UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA

VICERRECTORADO

CENTRO DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CONTROL DE FUGAS EN EL GASODUCTO SANTA CRUZ – YACUIBA MEDIANTE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

TRABAJO EN OPCIÓN AL DIPLOMADO EN
TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS

VICTOR MANUEL GABRIEL SOLANO

Sucre – Bolivia

2023

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito previo para la obtención del diplomado en Transporte Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.

Victor Manuel Gabriel Solano

Sucre, 01 de diciembre de 2023

DEDICATORIA

A mis padres por apoyarme siempre en mis planes y sueños

A mi hijo Victor Sebastian que es la luz de mi vida que me dio más fuerzas y motivos para salir adelante. A mi pareja por brindarme apoyo en todo momento.

A Dios por ser la luz que guía mi camino

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, gracias a Dios por haberme iluminado en cada paso de mi camino, por brindarme todas las bendiciones que tengo y por enriquecer mi vida con personas y oportunidades extraordinarias que han sido fundamentales en mi crecimiento personal y profesional.

Mi gratitud a la Universidad de San Francisco Xavier y especialmente a la Facultad de Ciencias y Tecnología, que han sido mi segundo hogar y lugar de formación durante estos años. Su entorno académico, sus aulas y el espíritu de conocimiento que allí se respira han sido esenciales en mi desarrollo como profesional.

Un profundo agradecimiento a todos mis docentes, quienes no solo me impartieron sus conocimientos, sino que también me inspiraron, guiaron y apoyaron a lo largo de mi trayectoria académica. Su dedicación, sabiduría y consejos han dejado una huella imborrable en mi carrera y en mi vida.

RESUMEN

La detección de fugas siempre ha sido un trabajo complejo en el área del transporte de hidrocarburos, el cual siempre ha dependido del avance de la tecnología para mejorar su detección y prevención de accidentes en el tiempo. En este trabajo se desarrolla un análisis cuantitativo y cualitativo para implementar sensores de fibra óptica para el control de fugas de gas en el gasoducto Santa Cruz – Yacuiba. En primer lugar, se ha determinado los parámetros operativos para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica adecuado, encontrando valores que pueden ser controlados con estos sensores. Posteriormente, se seleccionó el sensor de fibra óptica adecuado para la detección de fugas a través de comparación de diferentes tipos existentes en el mercado a través de rendimiento, escogiendo al sensor de rejilla de fibra óptica qué es el más utilizado a nivel internacional.

Por otra parte, se ha representado gráficamente el funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto. Finalmente, se desarrolló un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto. Los cálculos Se realizaron en primer lugar sustituyendo en las ecuaciones únicas planteadas cambiando para diferentes tipos de diámetro de fuga que se pueda presentar y estos se los ha ordenado en una tabla de Excel, con los cuales se marcó y se procedió a graficar de manera ordenada representando estos datos la forma en que se comportaría la fuga para distintos diámetros y capacidades de fuga. Con las relaciones obtenidas se pudo obtener curvas con distintas pendientes donde la curva superior es la que generaría rápidamente mayor pérdida de gas y la inferior representó la que genera menor pérdida, Entonces se necesita de un sensor que capte la fuga a esa velocidad.

Los diagramas P&ID se graficaron basándose en la instalación de un controlador y en la parte superior se representa la conexión con el sensor ya que cada vez que se presente una fuga este controlador y sensor detectarán la variación de caudal y de esa forma podrán determinar con la velocidad sónica donde se presentaría la fuga.

En la parte económica se estimó los costos de la implementación propuesta, obteniendo una relación de costo beneficio bastante alta y positiva

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA i

AGRADECIMIENTOS ii

RESUMEN iii

ÍNDICE DE CONTENIDO iv

ÍNDICE DE FIGURAS viii

ÍNDICE DE TABLAS ix

1 CAPITULO I: INTRODUCCIÓN 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.1.1 Planteamiento del problema 2

1.2 OBJETIVOS 3

1.2.1 Objetivo General 3

1.2.2 Objetivos Específicos 3

1.3 JUSTIFICACIÓN 3

1.3.1 Justificación técnica 3

1.3.2 Justificación teórica 4

1.4 METODOLOGÍA 4

1.4.1 Técnica de investigación 4

1.4.2 Instrumentos de investigación 4

CAPITULO II: DESARROLLO 5

2.1 MARCO TEÓRICO 5

2.1.1 Marco conceptual 5

2.1.1.1 Sensor de fibra óptica 5

2.1.1.2 Temperatura ambiente 5

2.1.1.3 Radio de curvatura 6

2.1.1.4 Distancia de detección 6

2.1.1.5 Diámetro del eje óptico 6
2.1.1.6 Objeto mínimo detectable 7
2.1.1.7 Detección por sensor de fibra óptica 7
2.1.1.8 Principio de funcionamiento 7
2.1.1.9 Resistencia AC 8
2.1.1.10 Adhesivo 8
2.1.1.11 Abrasión 8
2.1.1.12 Resistencia a la abrasión 9
2.1.1.13 Absorción 9
2.1.1.14 Corriente alterna de CA (CA) 9
2.1.1.15 Resistencia AC 9
2.1.2 Marco Contextual 9
2.1.2.1 Fundamentos físicos para los sensores de onda de fibra óptica en fugas de gas 9
2.1.2.1.1 Movimiento interno de onda en flujos de tuberías 9
2.1.2.1.2 Propagación de onda de presión 10
2.1.2.2 Parámetros operativos para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica adecuado 12
2.1.2.2.1 Estimación de la cantidad de fuga de gas 12
2.1.2.2.2 Estimación del flujo de radiación de calor 13
2.1.2.3 Tipos de sensores de fibra óptica 14
2.1.2.4 Representación de equipos de control en ductos en diagramas P&ID 14
2.1.2.5 Relación de costo-beneficio 15
2.2 INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS 16
2.2.1 Diagnostico 16
2.2.1.1 Situación actual del gasoducto 16
2.2.1.2 Perfil longitudinal 16
2.2.1.3 Peso molecular del gas 17

2.2.1.4 Propiedades pseudo críticas 18

2.2.1.5 Factor de compresibilidad del gas natural 20

2.2.1.6 Factor de fricción de la tubería 20

2.2.1.7 Densidad del gas natural 20

2.2.1.8 Caudal del gas natural 21

2.2.1.9 Resumen de los datos obtenidos 21

2.2.2 Determinación de los parámetros operativos de este gasoducto para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica disponible en el mercado. 22

2.2.2.1 Tasa de fuga de gas 22

2.2.2.2 Determinación de flujo másico de fuga de gas para distintos coeficientes de descarga 23

2.2.2.3 Estimación del flujo de radiación de calor 24

2.2.2.4 Selección del sensor adecuado 27

2.2.3 Representación gráfica del funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto. 28

2.2.3.1 Representación de la Velocidad de fuga 28

2.2.3.2 Representación gráfica de la detección del sensor respecto a la velocidad de fuga 29

2.2.4 Desarrollo de un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto junto a un manual de manejo. 31

2.2.4.1 Plano P&ID del sistema propuesto 31

2.2.4.2 Diseño de manual de control y manejo 32

2.2.4.2.1 Objetivo del programa 32

2.2.4.2.2 Desarrollo del plan 32

2.2.5 Estimación de los costos de la implementación propuesta. 32

2.2.5.1 Costos fijos 32

2.2.5.2 Costos Variables 33

2.2.5.3 Depreciación anual del proyecto 34

2.2.5.4 Inversión inicial del proyecto 34

2.2.5.5 Análisis de costo y beneficio 35

2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN 36

CAPITULO III: CONCLUSIONES 39

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 40

ANEXOS 41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: *Movimiento de onda de un fluido en un sensor óptico* 10

Figura 2: *Instrumentos generales o símbolos de funciones*.....14

Figura 3: *Relación de entalpia* 25

Figura 4: *Flujo másico para distintos coeficientes de descarga* 28

Figura 5: *Velocidad de fuga para diferentes diámetros de fuga* 29

Figura 6: *Velocidad de propagación*.....30

Figura 7: *Relación de velocidades* 31

Figura 8: *P&ID del sistema propuesto*.....32

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: *Datos de estación de compresión*.....16

Tabla 2: *Perfil longitudinal* 17

Tabla 3: *Peso Molecular del gas natural* 18

Tabla 4: *Propiedades criticas del gas natural* 19

Tabla 5: *Variables de operación* 21

Tabla 6: *Flujo másico para distintos coeficientes de descarga* 24

Tabla 7: *Velocidad de fuga para diferentes presiones y diámetros de fuga* 26

Tabla 8: *Datos de selección de sensor* 27

Tabla 9: *Datos de velocidad de fuga* 30

Tabla 10: *Análisis de costos fijos* 33

Tabla 11: *Costos variables* 33

Tabla 12: *Depreciación anual del proyecto* 34

Tabla 13: *Capital de trabajo* 34

Tabla 14: *Interpretación de Costo y beneficios*.....35

Tabla 15: *Análisis de resultados* 36

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

A través de un comunicado la empresa YPFB Transporte S.A dio a conocer el incidente que tuvo el sábado 24 de abril de 2021, alrededor del mediodía durante los trabajos de excavación para la reparación y mantenimiento del Gasoducto Santa Cruz – Yacuiba (GSCY), la misma detectó una fuga de gas natural en el tramo kp 482, entre las estaciones de Caigua y Campo Grande, más precisamente en la zona de Sachapera, provincia Gran Chaco, Tarija.

Al detectar esta situación de riesgo el personal tomó medidas de seguridad como el cierre de válvulas. Paralelamente, la empresa estableció un plan de reparación, trabajos que implicaron venteo o quema controlada a cargo de técnicos especializados.

En el comunicado la empresa también destacó que el incidente no provocó daños a personas ni al medio ambiente y que por el momento el gasoducto suspendió operaciones, por lo que pretendieron restablecerlo tan pronto como les fue posible.

En el trabajo de investigación denominado “Sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo”, se realizó una investigación tanto teórica como experimental de los principios para el diseño de un sensor de fibra óptica distribuido para detección de fugas de hidrocarburo. Este trabajo se presentó en dos principales secciones: la primera, describe detalladamente los transductores de sensado que transfieren la influencia de hidrocarburo en un cambio de los parámetros de la luz que se propaga dentro de la fibra de prueba y, la segunda, los métodos de interrogación para sensado distribuido (López, 2003).

El trabajo de investigación denominado “Monitoreo estructural basado en sistemas de sensores de fibra óptica”, presenta un compendio de métodos para realizar monitoreo en diferentes tipos de estructuras mediante sensores de fibra óptica. Para el análisis de los diferentes métodos se analizaron panoramas de todas partes del mundo, teniendo como principal exponente a China por el desarrollo de un mayor número de sistemas y porque sus modelos están a la vanguardia del monitoreo estructural.

Otra investigación realizada fue sobre detección y localización de fugas de una magnitud de fugas en una tubería en zigzag utilizando un sistema basado en el método de diagonalización del filtro. (Miller, 2018)

No se ha implementado hasta el momento ningún detector de fibra óptica de fugas en ningún tipo de red de transporte en Bolivia

1.1.1 Planteamiento del problema

El jueves 18 de octubre de 2021, reventó un punto del gasoducto GSYY (Gasoducto Santa Cruz-Yacuiba) de YPFB Transporte, debido a una fisura en la tubería, en el tramo Taquiperendia-Caigua, lo que ocasionó una fuga de gas, seguida de fuego, cuya expansión alcanzó a algunos moradores de la comunidad Pelícano, aledaña al lugar provocándoles quemaduras de diverso grado. El hecho ocurrió a 20 kilómetros de la localidad de Pelicano, ubicado en la tercera sección del municipio de Villamontes (Tarija).

Lamentablemente no existe una tecnología para detectar fisuras actualmente, ni para poder medir alguna posibilidad de cambios de flujo, que es una característica cuando se presenta una fuga. Los sistemas de control de fugas solo se encuentran en las estaciones de compresión y simplemente se basan en detectores de PLC.

El incidente en el gasoducto GSYY subraya una necesidad crítica de mejoras tecnológicas en la detección y prevención de fugas de gas. La ausencia de un sistema avanzado y efectivo para detectar fisuras y cambios en el flujo de gas en toda la extensión del gasoducto, no solo en las estaciones de compresión, pone en evidencia un riesgo significativo para las comunidades cercanas, como se vio en el caso de la comunidad Pelícano.

Se puede identificar que el problema principal es entonces el control deficiente de fugas en el gasoducto Santa cruz – Yacuiba. Se puede entonces plantear la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede controlar las fugas en el gasoducto Santa cruz – Yacuiba para evitar nuevamente explosiones?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar el control de fugas en el gasoducto Santa Cruz – Yacuiba mediante sensores de fibra óptica

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la situación actual del gasoducto
- Determinar los parámetros operativos de este gasoducto para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica disponible en el mercado.
- Representar gráficamente el funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto.
- Desarrollar un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto junto a un manual de manejo.
- Estimar los costos de la implementación propuesta.

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación técnica

En primer lugar, esta tecnología ayudaría bastante al ingeniero de transporte de hidrocarburos, responsable de las actividades de gestión de redes de gas, ya que ya no tendría que dedicar bastante tiempo a buscar soluciones para la localización de fugas. Por otra parte, el mismo garantizaría en dar soluciones a los proveedores de forma regular y en un período de tiempo inmediato.

Estos principios utilizados en la práctica pueden ser útiles para garantizar que las empresas cumplan con las políticas y normas establecidas en relación con las normas ambientales y de seguridad en relación con la detección y ubicación de fugas.

También se propondrá las bases de un equipo basado en fibra óptica para controlar la velocidad de onda y la velocidad sónica y localizar fugas en el gasoducto en estudio.

1.3.2 Justificación teórica

La teórica también es importante en el desarrollo de este proyecto ya que genera un aporte al conocimiento y también al desarrollo de este curso en el área de transportes ya que teóricamente se aplican métodos cuantitativos para predecir la velocidad de detección de fuga con el cual ayuda en la selección óptima del sensor adecuado al caudal de gas que se tiene y también adecuado a las variables operativas del mismo.

1.4 METODOLOGÍA

La presente monografía es una investigación propositiva, con un enfoque cuantitativo (Sampieri, 2014).

1.4.1 Técnica de investigación

La técnica que se aplicará simplemente es la recolección de datos, el cálculo de algunos parámetros y la representación de los mismos para la selección de los sensores de fibra óptica más adecuados a este gasoducto.

1.4.2 Instrumentos de investigación

Este proyecto simplemente es un conjunto de pasos para llevar a cabo la implementación de este equipo propuesto y no tiene ningún fundamento experimental por tanto solo se utilizará una computadora con Excel para representar los parámetros y las gráficas de los mismos y material de escritorio.

Los datos de presión y temperatura del ducto también son herramientas necesarias para poder evaluar las condiciones necesarias para la aplicación de este sistema.

CAPITULO II: DESARROLLO

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Marco conceptual

2.1.1.1 Sensor de fibra óptica

El sensor fibróptico contiene una fibra óptica conectada a una fuente de luz, a fin de facilitar la detección en espacios reducidos o cuando un perfil pequeño resulta conveniente.

Un sensor de fibra óptica es un dispositivo que utiliza fibra óptica para detectar ciertas condiciones o cambios en su entorno. Estos sensores se basan en la modificación de la luz que pasa a través de la fibra óptica en respuesta a un estímulo externo, como temperatura, presión, sonido, movimiento o incluso la presencia de ciertas sustancias químicas. Las variaciones en la luz, ya sea en su intensidad, fase, polarización o frecuencia, se utilizan para medir y detectar dichos cambios.

2.1.1.2 Temperatura ambiente

El rango de temperatura en el que la unidad de fibra puede ser utilizada. Para utilizar una unidad de fibra a alta temperatura ambiental, se recomienda seleccionar un tipo resistente al calor.

La temperatura ambiente es un factor crucial en la selección y uso de unidades de fibra óptica. Mientras que estas unidades están diseñadas para funcionar eficientemente en un rango específico de temperaturas ambiente, su rendimiento puede verse afectado negativamente por temperaturas extremadamente altas o bajas. Para aplicaciones en entornos de alta temperatura, es importante elegir unidades de fibra diseñadas con materiales resistentes al calor y con aislamiento adecuado. Esto asegura la integridad de la señal y la durabilidad del sensor, manteniendo un funcionamiento óptimo incluso en condiciones adversas.

2.1.1.3 Radio de curvatura

El índice que indica el radio máximo al cual la unidad de fibra se puede doblar y funcionar aún sin problemas. Las unidades de fibra con radio de curvatura más pequeño son útiles en lugares donde el enrutamiento es difícil.

El radio de curvatura es un parámetro clave en la manipulación y aplicación de unidades de fibra óptica. Indica cuán estrechamente se puede doblar la fibra sin comprometer su funcionalidad o causar daños. Un radio de curvatura más pequeño permite mayor flexibilidad en la instalación, especialmente en espacios confinados o con rutas complicadas. Sin embargo, doblar la fibra más allá de su radio de curvatura permitido puede causar atenuación de la señal o incluso romper la fibra. Por lo tanto, es fundamental elegir la fibra óptica adecuada en función de las necesidades específicas de instalación y ruta.

2.1.1.4 Distancia de detección

La distancia de detección de un sensor es un aspecto crítico en su diseño y aplicación. Se refiere a la máxima distancia a la que el sensor puede identificar y reaccionar ante la presencia de un objeto. Esta distancia varía según el tipo de sensor y las condiciones ambientales. En aplicaciones donde los objetos están lejos o en áreas extensas, se requieren sensores con una distancia de detección mayor. Es importante tener en cuenta que factores como la luz ambiental, la transparencia o color del objeto y las interferencias pueden influir en la eficacia de la detección a larga distancia.

2.1.1.5 Diámetro del eje óptico

Este índice se utiliza principalmente para unidades de fibra de modelo de barrera. Para las unidades de fibra de barrera, este es el tamaño del objeto que obstruye el eje óptico completamente.

El diámetro del eje óptico en unidades de fibra de barrera es fundamental para determinar su capacidad de detección. Este índice indica el tamaño mínimo del objeto que puede bloquear completamente el eje óptico, activando la respuesta del sensor. Por lo tanto, el diámetro del eje óptico influye directamente en la sensibilidad del sensor a objetos de diferentes tamaños. En

aplicaciones donde se requiere detectar objetos pequeños, se prefieren unidades de fibra con ejes ópticos de menor diámetro. Esto asegura una detección precisa y eficiente, clave para el rendimiento óptimo del sistema de sensores.

2.1.1.6 Objeto mínimo detectable

El objeto mínimo detectable es un parámetro crítico en el diseño y aplicación de unidades de fibra óptica, especialmente en sistemas de detección y monitoreo. Este parámetro define el tamaño más pequeño del objeto que la unidad puede identificar con precisión. La capacidad de detectar objetos pequeños es esencial en muchas aplicaciones industriales y de seguridad, donde la detección temprana de objetos diminutos puede ser crucial. La selección de una unidad de fibra óptica debe basarse, por tanto, en las necesidades específicas de detección, considerando tanto el ambiente de operación como la naturaleza de los objetos a detectar.

2.1.1.7 Detección por sensor de fibra óptica

El sistema de detección de fibra óptica se puede instalar en una tubería enterrada o no enterrada y puede detectar inmediatamente fugas en la tubería, alteraciones del suelo, excavaciones manuales y mecánicas, robos, tomas en caliente y movimiento de vehículos. El sistema de fibra óptica monitorea continuamente grandes tramos de tubería, buscando vibraciones y cambios de temperatura. Una vez que se produce una detección, el sistema alerta al operador o al personal de seguridad sobre la ubicación exacta de la perturbación en la tubería. Este tipo de monitoreo inteligente en tiempo real es fundamental para operar de manera eficiente y proteger activos valiosos.

2.1.1.8 Principio de funcionamiento

El sensor emite un pulso láser a través de un cable de fibra óptica para medir la vibración y la temperatura, así como la posición de esa vibración y temperatura. Utilizando una combinación de retrodispersión de Rayleigh, retrodispersión de Brillouin* y tiempo de vuelo.

Este sistema determina la presencia, ubicación, intensidad y frecuencia de vibraciones y cambios de temperatura a lo largo de una fibra óptica en tiempo real. Rayleigh Backscatter responde a la vibración física impartida a la fibra por perturbaciones en la aplicación. El

software de análisis de señales de HAWK permite al sensor determinar rápidamente el origen más probable de la vibración e informar cualquier señal errónea al personal de mantenimiento sobre posibles problemas con la tubería.

El equipo responde a los cambios en las temperaturas ambientales y se utiliza para detectar la caída de temperatura asociada con la reducción de la presión del fluido causada por la fuga aprovechando el efecto Joule-Thomson.

2.1.1.9 Resistencia AC

La resistencia total ofrecida por un dispositivo en un circuito de corriente alterna debido a efectos inductivos y capacitivos, así como la resistencia de corriente continua. La resistencia AC (corriente alterna) en un dispositivo es un factor clave para determinar su comportamiento y eficiencia en circuitos de AC. Esta resistencia no solo incluye la resistencia pura (como en la corriente continua), sino también los efectos de inductancia y capacitancia, que pueden causar desfases entre la corriente y el voltaje. La comprensión de la resistencia AC es crucial para el diseño de circuitos eléctricos y sistemas electrónicos, especialmente en aplicaciones que involucran frecuencias variables o altas, donde los efectos inductivos y capacitivos son más pronunciados.

2.1.1.10 Adhesivo

Un material adhesivo está diseñado para adherirse a otras superficies con el fin de unirlas o sellarlas. Los adhesivos pueden ser temporales o permanentes y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la construcción de edificios y la fabricación de muebles hasta aplicaciones en electrónica y aeroespaciales. La elección del adhesivo adecuado depende de factores como la compatibilidad de los materiales, las condiciones de uso y la durabilidad requerida.

2.1.1.11 Abrasión

Desgaste superficial de los alambres de un cable

2.1.1.12 Resistencia a la abrasión

Medida de la capacidad de un alambre, recubrimiento de alambre o material para resistir el desgaste o daño de la superficie por medios mecánicos.

2.1.1.13 Absorción

Esa porción de atenuación de fibra óptica resultante de la conversión de potencia óptica en calor.

2.1.1.14 Corriente alterna de CA (CA)

Corriente en la que el flujo de carga se invierte periódicamente.

2.1.1.15 Resistencia AC

La resistencia total ofrecida por un dispositivo en un circuito de corriente alterna debido a efectos inductivos y capacitivos, así como la resistencia de corriente continua.

2.1.2 Marco Contextual

2.1.2.1 Fundamentos físicos para los sensores de onda de fibra óptica en fugas de gas

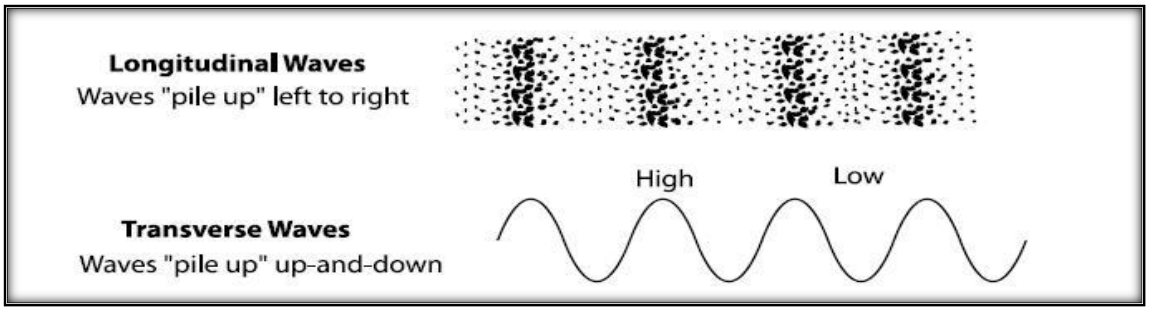
2.1.2.1.1 Movimiento interno de onda en flujos de tuberías

En los últimos años, el método de ondas de pulso de presión de un gas dentro de una tubería, se ha considerado como otro método prometedor para la detección temprana de problemas debido a su corto tiempo de respuesta, poca intrusividad, costo económico, capacidad anti-interferente y alta precisión de detección.

Cuando los gases fluyen durante un tiempo determinado, éstos ejercen presión en el área de la tubería. Adewumi propusieron un modelo para describir la propagación de pulsos de presión debido a la velocidad de onda a través de obstrucciones en tuberías de gas y probaron la viabilidad de este método mediante una serie de estudios numéricos. Chen, realizó experimentos de laboratorio sobre el modelo de propagación de ondas de presión y descubrieron que la longitud y la ubicación del bloqueo podían predecirse con una precisión aceptable.

Sin embargo, la distancia de detección se vio limitada por la degradación de la señal y el porcentaje de bloqueo se subestimó en casi un 50 % debido a la disipación de energía inducida por la atenuación de las ondas. Una forma eficaz de lograr la detección a larga distancia era aumentar la amplitud de la onda incidente; pero el efecto no lineal resultante no puede despreciarse.

Figura 1: *Movimiento de onda de un fluido en un sensor óptico*



Fuente: Extraído de A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis, 2018

En la figura 1 Se observa como las ondas de longitud tienen golpes altos y bajos lo que cuando se presenta una fuga el sensor absorbe los valores altos.

2.1.2.1.2 Propagación de onda de presión

Para entender la propagación de onda de presión en un sensor de fibra óptica se debe conocer el concepto de la amplitud de la onda. La expresión exacta no lineal de onda unidimensional en un fluido ideal con viscosidad cero fue derivada por Riemann y Earnshaw, respectivamente, en 1860 y 1858, que se puede expresar como:

$$v = F\left[t - \frac{x}{C_o}\left(1 - \beta\frac{v}{C_o}\right)\right] \qquad Ecuación \quad (2.1)$$

Dónde:

u es la velocidad de vibración de la partícula de fluido

c0 es la velocidad del sonido de señal pequeña

β es el parámetro de no linealidad.

La ecuación describe el proceso de desarrollo de una onda de amplitud finita en una onda de choque. Cuando la vibración de la fuente es una vibración armónica simple con la frecuencia de ω y la velocidad de vibración inicial de u0, la solución se puede escribir como:

$$v = v_o Sen\left(\omega t - kx + \sigma \frac{v}{v_o}\right) \qquad Ecuación \ \ (2.2)$$

Donde:

k es el número de onda

σ es un número adimensional que puede expresarse como

$$\sigma = \frac{x}{X_s} = \beta M_a x \qquad Ecuación \ \ (2.3)$$

Donde:

Xs es la distancia de discontinuidad

Ma es el número de Mach de la fuente

Según la Ecuación (2.14), la velocidad de propagación de la vibración está relacionada a la velocidad de la partícula del fluido. Esto conducirá a la formación de ondas de choque. La distancia de discontinuidad da una medida de cuándo y dónde aparece la onda de choque.

2.1.2.2 Parámetros operativos para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica adecuado

2.1.2.2.1 Estimación de la cantidad de fuga de gas

La tasa de fuga de gas del espacio se relaciona con su estado de flujo. Cuando $\frac{P_o}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$, el gas está en un flujo sónico, cuya cantidad de fuga viene dada por la ecuación (2.4):

$$Q_G = C_d A P \sqrt{\frac{MK}{RT}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \qquad Ecuación\ (2.4)$$

Cuando $\frac{P_o}{P} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$, el gas se encuentra en un flujo subsónico, cuya cantidad de fuga viene dada por la ecuación (2.5) y la ecuación (2.6):

$$Q_G = Y C_d A P \sqrt{\frac{MK}{RT}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \qquad Ecuación\ (2.5)$$

$$Y = \sqrt{\frac{1}{k-1}\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\left(\frac{P}{P_o}\right)^{\frac{2}{k}}\left[1-\left(\frac{P_o}{P}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \quad Ecuación\ \ (2.6)$$

Donde:

QG = tasa de fuga de gas, kg/s

p = presión de transmisión del gasoducto, Pa

p0 = presión ambiental, Pa

Cd = coeficiente de fuga de gas, tomado 1,00 para forma de brecha redonda, 0,95 para triángulo y 0,90 para rectángulo

M = masa molar del gas, kg/kmol

R = constante de gas J/mol·K

T = temperatura del gas, K

K = índice adiabático del gas, es decir, la relación entre la capacidad calorífica a presión constante Cp y la capacidad calorífica a volumen constante Cv

Y = factor de expansión del gas

A = área del hueco, m2.

2.1.2.2.2 Estimación del flujo de radiación de calor

La principal forma de daño del jet fire es la radiación térmica producida por la llama del jet. El método de estimación de radiación de chorro de fuego es un tipo de extensión del modo de difusión de chorro que incluye el efecto de flujo de aire. El chorro de fuego se considera como una composición de una serie de fuentes puntuales en el eje central de inyección, y cada fuente puntual de radiación tiene la misma tasa de liberación de calor. El flujo de radiación de calor de las fuentes puntuales se estima mediante la ecuación (2.7)

$$q = \frac{nQ_G H_G}{N} \qquad Ecuación\ (2.7)$$

Donde:

q = flujo de radiación de calor de fuentes puntuales, W

factor de eficiencia, tomado 0,35

QG = velocidad de fuga, kg/s

HC = calor de combustión, J/kg

N número hipotético de fuente de radiación puntual, que se puede seleccionar arbitrariamente, generalmente se toma 5 para evaluación y análisis de riesgos.

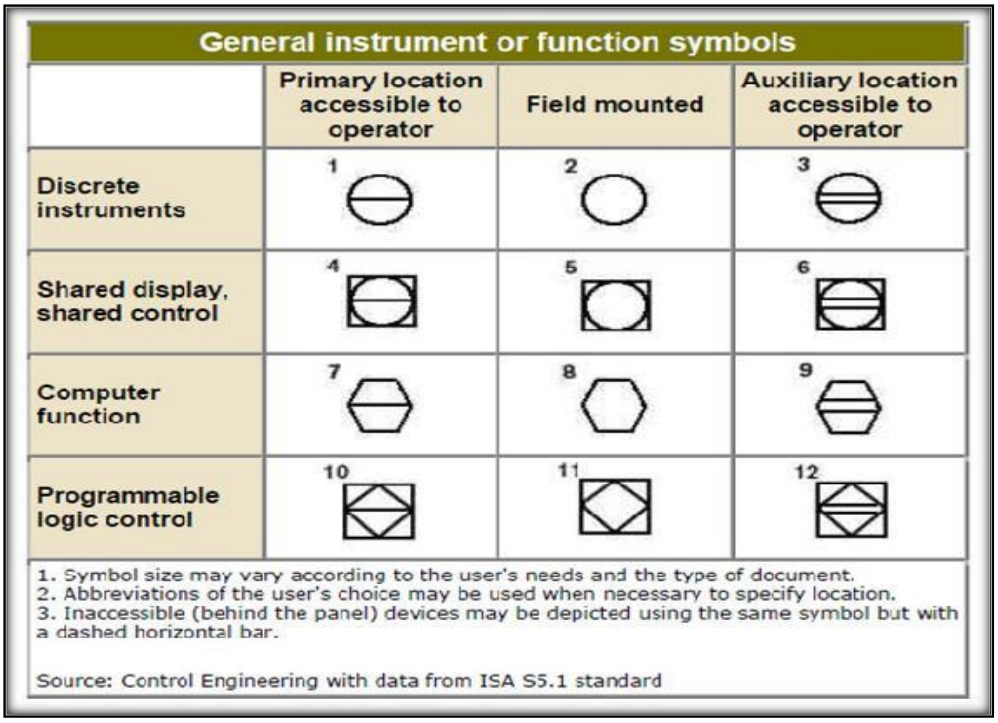
2.1.2.3 Tipos de sensores de fibra óptica

- Sensores de rejilla de fibra
- Sensores de tensión FBG,
- Interrogadores y multiplexores de FBG
- Sistemas de detección acústica distribuida (DAS)
- Detección de temperatura distribuida (DTS)

2.1.2.4 Representación de equipos de control en ductos en diagramas P&ID

Los instrumentos pueden tener diversas ubicaciones, accesibilidades y funcionalidades en el campo para ciertos procesos. Es importante describirlo claramente en un P&ID. A continuación, se muestra una tabla de estos símbolos comúnmente utilizados en P&ID (Crast & Laskowsky, 2020).

Figura 2: *Instrumentos generales o símbolos de funciones*



Fuente: Extraído de Libretexts.com, 2023

Los instrumentos discretos que se pueden ver en la anterior figura son instrumentos separados o separados de otros instrumentos en un proceso. Pantalla compartida, instrumentos de control compartidos comparten funciones con otros instrumentos. Los instrumentos que son controlados por computadoras se encuentran bajo la categoría de "función informática". Los instrumentos que computan, retransmiten o convierten información a partir de datos recopilados de otros instrumentos están bajo la sección "Control lógico programable" (Crast & Laskowsky, 2020)

Para simplificar enormemente los diagramas P&ID para los propósitos de esta clase, se debe emplear una convención estándar. Esta convención simplifica los numerosos dispositivos de control que deben utilizarse. Los sensores, transmisores, indicadores y controladores se etiquetarán en un P&ID como controlador. El tipo de controlador especificado (es decir, temperatura o nivel) dependerá de la variable que desee controlar y no de la acción requerida para controlarla (Crast & Laskowsky, 2020).

2.1.2.5 Relación de costo-beneficio

Representa la relación global entre los costos y beneficios durante un período determinado. En esencia, se trata del beneficio propuesto total en efectivo dividido por los costos totales propuestos en efectivo.

A continuación, se expone los factores a tener en cuenta para tomar la decisión:

- Si el costo-beneficio neto es positivo, significa que los beneficios del proyecto superan a los costos. Sin embargo, es muy importante que se considere la dimensión del costo-beneficio; si es demasiado bajo, probablemente no se obtenga demasiado beneficio con respecto a todo el esfuerzo que se aplica.

- Si el costo-beneficio es negativo, significa que los costos del proyecto superan a los beneficios. En este caso,el proyecto no es factible.

2.2 INFORMACIÓN Y DATOS OBTENIDOS

2.2.1 Diagnostico

2.2.1.1 Situación actual del gasoducto

Este sistema de transporte de gas tiene una longitud de 432 km y está compuesto por un ducto de 32”, 11 válvulas de bloqueo automático y 6 estaciones de medición, una de ellas la Estación de Villamontes, también es una estación de compresión y finalmente un Centro de Supervisión y Control (CSC) ubicado en la ciudad de Santa Cruz.

El tramo de variantes del gasoducto Santa Cruz y Yacuiba tiene las siguientes características.

Tabla 1: *Datos de estación de compresión*

TRAMO VARIANTES ESTACIÓN DE COMPRESIÓN	
Longitud	1.589,83 metros distribuidos en una línea de 560,46 metros
Diámetro	16 pulgadas
MATERIALES	
TUBERÍA	1.589,83 m API 5L Tubería de acero
TEE	1 unidad (16 pulgadas)
VALVULAS	2 unidades (16 pulgadas)
BRIDAS	11 unidades (16 pulgadas)
BRIDA CIEGA	1 unidad (16 pulgadas)
MANTAS TERMOCONTRAIBLES	133 unidades (16 pulgadas)

Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

La tabla anterior describe las partes de un tramo en una estación de compresión de un gasoducto. Incluye información sobre la tubería, que es de un tamaño específico, y varios componentes como válvulas, bridas y mantas termocontraíbles, utilizados en la construcción y mantenimiento del gasoducto para asegurar su funcionamiento y seguridad.

2.2.1.2 Perfil longitudinal

Obtenemos las longitudes de cada tramo:

$$L = \sqrt{|H_2 - H_1|^2 + (Prog_2 - Prog_1)^2}$$

$$L_1 = \sqrt{|3871{,}93 - 3872{,}20|^2 + (100 - 0)^2}$$

$$L_1 = 100{,}0036\, m$$

Obteniendo las longitudes de cada tramo:

Tabla 2: *Perfil longitudinal*

Tramo	Longitud (m)
L_1	100,0054435
L_2	100,0054435
L_3	100,0057783
L_4	100,0054435
L_5	100,0054435
L_6	100,0057783

Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

En la tabla anterior Se observa las correcciones de la longitud de todo el tramo

La longitud equivalente es igual a:

$$L_e = \sum_{i=1}^{n} L_i$$

$$L_e = 100{,}0054435 + 100{,}0054435 + 100{,}0057783 + 100{,}0054435 + 100{,}0054435 + 100{,}0057783$$

$$L_e = 600{,}0333\, m \cong 0{,}37284\, millas$$

2.2.1.3 Peso molecular del gas

Hallando el peso específico del gas en función de los componentes del mismo, se tiene:

Tabla 3: *Peso Molecular del gas natural*

Componente	Fracción volumétrica	Peso molecular
CH4	0,9204	16
C2H6	0,0401	34
C3H8	0,0119	44
n-C4H10	0,0143	58
C5H12	0,0033	72
CO2	0,0010	44
TOTAL	1,0000	18,1204

Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

En la anterior tabla se observa la sumatoria y los cálculos correspondientes para obtener el peso molecular total.

Utilizando la relación se tiene:

$$SG = \frac{M_g}{M_{aire}}$$

Para una temperatura amiente de 20 ºC y una P de 1 atm, el peso molecular del aire es igual a 28,84 gr/mol, entonces:

$$SG = \frac{18{,}1204\ gr/mol}{28{,}84\ gr/mol}$$

$$SG = 0{,}6283$$

2.2.1.4 Propiedades pseudo críticas

Para las propiedades pseudo críticas, se tiene la siguiente tabla:

Tabla 4: *Propiedades criticas del gas natural*

Componente	Fracción volumétrica	Presión Crítica (Psi)	Yi*Pci	Temperatura Crítica (ªF)	Yi*Pci
CH4	0,9134	667	609,2378	-116,68	-106,57551
C2H6	0,0426	707,8	30,15228	90,7	3,86382
C3H8	0,0121	615	7,4415	205,92	2,491632
n-C4H10	0,0143	548,8	7,84784	305,51	4,368793
C5H12	0,0166	488,1	8,10246	385,7	6,40262
CO2	0,0010	1069,5	1,0695	87,73	0,08773
TOTAL	1,0000		663,8514		-89,360917

Fuente: Elaboración Propia en base a Red Primaria de la C. Periférica, 2023

En la anterior tabla se observa el procedimiento para calcular la presión reducida y temperatura reducida con la cual se calcula posteriormente el factor de compresibilidad del gas.

Para el cálculo de las propiedades críticas de la mezcla se tiene:

$$P_c = 663{,}85\ [Psi]$$

$$T_c = -89{,}36\ [^{a}F] = 205{,}58\ K$$

Se trabaja con la presión operativa de 1500 Psi y la temperatura ambiente del gasoducto igual a 25 ºC, entonces. Para las propiedades reducidas:

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$$P_r = \frac{1500}{663{,}85}$$

$$P_r = 2{,}26$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$T_r = \frac{285{,}15}{205{,}58}$$

$$T_r = 1{,}39$$

2.2.1.5 Factor de compresibilidad del gas natural

Relacionando la P_r y T_r en la gráfica de compresibilidad que se encuentra en Anexos, se determina que el factor de compresibilidad del gas es de:

$$Z = 0{,}815$$

2.2.1.6 Factor de fricción de la tubería

Para el factor de fricción, utilizamos la siguiente expresión mostrada en el anterior capítulo:

$$f = 0{,}004\left(1 + \frac{12}{0{,}276D}\right)$$

$$f = 0{,}004 * \left(1 + \frac{12}{0{,}276 * 6 * 2{,}54 * 10}\right)$$

$$f = 0{,}00514$$

2.2.1.7 Densidad del gas natural

Para la densidad del gas natural:

$$PM = \rho ZRT$$

$$\rho = \frac{PM}{ZRT}$$

$$\rho = \frac{1500\ Psi \times \frac{1\ atm}{14{,}7\ Psi} \times 18{,}1204 \frac{gr}{mol}}{0{,}815 \times 0{,}082 \frac{atm - L}{mol - K} \times 288{,}15\ K} \times \frac{1\ Kg}{1000\ gr} \times \frac{1000L}{1\ m^3}$$

$$\rho = 96{,}02\ \frac{Kg}{m^3}$$

2.2.1.8 Caudal del gas natural

Para el caudal del gas natural:

$$Q = 433{,}5\ F \times \left(\frac{T_b}{P_b}\right) \times \left(\frac{P_1^2 - P_2^2}{GT_mLZ}\right)^{0{,}5} \times D^{2{,}667}$$

$$Q = 433{,}5\ \times 0{,}75 \times \left(\frac{520\ ºR}{14{,}7\ Psia}\right) \times \left(\frac{1500\ Psia^2 - 1490\ Psia^2}{0{,}6283 \cdot 518{,}67\ ºR \cdot 0{,}37284\ mill \cdot 0{,}815}\right)^{0{,}5} \times (6\ plg)^{2{,}667}$$

$$Q = 23{,}771\ MMSCFD\ \cong 7{,}80\frac{m^3}{s}$$

2.2.1.9 Resumen de los datos obtenidos

Se definen según datos obtenidos mediante la empresa y otros anteriormente calculados las siguientes variables de operación:

Tabla 5: *Variables de operación*

Variable	**Valor**
Temperatura de operación, T (K)	288,15
Gravedad específica del gas, γ_g,	0,6283
Gravedad específica del gas, ρ, $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	96,02
Factor de compresibilidad del gas, Z	0,815
Presión de entrega, P_1 (Psi)	1500
Caudal de operación, Q $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	7,80
Longitud de la tubería, L (m)	600,0333
Diámetro de la tubería, D (plg)	6
Factor de fricción de la tubería, f	0,00514

Fuente: Elaboración Propia en base a Red Primaria de la C. Periférica, 2023

Con estos datos se puede dar comienzo al análisis ya que el fin del proyecto es determinar si el caudal varía debido a las variaciones de presión con el pasar del tiempo ocasionado por choques y pequeñas fugas en el gasoducto.

Se puede diagnosticar que el ducto trabaja bien con esas operaciones, pero carece de sistemas automáticos de control de fugas ya que solo tiene válvulas de control y se debe implementar necesariamente un sistema de detección automático.

2.2.2 Determinación de los parámetros operativos de este gasoducto para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica disponible en el mercado.

2.2.2.1 Tasa de fuga de gas

Para el estado de flujo:

$$C_p = 8{,}57\,\frac{cal}{mol}$$

$$C_v = 6{,}56\,\frac{cal}{mol}$$

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

$$k = \frac{8{,}57}{6{,}56} = 1{,}31$$

$$\frac{P_o}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\frac{100}{1500} \leq \left(\frac{2}{1{,}31+1}\right)^{\frac{1{,}31}{1{,}31-1}}$$

$$0{,}067 \leq 0{,}5939$$

La tasa de fuga de gas del espacio se relaciona con su estado de flujo. Cuando $\frac{P_o}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$, el gas está en un flujo sónico, cuya cantidad de fuga viene dada por la ecuación (2.1):

$$m_G = C_d A_{fuga} P \sqrt{\frac{MK}{RT}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$$

$$m_G = 0{,}1 \times A_{fuga} \times 1500 Psi \times \frac{101325\ Pa}{14{,}7\ Psi} \sqrt{\frac{0{,}0181204\ \frac{Kg}{mol} \times 1{,}31}{8{,}314\ \frac{J}{mol\ K} \times 288{,}15\ K}\left(\frac{2}{1{,}31+1}\right)^{\frac{1{,}31+1}{1{,}31-1}}}$$

Pero para el área de fuga consideramos que las aberturas son circunferenciales y tiene un diámetro de 1 cm que equivale a 0,01 m; entonces se tiene:

$$A_{fuga} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{fuga}^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0{,}01^2$$

$$A_{fuga} = 7{,}85 \times 10^{-5}\ m^2$$

El flujo másico que se puede perder por segundo con una presión de 1500 Psi es de:

$$m_G = 0{,}1 \times 7{,}85 \times 10^{-5} \times 19025{,}1194$$

$$m_G = 0{,}1493 \frac{Kg}{s}$$

2.2.2.2 Determinación de flujo másico de fuga de gas para distintos coeficientes de descarga

Expresando el flujo másico para distintos coeficientes de descarga y en función de distintos diámetros de fuga se tiene:

$$m_G = 14942{,}2933 \cdot C_d \cdot D_{fuga}^2$$

Para distintos coeficientes de descarga que dependen del ambiente que generará el área de fuga se tiene la siguiente tabla:

Tabla 6: *Flujo másico para distintos coeficientes de descarga*

Df (cm)	mg (Kg/s) Cd = 0,1	mg (Kg/s) Cd = 0,2	mg (Kg/s) Cd = 0,5	mg (Kg/s) Cd = 0,7	mg (Kg/s) Cd = 0,85
0,3	0,0134	0,0269	0,0672	0,0941	0,1143
0,5	0,0374	0,0747	0,1868	0,2615	0,3175
0,7	0,0732	0,1464	0,3661	0,5125	0,6223
0,8	0,0956	0,1913	0,4782	0,6694	0,8129
1,0	0,1494	0,2988	0,7471	1,0460	1,2701
1,2	0,2152	0,4303	1,0758	1,5062	1,8289
1,5	0,3362	0,6724	1,6810	2,3534	2,8577

Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

La tabla anterior muestra cuánto gas se fuga del gasoducto en función del tamaño del orificio y diferentes condiciones de fuga. Cada fila indica un tamaño de orificio distinto y cada columna representa cuánto gas se escapa bajo distintas condiciones.

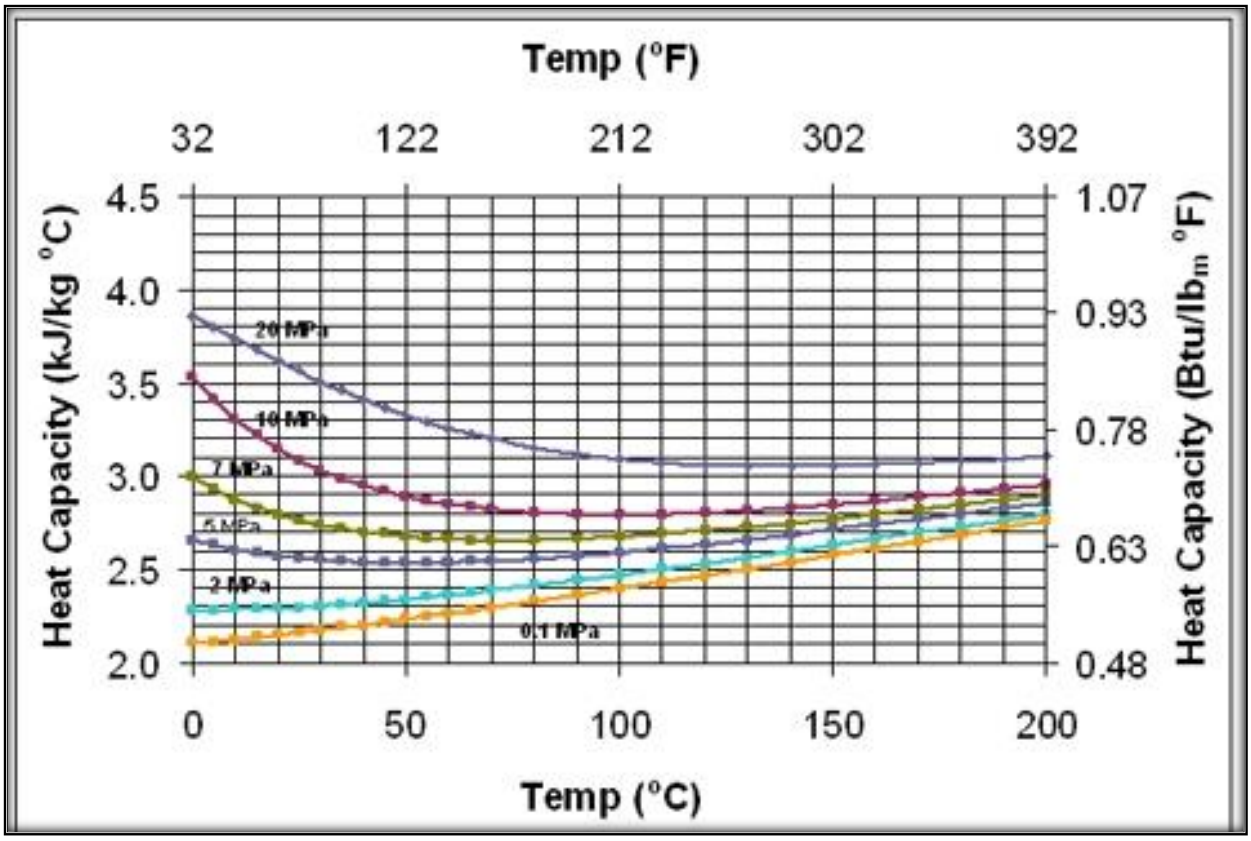
2.2.2.3 Estimación del flujo de radiación de calor

El flujo de radiación de calor de las fuentes puntuales se estima mediante la ecuación (2.4)

$$q = \frac{nm_G H_G}{N}$$

Hallando la entalpia en la siguiente gráfica se tiene:

Figura 3: *Relación de entalpia*



Fuente: Extraído de Experimental verification of the frequency response method of leak detection, 2016

La anterior figura representa la relación entre la entalpía y la temperatura cuyas curvas cambian con distintas presiones.

Para la presión de 1500 Psi y una temperatura de 288,15 K se tiene el siguiente valor de la entalpía del gas natural:

$$H_G = 3{,}3 \frac{KJ}{Kg * °C} \times 12{,}5\ °C$$

$$H_G = 41{,}25 \frac{KJ}{Kg}$$

Para un factor de eficiencia de 0,35:

$$q = \frac{0{,}35 \times 19{,}12 \times 41{,}25}{2}$$

$$q = 138\ KW$$

La potencia de daño es relativamente alta qué podría generar energía a un edificio para quemarlo.

$$C = \left[\rho\left(\frac{1}{P} + \frac{2d_i}{(d_o - d_i)E}\right)\right]^{-0{,}5}$$

$$C = \left[80{,}96\left(\frac{1}{1500} \times \left(\frac{14{,}7}{101325}\right) + \frac{2 \times 0{,}010}{\left(\frac{6 \times 2{,}54}{100} - 0{,}010\right) \times 2{,}3 \times 10^3}\right)\right]^{-0{,}5}$$

$$C = 14{,}21\frac{m}{hr}$$

Obteniendo datos para la velocidad de onda para diferentes presiones y diámetros de fuga se tiene:

Tabla 7: *Velocidad de fuga para diferentes presiones y diámetros de fuga*

P [Psi]	df = 0,002 m	df = 0,005 m	df = 0,010 m	df = 0,015 m
10,0	21,76631	16,7539	12,784453	10,6238
500	32,28056	20,36347	14,188592	11,38934
1000	32,47993	20,41324	14,205397	11,39803
1500	32,54722	20,42992	14,211012	11,40093

Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

La tabla anterior presenta datos sobre la velocidad a la que se fuga el gas en un gasoducto, variando según la presión dentro del ducto y el tamaño del orificio por donde se escapa. Cada fila indica una presión diferente, y cada columna muestra la velocidad de fuga para varios tamaños de orificios

2.2.2.4 Selección del sensor adecuado

En a los anteriores parámetros determinados se plantea utilizar el siguiente detector con las siguientes características:

Tabla 8: *Datos de selección de sensor*

ELEMENTOS		CARACTERÍSTICAS	VALORES
		Espesor:	10 mm
		Diámetro exterior:	500 mm
		Módulo elástico:	2,3 x 109 N/m2
Motor de inducción:		Potencia nominal:	1,5 hp
		Voltaje del inducido:	220 V, 50 Hz
		Corriente del inducido:	10 A
Bomba:		Presión de suministro:	300 kN/m2
		Caudal:	120 m3/min
		Tipo:	Bomba centrífuga
Controlador lógico programable:		Tipo:	PID (entrada analógica, salida de relé)
		Voltaje:	220 V
Transductores de presión:	PT1:	Tipo:	Transductor de presión programable
		Clasificación:	(-1 a 5 N/m2), 10 % de tolerancia
		Corriente:	(4-20 mA)
		Ubicación:	250 m desde la fuente
	PT2:	Tipo:	Transmisor de presión no programable
		Clasificación:	(-1 a 5 N/m2), 10 % de tolerancia
		Ubicación:	260 m desde la fuente
	PT4:	Tipo:	(-1 a 5 N/m2), 10 % de tolerancia
		Clasificación:	260 m desde la fuente
		Ubicación:	1 km

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

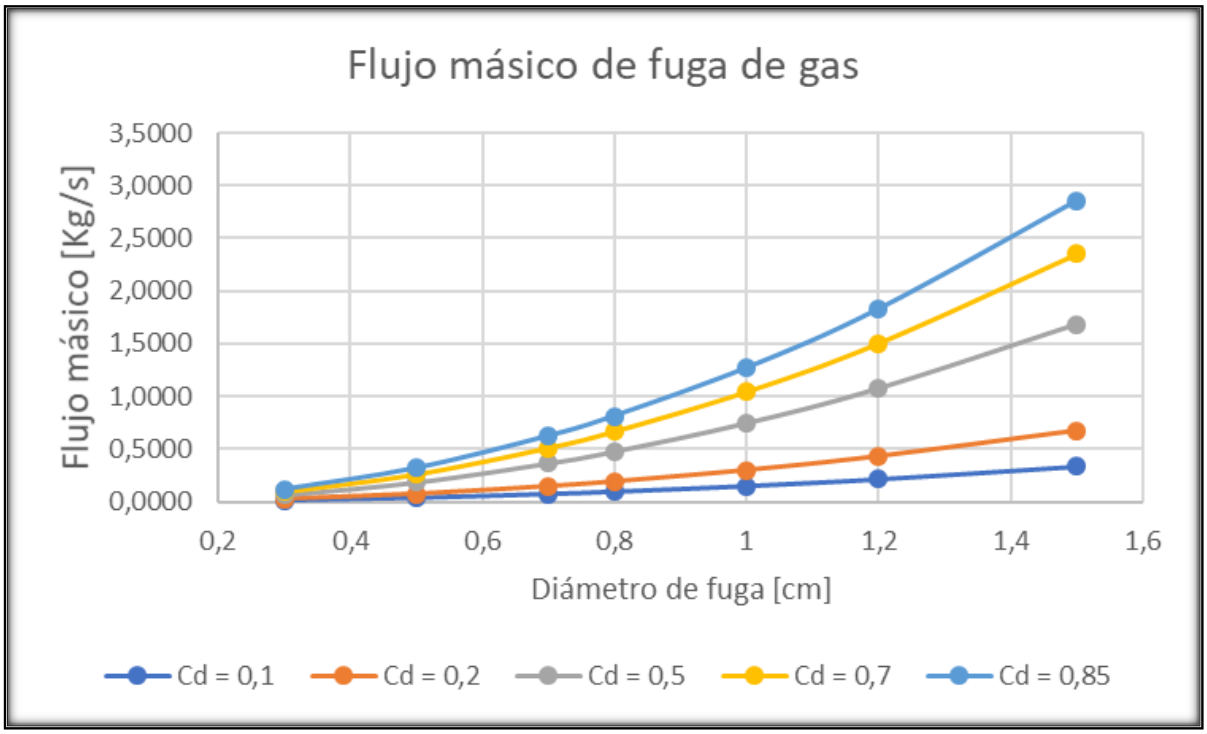
En esta tabla se observa en las características que debe tener el sensor para detectar fugas adoptadas los cálculos anteriormente desarrollados.

2.2.3 Representación gráfica del funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto.

2.2.3.1 Representación de la Velocidad de fuga

Graficando se tiene:

Figura 4: *Flujo másico para distintos coeficientes de descarga*



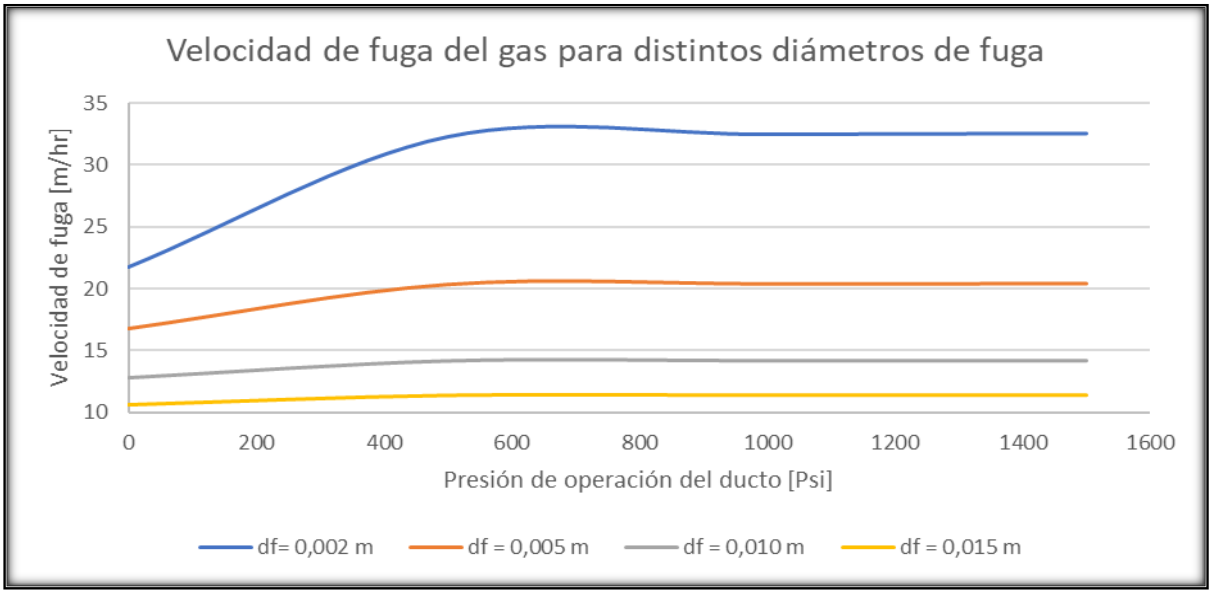
Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

La anterior figura se puede observar que mientras mayor es el valor del coeficiente de descarga mayor es el flujo más básico que se pierde de gas es decir que si mayor es la abertura mayor es la masa que se pierde.

Según las anteriores gráficas mientras más alejadas sea la zona y más descuidada mayor es el caudal que se pierde de gas.

Gráficamente:

Figura 5: *Velocidad de fuga para diferentes diámetros de fuga*



Fuente: Elaboración Propia en base a ecuaciones propuestas, 2023

En la anterior figura se puede observar que para distintos valores de diámetro de fuga Se incrementa la velocidad de fuga. La imagen es un gráfico que ilustra cómo la velocidad a la que el gas se fuga de un ducto aumenta con la presión del ducto y varía según el tamaño del orificio de fuga. Los diámetros de fuga más grandes permiten que el gas escape más rápido, especialmente a presiones más altas.

2.2.3.2 Representación gráfica de la detección del sensor respecto a la velocidad de fuga

Se tienen los siguientes datos con los parámetros calculados

Tabla 9: *Datos de velocidad de fuga*

t [hrs]	Vf [m/s]	Vs [m/s]
0	0	0
5	1,18177529	-0,208348202
10	-0,416813285	0,409228433
15	-1,041097549	-0,603009012
20	0,761917261	0,765861966
25	0,76295925	-0,926275721
30	-1,045719441	1,030957383

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

La tabla anterior muestra la evolución del tiempo en horas, la velocidad a la que se fuga el gas (Vf), y la velocidad de respuesta del sensor (Vs) en un gasoducto. Ofrece una visión de cómo varían estas velocidades con el tiempo, lo cual es crucial para evaluar la eficacia del sistema de detección de fugas.

Graficando:

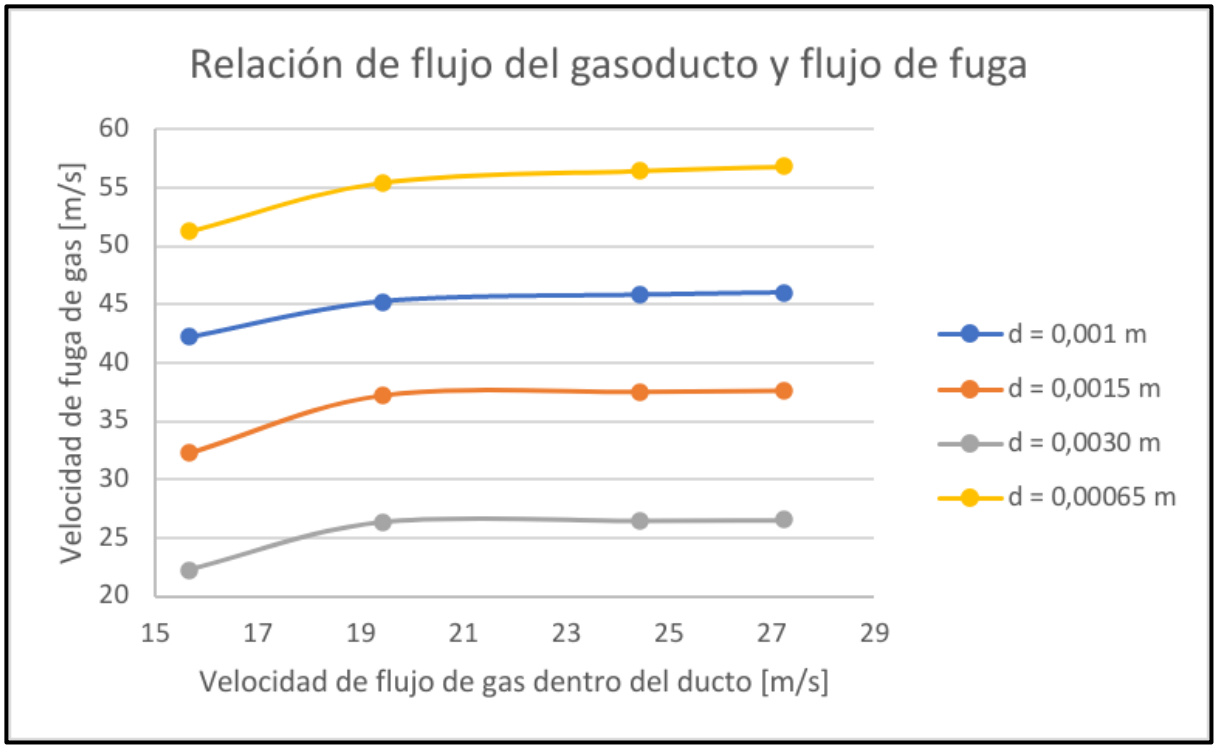
Figura 6: *Velocidad de propagación*

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Se puede observar en la anterior figura que el detector actuará rápidamente a la misma velocidad de fuga que se genere, por tanto, el sistema es factible.

Por otra parte, vamos a relacionar la velocidad de fuga y la velocidad del flujo de gas dentro del ducto para demostrar que a mayor el valor de la velocidad del ducto mayor es la velocidad de fuga.

Figura 7: *Relación de velocidades*



Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

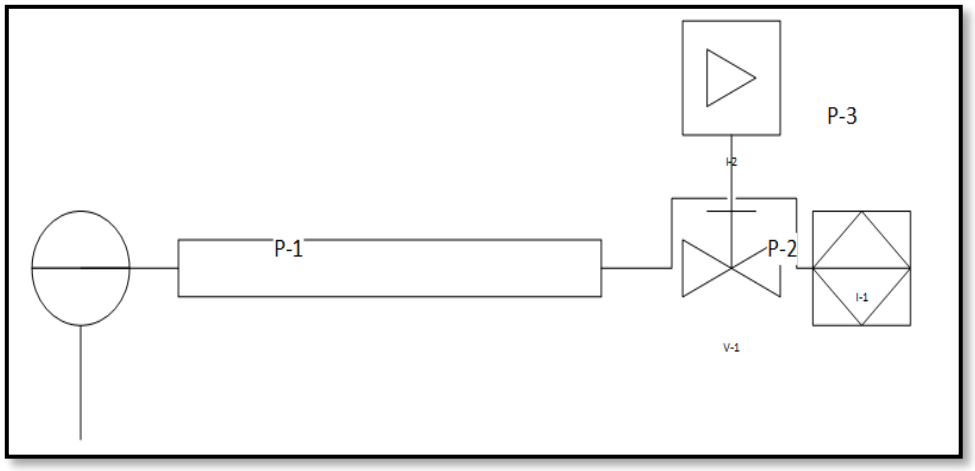
Se puede observar que la velocidad de fuga siempre va a ser mayor tenido al diámetro mientras más pequeño sea este de diámetro mayor es la velocidad lo cual no influye en sí la velocidad directa del gasoducto es entonces más importante controlar la presencia de estas fugas con un sistema adecuado.

2.2.4 Desarrollo de un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto junto a un manual de manejo.

2.2.4.1 Plano P&ID del sistema propuesto

Se presenta a continuación el plano del sistema propuesto:

Figura 8: *P&ID del sistema propuesto*



Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

En la anterior figura se observa el diseño de la instalación a la salida del ducto se debe encontrar el sensor y a la entrada un controlador a determinadas distancias entre 20 a 100 m se debe conectar un sensor para que el proceso de análisis sea óptimo.

2.2.4.2 Diseño de manual de control y manejo

2.2.4.2.1 Objetivo del programa

Establecer medidas preventivas y acciones inmediatas que pueden ser adoptadas por YPFB, proveedores, y contratistas frente a desastres o emergencias que se pueden presentar dentro del gasoducto en la línea Santa Cruz – Yacuiba, reduciendo el riesgo de fugas de gas e incendios.

2.2.4.2.2 Desarrollo del plan

En Anexos A, se presenta el desarrollo de plan de contingencias para evitar accidentes de fugas en el GSCY.

2.2.5 Estimación de los costos de la implementación propuesta.

2.2.5.1 Costos fijos

A continuación, se presentan los costos fijos considerando los costos del sistema propuesto

Tabla 10: *Análisis de costos fijos*

COSTOS FIJOS EN BOLIVIANOS	
COSTOS FIJOS	**Mensual**
Servicios Básicos	10.000
Mano de Obra Directa (MOD)	37.500
Mano de Obra Indirecta (MOI)	14.000
Seguridad Industrial	12.500
Instalación de Sensores	20.000
Gastos grales. de levantamiento de datos	5.000
Impuestos	7.000
TOTAL COSTO FIJO MES	106.000

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

El costo fijo de levantamiento del proyecto para la detección y prevención de fugas e incendios en el gasoducto anual es de 106.000 bolivianos.

2.2.5.2 Costos Variables

A continuación, se presentan los costos variables considerando los costos de instalación y mantenimiento:

Tabla 11: *Costos variables*

COSTOS VARIABLES EN BOLIVIANOS			
COSTOS VARIABLE	**Cantidad**	**V/r Unit**	**Mensual**
Accesorios	10	200	2.000
Soldadura	2	10.000	20.000
Mantenimiento Sensores de fibra óptica	3	14.000	42.000
Instalación Equipos de seguridad	8	1.000	8.000
Instalación Equipos electrónicos	6	4.000	24.000
TOTAL COSTO VARIABLE MES			98.000

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

El costo variable de levantamiento del proyecto para la instalación de los sensores de fuga de fibra óptica es de 98.000 bolivianos.

2.2.5.3 Depreciación anual del proyecto

Para la inversión inicial del proyecto se cuenta con la siguiente tabla:

Tabla 12: *Depreciación anual del proyecto*

PROPIEDAD	Valor	Vida útil/ Años	Depreciación Anual
Sensores de fibra óptica	80.000	8	10.000
Computadora	3.800	4	950
Cascos	200	5	40
Guantes	750	10	75
Trajes de seguridad	700	10	70
Accesorios	445	10	44,5
Total	85.900		11.179,5

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

La depreciación anual del proyecto es de 11.179,5 Bolivianos.

2.2.5.4 Inversión inicial del proyecto

Se tiene la siguiente tabla donde se describe la inversión total del proyecto:

Tabla 13: *Capital de trabajo*

COSTOS FIJOS	106.000
COSTOS VARIABLES AL MES	98.000
TOTAL COSTOS Y GASTOS	204.000
DEPRECIACIÓN	11.179,5
Sensores de fibra óptica	80.000
Software	10.000
TOTAL INVERSION INICIAL	305.179,5

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

La inversión inicial del levantamiento de datos, la simulación, la compra de nuevos equipos para la prevención de fugas en el gasoducto en estudio es de 305179,5 Bolivianos.

2.2.5.5 Análisis de costo y beneficio

La siguiente tabla puede usarse como indicador para determinar si los costos de implementación de sensores de fuga de fibra óptica tienen los siguientes beneficios:

Tabla 14: *Interpretación de Costo y beneficios*

CRITERIO	DESCRIPCION	SIGNIFICADO
B/C > 1	Los ingresos son mayores que los egresos	El proyecto es aconsejable
B/C = 1	Los ingresos son iguales que los egresos	El proyecto es indiferente
B/C < 1	Los ingresos son menores que los egresos	El proyecto no es aconsejable

Fuente: Elaboración propia, 2023

Por lo tanto, usando la ecuación:

$$\frac{B}{C} = \frac{Beneficios}{Inversion\ inicial}$$

Para los dos años de financiamiento:

$$\frac{B}{C} = \frac{[(500000 - 106000) + 500000]Bs}{305179{,}5\ \ Bs}$$

$$\frac{B}{C} = 2{,}92$$

Sobra el doble del presupuesto planteado, por lo tanto, el proyecto es factible ya que sobrará dinero después de la implementación del proyecto en la recuperación de dos años

El ingreso se obtiene del porcentaje anual del 5 % que se ahorra de los ingresos totales por venta de gas

2.3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

A continuación, se llega a analizar los resultados en función a los objetivos planteados:

Tabla 15: *Análisis de resultados*

Objetivos específicos	Actividades desarrolladas	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Diagnosticar la situación actual del gasoducto.	Presentar datos de estación Yacuiba Diagnosticar parámetros operativos del gasoducto Cálculo de caudal del ducto Cálculo de velocidad de onda de fuga Cálculo de caudal de fuga. Cálculo de calor de radiación qué genera el gas en accidente	Las ecuaciones sirvieron de mucho para encontrar estos valores que ayudan a determinar el tipo de sensor adecuado que se debe utilizar en el ducto.	Las ecuaciones son muy generales y un poco complicadas. Se debe investigar más de este tipo de modelos para mejorar el análisis.
Determinar los parámetros operativos de este gasoducto para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica disponible en el mercado.	Determinar la velocidad de fuga Una vez encontrado los valores de los parámetros se busca un detector de fibra óptico adecuado a estos valores. Comparar entre dos a tres sistemas para ver cuál es el más adecuado	Los sensores se adaptan a los valores encontrados	Existen muchas características para diferentes sensores y es algo complicado elegir.

Objetivos específicos	Actividades desarrolladas	Aspectos positivos	Aspectos negativos
Representar gráficamente el funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto.	Se grafica la relación entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que se controlará con el sistema propuesto	Las gráficas son fáciles de representar y entendibles	Se debe representar más variables en tres dimensiones pero es muy complicado.
Desarrollar un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto junto a un manual de manejo .	Graficar el plano de la instalación del sistema en el ducto con simbología P&ID. Proponer un manual de manejo del sistema	Se pudo graficar fácilmente utilizando el programa VISIO	Es muy complicado incorporar en todo el ducto y solo se analiza en un tramo
Estimar los costos de la implementación propuesta.	Realizar el análisis de costo del proyecto propuesto Calcular la relación de costo y beneficio	La relación de costo beneficio es alta lo que significa que el proyecto se financiará rápidamente debido a los ingresos generados por la venta de	Se debe comprar una cantidad moderada de detectores para que el proyecto sea factible

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

En la sección de análisis y discusión, se examinan los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados. El diagnóstico de la situación actual del gasoducto reveló que, aunque las ecuaciones utilizadas son efectivas para determinar el tipo de sensor necesario, son de naturaleza general y presentan cierta complejidad.

En el proceso de determinar los parámetros operativos para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica, se enfrentó la dificultad de elegir entre una amplia variedad de sensores con diferentes características. La representación gráfica del funcionamiento del equipo, mostrando la relación entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga, resultó ser una tarea sencilla y

comprensible. Sin embargo, la representación en tres dimensiones de más variables resultó ser un desafío.

En el desarrollo del plano P&ID en Visio y el manual de manejo, se logró con éxito la representación gráfica utilizando el programa, pero la incorporación de estos sistemas en todo el ducto, no solo en un tramo, presentó complicaciones.

La estimación de los costos de implementación del proyecto indicó una relación de costo-beneficio alta, sugiriendo que el proyecto se financiará rápidamente debido a los ingresos generados. No obstante, se identificó que la factibilidad del proyecto depende de la compra de una cantidad moderada de detectores.

CAPITULO III: CONCLUSIONES

- Se ha diagnosticado y determinado los parámetros operativos para seleccionar un detector de fuga de fibra óptica adecuado, encontrando valores que pueden ser controlados con estos sensores

- Se seleccionó el sensor de fibra óptica adecuado en función a los parámetros operativos para la detección de fugas a través de comparación de diferentes tipos existentes en el mercado a través de rendimiento, escogiendo al sensor de rejilla de fibra óptica qué es el más utilizado a nivel internacional.

- Se ha representado gráficamente el funcionamiento del equipo a través de la relación existente entre la velocidad de flujo y la velocidad de fuga que detecte este sistema propuesto.

- Se desarrolló un plano P&ID en Visio de la instalación de estos sensores de detección de fuga en el gasoducto.

- Se estimó los costos de la implementación propuesta, obteniendo una relación de costo beneficio bastante alta y positiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.F Lee, P. a. (2009). A selective literature review of transientbased leak detection methods. Colombo,: B.W.

De Silva, H. M. (2005). Leak detection in petroleum pipelines using a fuzzy system.

Jiao, J. H. (A new technique for modal acoustic emission pipeline leak location with one sensor). A new technique for modal acoustic emission pipeline leak location with one sensor. Insight 46.

Lee, P. V. (2003). J.A. Discussion to "Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation. Journal of Hydraulic Research 41.

Liggertt J.A. and Chea L.C. (1994). Inverse transient analysis in pipe network. Journal of Hydraulic Engineering 120.

Miller, R. P. (2018). A reference standard for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. NDT & E International 32.

Pollock, A. a.-Y. (1982). Leak detection using acoustic emission. Journal of Acoustic Emission 7.

Sampieri, R. H. (2014). *Metodología de la Investigación.* Mexico D.F.: McGraw - Hill.

Yang, Z. X. (2010). A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis.

ANEXOS

Anexo 1: Plan de mantenimiento de ducto y sensores

DESCRIPCIÓN DEL ESTABLECIMIENTO	
Generalidades	El gasoducto conecta las estaciones de yacuiba y Santa Cruz para la distribución de gas natural en el mercado.
Infraestructura	Se cuenta con dos estaciones de compresión y control en los cuales existen equipos de seguridad
	Cuenta con 8 extintores
	Cuenta con señalizaciones en lugares estratégicamente ubicados.
	Cuenta con dos botiquines de primeros auxilios ubicado a la vista. (botiquín 1, ubicado dentro de Almacén y Botiquín 2, ubicado dentro de carro taller)
	Cuenta con instalación de mantenimiento
	Cuenta con equipo de mantenimiento, donde se realiza actividades de pintado, soldado, etc.
	Cuenta con monitoreo computarizado.
COORDINADOR DE LAS OPERACIONES DE EMERGENCIA	
Función	El Coordinador de las operaciones de emergencia estará a cargo del Supervisor de SST y junto a ello el CSST, quien articulará de manera inmediata, los mecanismos de cómo hacer frente a desastres de producido por fuga de gas

PROCEDIMIENTO EN CASO DE FUGA DE GAS	
Procedimientos preventivo y de control	Se coordinará directamente con los responsables de las áreas de Mantenimiento.
	Se asegurará el cumplimiento de los procedimientos e instructivos establecidos previamente
	El personal operativo identificara correctamente la ubicación de los componentes del sistema de distribución de gas en las redes. El sistema estará representado gráficamente
	Se procederá a aislar o bloquear las válvulas de alimentación del sistema por donde pasa el gas
	De seguir existiendo fuga de gas se procederá a paralizar toda actividad realizadas en la red en el momentos de existir fuga de gas
	Se eliminará cualquier fuente potencial de ignición (por ejemplo fósforos, encendedores de cigarros, calentadores, etc.).
	Se apagará los sistemas de operación eléctrica en aquellos lugares donde exista la presencia de gas.
	Siempre verificar que las tuberías de conexión no se encuentren dañadas ni corroídas
Acciones primeras a responder	Evaluar la fuga con el modelo propuesto, cerrar válvulas
	Continuar con los procedimientos establecidos en el instructivo en caso de fuga de gas
	Comunicado inmediato al jefe a cargo de manera inmediata
	Realizar una búsqueda exhaustiva de verificación de no existir más fuga de gas
	Verificar las tuberías de gas que no se encuentren corroídas ni dañadas
	Dar aviso oportuno al supervisor y al personal cercano para el comienzo de la evacuación de la zona o edificio afectado.
	Informar al personal cercano que se ha producido una emergencia, procure no accionar interruptores, conectar artefactos eléctricos, encender ni apagar luces.

CONTROL DE FUEGO Y/O EXPLOSION POR GAS	
Antes de lo ocurrido	Personal debe contar con entrenamientos, simulacros preventivos
	Personal debe conocer todo procedimiento, instructivo de las actividades que se realizan
Durante la ocurrencia (acciones primeras a tomar)	De ocurrir alguna fuga de gas y no ser resuelta, todo personal debe evacuar de forma inmediata
	De existir presencia de fuego en la red, el técnico tendrá solo 1 minuto para accionar el extintor
	De haber tomado más tiempo del segundo ítem, el personal, consumidores y todos los que se encuentran cerca deben evacuar de manera inmediata, de forma que se deba alejar de todo, del centro de trabajo
	La evacuación se realizará de manera rápida, sin ocasionar disturbios
	Se deberá notificar al centro de bomberos más cercano de forma inmediata.
Después de la ocurrencia	El personal está totalmente prohibido a ingresar al área sin que esto haya sido notificado
	Las personas entrenadas, capacitadas deberán realizar una exhaustiva investigación de la zona, infraestructura,
	Se dará aviso a los colaboradores cuando el ambiente es sano para su ingreso
	Se deberá realizar una investigación de las causas que se originó para dicho evento

COMITÉ DE SEGURIDAD	
Funciones	Tener el control de las actividades operativa, administrativa y servicios de emergencia.
	Realizar las evaluaciones pertinentes de las acciones que ejecutan los encargados de equipos de lucha contra incendio, evacuación y primeros auxilios.
	Considerar las circunstancias e investigar las causas de todos los accidentes que ocurran en el establecimiento.
	Hacer recomendaciones apropiadas para que el técnico se encuentre preparado frente a diferentes circunstancias.
	Procurar la colaboración de todos los trabajadores, incluyendo el personal de servicio y personal de seguridad,
	Cuidar que las personas que se ocupan del local reciben instrucción e información adecuada sobre seguridad mediante los parlantes del establecimiento.
	Asegurar que todo el personal que labora en el establecimiento tenga pleno conocimiento de los reglamentos, instrucciones, Planes, y otros relacionados a la seguridad del local.
	Coordinar el apoyo externo en caso que el equipo y personal no pueda controlar la emergencia.

Fuente: Elaboración propia en base al proyecto propuesto, 2023

Anexo 2: Datos de simulación

P [Psi]	d = 0,001 m	d = 0,0015 m	d = 0,0030 m	d = 0,00065 m
0,01	0,922525507	0,922433283	0,922153076	0,922589718
500	45,23119726	37,17096539	26,36978541	55,44968362
1000	45,78463654	37,47630169	26,47813601	56,4788857
1500	45,97368041	37,57976485	26,51455077	56,83490183
V flujo (m/s)	d = 0,001 m	d = 0,0015 m	d = 0,0030 m	d = 0,00065 m
15,66481997	42,22525507	32,22433283	22,22153076	51,22589718
19,42437677	45,23119726	37,17096539	26,36978541	55,44968362
24,43711916	45,78463654	37,47630169	26,47813601	56,4788857
27,25678675	45,97368041	37,57976485	26,51455077	56,83490183

Fuente: Elaboración propia en base a datos calculados.