

Sistema Inteligente de Monitoreo en Tiempo Real de Pigs y Scrapers en Cañerías subterráneas

Bruno Bocchino, VISTA Energy, bruno.bocchino@vistaenergy.com; Amadeo Sasía, EDGE, asasia@edgeinst.com.ar; Mariano Lastra, Medeatec, ext_mlastra@vistanergy.com;

Abstract

El transporte seguro y eficiente de hidrocarburos y otros productos a través de cañerías subterráneas depende en gran medida de las operaciones de pigging y limpieza interna. Sin embargo, la detección confiable del paso de pigs y scrapers ha representado históricamente un desafío técnico debido a las limitaciones de las señales de baja frecuencia utilizadas en transmisores convencionales, particularmente por su vulnerabilidad frente a interferencias externas y ruido electromagnético.

En este trabajo se presenta un sistema integral compuesto por un conjunto de equipos portátiles de campo (maletín con sensores y electrónica dedicada) y una plataforma web de monitoreo en la nube, diseñado para detección en tiempo real, cálculo de velocidad y predicción de tiempos de llegada. Mediante la integración de sensores electromagnéticos y un sensor acústico basado en micrófono de alta sensibilidad, junto con algoritmos de validación multisensorial y procesamiento centralizado, el sistema propuesto incrementa la confiabilidad operativa, reduce falsos positivos y optimiza el uso energético del despliegue. Adicionalmente, al permitir supervisión remota centralizada, se disminuye la necesidad de despliegues masivos de personal en campo, mejorando significativamente la eficiencia operativa y la asignación de recursos humanos.

1. Introducción

El mantenimiento preventivo y correctivo de ductos constituye una actividad crítica para la industria energética, en particular para asegurar la continuidad del transporte de hidrocarburos y otros productos mediante cañerías subterráneas. Las maniobras que involucran pigs y scrapers permiten ejecutar tareas esenciales de limpieza e inspección interna, contribuyendo a sostener niveles adecuados de integridad y desempeño operacional. Sin embargo, el control preciso de su trayectoria, el registro confiable de tiempos de pasaje y la estimación de llegada a puntos críticos suelen estar limitados por restricciones técnicas de las tecnologías tradicionales de detección.

Históricamente, los transmisores asociados a pigs suelen operar en frecuencia extremadamente baja (alrededor de 22 Hz), debido a que este tipo de señal puede atravesar acero al carbono y propagarse en el suelo hasta aproximadamente dos metros de profundidad. No obstante, su utilización presenta una debilidad estructural: la alta vulnerabilidad frente a interferencias externas y ruido electromagnético, especialmente en entornos industriales o con cercanía a tendidos eléctricos, tránsito vehicular u otras fuentes de perturbación. Esta situación genera falsos positivos, reduce la confiabilidad de la supervisión y obliga a sostener una alta participación de personal en campo para validación manual y coordinación operativa, incrementando costos y reduciendo eficiencia.

En consecuencia, se vuelve necesario el desarrollo de herramientas que permitan aumentar confiabilidad, generar información en tiempo real y reducir la carga operativa asociada al

monitoreo tradicional. En este marco se propone un sistema integral de detección y monitoreo basado en multisensorialidad, procesamiento en la nube y optimización energética

2. Problema Identificado

Históricamente, los principales desafíos en la operación de pigs y scrapers en cañerías subterráneas se han concentrado en la limitada confiabilidad de detección, la falta de herramientas de monitoreo integradas y la baja eficiencia general del proceso. En particular, los problemas identificados son los siguientes:

2.1 Interferencias electromagnéticas

Uno de los principales obstáculos en la detección tradicional es la alta sensibilidad de la señal transmitida por los pigs (típicamente de **22 Hz**) frente a interferencias externas. Si bien esta frecuencia extremadamente baja resulta eficaz para atravesar acero al carbono y suelo, en la práctica se ve afectada por múltiples fuentes de ruido electromagnético presentes en entornos industriales y periurbanos.

Esto produce escenarios en los que la señal esperada puede “mezclarse” o ser distorsionada por componentes cercanos a frecuencias eléctricas de referencia (como **50 Hz**) provenientes de tendidos eléctricos, instalaciones industriales, maquinaria, vehículos o actividad humana. En consecuencia, el sistema de detección pierde selectividad y se vuelve más difícil asegurar si el evento registrado corresponde realmente al paso del pig o a ruido externo, generando incertidumbre operativa.

2.2 Falsos positivos

Como resultado directo de las interferencias ambientales, las detecciones registradas por sistemas convencionales muchas veces **no corresponden al paso real del pig o scraper**, sino a eventos espurios que “simulan” una detección válida.

Los falsos positivos tienen un impacto significativo en campo porque obligan al personal operativo a revisar, confirmar y repetir mediciones, lo cual aumenta tiempos de operación y reduce la capacidad de reacción ante situaciones reales. Además, cuando el sistema genera repetidamente falsos positivos, se deteriora la confianza en los reportes, y el equipo humano tiende a depender de validaciones manuales o redundancias operativas, en lugar de una señal clara y objetiva.

2.3 Pérdida de confiabilidad

La imposibilidad de diferenciar de manera consistente entre una señal verdadera y una interferencia provoca una pérdida progresiva de confiabilidad del sistema en su conjunto. En operaciones críticas de ductos, este aspecto es particularmente relevante, ya que la confiabilidad no solo se mide por “detectar algo”, sino por hacerlo de forma **precisa, repetible y verificable**.

Cuando la detección es incierta, la operación completa se vuelve más difícil de planificar: disminuye la capacidad de estimar tiempos, se generan dudas sobre el estado del pig, y se incrementa el riesgo de decisiones tardías o incorrectas. Esta pérdida de confiabilidad puede escalar desde un problema operativo hasta un problema de seguridad, especialmente cuando se

requiere confirmar el avance del pig para evitar bloqueos, demoras o incidentes durante maniobras de mantenimiento.

2.4 Limitaciones en la gestión energética

Otro desafío importante corresponde al consumo energético de los equipos de campo. En esquemas tradicionales, los dispositivos de detección suelen operar durante largos períodos sin una lógica clara de optimización, lo cual implica mantener sensores activos y sistemas de adquisición/transmisión funcionando de manera constante.

Este enfoque produce un consumo elevado de batería, especialmente en despliegues extensos o en entornos donde no existe alimentación permanente. Como consecuencia, el personal se ve obligado a realizar tareas adicionales como recambios de batería, revisiones periódicas y reubicación de dispositivos, agregando complejidad y costos al proceso general.

En escenarios reales, esta limitación energética también reduce flexibilidad operativa: si el equipo se queda sin energía en un tramo crítico, la operación pierde visibilidad y se debe recurrir nuevamente a métodos manuales o estimaciones sin datos en tiempo real.

2.5 Falta de integración (y ausencia de inteligencia operativa en tiempo real)

La falta de un sistema integrado que centralice la información representa una limitación clave. En el esquema tradicional, aun cuando existen múltiples puntos de medición, las señales no se gestionan de forma unificada ni se traducen en variables directamente útiles para la operación, tales como:

- velocidad del pig,
- estimación de tiempo de llegada,
- predicciones dinámicas,
- alertas tempranas,
- identificación de demoras anormales o potenciales obstrucciones.

Esta carencia de integración se traduce en una operación basada en confirmaciones puntuales (en lugar de monitoreo continuo) y con baja capacidad de anticipación. En consecuencia, se dificulta la coordinación logística, se incrementan los tiempos muertos y se limita el aprovechamiento de datos para mejorar futuras maniobras.

2.6 Alta demanda de personal en campo (mano de obra intensiva)

Finalmente, y como punto crítico complementario, la operación actual requiere una gran cantidad de personal en campo para garantizar el monitoreo efectivo durante una corrida de pigging. Esto implica que numerosos operarios deban estar distribuidos a lo largo del ducto, realizando tareas como:

- confirmación manual de pasajes,
- seguimiento del cronograma estimado,

- validación de lecturas dudosas,
- reposicionamiento de equipos,
- comunicación constante entre cuadrillas para coordinación.

Este uso intensivo de mano de obra no solo incrementa el costo directo de operación, sino que también reduce la eficiencia global, ya que recursos humanos altamente calificados terminan asignados a tareas repetitivas y de verificación, que podrían automatizarse o resolverse con monitoreo centralizado.

En este contexto, un sistema robusto y confiable de detección en tiempo real permite disminuir la dependencia de presencia constante en campo, liberando personal para tareas de mayor valor agregado, mejorando la seguridad operacional y optimizando los recursos disponibles en la gestión integral del ducto.

3. Desarrollo de la Solución

El desarrollo del sistema integral surgió como respuesta directa a las limitaciones históricas observadas en operaciones reales de pigging y scraping en cañerías subterráneas. En estos escenarios, la necesidad de detectar con precisión el pasaje del pig, conocer su velocidad y estimar su llegada a puntos críticos es esencial para asegurar la continuidad operativa, minimizar riesgos y optimizar recursos.

Sin embargo, los métodos tradicionales basados únicamente en detección electromagnética de frecuencia extremadamente baja han demostrado ser insuficientes para garantizar una operación robusta, especialmente en entornos con alta presencia de interferencias externas y condiciones de campo variables.

En este contexto, se diseñó una arquitectura completa que combina sensores de naturaleza distinta (electromagnéticos y acústicos), procesamiento local de señales, transmisión en tiempo real y una plataforma central en la nube capaz de validar eventos, estimar parámetros dinámicos y gestionar energéticamente el despliegue en campo.

3.1 Vulnerabilidad de la señal electromagnética

El canal electromagnético constituye el método clásico de detección del pasaje de pigs, debido a que los transmisores asociados suelen operar en frecuencias extremadamente bajas (alrededor de 22 Hz). Esta elección se fundamenta en la capacidad de la señal para atravesar materiales metálicos como acero al carbono y, al mismo tiempo, propagarse a través del suelo hasta profundidades aproximadas de dos metros.

No obstante, en condiciones reales de operación, esta ventaja se convierte también en una fuente de fragilidad: la misma banda de frecuencias está expuesta a una gran cantidad de perturbaciones externas. Tendidos eléctricos, maquinaria industrial, tránsito vehicular y actividad humana pueden introducir señales no deseadas o variaciones en el entorno electromagnético capaces de distorsionar lecturas.

En la práctica, esto impacta negativamente en dos aspectos clave:

- **Selectividad:** se dificulta distinguir la firma real del pig frente a señales externas.
- **Confiabilidad operativa:** se incrementa la probabilidad de falsas detecciones, obligando a validaciones manuales o redundancias de personal.

Por lo tanto, el diseño del sistema integral parte del reconocimiento de que un único canal de detección no resulta suficiente para garantizar robustez. Bajo esta premisa se decidió incorporar un segundo canal independiente de medición, que opere con un principio físico diferente y permita confirmar eventos con mayor certeza.

3.2 Diseño del sensor acústico

Para complementar la detección electromagnética, se desarrolló un sensor acústico diseñado específicamente para captar vibraciones asociadas al pasaje del pig o scraper dentro de la cañería.

El componente central del módulo acústico es un **micrófono de alta sensibilidad**, capaz de registrar vibraciones mecánicas transmitidas a través del terreno. A diferencia de un enfoque convencional que podría captar ruido ambiental superficial (viento, conversaciones, maquinaria cercana), el sistema se diseñó para priorizar la captura de vibraciones subterráneas relevantes, asociadas al movimiento del dispositivo dentro del ducto.

Para lograr esto, el micrófono se integra a una **clavija especialmente diseñada**, que se inserta en el suelo y cumple funciones esenciales:

- **Acople mecánico eficiente:** mejora la transmisión de vibraciones desde el terreno hacia el sensor.
- **Aislamiento relativo de interferencias externas:** al tomar contacto con capas más profundas, reduce el ruido superficial.
- **Repetibilidad de instalación:** permite que el operador pueda emplazar el sensor de manera consistente, manteniendo desempeño estable entre distintas mediciones.

Este diseño del sensor acústico no se plantea como reemplazo del canal electromagnético, sino como un mecanismo complementario de validación y redundancia. De este modo, incluso ante señales electromagnéticas ambiguas, el sistema cuenta con un segundo indicador objetivo que refuerza la confiabilidad final.

3.3 Integración multisensorial

La integración multisensorial constituye uno de los pilares fundamentales de la solución propuesta. El sistema combina de forma simultánea:

- una **bobina electromagnética** optimizada para operar en un rango típico de **15–30 Hz**,
- un **micrófono de alta sensibilidad** como canal acústico de vibración.

El enfoque multisensorial permite aprovechar las fortalezas de cada tecnología:

- la detección electromagnética aporta alcance y penetración en terreno,

- la detección acústica aporta un criterio físico distinto, menos dependiente de interferencias electromagnéticas.

Desde el punto de vista operativo, este enfoque mejora sustancialmente la robustez del sistema debido a que:

1. **Reduce falsos positivos:** un evento electromagnético aislado no se considera suficiente si no está acompañado por un patrón acústico compatible (o viceversa).
2. **Aumenta la certeza del evento:** la coincidencia temporal entre ambos canales refuerza la validación.
3. **Mejora la precisión del análisis:** múltiples puntos de detección confiable permiten estimar velocidad con menor error.

En otras palabras, la solución no depende de un único “indicador”, sino que utiliza confirmación cruzada, que es una estrategia ampliamente utilizada en sistemas críticos industriales donde la confiabilidad es prioritaria.

3.4 Procesamiento en la nube

Una vez adquiridas las señales en campo, el sistema contempla una arquitectura de procesamiento distribuido que divide responsabilidades entre hardware y software:

- **En campo:** los equipos realizan adquisición y preprocesamiento.
- **En la nube:** se realiza el análisis avanzado, correlación multisensorial, cálculo y visualización.

Los equipos de campo capturan las señales provenientes de ambos sensores y ejecutan un preprocesamiento inicial, que puede incluir filtrado básico y estructuración del dato antes de enviarlo. Este enfoque es importante porque permite:

- reducir el ruido “no útil” antes de transmitir,
- optimizar el uso de ancho de banda,
- disminuir consumo energético asociado a procesamiento excesivo o transmisión continua.

Posteriormente, los datos se envían **en tiempo real** mediante comunicación satelital hacia la plataforma central (dashboard web). Allí, el sistema aplica modelos matemáticos que permiten:

- **validar detecciones** mediante reglas o correlaciones entre canales,
- **calcular velocidad del pig/scraper** al contrastar tiempos de paso entre estaciones,
- **estimar tiempos de llegada** a nuevos puntos del ducto,
- **anticipar desvíos operativos** tales como desaceleraciones anómalas o posibles obstrucciones.

Además, centralizar el procesamiento en la nube habilita escalabilidad: múltiples estaciones desplegadas en campo pueden operar simultáneamente y reportar a un único sistema de control, generando trazabilidad completa de la corrida.

3.5 Optimización energética

En operaciones reales, especialmente sobre ductos extensos o ubicados en áreas remotas, la autonomía energética resulta determinante. Un sistema que funcione de manera continua durante largos períodos sin criterio de activación puede consumir batería de forma rápida y obligar a recambios frecuentes, lo cual incrementa costos logísticos y complejidad operativa.

Para resolver este problema, el sistema integral incorpora una lógica de optimización energética gestionada desde el dashboard web. El objetivo es operar bajo el principio de “activación inteligente”, es decir:

- maximizar probabilidad de detección en ventanas relevantes,
- minimizar consumo en períodos donde no se espera un evento.

En particular, el dashboard implementa algoritmos que determinan **ventanas de tiempo críticas** donde es más probable que ocurra el pasaje del pig. En esas ventanas se habilita adquisición y monitoreo intensivo, mientras que fuera de ellas el equipo puede entrar en modos de menor consumo.

Este enfoque aporta beneficios directos:

- **extiende significativamente la vida útil de batería,**
- **reduce adquisición innecesaria de señales,** evitando registrar grandes volúmenes de ruido,
- **mejora confiabilidad global,** ya que el sistema concentra recursos donde se maximiza valor operativo.

Como resultado, la solución se vuelve más viable para despliegues prolongados, permite planificar mejor el soporte de campo y reduce la dependencia de intervención manual constante.

4. Descripción del Producto Final

La solución propuesta se materializa como un sistema integral orientado a operación en campo, compuesto por dos componentes principales: (i) un conjunto de equipos de detección portátiles desplegables en terreno y (ii) una plataforma de monitoreo basada en la nube accesible mediante un dashboard web. Esta arquitectura fue diseñada considerando las condiciones reales de trabajo en ductos subterráneos, donde las limitaciones de acceso, la variabilidad ambiental y la logística operativa imponen requerimientos de confiabilidad, autonomía y facilidad de instalación.

La integración de ambos subsistemas permite ejecutar un flujo completo de adquisición–procesamiento–visualización, asegurando que el monitoreo del pig o scraper no dependa únicamente de inspecciones manuales aisladas, sino de un esquema de control continuo con análisis en tiempo real.

4.1 Equipos de campo

El componente de campo se implementa como un **dispositivo electrónico portátil en formato maletín**, pensado para facilitar el transporte, despliegue y operación por parte del personal técnico. La decisión de encapsular la solución en un maletín responde a una necesidad práctica: permitir que el sistema sea utilizado en diferentes tramos del ducto, sin requerir infraestructura fija, y garantizando un set de sensores y electrónica protegidos frente a condiciones ambientales adversas.

El maletín integra los siguientes módulos:

a) Sensor electromagnético (bobina 15–30 Hz)

El sistema incluye una bobina electromagnética optimizada para capturar señales asociadas al transmisor del pig/scraper. El rango de 15–30 Hz permite captación efectiva en entornos enterrados, manteniendo compatibilidad con el esquema tradicional de detección de baja frecuencia, pero mejorando su uso dentro de un contexto multisensorial. Este canal aporta alcance y capacidad de atravesar materiales metálicos y el suelo, siendo clave en ductos enterrados.

b) Sensor acústico: micrófono de alta sensibilidad con clavija mecánica

El equipo incorpora un micrófono de alta sensibilidad montado sobre una clavija mecánica diseñada para ser insertada en el terreno. Este diseño no solo facilita la instalación en diferentes puntos del trazado, sino que mejora el acoplamiento físico con vibraciones subterráneas. El objetivo de este subsistema es capturar variaciones mecánicas asociadas al pasaje del pig/scraper como fuente alternativa de validación, aportando robustez frente al ruido electromagnético.

c) Unidad de procesamiento local (microprocesador de bajo consumo)

El hardware incluye un microprocesador de bajo consumo con capacidad suficiente para ejecutar preprocesamiento de señales antes del envío. Esto permite reducir volumen de datos, filtrar lecturas no relevantes y estructurar información de manera eficiente para su posterior análisis en la nube. Además, el procesamiento local reduce la dependencia de conectividad constante para tareas básicas, y contribuye al ahorro energético global del sistema.

d) Comunicación satelital para transmisión en tiempo real

Una característica clave del diseño es la capacidad de transmitir datos hacia la nube mediante comunicación satelital. Esta decisión tecnológica permite operar incluso en zonas sin conectividad convencional o con baja disponibilidad de redes celulares, lo cual es frecuente en tramos extensos o remotos de ductos. La comunicación en tiempo real habilita monitoreo centralizado, disminuyendo la necesidad de personal en campo realizando confirmaciones manuales continuas.

e) GPS integrado para geoposicionamiento y trazabilidad

Cada unidad incluye GPS integrado con el fin de registrar y transmitir la posición geográfica de la estación. Esto resulta fundamental para asegurar trazabilidad operativa, asociar mediciones a puntos reales del ducto y permitir que el dashboard represente eventos de manera contextualizada. Además, el geoposicionamiento facilita auditoría posterior de la corrida y mejora la coordinación entre equipos y operadores.

En conjunto, el equipo de campo actúa como una estación de monitoreo autónoma, portable y escalable: pueden desplegarse múltiples maletines en distintos puntos del ducto, generando una red distribuida de detección y seguimiento.

4.2 Dashboard Web (plataforma de monitoreo en la nube)

El segundo componente del producto final es una plataforma digital basada en un **dashboard web**, cuya función principal es centralizar, analizar y presentar en forma unificada la información proveniente de los equipos desplegados en campo. La plataforma se concibe no solo como un visor, sino como un núcleo de inteligencia operativa que habilita decisiones en tiempo real.

Entre sus principales capacidades se incluyen:

a) Centralización de señales y monitoreo en tiempo real

El dashboard recibe la información transmitida por los equipos y la organiza en un esquema centralizado. Esto elimina la dispersión de datos típica de operaciones tradicionales (lecturas puntuales aisladas), habilitando una visualización continua del estado de la corrida. A nivel operativo, esto permite que equipos de supervisión puedan seguir el avance del pig/scraper con menor dependencia de confirmaciones manuales.

b) Validación multisensorial mediante modelos matemáticos

La plataforma incorpora modelos de validación que correlacionan información electromagnética y acústica para confirmar eventos. Este enfoque reduce falsos positivos y permite diferenciar con mayor precisión entre señal útil y ruido ambiental. La validación multisensorial constituye el criterio central para transformar las señales medidas en “eventos confiables” de pasaje.

c) Cálculo de velocidad y predicción de llegada

Una vez confirmados los eventos de pasaje en distintas estaciones, el dashboard permite calcular velocidad del pig/scraper y proyectar tiempos de llegada a puntos posteriores del ducto. Esta capacidad introduce un cambio importante: la operación deja de basarse en estimaciones estáticas o experiencia previa, y pasa a utilizar datos dinámicos en tiempo real que mejoran planificación y coordinación.

d) Estimación de fin de maniobras y detección de anomalías

Además de estimar tiempos, el sistema puede ayudar a identificar patrones asociados a posibles demoras, reducciones anómalas de velocidad o condiciones que podrían indicar obstrucción. Esto permite introducir alertas tempranas y reducir tiempos de respuesta ante eventos críticos, mejorando la seguridad y disminuyendo riesgos operativos.

e) Gestión energética de equipos en campo

Una capacidad diferencial del dashboard es la implementación de algoritmos que permiten administrar el encendido/apagado o modos de operación de los equipos en campo, activándolos en ventanas críticas. Esta funcionalidad mejora la autonomía general del despliegue y reduce el consumo innecesario durante intervalos en los que no se espera pasaje del pig.

f) Reportes completos por corrida e integración con sistemas del cliente

Finalmente, la plataforma genera reportes completos que documentan la corrida, el comportamiento del pig, los tiempos, las detecciones validadas y los resultados obtenidos. Este

reporte puede ser integrado en sistemas del cliente, aportando trazabilidad, evidencia operativa y material útil tanto para auditoría como para análisis posterior de desempeño del ducto

5. Resultados y Beneficios

La implementación del sistema integral propuesto, compuesto por equipos portátiles de campo y una plataforma web de monitoreo centralizado en la nube, permitió transformar el enfoque operativo tradicional de las maniobras de pigging y scraping en ductos subterráneos. Al incorporar detección multisensorial y análisis en tiempo real, el sistema mejora notablemente la calidad de información disponible durante la corrida, reduciendo incertidumbre, aumentando confiabilidad y habilitando una operación más controlada y eficiente.

Uno de los beneficios más relevantes observados es la mejora directa de la **eficiencia operativa**, principalmente debido a la **reducción de la necesidad de personal desplegado en campo**. En escenarios tradicionales, la baja confiabilidad de la detección obliga a utilizar numerosos operarios distribuidos a lo largo del ducto para validar manualmente eventos, confirmar pasajes y coordinar acciones en base a estimaciones aproximadas. En cambio, con el sistema propuesto, la centralización de datos y la validación multisensorial permiten confirmar el pasaje del pig o scraper con mayor certeza, disminuyendo la dependencia de controles manuales constantes y liberando recursos humanos para tareas de mayor valor agregado.

En particular, el monitoreo en tiempo real mediante el dashboard web mejora la coordinación operativa y reduce tiempos muertos, ya que el avance del pig puede ser seguido y estimado con mayor precisión. El cálculo de velocidad y la predicción de llegada permiten planificar acciones con anticipación, evitando el despliegue innecesario de cuadrillas completas únicamente para “esperar confirmación” del pasaje. Esto no solo impacta positivamente en costos de mano de obra, sino también en logística, traslados, tiempos improductivos y exposición de personal en terreno, lo que en conjunto contribuye a una operación más eficiente y segura.

Adicionalmente, la mayor confiabilidad lograda en detección, gracias al uso combinado de sensores electromagnéticos y acústicos, reduce drásticamente la ocurrencia de falsos positivos. Esto disminuye la carga operativa de verificaciones repetidas y minimiza la toma de decisiones bajo incertidumbre, un factor crítico cuando se operan ductos extensos o en zonas con alto nivel de interferencias externas. Como consecuencia, los eventos registrados adquieren mayor credibilidad y el equipo operativo puede concentrarse en ejecutar la maniobra con menos interrupciones y mayor previsibilidad.

Por último, la gestión energética inteligente incorporada en el sistema también se traduce en eficiencia operativa. Al habilitar el encendido de los equipos únicamente en ventanas críticas de tiempo, se incrementa la autonomía de las estaciones desplegadas, reduciendo intervenciones logísticas en campo tales como cambios de baterías o reposicionamiento frecuente. Este aspecto vuelve al sistema especialmente competitivo en operaciones prolongadas, en ductos largos y en escenarios remotos, donde el costo de sostener personal y equipamiento activo durante toda la corrida resulta significativamente alto.

En conjunto, la solución desarrollada no solo mejora la confiabilidad técnica del monitoreo, sino que genera un impacto concreto en la productividad: permite realizar corridas con mejor control,

menos dependencia de mano de obra intensiva y una asignación más eficiente del personal, habilitando un uso más inteligente de recursos dentro de la operación de mantenimiento y gestión de ductos.

6. Discusión

La problemática central abordada en este trabajo surge de una limitación ampliamente conocida en operaciones de pigging y scraping dentro de ductos enterrados: la detección basada exclusivamente en señales electromagnéticas de frecuencia extremadamente baja ofrece la ventaja de atravesar acero y suelo, pero al mismo tiempo presenta una elevada vulnerabilidad frente a interferencias externas. Esta condición reduce la confiabilidad del proceso, incrementa la probabilidad de falsos positivos y obliga a sostener una operación altamente dependiente de verificaciones manuales, lo cual afecta tanto los costos como la eficiencia operativa general.

En este contexto, la propuesta desarrollada se apoya en un concepto fundamental de ingeniería aplicada a sistemas críticos: la redundancia basada en fenómenos físicos independientes. La incorporación de un canal acústico mediante un micrófono de alta sensibilidad permite obtener una fuente alternativa de evidencia del pasaje del pig o scraper, aportando robustez frente a ruidos electromagnéticos del entorno. La validación cruzada entre ambos canales no solo incrementa la certeza de detección, sino que también reduce la carga de trabajo asociada a la interpretación manual de señales ambiguas.

Por otro lado, la decisión de implementar procesamiento distribuido, con preprocesamiento local en campo y análisis avanzado en la nube, introduce ventajas operativas relevantes. En primer lugar, permite escalar el sistema a múltiples puntos del ducto sin necesidad de aumentar la complejidad del hardware individual. En segundo lugar, habilita capacidades de cálculo que son directamente útiles para operación, como la estimación de velocidad, predicción de tiempos de llegada y detección de posibles anomalías, transformando señales crudas en información accionable. De esta manera, el sistema deja de ser un “registrador de eventos aislados” para convertirse en una herramienta activa de soporte a decisiones.

Un aspecto adicional de gran impacto es la mejora en eficiencia operativa por reducción de personal en campo. Históricamente, la falta de información confiable en tiempo real obliga a desplegar grandes cuadrillas para cubrir tramos extensos del ducto y confirmar manualmente pasajes. Con el sistema integral propuesto, la operación puede centralizarse y supervisarse de manera remota con mayor precisión, disminuyendo la necesidad de sostener tanta mano de obra en terreno. Esto libera recursos humanos que pueden reasignarse a tareas de mayor valor agregado dentro del mantenimiento y operación de infraestructura crítica, mejorando productividad y reduciendo tiempos improductivos asociados a logística y espera.

Finalmente, la optimización energética implementada en los equipos de campo representa una ventaja clave en escenarios reales, donde el monitoreo se extiende en el tiempo y los equipos se encuentran en ubicaciones remotas. La activación inteligente por ventanas críticas disminuye el consumo innecesario, reduce intervenciones logísticas como recambios de batería y mejora la disponibilidad general del sistema durante toda la corrida. En conjunto, el desarrollo presentado equilibra confiabilidad, escalabilidad y sustentabilidad operativa, abordando simultáneamente desafíos técnicos y organizacionales propios del monitoreo de ductos.

7. Conclusiones

En este trabajo se presentó un sistema inteligente de monitoreo en tiempo real orientado a la detección del pasaje de pigs y scrapers en ductos subterráneos. La solución desarrollada responde a limitaciones críticas observadas en metodologías tradicionales, particularmente aquellas asociadas al uso exclusivo de señales electromagnéticas de baja frecuencia que, si bien atraviesan acero y suelo, resultan altamente sensibles a interferencias externas y generan falsos positivos que degradan la confiabilidad operativa.

Como principal aporte, el sistema integra detección multisensorial mediante un canal electromagnético complementado por un canal acústico basado en micrófono de alta sensibilidad. Esta arquitectura mejora sustancialmente la robustez de detección al permitir validación cruzada de eventos, disminuyendo la dependencia de interpretaciones manuales y reduciendo la incertidumbre durante la operación. En simultáneo, la transmisión en tiempo real hacia una plataforma web en la nube habilita el cálculo de velocidad, la predicción de tiempos de llegada y la generación de reportes completos por corrida, transformando datos de campo en información directamente útil para supervisión y toma de decisiones.

Un resultado de alto impacto operativo se refleja en la mejora de eficiencia general del proceso, principalmente debido a la reducción de la necesidad de personal desplegado en campo. Al contar con monitoreo centralizado y mayor confiabilidad en los eventos detectados, disminuye la necesidad de cuadrillas numerosas distribuidas a lo largo del ducto únicamente para confirmación manual. Esto se traduce en una operación más ágil, con menores costos logísticos y con posibilidad de reasignar recursos humanos hacia tareas de mayor valor agregado.

Además, la incorporación de gestión energética inteligente mediante ventanas críticas de operación permite prolongar autonomía de los equipos de campo, mejorando la viabilidad del despliegue en ductos extensos y zonas remotas. En conjunto, la solución presentada representa un avance significativo en la gestión de infraestructura crítica, incrementando confiabilidad, seguridad y eficiencia, y estableciendo una base sólida para futuras extensiones hacia analítica avanzada, alarmas predictivas y automatización de operaciones basadas en condición.

Breve Cv, según modelo:

- Amadeo Agustín Sasía es Ingeniero Electrónico egresado de la Universidad Nacional de Córdoba. Desarrolló su carrera como investigador y desarrollador en el campo de la Resonancia Magnética Nuclear, participando y liderando proyectos tecnológicos en colaboración con Shell e YPF, con foco en investigación aplicada e innovación para la industria energética. Desde 2013 es socio fundador de Edge SA, empresa de base tecnológica especializada en soluciones para la industria del Oil & Gas. Allí impulsa desarrollos en data analytics, sistemas de telemetría propios, mediciones en campo y soluciones integrales de comunicaciones industriales, particularmente satelitales. Asimismo, la compañía es especialista en sistemas de inyección de químicos para aseguramiento de flujo, integrando tecnología, automatización y análisis de datos para optimizar la eficiencia operativa y la toma de decisiones en campo.

- Bruno Bocchino es Ingeniero en Petróleo egresado del Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA) con más de diez años de experiencia en la industria de Oil & Gas. A lo largo de su carrera ha ocupado posiciones técnicas y de liderazgo en Pan American Energy y Vista Energy, consolidando una sólida trayectoria en producción, reservorios y operaciones de workover. Actualmente se desempeña como Líder del equipo de Aseguramiento de Flujo en Vista Energy, donde dirige proyectos estratégicos, con enfoque en tecnología e innovación, y equipos multidisciplinarios en la Cuenca Neuquina, con foco en eficiencia operativa, continuidad productiva y generación de valor.
- Mariano Martín Lastra es Ingeniero Civil recibido de la Universidad Nacional del Comahue, con experiencia en logística y servicios varios. Actualmente se desempeña como Ingeniero de Integridad de Ductos en Medeatec, con dedicación exclusiva para el proyecto de VISTA Energy.