

## Enfoque Integral para la Detección de Conexiones Ilícitas y Optimización del Mantenimiento Preventivo en Sistemas de Transporte de Hidrocarburos Mediante Análisis de Señales MFL e Integración de Datos

### Autores:

José Luis Alcántar Rodríguez - Especialista Análisis de Integridad

Oscar Gilberto Páez Ortiz – Líder de Análisis de Integridad

**GIE GROUP**

Colombia

### Correo Electrónico:

jalcantar@giegroup.net

paez@giegroup.net

**Resumen:** Este trabajo presenta un enfoque para gestionar la integridad de sistemas de transporte de hidrocarburos, con especial atención a la detección y gestión de conexiones ilícitas, uno de los mayores desafíos de la industria energética. En Colombia, estas conexiones han generado pérdidas económicas significativas, impactos ambientales y riesgos de seguridad. La metodología propuesta combina inspecciones ILI con tecnología MFL, integración de bases de datos históricas y herramientas analíticas como Power BI, para identificar, clasificar y priorizar intervenciones. Se describe un flujo estructurado en seis etapas: inspección inicial, integración de datos, clasificación de conexiones (TAPS), análisis y priorización, validación en campo, y optimización continua. El análisis de un caso real destaca cómo la aplicación de tecnologías avanzadas y validaciones en campo puede eliminar conexiones ilícitas, proteger el medio ambiente y optimizar recursos.

### Introducción

La integridad de los sistemas de transporte de hidrocarburos es crítica para la operación de la industria energética, enfrentando desafíos como conexiones ilícitas que generan pérdidas económicas, riesgos ambientales y afectan la seguridad de las comunidades.

En Colombia, el hurto de hidrocarburos y las conexiones ilícitas han generado impactos económicos por COP 3,6 billones en los últimos cinco años, incluyendo COP 1,04 billones en costos de atención, COP 1,6 billones en ingresos no percibidos y daños a 238 mil metros cuadrados de suelos [1].

En este contexto, el mantenimiento preventivo se presenta como una herramienta clave para

mitigar riesgos y optimizar recursos. Este trabajo propone un enfoque integral que combina el análisis de señales MFL (Magnetic Flux Leakage), datos de corridas de inspección con herramienta instrumentada ILI (In Line Inspection) y manejo de bases de datos actualizadas para detectar anomalías, priorizar intervenciones y mejorar la sostenibilidad operativa.

### Objetivo

Desarrollar un enfoque integral que combine el análisis de señales MFL (Magnetic Flux Leakage) con datos de corridas ILI, condiciones mecánicas de reparación y bases de datos actualizadas, con el objetivo de detectar conexiones ilícitas, prevenir fallas en la infraestructura y optimizar los planes de mantenimiento preventivo, contribuyendo a

reducir riesgos ambientales, minimizar pérdidas económicas y fortalecer la sostenibilidad de los sistemas de transporte de hidrocarburos.

### Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, la metodología se desarrolla mediante un flujo estructurado, ilustrado en el gráfico de análisis de TAPS (ver Figura 1).

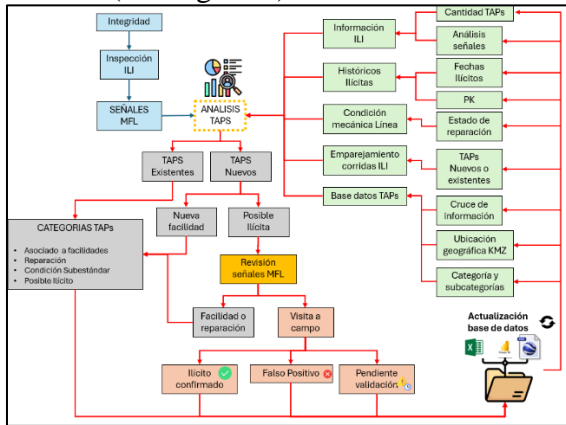


Figura 1. Flujograma de metodología planteada

Basado en el flujograma presentado, la metodología se organiza en etapas claves, cada una representada con colores específicos para facilitar su comprensión y seguimiento.

1. Inspección y análisis inicial.
2. Integración de datos.
3. Clasificación de TAPS.
4. Análisis y priorización.
5. Validación en campo.
6. Optimización y retroalimentación.

1. Inspección y análisis inicial:

a). Inspecciones ILI: Las herramientas de inspección en línea (ILI) recopilan datos técnicos sobre el estado de las tuberías, como corrosión, deformaciones y accesorios instalados. Estas inspecciones identifican tanto

TAPS lícitas (drenajes, venteos, Hot Taps) como ilícitas asociadas al hurto de hidrocarburos, permitiendo evaluar la integridad de los ductos. La Figura 2 muestra un corte transversal ilustrativo de una tubería durante una inspección ILI.



Figura 2. Inspección ILI en tubería

b). Procesamiento de señales MFL: Las señales MFL se analizan para identificar daños, corrosión y defectos estructurales, aunque ciertas señales, como las asociadas a tomas ilícitas, pueden no ser detectadas. De tal manera, una revisión detallada corresponde a una tarea primordial para identificar anomalías y priorizar intervenciones en zonas críticas, garantizando la integridad del ducto.

La Figura 3 muestra una señal MFL típica que representa una pérdida de metal causada por corrosión.

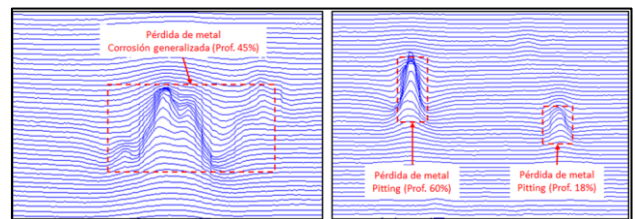


Figura 3. Señal MFL Corrosión.

La Figura 4 ilustra patrones característicos de señales asociados a tomas (TAPS).

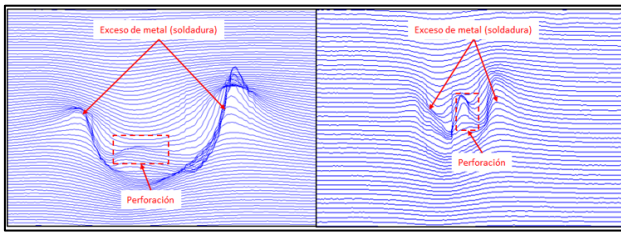


Figura 4. Señales MFL TAPs

La Figura 5 muestra señales típicas asociadas a tomas ilícitas que no han sido reparadas.

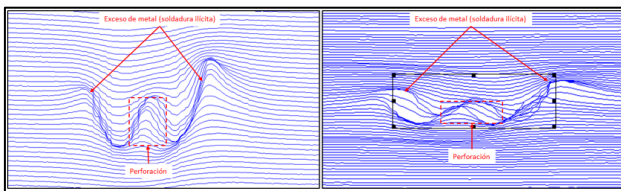


Figura 5. Señal MFL ilícitas sin reparar.

2. Integración de datos:

- Se integran datos de inspecciones ILI, señales MFL, registros históricos de conexiones ilícitas, condiciones mecánicas de reparación y bases de datos de ubicación geográfica. Esta integración permite correlacionar los hallazgos y obtener una visión completa y precisa del estado de la infraestructura.
- Se emplean herramientas como Power BI y sistemas GIS para procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones de riesgo, vulnerabilidades y zonas críticas. La Figura 6 muestra un dashboard interactivo que permite visualizar los TAPS reportados por diferentes corridas ILI, junto con un mapa y gráficos que facilitan el filtrado de información por tramos, sistemas y categorías.



Figura 6. Dashboard distribución TAPS

3. Clasificación de TAPS:

La clasificación de TAPS (conexiones) es fundamental para diferenciar entre instalaciones lícitas e ilícitas y priorizar acciones correctivas. Esta clasificación se realiza con base en las siguientes categorías:

- TAPS existentes:** Conexiones previamente registradas en los sistemas de inspección, tanto lícitas como ilícitas. Estas incluyen drenajes, venteos, Hot Taps, puntos de inspección autorizados y conexiones ilícitas ya detectadas y controladas. La Imagen 1 ilustra un ejemplo de TAPS existentes, como drenajes y venteos, utilizados para la operación y monitoreo del ducto.

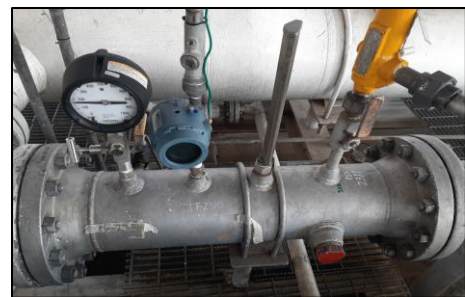


Imagen 1. TAPS existentes en facilidades operativas

- TAPS nuevos:** Conexiones no registradas detectadas durante las inspecciones recientes. Estas incluyen nuevas instalaciones ilícitas realizadas por terceros para el hurto de hidrocarburos o conexiones legítimas no

documentadas. Requieren validación y clasificación para determinar el tipo de intervención necesaria.

- c) **TAPS lícitas:** Conexiones autorizadas y documentadas que forman parte del diseño y operación del sistema de transporte, como drenajes, venteos, conexiones de monitoreo y Hot Taps. La Imagen 2 muestra la instalación de una derivación tipo TAP lícito, que forma parte del diseño autorizado para la operación del sistema de transporte.



Imagen 2. Instalación de Tap Lícito

- d) **TAPS ilícitas:** Instalaciones clandestinas realizadas por terceros para sustraer hidrocarburos ilegalmente, representando un riesgo significativo para la seguridad, la integridad de la infraestructura y el medio ambiente. La Imagen 3 muestra un ejemplo de TAP ilícito, el cual al ser una conexión subestándar representa un impacto en la seguridad y en la operación de los sistemas de transporte



Imagen 3. TAP Ilícito en Ducto

La clasificación detallada de TAPS facilita la priorización de inspecciones adicionales, la implementación de acciones correctivas y el fortalecimiento de los planes de mantenimiento preventivo.

#### 4. Análisis y priorización:

- Evaluación de señales MFL: Se realiza un análisis detallado de las señales MFL enfocándose principalmente en los posibles ilícitos. Este análisis permite determinar si un TAP identificado es ilícito, requiere una reparación inmediata o necesita una visita de campo para su validación. Al centrar el análisis en las áreas con mayor probabilidad de contener conexiones ilegales, se mejora la precisión en la identificación de riesgos. La Figura 7 muestra un ejemplo de señales MFL correspondientes a TAPS lícitos, mientras que la Figura 8 representa las señales típicas asociadas a un TAP ilícito.

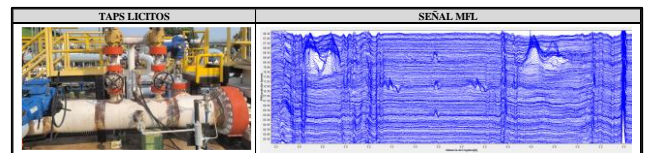


Figura 7. TAPS Lícitos

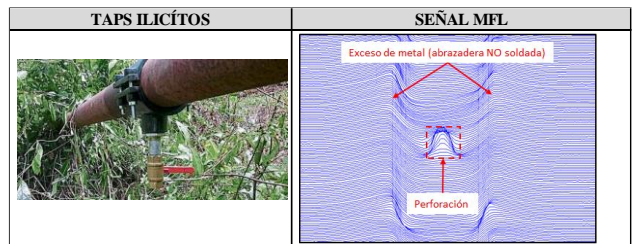


Figura 8. TAPS ilícitos

- Sistema de clasificación de riesgos: Se implementa un sistema de clasificación que organiza las anomalías y conexiones según su nivel de riesgo (alto, medio,



bajo). Este proceso facilita la priorización de intervenciones, enfocándose especialmente en las áreas con potencial presencia de conexiones ilícitas.

- Determinación de acciones: Con base en el análisis de riesgos, se definen planes de acción específicos para intervenir de manera oportuna y eficiente en las zonas más vulnerables. Esto incluye la planificación de inspecciones adicionales, reparaciones correctivas o la eliminación de conexiones ilícitas.

#### 5. Validación en campo:

- Realización de visitas: Se llevan a cabo inspecciones físicas en las zonas previamente identificadas como críticas, con el objetivo de confirmar la presencia de anomalías detectadas durante las fases de inspección y análisis. La imagen 4 muestra una inspección para confirmar anomalías detectadas en las fases de inspección y análisis.



Imagen 4. Validación en campo

- Clasificación de resultados: Los hallazgos obtenidos durante las inspecciones en campo se organizan en tres categorías principales, con el objetivo de priorizar acciones correctivas:
  - a. Ilícito confirmado: Conexiones ilegales verificadas que requieren intervención inmediata. Ver Imagen 5.



Imagen 5. Ilícito confirmado

- b. Falso positivo: Elementos instalados en la tubería que no representan riesgos reales o que no están asociadas a conexiones ilícitas. La Imagen 6 muestra la verificación de un falso positivo, un elemento sin riesgos ni asociación con ilícitos.



Imagen 6. Verificación de Falso Positivo

- c. Pendiente de validación: Anomalías que necesitan análisis adicional o condiciones especiales para su confirmación definitiva.

#### 6. Optimización y retroalimentación:



- Actualización continua de bases de datos: Los resultados obtenidos durante las etapas de inspección, análisis y validación se incorporan de manera sistemática a las bases de datos centralizadas. Esto permite mantener un registro actualizado y preciso sobre el estado de la infraestructura y las intervenciones realizadas.
- Ajustes al plan de mantenimiento preventivo: Con base en los hallazgos y análisis históricos, se realizan ajustes al



plan de mantenimiento preventivo, priorizando las áreas de mayor riesgo y optimizando los recursos disponibles. Este enfoque dinámico asegura que las estrategias de mantenimiento evolucionen en función de las necesidades reales del sistema.

### Beneficios

Este enfoque integral ofrece múltiples beneficios en términos de gestión de activos, sostenibilidad, medio ambiente, y análisis de resultados, garantizando una operación más eficiente y sostenible:

**Gestión de Activos:** Optimización de recursos mediante la priorización de intervenciones en áreas críticas, extensión de la vida útil de la infraestructura y mejora de la planificación basada en datos actualizados.

**Sostenibilidad y Medio Ambiente:** Reducción de impactos ambientales, prevención de derrames y cumplimiento normativo, promoviendo un transporte más seguro y sostenible.

**Análisis de Resultados:** Decisiones fundamentadas en datos confiables, priorización efectiva de riesgos y monitoreo continuo, asegurando la sostenibilidad del negocio y el cuidado del medio ambiente.

### Caso Real

Este caso aborda la gestión de una conexión ilícita en un poliducto de 45 kilómetros, empleando inspecciones ILI con tecnología MFL, análisis de datos históricos y validación en campo. La intervención permitió eliminar la conexión ilegal, mitigando riesgos económicos, operativos y ambientales.

Se destaca la integración de tecnologías avanzadas y análisis riguroso como un modelo replicable para optimizar recursos, priorizar zonas críticas y fortalecer la sostenibilidad operativa.

### **Desarrollo del Caso:**

- **Inspección ILI:** Se realizó una inspección con técnica MFL en el poliducto de 45 kilómetros, identificando varias zonas con posibles TAPS mediante el análisis compartido por el proveedor.

### **Integración de Datos:**

- Se analizaron siete corridas ILI, identificando que un evento en particular no fue reportado en inspecciones anteriores.
- Los registros históricos indicaron que en año 2021 se registró un evento en la zona, confirmando condiciones de vulnerabilidad.
- La revisión de las condiciones mecánicas de reparación mostró que no se habían realizado intervenciones previas en el área.
- El análisis de bases de datos GPS permitió clasificar el punto como un TAP nuevo, considerado posible ilícito.

### **Análisis de Señales MFL:**

En la Figura 9 se observan señales MFL que evidencian dos indicaciones circunferenciales correspondientes al inicio y fin de una grapa. Entre estas indicaciones, se detecta una pérdida de metal asociada a una perforación de 1 pulgada de diámetro.

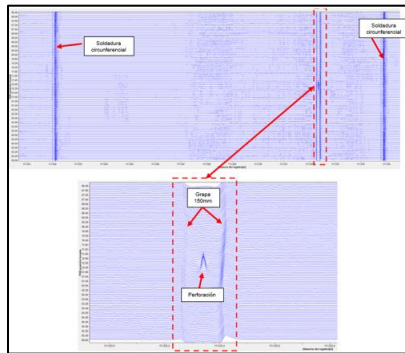


Figura 9. Señales MFL con señales de perforación

### Validación en Campo:

- Técnicos realizaron una visita al punto identificado, localizado en una zona boscosa de difícil acceso con tubería enterrada.
- Inicialmente se consideró descartar el punto debido a que a simple vista no se percibían hallazgos relevantes, las claras evidencias de posible ilícito identificadas en el análisis llevaron a realizar una excavación puntual para confirmar la situación.
- En la Imagen 7 se observa la conexión ilícita utilizada para extraer hidrocarburos de forma ilegal tras la excavación puntual realizada en el sitio. Inicialmente, la válvula no fue identificada debido a que la conexión ilícita contaba con una extensión mediante una manguera de 40 metros, dispuesta en sentido paralelo al eje del sistema. Esta disposición ocultaba los rastros, dificultando su hallazgo mediante inspección visual.



Imagen 7. Conexión ilícita detectada por análisis

La intervención permitió eliminar conexiones ilícitas, reduciendo riesgos de hurto y derrames, optimizar recursos al disminuir costos operativos y mejorar la precisión en inspecciones futuras. Además, se protegieron ecosistemas sensibles al evitar derrames y se fortaleció la gestión preventiva mediante la actualización de bases de datos. Este caso evidencia cómo el uso de tecnologías avanzadas, integración de datos y validación en campo optimiza la gestión de activos y garantiza la sostenibilidad operativa.

### Conclusiones

Este trabajo demuestra la efectividad de un enfoque integral en la gestión de activos para sistemas de transporte de hidrocarburos, integrando tecnologías avanzadas, análisis de datos y validación en campo. Los principales beneficios incluyen:

- **Gestión eficiente de activos:** Maximiza recursos, prolonga la vida útil de la infraestructura y prioriza intervenciones críticas para asegurar una operación confiable.
- **Optimización económica:** Reduce costos por reparaciones, mitigación de daños y hurto de hidrocarburos, garantizando un retorno significativo de inversión en tecnologías avanzadas.
- **Sostenibilidad ambiental:** Minimiza derrames y protege ecosistemas, fortaleciendo el cumplimiento normativo y la reputación corporativa.
- **Toma de decisiones basada en datos:** Prioriza zonas críticas mediante análisis detallado, optimizando recursos y resultados operativos.



- **Modelo replicable:** Sirve como referencia para implementar prácticas sostenibles, seguras y responsables en otras infraestructuras críticas.

La gestión de activos es esencial para integrar sostenibilidad ambiental, optimización económica y seguridad operativa, asegurando sistemas de transporte de hidrocarburos más seguros y rentables.

### **Bibliografía**

[1] Ecopetrol, Ecopetrol, MinDefensa y UIAF fortalecen lucha contra delitos que afectan infraestructura de la empresa estatal. Bogotá: Ecopetrol, 30 de mayo de 2024.

[2] ASME B31.4, Pipeline Transportation Systems for Liquids and Slurries. Nueva York: The American Society of Mechanical Engineers, 2019.

[3] API 5L, Specification for Line Pipe. Washington, DC: American Petroleum Institute, 46th ed., 2018.

[4] ROSEN Group, Rosoft: Advanced Signal Processing Software for ILI Data Analysis, ROSEN Technology and Research Center, Alemania, 2023.

José Luis Alcántar Rodríguez Ingeniero Metalúrgico con Maestría en Gestión de Integridad y Corrosión, certificado API 570, con más de 12 años de experiencia en inspección, evaluación y mantenimiento de infraestructura de transporte de hidrocarburos. Especializado en integridad mecánica, análisis de anomalías ILI y técnicas END (UT, MT, PT y VT). Con habilidades en gestión de riesgos, optimización de procesos y manejo de herramientas como Power BI y Excel avanzado para la mejora de la gestión de activos críticos.

Oscar Gilberto Páez Ortiz Ingeniero Mecánico, Especialista en Alta Gerencia Financiera, Magíster en Ingeniería Industrial, PMP y Analista de Datos Certificado, con más de 22 años de experiencia liderando proyectos en el sector energético e industrial, y 8 años dedicados al análisis de datos. Es experto en gestión de integridad estructural de equipos estáticos. Ha liderado equipos multidisciplinarios con dispersión geográfica, asegurando el cumplimiento de estándares y optimizando recursos estratégicos. Su enfoque analítico le ha permitido transformar datos complejos en soluciones prácticas, utilizando técnicas avanzadas de correlación y visualización.

1. **Nombre del autor:** José Luis Alcántar
2. **Celular:** 3133148055
3. **Dirección del autor:**
  - a. **Residencia:** Carrera 15 No 24-15
  - b. **E. mail:** jalcantar@giegroup.net
  - c. **Ciudad:** Tunja-Boyacá
  - d. **País:** Colombia