



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TÍTULO**

Diseño de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en  
el Poliducto Libertad Pascuales.

**AUTOR**

Reyes Indio George Jesús

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del grado académico en  
**MAGÍSTER EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN**

**TUTOR**

Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.

**Santa Elena, Ecuador**

**2024**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. ALICIA ANDRADE VERA, Mgtr.  
COORDINADORA DEL  
PROGRAMA**

---

**Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.  
TUTOR**

---

**Ing. Ricardo Cajo Díaz, Ph.D.  
DOCENTE ESPECIALISTA**

---

**Ing. Jessica Marcatoma Tixi, Msc.  
DOCENTE ESPECIALISTA**

---

**Abg. María Rivera, MSc.  
SECRETARIA GENERAL UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por George Jesús Reyes Indio como requerimiento para la obtención del título de Magister en Electrónica y Automatización.

**TUTOR**

---

**Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.**

Santa Elena, 3 de junio del 2024



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, GEORGE JESÚS REYES INDIO**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación, “Diseño de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en el Poliducto Libertad Pascuales”, previo a la obtención del título en Magister en Electrónica y Automatización, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 3 de junio del 2024

**EL AUTOR**

---

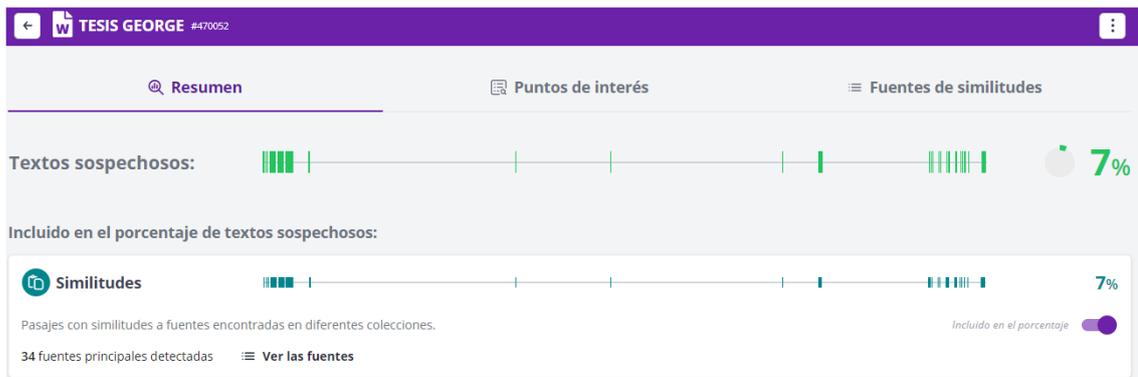
**George Jesús Reyes Indio**



**UPSE**  
**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA**  
**DE SANTA ELENA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**INSTITUTO DE POSTGRADO**

**CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO**

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado “Diseño de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en el poliducto Libertad Pascuales”, presentado por el estudiante, George Jesús Reyes Indio fue enviado al Sistema Anti-plagio COMPILATO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 7%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



**TUTOR**

---

**Ing. Francisco Novillo Parales, Ph.D.**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA  
DE SANTA ELENA  
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES  
INSTITUTO DE POSTGRADO**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **GEORGE JESÚS REYES INDIO**

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi trabajo de examen complejo con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este trabajo de examen complejo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 3 de junio del 2024

**EL AUTOR**

---

**George Jesús Reyes Indio**

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento va dirigido en primer lugar a Dios por permitirme llevar buen término este trabajo de investigación. Agradezco también a docentes y compañeros de la maestría, quienes me brindaron su conocimiento y apoyo durante el tiempo de mi formación académica.

Un agradecimiento especial a mi familia, por su amor incondicional, paciencia y constante ánimo. A mis padres, por inculcarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

*George Jesús, Reyes Indio*

## **DEDICATORIA**

A mis progenitores, Jesús y Alina por su amor absoluto, su apoyo inquebrantable y por enseñarme que esta vida todo se logra con esfuerzo y mucha dedicación.

A mi hermana, Jenny por estar ahí incondicionalmente cuando más he necesitado de su valiosa y desinteresada ayuda. Gracias por creer en mí y por estar siempre a mi lado.

Y finalmente, a mis hijos Gadiel y Krystel, quienes son mi motor y mi fuente de inspiración. Ellos hacen que cada esfuerzo y logro alcanzado tenga un significado especial.

*George Jesús, Reyes Indio*

## ÍNDICE GENERAL

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD.....	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO .....	V
AUTORIZACIÓN .....	VI
AGRADECIMIENTO .....	VII
DEDICATORIA .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIII
RESUMEN .....	XVI
ABSTRACT.....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	2
OBJETIVOS .....	4
Objetivo General.....	4
Objetivos Específicos .....	4
CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
1.1.- Marco conceptual .....	5
1.1.1- Sistemas de detección y localización de fugas .....	5
1.1.2.- Métodos para la identificación y ubicación de fugas .....	6
1.1.2.1.- Identificación de filtraciones mediante ondas de presión negativa .....	6
1.1.2.2.-Detección de fugas basada en sensor de fibra .....	6
1.1.2.3.-Detección de fugas en tuberías basada en SWM (Support Vector Machine).....	6

1.1.2.4.- Sensores piezoeléctricos acústicos – eléctricos .....	6
1.1.2.5.- Transformada rápida de fourier .....	6
1.1.2.6 .- Análisis wavelet armónica.....	7
1.1.2.7.- Simulación dinámica de fluidos computacional CDF (Computational Dynamics Fluid).....	7
1.1.2.8.- Redes neuronales .....	7
1.1.3.- Controlador Lógico Programable (PLC) .....	7
1.1.4.- Industria 4.0.....	8
1.1.4.1.- Características de la industria 4.0.....	8
1.1.5.- Protocolos de comunicación industrial.....	9
1.2.- ANTECEDENTES .....	12
1.3.- Importancia de su implementación práctica. ....	14
<b>CAPÍTULO 2: METODOLOGIA DE DESARROLLO. ....</b>	<b>18</b>
2.1.- Método Planteado.....	18
2.1.1.- El método bajo análisis.....	18
2.1.2.- Desempeño del sistema en operación estable.....	19
2.1.3.- Desempeño del sistema al momento de una fuga.....	20
2.1.4.- Diferenciando una pérdida de fluido de otros eventos transitorios generados por la operación normal. ....	23
2.1.5.- Propuesta de un modelo para desarrollar un sistema de detección y diagnóstico fugas a partir de datos reales.....	24
2.1.5.1.- Vigilante del Diferencial de flujo .....	25
2.1.5.2.-Monitor de lotes.....	25
2.1.5.3.- Vigilante de Presiones. ....	25
2.1.5.4.- Clasificador de Falla.....	25

2.1.5.5.- Localizador de fuga .....	25
2.1.6.- Detección de fuga por Balance de Línea. ....	26
2.1.7.- Estimación de la localización de la fuga mediante el método de onda de presión negativa.....	29
2.1.8.- Comportamiento cuando se tiene dos registros lecturas de presión. ....	30
2.1.9.- Comportamiento cuando se tiene varios puntos de registro de presión. ....	31
2.2.- Planificación de implementación .....	33
2.2.1.- Factibilidad técnica.....	34
En conclusión, considerando el planteamiento del presente proyecto, se seleccionó la opción más favorable para alcanzar un rendimiento óptimo y se logró elegir el controlador programable necesario para su ejecución. ....	36
2.2.2.- Factibilidad Económica .....	36
2.3.- METODOLOGÍA.....	37
2.3.1.- Resultados esperados.....	38
2.4.- Descripción de la solución propuesta .....	38
2.4.1.- Descripción del proyecto .....	38
2.4.2.- Componentes Físicos.....	39
2.4.3.- Componentes Lógicos .....	42
2.4.4.- Diseño de la propuesta.....	44
2.4.4.1.- Diagrama de flujo del para el proceso .....	44
RESULTADOS .....	50
CONCLUSIONES .....	53
RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS.....	55
ANEXOS .....	59

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del Poliducto Libertad Pascuales. ....	13
Tabla 2 Características Motores Eléctricos.....	13
Tabla 3 Características bombas mecánicas.....	13
Tabla 4 Válvulas de seguridad.....	14
Tabla 5 Comportamiento de presiones y caudal en diferentes eventos .....	23
Tabla 6 Estimación de costos para los dispositivos .....	36
Tabla 7 Cálculo de los costos estimados para la implementación del sistema. ....	37
Tabla 8 Sensores y actuadores. ....	38
Tabla 9 Especificaciones PLC CONTROLLOGIX 5561 .....	40
Tabla 10 Datos de simulaciones realizadas mediante el método de onda de presión negativa.....	50

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los métodos de identificación de fugas en ductos.....	5
Figura 2 Presenta el diseño arquitectónico para la recolección de datos de IoT. ....	9
Figura 3 Transmisor de presión Rosemount 3051 y Caudalímetro serie 3051CF.....	11
Figura 4 Perfil geográfico del Poliducto Libertad Pascuales.....	12
Figura 5 Limpieza de canal ocasionado por perforaciones clandestinas .....	15
Figura 6 Reparación de tubería ocasionada por perforaciones clandestinas.....	16
Figura 7 Sistema de conducción mediante bombeo hidráulico .....	19
Figura 8 Gradiente hidráulico poliducto PLP. ....	20
Figura 9 Caudal al momento de una fuga 02/04/2024.....	20
Figura 10 Presión al momento de una fuga 02/04/2024. ....	21
Figura 11 Comportamiento de presiones ante una fuga .....	22
Figura 12 Secuencia lógica para detección de fugas .....	24
Figura 13 Comportamiento de variación de caudales de entrada/salida cuando ocurre una fuga .....	26
Figura 14 Generador de residuos .....	27
Figura 15 Presión al momento de una fuga 02/04/2024. ....	29
Figura 16 Localización de la fuga por el método de onda de presión negativa.....	30
Figura 17 Ejemplo del ducto con varios puntos de medición de presión. ....	32
Figura 18 Comunicación Ethernet .....	35
Figura 19 Contrologix.....	36
Figura 20 Controlador PLC contrologix 5561 .....	39
Figura 21 Sensor de Caudal y Presión Emerson 3051CF.....	40
Figura 23 Factory Talk View.....	42

Figura 24 Factory View Site Edition .....	43
Figura 25 RSLogix 5000.....	43
Figura 26 Lenguaje de programación KOP .....	44
Figura 27 Diagrama de flujo para la detección de fugas .....	45
Figura 28 Programación del PLC con LOGIX 5000 .....	46
Figura 29 Desarrollo del sistema en Factory Tal View .....	47
Figura 30 Configuración de usuarios.....	47
Figura 31 Monitoreo de presiones en Factory Tal View .....	48
Figura 32 Nota: Fuente autor.....	49
Figura 33 Diagrama de conexión de modulo 1756-IF8H analógico. ....	49
Figura 34 Precisión del modelo de onda de presión negativa.....	51

## INDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de bloques de funcionamiento de sensor de presión y caudalímetro .....	59
Anexo 2: Diagrama de instalación de sensores en campo. ....	60
Anexo 3: Planos dimensionales de sensor .....	61
Anexo 4: Componentes de módulo 1756-IF8H de entradas analógicas.....	62
Anexo 5: Entradas de voltaje y corriente del 1756-IF8H.....	63
Anexo 6: Configuración de módulos en la aplicación Logix Designer .....	64
Anexo 7: Configuración HART.....	65
Anexo 8: Ficha Configuración Módulos de entrada.....	66
Anexo 9: Diagrama de flujo de 1756-IF8H.....	67
Anexo 10: Esquemático de Telecomunicaciones a utilizarse (se utilizará la red disponible del Poliducto Monteverde – Chorrillo).....	68

## **RESUMEN**

Los oleoductos y poliductos son el medio de transporte de larga distancia más económicos y seguros que existen para transportar el petróleo y sus derivados. Esto deben cumplir con estrictos requisitos de seguridad, confiabilidad y eficiencia. Para lograrlo, es esencial utilizar sistemas que aseguren su objetivo.

En el 2023 las fugas ocasionadas por perforaciones clandestinas a nivel nacional según reportes de medios de comunicación en consultas realizadas a la estatal EPPETORECUADOR, ascienden a 89.7 millones de dólares.

Por lo que en esta investigación Se combinarán tecnologías de reconocimiento de fallas y modelado de procesos con métodos de balance de línea y análisis de ondas de presión negativa para determinar la ubicación y reconocer la filtración por perforación. Los procedimientos y algoritmos propuestos se validan en un poliducto real de 128 kilómetros de longitud, bombeando 46200 galones por hora.

La simulación del proceso emerge como un elemento esencial, abarcando la evaluación virtual del desempeño del sistema de detección de fugas en Poliductos. Se detallan las herramientas como software y hardware empleados para proyectar de forma gráfica y anticipada el funcionamiento del sistema, subrayando su relevancia en la identificación temprana de posibles fallos y la optimización del diseño previo a su aplicación práctica.

**Palabras claves:** Poliductos, fuga, ondas, balance.

## **ABSTRACT**

Oil pipelines and polyducts are the most economical and safe means of long-distance transportation that exist to transport oil and its derivatives. This must meet strict safety, reliability and efficiency requirements. To achieve this, it is essential to use systems that ensure your objective.

In 2023, leaks caused by clandestine drilling nationwide, according to media reports in consultations with the state-owned EPPETORECUADOR, amount to 89.7 million dollars.

So in this research fault recognition and process modeling technologies will be combined with line balance methods and negative pressure wave analysis to determine the location and recognize the drilling leak. The proposed procedures and algorithms are validated in a real pipeline 128 kilometers long, pumping 46,200 gallons per hour.

The simulation of the process emerges as an essential element, covering the virtual evaluation of the performance of the leak detection system in Polyducts. The tools such as software and hardware used to project graphically and in advance the operation of the system are detailed, highlighting their relevance in the early identification of possible failures and the optimization of the design prior to its practical application.

**Keywords:** Polyduct, leak, wave, balance.

## **INTRODUCCIÓN**

La Gerencia de Transporte de la Empresa Pública de Hidrocarburos del Ecuador EP Petroecuador, se enfoca en optimizar el transporte del petróleo crudo y sus derivados mediante la red nacional de oleoductos y poliductos, garantizando eficiencia y seguridad en todas las operaciones. (Gabriela Morales Delgado, 2012)

El poliducto Libertad – Pascuales ubicado entre las provincias de Santa Elena y Guayas es un ducto con una extensión de aproximadamente 128 Kilómetros de longitud de tubería de 10 pulgadas de diámetro de acero al carbono, mediante la que se transportan productos limpios derivados del petróleo como gasolina y Diesel, está formado por una estación de bombeo ubicada en la provincia de Santa Elena, donde están instalados equipos de bombeo y una estación reductora localizada en la Provincia de Guayas, que facilita la recepción de productos refinados derivados del petróleo.

Las operaciones de bombeo alcanzan 1100 BBl/h, aproximadamente 26400 barriles por día, por lo que con este flujo abastece al 35% de la demanda combustibles de la provincia de Guayas. Sin embargo, la integridad y seguridad de este poliducto se ven amenazadas por las constantes fugas ocasionadas por perforaciones clandestinas, lo que resulta en pérdidas económicas considerables, además de impactos ambientales negativos.

En el 2023 las fugas ocasionadas por perforaciones clandestinas a nivel nacional según reportes de medios de comunicación a nivel nacional como Teleamazonas y Ecuavisa, en consultas realizadas a la estatal EP-PETROECUADOR, las pérdidas ascienden a 89.7 millones de dólares. Ante este contexto, esta investigación pretende diseñar un sistema de detección y localización de fugas que combine técnicas avanzadas de detección de fallas y modelación de procesos. El alcance de este trabajo abarca desde la identificación aproximada de las fugas hasta la implementación de medidas preventivas y correctivas eficaces.

El presente trabajo se centra en defender la viabilidad y eficacia de este sistema propuesto, el cual se fundamenta en el uso de algoritmos y métodos innovadores para la detección temprana y precisa de fugas en el Poliducto Libertad-Pascuales.

La relevancia de este trabajo se manifiesta en múltiples ámbitos. En el ámbito social, la reducción de las fugas contribuirá a minimizar los impactos ambientales y proteger la salud de las comunidades cercanas al poliducto. Desde una perspectiva profesional, el desarrollo de un sistema eficiente de detección de fugas mejorará la seguridad y la confiabilidad de la infraestructura petrolera del país. En el ámbito científico, este estudio aportará conocimientos y técnicas innovadoras en el campo de la detección de fugas en ductos, con posibles aplicaciones en otros contextos similares.

El documento abordará la necesidad de desarrollar un sistema de detección y localización de fugas, el cual se estructurará en dos partes. En la primera parte, se tratarán los conceptos básicos y los métodos que se utilizarán en el proyecto de investigación. En la segunda parte, se analizará la viabilidad y eficacia del sistema propuesto, fundamentado en algoritmos y métodos innovadores para la detección temprana y precisa de fugas en el Poliducto Libertad-Pascuales. Se investigarán técnicas como el balance de línea y la velocidad de onda de presión negativa, con el fin de localizar e identificar fugas de manera rápida y confiable mediante la instalación de una red de sensores e instrumentación necesaria. Como parte final del proyecto, se presentarán las conclusiones y recomendaciones derivadas de su desarrollo.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseño y simulación de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en el poliducto Libertad – Pascuales.

### **Objetivos Específicos**

- ✓ Simular el incremento de número de dispositivos de medición en puntos kilométricos estratégicos para el monitoreo de parámetros de operación en tiempo real.
- ✓ Determinar la localización aproximada de la fuga a lo largo del poliducto, lo que permitirá una respuesta rápida y eficiente por parte del personal de mantenimiento.
- ✓ Diseñar una interfaz gráfica que permita el monitoreo y la detección de fugas basado en el algoritmo de atenuación de la onda de presión negativa.

# CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

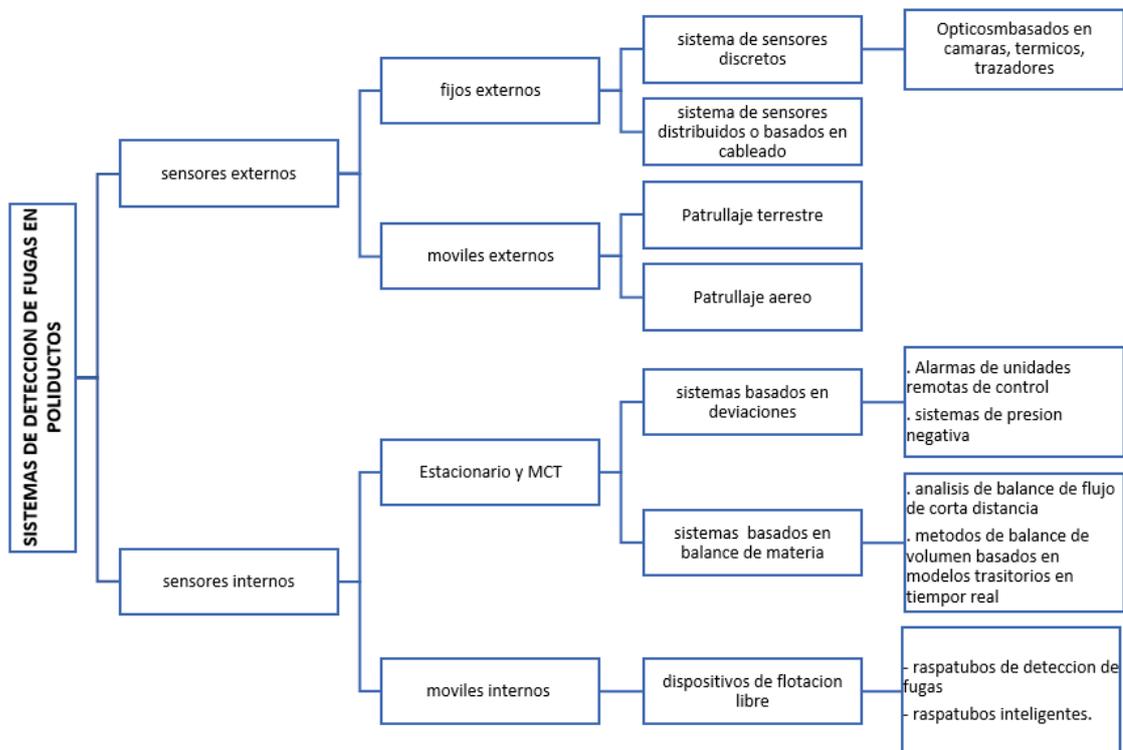
## 1.1.- Marco conceptual

### 1.1.1- Sistemas de detección y localización de fugas

Las compañías que gestionan poliductos utilizan múltiples métodos y tecnologías para identificar fugas, rupturas y derrames, los cuales pueden clasificarse en dos categorías: sistemas de detección internos y externos. Los sistemas externos dependen de equipos de campo o dispositivos situados fuera de la tubería, destinados a vigilar las alteraciones en las condiciones externas de esta. En contraste, los sistemas internos se enfocan en la medición de parámetros de proceso como presión, temperatura y flujo dentro del ducto. En la figura 1 se presenta un diagrama de la clasificación de los sistemas de detección de fugas. (Salas Camacho, 2022)

**Figura 1**

*Clasificación de los métodos de identificación de fugas en ductos.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor basado sistemas de detección de fugas(Salas Camacho, 2022)

### **1.1.2.- Métodos para la identificación y ubicación de fugas**

A continuación, se enumeran algunos de los métodos más relevantes utilizados para la identificación y localización de fugas en Poliductos:

#### **1.1.2.1.- Identificación de filtraciones mediante ondas de presión negativa**

Es ampliamente utilizado para la detección de fugas o fisuras en ductos de gran extensión, utilizando el principio de la velocidad de onda interna en la tubería, capaz de identificar fugas con una tasa de flujo baja.(Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.2.-Detección de fugas basada en sensor de fibra**

El método utiliza sensores de fibra óptica para detectar fallas, ofreciendo una alta sensibilidad y seguridad en la identificación y ubicación de fugas. Puede acoplarse junto a la tubería para adquirir datos en tiempo real. Una de sus principales desventajas es que se debe agregar un material insonorizante para evitar el ruido externo del ambiente al momento de recoger los datos. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.3.-Detección de fugas en tuberías basada en SWM (Support Vector Machine)**

El Support Vector Machine se puede utilizar eficazmente para identificar cualquier defecto o fuga en la tubería. Para este método, es imprescindible instalar sensores de fibra óptica a lo largo del ducto, para procesamiento de señales utiliza los principios de interferometría para identificar fugas. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.4.- Sensores piezoeléctricos acústicos – eléctricos**

Se colocan instrumentos piezoeléctricos en el ducto para detectar la dispersión de la onda sonora generada por una fuga. Este método ofrece mejores resultados en gasoductos que en poliductos, ya que una tubería que transporta gas mitiga en menor magnitud la onda sonora que una que transporta líquidos.

#### **1.1.2.5.- Transformada rápida de fourier**

La transformada rápida de Fourier (FFT) puede emplearse para la detección de fugas, pero presenta ciertas limitaciones. La FFT es aplicable a tuberías con pocas curvas, que no estén enterradas y que estén independientes del ruido del tráfico. Estas restricciones dificultan la detección y localización de fugas en gasoductos y poliductos, ya que la

mayoría de estas estructuras en la industria suelen estar enterradas y poseen curvaturas. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.6.- Análisis wavelet armónica**

La señal de presión provocada por una fisura o fuga en el ducto se fragmenta en cada nivel, mediante la transformada wavelet armónica, y los resultados se presentan en forma de un mapa de contorno frecuencia-tiempo o en un gráfico de frecuencia-tiempo. Este método es útil para la detección de pequeñas fugas en ductos de longitud amplia. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.7.- Simulación dinámica de fluidos computacional CDF (Computational Dynamics Fluid).**

Este método muestra resultados satisfactorios en las simulaciones; sin embargo, el tiempo de cómputo es uno de sus inconvenientes, y el pronóstico de fugas en una tubería es complicada. No es adecuado para ductos de gran longitud. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.2.8.- Redes neuronales**

El método emplea una arquitectura de redes neuronales junto con las lecturas de niveles de caudal y presión en la tubería para estimar el factor de fricción y determinar la ubicación de una fuga. Las arquitecturas incluyen redes bayesianas, perceptrones multicapa y redes neuronales convolucionales. (Salas Camacho, 2022)

#### **1.1.3.- Controlador Lógico Programable (PLC)**

Un autómata programable, también denominado en el ámbito de la automatización industrial por sus siglas PLC (Controlador Lógico Programable), es un ordenador compacto concebido para su uso en entornos industriales donde se requieren dispositivos resistentes que posibiliten el control de procesos automáticos. Está diseñado para recibir señales de entrada, procesarlas mediante el lenguaje de programación configurado en el sistema y generar las correspondientes señales de salida que gestionarán los actuadores conectados al controlador. (Borbor Guerrero, 2023)

El lenguaje de programación del autómata empleado en estos dispositivos será el responsable de determinar y gestionar las acciones llevadas a cabo por los equipos que se

encuentran conectados. El controlador dispone de diversos lenguajes de programación, entre los cuales hay tres que son los más comúnmente utilizados:

- ✓ Lenguaje Ladder:
- ✓ Lenguaje Booleano (Lista de instrucciones).
- ✓ Diagrama de funciones.(Borbor Guerrero, 2023)

#### **1.1.4.- Industria 4.0**

La llamada Industria 4.0 se refiere al modelo de organización y control de la cadena de valor del producto. Este término se utiliza de manera generalizada en Europa, donde también se emplean expresiones como "Fábrica inteligente" o "Internet industrial". Estas denominaciones comparten el reconocimiento de los procesos de transformación digital, generando avances en tecnologías de la información y, en particular, en la información y el software.(Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)

Los ejemplos de adopción de la Industria 4.0 pueden ser aplicados por empresas, sin importar su categoría y escala en la industria en la que operan. Para su aplicación, deben existir tecnologías sofisticadas de recoger y manejar grandes cantidades de información, permitiendo así la automatización y digitalización de los procesos empresariales.(Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)

##### **1.1.4.1.- Características de la industria 4.0**

- ✓ La integración vertical de sistemas de elaboración inteligente permite a las fábricas y plantas de manufactura reaccionar de manera rápida y adecuada a los cambios en su entorno. Es decir, ante un aumento en la demanda de productos específicos o ante imprevistos en la producción, la planta de manufactura será capaz de tomar decisiones óptimas para resolver estos y otros problemas que surjan.(Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)
- ✓ La integración horizontal a través de redes globales de cadenas de valor facilita la creación y el mantenimiento de las conexiones establecidas entre los comerciantes y clientes. (Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)
- ✓ La ingeniería a lo largo de toda la cadena de valor se refiere a que toda la cadena de valor será monitoreada desde su producción hasta su consumo.(Tigre Chitacpa & Zumba Arichávala, 2022)

### 1.1.5.- Protocolos de comunicación industrial

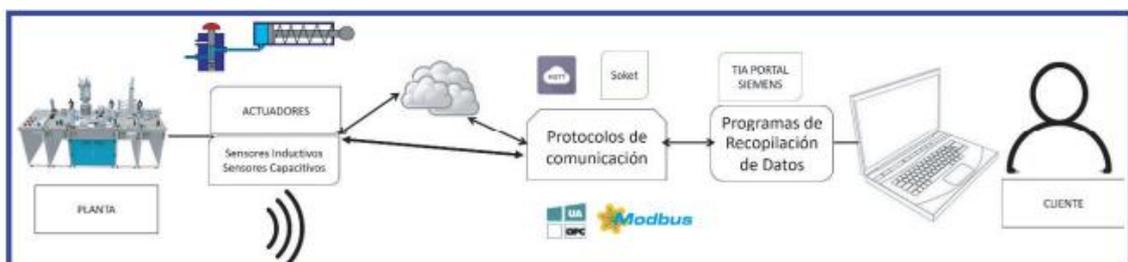
En el contexto de entornos industriales, la comunicación industrial es de suma importancia, ya que se considera una adición esencial para garantizar la eficiencia en las operaciones. Facilita en gran medida el monitoreo y control de los procesos realizados en un sistema, mejora la productividad, contribuye a la detección oportuna de posibles problemas, proporciona la capacidad de generar registros de datos para análisis, y simplifica la toma de decisiones en caso de surgir eventualidades previstas o imprevistas. (Borbor Guerrero, 2023)

#### Protocolo OPC

Es un conjunto de técnicas de comunicación con una arquitectura de cliente-servidor. Una aplicación funciona como servidor, proporcionando datos, y otra actúa como cliente, leyendo o manipulando esos datos. La arquitectura OPC es un protocolo de comunicación neutral respecto al proveedor, utilizado en aplicaciones de automatización en la industria. Se fundamenta en el modelo cliente-servidor y facilita una comunicación transparente desde los instrumentos hasta el sistema ERP. Este protocolo es independiente de la base tecnológica utilizada y dispone de procedimientos de seguridad integrados OPC UA, es versátil y completamente independiente, por lo que es considerado el protocolo de comunicación perfecto para la implementación de la Industria 4.0, como se ilustra en la Figura 2. (Cuero Granobles et al., 2021)

#### Figura 2

*Presenta el diseño arquitectónico para la recolección de datos de IoT.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor basado en la arquitectura para la recolección de datos IoT. Fuente: (Cuero Granobles et al., 2021)

## **Protocolo HART**

Es el estándar mundial para el intercambio de información digital mediante las señales de corriente analógica de 4-20 mA que conectan la mayoría de los instrumentos de campo con los sistemas de control distribuido. La tecnología HART proporciona una solución confiable y a largo plazo para los operadores de plantas que buscan aprovechar los beneficios de los dispositivos inteligentes con comunicación digital, al mismo tiempo que protegen las inversiones existentes en instrumentación analógica y cableado de planta. Más que un simple protocolo de comunicación, con la tecnología HART, las plantas procesadoras tienen acceso a una amplia gama de información digital sobre procesos, mantenimiento y diagnóstico, información que resulta valiosa en todas las etapas del ciclo de vida de la planta, desde el diseño y la instalación hasta la operación y, finalmente, el mantenimiento.(ERMERSON INDUSTRIES, 2024)

## **Transmisor de presión Rosemount 3051 y Cudalimento serie 3051CF**

Un transductor de presión es un aparato concebido para evaluar la presión de un fluido (sea líquido o gas) en un sistema. Emplea diversas tecnologías, como la piezoeléctrica, piezorresistiva o capacitiva, para detectar y transformar la presión en una señal eléctrica proporcional, generalmente en forma de voltaje o corriente, que puede ser interpretada por dispositivos de control o sistemas de supervisión.

Por otra parte, un medidor de flujo es un dispositivo que cuantifica la cantidad de flujo que transita por un área determinada en un sistema durante un intervalo de tiempo definido. Existen diversos tipos de medidores de flujo, como aquellos basados en el principio de medición de flujo volumétrico (por ejemplo, el flujo de un líquido en litros por minuto) o en el principio de medición de flujo másico (por ejemplo, el flujo de gas en kilogramos por hora). Estos dispositivos pueden emplear diferentes tecnologías de medición, como la medición de presión diferencial, el efecto Coriolis, la medición ultrasónica, entre otras.

Ambos instrumentos son esenciales en una diversidad de aplicaciones industriales, desde la supervisión de sistemas de tuberías y procesos de fabricación hasta el aseguramiento de la calidad en la producción de alimentos y bebidas.

Para el diseño del Rosemount 3051CF, se ejerce presión sobre los diafragmas aislantes. El aceite desplaza el diafragma central, lo que provoca un cambio en la capacitancia. Después, el convertor capacitivo-digital (C/D) transforma esta señal de capacitancia en una señal digital. Posteriormente, el microprocesador utiliza las señales de la termorresistencia y el convertor C/D para calcular la salida correcta del transmisor. Esta señal se envía luego al convertor digital-analógico (D/A), que convierte la señal en una forma analógica y la superpone a la señal HART en la salida de 4-20 mA, imagen del sensor se muestra en la Figura 3.(Emerson, 2023)

### Figura 3

*Transmisor de presión Rosemount 3051 y Caudalímetro serie 3051CF.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor sensores de presión y caudal EMERSON.  
<https://www.emerson.com/documents/automation/gu%EDa-de-inicio-r%E1pido-transmisor-de-presi%F3n-rosemount-3051-y-caudal%EDmetro-serie-3051cf-es-es-89250.pdf>

## 1.2.- ANTECEDENTES

La EP PETROECUADOR, es una entidad gubernamental ecuatoriana establecida el 26 de septiembre de 1989. Se encarga de la explotación de recursos hidrocarbúrficos tanto de manera directa a través de Petroecuador como mediante contratos de asociación con terceros. Su responsabilidad abarca la exploración y explotación de las canteras de petróleo en el territorio y las aguas Ecuatorianas. La sede actual de la empresa se ubica en la calle Alpallana E8-86 y la avenida 6 de diciembre de la ciudad de Quito.

El Poliducto Libertad – Pascuales, perteneciente a la División de Transporte de EP-Petroecuador, es el encargado del traslado de productos limpios derivados del petróleo desde la ciudad de La Libertad, ubicada en la provincia de Santa Elena, hasta Pascuales, situada en la provincia del Guayas. Esta infraestructura, en funcionamiento desde 1992 hasta la fecha, es una de las más importantes de Ecuador. El Poliducto tiene una extensión de 128 kilómetros y una capacidad de transporte de 26,400 barriles por día.

El Poliducto Libertad – Pascuales es considerado un activo crítico a nivel nacional, lo que subraya la importancia de mantener su infraestructura de transporte de manera integral, segura y eficiente. En La figura 4 se muestra el perfil geográfico del derecho de vía de este poliducto.

### Figura 4

*Perfil geográfico del Poliducto Libertad Pascuales.*



*Nota:* Imagen adaptada autor de derecho de vía del Poliducto Libertad – Pascuales de la EP-PETROECUADOR 2024.

## Características y especificaciones técnicas del Poliducto y Estación de bombeo

**Tabla 1**

*Características del Poliducto Libertad Pascuales.*

CARACTERÍSTICAS DE POLIDUCTO	
Año de construcción	1992
Longitud	128 KM
Diámetro	10 PULGADAS
Capacidad de diseño	42402 barriles
Recubrimiento tubería	Poliken
Espesor	0,219" / 0,250" (5,56 y 6,35 mm)

*Nota:* Fuente (EP-PETROECUADOR 2024)

**Tabla 2**

*Características Motores Eléctricos*

CARACTERÍSTICAS MOTORES ELÉCTRICOS	
MARCA	SIEMENS
SERIE	2105417-200
HP	800
AMP	95.1
RPM	3577
HERTZ	60
VOLTS	4160

*Nota:* Fuente (EP-PETROECUADOR 2024)

**Tabla 3**

*Características bombas mecánicas*

CARACTERÍSTICAS BOMBAS PRINCIPALES	
MARCA	GOULDS PUMPS (SENECA FALLS, N. Y.)
MODELO	3600
SIZE	4X6 – 11
CAPACIDAD	980 GPM
RPM	3560
MAXIMA PRESION DE TRABAJO EN LB/IN <sup>2</sup>	2100 PSI
HEAD FT	2659

*Nota:* Fuente (EP-PETROECUADOR 2024)

### **Ubicación referencial de las nuevas válvulas de bloqueo**

A lo largo del poliducto Libertad - Pascuales se han instalado siete casetas o canastillas en las cuales se encuentran válvulas de bloqueo (5) generalmente ubicadas junto a cuerpos de agua, tal como se muestra en el cuadro presentado a continuación:

**Tabla 4**

*Válvulas de seguridad*

NUMERO DE VÁLVULA	POLIDUCTO LIBERTAD – PASCUALES (KILOMETRAJE PK)
1	0+100 Estación Cabecera La Libertad
2	37+500 Rio el Azucar
3	73+750 Rio Chanduy
4	95+150 Rio Chongon
5	126+500 Terminal de Pascuales
6*	78+650 Caseta de Transrectificador
7*	78+700 Cerecita Monitoreo

*Nota:* Fuente (EP-PETROECUADOR 2024)

### **1.3.- Importancia de su implementación práctica.**

El robo de hidrocarburos a través de perforaciones clandestinas en las tuberías de transporte representa un grave problema para el Estado ecuatoriano y para la empresa estatal Petroecuador. Este acto ilícito ha ocasionado la pérdida significativa de 643,556.51 barriles de gasolina y diésel, con un impacto económico estimado en \$89.7 millones. Los principales poliductos afectados incluyen Esmeraldas - Santo Domingo, Santo Domingo - Pascuales, Libertad - Pascuales, Libertad - Manta y Pascuales - Cuenca. Estas perforaciones clandestinas no solo causan daños a la infraestructura petrolera, sino que también generan derrames de combustibles que afectan a zonas pobladas, así como a su flora y fauna. Además, ponen en riesgo la provisión de combustibles en las áreas donde se encuentran los tubos averiados.

A pesar de los esfuerzos de Petroecuador por reparar la infraestructura dañada y denunciar estos actos ante la fiscalía general del Estado y la Unidad Nacional de Investigación de Delitos Hidrocarburíferos de la Policía Nacional, el problema persiste. Se requiere una solución integral que no solo aborde la reparación de los daños, sino también la prevención y detección temprana de futuras perforaciones clandestinas.

Para abordar este problema de manera efectiva, es necesario implementar un sistema de detección de fugas avanzado que pueda identificar y alertar sobre perforaciones clandestinas en tiempo real. Este sistema debe integrar tecnologías de monitoreo remoto, como sensores de presión y temperatura. Además, se deben establecer medidas de seguridad adicionales, como patrullajes periódicos y la colaboración estrecha con las fuerzas del orden, para disuadir y capturar a los responsables de estos actos ilícitos.

### Figura 5

*Limpieza de canal ocasionado por perforaciones clandestinas*



**expreso**



Trabajadores de diversas entidades públicas realizan tareas de limpieza en el canal tras el derrame. @EPPETROECUADOR

*Nota:* Imagen adaptada por el autor, Fuente diario expreso 2023, <https://www.expreso.ec/guayaquil/preocupacion-afectacion-ambiental-derrame-combustible-canal-186970.html>

## Figura 6

### Reparación de tubería ocasionada por perforaciones clandestinas



*Nota:* Imagen adaptada por el autor, Fuente diario la hora 2023 <https://www.lahora.com.ec/pais/perforaciones-clandestina-perdidas-barriles-gasolina-diesel-2023/>

Se consideran las siguientes características del Poliducto:

- ✓ El Poliducto transporta gasolina, diésel.
- ✓ Tiene una longitud de cientos de 128 km.
- ✓ Cuenta con una estación de impulsión en el punto de origen para propulsar el fluido, y una estación reductora de presión en el destino que opera de forma manual para regular el flujo y la presión. Tienen medición de flujo, presión, densidad y temperatura en los extremos.
- ✓ Posee escasa instrumentación en puntos kilómetros estratégicos intermedios
- ✓ La variación de presión y caudal depende de los operativos realizados en la estación de bombeo

- ✓ Difícil acceso a derecho al de vía del poliducto
- ✓ Sistema de tubería subterráneos
- ✓

Imaginemos que se produce una fuga en algún punto del poliducto y se desea calcular la ubicación de esta, entonces se puede decir que:

- ✓ La magnitud es adecuada para detectar variaciones en el flujo y la presión.
- ✓ Permanece invariable durante períodos prolongados o puede durar lapsos tan breves como fracciones de horas.

Entonces

¿Cómo se puede estimar la localización de la fuga con una precisión confiable a partir de las lecturas de flujo y presión?

La respuesta a esta pregunta es sumamente importante, ya que la detección y ubicación temprana de fugas tienen un impacto considerable en las pérdidas económicas y medioambientales para la empresa, las cuales pueden ser considerables.

## **CAPÍTULO 2: METODOLOGIA DE DESARROLLO.**

### **2.1.- Método Planteado**

En este estudio partimos de la premisa de que el material a transportar es un líquido, que el sistema está en un estado estable previo a la fuga, y que los métodos para calcular la detección y localización de la fuga se implementarán durante el período transitorio posterior al evento.

La mayoría de los enfoques analíticos para la detección y localización de fallas requieren un modelo analítico detallado del proceso bajo supervisión. En principio, se consideran muchos parámetros como constantes, como el diámetro del poliducto, la consistencia del producto y la aspereza del ducto.

Todo esto influye en los modelos de pérdida en un tramo, lo que afecta al modelo propuesto. Estas circunstancias impulsan la búsqueda de alternativas mediante un enfoque estadístico que considere múltiples mediciones, lo que ayuda a mitigar el efecto de la variabilidad.

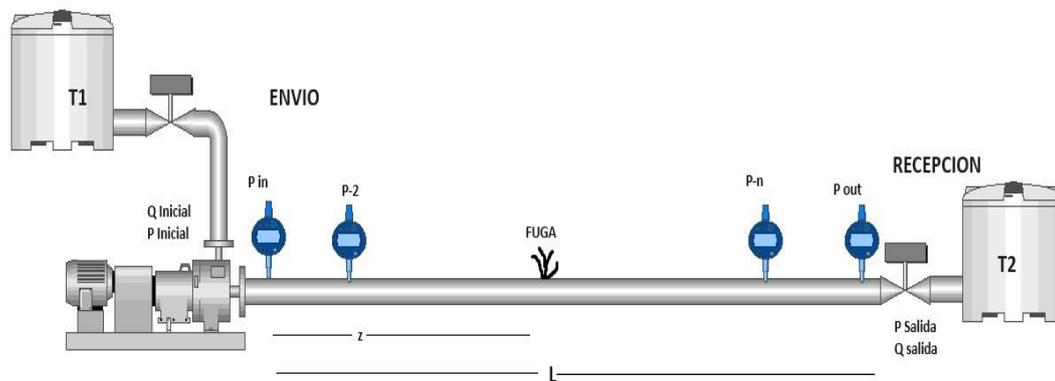
#### **2.1.1.- El método bajo análisis.**

Un Poliducto es una red de transporte hidráulico que emplea bombas para desplazar productos como Gasolina o Diesel desde un lugar geográfico hasta otro remoto, cubriendo amplias distancias (L) y alturas considerables, en un lapso de tiempo (T1 a T2). Para lograrlo, se utilizan dispositivos de bombeo que pueden generar elevadas presiones requeridas para superar las pérdidas y disparidades de altura entre el punto de partida y el de llegada.

Para su funcionamiento, generalmente se lleva a cabo la medición y supervisión de los caudales, presiones, densidad y temperatura del producto tanto en la entrada como en la salida del conducto. Además, en nuestra investigación, se presupone la existencia de transmisores de presión situados en puntos intermedios de la tubería, junto con sistemas de telecomunicaciones que permiten centralizar todas las mediciones en un solo servidor en el Poliducto Libertad - Pascuales, específicamente en la estación principal de La Libertad. Este servidor será utilizado para validar empíricamente lo desarrollado en este proyecto. El sistema desarrollado se muestra en la figura 7.

**Figura 7**

*Sistema de conducción mediante bombeo hidráulico*



*Nota:* Fuente autor.

### **2.1.2.- Desempeño del sistema en operación estable**

Cuando el sistema está en condiciones normales, se produce un incremento de la presión en la entrada del poliducto para facilitar el flujo del combustible. Este aumento de presión es esencial para vencer cualquier elevación que pueda existir en los puntos posteriores, así como para compensar las pérdidas causadas por la resistencia al flujo del combustible en el ducto. Si sumamos la presión manométrica en cada punto del poliducto con la elevación física del punto, obtendremos la curva conocida como el gradiente de presión, representada por la ecuación.

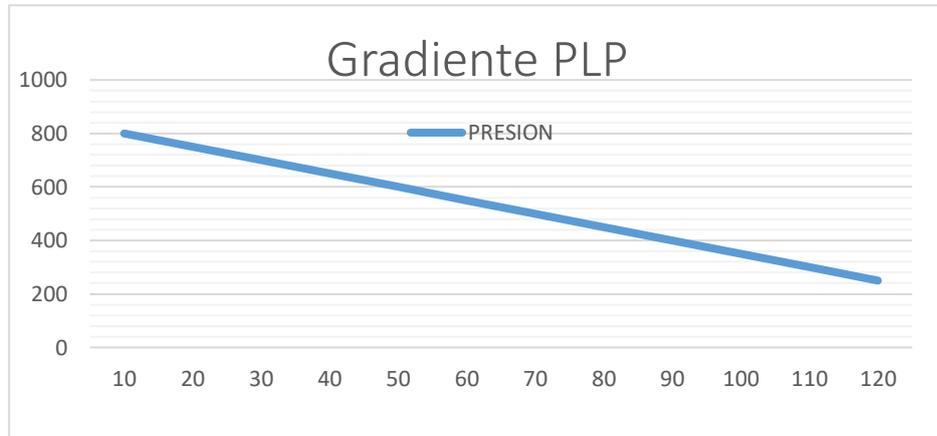
$$H_i = h_i + \frac{P_i}{\gamma} = h_i + \frac{P_i}{\rho \cdot g}$$

Donde  $P_i$  es la presión en el punto  $i$  y,  $\gamma$  es el peso específico del producto, y  $h_i$  la altura.

Al dibujar los puntos de carga del ducto, obtenemos la gradiente hidráulica que, cuando el sistema opera en estado estable, será una línea recta como se observa en la siguiente figura 8.

**Figura 8**

*Gradiente hidráulico poliducto PLP.*



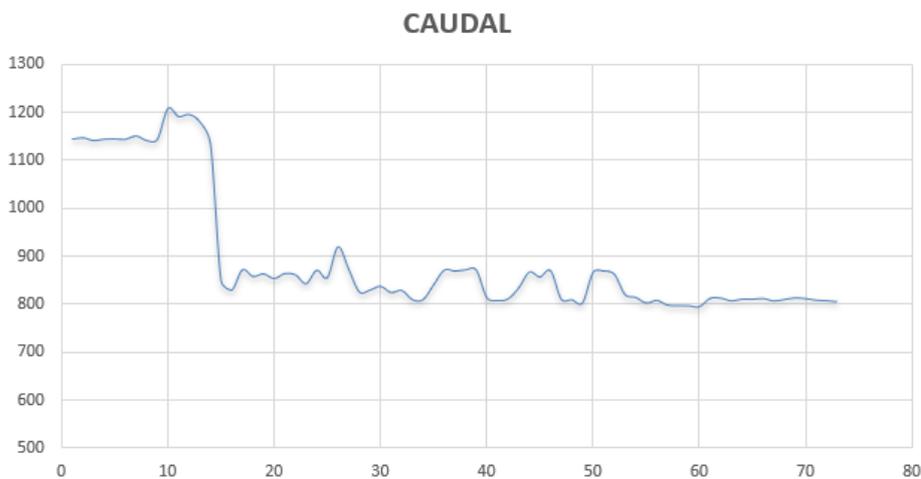
*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024

**2.1.3.- Desempeño del sistema al momento de una fuga.**

Una fuga o perforación clandestina realizada por la delincuencia organiza, altera el sistema hidráulico del poliducto, lo que a su vez modifica las lecturas de presión o flujo en los diversos puntos de medición del sistema con el tiempo. La figura 9 ilustra la evolución temporal de las lecturas de flujo y presión a lo largo de la tubería al momento de una fuga.

**Figura 9**

*Caudal al momento de una fuga 02/04/2024*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024

**Figura 10**

*Presión al momento de una fuga 02/04/2024.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024.

Por lo general, cuando se produce una fuga o una extracción ilegal de combustible, el caudal antes del punto de fuga aumenta, mientras que el caudal después del punto de fuga se reduce. En un ducto de longitud extensa, este efecto físico comienza de inmediato en la ubicación de fuga y se extiende gradualmente. Las variaciones en otros puntos del ducto se presentarán con un intervalo de tiempo  $\Delta t$ , que depende de la velocidad del flujo en el ducto y la distancia entre la ubicación de fuga y los extremos.

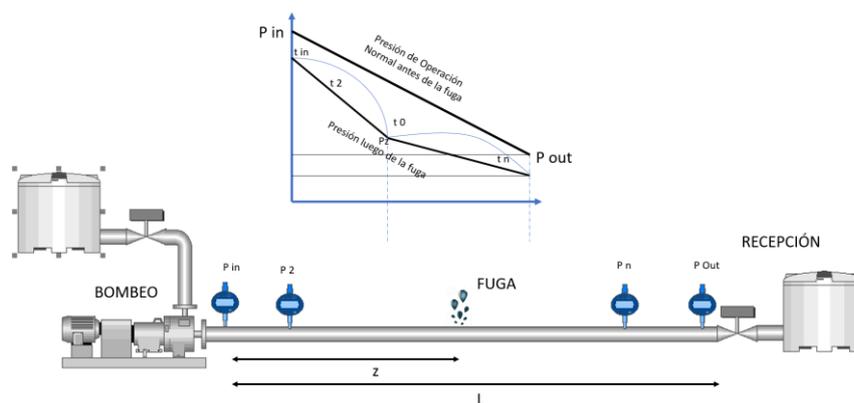
Con las presiones sucede algo equivalente: cuando el producto se escapa por la perforación o fisura, la presión en este punto intenta igualarse con la presión exterior (atmosférica), lo que provoca una caída considerable de presión en el punto de fuga que se propagará en ambas direcciones, formando lo que se conoce como la "***Onda de Presión Negativa***".

La variación de presión en otros puntos del ducto se presentará con un retardo temporal  $\Delta t$ , debido a la rapidez de transmisión de señal de presión y la longitud desde el lugar de la perforación o fuga hacia sus extremos. La rapidez de transmisión de la señal de presión

es similar a la del sonido en el medio y se relaciona con la compresibilidad del producto. Este retardo  $\Delta_t$  en la aparición de la variación de la señal de presión es importante y nos servirá después para poder determinar la ubicación de la fuga. En la figura 11 se muestra el comportamiento de presiones antes una fuga.

**Figura 11**

*Comportamiento de presiones ante una fuga*



*Nota:* Fuente autor.

Cuando la fuga es el resultado de un fallo, es lógico asumir que el flujo de escape permanezca constante, manteniendo así la estabilidad previamente mencionada. Sin embargo, cuando la fuga es de corta duración, como en el caso de perforaciones clandestinas, el flujo de escape solo ocurre durante un período limitado de tiempo (hasta que se llene el autotanke o recipientes usados para este fin) y se interrumpe, volviendo al estado de equilibrio original.

En el caso de una extracción ilegal de combustible de corta duración, puede ocurrir que las presiones no tengan el tiempo necesario para alcanzar un nuevo equilibrio antes de volver a su estado original. Sin embargo, como en el caso anterior, el cambio de presión comenzará de inmediato en el punto de fuga y se propagará hacia el resto del conducto a la velocidad del sonido en el medio.

#### 2.1.4.- Diferenciando una pérdida de fluido de otros eventos transitorios generados por la operación normal.

Durante la operación normal de bombeo de productos a lo largo del poliducto desde el punto de envío hasta el de recepción, se realizan varios cambios operativos, como: encendido y apagado de las unidades de bombeo, sustitución de una bomba por otra, ajustes variables de bombeo como flujo y presión, porcentaje de open/close de válvulas reductoras.

Estas situaciones operativas pueden ocasionar cambios repentinos en la presión y el flujo, los cuales podrían ser confundidos con una fuga. Por lo tanto, es crucial identificar el comportamiento de las variables del sistema que caracterizan una pérdida de fluido. La Tabla 5 muestra un resumen de los eventos y comportamientos típicos durante la operación del poliducto.

**Tabla 5**

*Comportamiento de presiones y caudal en diferentes eventos*

EVENTO	PRESIÓN EN CABECERA	CAUDAL EN CABECERA	PRESIÓN EN REDUCTORA	CAUDAL EN REDUCTORA
Fuga	Desciende	Incrementa	Desciende	Desciende
Arranque de grupo de bombeo	Incrementa	Incrementa	Incrementa	Incrementa
Para de grupo de bombeo	Desciende	Desciende	Desciende	Desciende
Apertura de válvula reguladora en cabecera	Desciende	Incrementa	Incrementa	Incrementa
Cierre válvula reguladora	Incrementa	Desciende	Desciende	Desciende
Apertura de válvula en reductora	Desciende	Incrementa	Desciende	Incrementa
Cierre de válvula en reductora	Incrementa	Desciende	Incrementa	Desciende

*Nota:* Fuente autor.

Para prevenir que una pérdida se mezcle con otros incidentes que causan cambios entre el flujo de entrada y el de salida, deben tener lugar los siguientes sucesos:

- a) Cuando ocurre una fuga, el flujo que se envía aumentará mientras que el flujo de recepción disminuirá, lo que provocará una disparidad en los flujos. Para prevenir la confusión de esta discrepancia con las variaciones habituales debido a errores de calibración, se debe activar una señal de alarma cuando la diferencia de flujos sobrepase un límite considerado dentro de rangos de operación.

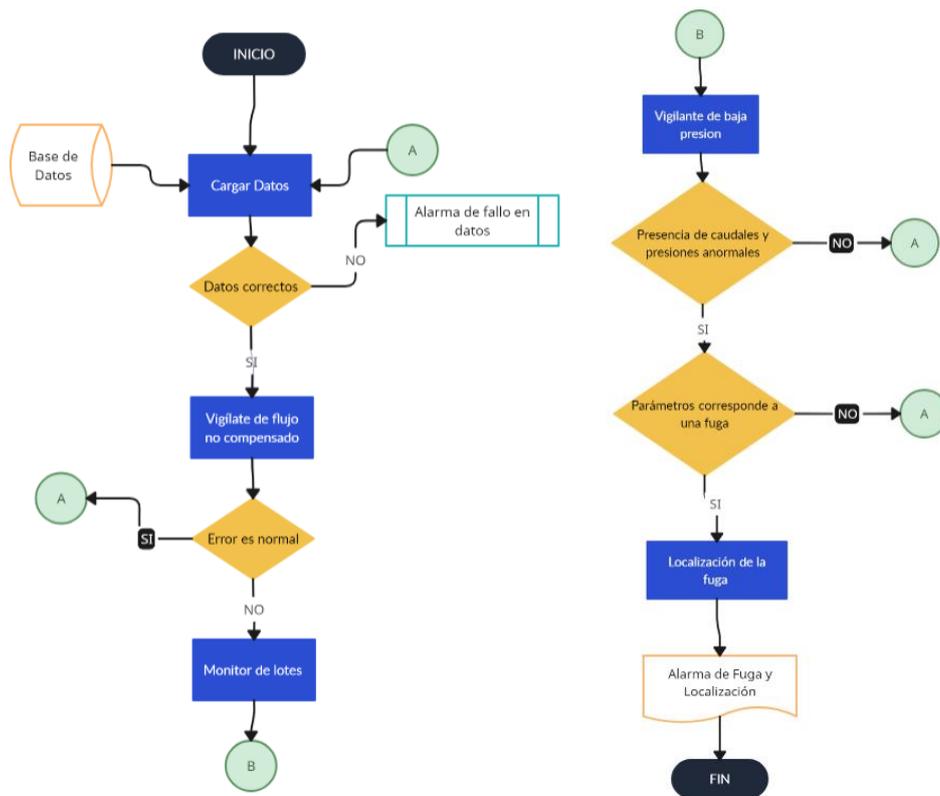
b) La presión decrece en la proximidad del escape y se propaga hacia los extremos de la tubería, perdiendo gradualmente fuerza a medida que se aleja. Si la fuga es pequeña y persistente, la presión alcanza un valor estable. Sin embargo, si la perturbación es significativa, es probable que los sistemas de control de bombeo en la fuente activen sus protecciones y detengan el flujo.

**2.1.5.- Propuesta de un modelo para desarrollar un sistema de detección y diagnóstico fugas a partir de datos reales.**

La confirmación de datos requiere asegurar que la lectura de los datos sea precisa y que estén dentro de los intervalos usuales del medidor. Si existen datos insuficientes, se realizará una interpolación con los datos previos para su filtrado. En situaciones de comunicaciones deficientes, donde se pueda perder cierta información, se debe filtrar esta pérdida.

**Figura 12**

*Secuencia lógica para detección de fugas*



*Nota:* Fuente autor.

#### **2.1.5.1.- Vigilante del Diferencial de flujo.**

Calcula la discrepancia o la desviación real del flujo entre la entrada y la salida del poliducto, teniendo en cuenta el retardo del sistema. En la práctica, siempre habrá una cierta variación normal debido a la precisión de los dispositivos, las fluctuaciones de temperatura y densidad del producto, así como el ruido en la señal. No se considerará que hay un fallo si la divergencia del flujo se encuentra dentro de los límites usuales. Sin embargo, si esta disparidad excede un valor preestablecido durante un periodo determinado, se generará una advertencia o señal de alarma.

#### **2.1.5.2.-Monitor de lotes.**

Se utilizarán modificaciones en las presiones para confirmar la existencia de una fuga. Sin embargo, dado que las presiones se ven afectadas por el producto transportado, es crucial determinar inicialmente la composición del producto y si es uniforme en todo el conducto o si existen cambios de lote. Por lo tanto, en esta fase se supervisa la ubicación de cada lote de producto, cuyo cálculo se fundamenta en los datos de densidad del producto bombeado, el caudal, el tiempo de bombeo y el volumen del conducto.

#### **2.1.5.3.- Vigilante de Presiones.**

Se contrastarán las presiones o cargas actuales con sus valores medios habituales sin fallos. Si estas son menores que un límite establecido y si su tendencia a la baja de presión persiste durante un lapso definido, al menos de 5 intervalos de muestreo, se activará una alerta por baja presión. Para evitar alarmas incorrectas debido a transitorios o errores de lectura, la disminución de la presión deberá manifestarse en dos o más puntos de observación.

#### **2.1.5.4.- Clasificador de Falla.**

Determina la veracidad de la fuga en función de si los cambios en el flujo y la presión coinciden con los patrones característicos de un evento de fuga, según el detalle de la Tabla5.

#### **2.1.5.5.- Localizador de fuga.**

Calculará de manera aproximada la localización de la fuga mediante el método de la velocidad de onda negativa de presión, que se transmite a los sensores más cercanos.

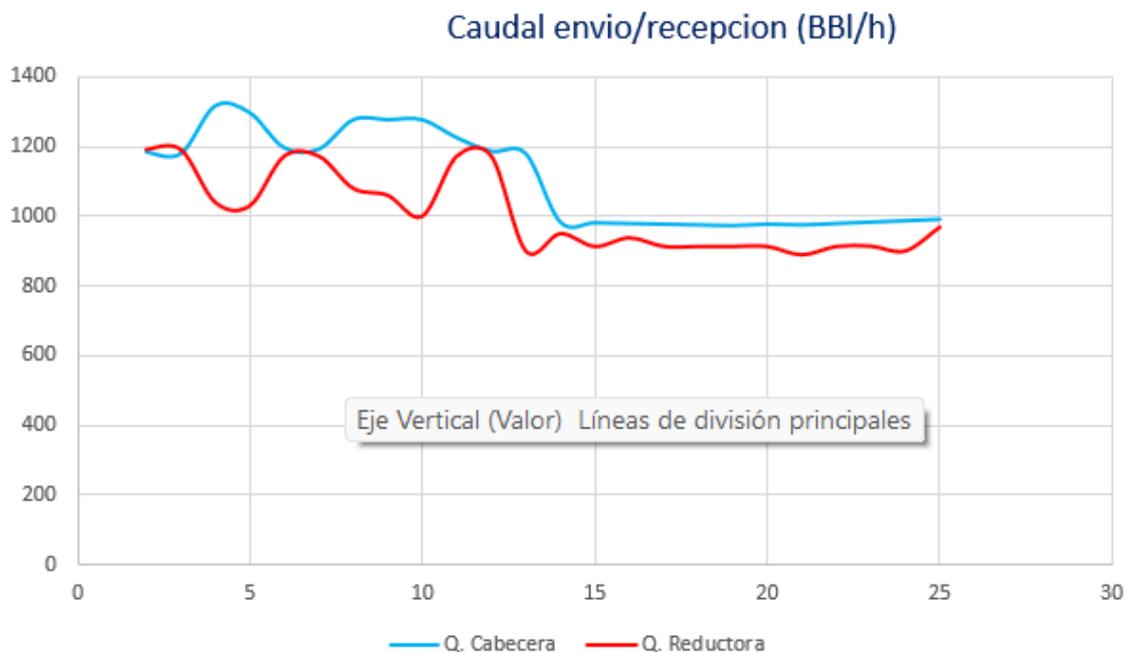
### 2.1.6.- Detección de fuga por Balance de Línea.

La parte fundamental de la conservación de masa nos explica que el caudal de entrada  $Q_{in}$  a un ducto es igual al de salida  $Q_{out}$  es decir que su diferencia es cero  $Q_{in} - Q_{out} = 0$ . Sin embargo, en la práctica en un poliducto de una longitud considerable es normal el tener una diferencia temporal de caudales como:

- ✓ Modificación del volumen del producto dentro del conducto debido a efectos de compresión y evaporación, lo que modifica la cantidad de masa almacenada en el poliducto.
- ✓ Cambio de densidad cuando se bombean lotes de diferentes productos
- ✓ Características de los medidores como exactitud, precisión y repetibilidad.
- ✓ Diferencia de densidad del producto por cambio de temperatura.
- ✓ Cambio en el volumen interior en el poliducto por variación de temperatura o deformaciones.
- ✓ Retraso en la propagación de los cambios de flujo a lo largo del poliducto.

**Figura 13**

*Comportamiento de variación de caudales de entrada/salida cuando ocurre una fuga*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024.

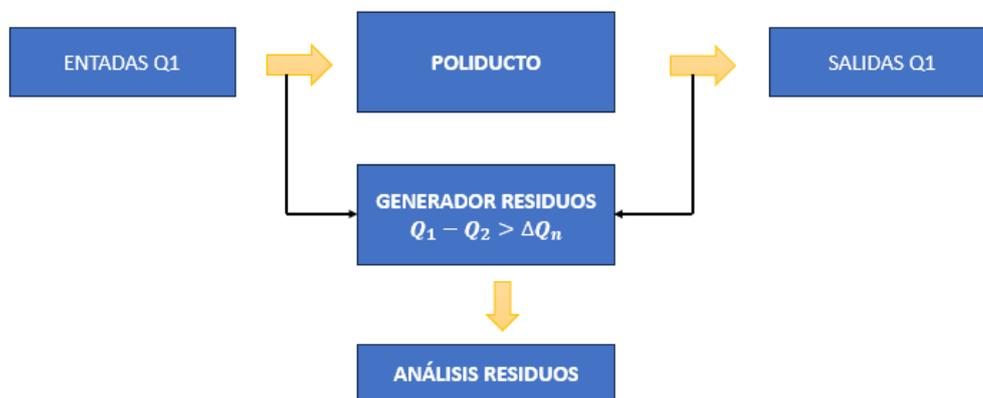
Para minimizar las discrepancias entre el flujo que entra y sale, se sugiere utilizar los mismos dispositivos de medición y, siempre que sea viable, medidores de flujo másico con corrección por temperatura y presión.

En la situación examinada, se implementa una rectificación de volumen basada en temperatura y densidad en condiciones normales (60°F). El margen de error de volumen originado por la compresibilidad del líquido generalmente es mínimo, por lo que su ajuste puede ignorarse. Respecto a la evaporación, esta se produce cuando la recepción registra un flujo superior al envío o cuando se detiene el envío y la recepción sigue recibiendo producto en sus tanques.

Para detectar el flujo de una eventual pérdida mediante el equilibrio de masas, es fundamental reconocer la disparidad inducida por una fuga, es decir, un flujo no compensado. Para conseguirlo, se requiere instaurar un dispositivo generador de residuos que recoja la información del flujo que entra y sale del proceso, y que efectúe las siguientes tareas:

#### Figura 14

##### *Generador de residuos*



*Nota:* Fuente autor.

Cuando hay una fuga, el flujo no compensado aumenta de manera rápida, mostrando un comportamiento similar al de una función de primer orden. Esta tendencia nos advierte sobre la presencia de una irregularidad. Dependiendo de cada sistema, se pueden establecer diferentes umbrales de advertencia para evitar falsas alarmas. En el caso

analizado, un aumento del 2 % en el flujo de envío es suficiente para generar una alerta. Se pueden definir varios niveles de alerta, adaptándolos según la sensibilidad y el ruido inherentes al sistema.

### **Vigilante de Presiones**

Una vez identificada la existencia de un flujo no compensado, se procede a recopilar datos del pasado inmediato para detectar las variaciones de presión.

Debido a que la señal de flujo demora en propagarse hasta los extremos de la tubería, el inicio de la fuga debe haber ocurrido algún tiempo antes de que se detecte el cambio de flujo en los extremos. Por lo tanto, se recomienda calcular el tiempo máximo en que transcurre desde el comienzo de la fuga hasta su detección en alguno de los extremos para asegurar una recopilación precisa de datos. En términos generales, el mayor retraso se produce cuando la falla se encuentra en la mitad del ducto. Por consiguiente, es necesario determinar el tiempo de propagación de la señal de flujo desde el centro del ducto hasta el extremo. Debido a que la velocidad de propagación del flujo varía de un ducto a otro, se sugiere utilizar esta velocidad basándose en el historial previo del mismo.

En el poliducto de estudio esta velocidad de propagación será estimada en aproximadamente de 690 m/s con una longitud de ducto de 128 kilómetros. El tiempo de propagación desde la mitad del ducto hasta el extremo será de 90 segundos.

Normalmente, en un sistema sin fugas, las presiones se mantienen estables, pero cuando ocurre una fuga, la presión cae abruptamente. Por lo tanto, en esta fase, para asegurarse de que existe una fuga real, se debe verificar si también disminuyen las presiones de los transmisores adyacentes.

Para determinar la disminución de presión, realizamos de manera similar a la anterior un cálculo de la variación de presión normal en estado estable para cada punto de medición de presión. Estos valores se pueden obtener del rendimiento anterior a la fuga.

$$P_{SS} = \sum_{i=m}^n \frac{P_m(i)}{n - m}$$

Un generador de residuos tomará como entradas las presiones de los sensores y detectará las variaciones de presión restando el valor en estado estable sin fugas en cada punto de medición.

$$\Delta P(i)_{\square} = P(i)_{\square} - P_{SS}(i)$$

Se fija un umbral  $\Delta P(i)_{min}$  igual a 2 veces mayor que el rango del ruido de los datos de la presión antes de la fuga es decir 2 veces la diferencia entre valor máximo y el mínimo de los datos desde m a n, dependiendo la particularidad de cada sistema este valor puede variar.

$$\Delta P(i)_{min} = 2[\max(P(m) \dots P(n)) - \min(P(m) \dots P_{SS}(n))]$$

Si  $\Delta P$  es mayor en valor absoluto que  $\Delta P$  por 5 periodos consecutivos se activa la alarma de baja presión del respectivo punto y si existe alarma de baja presión en dos puntos consecutivos se da alarma de baja presión del sistema.

### 2.1.7.- Estimación de la localización de la fuga mediante el método de onda de presión negativa.

Una vez detectada fuga, procedemos a realizar su análisis para determinar su ubicación. Una forma de hacerlo utilizando el método de propagación de la onda negativa de presión. Cuando se produce una fuga, se origina una caída inmediata de la presión en el punto de escape, la cual se transmite hacia los extremos del ducto a una velocidad equivalente a la del sonido en el medio.

#### Figura 15

*Presión al momento de una fuga 02/04/2024.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024.

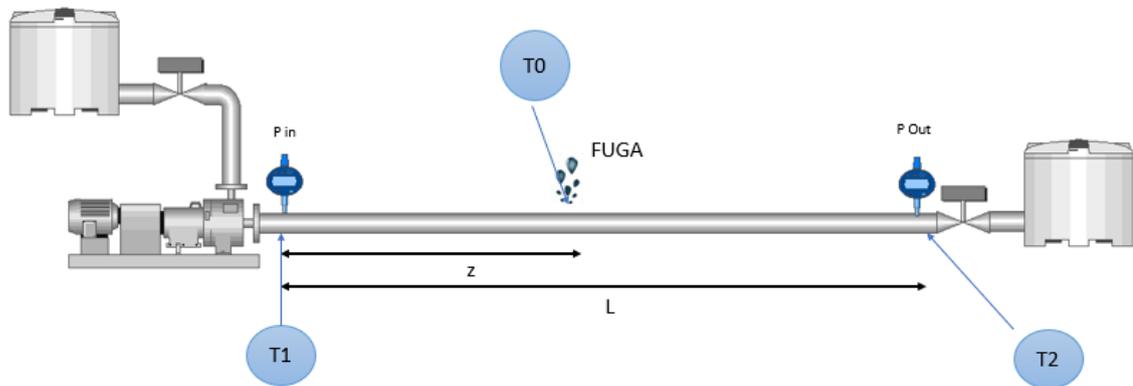
En líquidos combustibles esta velocidad va desde 1040 a 1480 m/s (en gasolina el valor es aproximadamente de 1180 m/s y en Diesel de 1250 m/s). Los tiempos de inicio de la caída de presión en diferentes puntos del medio se pueden usar para estimar la ubicación de la falla.

### 2.1.8.- Comportamiento cuando se tiene dos registros lecturas de presión.

Suponemos que solo se tienen dos sensores de presión el ducto y que la fuga ocurre en medio de ellos como se muestra en la figura 16.

**Figura 16**

*Localización de la fuga por el método de onda de presión negativa.*



*Nota:* Fuente autor.

Sea:

- ✓  $L$  la longitud total del ducto entre los sensores 1 y 2.
- ✓  $z$  la distancia del sensor 1 al punto de fuga.
- ✓  $t_0$  el tiempo de inicio de la fuga (desconocido),
- ✓  $t_1$  y  $t_2$  los tiempos de inicio del cambio de presión en los sensores 1 y 2
- ✓ los cuales pueden obtenerse de los registros de presión en los señores.
- ✓  $v$  la velocidad de propagación de la onda de presión (igual a la velocidad del sonido en el medio)

Partiendo del concepto de que la onda de baja presión viaja una distancia  $z$  en un tiempo  $(t_1 - t_0)$  a una velocidad  $v$ .

$$z = v \cdot (t_1 - t_0) \quad \text{y} \quad L - z = v \cdot (t_2 - t_0)$$

Despejando

$$\begin{aligned} z &= v \cdot t_1 - v \cdot t_0 \\ z - v \cdot t_1 &= -v \cdot t_0 \quad \text{y} \quad L - z = v \cdot t_2 - v \cdot t_0 \end{aligned}$$

Reemplazando

$$L - z = v \cdot t_2 + z - v \cdot t_1$$

$$z = \frac{L + v \cdot (t_1 - t_2)}{2}$$

Entonces, calculando los instantes de inicio del cambio de presión  $t_1$  y  $t_2$  en los dos medidores de presión se puede estimar la localización de la fuga a partir de la ecuación.

En el ducto del ejemplo el tiempo de muestreo es de 5 segundos. Si consideramos que la onda viaja a razón de 690 m/s, recorrerá 3.45 km durante un tiempo de muestreo. Una aproximación inexacta del punto de inicio de la fuga resultará en errores significativos en la determinación del punto de escape.

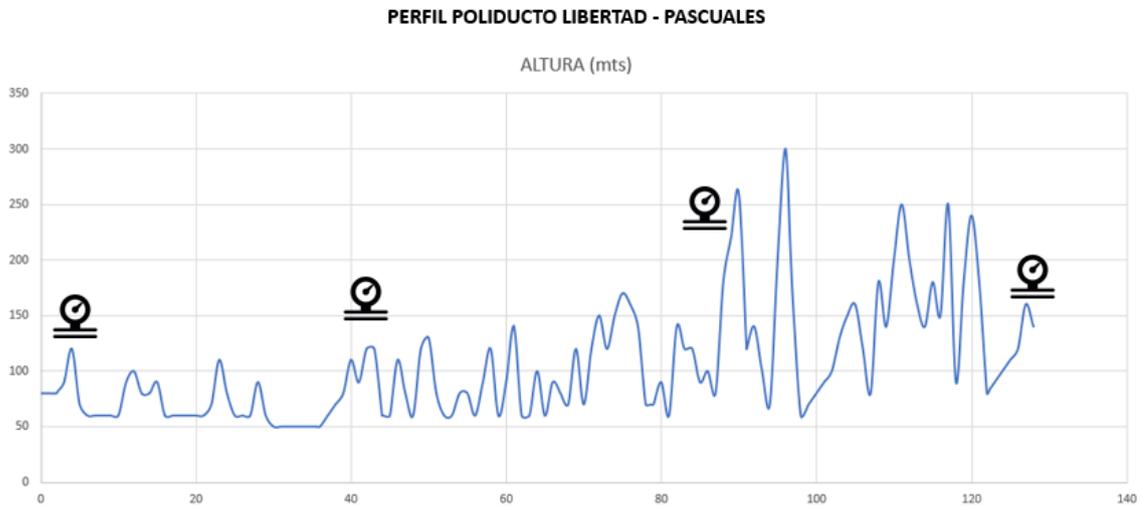
La exactitud se incrementaría si se contara con más puntos de medición a lo largo del conducto, dado que, por un lado, los medidores cercanos al sitio de la fuga mostrarían un cambio de presión más notable, facilitando una mejor estimación de los instantes de inicio de dicho cambio, y por otro lado, los errores de cálculo del punto de inicio de la fuga se compensarían entre los múltiples medidores.

### **2.1.9.- Comportamiento cuando se tiene varios puntos de registro de presión.**

Asúmanos que ahora el ducto cuenta con varios sensores de presión localizados a lo largo del poliducto como se indica en la figura 17.

**Figura 17**

*Ejemplo del ducto con varios puntos de medición de presión.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente EP PETORECUADOR 2024.

Sean:

- ✓  $d_i$  distancia del sensor  $i$  con respecto al inicio del ducto
- ✓  $z$  la distancia del punto de fuga con respecto al inicio del ducto.
- ✓  $v$  la velocidad de propagación de la onda de presión en el medio (igual a la
- ✓ velocidad del sonido en el medio)
- ✓  $T_i^m$  el tiempo medido u observado de inicio del cambio de presión en el medidor  $i$  dado que el tiempo de inicio de fuga no es conocido, el tiempo de todos los sensores se mide a partir de un punto de referencia arbitrario en el tiempo, común para todos los sensores de presión.
- ✓  $T_0$  el tiempo de inicio de la fuga (desconocido) con respecto a la misma referencia arbitraria usada para los sensores.
- ✓ Fije una primera estimación arbitraria  $T_0$  y  $z$ . Dado que la onda de presión viaja desde el punto de fuga a una velocidad  $v$ , el tiempo estimado  $T_i^E$  de inicio del cambio de presión en el sensor  $i$  sería:

$$T_i^E = T_0 + \frac{|d_i - z|}{v}$$

Entonces el error de predicción en el punto  $i$  sería

$$e_i = T_i^E - T_i^m$$

$$e_i = T_0 + \frac{|d_i - z|}{v} - T_i^m$$

$$e_i = + \frac{|d_i - z|}{v} - (T_i^m - T_0)$$

Sea SSE la suma de los cuadrados de los errores de todos los medidores que se obtendría con las estimaciones  $z$  y  $T_0$

$$SSE(z, T_0) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{|d_i - z|}{v} - (T_i^m - T_0) \right)^2$$

Por último, sean  $z^*$  y  $T_0^*$  los valores de  $z$  y  $T_0$  que minimizan la suma de los cuadrados de los errores. Estos valores serán la estimación de la ubicación del punto de fuga y del tiempo de inicio de la fuga bajo el criterio SSE.

## 2.2.- Planificación de implementación

Diseño y simulación de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en el Poliducto Libertad Pascuales conlleva un proceso de análisis y monitoreo en tiempo real, recolectando los datos de todos los instrumentos que estén enlazados a la red del sistema, para estos se debe considerar las normas:

✓ **API RP 1130** "Monitoreo computacional de tuberías para líquidos"

Esta práctica recomendada (RP) se centra en el diseño, implementación, prueba y operación de LDS que utilizan un enfoque algorítmico. El propósito de esta práctica recomendada es ayudar al operador del ducto a identificar problemas relevantes para la selección, implementación, prueba y operación de un LDS. Los LDS se clasifican en basados internamente y basados externamente. Los sistemas internos utilizan instrumentación de campo (por ejemplo, para flujo, presión y temperatura del fluido) para monitorear los parámetros internos de la tubería; estos parámetros de la tubería se utilizan posteriormente para inferir una fuga. Los sistemas externos utilizan sensores locales dedicados.

✓ **ISA 101**

Elaborada por la Sociedad Internacional de Automatización, ofrece una guía detallada para el desarrollo de interfaces..(Bohórquez et al., 2019)

✓ **ISO 9241-210:2019**

Se fundamenta en los principios de la ergonomía de la interacción humano-sistema, centrada en la creación de sistemas eficaces, seguros y fáciles de entender y manejar. (Borbor Guerrero, 2023)

✓ **IEC 62682**

Norma internacional que proporciona directrices para el diseño e implementación de sistemas de alarmas seguros en ambientes industriales automatizados.(Matiti et al., 2021)

### **2.2.1.- Factibilidad técnica**

El análisis de viabilidad técnica pretende abordar las proyecciones efectuadas para este proyecto, recopilando la información requerida para mejorar la eficacia en áreas específicas, donde se anticipa lograr niveles de excelencia más elevados.

En la industria del petróleo, existen diversos sistemas de detección de fugas, algunos de los cuales utilizan tecnologías modernas en ciertos procesos, mientras que otros aún dependen de tecnologías obsoletas que no cumplen con los estándares de rendimiento deseados.

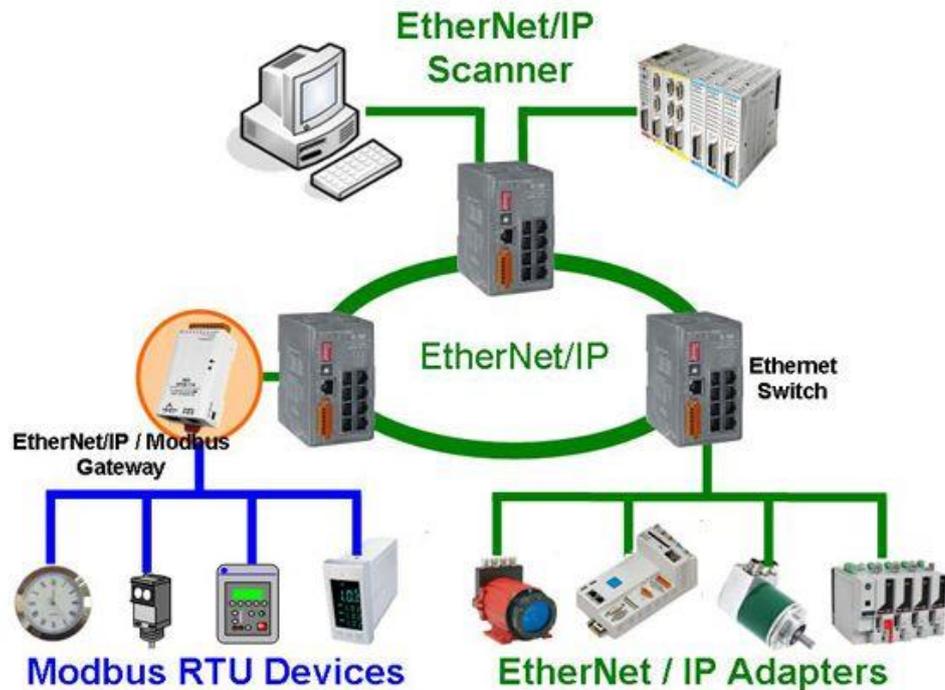
En el diseño de este proyecto, es crucial realizar un análisis detallado de equipos, normativas, medios y protocolos de comunicación para establecer la estructura de un sistema que permita monitorear la operación en tiempo real de un Poliducto, asegurando así un rendimiento satisfactorio.

Para la elaboración del sistema SCADA, se deben cumplir estrictamente las normativas de seguridad, aplicables a cada dispositivo utilizado en procesos automáticos industriales. Estas normativas se ponen a prueba en simulaciones de la interfaz junto con el controlador encargado de la operación global del sistema.

**Ethernet/IP:** Es un protocolo de comunicación fundamentado en Ethernet, ampliamente empleado en ámbitos industriales para la conexión de dispositivos de automatización y supervisión como se muestra en la figura 18.

**Figura 18**

*Comunicación Ethernet*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente

[https://www.icpdas.com/en/product/guide+Industrial\\_\\_Communication+Fieldbus\\_\\_Communication+EtherNet\\_IP](https://www.icpdas.com/en/product/guide+Industrial__Communication+Fieldbus__Communication+EtherNet_IP)

### **Controladores lógicos Programables**

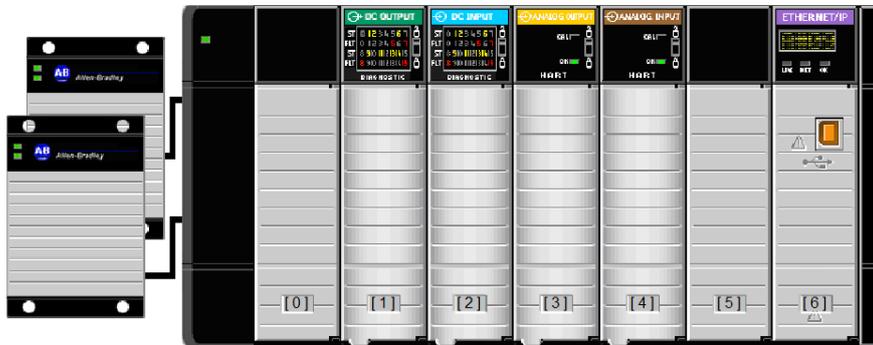
La plataforma Logix está relacionada con los dispositivos de control como PLC, dispositivos de corriente directa y corriente alterna entre otros. La arquitectura proporciona soluciones a las aplicaciones industriales, cuya finalidad es fabricar lotes de productos, a través de movimientos de maquinarias eléctricas, variadores de velocidad e incluso control de procesos industriales.

Los principales controladores asociados son:

- ControlLogix (aplicaciones requieren alto rendimiento).
- CompactLogix (control está asociada al nivel de máquina de la pirámide CIM)
- MicroLogix, (aplicaciones sean a pequeñas escalas y sencillas).

**Figura 19**

*Contrologix*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente Allen Bradley

**En conclusión, considerando el planteamiento del presente proyecto, se seleccionó la opción más favorable para alcanzar un rendimiento óptimo y se logró elegir el controlador programable necesario para su ejecución.**

**2.2.2.- Factibilidad Económica**

Se presenta el análisis de viabilidad económica, fundamentado en el estudio de costos asociados a los equipos considerados en el diseño del presente proyecto.

**Tabla 6**

*Estimación de costos para los dispositivos*

DISPOSITIVOS	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
CONTROLOGIX (1756-L61)	Controlador lógico programable	4	730,00	2.920,00
MODULO 1756-ENT2T/C	MODULO ETERNET	4	1.300,00	5.200,00
MODULO 1756-IF8H/A	HART MODULO ENTRADAS ANALOGICAS	4	1.100,00	1.100,00
RSLINK CLASIC	PAQUETE DE PROGRAMACION	1	6.757,00	6.757,00
RSLOGIX 5000	PROGRAMACION ALLEN BRANDLEY			
FACRTORY TALK VIEW				
HISTORIAN SERVER				
TRANSMISOR DE PRESIÓN	SENSOR	4	2.662,00	10.648,00
ROSEMOUNT 3051 (EMERSON)				

CUDALIMENTO SERIE 3051CF (EMERSON)	SENSOR	4	2.904,00	11.616,00
DETECTOR DE FUGAS DE GAS POR ULTRASONIDO INCUS DE ROSEMOUNT	SENSOR	4	2800,00	11.200,00
TOTAL, GENERAL				49.441,00

*Nota:* Fuente Autor

## **Tabla 7**

*Cálculo de los costos estimados para la implementación del sistema.*

DESCRIPCION	PRECIO	TOTAL
Diseño y programación	\$ 8.000,00	\$ 8.000,00
Instalación y pruebas de funcionamiento	\$ 10.000,00	\$ 10.000,00
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 18.000,00</b>

*Nota:* Fuente Autor

## **2.3.- METODOLOGÍA**

### **INVESTIGACIÓN APLICADA**

La investigación aplicada se centra en abordar un tema particular utilizando conocimientos adquiridos y recurriendo a la recopilación de información.

La exploración de fuentes bibliográficas relacionadas con el tema de detección de fugas originadas por perforaciones ilegales sirvió como fundamento investigativo para la elaboración de esta propuesta.

Con la información suficiente obtenida a través de la exploración realizada, podemos identificar los desafíos y potenciales soluciones para la instauración o concepción de un sistema automatizado.

De acuerdo con el diseño propuesto, se llevan a cabo las distintas fases del proyecto, que incluyen la programación, elaboración de la interfaz y la selección de los sensores más adecuados para el fin del proyecto.

## Procesamiento de la información obtenida.

- ✓ Recolección de datos usando técnicas de indagación bibliográfica.
- ✓ Elección de la información e instrumentos a manejar.
- ✓ Análisis de resultados conforme a ensayos ejecutados.

### 2.3.1.- Resultados esperados

El desarrollo de la investigación y la formulación de la propuesta evidencian un uso apropiado de las tecnologías, con el propósito de llevar a cabo el diseño y la simulación de un sistema de alerta temprana para la detección de fugas en el Poliducto Libertad-Pascuales. Esto facilitará la supervisión de los procesos al proporcionar información en tiempo real simulado sobre el estado de los sensores en ubicaciones estratégicas a lo largo del poliducto. De esta manera, se podrán tomar decisiones óptimas para reducir las pérdidas para el Estado Ecuatoriano.

## 2.4.- Descripción de la solución propuesta

### 2.4.1.- Descripción del proyecto

Para la elaboración del proyecto de un sistema de alerta temprana para localización de fugas en el Poliducto Libertad Pascuales, se tiene establecido la utilización de sensores, equipos de control, diseño de interfaz y monitoreo. Para simular detección de fugas ocasionadas por perforaciones clandestinas realizadas por la delincuencia organizada se realiza la instalación de una red de sensores a lo largo de poliducto en puntos estratégicos que mediante la aplicación del algoritmo de onda de presión negativo y balance de masa se podrá determinar si existe fuga y estimar su localización.

El diseño incluye la supervisión y monitoreo de un sistema SCADA el cual proporciona una interfaz gráfica simple y entendible, mostrando toda la información de los sensores instalados a lo largo de la tubería y condiciones de la operación.

### Tabla 8

*Sensores y actuadores.*

Cantidad	Descripción	Tipo
4	Sensor de presión	Comunicación hart 2 hilos
4	Caudalímetro	Comunicación hart
4	Sensor de gases	Comunicación hart

4	PLC	LOGIX5561
4	modulo ethernet	MODULO 1756-ENT2T/C
4	modulo analógico	MODULO 1756-IF8H/A HART ANALOG IN

*Nota:* Fuente Autor

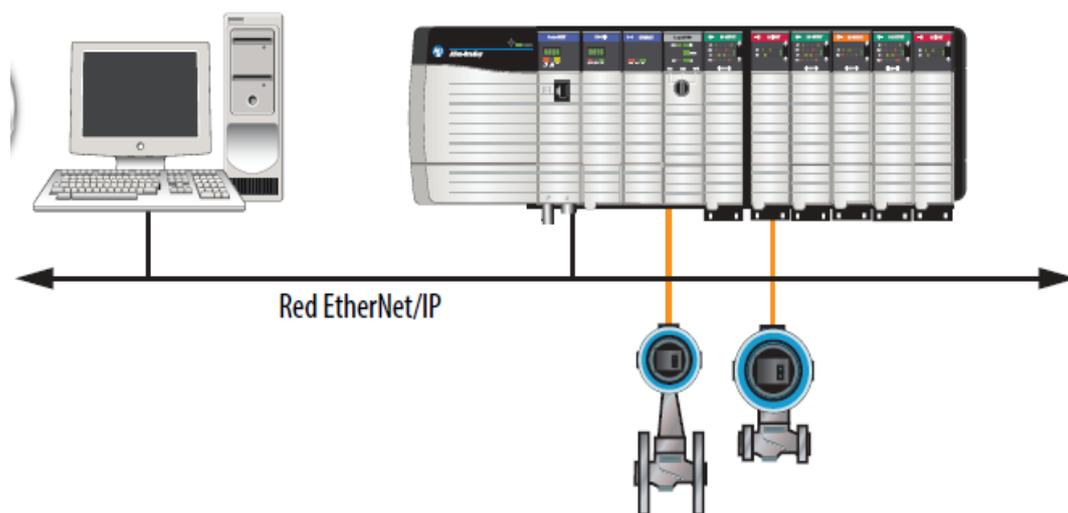
## 2.4.2.- Componentes Físicos

### Controlador PLC controllogix 5561

Los ControlLogix son reconocidos por su resistencia, versatilidad y potencia de cálculo, cualidades que los hacen idóneos para aplicaciones que demandan un control preciso y en tiempo real de procesos industriales de alta complejidad. Estos controladores proporcionan una extensa variedad de funciones de E/S (Entrada/Salida) digitales y analógicas, además de múltiples alternativas de comunicación para integrarse con otros dispositivos y sistemas en una red industrial. (Cueva Tumbaco, 2018)

### Figura 20

*Controlador PLC controllogix 5561*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente (Cueva Tumbaco, 2018)

**Tabla 9**

*Especificaciones PLC CONTROLLOGIX 5561*

DATOS TÉCNICOS	
Tipo de producto	CONTROLLOGIX 5561
Firmware versión	V 20
Voltaje de alimentación soportado	24 vdc
modulo analógico	MODULO 1756-IF8H/A HART ANALOG IN (8 CANALES)
modulo ethernet	MODULO 1756-ENT2T/C (1)

*Nota:* Fuente Autor

**Sensor de presión y caudalímetro**

Para el diseño del Rosemount 3051CF, se aplica presión a los diafragmas aislantes, el aceite desvía el diafragma central, el cual cambia la capacitancia. Luego, el convertidor C/D cambia esta señal de capacitancia a una señal digital. Luego, el microprocesador toma las señales de la termorresistencia y el convertidor C/D calcula la salida correcta del transmisor. Luego, esta señal es enviada al convertidor D/A, que convierte la señal a una señal analógica y se superpone a la señal HART en la salida de 4—20 mA.

**Figura 21**

*Sensor de Caudal y Presión Emerson 3051CF.*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente Emerson

## Sensor de gases

El sensor de fugas de gas por ultrasonido emplea sensores acústicos ultrasensibles para vigilar continuamente áreas extensas, detectando ultrasonidos producidos por la liberación de gas presionado en un ducto. Es especialmente adecuado para la supervisión en entornos al aire libre ventilados. Creado para resistir condiciones climáticas severas, como viento y variaciones en la dirección, estratificación o dilución del gas, el detector de fugas de gas por ultrasonido garantiza un rendimiento óptimo en todo momento.

### Características

- ✓ Respuesta inmediata a todas las fugas (gases tóxicos, combustibles o inertes)
- ✓ No se requiere calibración
- ✓ Los sensores de detección cuádruples proporcionan el rango de detección más amplio disponible en el mercado, que va desde 2 hasta 40 metros .
- ✓ Los sensores acústicos no contienen componentes móviles, lo que implica que no se desgastan, desalinean ni requieren reemplazo en condiciones normales de operación.
- ✓ Operan a temperaturas de -40 °C a 85 °C (-40 °F a 185 °F)
- ✓ Autocomprobación electrónica automática
- ✓ 4–20 mA de comunicación HART™

### Figura 22

*Sensor de gases Emerson*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente Emerson

### 2.4.3.- Componentes Lógicos

#### FactoryTalk

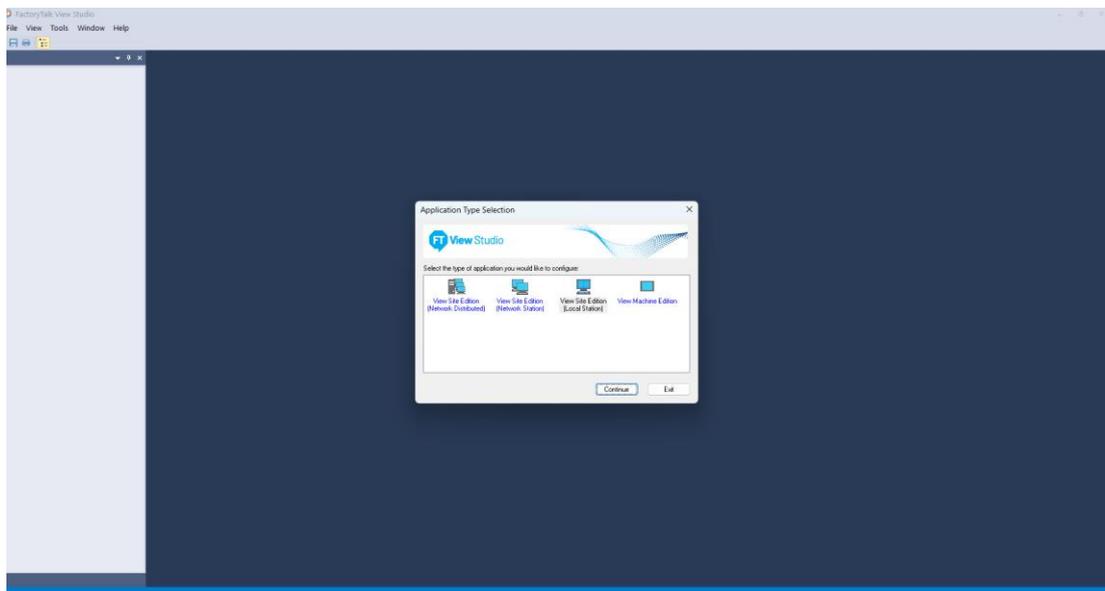
La plataforma FactoryTalk se ocupa de consultar, analizar y procesar los datos provenientes de dispositivos ubicados en los tres primeros niveles de la pirámide CIM, que incluyen controladores, variadores de velocidad, sensores y actuadores. Para facilitar la comunicación a través de EtherNet/IP™ entre los distintos equipos de la marca, como controladores y pantallas táctiles, con los programas de diseño, emplea FactoryTalk Linx como servidor de datos y servicios de comunicaciones.(Valaboju et al. 2023).

El principal software que está asociada a la plataforma es FactoryTalk View (FTV) Studio para la aplicación a realizar depende del uso de:

FTV Site Edition (SE), para el uso de servidores, registros y almacenamiento de datos, puede ser instalada en una sola computadora (Local Station), varias computadoras (Network Station) o con la opción de clasificar las áreas de la planta y además de realizar redundancia (Network Distributed). El servidor HMI es aquel que suministra la información de los componentes que conforman las pantallas de los SCADA(Valaboju et al. 2023).

#### Figura 23

##### *Factory Talk View*



*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente: Rockwell Automation.

## Figura 24

*Factory View Site Edition*



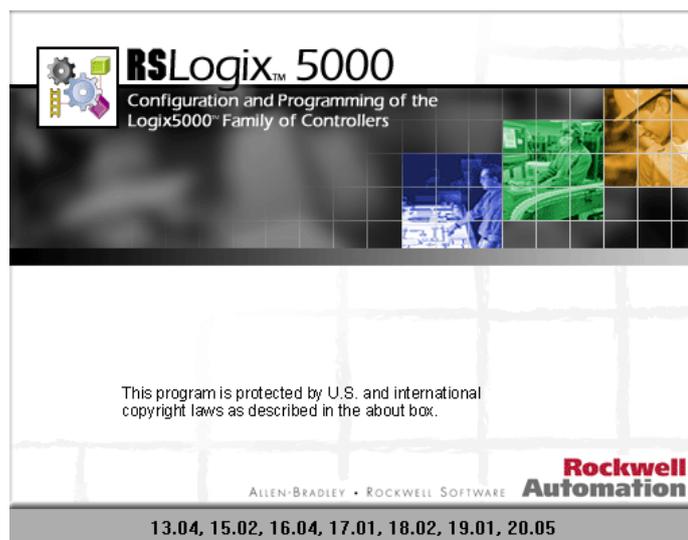
*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente: Rockwell Automation.

## RSLogix 5000

Diseñar aplicaciones exclusivamente para los ControlLogix y CompactLogix, a través de los diversos lenguajes de programación que posee tales como diagrama de escalera, diagrama de funciones secuenciales, text estructurado (Valaboju et al., 2023)

## Figura 25

*RSLogix 5000*



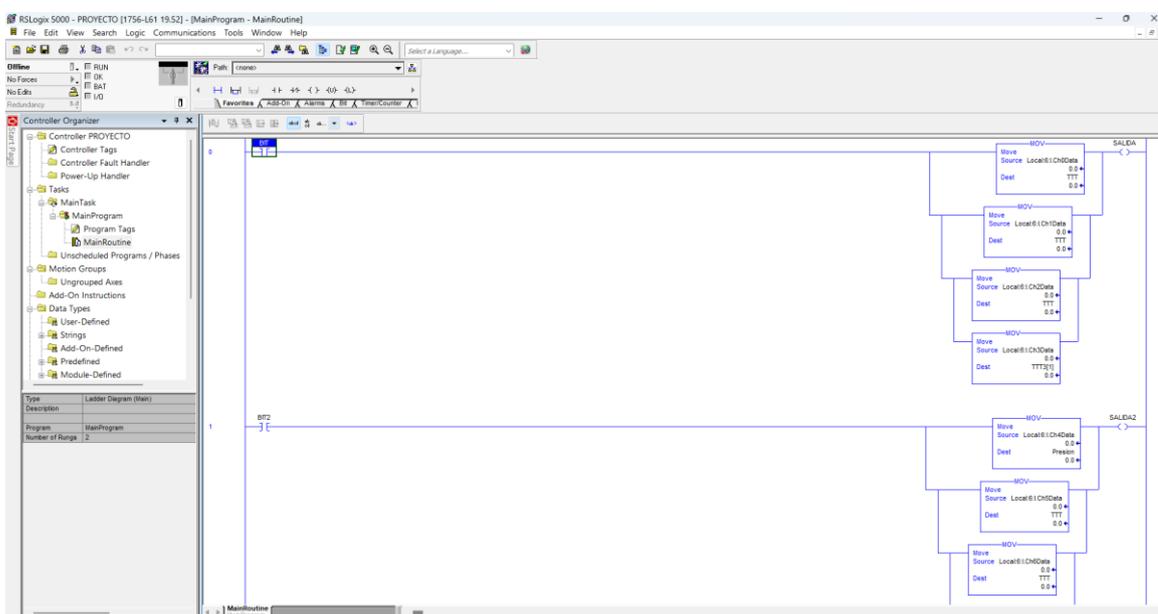
*Nota:* Imagen adaptada por el autor Fuente: Rockwell Automation.

## Lenguaje de programación KOP

El lenguaje KOP(KontaKtplan).- El lenguaje de escalera fue inicialmente concebido con una estructura similar al esquema eléctrico, donde los contactos y las bobinas se disponen en disposición horizontal y vertical, interconectándose entre sí. Asimismo, se emplean bloques de instrucciones que facilitan la programación de manera más simple.(Baldeón Casquete, 2021)

**Figura 26**

*Lenguaje de programación KOP*



*Nota:* Fuente autor.

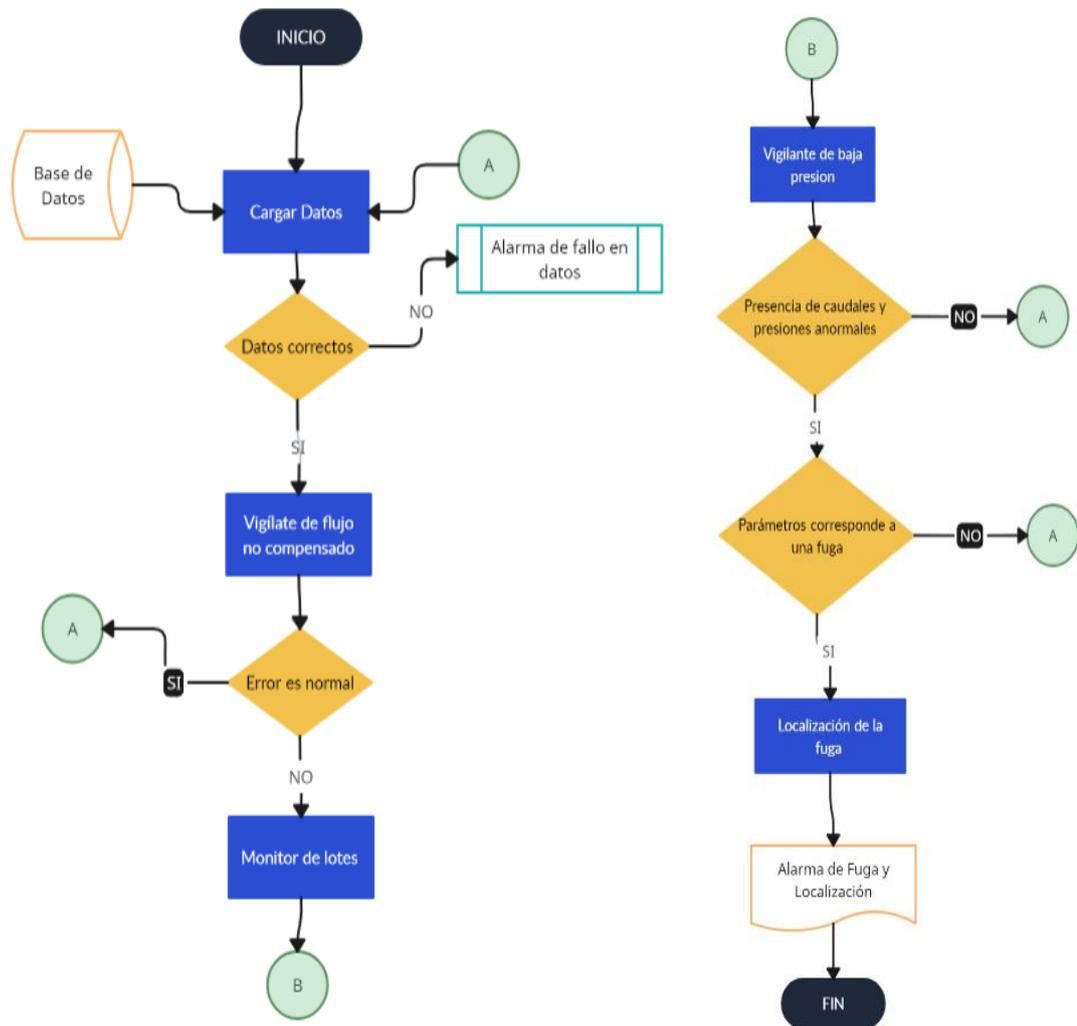
### 2.4.4.- Diseño de la propuesta

#### 2.4.4.1.- Diagrama de flujo del para el proceso.

A continuación, se muestra una representación visual de un proceso o algoritmo, mostrando las etapas o pasos del proceso y la secuencia en la que ocurren. Se utiliza ampliamente en la programación, la ingeniería, la gestión de proyectos y otros campos para ilustrar la lógica de un proceso de manera clara y comprensible.

**Figura 27**

*Diagrama de flujo para la detección de fugas*



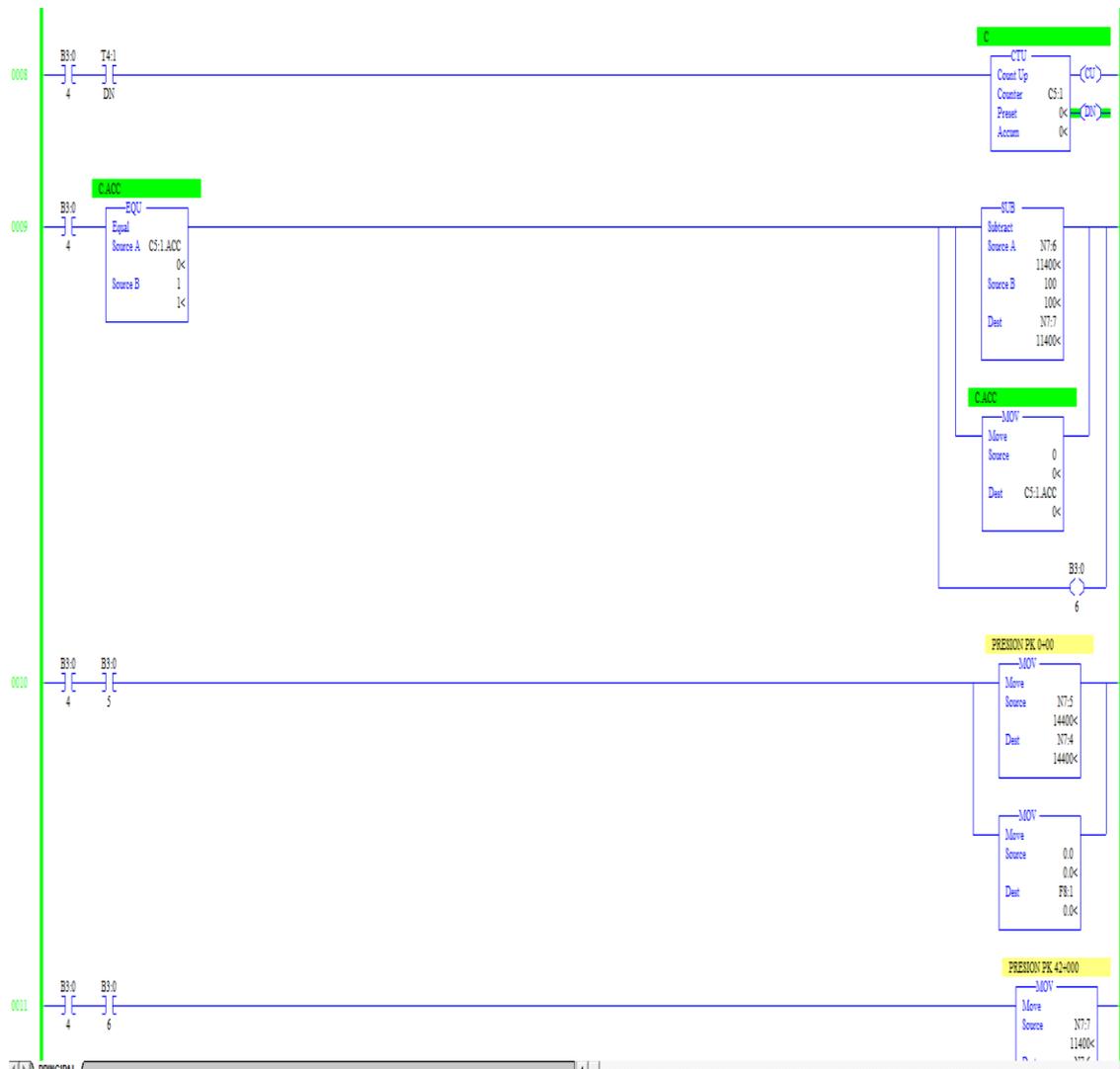
*Nota:* Fuente autor.

#### 2.4.4.2 .-Programación en el controlador PLC ControlLogix 5561

PLC ControlLogix 5561 se utilizaría para monitorear todas las etapas del proceso del sistema para nuestro caso simulando el testeo de información proporcionada por dispositivos instalados a lo largo del ducto, para esta programación se utilizó el lenguaje Ladder(KOP), con el software de programación Rslogix 5.000 en su versión de firmware 19.0

**Figura 28**

*Programación del PLC con LOGIX 5000*



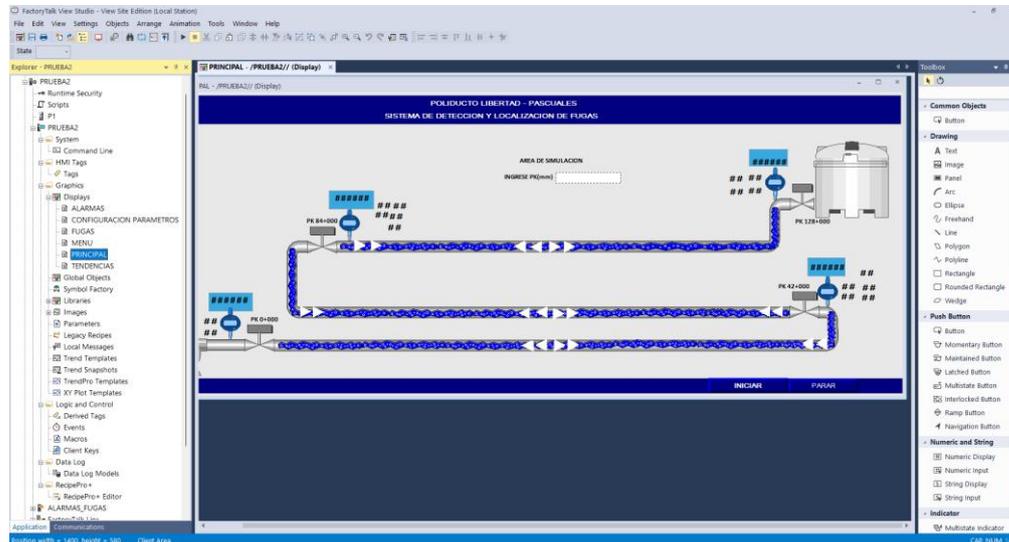
*Nota:* Fuente autor.

#### **2.4.4.3.- Diseño de Interfaz SCADA.**

En esta sección se describe en detalle el diseño de la interfaz que se creará para la empresa EPPETROECUADOR, que permitirá supervisar el proceso. El diseño está regulado por las normas ANSI/ISA-101.01-2015, ISO 9241 y EN 29241, las cuales establecen los lineamientos de diseño para lograr un desempeño efectivo en las tareas programadas por partes de los usuarios, con bosquejos que cumplan con los códigos de colores establecidos y sean de fácil comprensión para el operador de la industria petrolera Ecuatoriana.

**Figura 29**

*Desarrollo del sistema en Factory Tal View*



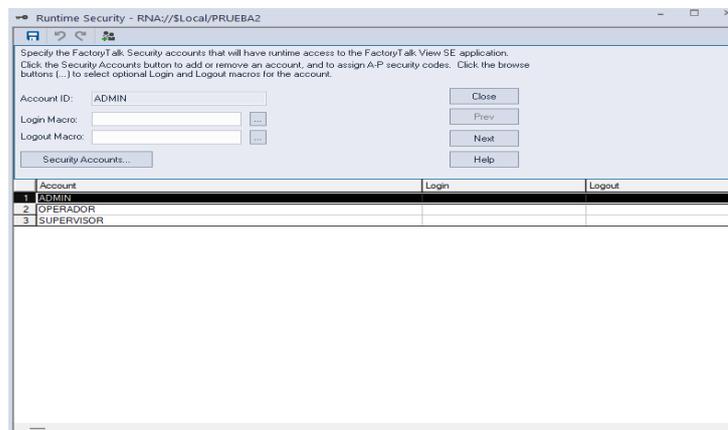
*Nota:* Fuente autor.

**2.4.4.4.-Creación de usuarios**

La gestión de usuarios y permisos en FactoryTalk View es crucial para mantener la seguridad y la integridad de tus sistemas de automatización. Es recomendable asignar roles y privilegios adecuados a cada usuario para garantizar que solo tengan acceso a las funciones y datos necesarios para realizar sus tareas asignadas.

**Figura 30**

*Configuración de usuarios*



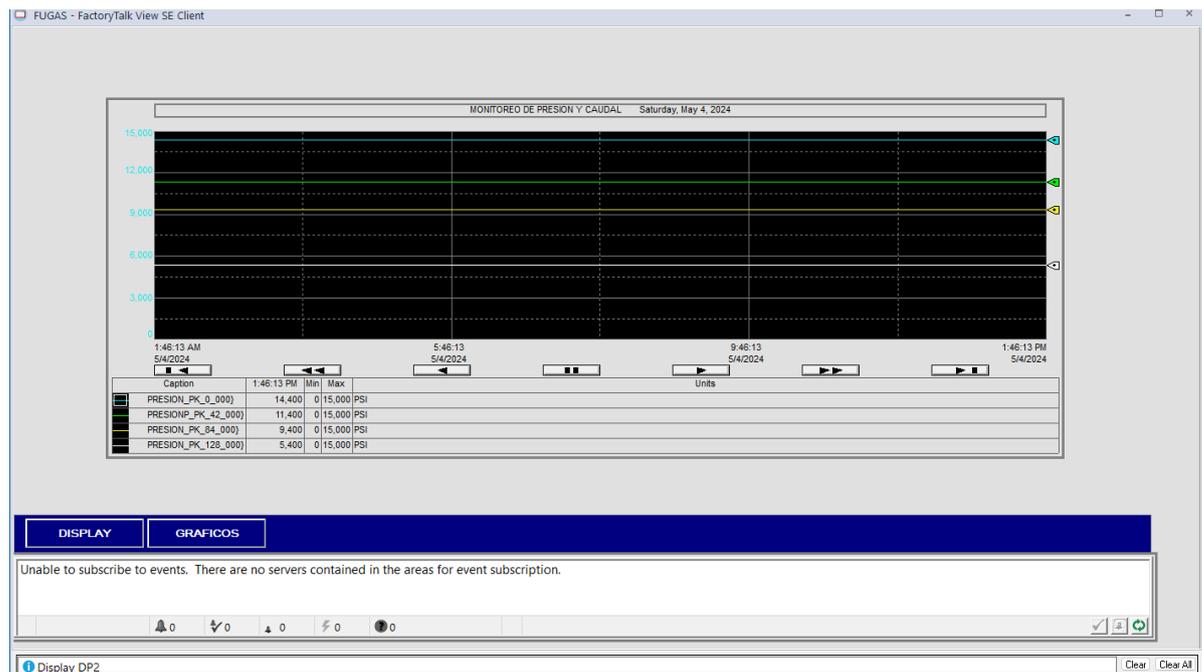
*Nota:* Fuente autor.

### 2.4.4.5.-Tendencias

Las tendencias en FactoryTalk View proporcionan una herramienta poderosa para monitorear y analizar el rendimiento del proceso, identificar problemas potenciales y optimizar la operación del sistema en tiempo real y a lo largo del tiempo.

**Figura 31**

*Monitoreo de presiones en Factory Tal View*



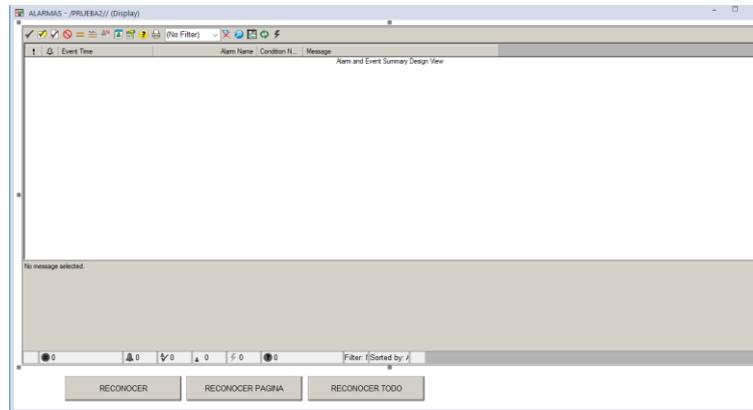
*Nota:* Fuente autor.

### 2.4.4.6.- Alarmas

Las alarmas son notificaciones que se generan cuando se produce una condición anormal o fuera de los límites predefinidos en el sistema. Estas alarmas pueden ser visuales, audibles o incluso pueden desencadenar acciones específicas, dependiendo de cómo se configuren. Aquí te explico cómo configurar y gestionar alarmas en FactoryTalk View:

**Figura 32**

*Nota: Fuente autor.*



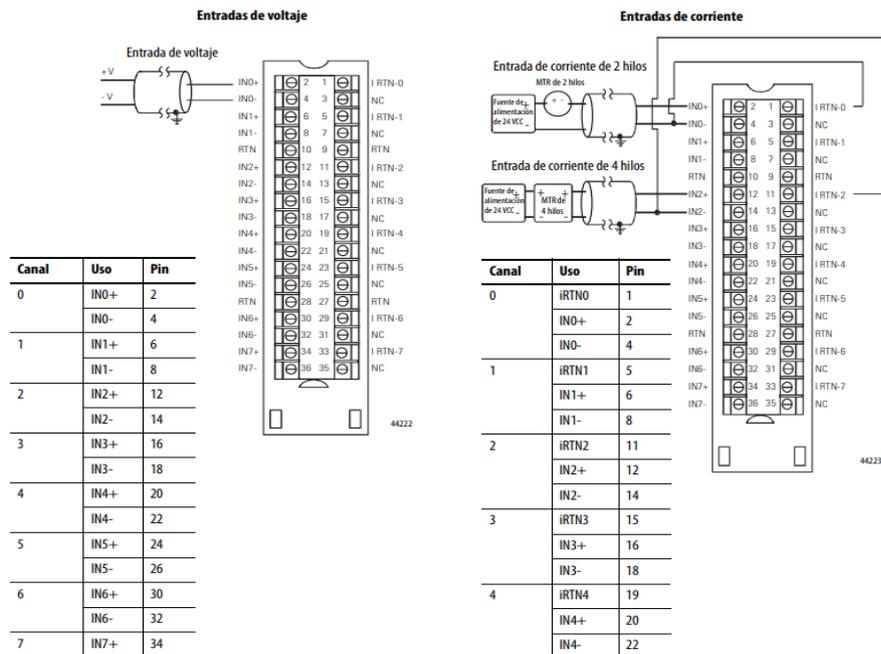
*Nota: Fuente autor.*

**2.4.4.7.-Diagrama de Conexión modulo analógico para integración de sensores.**

**Figura 33**

*Diagrama de conexión de modulo 1756-IF8H analógico.*

**Cableado del módulo**



*Nota: Imagen adaptada por el autor Fuente: Rockwell Automation.*

## RESULTADOS

**Tabla 10**

*Datos de simulaciones realizadas mediante el método de onda de presión negativa*

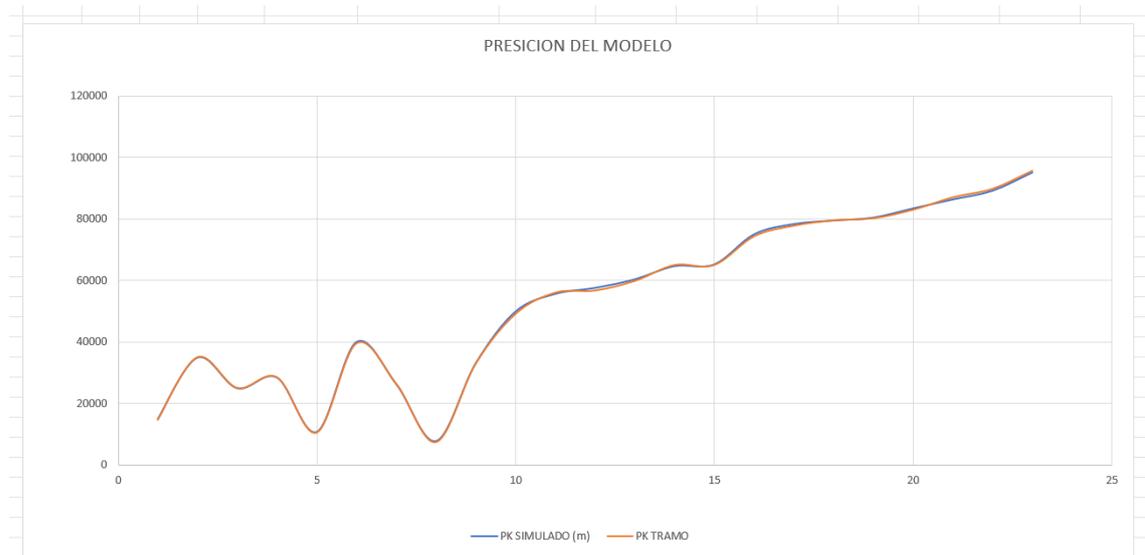
NUMERO DE SIMULACION	PK SIMULADO (m)	TI - T2	T2- T3	T3- TF	TI-TF	PK TRAMO	PK POLIDUCTO	ERROR T	ERROR P
1	15.000	- 18	60	60	-138	14790	16390	1,4000%	9,2667%
2	35.000	41	60	60	-80	35145	36400	0,4143%	4,0000%
3	25.000	12	60	60	-108	25140	26740	0,5600%	6,9600%
4	28.500	22	60	60	-98	28590	30190	0,3158%	5,9298%
5	10.800	- 30	60	60	-150	10650	12250	1,3889%	13,4259%
6	40.100	54	60	60	-66	39630	41230	1,1721%	2,8180%
7	26.350	16	60	60	-104	26520	28120	0,6452%	6,7173%
8	7.800	- 39	60	60	-159	7545	9145	3,2692%	17,2436%
9	33.200	35	60	60	-85	33075	34675	0,3765%	4,4428%
10	50.000	60	-40	60	-40	49200	50200	1,6000%	0,4000%
11	55.750	60	-20	60	-20	56100	57100	0,6278%	2,4215%
12	57.700	60	-18	60	-18	56790	57790	1,5771%	0,1560%
13	60.500	60	-9	60	-9	59895	60895	1,0000%	0,6529%
14	64.800	60	6	60	6	65070	66070	0,4167%	1,9599%
15	65.350	60	6	60	6	65070	66070	0,4285%	1,1018%
16	75.150	60	33	60	33	74385	75385	1,0180%	0,3127%
17	78.500	60	43	60	43	77835	78835	0,8471%	0,4268%
18	79.650	60	48	60	48	79560	80560	0,1130%	1,1425%
19	80.600	60	50	60	50	80250	81250	0,4342%	0,8065%
20	83.600	60	58	60	58	83010	84010	0,7057%	0,4904%
21	86.520	60	60	-52	68	87060	87460	0,6241%	1,0865%
22	89.360	60	60	-44	76	89820	90220	0,5148%	0,9624%
23	95.300	60	60	-27	93	95685	96085	0,4040%	0,8237%
<b>PROMEDIO ERROR T</b>								<b>0,8632%</b>	
<b>PROMEDIO ERROR P</b>								<b>3,6325%</b>	

*Nota:* Fuente autor.

Después de realizar las simulaciones necesarias, se puede afirmar que, al simular la instalación de cuatro sensores a lo largo del poliducto de 128 kilómetros de longitud, se obtiene un error promedio del +/- 0.8632 % en la precisión de la localización de fugas en el poliducto.

**Figura 34**

*Precisión del modelo de onda de presión negativa*



*Nota:* Fuente autor.

#### Resultados Esperados de Realizar una Simulación:

**Evaluación de Estrategias de Detección y Prevención:** Mediante la simulación, se pueden probar diferentes estrategias de detección y prevención de perforaciones clandestinas, como la ubicación de sensores de presión, el patrullaje de seguridad. Esto permitiría a la empresa determinar qué estrategias son más efectivas para reducir el robo de hidrocarburos.

**Cuantificación del Impacto Económico:** La simulación podría ayudar a estimar el impacto económico de las perforaciones clandestinas en términos de pérdida de ingresos por la sustracción de combustibles y los costos asociados con la reparación de la infraestructura dañada. Esto proporcionaría a Petroecuador una comprensión más clara de la magnitud del problema y justificaría la inversión en medidas de seguridad adicionales.

**Mejora de los Protocolos de Respuesta:** La simulación permitiría a Petroecuador probar y optimizar sus protocolos de respuesta ante incidentes, incluyendo la coordinación con las fuerzas del orden y la gestión de denuncias ante las autoridades competentes. Esto

garantizaría una respuesta rápida y eficiente en caso de que ocurra una perforación clandestina.

En conjunto, estos resultados esperados de la simulación proporcionarían a Petroecuador información valiosa para fortalecer su seguridad energética y proteger sus recursos petroleros contra el robo y la manipulación ilegal.

## CONCLUSIONES

- ✓ La simulación destaca el papel crucial del sistema en la mitigación de riesgos asociados con las fugas en poliductos de transporte de hidrocarburos. La capacidad de detectar y localizar fugas de manera oportuna puede reducir el riesgo de accidentes graves, como derrames, que pueden tener consecuencias ambientales, económicas y sociales devastadoras.
- ✓ La simulación permite evaluar el costo de implementar y mantener el sistema de detección y localización de fugas en comparación con los beneficios potenciales, como la reducción de pérdidas de producto, la prevención de daños ambientales y la protección de la reputación corporativa. Este análisis puede ayudar a tomar decisiones informadas sobre la viabilidad y la rentabilidad del sistema.
- ✓ La simulación resalta el papel del sistema en el cumplimiento de regulaciones ambientales y de seguridad, así como en el cumplimiento de los estándares de responsabilidad corporativa. La capacidad de demostrar un enfoque proactivo hacia la detección y mitigación de fugas puede ser fundamental para mantener la licencia operativa y la reputación de la empresa en la industria.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Integrar el sistema de detección y localización de fugas con los sistemas de seguridad y monitoreo existentes en el Poliducto Libertad - Pascuales, como sistemas de control de procesos y sistemas de respuesta a emergencias. Esto facilitará una acción rápida y coordinada en caso de una fuga o perforación clandestina detectada.
- ✓ Proporcionar capacitación adecuada al personal responsable de operar y mantener el sistema de detección de fugas. Asegúrate de que comprendan cómo funciona el sistema, cómo interpretar los datos y cómo responder de manera efectiva en caso de una emergencia.
- ✓ Asegurarse de calibrar periódicamente los sensores y el equipo del sistema de detección para garantizar la precisión de las mediciones. Programar un mantenimiento regular para garantizar que todos los componentes del sistema estén funcionando correctamente y se mantengan en óptimas condiciones.

Haga clic o pulse aquí para escribir texto.

## REFERENCIAS

- ANNIABEL DE LA CARIDAD, C. S. (2022). *“Diseño y simulación de la automatización del proceso de rebombeo de agua potable.”*
- Baldeón Casquete, D. E. (2021). Migración a lenguaje SCL y mejoras de programa de planta Festo MPS-500 del laboratorio de fabricación flexible de la UPS-G. *Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil.*
- Bohórquez, E. D., Prado, E. A., & Ramirez, M. F. (2019). IMPLEMENTACIÓN DE LA NORMA ISA 101, SOBRE LAS HMI, PERTENECIENTES A LOS MÓDULOS DE INSTRUMENTACIÓN DE LA UNIVERSIDAD ECCI. *SEMINARIO INTERNACIONAL*, 3(20).
- Borbor Guerrero, D. S. (2023). *Diseño y simulación del proceso automatizado de envasado vertical utilizando un PLC para productos alimenticios granulados.* UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA.
- Cuero Granobles, L. F., Gutiérrez Marroquín, W., & Londoño, I. M. (2021). LOS PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN, UNA BASE PARA LA DIGITALIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES. *Revista Teinnova*, 5. <https://doi.org/10.23850/25007211.3423>
- Cueva Tumbaco, J. E. (2018). *Diseño e implementación de un sistema redundante basado en equipos de la marca Rockwell Automation”.* ESPOL SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.
- CYAMBIENTE CÍA. LTDA. (2022). *ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL EX POST POLIDUCTO LIBERTAD – PASCUALES - MANTA.*
- Emerson, R. (2023). *Hoja de datos del producto: Transmisor de presión Rosemount 3051.*
- ERMERSON INDUSTRIES. (2024). *HART - DIGITAL TRANSFORMATION FOR ANALOG INSTRUMENTS.* <https://www.fieldcommgroup.org/technologies/hart>
- Gabriela Morales Delgado, A. (2012). *Repotenciacion del Poliducto Tres Bocas Pascuales.* ESPOL SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

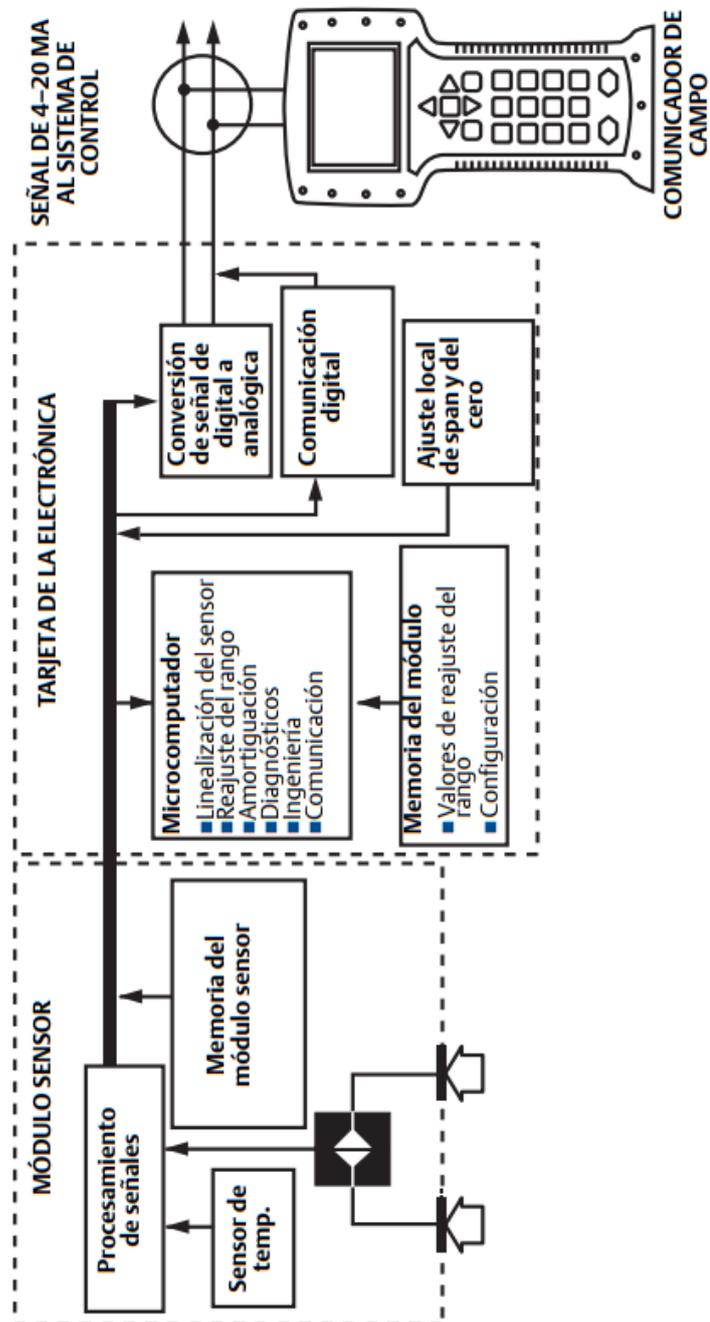
- Gomez-Camperos, J. A., García-Guarín, P. J., & Nolasco-Serna, C. (2020). Modelo numérico de detección de fugas para sistema de tuberías. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*. <https://doi.org/10.15649/2346030x.723>
- González, L., Sofía, O., Laguía, D., Gesto, E., & Hallar, K. (2020). Internet del Futuro – Estudio de tecnologías IoT. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 12(3). <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v12.n3.744>
- Jurado Pérez, L. A., Velázquez Vargas, W. A., & Vinuesa Escobar, N. F. (2014). Estado del Arte de las Arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT). *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación*.
- Kermani, M., Abbasi, S., Shirdare, E., & Martirano, L. (2023). Real-Time PLC-Based Control for Microgrid Operations Using SCADA System. *Proceedings - 2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2023*. <https://doi.org/10.1109/IEEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194668>
- Kiangala, K. S., & Wang, Z. (2019). An Industry 4.0 approach to develop auto parameter configuration of a bottling process in a small to medium scale industry using PLC and SCADA. *Procedia Manufacturing*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.015>
- Ladino-Moreno, E.-O., García-Ubaque, C.-A., & García-Vaca, M.-C. (2021). Estimación de fugas en tuberías a presión para sistemas de agua potable mediante redes neuronales artificiales y Epanet. *Revista Científica*, 43(1). <https://doi.org/10.14483/23448350.18275>
- Lin, C. Y., & Nadjm-Tehrani, S. (2023). Protocol study and anomaly detection for server-driven traffic in SCADA networks. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2023.100612>
- Matiti, K., Southward, J., & Tullio, L. (2021). Integrated approach for HAZOP, LOPA and alarm rationalisation reviews. *Institution of Chemical Engineers Symposium Series, 2021-November*(168).
- Reyes-Flores, E. (2019). Tipos de Sensores. *Con-Ciencia Serrana Boletín Científico de la Escuela Preparatoria Ixtlahuaco*, 1(2).

- Salas Camacho, F. A. (2022). *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*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Sidhardha, K., Naga Prudhvi Raj, V., Krishna, J. M., Vamsi, K. S., & Hari, D. S. (2023). Integration of Programmable Logic Controller with LabVIEW for Acquiring Data, Monitoring and Controlling. *Proceedings - 7th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICCMC56507.2023.10083850>
- Sistema de control automático para la detección de fuga de gas natural. (2022). *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(3). [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i3.2253](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i3.2253)
- Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Muñoz, L., & Rodríguez-González, S. (2019). Arquitecturas de Referencia Edge Computing para la Industria 4.0: una revisión. *Memorias De Congresos UTP*, <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/2284>.
- Tigre Chitacpa, K. E., & Zumba Arichávala, J. D. (2022). *ESTUDIO DE LA PASARELA INTELIGENTE IOT 2040 DE SIEMENS Y DESARROLLO DE UN MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO ORIENTADAS AL APRENDIZAJE DE LOS SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.
- Trujillo, L., Arguello, M. S., Israel, S., Luis, M. J., & Camargo, O. (s. f.). *PRESENT A UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA*.
- Valaboju, C., Amuda, M., Sri Charan, N. C. H., Gopireddy, S. R., Hazaveh, P. K., & Rawashdeh, N. A. (2023). A Supervisory Control System for a Mechatronics Assembly Station. *2023 15th International Conference on Computer and Automation Engineering, ICCAE 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICCAE56788.2023.10111393>

Yang, J., Mostaghimi, H., Hugo, R., & Park, S. S. (2022). Pipeline leak and volume rate detections through Artificial intelligence and vibration analysis. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110368>

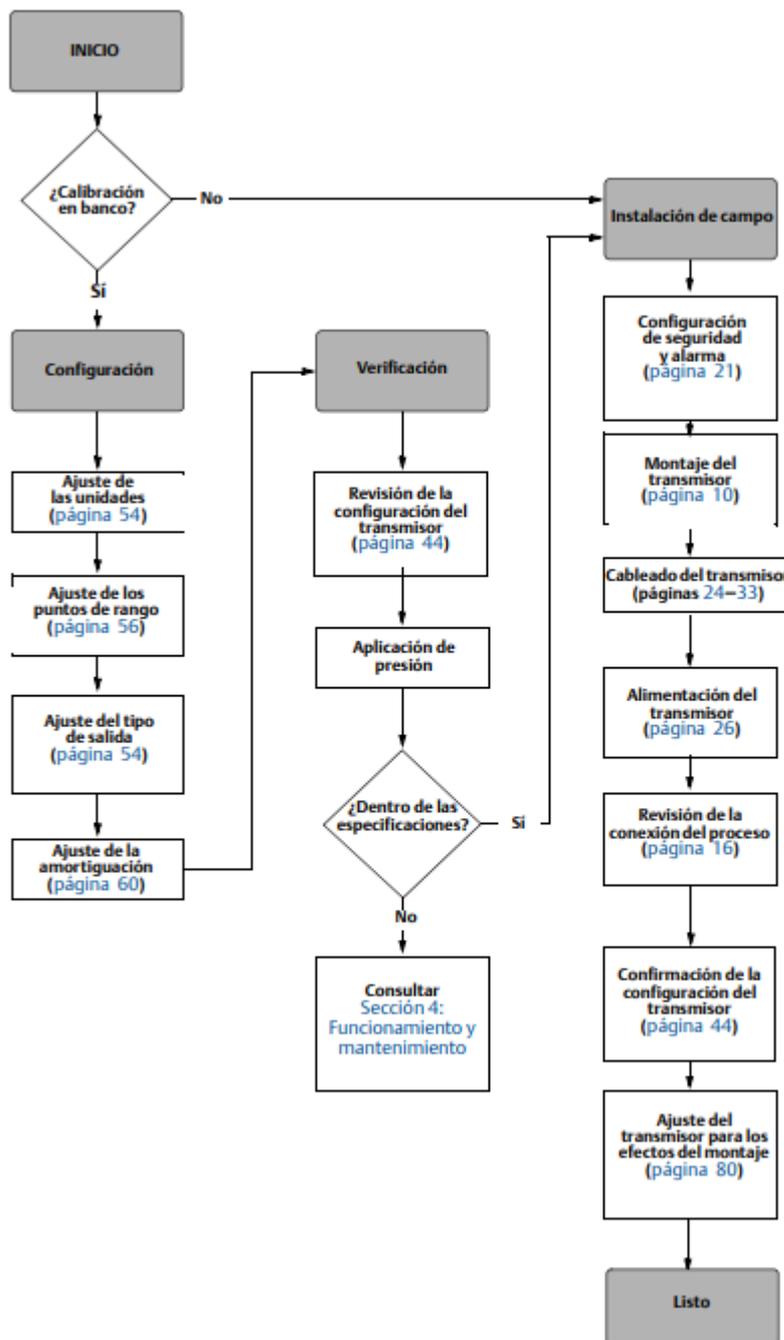
## ANEXOS

Anexo 1: Diagrama de bloques de funcionamiento de sensor de presión y caudalímetro



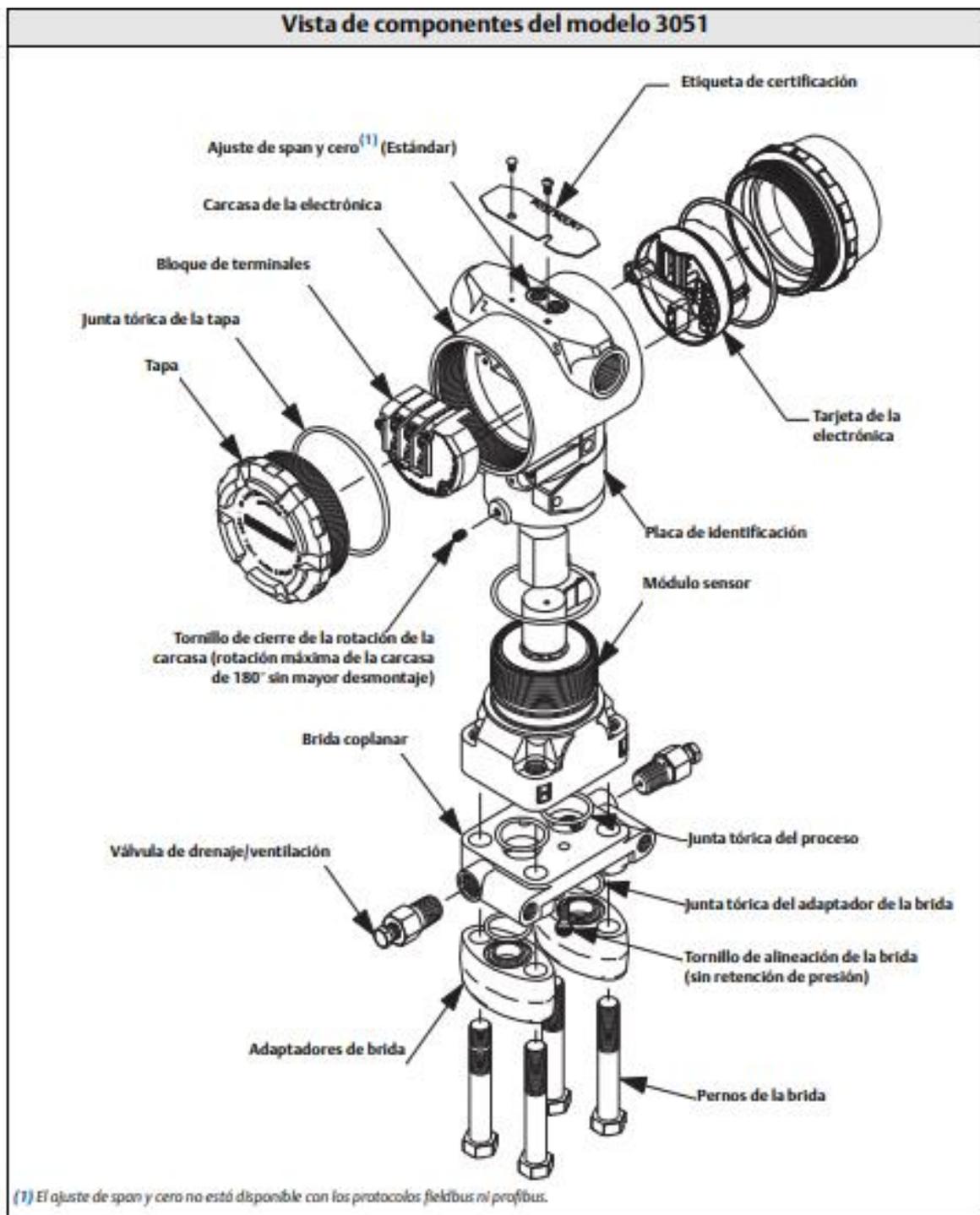
Fuente: Emerson

Anexo 2: Diagrama de instalación de sensores en campo.



Fuente: Emerson

### Anexo 3: Planos dimensionales de sensor

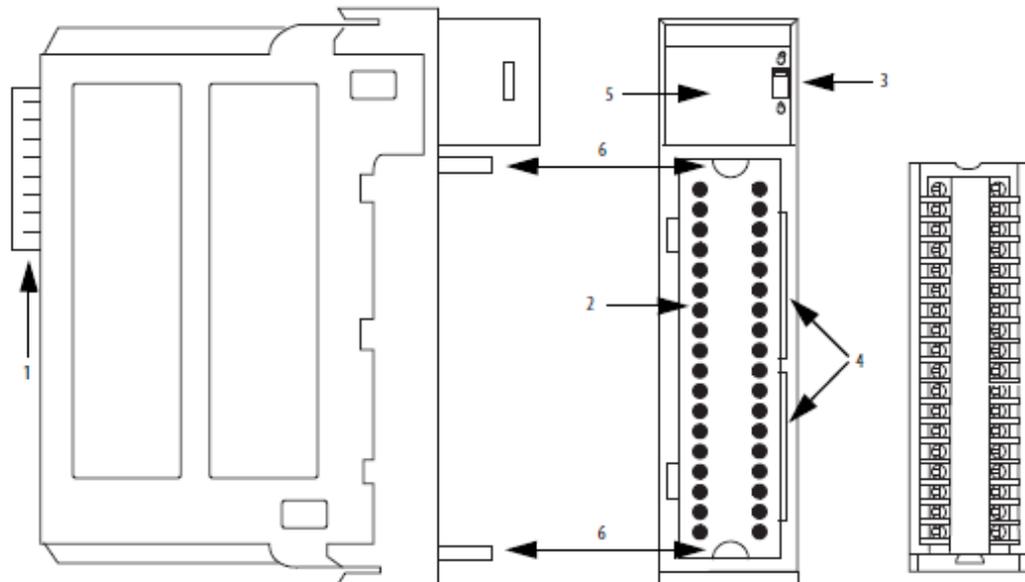


Fuente: Emerson

## Anexo 4: Componentes de módulo 1756-IF8H de entradas analógicas

### Componentes del módulo

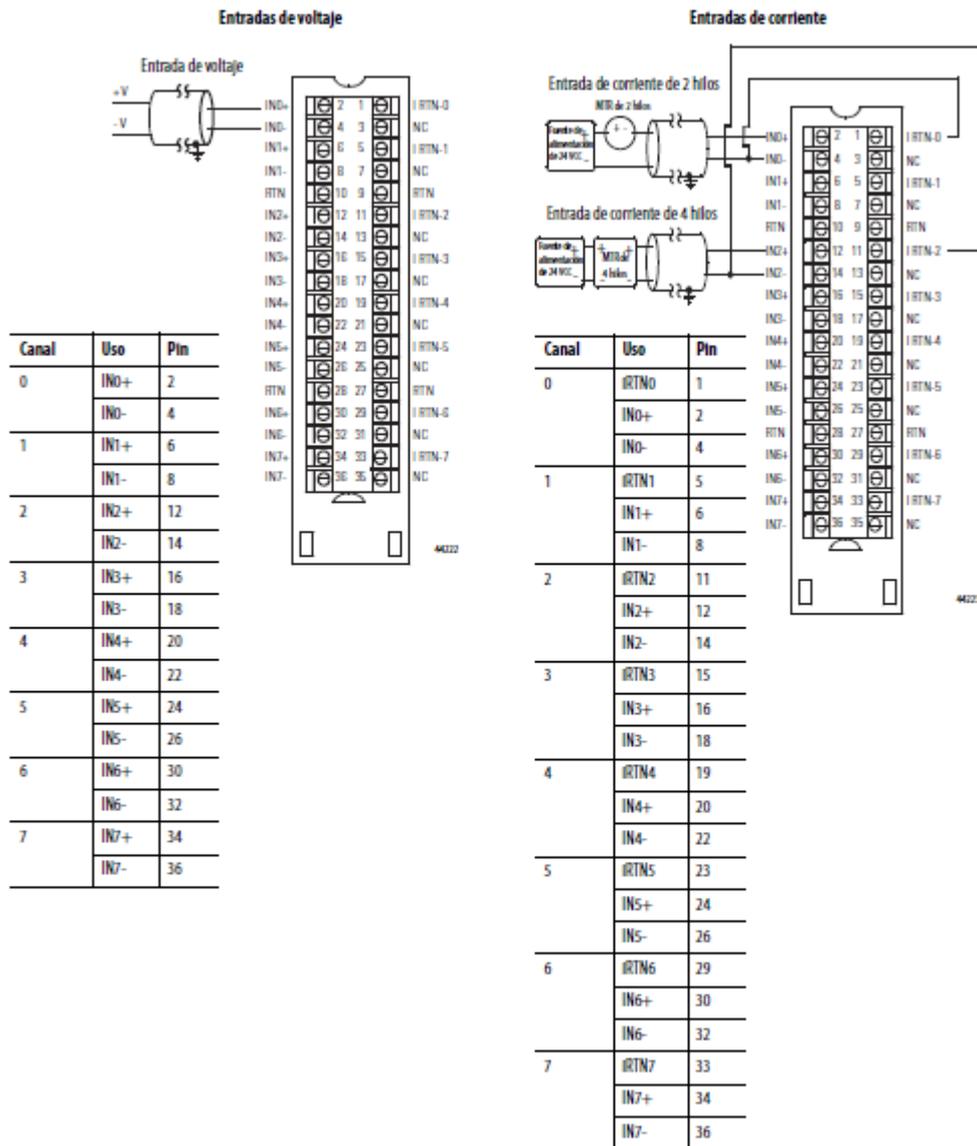
Esta figura muestra las características físicas de los módulos de E/S analógicas ControlLogix.



Ítem	Descripción
1	<b>Conector de backplane</b> – Conecta el módulo al backplane ControlBus™.
2	<b>Pines de conector</b> – Las conexiones de entrada/salida, alimentación eléctrica y a tierra se realizan mediante estos pines con el uso de un RTB (bloque de terminales extraíble) o IFM (módulo de interface).
3	<b>Lengüeta de fijación</b> – Fija el cable RTB o IFM en el módulo, lo cual contribuye a mantener las conexiones de los cables.
4	<b>Ranuras de codificación</b> – Protegen mecánicamente el RTB para evitar que se conecten inadvertidamente los cables equivocados al módulo.
5	<b>Indicadores de estado</b> – Muestran el estado de los dispositivos de entrada/salida, estado de diagnóstico del módulo y el estado de la comunicación. Use estos indicadores como ayuda en la resolución de problemas.
6	<b>Guías superiores e inferiores</b> – Ayudan a asentar el cable RTB o IFM en el módulo.

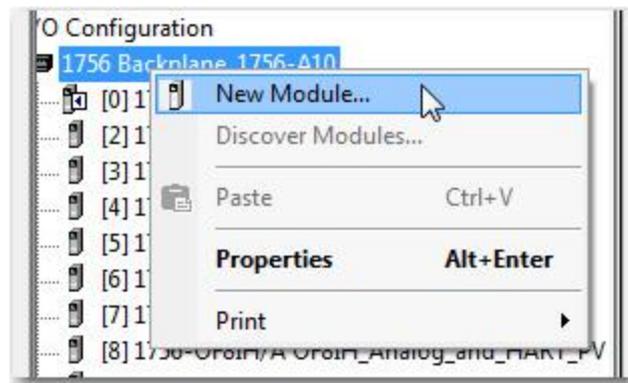
Fuente: Allen Bradley

## Anexo 5: Entradas de voltaje y corriente del 1756-IF8H

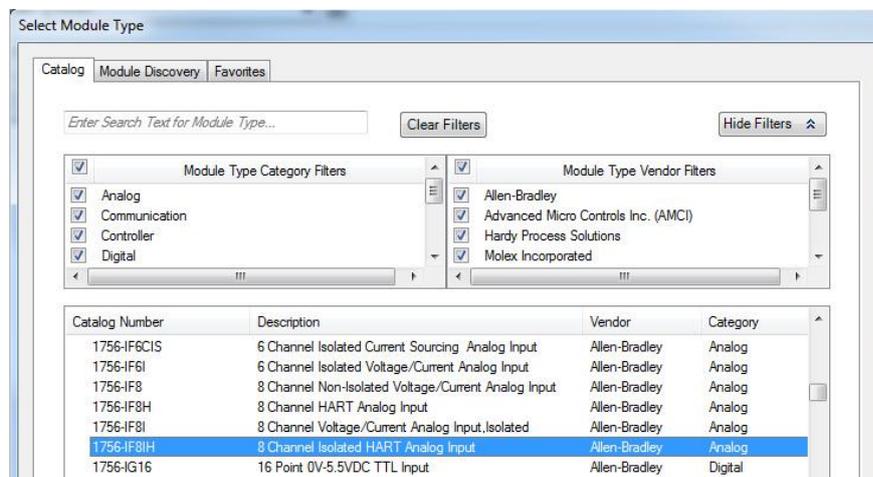


Fuente: Allen Bradley

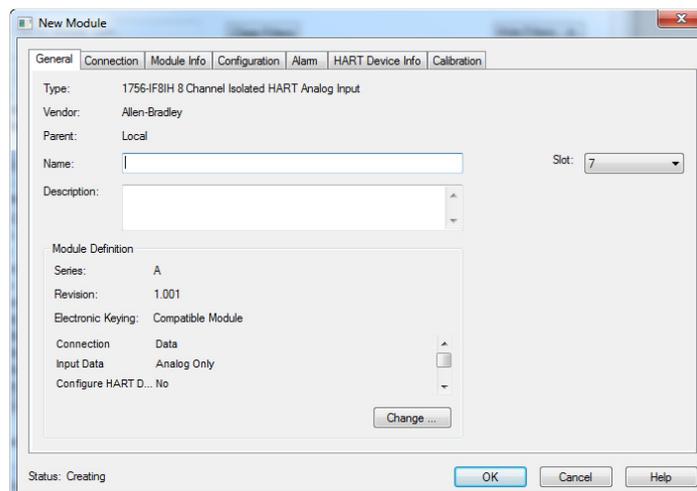
## Anexo 6: Configuración de módulos en la aplicación Logix Designer



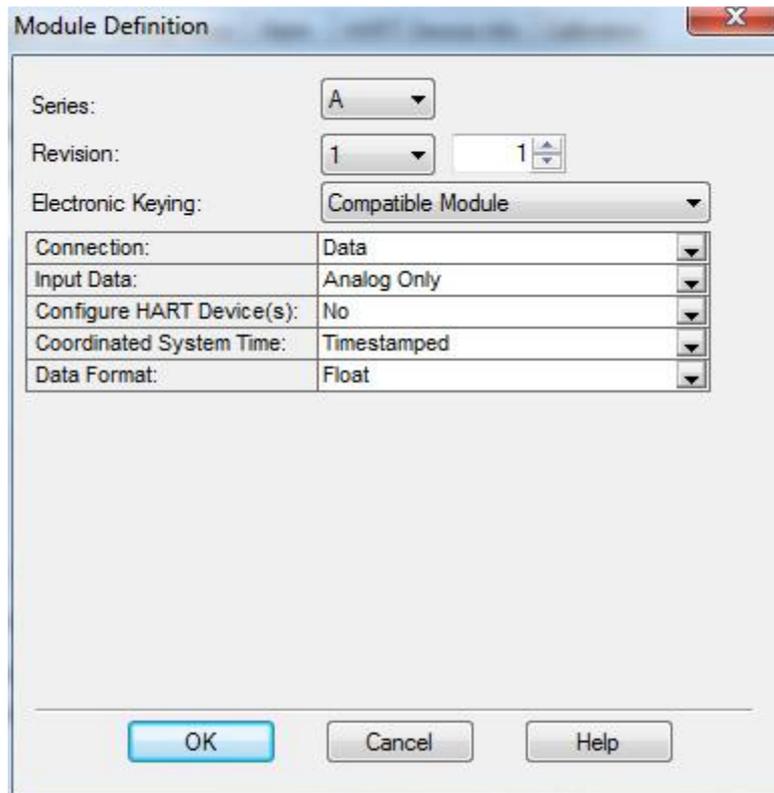
Fuente: Allen Bradley



Fuente: Allen Bradley

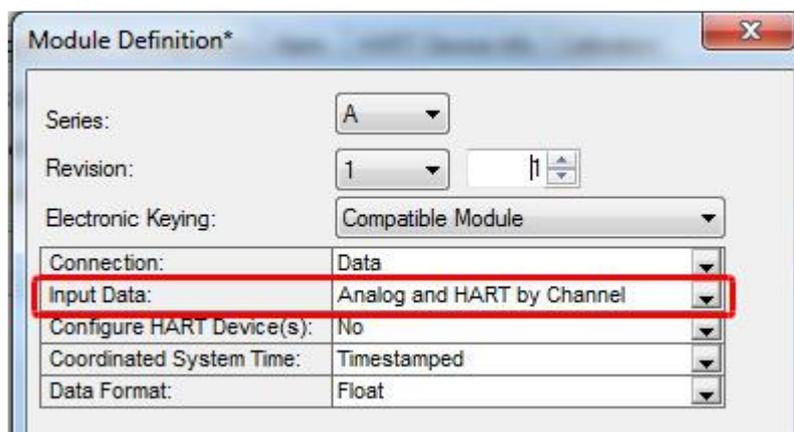


Fuente: Allen Bradley

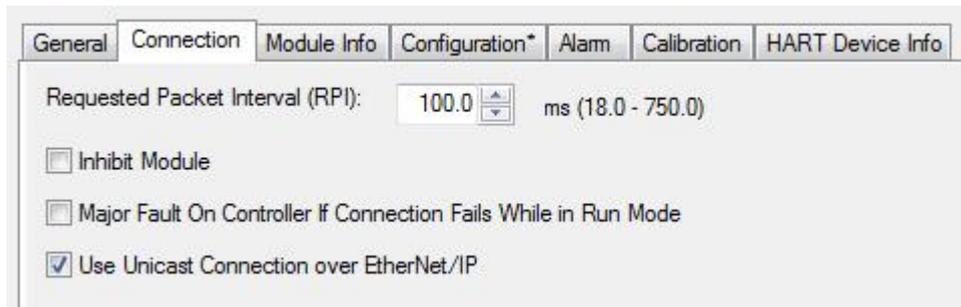


Fuente: Allen Bradley

#### Anexo 7: Configuración HART

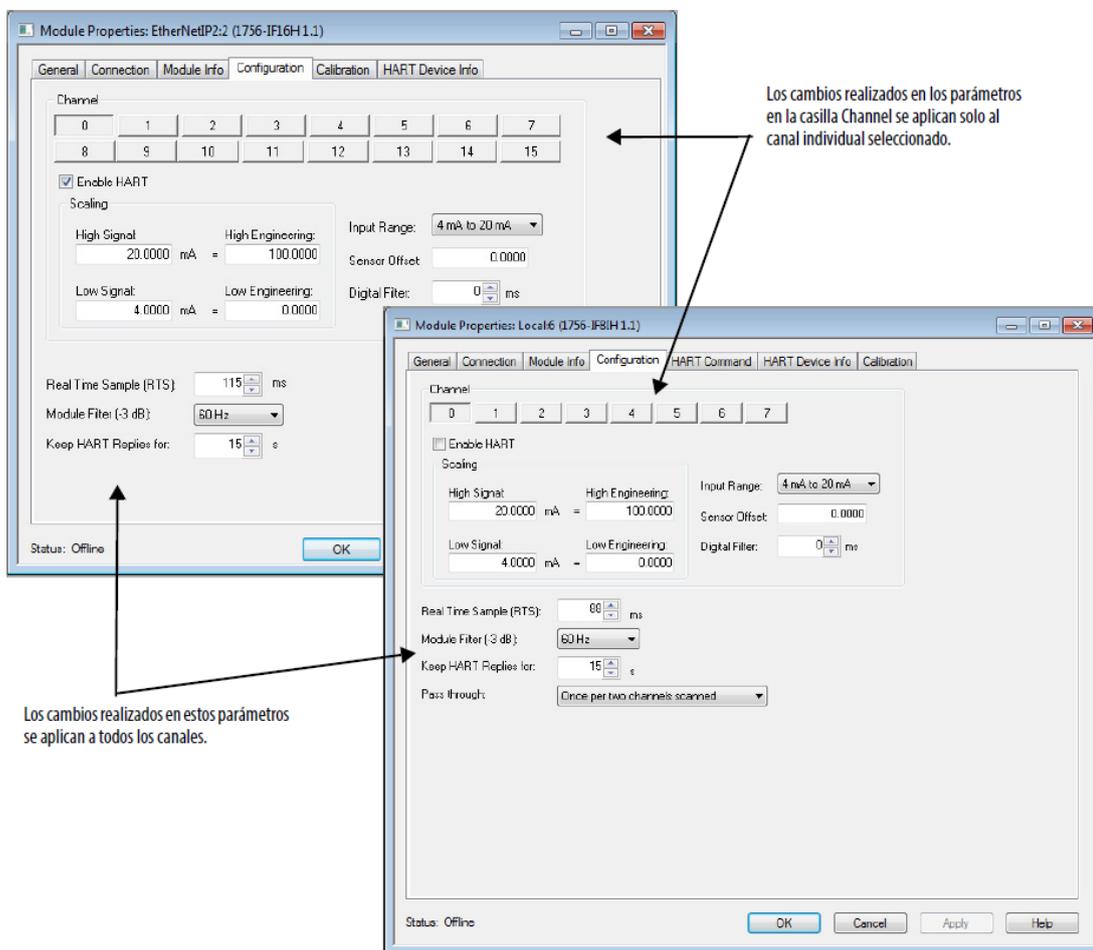


Fuente: Allen Bradley



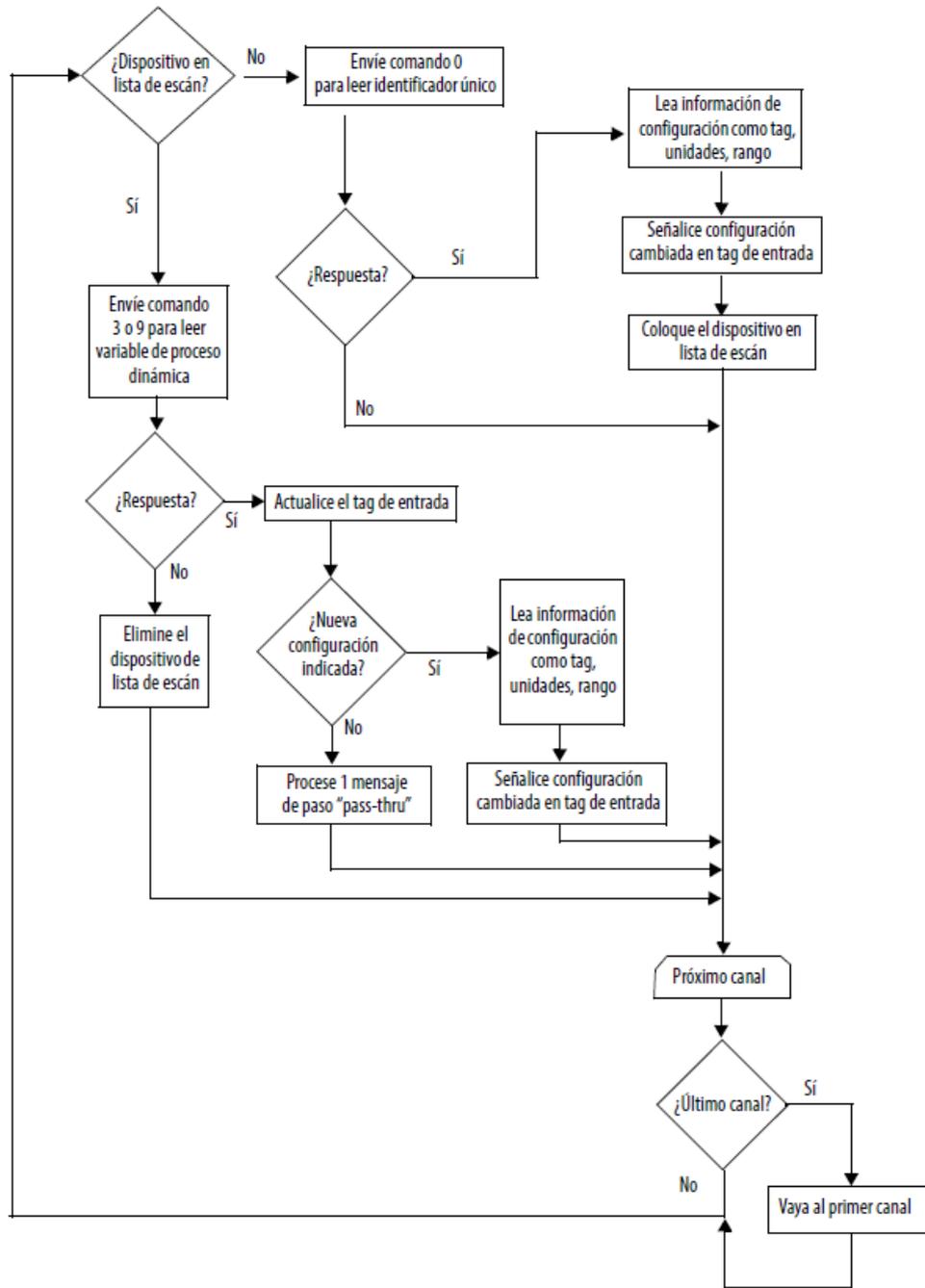
Fuente: Allen Bradley

### Anexo 8: Ficha Configuración Módulos de entrada



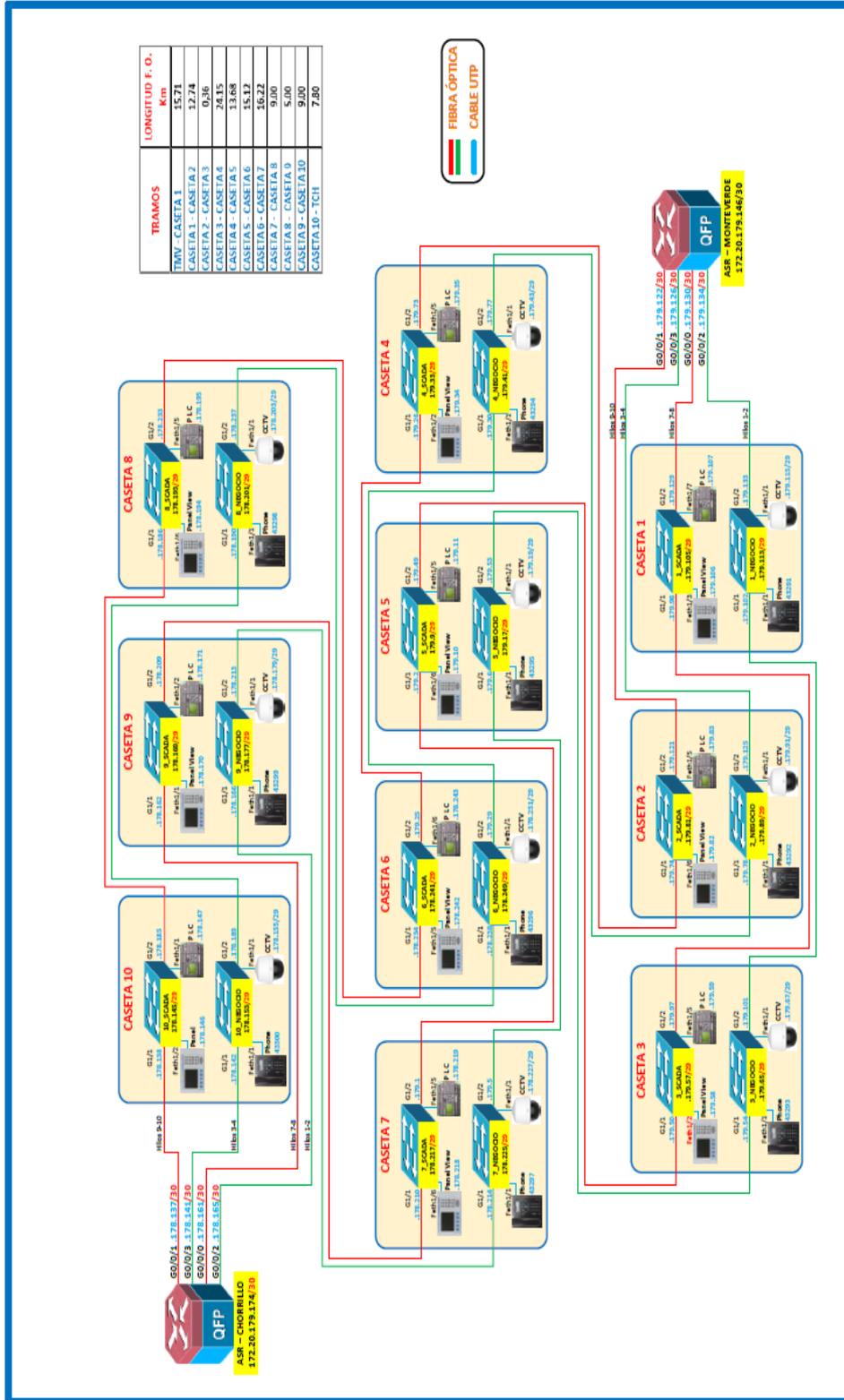
Fuente: Allen Bradley

Anexo 9: Diagrama de flujo de 1756-IF8H



Fuente: Allen Bradley

Anexo 10: Esquemático de Telecomunicaciones a utilizarse (se utilizará la red disponible del Poliducto Monteverde – Chorrillo).



Fuente: EPPetroecuador