresiva (km+m)
Tramo II	1	Válvula	318+198
	2	Válvula	406+777
	3	Válvula	466+772
	4	Válvula	559+000
	5	Válvula	565+306
	6	Válvula	605+800

Fuente: Adaptado de (Petroperú, 2019).

1.4. Estudio del arte de los sistemas de detección y localización de fugas

Existen diversos enfoques que son usados por las empresas operadoras de ductos para detectar fugas, roturas y derrames. Estos se pueden clasificar en dos grupos los sistemas de detección internos y externos. Los sistemas externos son aquellos que emplean instrumentación de campo o componentes que están ubicados físicamente fuera de la tubería y que tienen un diseño tal que miden las variaciones en las condiciones externas de la tubería (Vásquez, et al., 2021). Por otro lado, los sistemas internos son aquellos que miden valores de proceso tales como; la presión, temperatura y flujos volumétricos o máscicos del flujo dentro de la tubería. En la figura 1.10 se muestra un mapa de la clasificación de los sistemas de detección de fugas.

1.4.1. Métodos para la detección y localización de fugas

Algunos de los métodos importantes aplicados para la detección y localización de fugas en ductos son enumerados continuación:

1.4.1.1. Sistema de detección de fugas basado en ondas de presión negativa

Es un método ampliamente usado para la detección de fugas en tuberías de largas longitudes, empleando el principio de velocidad de onda interior en la tubería, capaz de detectar fugas de tasa de flujo bajas. (Sun and Chang, 2014)

1.4.1.2. Detección de fugas basada en sensor de fibra

El método emplea sensores de fibra óptica para fallas presentando una mayor sensibilidad y seguridad en la detección y localización de fugas, puede ser instalado junto con la red de tuberías para obtener datos en tiempo real, una de sus mayores desventajas es que se debe

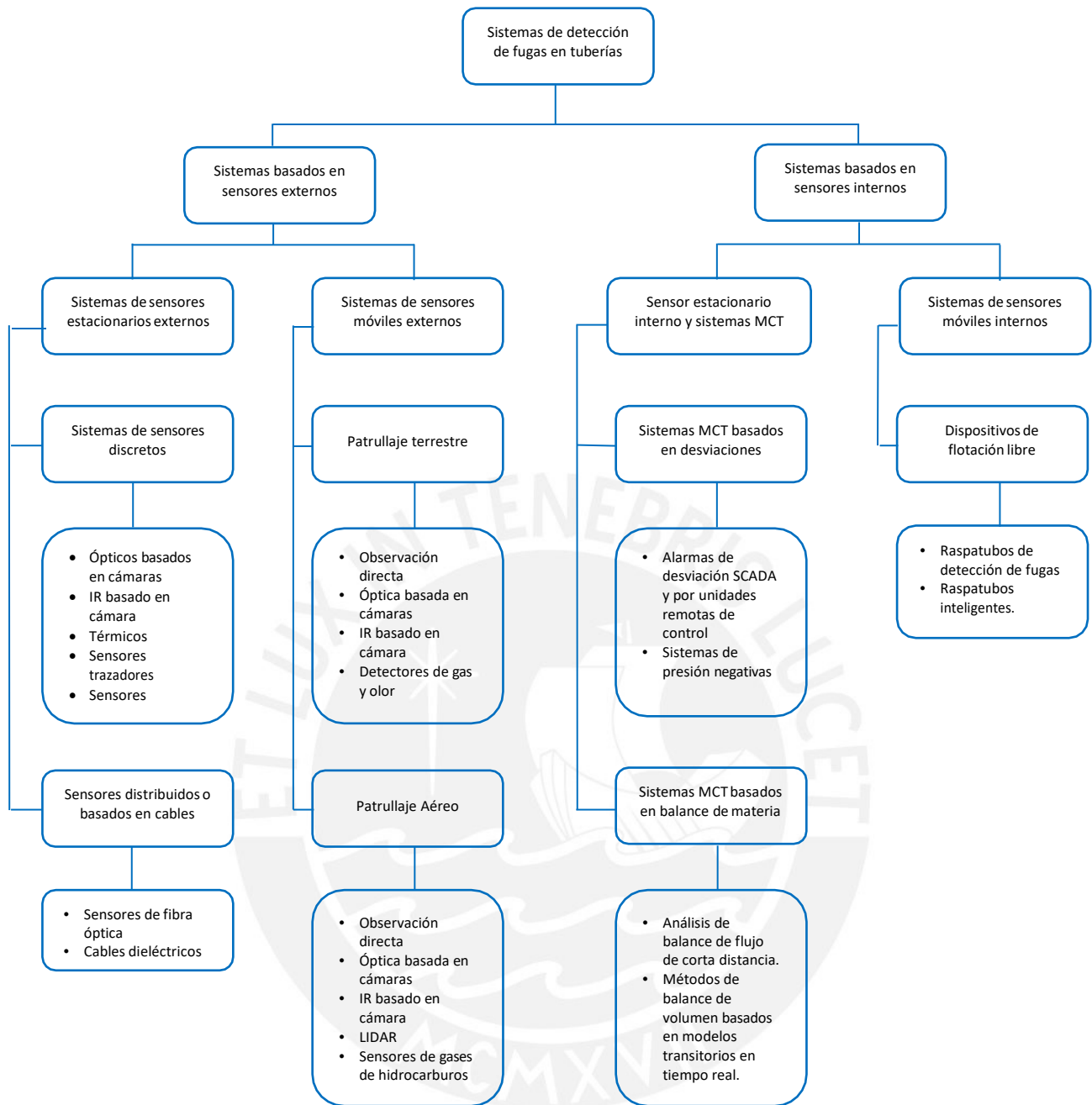


Figura 1.10. Clasificación de los sistemas de detección de fugas en tuberías.

Fuente: Adaptado de (Henrie et al.,2016).

agregar un material a prueba de sonido para evitar el ruido ambiental al momento de tomar los datos (Bhuiyan et al., 2016).

1.4.1.3. Detección de fugas en tuberías basada en SVM

El Support Vector Machine se puede usar de manera eficiente para detectar algún defecto o fuga en la tubería, para este método es necesario contar con sensores de fibra óptica distribuidos a lo largo de la tubería y junto a los circuitos de amplificación y filtrado de señales, aplicar los principios de interferometría para detectar dichas fugas. (Qu et al., 2010)

1.4.1.4. Sensores piezoeléctricos acústicos – eléctricos

Este método usa una distribución de sensores piezoeléctricos a lo largo de la tubería, que detectan la dispersión de la onda sonora producida por una fuga, este método tiene mejores resultados en gasoductos que en oleoductos, debido a que una tubería que transporta gas atenúa menos la onda sonora que una tubería que transporta líquidos. (Ozevin and Harding, 2012)

1.4.1.5. Transformada Rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier (FFT) se puede usar para la detección de fugas, pero tiene algunas limitaciones, la FFT se puede aplicar para una tubería que tiene pocas curvas, la tubería no debe estar enterrada y debe estar libre del ruido del tráfico. Estas limitaciones comprometen la detección y localización de fugas en gasoductos y oleoductos ya que la mayoría de estas estructuras se encuentran enterradas y presentan curvaturas. (Lay-Ekuakile et al., 2009.)

1.4.1.6. Análisis wavelet armónica

La señal de presión causada por una fuga en la tubería se descompone en cada nivel wavelet mediante la transformada de wavelet armónica, y los resultados se muestran en términos de mapa de contorno de frecuencia – tiempo o en un gráfico de perfil de frecuencia – tiempo. Este método sirve para la detección de fugas pequeñas en tuberías de gran longitud. (Hu et al., 2011)

1.4.1.7. Simulación dinámica de fluidos computacional (CFD)

Este método presenta buenos resultados en las simulaciones, el tiempo de cómputo es uno de sus inconvenientes y la predicción de fugas en una tubería es difícil, no se aplica para tuberías de grandes longitudes. (Ben-Mansour et al., 2012.)

1.4.1.8. Filtros de Kalman

Este método emplea el concepto de estimadores de estados, los diferentes tipos de filtros de Kalman tales como: Ensemble Kalman filter (EnKF), Extended Kalman filter (EKF),

Unscented Kalman filter (UKF) y Particle filter (PF), demuestran su aplicabilidad para el diagnóstico y detección de fugas. (Torres et al, 2020)

1.4.1.9. Redes Neuronales

El método usa una arquitectura de redes neuronales en conjunto con las mediciones de caudal y presión en la tubería, y estima el factor de fricción para determinar la posición de una fuga. Entre las arquitecturas se tienen las redes bayesianas, perceptrón multicapa y las redes neuronales convolucionales. (Perez-Perez et al., 2021)

1.4.1.10. Análisis Estructural

Este método emplea un modelo del sistema para analizar los cambios estructurales que pueden presentar inconsistencias en la dinámica nominal de un proceso y por tanto puedan generar indicios de fallas (Pérez-Zuñiga et al., 2015-2020). Dentro de un conjunto de fallas de interés se pueden aislar fallas de tipo fuga. (Pérez-Zuñiga et al., 2021)

1.5. Propuesta y Objetivos de Tesis

1.5.1. Propuesta de Tesis

Por los motivos expuestos en las secciones anteriores, este trabajo de tesis propone modelar el sistema de transporte de petróleo crudo para la detección y localización de fugas en el Tramo I del Oleoducto Norperuano, para tal fin se empleará la comparación de las soluciones numéricas por los métodos matemáticos de discretización por diferencias finitas y método de las características (MOC) aplicados al oleoducto, además se diseñará el sistema de detección y localización de fugas que cumplan con los requerimientos de sensibilidad y precisión. Por lo tanto, la detección de fugas en el oleoducto de forma rápida proporcionaría un medio para minimizar las consecuencias negativas de estos sucesos.

1.5.2. Objetivos de la Tesis

Objetivo General

Modelar el sistema de transporte de petróleo crudo para la detección y localización de fugas en el Tramo I del Oleoducto Norperuano.

Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte sobre el modelamiento del transporte de petróleo crudo por ductos y los sistemas de detección y localización de fugas en oleoductos.

- Simular mediante software los modelos propuestos para el transporte de petróleo crudo por ductos y comparar los resultados para diferentes condiciones de fugas.
- Diseñar un sistema de detección de fugas basado en modelo, que permita detectar y localizar diferentes condiciones de fuga de petróleo crudo.
- Desarrollar la propuesta de implementación del sistema de detección y localización de fugas en el Tramo I del Oleoducto Norperuano.



CAPÍTULO II: MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL DUCTO

2.1. Introducción

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del flujo interior en una tubería constituyen un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales, las cuales son difíciles de resolver analíticamente y, por lo tanto, se deben emplear métodos numéricos para su solución, tales como el método de las características o los diferentes métodos de diferencias finitas explícitas e implícitas. Los métodos numéricos necesitan de información como las condiciones de frontera en la tubería, que dependen de las unidades o equipos aguas arriba y aguas abajo, haciendo que el modelo no se pueda generalizar para cualquier escenario, esto implica un incremento en la complejidad del modelado. A continuación, se desarrollan dos de los métodos más empleados para el modelado dinámico del transporte de fluidos por tuberías o ductos.

2.2. Método de las características (MOC)

El método de características es una técnica para resolver ecuaciones diferenciales parciales. Normalmente, se aplica para resolver ecuaciones de primer orden, aunque en general es válido para cualquier ecuación diferencial parcial hiperbólica. El método consiste en reducir una ecuación diferencial parcial a una familia de ecuaciones diferenciales ordinarias a lo largo de la cual la solución puede integrarse a partir de algunos datos iniciales dados en una hipersuperficie adecuada. (Mambretti, 2014)

Retomando las ecuaciones del balance de momento y continuidad que describen el flujo en estado transitorio de un fluido ligeramente compresible con el siguiente par de ecuaciones:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \frac{\partial v}{\partial z} = 0 \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = -f \frac{\rho v |v|}{2D} - \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \\ \frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial z} = -f \frac{Q|Q|}{2DA^2} - g \cdot \text{sen}(\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

Donde; p es la presión manométrica en el ducto [Pa], ρ es la densidad del fluido [kg/m^3], c es la velocidad de onda del fluido [m/s], v es la velocidad del fluido en el interior del ducto

$[m/s]$, z es la posición de referencia del sistema $[m]$, t es la variable de tiempo $[s]$, f es el factor de fricción *[adimensional]*, D es el diámetro del ducto $[m]$, g es la aceleración de la gravedad $[m/s^2]$, α es el ángulo formado con la horizontal *[radianes]*, H es la altura de presión manométrica $[m]$, A es el área de la sección transversal $[m^2]$, Q es el flujo volumétrico o caudal $[m^3/s]$.

Tanto el conjunto de ecuaciones en (1) y (2) pueden ser empleadas para describir las ecuaciones de balance en un sistema de flujo de fluidos, donde: $v = Q/A$ y $p = \rho g H$.

Multiplicando la segunda ecuación de 1 por c y sumando a la primera el resultado sería:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial z}\right) + \rho c \left(\frac{\partial v}{\partial t} + c \frac{\partial v}{\partial z}\right) = -f \frac{v^2}{2D} - c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (3)$$

De forma similar si se multiplica la segunda ecuación por c y se resta de la primera el resultado sería:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial z}\right) - \rho c \left(\frac{\partial v}{\partial t} - c \frac{\partial v}{\partial z}\right) = f \frac{v^2}{2D} + c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (4)$$

Si en el plano (z, t) , se considera líneas rectas determinadas por las ecuaciones:

$$\frac{dz}{dt} = c, \quad z - ct = \xi = \text{constante} \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = -c, \quad z + ct = \eta = \text{constante} \quad (6)$$

Que para la ecuación de onda ξ y η se denominan características, es fácil deducir que para cualquier $A(z, t)$, es válido:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + c \frac{\partial A}{\partial z} = \left(\frac{dA}{dt}\right)_{\xi=\text{const.}} \quad (7)$$

De forma similar será verdad que:

$$\frac{\partial A}{\partial t} - c \frac{\partial A}{\partial z} = \left(\frac{dA}{dt}\right)_{\eta=\text{const.}} \quad (8)$$

Usando ahora la noción de una derivada direccional, se puede escribir las ecuaciones obtenidas anteriormente de la siguiente forma:

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\xi=const.} + \rho c \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\xi=const.} = -f \frac{\rho c v |v|}{2D} - c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (9)$$

$$\left(\frac{dp}{dt}\right)_{\eta=const.} - \rho c \left(\frac{dv}{dt}\right)_{\eta=const.} = f \frac{\rho c v |v|}{2D} + c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (10)$$

O también:

$$\frac{d}{dt} (p + \rho c \cdot v)_{\xi=const.} = -f \frac{\rho c v |v|}{2D} - c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} (p - \rho c \cdot v)_{\eta=const.} = f \frac{\rho c v |v|}{2D} + c \rho g \cdot \text{sen}(\alpha) \quad (12)$$

Si se considera en el plano (z, t) una cuadrícula rectangular con coordenadas de espaciamiento Δz y paso de tiempo $\Delta t = \Delta z/c$, tal como se muestra en la figura 2.1. A través de los nodos de la cuadrícula resultante se trazan las características $z = ct + \xi$ y $z = -ct + \eta$, de pendiente positiva y negativa, respectivamente. La distribución continua de las funciones buscadas $p(z, t)$ y $v(z, t)$ se reemplaza con valores discretos $p_{k,m} = p(z_k, t_m)$ y $v_{k,m} = v(z_k, t_m)$ de las funciones de cuadrícula en los nodos de la cuadrícula.

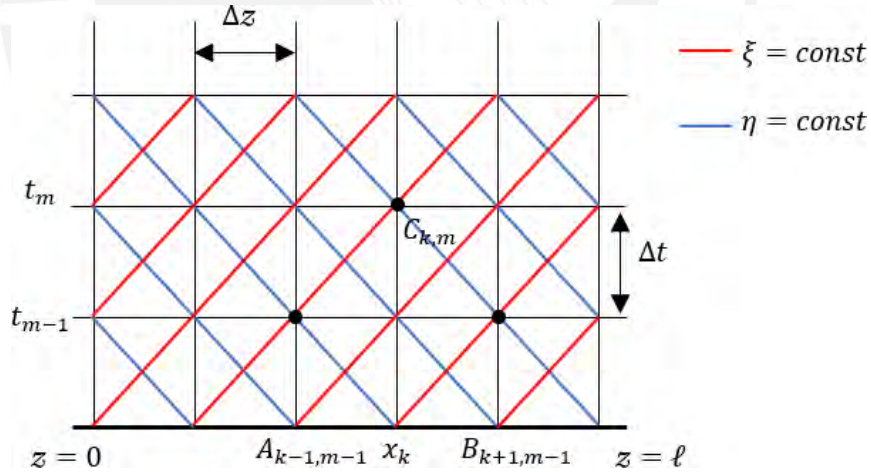


Figura 2.1. Diagrama del plano (x, t) del método de las características.

El punto $C(z_k, t_m)$ puede ser un punto arbitrario dentro del plano (z, t) , si se reemplazan las derivadas direccionales de las ecuaciones 11 y 12, con las diferencias finitas a lo largo de las líneas características AC y BC se obtiene:

$$\left. \frac{\Delta(p + \rho c \cdot v)}{\Delta t} \right|_{\xi=const.} = -c \varphi_A \quad (13)$$

$$\left. \frac{\Delta(p - \rho c \cdot v)}{\Delta t} \right|_{\eta=const.} = -c \varphi_B \quad (14)$$

Donde $\varphi = f \frac{\rho \omega r}{2D} + \rho g \cdot \text{sen}(\alpha)$

A partir de estas ecuaciones se puede determinar la presión p_c y velocidad v_c del fluido para el punto C mediante los valores conocidos de los puntos A y B.

$$\begin{cases} p_{k,m} + \rho c \cdot v_{k,m} = p_{k-1,m-1} + \rho c \cdot v_{k-1,m-1} - \Delta z \cdot \varphi_{k-1,m-1} \\ p_{k,m} - \rho c \cdot v_{k,m} = p_{k+1,m-1} - \rho c \cdot v_{k+1,m-1} + \Delta z \cdot \varphi_{k+1,m-1} \end{cases} \quad (15)$$

Con este sistema de ecuaciones lineales se puede obtener la presión $p_{k,m}$ y la velocidad $v_{k,m}$ del flujo.

$$\begin{cases} p_{k,m} = \frac{p_{k-1,m-1} + p_{k+1,m-1}}{2} + \rho c \cdot \frac{v_{k-1,m-1} - v_{k+1,m-1}}{2} + \frac{\Delta z}{2} \cdot (\varphi_{k+1,m-1} - \varphi_{k-1,m-1}) \\ v_{k,m} = \frac{p_{k-1,m-1} - p_{k+1,m-1}}{2\rho c} + \frac{v_{k-1,m-1} + v_{k+1,m-1}}{2} - \frac{\Delta z}{2\rho c} \cdot (\varphi_{k-1,m-1} + \varphi_{k+1,m-1}) \end{cases} \quad (16)$$

Por lo tanto, las fórmulas recurrentes (16) dan la solución del problema formulado, porque permiten calcular la presión y la velocidad del flujo en el siguiente instante de tiempo t_m a partir de valores conocidos de estos parámetros en el instante anterior de tiempo t_{m-1} . Dado que en el primer instante de tiempo se puede tomar los valores iniciales de la presión y la velocidad del flujo en $t = 0$, luego calculando sucesivamente la presión y la velocidad con las fórmulas (16), con lo que se puede obtener los parámetros de flujo en un instante de tiempo arbitrario $t > 0$.

2.2.1. Velocidad de onda

La velocidad de onda en un fluido ligeramente comprimible y confinado en una tubería rígida, puede ser expresada en términos del módulo de elasticidad y la densidad de la masa del fluido, pero además la velocidad depende de las propiedades elásticas del conducto, así como de las restricciones externas. Las propiedades elásticas incluyen el tamaño de la tubería, el espesor de la pared y el material de la pared. El módulo de elasticidad en la masa del fluido depende de su temperatura, presión y la cantidad de gases arrastrados. (Chaudhry, 2014)

Por lo tanto, la velocidad de onda de una onda de presión positiva puede ser más alta que la de una onda negativa. Se necesitan pruebas de prototipo adicionales para cuantificar la

reducción en la velocidad de la onda debido a la reducción de la presión. (Halliwell, 1963) presentó la siguiente expresión general para la velocidad de onda:

$$c = \sqrt{\frac{K_e}{\rho \left(1 + \frac{K_e \psi}{E}\right)}} \quad (17)$$

Donde ψ es un parámetro adimensional que depende de las propiedades elásticas de la tubería; E es el módulo de elasticidad de Young de las paredes de la tubería y K_e es el módulo de elasticidad del fluido. Algunos valores referenciales se encuentran en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Módulos de elasticidad de Young

Material	Módulo de elasticidad E^* [GPa]
Aleaciones de aluminio	68 – 73
Cemento de asbesto	24
Latón	78 – 110
Hierro fundido	80 – 170
Concreto	14 – 30
Aceros dulces	200 – 212

Fuente: Adaptado de (Chaudhry, 2014)

Tabla 2.2. Módulos de elasticidad y densidad de algunos líquidos comunes a presión atmosférica

Material	Temperatura (°C)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad K_e [GPa]
Alcohol etílico	0	790	1.32
Glicerina	15	1260	4.43
Crudo de petróleo	15	900	1.50
Agua	20	999	2.19
Agua de mar	15	1025	2.27

Fuente: Adaptado de (Chaudhry, 2014)

2.2.2. Condiciones iniciales y de frontera

Con las ecuaciones propuestas anteriormente es posible calcular los valores de los parámetros requeridos en los puntos interiores de la malla trazada por el método de las características, conocidas las condiciones iniciales y de frontera. Las condiciones iniciales son normalmente calculadas con los métodos de caudal en estado estacionario, en cuanto a las condiciones de frontera, estas dependen del tipo de arreglo que se encuentren en los extremos de la tubería, las cuales a su vez determinan el comportamiento del sistema. Una condición de frontera especifica establecen uno de los parámetros (altura p , velocidad v), o relaciona estos dos parámetros con una función definida. Los dos parámetros p y v en cada extremo de la tubería se calculan resolviendo las ecuaciones que describe la condición de frontera junto con la línea característica, para condiciones aguas abajo o aguas arriba (Chaudhry, 2014).

2.2.3. Reservorios

Una de las condiciones de frontera más comunes que se presentan en el análisis de sistemas de fluidos son los reservorios, bajo la hipótesis que estos son lo suficientemente grandes como para mantener inalterado su nivel durante el transitorio: para este caso se puede asumir que la altura es constante. Esta condición se asocia a una ecuación característica. Tal como se muestra en la figura 2.2, las condiciones pueden establecerse aguas arriba o aguas debajo de la tubería.

Suponiendo que la tubería está dividida en $n - 1$ secciones, de 1 a n y el reservorio está ubicado aguas arriba por ejemplo en el punto $n = 1$ se tendría el siguiente análisis:

$$\begin{aligned} H(1, t) &= H_0 \quad \forall t \text{ la altura en el reservorio se mantiene constante} \\ v(1, t + 1) &= v(2, t) + \frac{g}{c} \cdot [H_0 - H(2, t)] - f \cdot \frac{v(2, t)|v(2, t)|}{2D} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (18)$$

De forma similar se puede realizar el análisis para un reservorio posicionado aguas abajo por ejemplo en el punto n , tal que la condición de altura constante se le asocia a la línea característica positiva:

$$\begin{aligned} H(n, t) &= H_0 \quad \forall t \text{ la altura en el reservorio se mantiene constante} \\ v(n, t + 1) &= v(n - 1, t) - \frac{g}{c} \cdot [H_0 - H(n - 1, t)] - f \cdot \frac{v(n - 1, t)|v(n - 1, t)|}{2D} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (19)$$

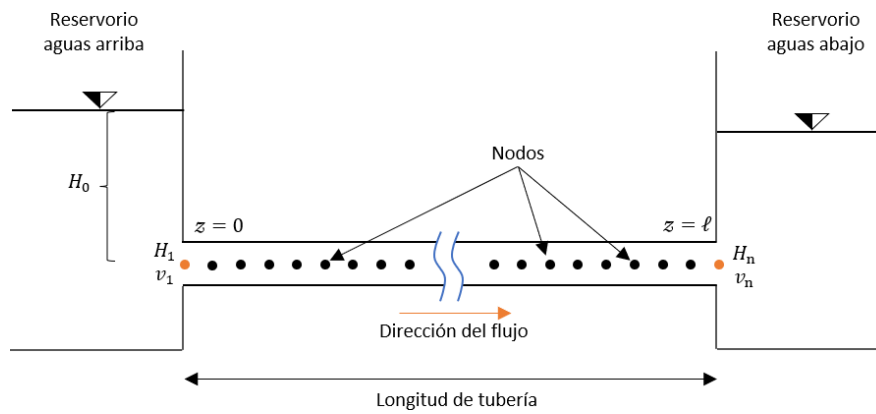


Figura 2.2. Representación de los reservorios de altura constante aguas arriba y aguas abajo.

2.2.4. Válvula

Las válvulas son elementos complejos, cuyos modelos relacionan las variaciones entre la altura y el flujo de descarga a través de la válvula, se puede implementar una forma simple tomando la hipótesis que para una cierta posición de apertura de la válvula le corresponde un único valor de velocidad de flujo, para ello existen diferentes correlaciones algunas de las cuales se pueden representar como la ecuación (20).

$$v(1, t) = v_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_c}\right), \quad \text{para } t \leq t_c \quad (20)$$

$$v(1, t) = 0, \quad \text{para } t > t_c \quad (21)$$

En este caso la válvula se encuentra posicionada aguas arriba en la sección $n = 1$, esta condición se asocia a la línea característica negativa.

$$H(1, t + 1) = H(2, t) + \frac{c}{g} \cdot [v(1, t + 1) - v(2, t)] + f \cdot \frac{c}{g} \cdot \frac{v(2, t)|v(2, t)|}{2D} \cdot \Delta t \quad (22)$$

Nuevamente se realiza un análisis similar para la válvula posicionada aguas abajo, donde la condición de velocidad se asocia a la línea característica positiva.

$$v(n, t) = v_0 \cdot \left(1 - \frac{t}{t_c}\right), \quad \text{para } t \leq t_c \quad (23)$$

$$v(n, t) = 0, \quad \text{para } t > t_c \quad (24)$$

$$H(n, t + 1) = H(n - 1, t) - \frac{c}{g} [v(n, t + 1) - v(n - 1, t)] - f \cdot \frac{c}{g} \frac{v(n - 1, t)|v(n - 1, t)|}{2D} \cdot \Delta t \quad (25)$$

2.2.5. Bomba Centrífuga

En (Verde & Torres, Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks Advanced Tools for Automatic Monitoring and Supervision of Pipelines, 2017) la condición de frontera para una bomba centrífuga ubicada en el extremo aguas arriba de la tubería y funcionando a velocidad constante, se analiza empezando por la curva de descarga de la bomba centrífuga seleccionada. La característica de la bomba que funciona a velocidad constante se puede aproximar por la siguiente expresión:

$$H_b - H_{in} = C_2 Q_1^2 + C_1 Q_1 + C_0 \quad (26)$$



Figura 2.3. Sistema bomba – tubería

Donde $H_b - H_{in} = H_m$ es la altura de presión de la bomba, H_b es la presión de salida de la bomba, H_{in} es la presión de succión de la bomba, Q_1 es el flujo volumétrico en la tubería, y C_0, C_1, C_2 son los coeficientes constantes que dependen de la bomba seleccionada.

La restricción hidráulica para la entrada de la tubería puede ser modelada por la siguiente expresión:

$$R_{in} Q_1^2 = H_b - H_1 \quad (27)$$

Donde R_{in} es el coeficiente de restricción y depende de la pérdida de presión que ocurre entre la descarga de la bomba y el inicio de la tubería. En el caso de que el flujo o velocidad en el punto $n = 1$ se considere una condición de frontera aguas arriba, se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_1 = \frac{-C_1 + \sqrt{C_1^2 - 4(R_{in} + C_0)(-C_2 + H_1 - H_{in})}}{2(R_{in} + C_0)} \quad (28)$$

Donde H_{in} depende de la condición del reservorio aguas arriba, mientras que H_1 es calculado para cada paso en la simulación. La restricción hidráulica para la salida de la tubería puede ser modelada igualmente como se muestra a continuación:

$$R_{out}Q_n^2 = H_n - H_{out} \quad (29)$$

Donde R_{out} es el coeficiente de restricción y depende de la pérdida de presión entre la salida de la tubería. En el caso donde H_n es usado como una condición de frontera, se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$H_n = H_{out} + R_{out}Q_n^2 \quad (30)$$

Ahora H_{out} es la nueva condición de frontera, y H_n es calculada para cada paso en la simulación.

Algoritmo principal para el método de características (MOC)

```

1: // Leer la configuración del sistema de tuberías
2: // Leer las condiciones iniciales
3: t = 0;
4: while t < tmax do
5:     t = t + dt;
6:     CalculoPuntosInteriores;
7:     CalculoCondicionesdeFrontera;
8: end while

```

Algoritmo para los puntos interiores de la malla **CalculoPuntosInteriores**

```

1: for i = 1 to n-1 do
2:     vp[i] = 0.5*(v[i-1]+v[i+1])+(g/c)*(h[i-1]-h[i+1])-
3:     (f*dt/(2*d))*(v[i-1]*abs(v[i-1])+v[i+1]*abs(v[i+1]));
4:     hp[i] = 0.5*(h[i-1]+h[i+1]+ (v[i-1]-v[i+1])/(g/c) -
5:     (f*dt/(2*d))*(v[i-1]*abs(v[i-1])-v[i+1]*abs(v[i+1]))/(g/c));
6: end for

```

Algoritmo para los puntos en las fronteras **CalculoCondicionesdeFrontera**

```

1: // Reservorio ubicado aguas arriba
2: hp[0] = h0;
3: vp[0] = v[1]+g*(h[0]-hp[1])/c-f*v[1]*abs(v[1])*dt/(2*d);
4:
5: // Válvula ubicada corriente abajo
6: if t<tc then
7:     tau = power((1-t/tc),m);
8:     vp[n] = v0*tau;

```

```

9:    hp[n] = h[n-1]-c*(vp[n]-v[n-1])/g-f*c*v[n-1]*abs(v[n-1])*dt/(2*g*d);
10: end else
11:    tau = 0;
12:    vp[n] = 0;
13:    hp[n] = h[n-1]+c*v[n-1]/g-f*c*v[n-1]*abs(v[n-1])*dt/(2*g*d);
14: end if

```

2.3. Método en diferencias finitas

Tomando el siguiente modelo de las ecuaciones del balance de momento y continuidad, y asumiendo inicialmente una tubería horizontal se tienen:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} \quad (31)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{\partial H}{\partial z} - f \frac{Q|Q|}{2DA} \quad (32)$$

Los modelos de coeficientes de fricción constante no se recomiendan para sistemas reales, por otro lado, las ecuaciones para fricción variable en estado transitorio incrementan la complejidad de las estructuras de detección y aislamiento de fugas, y no aportan mejoras significativas en las estimaciones de fugas (Verde & Torres, Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks Advanced Tools for Automatic Monitoring and Supervision of Pipelines, 2017). Por lo tanto, es recomendable manejar una ecuación como la de Colebrook (33) o Swamee – Jain (34) para el cálculo de f .

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 0.86 \ln \left(\frac{1}{3.7D} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (33)$$

$$f = 1.325 \left\{ \ln \left[0.27 \left(\frac{e}{D} \right) + 5.74 \left(\frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad (34)$$

Donde; f es el factor de fricción [adimensional], D es el diámetro del ducto [m], e es la rugosidad absoluta del ducto [m], Re es el número de Reynolds [adimensional].

La siguiente discretización explícita fue considerada por (Chaudhry, 2014); la longitud de la tubería es considerada continua y se aproxima usando secciones espaciales discretas explícitas. El espacio z puede ser dividido en n celdas de tamaño $\Delta z = L/n$ y luego, las derivadas parciales con respecto a z de las ecuaciones (31) y (32) pueden ser aproximadas de la siguiente forma:

$$\frac{\partial H}{\partial z} \cong \frac{H_{i+1} - H_i}{\Delta z} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (35)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial z} \cong \frac{Q_i - Q_{i+1}}{\Delta z} \quad \forall i = 2, \dots, n \quad (36)$$

2.3.1. Modelo de fuga

El caudal teórico que sale a través de un hoyo de área A , está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = A\sqrt{2gH} \quad (37)$$

En la práctica la descarga de un fluido produce una pérdida en la velocidad, la cual se conoce como coeficiente de descarga c_d , por lo tanto, el caudal se representaría como:

$$Q = c_d A\sqrt{2gH} \quad (38)$$

Si se agrupa los valores constantes de esta última ecuación se podría escribir:

$$Q_f(z_f, t) = \lambda\sqrt{H(z_f, t)} \quad (39)$$

Donde $\lambda = c_d A\sqrt{2g}$, además $\lambda \geq 0$, la ecuación puede ser aplicada en cualquier sección de la tubería con la siguiente forma:

$$Q_{i+1} = \lambda_i\sqrt{H_{i+1}} \quad \forall i = 1, \dots, n - 1 \quad (40)$$

Asumiendo que las condiciones de frontera en los extremos de la tubería son caracterizadas por las alturas de presión al inicio H_{ri} y fin H_{ro} , y sustituyendo en las aproximaciones de las ecuaciones diferenciales del sistema, el modelo puede ser escrito como n conjuntos de ecuaciones dinámicas no lineales representadas por:

$$Q_i = \frac{gA}{\Delta z} (H_i - H_{i+1}) - \frac{J}{2DA} Q_i |Q_i| \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (41)$$

$$\dot{H}_i = \frac{c^2}{aA\Delta z} (Q_{i-1} - Q_i - \lambda_{i-1}\sqrt{H_i}) \quad \forall i = 2, \dots, n \quad (42)$$

Con $H_1 = H_{ri}$ y $H_{n+1} = H_{ro}$ como entradas del sistema.

2.4. Análisis de los modelos

Se realizaron simulaciones para el caso de transporte de agua con las condiciones mostradas en la tabla 2.3, tomando al nodo 3 como punto de fuga ubicado a 42.5 metros desde el inicio de la tubería, para ambos modelos no se consideró el ruido de medición:

Tabla 2.3. Parámetros de la tubería y flujo para simulaciones

Parámetro	Valor
Longitud, L [m]	85.0
Diámetro, D [m]	0.0635
Velocidad de onda, c [m/s]	407.5
Densidad, ρ [kg/m ³]	1000.0
Número de segmentos	4
Número de nodos, n	5
Constante de fuga, λ [m ^{2.5} /s]	8×10^{-6}
Constante de fricción, f	0.0216

En la figura 2.4, se observa la respuesta con el método de las características (MOC), para los nodos 2 y 4, nodos ubicados a 21.25 metros y 63.75 metros respectivamente desde el inicio de la tubería. En la gráfica de alturas se observa el comportamiento transitorio en el tiempo de 260 segundos producto de la fuga en el nodo 3, la magnitud de la fuga no produce un cambio considerable en los valores de estado estacionario. Por otro lado, en la gráfica de los caudales se tiene que luego del tiempo de fuga el nodo 2 tiene un incremento y el nodo 4 decrece eso ocurre por la dinámica del balance de materia y por tomar las condiciones de frontera a las alturas H_1 y H_5 .

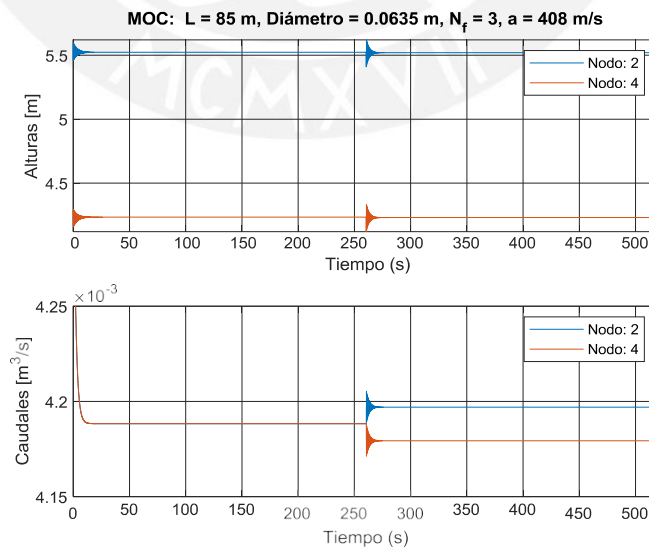


Figura 2.4. Respuesta para una fuga ubicada en el nodo 3, usando el método MOC.

En la figura 2.5, se presenta la respuesta para la altura y caudales empleando el método de discretización por diferencias finitas, la ubicación de la fuga se encuentra en el nodo 3 y el conjunto de ecuaciones diferenciales (Verde, 2004) que representa esta dinámica se muestra a continuación:

$$\begin{aligned}
 \dot{H}_2 &= \frac{c^2}{\Delta z g A} (Q_1 - Q_2) \\
 \dot{H}_3 &= \frac{c^2}{\Delta z g A} (Q_2 - Q_3) \\
 \dot{H}_4 &= \frac{c^2}{\Delta z g A} ((Q_3 - \lambda \sqrt{H_3}) - Q_4) \\
 Q_1 &= \frac{g A}{\Delta z} (H_1 - H_2) - \frac{f}{2 D A} Q_1 |Q_1| \\
 Q_2 &= \frac{g A}{\Delta z} (H_2 - H_3) - \frac{f}{2 D A} Q_2 |Q_2| \\
 Q_3 &= \frac{g A}{\Delta z} (H_3 - H_4) - \frac{f}{2 D A} Q_3 |Q_3| \\
 Q_4 &= \frac{g A}{\Delta z} (H_4 - H_5) - \frac{f}{2 D A} Q_4 |Q_4|
 \end{aligned} \tag{43}$$

En esta solución los caudales presentan un cambio mientras que las alturas de presión no cambian de valor luego de la etapa transitoria, esto se debe a que para el sistema de ecuaciones diferenciales descritas anteriormente se consideran las presiones en el nodo 1 y 5 como entradas y se analizan las salidas Q_i en el sistema.

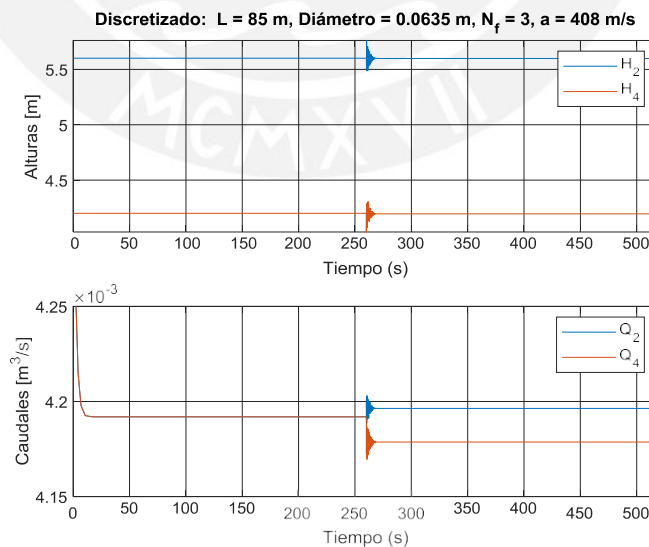


Figura 2.5. Respuesta para una fuga ubicada en el H_3 , usando el método discretizado.

Otro enfoque es considerar como condiciones de frontera al caudal de entrada Q_1 y H_5 , las ecuaciones diferenciales para este caso se muestran a continuación.

$$\begin{aligned}
 \dot{H}_1 &= \frac{c^-}{gA\Delta Z} (Q_1 - Q_2) \\
 \dot{H}_2 &= \frac{c^2}{gA\Delta Z} (Q_2 - Q_3) \\
 H_3 &= \frac{c^2}{gA\Delta Z} ((Q_3 - \lambda\sqrt{H_3}) - Q_4) \\
 \dot{H}_4 &= \frac{c^2}{gA\Delta Z} (Q_4 - Q_5) \\
 Q_2 &= \frac{\Delta Z}{gA} (H_1 - H_2) - \frac{f}{2DA} Q_2 |Q_2| \\
 Q_3 &= \frac{\Delta Z}{gA} (H_2 - H_3) - \frac{f}{2DA} Q_3 |Q_3| \\
 Q_4 &= \frac{\Delta Z}{gA} (H_3 - H_4) - \frac{f}{2DA} Q_4 |Q_4| \\
 Q_5 &= \frac{\Delta Z}{gA} (H_4 - H_5) - \frac{f}{2DA} Q_5 |Q_5|
 \end{aligned} \tag{44}$$

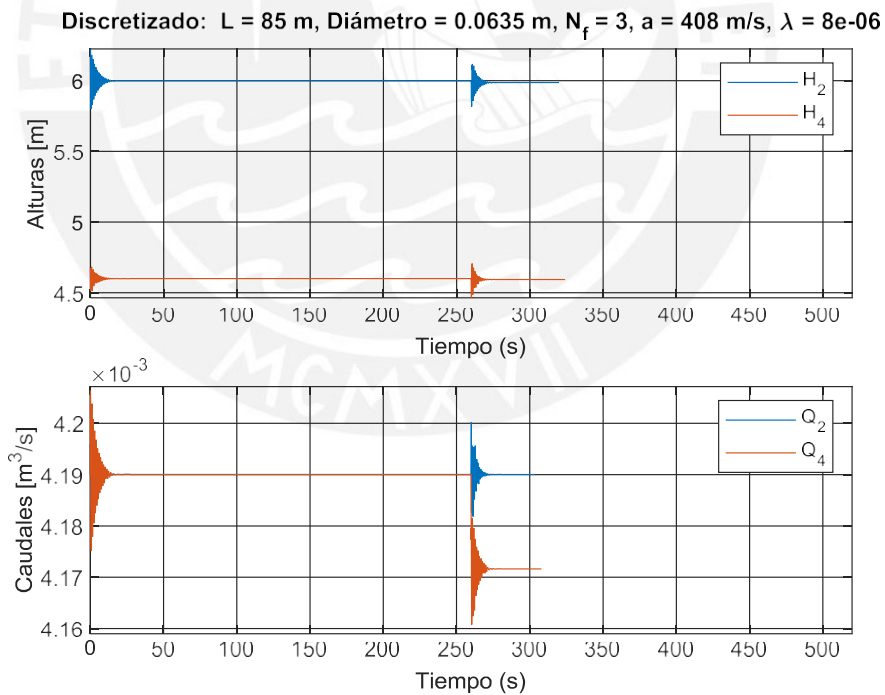


Figura 2.6. Respuesta para una fuga ubicada en el H_3 , usando el método discretizado.

En la figura 2.6 se muestra la respuesta del sistema para las condiciones de la tabla 2.3, la principal diferencia en este enfoque es que el caudal de previo al nodo de fuga se mantiene

constante después de la etapa transitoria, mientras que, si se toman como condiciones de frontera las alturas de presión a la entrada y salida, el caudal previo a nodo de fuga se incrementaba, el segundo enfoque usando el conjunto de ecuaciones (44) presenta una mejor aproximación a lo que sucede en un escenario real de acuerdo con (Begovich et al., 2012).

Para la solución de estas ecuaciones diferenciales es necesario emplear un *solver* adecuado, dentro de (Mathworks, 2022), se sugiere usar el *ode23s* o el *ode15s*, ya que sirven para ecuaciones diferenciales rígidas y ecuaciones diferenciales algebraicas, además de comprobar su correcto desempeño en la solución de este conjunto de ecuaciones en específico.

Ambas soluciones presentan resultados semejantes para la misma magnitud, ubicación y tiempo de la fuga pudiéndose emplear cualquiera de estos dos modelos para representar la dinámica del flujo en tuberías y simular las posibles fugas ubicadas en cualquier otro punto dentro de su longitud.

2.5. Características del modelo para el Tramo I del ONP

Las características del transporte del crudo por el Tramo I se modelan como un sistema reservorio – tubería – válvula – reservorio. El modelo consiste en una tubería de 306 kilómetros de largo, 24 pulgadas de diámetro, con un reservorio inicial con 440 metros de altura de presión y un reservorio de 198 metros de altura de presión aguas abajo. El flujo volumétrico de crudo es producido por una bomba descrita en el Capítulo I, la cual suministra una presión constante. Existe una diferencia de alturas de presión de 242.17 metros entre los reservorios. El modelo se simplifica de tal forma que no incluye accesorios como; codos, uniones, válvulas de bloqueo, curvas, etc. Además, se asume que la tubería no se ve afectada por el perfil de inclinación ya que como se muestra en la figura 2.7, la tubería tiene una inclinación promedio de $0.0315^\circ \cong 0^\circ$, esto quiere decir que se puede asumir como una tubería recta, haciendo que las ecuaciones de balance de momento y masa sean unidimensionales.

El modelo de la tubería es discretizado en 34 segmentos de 9000 metros cada uno, teniendo un total de 35 nodos a lo largo de la tubería. Inicialmente se resuelve el sistema en estado estacionario calculando el perfil hidráulico de presiones. Luego se emplea el método de características (MOC) para simular el comportamiento normal “sin fugas” del sistema. Y

posteriormente se realizan las simulaciones del sistema “con fugas”; a diferentes tiempos, diferentes ubicaciones, diferentes magnitudes y en presencia de ruido de medición, todo ello con la finalidad de observar el comportamiento del sistema en esos escenarios.

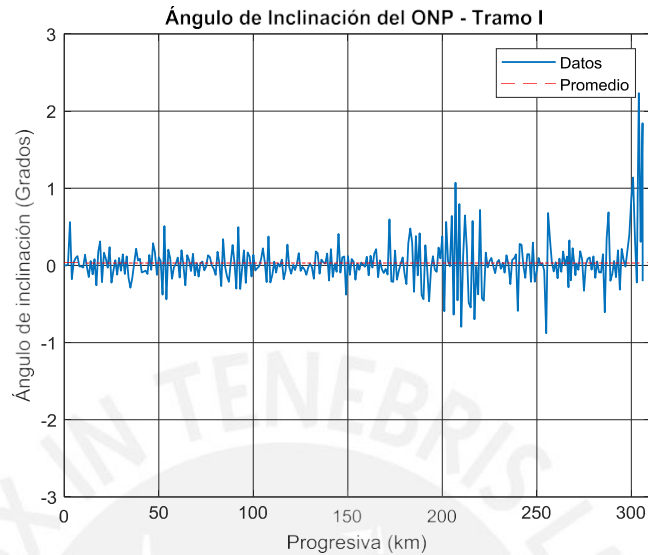


Figura 2.7. Perfil de inclinación de la tubería del Tramo I del ONP

2.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo, se realizó el modelado dinámico del flujo de fluidos a través de una tubería, derivado de las ecuaciones de momento y continuidad que definen el comportamiento transitorio del flujo, con el propósito principal de incluir el efecto de las fugas en el modelo y verificar la respuesta del flujo volumétrico y de la altura de presión en el sistema.

El modelo matemático derivado resulta en un sistema de ecuaciones hiperbólicas en derivadas parciales, las cuales se resolvieron en este capítulo mediante dos métodos numéricos disponibles para su solución como son; el método de las características (MOC) y la discretización de diferencias finitas, estos métodos permiten simular el comportamiento del flujo a través de una tubería, considerando el valor de fricción constante o variable, y la velocidad de onda constante.

El método de las características (MOC) y el método discretizado de diferencias finitas se describieron de forma detallada considerando algunas de las condiciones de contorno más frecuentes en los sistemas de transporte de fluidos. Con fines demostrativos, se realizó una prueba de los algoritmos para un ducto de longitud y especificaciones conocidas,

considerando 5 nodos o 4 segmentos, verificando la aplicabilidad de ambos métodos en la solución transitoria y estacionaria de las variables de interés; flujo y presión, las que serán empleadas posteriormente para el sistema detección de fugas.

Tras la comparación de los resultados de estos métodos se concluye que, el método de las características (MOC) presenta el mismo resultado que el método de discretizado, cuando se consideran como valores de frontera a las alturas de presión a la entrada y salida del ducto, sin embargo, estos resultados pueden no tener una aproximación realista del sistema, ya que la convergencia de estos métodos demuestran un incremento en el flujo en el nodo antes del punto de fuga, mientras que el modelo discretizado donde se toman como condiciones de frontera al flujo volumétrico de entrada y la altura de presión a la salida, presenta un comportamiento más real, debido a que el flujo volumétrico en el nodo antes de la fuga se mantiene constante y el flujo posterior se reduce producto del flujo perdido por la fuga.



CAPÍTULO III: DISEÑO DE SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

3.1. Introducción

En el presente capítulo se efectúa el desarrollo teórico de una de las técnicas más aplicadas en el campo de la estimación de estados y parámetros los filtros de Kalman (Torres et al., 2020) así como la simulación del sistema de detección de fugas basado en el Filtro de Kalman Extendido por medio del software MATLAB®. Cabe indicar que existen diferentes enfoques para abordar la implementación de los Filtros de Kalman para la detección de fugas, en particular se estará trabajando con el modelo de espacios discreto. Inicialmente se discute sobre el Filtro de Kalman básico y posteriormente sobre el Filtro de Kalman Extendido, finalizando con las simulaciones de estimación de magnitud y ubicación de fugas en el Tramo I del ONP.

3.2. Filtro de Kalman

Se puede decir que el filtro de Kalman es uno de los mayores descubrimientos de la ingeniería matemática, presentado por Rudolf E. Kalman en diferentes artículos técnicos en la década de los sesentas (Kalman & Bucy, 1960), el cual se usa en una amplia variedad de problemas de ingeniería. El algoritmo es ideal para su implementación en computadoras y resuelve el llamado *problema cuadrático lineal*, que permite estimar el estado de sistemas dinámicos lineal que está afectado por ruido blanco o comportamiento aleatorio, también es conocido como *estimador cuadrático lineal*. Los dos tipos de ruido conocidos en los sistemas dinámicos son; el ruido de medición y el ruido de proceso. El ruido de medición está relacionado con los sensores empleados para la medición de las variables de proceso, mientras que el ruido de proceso está asociado al sistema y sus estados.

3.2.1. Filtro de Kalman Discreto

En la mayoría de problemas de control es conveniente trabajar con los modelos de espacio de estados de los sistemas dinámicos, idealmente estos modelos se basarán en las leyes físicas del mundo real, entonces se puede describir el siguiente sistema lineal variante en el tiempo:

$$\mathbf{x}_k = \boldsymbol{\phi}_{k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \boldsymbol{\Gamma}_{k-1}\mathbf{u}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (45)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (46)$$

Donde:

\mathbf{x}_k es el vector de estados en el tiempo t_k .

Φ_{k-1} es la matriz de transición para el tiempo t_{k-1}

Γ_k es la matriz de entrada

\mathbf{u}_k es el vector de entrada

\mathbf{w}_k es el vector de perturbaciones aleatorias de proceso

\mathbf{z}_k es el vector de salida o salida del sensor

\mathbf{H}_k es la matriz de salida

\mathbf{v}_k es el vector de ruido aleatorio de medición

Matemáticamente, estos ruidos blancos no correlacionados con media cero y covarianzas denotadas por $\mathbb{Q}_k = \mathbf{I}_{12 \times 12}$ (ruido de proceso) y $\mathbb{R}_k = \mathbf{I}_{4 \times 4}$ (ruido de medición).

$$\text{cov}[\mathbf{w}_k, \mathbf{w}_j] = E[\mathbf{w}_k, \mathbf{w}_j^T] = \begin{cases} 0 & \text{si } j \neq k \\ \mathbb{Q}_k & \text{si } j = k \end{cases} \quad (47)$$

$$\text{cov}[\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_j] = E[\mathbf{v}_k, \mathbf{v}_j^T] = \begin{cases} 0 & \text{si } j \neq k \\ \mathbb{R}_k & \text{si } j = k \end{cases} \quad (48)$$

Donde, $\text{cov}[\]$ es la covarianza de los vectores, y $E[\]$ es el vector esperado. Si \mathbb{Q}_k es muy inferior a \mathbb{R}_k , las predicciones de estado solo se basarán en las predicciones del modelo y se ignorarán las mediciones. Si \mathbb{R}_k es muy inferior a \mathbb{Q}_k las predicciones de estado solo se basarán en las mediciones y las predicciones del modelo se ignorarán.

El filtro de Kalman es usado para estimar estados que no pueden ser medidos directamente del sistema, por lo tanto, emplea las mediciones reales y el modelo del sistema, junto al factor de ganancia \mathbf{K} . El filtro tiene dos etapas distintas, una de predicción (*a priori*) y la otra de corrección (*a posteriori*). La etapa de predicción el filtro utiliza la estimación del estado $\hat{\mathbf{x}}_k$ para calcular el estado siguiente $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ luego en la etapa de corrección esta estimación se corrige en función a las medidas disponibles de salida \mathbf{y}_{k+1} , la estimación mejorada $\hat{\mathbf{x}}_k$ se conoce como estimación a posteriori, los errores de los estados en la fase de predicción y corrección pueden definirse como:

$$\mathbf{e}_k^- = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^- \quad (49)$$

$$\mathbf{e}_k = \mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k \quad (50)$$

Las matrices de covarianza del error en las fases *a priori* y *a posteriori* se definen como:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^- &= E[\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}] = E \begin{bmatrix} (e_{1k}^-)^2 & e_{1k}^- e_{2k}^- & \dots & \dots \\ e_{2k}^- e_{1k}^- & (e_{2k}^-)^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & (e_{nk}^-)^2 \end{bmatrix} \\ &= E[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-)(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k^-)^T] \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k &= E[\mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T] = E \begin{bmatrix} (e_{1k})^2 & e_{1k} e_{2k} & \dots & \dots \\ e_{2k} e_{1k} & (e_{2k})^2 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & \dots & (e_{nk})^2 \end{bmatrix} \\ &= E[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^T] \end{aligned} \quad (52)$$

Los elementos fuera de la diagonal de estas matrices son los errores combinados de dos estados diferentes, mientras que la diagonal representa los términos del error cuadrático medio para un estado.

El objetivo principal del filtro de Kalman es obtener el valor de la ganancia de Kalman " \mathbf{K}_k " para cada intervalo de tiempo k , la cual minimiza los términos de error de una forma óptima asumiendo que se tiene ruido gaussiano.

Para minimizar estos errores se formula la siguiente expresión que relaciona la ganancia de Kalman con la covarianza del error:

$$\mathbf{P}_k = E [(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k)) (\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k - \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k))^T] \quad (53)$$

Reemplazando las ecuaciones (46) y (49) en (53):

$$\mathbf{P}_k = E [(\mathbf{e}_k^- - \mathbf{K}_k (\mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-)) (\mathbf{e}_k^- - \mathbf{K}_k (\mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-))^T] \quad (54)$$

Simplificando la expresión de la ecuación (54):

$$\mathbf{P}_k = E [(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{e}_k^- - \mathbf{K}_k \mathbf{v}_k (\mathbf{e}_k^{-T} (\mathbf{I} - \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T) - \mathbf{v}_k^T \mathbf{K}_k^T)] \quad (55)$$

Reordenando la ecuación (55) queda de la forma:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] E[\mathbf{e}_k^- \mathbf{e}_k^{-T}] [\mathbf{I} - \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T] + \mathbf{K}_k E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] \mathbf{K}_k^T \quad (56)$$

Ahora, reemplazando (51) y (48) en (56):

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k] \mathbf{P}_k^- [\mathbf{I} - \mathbf{H}_k^T \mathbf{K}_k^T] + \mathbf{K}_k \mathbb{R}_k \mathbf{K}_k^T \quad (57)$$

Simplificando la ecuación 57 se obtiene:

$$\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - 2\mathbf{K}_k\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^- + \mathbf{K}_k[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k]\mathbf{K}_k^T \quad (58)$$

La ecuación (57) es la expresión de la covarianza del error válida para cualquier ganancia K_k . Debido a que la traza o diagonal principal representan el error cuadrático medio, se debe determinar la derivada de la traza de \mathbf{P}_k igualada a cero, de tal forma que se obtenga la ganancia óptima de Kalman.

$$\frac{d(tr(\mathbf{P}_k))}{dK_k} = -2\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + 2[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k]\mathbf{K}_k \quad (59)$$

Igualando a cero esta última ecuación y despejando K_k :

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k]^{-1} \quad (60)$$

Con la ecuación (59) se determina la ganancia óptima de Kalman, si se reemplaza la ganancia de Kalman optima en la ecuación (58) se obtiene:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^- - 2(\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T[\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k]^{-1})\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^- \\ + \mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_k^-\mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k)^{-1} \end{aligned} \quad (61)$$

Simplificando la ecuación (61):

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_k^- \quad (62)$$

La siguiente etapa es la de predicción o también llamada *a priori*, como en la predicción se tiene un incremento $k + 1$, se reemplaza con (45) en la ecuación (49), dando como resultado:

$$\mathbf{e}_{k+1}^- = (\boldsymbol{\phi}_k\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\Gamma}_k\mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k) - (\boldsymbol{\phi}_k\mathbf{x}_k + \boldsymbol{\Gamma}_k\mathbf{u}_k) \quad (63)$$

Simplificando esta ecuación se obtiene:

$$\mathbf{e}_{k+1}^- = \boldsymbol{\phi}_k\mathbf{e}_k + \mathbf{w}_k \quad (64)$$

Sustituyendo en la ecuación (51):

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = E[(\boldsymbol{\phi}_k\mathbf{e}_k + \mathbf{w}_k)(\mathbf{e}_k^T\boldsymbol{\phi}_k^T + \mathbf{w}_k^T)] \quad (65)$$

Expandiendo (65) y reemplazando con las ecuaciones (47) y (52):

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = E[\boldsymbol{\phi}_k\mathbf{P}_k\boldsymbol{\phi}_k^T + \boldsymbol{\phi}_k\mathbf{e}_k\mathbf{w}_k^T + \mathbf{w}_k\mathbf{e}_k^T\boldsymbol{\phi}_k^T + \mathbb{Q}_k] \quad (66)$$

Debido a que se asume que el ruido del proceso tiene una media de cero o $E[\mathbf{w}_k] = 0$, entonces, la estimación a priori de la matriz de covarianza se simplifica a:

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \boldsymbol{\phi}_k \mathbf{P}_k \boldsymbol{\phi}_k^T + \mathbf{Q}_k \quad (67)$$

Las ecuaciones de estas dos etapas pueden ser resumidas a:

Etapas de Predicción

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = \boldsymbol{\phi}_k \hat{\mathbf{x}}_k + \boldsymbol{\Gamma}_k \mathbf{u}_k$$

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \boldsymbol{\phi}_k \mathbf{P}_k \boldsymbol{\phi}_k^T + \mathbf{Q}_k$$

Etapas de Corrección

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{H}_k^T + \mathbb{R}_k)^{-1}$$

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_k^-$$

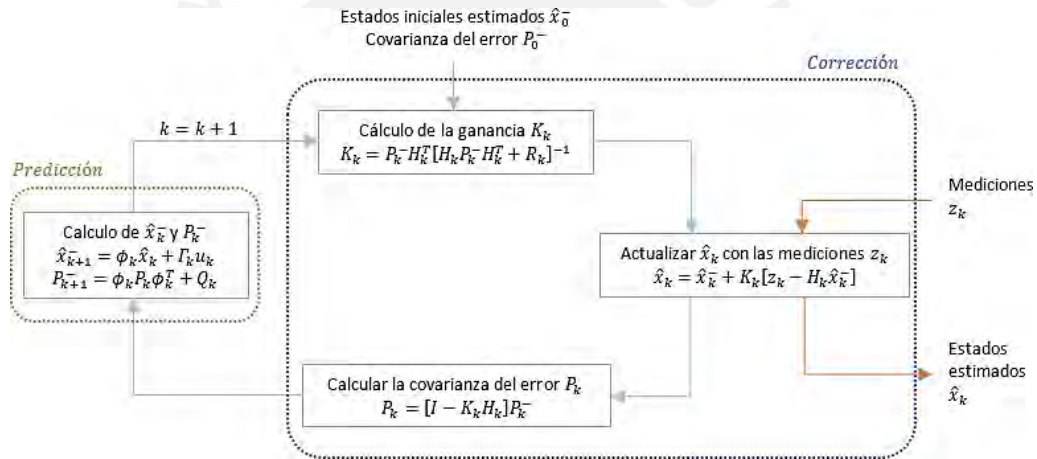


Figura 3.1. Bucle del Filtro de Kalman

3.3. Filtro Extendido de Kalman

Debido a que las ecuaciones dinámicas del sistema no son lineales se procede a implementar el llamado Filtro de Kalman Extendido que en principio trabaja de forma semejante que el filtro lineal con la diferencia de que es necesario un proceso previo de linealización para cada paso de tiempo (Grewal & Andrews, 2014), de esta forma se derivarán dos linealizaciones entorno a las estimaciones de estado a posteriori (\mathbf{x}_k) y las estimaciones de estado a priori (\mathbf{x}_k^-).

Un modelo no lineal puede ser descrito por las siguientes ecuaciones de estado:

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \quad (68)$$

$$\mathbf{z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{x}_k) + \mathbf{v}_k \quad (69)$$

Ahora si se aplica una linealización por aproximación de la serie de Taylor para $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ se obtiene:

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}_k) = \mathbf{h}(\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-) + \mathbf{J}_h[\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-] \quad (70)$$

Donde \mathbf{J}_h es el jacobiano de $\mathbf{h}(\mathbf{x}_k)$ evaluado para $\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-$ entonces quedaría definido como:

$$\mathbf{J}_h = \left. \frac{\partial \mathbf{h}(\mathbf{x}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^-} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{h}(x_{1k})}{\partial x_1} & \frac{\partial \mathbf{h}(x_{1k})}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial \mathbf{h}(x_{2k})}{\partial x_1} & \frac{\partial \mathbf{h}(x_{2k})}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (71)$$

Luego la ganancia de Kalman puede ser calculada empleando la siguiente ecuación:

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_k^- \mathbf{J}_k^T [\mathbf{J}_k \mathbf{P}_k^- \mathbf{J}_k^T + \mathbb{R}_k]^{-1} \quad (72)$$

La matriz de estado a posteriori se calcula mediante:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_k^- + \mathbf{K}_k[\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_k^-] \quad (73)$$

De igual forma, la matriz \mathbf{P}_k se actualizará con la ecuación:

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{J}_k] \mathbf{P}_k^- \quad (74)$$

Para $f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ se linealiza alrededor de $\hat{\mathbf{x}}_k$ empleando la aproximación de la serie de Taylor:

$$f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) = f(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{J}_x[\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k] \quad (75)$$

Donde \mathbf{J}_x es el jacobiano de $f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$ evaluado para $\hat{\mathbf{x}}_k$ y \mathbf{u}_k :

$$\mathbf{J}_x = \left. \frac{\partial f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(x_{1k})}{\partial x_1} & \frac{\partial f(x_{1k})}{\partial x_2} & \dots \\ \frac{\partial f(x_{2k})}{\partial x_1} & \frac{\partial f(x_{2k})}{\partial x_2} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \quad (76)$$

La estimación a priori del vector de estados será:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1}^- = f(\hat{\mathbf{x}}_k, \mathbf{u}_k) \quad (77)$$

El siguiente paso será calcular la matriz de covarianza de los estados estimados $\hat{\mathbf{x}}_k$:

$$\mathbf{P}_{k+1}^- = \mathbf{J}_x \mathbf{P}_k + \mathbb{Q}_k \quad (78)$$

3.4. Implementación del Filtro Extendido de Kalman para la detección y localización de fugas en MATLAB

El modelo desarrollado de transporte de crudo de petróleo para el Tramo I con el método MOC toma como condiciones de frontera que a inicio de la tubería existe una bomba que suministra un flujo a presión constante y con un determinado caudal o flujo volumétrico, y al final de la tubería una válvula en el punto de llegada, asumiendo un modelo de tipo (reservorio – tubería – válvula). Todo el modelo se transforma al espacio de estado para determinar la matriz de transición y aplicar el Filtro de Kalman Extendido.

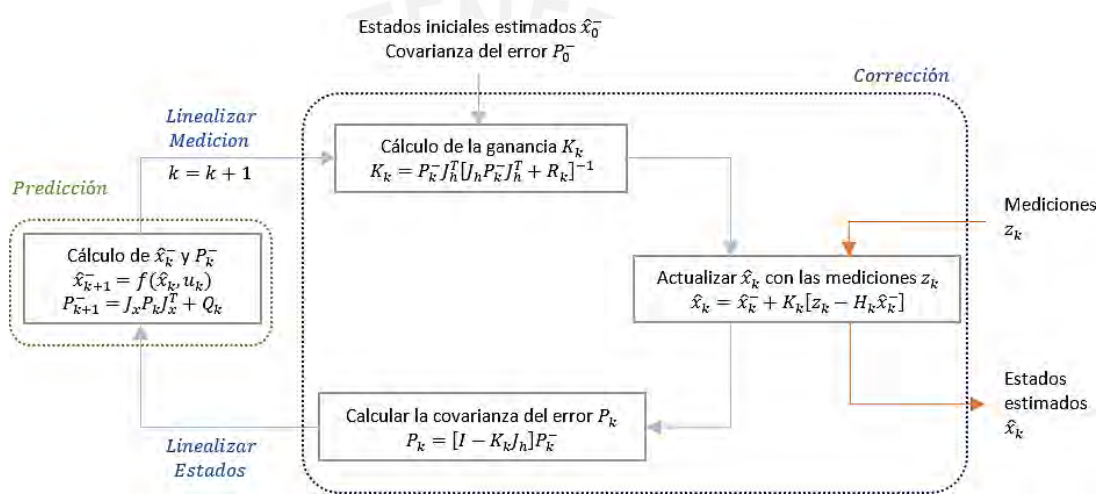


Figura 3.2. Bucle del Filtro de Extendido de Kalman

En el diagrama de la figura 3.3 se muestra que cuando no hay presencia de fuga las estimaciones se mantienen estables sin cambios significativos, mientras que cuando ocurre una fuga, las presiones y flujos estimados tienden a caer y, por lo tanto, se detectará la existencia de una fuga.

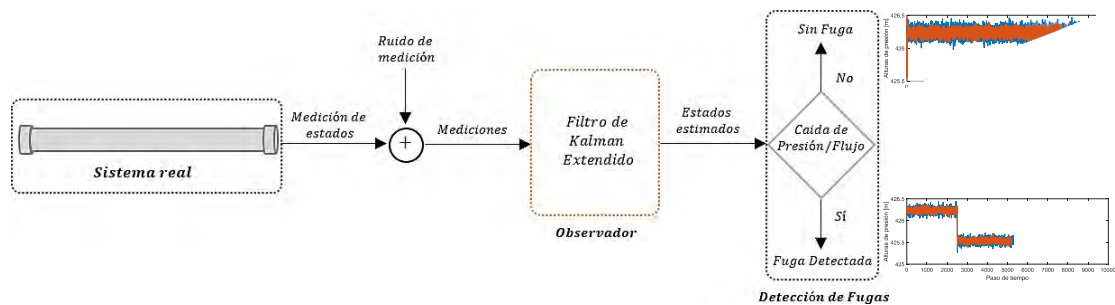


Figura 3.3. Representación del esquema de estimación de estados y detección de fallas.

3.4.1. Modelo en espacio de estados del sistema

Para la implementación del Filtro de Kalman Extendido es necesario representar el modelo del sistema en espacio de estados. Esta representación se hace compleja toda vez que se requiere despejar las presiones y flujos de cada nodo interior con fuga, las cuales tienen en su expresión una raíz cuadrada de la ecuación de válvula. Si por ejemplo se consideran 4 nodos o 3 segmentos de tubería el vector de estados puede ser descrito como:

$$\mathbf{x}_j = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ [x_{12}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{1,k} \\ H_{2,k} \\ H_{3,k} \\ H_{4,k} \\ Q_{11,k} \\ Q_{12,k} \\ Q_{21,k} \\ Q_{22,k} \\ Q_{31,k} \\ Q_{32,k} \\ Q_{2,k} \\ [Q_{L3,k}] \end{bmatrix} \quad (79)$$

El vector de entradas \mathbf{u}_j del sistema serán las alturas de presión de entrada y salida del ducto, así como el coeficiente de válvula C_v .

$$\mathbf{u}_j = \begin{bmatrix} u_1 \\ [u_2] \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{R1} \\ [H_{R2}] \\ C_v \end{bmatrix} \quad (80)$$

Por lo general, para muchos de los casos se asumen que estas entradas permanecen constantes, sin embargo, es posible tener algunas fluctuaciones en la presión de entrada o en la presión de bombeo al inicio del ducto. Se puede describir una ecuación diferencial no lineal en el espacio de estados, como:

$$\mathbf{x}_k = f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{u}_k, \mathbf{w}_{k-1}) \quad (81)$$

Donde \mathbf{w}_{k-1} representa el vector de ruido aleatorio de proceso. Si se reescriben las ecuaciones en espacio de estado como función de los estados y las entradas, se tiene las siguientes ecuaciones:

$$x_{1,k} = u_{1,k} - \frac{\frac{1}{2}gA^2B^2 + gA^2B\sqrt{B^2 - 4\left(\frac{1+K}{2gA^2}\right)(x_{2,k-1} - Bx_{6,k-1} + Rx_{6,k-1}|x_{6,k-1}| - u_{1,k})}{B^2 - 4\left(\frac{1+K}{2gA^2}\right)(x_{2,k-1} - Bx_{6,k-1} + Rx_{6,k-1}|x_{6,k-1}| - u_{1,k})}}{1+K} + w_{1,k-1} \quad (82)$$

$$x_{2,k} = \frac{1}{2} (x_{1,k-1} + Bx_{5,k-1} - Rx_{5,k-1} |x_{5,k-1}| + x_{3,k-1} - Bx_{8,k-1} + Rx_{8,k-1} |x_{8,k-1}| - Bx_{11,k-1}) + w_{2,k-1} \quad (83)$$

$$x_{3,k} = \frac{1}{2} (x_{2,k-1} + Bx_{7,k-1} - Rx_{7,k-1} |x_{7,k-1}| + x_{4,k-1} - Bx_{10,k-1} + Rx_{10,k-1} |x_{10,k-1}| - Bx_{12,k-1}) + w_{3,k-1} \quad (84)$$

$$x_{4,k} = x_{3,k-1} + Bx_{9,k-1} - Rx_{9,k-1} |x_{9,k-1}| + \frac{u_{3,k} B + \sqrt{(u_{3,k} B)^2 + 4u_{3,k} (x_{3,k-1} + x_{9,k-1} (B - R|x_{9,k-1}|) - u_{2,k})} - u_{2,k}}{2} + w_{4,k-1} \quad (85)$$

$$x_{5,k} = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4 \frac{1+K}{2gA^2}} (x_{2,k-1} - Bx_{6,k-1} + Rx_{6,k-1} |x_{6,k-1}| - u_{1,k})}{\left(\frac{1+K}{gA^2}\right)} + w_{5,k-1} \quad (86)$$

$$x_{6,k} = \frac{(x_{1,k-1} + Bx_{5,k-1} - Rx_{5,k-1} |x_{5,k-1}| - x_{3,k-1} + Bx_{8,k-1} - Rx_{8,k-1} |x_{8,k-1}| + Bx_{11,k-1})}{2B} + w_{6,k-1} \quad (87)$$

$$x_{7,k} = \frac{(x_{1,k-1} + Bx_{5,k-1} - Rx_{5,k-1} |x_{5,k-1}| - x_{3,k-1} + Bx_{8,k-1} - Rx_{8,k-1} |x_{8,k-1}| - Bx_{11,k-1})}{2B} + w_{7,k-1} \quad (88)$$

$$x_{8,k} = \frac{(x_{2,k-1} + Bx_{7,k-1} - Rx_{7,k-1} |x_{7,k-1}| - x_{4,k-1} + Bx_{10,k-1} - Rx_{10,k-1} |x_{10,k-1}| + Bx_{12,k-1})}{2B} + w_{8,k-1} \quad (89)$$

$$x_{9,k} = \frac{(x_{2,k-1} + Bx_{7,k-1} - Rx_{7,k-1} |x_{7,k-1}| - x_{4,k-1} + Bx_{10,k-1} - Rx_{10,k-1} |x_{10,k-1}| - Bx_{12,k-1})}{2B} + w_{9,k-1} \quad (90)$$

$$x_{10,k} = \frac{u_{3,k} B + \sqrt{(u_{3,k} B)^2 + 4u_{3,k} (x_{3,k-1} + x_{9,k-1} (B - R|x_{9,k-1}|) - u_{2,k})} - u_{2,k}}{2} + w_{10,k-1} \quad (91)$$

$$x_{11,k} = x_{11,k-1} + w_{11,k-1} \quad (92)$$

$$x_{12,k} = x_{12,k-1} + w_{12,k-1} \quad (93)$$

Donde, $B = c/Ag$ y $R = f\Delta z/2gDA^2$. Y el vector de salida será:

$$\mathbf{z}_k = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{4,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (94)$$

Donde \mathbf{v}_k es el ruido de medición y las alturas de presión de entrada y salida pueden ser medidas del sistema. Para la implementación del filtro serán necesarias todas estas ecuaciones de estado y salida.

3.4.2. Matrices Jacobianas para el Filtro de Kalman Extendido

Debido a que las ecuaciones de estado son no lineales, es necesario efectuar el cálculo de las matrices jacobianas o de derivadas parciales (J_h y J_x) de las ecuaciones de estado usando las ecuaciones (71) y (76), retomando las ecuaciones:

$$J_h = \left. \frac{\partial h(x_k)}{\partial x} \right|_{\hat{x}_{k+1}}$$

Esta matriz se encuentra en función de las mediciones del sistema que corresponden a las presiones de entrada y salida del ducto, por lo tanto, la matriz J_h quedará de la forma:

$$J_h = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (95)$$

Por otro lado, la dimensión de la matriz J_x es de 12×12 , y los elementos de la matriz J_x se calcularán con la notación, J_{ij} donde los subíndices representan la derivada parcial del estado i con respecto al estado j . Al realizar dichos cálculos se encuentran elementos con valores iguales a cero los cuales se incorporarán en la implementación del filtro.

$$J_x = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x} \Big|_{\hat{x}_k, u_k}$$

$$J_x = \begin{bmatrix} 0 & J_{1,2} & 0 & 0 & 0 & J_{1,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{2,1} & 0 & J_{2,3} & 0 & J_{2,5} & 0 & 0 & J_{2,8} & 0 & 0 & J_{2,11} & 0 \\ 0 & J_{3,2} & 0 & J_{3,4} & 0 & 0 & J_{3,7} & 0 & 0 & J_{3,10} & 0 & J_{3,12} \\ 0 & 0 & J_{4,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{4,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_{5,2} & 0 & 0 & 0 & J_{5,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{6,1} & 0 & J_{6,3} & 0 & J_{6,5} & 0 & 0 & J_{6,8} & 0 & 0 & J_{6,11} & 0 \\ J_{7,1} & 0 & J_{7,3} & 0 & J_{7,5} & 0 & 0 & J_{7,8} & 0 & 0 & J_{7,11} & 0 \\ J_{8,1} & 0 & J_{8,3} & 0 & 0 & 0 & J_{8,7} & 0 & 0 & J_{8,10} & 0 & J_{8,12} \\ J_{9,1} & 0 & J_{9,3} & 0 & 0 & 0 & J_{9,7} & 0 & 0 & J_{9,10} & 0 & J_{9,12} \\ 0 & 0 & J_{10,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{10,9} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{11,11} & 0 \\ [0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_{12,12} \end{bmatrix} \quad (96)$$

Ahora se muestran los elementos de la matriz J_x con valores diferentes de cero:

$$J_{1,2} = \frac{-B}{\sqrt{B^2 - 3(H_{2,k-1} - BQ_{12,k-1} + RQ_{12,k-1}^2 - H_{R1})/(gA^2)}} + 1 \quad (97)$$

$$J_{1,6} = \frac{B^2 - 2BRQ_{12,k-1}}{\sqrt{B^2 - 3(H_{2,k-1} - BQ_{12,k-1} + RQ_{12,k-1}^2 - H_{R1})/(gA^2)}} - B + 2RQ_{12,k-1} \quad (98)$$

$$J_{2,1} = J_{2,3} = J_{3,2} = J_{3,4} = J_{6,11} = -J_{7,11} = J_{8,12} = -J_{9,12} = \frac{1}{Z} \quad (99)$$

$$J_{2,5} = \frac{1}{2} \frac{(B - 2RQ_{11,k-1})}{Z} \quad (100)$$

$$J_{3,7} = \frac{1}{2} \frac{(B - 2RQ_{21,k-1})}{Z} \quad (101)$$

$$J_{2,8} = \frac{1}{2} \frac{(-B + 2RQ_{22,k-1})}{Z} \quad (102)$$

$$J_{3,10} = \frac{1}{2} \frac{(-B + 2RQ_{32,k-1})}{Z} \quad (103)$$

$$J_{2,11} = J_{3,12} = -\frac{1}{Z} B \quad (104)$$

$$J_{4,3} = 1 - \frac{B C_v}{\sqrt{(B C_v)^2 + 4 C_v (H_{3,k-1} + Q_{31,k-1} (B - R |Q_{31,k-1}|) - H_{R2})}} \quad (105)$$

$$J_{4,9} = B - 2 R Q_{31,k-1} - \frac{C_v (B - 2 R Q_{31,k-1})}{\sqrt{(B C_v)^2 + 4 C_v (H_{3,k-1} + Q_{31,k-1} (B - R |Q_{31,k-1}|) - H_{R2})}} \quad (106)$$

$$J_{5,2} = - \frac{1}{\sqrt{B^2 - 3 (H_{2,k-1} - B Q_{12,k-1} + R Q_{12,k-1}^2 - H_{R1}) / (g A^2)}} \quad (107)$$

$$J_{5,6} = \frac{-B + 2 R Q_{12,k-1}}{\sqrt{B^2 - 3 (H_{2,k-1} - B Q_{12,k-1} + R Q_{12,k-1}^2 - H_{R1}) / (g A^2)}} \quad (108)$$

$$J_{6,1} = -J_{6,3} = J_{7,1} = -J_{7,3} = J_{8,1} = -J_{8,3} = J_{9,1} = -J_{9,3} = \frac{1}{2B} \quad (109)$$

$$J_{6,5} = J_{7,5} = \frac{1}{2B} (B - 2 R Q_{11,k-1}) \quad (110)$$

$$J_{6,8} = J_{7,8} = \frac{1}{2B} (B - 2 R Q_{22,k-1}) \quad (111)$$

$$J_{8,7} = J_{9,7} = \frac{1}{2B} (B - 2 R Q_{21,k-1}) \quad (112)$$

$$J_{8,10} = J_{9,10} = \frac{1}{2B} (B - 2 R Q_{32,k-1}) \quad (113)$$

$$J_{10,3} = \frac{C_v}{\sqrt{(B C_v)^2 + 4 C_v (H_{3,k-1} + Q_{31,k-1} (B - R |Q_{31,k-1}|) - H_{R2})}} \quad (114)$$

$$J_{10,9} = \frac{C_v (B - 2 R Q_{31,k-1})}{\sqrt{(B C_v)^2 + 4 C_v (H_{3,k-1} + Q_{31,k-1} (B - R |Q_{31,k-1}|) - H_{R2})}} \quad (115)$$

$$J_{11,11} = J_{12,12} = 1 \quad (116)$$

3.4.3. Detección de fugas bajo el enfoque de fugas ficticias

El enfoque de fugas ficticias es un método que se puede aplicar en conjunto al Filtro de Kalman Extendido, ya que con este último es posible estimar las magnitudes de las fugas, mientras que el método de características (MOC) modela las fugas únicamente en los nodos que se encuentran distribuidos a lo largo de la tubería, con el enfoque de fugas ficticias es posible estimar una fuga que no necesariamente se encuentra en un nodo. Si se representa el sistema con cuatro nodos (puntos de medición de presión), tres segmentos y dos fugas ficticias Q_{L1} y Q_{L2} , tal como en la figura 3.4.

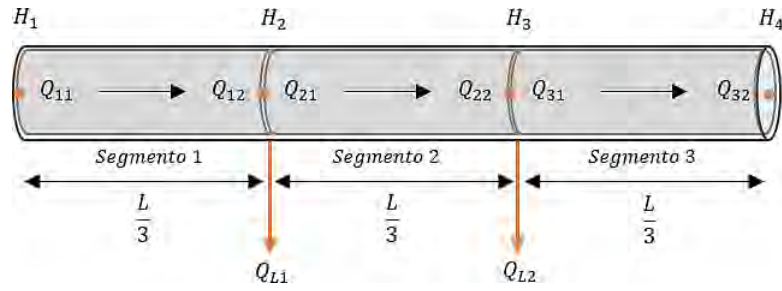


Figura 3.4. Representación del ducto con dos fugas ficticias Q_{L1} y Q_{L2} .

Entonces, es posible estimar alguna fuga ubicada entre estos dos nodos, haciendo que la magnitud de fuga real del ducto sea igual a la suma de las dos fugas ficticias, en caso de no haber fuga las estimaciones obtenidas por el filtro oscilarán alrededor de cero y la suma de ambas será igualmente cero. Para la determinación de la ubicación de fuga se determinará a partir de una interpolación empleando las ubicaciones de los nodos de fuga ficticios y las estimaciones de la magnitud de fuga en cada uno de estos nodos.

Considerando un análisis en estado estacionario, el enfoque de fugas ficticias (Lesyshen, 2005) asume que existe una equivalencia sobre dos sistemas con respecto a sus condiciones de frontera. En la figura 3.5 se representa un ejemplo de sistemas equivalentes, la tubería A es el modelo estimado por el Filtro de Kalman Extendido con dos fugas ficticias que ocurren en las ubicaciones z_{L1} y z_{L2} , mientras que la tubería B es el modelo real con una fuga Q_L ubicada en z_L , donde sus balances de masa en términos de flujos son:

Tubería A:

$$Q_{out} = Q_{in} + Q_{L1} + Q_{L2} \quad (117)$$

Tubería B:

$$Q_{out} = Q_{in} + Q_L \quad (118)$$

Si se retoman las ecuaciones (31) y (32) del capítulo 2 sobre conservación de momento y continuidad, y se realiza un análisis en el estado estacionario, los términos dependientes del tiempo se vuelven cero:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = -\frac{c^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -gA \frac{\partial H}{\partial z} - f \frac{Q|Q|}{2DA} = 0$$

Entonces, quedaría de la siguiente forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial z} = 0 \quad (119)$$

$$\frac{\partial H}{\partial z} = f \frac{Q|Q|}{2gDA^2} \quad (120)$$

La ecuación (119) indica que en estado estacionario el caudal es constante e independiente de la posición y tiempo. Entonces, el caudal se mantiene constante a lo largo de todo el ducto y está determinado por la condición de frontera dónde $z = \ell$.

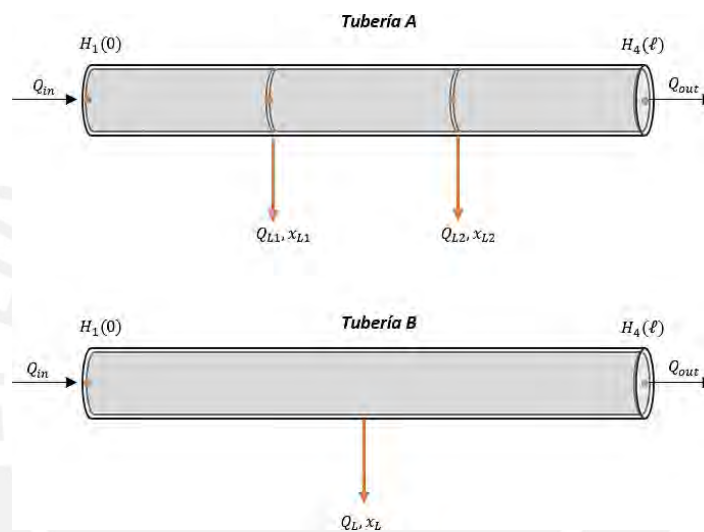


Figura 3.5. Representación de la comparación de ductos para aplicar el enfoque de fugas ficticias

Si se emplea la ecuación de Darcy Weisbach (121) para el flujo en estado estacionario:

$$H(z) - H(0) = f \frac{Q^2}{2gDA^2} z \quad (121)$$

Aplicando esta ecuación para las tuberías A y B, y para la tubería A se toma que $Q_L = Q_{L1} + Q_{L2}$:

$$H(\ell) - H(0) = \frac{f}{2gDA^2} [(Q_{L1} + Q_{L2} + Q_L)^2 z_{L1} + (Q_{L1} + Q_{L2})^2 (z - z_{L1}) + Q_L^2 (\ell - z_{L2})] \quad (122)$$

$$H(\ell) - H(0) = \frac{f}{2gDA^2} [(Q_L + Q_L)^2 x + Q_L^2 (\ell - z)]_L \quad (123)$$

Como la caída de presión total en ambas tuberías es la misma ambas ecuaciones (122) y (123) pueden igualarse y simplificarse asumiendo que la magnitud de fuga es muy pequeña en comparación con el flujo principal, obteniendo la ecuación (124).

$$Q_L z_L = Q_{L1} z_{L1} + Q_{L2} z_{L2} \quad (124)$$

Ahora se despeja la ubicación de fuga z_L :

$$z_L = \frac{Q_{L1} z_{L1} + Q_{L2} z_{L2}}{Q_L} \quad (125)$$

Con la ecuación (125) se puede determinar la ubicación de la fuga, ya que se conoce previamente las posiciones de fuga ficticia z_{L1} y z_{L2} y los caudales Q_{L1} y Q_{L2} son estimados por el Filtro de Kalman Extendido (Doshmanziari et al., 2020).

3.5. Resultados de la simulación con el Filtro de Kalman Extendido

Tomando en consideración el modelo para el Tramo I del ONP expuesto en el capítulo 2 donde se explican las características del ducto, y la técnica de discretización por el método de características, se procede a realizar las pruebas de simulación en MATLAB®.

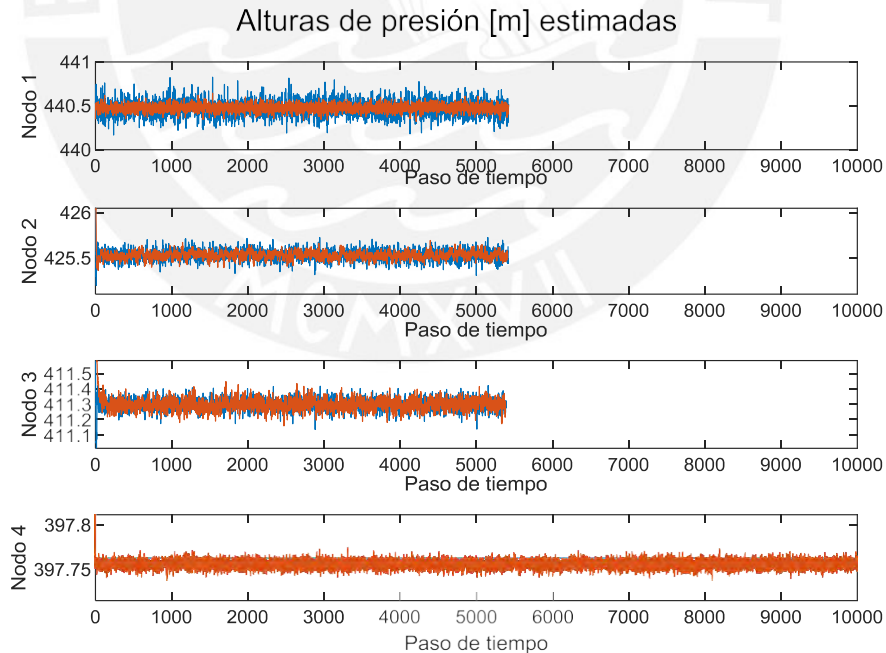


Figura 3.6. Alturas de presión en metros para los cuatro nodos, en color azul las mediciones del modelo y en rojo las estimaciones por el Filtro de Kalman Extendido.

3.5.1. Simulación para un segmento del Tramo I del ONP

Inicialmente el oleoducto se simula con una longitud de 54 000 metros que fue discretizado en 18 segmentos de 3 000 metros cada uno, tomando como referencia la figura 3.4. La fuga de crudo se ubica a los 27 000 metros desde la estación de bombeo 1 con una magnitud del 5% del caudal total que circula por el oleoducto que es para este caso particular de 50 MBD (miles de barriles de crudo por día) y se produce en el $t = 1$.

En la figura 3.6 se muestra una comparación entre los datos obtenidos del modelo por el método de características (MOC) y las estimaciones del Filtro de Kalman Extendido, estas estimaciones son muy próximas a las “medidas de planta”, por lo que se puede asumir que logro diseñar un estimador adecuado para el modelo.

Las fugas ficticias fueron ubicadas a los 18 000 y 36 000 metros de la progresiva, como la fuga se ubica en el punto central de este segmento del ducto, se presume que las estimaciones realizadas por el Filtro de Kalman Extendido de los caudales de las fugas ficticias (Q_{L1} y Q_{L2}) serán iguales en magnitud, tal como se muestra en la figura 3.7.

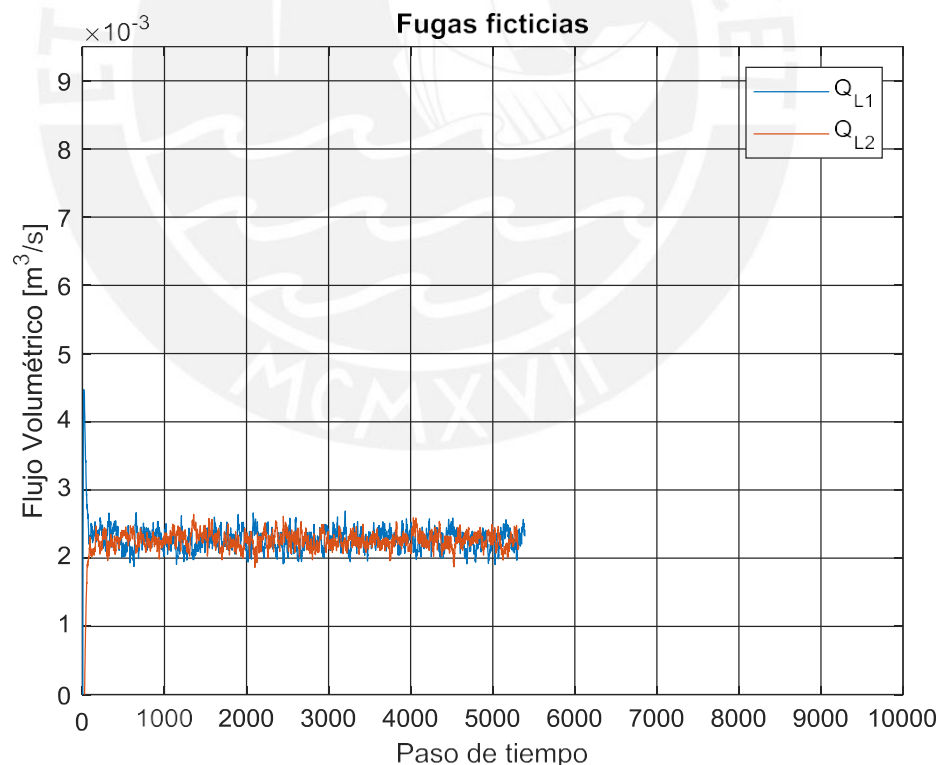


Figura 3.7. Estimaciones de fugas ficticias Q_{L1} y Q_{L2} realizadas por el Filtro de Kalman Extendido, ubicadas en los kilómetros 18 y 36 de la progresiva.

Las fugas ficticias estimadas Q_{L1} y Q_{L2} de la figura 3.7, tienen una magnitud de 0.0023 y 0.0022 m^3/s en promedio respectivamente. Ambas estimaciones oscilan en un valor promedio debido a que la fuga real se encuentra ubicada en el medio del segmento del ducto. Estas estimaciones sirven a la vez para poder determinar la magnitud de la fuga total mediante la ecuación $Q_L = Q_{L1} + Q_{L2}$ y posteriormente se emplea estos datos para calcular la ubicación de fuga con la ecuación (81).

En la figura 3.8 se observa la gráfica de estimación de magnitud de fuga o caudal de la fuga Q_L cuyo valor real es de 0.0045755 m^3/s y la estimación promedio es de 0.0045376 m^3/s este valor significa un error de 0.828 % con referencia al valor real.

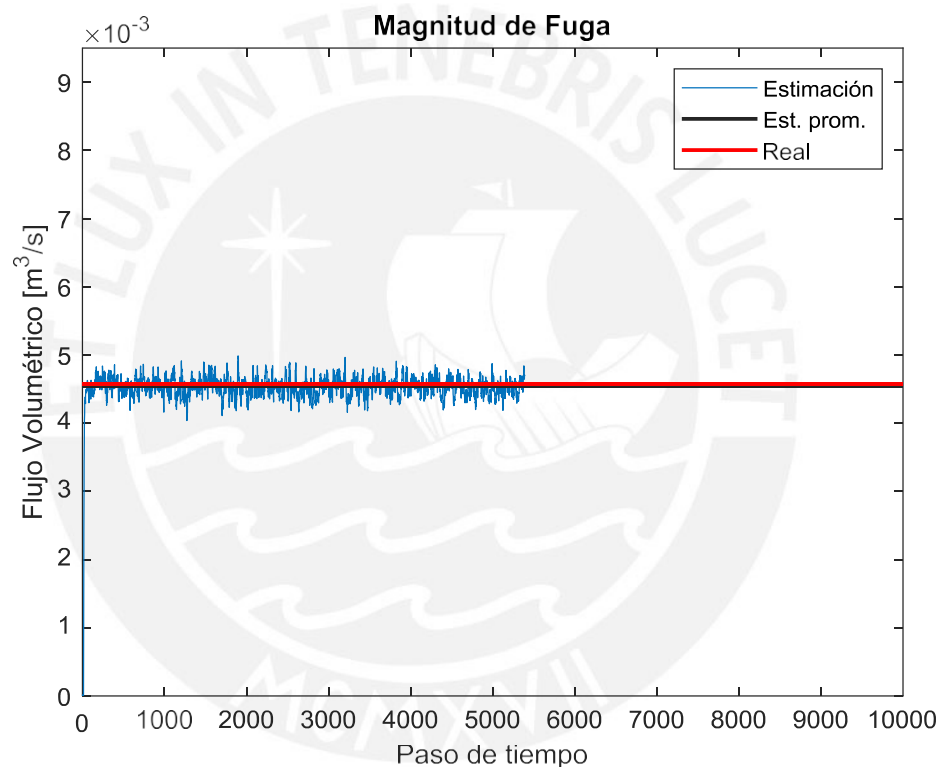


Figura 3.8. Estimación de magnitud o caudal de la fuga Q_L por el Filtro de Kalman Extendido.

Por otro lado, en la figura 3.9 se observa la gráfica de estimación de ubicación de fuga z_L que tiene un valor real de 27 000 *metros* y un valor estimado promedio de 26 909.81 *metros*, dando un error de 0.334 %. Cabe aclarar que estos resultados pueden diferir en cada proceso de simulación debido a que se incluye ruido aleatorio a los datos de presión del modelo. 0.0045755

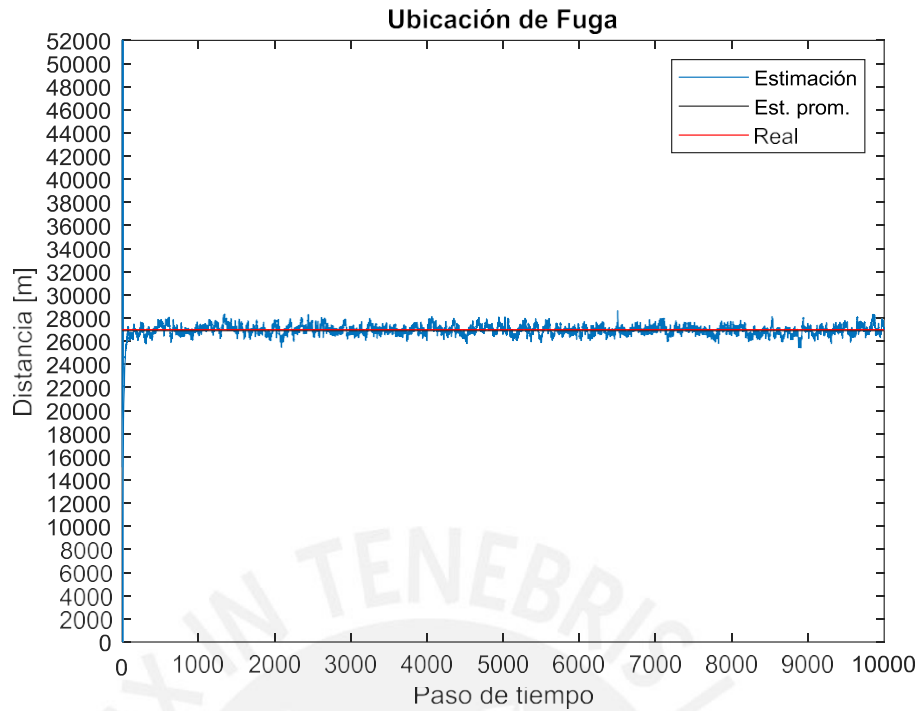


Figura 3.9. Estimación de ubicación de la fuga x_L por el Filtro de Kalman Extendido.

Tal como se muestra el perfil de gradiente de presiones en la figura 3.10, cuando existe presencia de fuga en el ducto se produce como consecuencia una desviación en el gradiente de presiones, mientras mayor sea la magnitud de la fuga, mayor será la desviación del perfil de gradiente. En este caso con un 5% de magnitud de fuga se puede apreciar dicha ligera desviación en los nodos 2 y 3 del modelo.

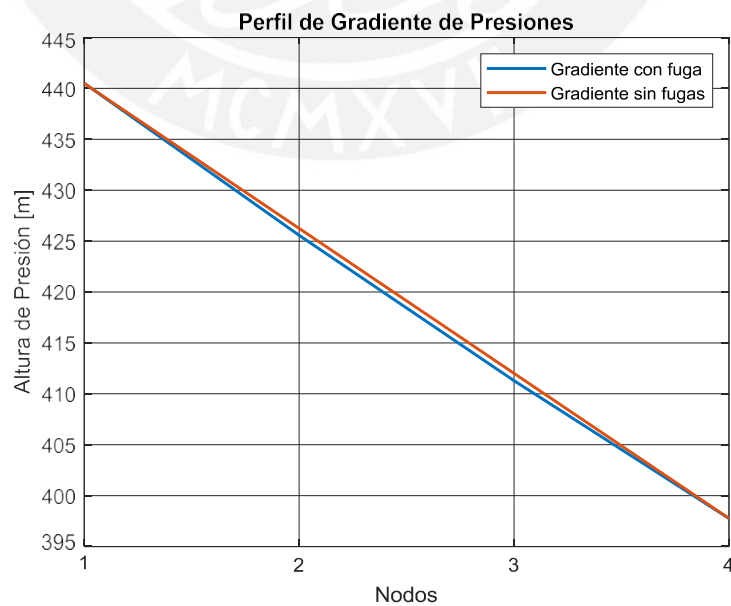


Figura 3.10. Perfil de gradiente de presiones con y sin fuga para los nodos del modelo.

Al variar la ubicación de fuga para los diferentes nodos del modelo MOC con una magnitud de fuga del 5% del caudal total, se obtiene el resultado de la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Ubicación y magnitud de fuga estimada para diferentes ubicaciones.

Nodo	Ubicación Real [m]	Ubicación Estimada [m]	Error %	Magnitud Estimada [m³/s]	Error %
1	0	--	--	2.0178E-05	99.559
2	3000	17648.23	488.274	0.0008181	82.120
3	6000	17948.15	199.136	0.0015699	65.689
4	9000	323.66	96.404	0.0023459	48.730
5	12000	6293.87	47.551	0.0031059	32.120
6	15000	12164.10	18.906	0.0038462	15.938
7	18000	17830.73	0.940	0.0045580	0.383
8	21000	20943.91	0.267	0.0045645	0.241
9	24000	23814.43	0.773	0.0045585	0.372
10	27000	26909.81	0.334	0.0045376	0.828
11	30000	29976.18	0.079	0.0045383	0.813
12	33000	32887.99	0.339	0.0045148	1.327
13	36000	35800.70	0.554	0.0045151	1.3210
14	39000	35784.57	8.245	0.0037304	18.471
15	42000	35690.05	15.024	0.0029878	34.700
16	45000	35430.75	21.265	0.0022159	51.570
17	48000	35156.26	26.758	0.0014543	68.215
18	51000	35273.18	30.837	0.0007383	83.865
19	54000	41597.06	22.968	7.61363E-06	99.834

El Filtro de Kalman Extendido detecta con un alto nivel de precisión las fugas ubicadas entre los nodos 7 a 13, con un error promedio de 0.47 %, mientras que si la fuga se produce fuera de estos dos nodos el error porcentual comienza a incrementarse esto debido a que la técnica de fugas ficticias emplea una función de interpolación entre estos dos nodos para ubicar la fuga. Esto quiere decir que, para determinar la posición en nodos fuera del intervalo las fugas ficticias Q_{L1} y Q_{L2} deben ser mayores a la fuga real para producir una buena estimación, esto ocurre también en otros escenarios cuando la magnitud de fuga es de 1%, 2% y 10%.

Al variar la magnitud de la fuga en 1%, 2%, 5% y 10% para diferentes ubicaciones se puede apreciar el cambio en el error % en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Ubicación de fuga estimada para diferentes ubicaciones y magnitudes de fuga.

Ubicación Real [m]	Ubicación Estimada [m]							
	Magnitud de Fuga 1%	Error %	Magnitud de Fuga 2%	Error %	Magnitud de Fuga 5%	Error %	Magnitud de Fuga 10%	Error %
15000	17315.67	15.438	17402.57	16.017	12164.10	18.906	17929.43	19.530
18000	18095.97	0.533	18193.07	1.073	17830.73	0.940	18006.13	0.034
21000	21273.38	1.302	21278.86	1.328	20943.91	0.267	21021.59	0.103
24000	24352.42	1.468	24272.26	1.134	23814.43	0.773	24114.62	0.478
27000	27236.97	0.878	27034.53	0.128	26909.81	0.334	27211.06	0.782
30000	30836.46	2.788	30351.15	1.171	29976.18	0.079	30124.04	0.413
33000	34067.29	3.234	33468.30	1.419	32887.99	0.339	33070.71	0.214
36000	36776.48	2.157	36576.47	1.601	35800.70	0.554	36063.13	0.175
39000	43286.22	10.990	42024.61	7.755	35784.57	8.245	42108.57	7.971

En la figura 3.11 se muestra la estimación del caudal de fuga con el Filtro de Kalman Extendido para diferentes niveles de magnitud de fuga, donde todas las estimaciones tienden a posicionarse alrededor del valor real de magnitud de fuga, para una ubicación a 27 000 metros de progresiva del ducto.

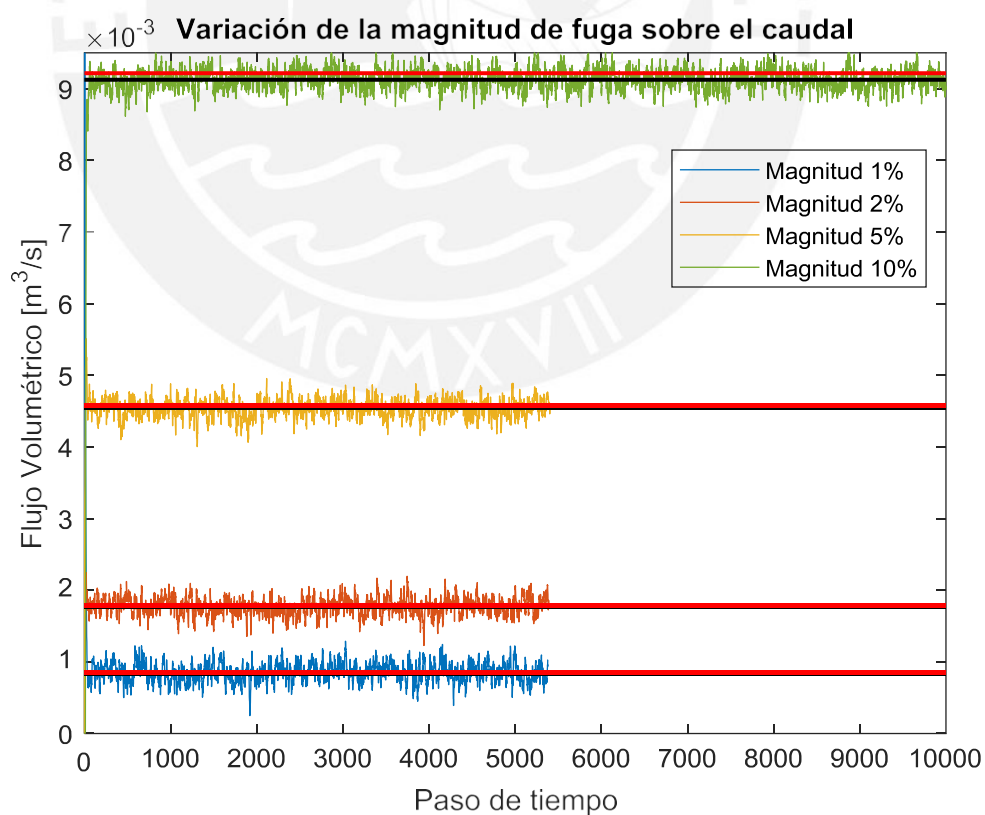


Figura 3.11. Variación de magnitud de fuga ubicada a 27 000 metros de la progresiva.

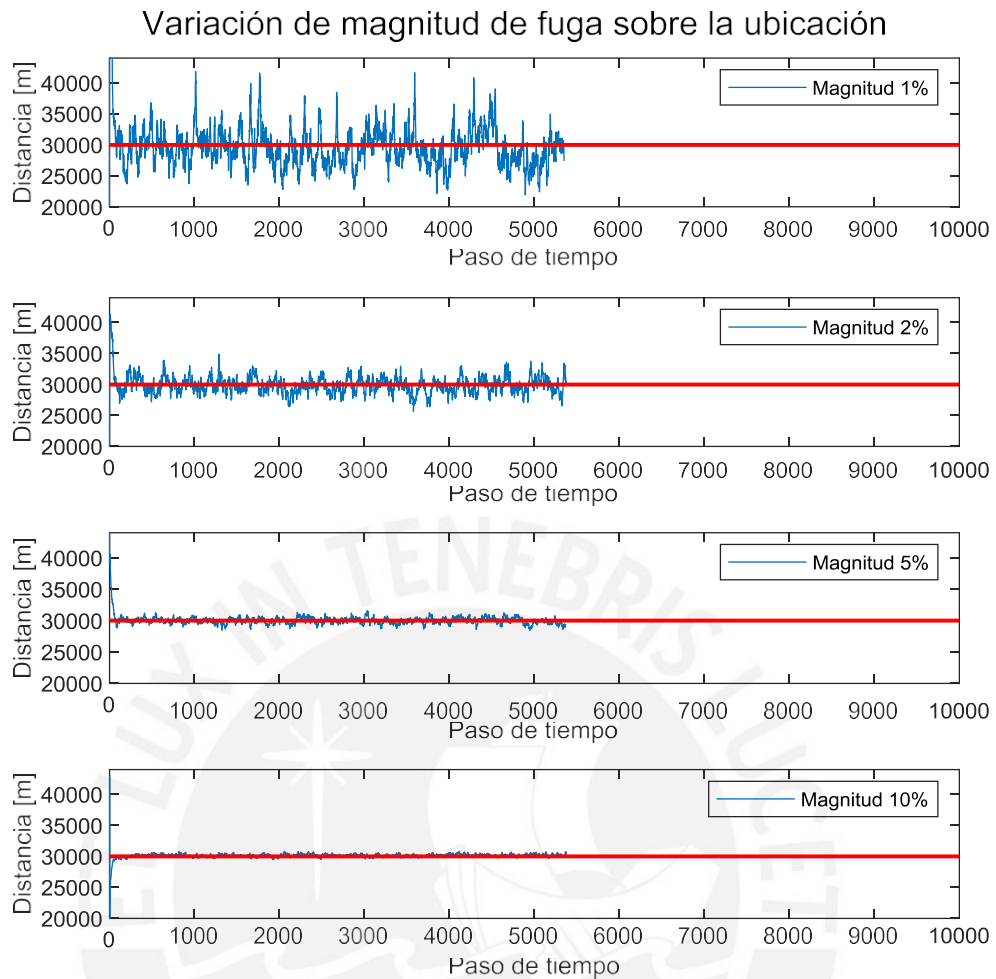


Figura 3.12. Variación de magnitud de fuga sobre la ubicación, cuando la fuga real se ubica a los 30000 metros de la progresiva.

En la figura 3.12 se observa el efecto de la magnitud de fuga frente a la estimación de ubicación de fuga, mientras la magnitud se incrementa la desviación de la estimación de la ubicación es menor, esto quiere decir que para fugas menores a 1% del caudal total la estimación no será precisa.

3.6. Conclusiones del capítulo

Algunas de las razones de porqué el Filtro de Kalman es uno de los estimadores más empleados es debido a que combina la información de las mediciones reales con el modelo matemático de la planta, esto gracias al uso de las matrices \mathbb{R}_k y \mathbb{Q}_k como factores de ponderación para determinar la ganancia \mathbf{K}_k .

Gracias al Filtro de Kalman Extendido fue posible la estimación de la magnitud y ubicación de fuga en un segmento de 54 kilómetros del Tramo I del ONP, siendo necesarias cuatro mediciones de presión que fueron proporcionadas por el modelo dinámico del sistema realizado con el método de características (MOC), logrando errores de estimación en magnitud del 0.241 % y 0.079 % para el caso de la estimación de ubicación con una magnitud de fuga de 5% del flujo total.

Con un buen ajuste de los pesos en las matrices \mathbb{R}_k y \mathbb{Q}_k se pueden lograr estimaciones con menor desviación del valor real y un menor error porcentual, tanto en la estimación de magnitud y ubicación. También se debe tener cuidado con la iniciación de la matriz de covarianza \mathbf{P}_k ya que puede desestabilizar la observabilidad del sistema, deteniendo el proceso de simulación.



CAPÍTULO IV: PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE DETECCIÓN DE FUGAS BASADO EN EL FILTRO DE KALMAN EXTENDIDO

4.1. Introducción

En este último capítulo se presentarán las especificaciones técnicas de los equipos, diagramas, esquemas y buenas prácticas que se necesitan para llevar a cabo la implementación del Sistema de Detección de Fugas para el Tramo I del Oleoducto Norperuano. El algoritmo para el sistema de detección se diseña de forma particular ya que posee características físicas de longitud, diámetro de la tubería, rugosidad interna, ubicación de las estaciones de bombeo, la instrumentación de campo, características hidráulicas, etc. (Henrie, Carpenter, & Nicholas, 2016). Además de considerar sus condiciones operativas como el flujo volumétrico o caudal, las propiedades fisicoquímicas del crudo transportado, y los objetivos de gestión de integridad del ducto.

4.2. Hardware de propuesto para el sistema de detección de fugas

El algoritmo del Filtro Extendido de Kalman representa una dificultad en el uso y almacenamiento de datos, algunas de las variables empleadas tales como las variables de estado, la ganancia o la covarianza del error, son del tipo matriz. Por lo que se debe escoger un controlador que sea capaz de trabajar con operaciones matriciales tales como; transposición, inversión y multiplicaciones. Actualmente el mercado ofrece diversas opciones de controladores, como los controladores lógicos programables (PLC), controladores de automatización programables (PAC) y las Unidades de Terminal Remoto (RTU), de todos ellos la infraestructura actual del Oleoducto Norperuano usa Unidades de Terminal Remoto (RTU) para adquirir y monitorear las señales de los diferentes sensores, también por brindar alta confiabilidad y por su desempeño de trabajo en zonas agrestes, la información captada por cada RTU luego es enviada por enlace satelital a la sala de control en el Terminal de Bayóvar ubicada en Piura, donde el sistema de detección de fugas se encontrará implementado sobre una computadora industrial, trabajando en paralelo al SCADA.

4.2.1. Unidad de Terminal Remoto (RTU)

Las RTU son unidades de control y adquisición de datos, diseñadas para las estaciones remotas DCS y SCADA. A menudo están equipados con puertos de conexión de red, que pueden incluir interfaces de radio alámbricas e inalámbricas para comunicarse con el controlador de supervisión (Stouffer et al.,2011). El RTU servirá para adquirir y monitorear las señales provenientes de la instrumentación (temperatura, flujo y presión) distribuida en la infraestructura del Tramo I del Oleoducto Norperuano.



Figura 4.2. Esquema del RTU2020 de la marca Honeywell. **Fuente:** Honeywell – Technical Information

Según lo mostrado en la figura 4.2 el RTU presenta las siguientes características:

1. Entrada de alimentación 18 – 30 VDC.
2. Puertos RS485
3. Puertos RS232
4. Puertos Ethernet
5. Entradas y salidas, no redundantes
6. Slot para tarjeta SD
7. LEDs de estado

Adicionalmente, en la tabla 4.1 se enumeran los elementos dentro de los tableros de control puestos en cada caseta de manipulación de válvulas de bloqueo del Oleoducto Norperuano.

Tabla 4.1. Dispositivos de los tableros de control para las casetas de válvulas distribuidas en la infraestructura del Oleoducto Norperuano.

N°	Descripción	Marca	Modelo
1	DISPOSITIVO DE COMUNICACIÓN	VICTRON ENERGY	VENUS GX
2	INTERRUPTOR DE PANELES	SIEMENS	5SY4520-7
3	INTERRUPTOR DE BATERÍAS	SIEMENS	5SY4520-7
4	INTERRUPTOR DE FUENTES	SIEMENS	5SL6206-7
5	INTERRUPTOR DE FUENTE	SIEMENS	5SL6206-7
6	INTERRUPTOR DE RESERVA	SIEMENS	5SL6206-7
7	CONTROLADOR DE CARGA DE BATERÍA	VICTRON ENERGY	MPPT15170 -TR
8	INVERSOR DE CORRIENTE	VICTRON ENERGY	48/1200
9	FUENTE 24	PHOENIX CONTACT	TRIO PS 2G / TAC / 24DC / 10
10	FUENTE 55	AXIS	T8134 MDSPAN60W
11	FUENTE 12	PHOENIX CONTACT	TRIO PS / TAC / 12 DC / 5
12	SWITCH 16 PUERTOS – 16 PUERTOS	REC	SW1
13	RTU CONTROLLER	HONEYWELL	CONTROLLER CPM28, MIXED 10
14	SURGE PROTECTOR	PHOENIX CONTACT	VAL – MS 60000 PV/2+V
15	SURGE PROTECTOR DIGITAL (INPUT)	PHOENIX CONTACT	PLT – SEC – T3 – 24 – PM
16	SURGE PROTECTOR DIGITAL (OUTPUT)	PHOENIX CONTACT	PLT – SEC – T3 – 24 – PM
17	SURGE PROTECTOR ANALOGICO	PHOENIX CONTACT	TC – 6P – TX2 – 24DC – UT – 1
18	SURGE PROTECTOR	PHOENIX CONTACT	D – LAN – CAT25 – FP
19	BORNE DE UN PISO	SIEMENS	8WA1 – 011 – 1DF11
20	BORNE DE DOBLE PISO	SIEMENS	8WA1 – 011 – 2DG11
21	BORNE FUSIBLE CUCHILLA	PHOENIX CONTACT	UK 5 – HESILED – 24

Fuente: Adaptado de Petroperú, 2019.

4.2.2. Transmisores de presión

Los transmisores de presión que se encuentran instalados en las casetas de válvulas en la infraestructura del Oleoducto Norperuano son de la marca Honeywell y modelo STG87L, los cuales miden la presión manométrica del fluido en el ducto, estos dispositivos se caracterizan por su tecnología que combina un sistema piezoresistivo y compensación de temperatura proporcionando alta precisión y estabilidad. En la tabla 4.2 se muestran algunas de las características principales del producto.

Tabla 4.2. Características de los transmisores de presión instalados en la infraestructura del Oleoducto Norperuano.

Característica	Valor
Precisión	Hasta 0.055% del rango
Estabilidad	Hasta 0.015% del rango
Compensación de temperatura	Automática
Rango de temperatura	-40 – 125 °C
Rangeabilidad	100:1
Tiempos de respuesta	80 ms
Límite superior de rango	3000 psi / 210 bar
Límite inferior de rango	-14.7 psi / -1.0 bar
Comunicación	4 – 20 mA / HART® / FOUNDATION™ Fieldbus

Fuente: Adaptado de la ficha técnica del producto, Honeywell.

4.3. Arquitectura del sistema de detección de fugas propuesto

La arquitectura del sistema de detección propuesto se observa en la figura 4.3, el cual contará con diferentes puntos de monitoreo local de los parámetros de presión, flujo y temperatura, y control basado en RTU que brindarán comunicación hacia la sala de control ubicada en la ciudad de Piura a través de un enlace satelital. La activación de las válvulas de bloqueo y el registro de datos serán administrados por un sistema SCADA, contando además con una interfaz para el seguimiento de eventos y control localizado en algunos de los puntos centrales de operación (estaciones de bombeo).

El sistema de detección de fugas trabajará de forma paralela tomando la información de los sensores de presión, flujo y temperatura que se encuentra en el registro de datos del SCADA,

de forma tal que se pueda realizar los cálculos de estimación de localización y magnitud de fuga dentro del algoritmo propuesto.

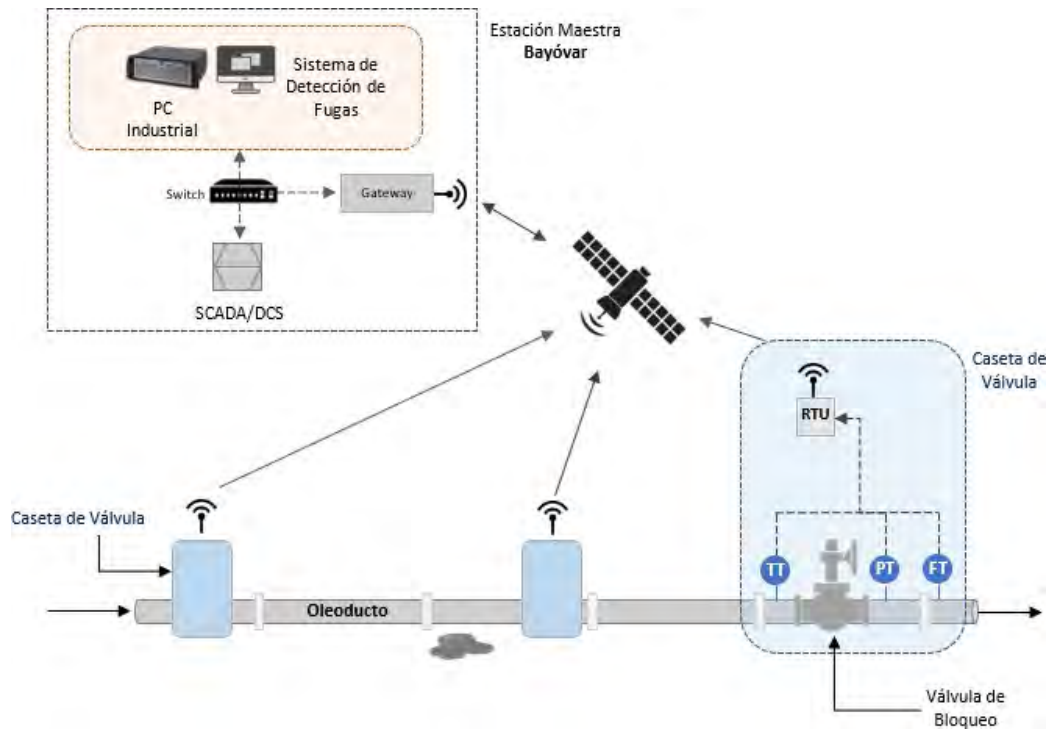


Figura 4.3. Arquitectura de comunicación del Sistemas de Detección de Fugas propuesto.

El protocolo de comunicación industrial entre el SCADA y el sistema de detección de fugas puede ser Ethernet/IP el cual es bastante extendido dentro de la empresa y dependerá de la infraestructura de comunicación ya implementada, una condición necesaria para la operación eficiente de este sistema es que los controladores trabajen en redundancia (Núñez, 2020), al igual que todo el sistema de comunicación.

4.4. Propuesta de implementación del algoritmo en el controlador o computador industrial

El Filtro de Kalman Extendido es un algoritmo recursivo que tiene por finalidad estimar los estados del sistema de detección de fugas para lo cual se requieren de las mediciones de los parámetros de presión y flujo volumétrico, así como ingresar las características del crudo transportado.

El algoritmo del programa y la descripción de las rutinas se presentan a continuación:

Algoritmo: Filtro de Kalman Extendido - FKE_Obs ()

```
// Iniciación
Inputs: Alturas de presión ( $H_1, H_4$ ), Flujos volumétricos ( $Q_1, Q_4$ ),  $C_v$  de válvula,  $\hat{x}, P_0, Q$ 
y  $\mathbb{R}$ 
Outputs: Estados estimados ( $H_i, Q_i, Z_L, Q_L$ )

1.  $k = 1$ 
2. while true do
3.      $z^{(k)}$                                      ← Toma de mediciones ( $H_1, H_4, Q_1, Q_4$ )

// Predicción
4.      $J_{h^{(k)}}$                                    ← Matriz_Jacobiana ( )
5.      $J_{h^{(k)}}^T$                                    ← Matriz_Transpuesta ( $J_h$ )
6.      $x^{(k)} = f(x_{k-1}, u_{k+1})$                  ← Usar el estado con la matriz de transición  $\phi$ 
7.      $P^{(k)} = J_{h^{(k)}}P^{(k-1)}J_{h^{(k)}}^T + Q$     ← Multiplicacion_Matriz ( )

// Corrección
8.      $S^{(k)} = J_{h^{(k)}}P^{(k-1)}J_{h^{(k)}}^T + \mathbb{R}$     ← Multiplicacion_Matriz ( )
9.      $S^{(k)-1}$                                        ← Matriz_Inversa (S)
10.     $K^{(k)} = P^{(k)}J_{h^{(k)}}^T S^{(k)-1}$           ← Multiplicacion_Matriz ( )
11.     $z_{pred}^{(k)} = z^{(k)} - Hx^{(k)}$              ← Cálculo de y
12.     $y^{(k)} = z^{(k)} - z_{pred}^{(k)}$              ← Tomar medición
13.     $x^{(k)} = x^{(k)} + (Ky^{(k)})$                  ← Actualizar estados, Multiplicacion_Matriz
    ()
14.     $P^{(k)} = [I - KJ_{h^{(k)}}]P^{(k)}$            ← Actualizar la matriz de covarianza

15.    Cálculo de las constantes de integración ← MOC_Main ( )
    y condiciones de frontera
16.     $k = k + 1$ 
17. end
```

LEAK_MAIN (). Este es el programa principal el cual tiene el propósito de controlar la ejecución del programa, llamando a las diferentes rutinas cuando sea necesario. Esta rutina llama a cada tiempo de muestreo secuencialmente a las rutinas:

FKE_Obs (). Esta subrutina es usada para reconstruir el vector de estado usando el Filtro de Kalman Extendido. Invocando la subrutina *Multiplicacion_Matriz* y *Matriz_Inversa* para completar las operaciones.

Multiplicacion_Matriz (). Esta subrutina se emplea varias veces en las rutinas de corrección y predicción a través de un comando 'Jump to Subroutine'. Las matrices junto a sus dimensiones se pasan como entradas, devolviendo la matriz de respuesta resultante de la multiplicación.

Matriz_Inversa (). Las dimensiones de la matriz se pasan a este junto con una matriz. La subrutina devuelve la matriz invertida resultante utilizando una matriz aumentada con eliminación gaussiana.

Matriz_Transpuesta (). Se pasa a esta subrutina la matriz a transponer y devuelve la matriz transpuesta.

Matriz_Jacobiana (). Esta subrutina calcula el valor de cada elemento de la matriz jacobiana considerando los valores de estimación previa y devuelve la matriz resultante.

MOC_Main (). Esta subrutina contiene el modelo dinámico de la planta empleando el método de características, tiene por entradas las alturas de presión y flujo volumétrico estimados un paso anterior, y dando como devolviendo los valores simulados de altura de presión y flujo volumétrico en el paso actual.

4.5. Consideraciones de la implementación del sistema de detección de fugas

Como se mencionó la mayoría de subrutinas a implementar se pueden realizar en texto estructurado, asignando las matrices a la memoria del controlador o en algún lenguaje de programación. Adicionalmente, se debe considerar que todos los cálculos a realizar tendrán que realizarse en un tiempo limitado gobernado por el periodo de muestreo, por lo que debe mantenerse lo más bajo posible a fin de obtener una respuesta rápida en la detección, localización y cuantificación de la magnitud de fuga, existiendo la necesidad de verificar y evaluar los tiempos de cálculo en cada etapa de la ejecución del algoritmo. Cabe mencionar que cuanto menor sea la fuga, mayor será el número de muestras de datos que se requerirán para la detección.

El sistema de detección de fugas propuesto únicamente recibe los datos por parte del SCADA, sin embargo, los sistemas completamente desarrollados producen un intercambio de datos bidireccional entre el SCADA y el sistema de detección de fugas para la gestión del sistema de alarmas. Aun así, se debe considerar; la redundancia de comunicación, el enfoque de transferencia de alarma y cómo garantizar las alarmas críticas no se pierdan si ocurre una falla de comunicación.

Es importante considerar el almacenamiento de los datos de entrada al sistema de detección de fugas, así como las salidas (alarmas) y los valores de estimación obtenido a partir del Filtro de Kalman Extendido en un servidor local.

4.6. Conclusiones del capítulo

En este capítulo se analizó y planteó la propuesta de implementación del sistema de detección de fugas, identificando los requerimientos de hardware y software necesarios. La complejidad del algoritmo requiere inevitablemente de una buena capacidad de memoria en la PC, por lo tanto, se requiere de realizar una adecuada selección de este equipo, con capacidad de trabajar con un monitoreo redundante, ya que se busca una alta disponibilidad de los datos.

La implementación del algoritmo de detección de fugas en un PC industrial representa un desafío, sin embargo, es posible desplegar la solución con las funciones de operaciones matriciales necesarias para implementar eficientemente el Filtro de Kalman Extendido.

Para calcular un periodo de muestreo adecuado no solo hay que tomar en consideración la dinámica del proceso sino también el ruido de medición en los transductores de presión y flujo.



CONCLUSIONES

En la presente tesis se llegaron a las siguientes conclusiones:

- El estudio del arte de este trabajo recogió toda la información disponible sobre el transporte de crudo por la infraestructura del Oleoducto Norperuano, comprobando que dicho transporte presenta cierta complejidad ya que los perfiles de elevación son diferentes para cada tramo, además las propiedades del producto transportado son variables para el tramo I y II cuando se programan diferentes batch de crudo, el régimen de transporte varía según la demanda de los clientes del oleoducto. Al revisar los métodos empleados para la detección y estimación de ubicación y magnitud, se concluyó que el método del Filtro de Kalman Extendido fue uno de los más adecuados para la estimación de los parámetros de fuga que puede ser implementado en un controlador avanzado o computadora industrial.
- Se realizó el modelamiento dinámico del sistema de transporte de fluidos con énfasis al crudo de petróleo, partiendo de las ecuaciones de momento y continuidad que se expresan como ecuaciones diferenciales parciales, resolviéndolos con los métodos de discretización de diferencias finitas y el método de características (MOC), el primero se representa como un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que pueden ser resueltas mediante algún solver o método numérico, el segundo modelo contempla las condiciones de frontera del sistema y permite evaluar de forma integral el sistema de transporte, basado en los resultados de simulación se concluye que ambos pueden ser aplicados al sistema de transporte de fluidos, sin embargo, el método de características (MOC) es mucho más flexible en la programación para la simulación y su implementación sobre un controlador o computador industrial. Adicionalmente se realizó una simulación con el método de discretización de diferencias finitas modificando las condiciones de frontera, obteniendo como resultado una solución más realista del comportamiento de los caudales aguas arriba y abajo del punto de fuga.
- Empleando la técnica del filtro de Kalman Extendido se logró diseñar un sistema de detección de fugas precisando la ubicación y magnitud de fuga, obteniendo errores de estimación en magnitud del 0.241 % y 0.079 % para el caso de la estimación de ubicación con una magnitud de fuga de 5% para un flujo de 50 mil barriles de crudo por día. Se realizaron diferentes pruebas cambiando la magnitud de fuga y la ubicación del punto de fuga, obteniendo en promedio global 0.918% de error para la

ubicación de fuga y 1.028% de error para la magnitud de fuga. Concluyendo que el algoritmo y el método basado en el Filtro de Kalman Extendido proporciona una respuesta muy precisa para ambos parámetros estimados.

- Se propuso la implementación del sistema de detección de fugas sobre una computadora industrial en el que se adicionalmente se listó el conjunto de elementos requeridos como hardware y software para diseñar el sistema de comunicación entre la instrumentación disponible en la infraestructura del Tramo I del Oleoducto Norperuano y una estación principal de control. Se formuló la implementación del algoritmo del Filtro de Kalman Extendido haciendo uso de diferentes subrutinas para las operaciones matriciales necesarias en cada etapa de predicción y corrección del filtro.



RECOMENDACIONES

Es necesario contar con mayor información sobre las condiciones de operación del transporte de crudo en el Oleoducto Norperuano, con mayor énfasis en los perfiles de velocidad en función de la progresiva o recorrido, históricos de presiones y flujos volumétricos, esto ayudará a tener mejor precisión en la estimación de la ubicación y magnitud de fuga en el sistema de detección de fugas.

Se debe realizar un buen ajuste de los pesos en las matrices \mathbb{R}_k y \mathbb{Q}_k ya que proporcionan una disminución en los errores de estimación de alturas de presión, flujos y parámetros de fuga. También se debe tener cuidado con la iniciación de la matriz de covarianza \mathbf{P}_k ya que puede desestabilizar la observabilidad del sistema, deteniendo el proceso de simulación. Es posible emplear alguna técnica de optimización para el ajuste de los pesos en las matrices \mathbb{R}_k y \mathbb{Q}_k , obteniendo un mejor rendimiento en la estimación de los estados de interés.

La mayoría de literatura sobre los sistemas de detección de fugas está orientado a localizar y detectar fugas en ductos de transporte de agua, teniendo la posibilidad de desarrollar mayor investigación sobre las técnicas de identificación fugas en oleoductos, gaseoductos y poliductos (ductos multiproducto).

BIBLIOGRAFÍA

- Begovich, O., Pizano-Moreno, A., & Besançon, G. (2012). Online implementation of a leak isolation algorithm in a plastic pipeline prototype. *Latin American applied research*, 42(2), 131-140.
- Ben-Mansour, R., Habib, M. A., Khalifa, A., Youcef-Toumi, K., & Chatzigeorgiou, D. (2012). Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. *Computers & Fluids*, 57, 110-123.
- Bhuiyan, M. A. S., Hossain, M. A., & Alam, J. M. (2016). A computational model of thermal monitoring at a leakage in pipelines. *International journal of heat and mass transfer*, 92, 330-338.
- Chaudhry, M. H. (2014). Transient Flow Equations. In *Applied Hydraulic Transients* (pp. 49-54). New York: Springer.
- Chaudhuri, U. R. (2011). Fundamental Of Petroleum and Petrochemical Engineering. In *Crude Petroleum Oil* (pp. 1-6). CRC Press.
- Chanthery, E., Szyber, A., Travé-Massuyès, L., & Pérez-Zuñiga, C.G. (2020). Process Decomposition and Test Selection for Distributed Fault Diagnosis. In: Fujita, H., Fournier-Viger, P., Ali, M., Sasaki, J. (eds) Trends in Artificial Intelligence Theory and Applications. Artificial Intelligence Practices. IEA/AIE 2020. Lecture Notes in Computer Science(), vol 12144. Springer, Cham.
- Doshmanziari, R., Khaloozadeh, H., & Nikoofard, A. (2020). *Gas pipeline leakage detection based on sensor fusion under model-based fault detection framework*. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 184, 106581.
- El Comercio. (2016, 02 13). Amazonía de negro: derrame de crudo afecta afluyente del Marañón.
- Gestión. (2019, 07 18). Oleoducto Norperuano: Indígenas levantan protestas en zona declarada en emergencia por derrame de petróleo. *Economía*.
- Grewal, M. S., & Andrews, A. P. (2014). *Kalman filtering: Theory and Practice with MATLAB*. John Wiley & Sons.
- Henrie, M., Carpenter, P., & Nicholas, R. E. (2016). Pipeline Leak Detection Basics. En *Pipeline leak detection handbook* (pp. 37 - 40). Gulf Professional Publishing.
- Henrie, M., Carpenter, P., & Nicholas, R. E. (2016). Implementation and Installation of Pipeline Leak Detection Systems. En *Pipeline leak detection handbook* (pp. 179 - 182). Gulf Professional Publishing.
- Hu, J., Zhang, L., & Liang, W. (2011). Detection of small leakage from long transportation pipeline with complex noise. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(4), 449-457.
- Inga-Aparcana, H. (2021). Estado situacional del ONP y perspectivas para su operación en los próximos 20 años. Lima: Conferencias SPE Lima.
- Kalman, R., & Bucy, R. S. (1960). New results in linear filtering and prediction theory. *Journal of Basic Engineering*, 82(D), 35-40.

- Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G., & Trotta, A. (2009). Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application. *Measurement*, 42(3), 358-367.
- León, A., & Zuñiga, M. (2020). *La sombra del petroleo - Informe de los derrames petroleros en la Amazonia peruana 2000 - 2019*. Lima: Oxfam América Inc.
- Lesyshen, R. M. (2005). Water transmission line leak detection using extended kalman filtering (Doctoral dissertation).
- Mambretti, S. (2014). Numerical solution of the governing equations: The method of characteristics. In *Water Hammer Simulations* (pp. 41-64). Boston: WITPRESS.
- Mathworks. (3 de Junio de 2022). Mathworks Help. Obtenido de <https://www.mathworks.com/help/matlab/math/choose-an-ode-solver.html>
- Medrano-Recuay, U. S. (2019). *Análisis de la fisalización ambiental de los derrames de petróleo en el oleoducto norperuano desde el enfoque de la regulación*. Lima.
- Núñez López, J. D. (2020). Metodología para la implementación de estimadores de estado tipo filtro de Kalman en procesadores industriales. Colombia.
- Ozevin, D., & Harding, J. (2012). Novel leak localization in pressurized pipeline networks using acoustic emission and geometric connectivity. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 92, 63-69.
- Pérez-Pérez, E. D. J., López-Estrada, F. R., Valencia-Palomo, G., Torres, L., Puig, V., & Mina-Antonio, J. D. (2021). Leak diagnosis in pipelines using a combined artificial neural network approach. *Control Engineering Practice*, 107, 104677.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., & Sotomayor, J., (2015). Decentralized diagnosis in a spacecraft attitude determination and control system. *Journal of Physics: Conf Series* vol. 659(1) pp. 1-12.
- Pérez, C.G., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., & Sotomayor, J. (2016). Fault driven minimal structurally overdetermined set in a distributed context. 27th International Workshop on Principles of Diagnosis DX2016.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., & Sotomayor, J. (2017). Fault-driven structural diagnosis approach in a distributed context. *IFAC PapersOnline* 50-1 14254-14259.
- Pérez-Zuniga, C., Chantery, E., Travé-Massuyès, L., Sotomayor, J., & Artigues, C. (2018). Decentralized diagnosis via structural analysis and integer programming. *IFAC-PapersOnline* 51-24 pp. 168-175.
- Pérez-Zuñiga C.G., Sotomayor-Moriano J., Chantery E., Travé-Massuyès L. & Soto M. (2019) Flotation Process Fault Diagnosis Via Structural Analysis, *IFAC-*
- Pérez-Zuñiga, G., Rivas-Perez, R., Sotomayor-Moriano, J. & Sánchez-Zurita, V. (2020) Fault Detection and Isolation System Based on Structural Analysis of an Industrial Seawater Reverse Osmosis Desalination Plant. *Processes* 2020, 8, 1100.

- Pérez-Zuñiga, G., Sotomayor-Moriano, J., Rivas-Perez, R., & Sanchez-Zurita, V. (2021). Distributed Fault Detection and Isolation Approach for Oil Pipelines. *Applied Sciences*, 11(24), 11993.
- Petroperú. (2010). *Transporte de crudo pesado de la cuenca del Marañón por el oleoducto nor peruano*. Perú.
- Petroperú. (2013). *Desarrollo y elaboración del estudio de riesgos, asesoría y complementación del sistema de integridad del oleoducto nor peruano*. Perú.
- Petroperú. (2019). *Servicio de instalación de válvulas de bloqueo automático en el ORN, Tramo I y Tramo II del ONP*. Perú.
- Petroperú. (2021). *Petroperú - Unidades operativas*. Retrieved Mayo 1, 2021, from <https://www.petroperu.com.pe/proyectos-y-unidades-operativas/unidades-operativas/oleoducto/>
- Pumaricra Rojas, D., Noack, M., Reger, J., & Pérez-Zúñiga, G. (2022). State Estimation for Coupled Reaction-Diffusion PDE Systems Using Modulating Functions. *Sensors*, 22(13), 5008.
- Qu, Z., Feng, H., Zeng, Z., Zhuge, J., & Jin, S. (2010). A SVM-based pipeline leakage detection and pre-warning system. *Measurement*, 43(4), 513-519.
- Rockwell Automation. (3 de Junio de 2022). SLC 500 Controllers. Obtenido de <https://www.rockwellautomation.com/en-us/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers/small-controllers/slc-500-controllers.html>
- Speight, J. G. (2016). Handbook of petroleum refining. En *Crude Oil, Heavy Oil and Tar Sand Bitumen* (pp. 34-36). CRC press.
- Stouffer, K., Falco, J., & Scarfone, K. (2011). Guide to industrial control systems (ICS) security. NIST special publication, 800(82), 16-16.
- Tamayo, J., Salvador, J., Vásquez, A., & De la Cruz, R. (2020). La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú. Osinergmin: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería.
- Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., & López-Estrada, F. R. (2020). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 173.
- Vásquez, J.W., Perez, C.G., Muñoz, Y.A., & Ospino, A. (2020) Simultaneous occurrences and false-positives analysis in discrete event dynamic systems. *J. Comput. Sci.* 44, 101162.
- Vásquez, J. W., Pérez-Zuñiga, G., Sotomayor-Moriano, J., & Ospino, A. (2021). Super-Alarms with Diagnosis Proficiency Used as an Additional Layer of Protection Applied to an Oil Transport System. *Entropy*, 23(2), 139.
- Verde, C. (2004). Structural Analysis for Fault Diagnosis in Pipelines. *IFAC Proceedings Volumes 37*, 19-26.

Verde, C., & Torres, L. (2017). *Modeling and Monitoring of Pipelines and Networks Advanced Tools for Automatic Monitoring and Supervision of Pipelines*. Springer International Publishing.

