

INTEGRACIÓN DE UNIDADES DE MAPEO INERCIAL EN HERRAMIENTAS DE LIMPIEZA EN EL OLEODUCTO DE LOS LLANOS ORIENTALES (ODL) PARA LA GESTION PROACTIVA DE AMENAZAS GEOLÓGICAS.

Leonardo Mendoza², John Jordan², Jon Hernandez¹, Orly Alvao¹

¹ODL, Bogotá, Colombia

²ROSEN Group, Bogotá, Colombia

orly.alvao@odl.com.co

jjvalderrama@rosen-group.com

1. Sinopsis

La empresa ODL gestiona un oleoducto vital en los departamentos colombianos de Meta y Casanare, que abarca 260 kilómetros. Adicionalmente ODL gestiona la integridad dos oleoductos, uno de 483 km que atraviesa los departamentos de Boyacá, Antioquia y Córdoba. El otro tiene 230 Km. Estos oleoductos enfrentan desafíos debido a las amenazas geológicas que podrían comprometer su operación segura. Para mitigar estos riesgos, ODL ha implementado el Sistema Integral de Aseguramiento de Oleoductos (SIAD), que utiliza tecnologías como la fibra óptica, mediciones del flujo del río, sobrevuelos con drones y mapeo inercial con herramientas de inspección en línea (ILI). A pesar de la implementación de estas medidas, la frecuencia de inspecciones ILI es limitada, realizándose cada cinco años o más, lo que dificulta la detección oportuna de cambios en la tubería tras eventos geológicos o climáticos.

Para abordar esta limitación, ODL ha integrado una nueva tecnología en su estrategia: una unidad de mapeo inercial dentro de una herramienta de limpieza de oleoductos. Esta innovación permite un monitoreo más frecuente y temprano de la posición del oleoducto y el análisis de deformaciones por curvatura.

Los resultados de la implementación de esta nueva tecnología ha demostrado una buena trazabilidad de los datos inerciales, identificando dos zonas de deformación por curvatura de alta prioridad y que representan una amenaza para la integridad de las tuberías. Una de estas zonas muestra un movimiento constante desde 2011, mientras que la otra presenta un leve cambio en la trayectoria horizontal desde entonces. Esta tecnología ha permitido identificar áreas potencialmente activas de movimiento en uno de los oleoductos y diferenciar secciones estables de inestables, lo que facilita la planificación de acciones de mitigación.

En resumen, la integración de esta tecnología mejora considerablemente la gestión de amenazas geológicas y la operación segura de los oleoductos que gestiona ODL. Este avance en el monitoreo y la mitigación de riesgos geológicos proporciona una mayor seguridad operativa y mejora la capacidad de respuesta ante posibles eventos adversos. La implementación de esta nueva tecnología en la estrategia de ODL representa un avance significativo en la gestión de riesgos, asegurando una operación más segura y eficiente de los oleoductos.

En conclusión, la incorporación de la unidad de mapeo inercial dentro de las herramientas de limpieza de los oleoducto que gestiona ODL ha mejorado notablemente la detección y mitigación de riesgos geológicos, brindando mayor seguridad operativa y capacidad de respuesta ante eventos adversos.

2. Introducción

Para entender la importancia del monitoreo del movimiento de tuberías mediante los resultados de las inspecciones con mapeo inercial es importante entender el funcionamiento y proceso de evaluación de esta información, a continuación se describe los pasos relevantes

Proceso de Evaluación.

La unidad de mapeo inercial IMU que se adapta en una herramienta de limpieza recopila principalmente datos de dos componentes, registro de tiempo y datos inerciales. Los datos de aceleración son recolectados por tres acelerómetros (lineales) y tres giroscopios (rotacionales), los cuales proveen seis grados de libertad definidos por un sistema de coordenadas cartesianas. Al medir las aceleraciones y el tiempo en un incremento de distancia dado, se pueden calcular las deformaciones por flexión y el movimiento del oleoducto. En este nuevo desarrollo tecnológico no se ha integrado odometría; por lo tanto, no existe un registro de distancia dentro de los datos recopilados por la herramienta. Para superar este desafío, los datos IMU se alinean con un sistema de distancia maestro perteneciente a un conjunto de datos con un registro de distancia integrado, es decir una línea base preexistente. Este proceso es similar a los métodos de alineación típicos utilizados al comparar características entre dos oleoductos. La diferencia principal radica en que las señales IMU se utilizan para alinear los datos.

Procesamiento de los datos y alineación.

El proceso de alinear los datos de la plataforma IMU con una línea base es relativamente sencillo. Los datos IMU son revisados por el analista y se alinean utilizando patrones de señal conocidos de ciertas características dentro del oleoducto. Una vez que se completa la alineación, se recalculan los valores de inclinación y azimut, y el conjunto de datos se navega desde el lanzador hasta el receptor. Si ciertos segmentos del oleoducto se desplazan significativamente según la realineación, las magnitudes y ubicaciones de las deformaciones por curvatura recalculadas serán diferentes. Para tener esto en cuenta, se corrigen desplazamientos localizados con una alineación secundaria. Una vez completado, el conjunto de datos se puede utilizar para realizar análisis completos de deformaciones por curvatura y movimientos del oleoducto.

Una ventaja de este proceso es que no es necesario realizar una navegación completa del oleoducto para llevar a cabo una evaluación de deformaciones por curvatura o movimientos del oleoducto. Un aspecto de este tipo de análisis es que las deformaciones y desviaciones son relativamente independientes de la posición geoespacial. Un analista solo se preocupa por los cambios incrementales en las deformaciones por curvatura y las desviaciones locales del oleoducto para realizar una evaluación completa y precisa.

Deformaciones por Curvatura

Influencias externas como eventos climáticos extremos, hidrología subterránea, asentamientos y actividad de construcción pueden provocar el desplazamiento de un oleoducto desde su posición original de construcción e inducir una tensión de flexión en el cuerpo del tubo. A magnitudes elevadas, las deformaciones por curvatura pueden provocar la deformación plástica de un oleoducto y comprometer la integridad de las soldaduras longitudinales y circunferenciales.

Calcular y comprender las deformaciones por curvaturas presentes en un oleoducto es fundamental para determinar la integridad general del sistema.

Al calcular las deformaciones por curvatura en todo un oleoducto, es razonable suponer que el cuerpo del tubo está compuesto por un material homogéneo y que la sección transversal del tubo es simétrica. Basándose en estas suposiciones, cuando se dobla un tubo, un lado experimentará compresión mientras que el otro lado experimentará tensión. Los valores máximos tanto de tensión como de compresión se producirán en las fibras más externas del cuerpo del tubo. La deformación por curvatura será igual a cero a lo largo del eje neutro, que es ortogonal al plano de curvatura.

En 1994, Czyz y Adams definieron un método determinista para calcular la deformación por curvatura inducida en un oleoducto utilizando datos de actitud diferencial [1]. En un punto instantáneo del tubo, primero se establece un sistema de coordenadas local con el plano vertical que pasa por el centro del tubo y el plano horizontal orientado perpendicular al plano vertical. La curvatura solo se considera en un plano ortogonal a la sección transversal del tubo. En este caso, siempre habrá un plano vertical que sea tangente a la línea central del tubo. Sin embargo, el plano horizontal no contendrá necesariamente el vector tangente a la línea central del tubo (esto solo ocurre cuando el tubo es horizontal). En cambio, el plano de curvatura horizontal estará inclinado a través de un ángulo igual al valor de la inclinación. Para compensar esto, la curvatura horizontal instantánea se define como la proyección del vector de curvatura en el plano horizontal, de ahí la multiplicación de la magnitud bruta de la curvatura horizontal por el coseno de la inclinación, con estos parámetros es posible calcular las curvaturas horizontal y vertical en cualquier punto de la tubería, posteriormente se calcula la máxima deformación por curvatura en cada componente (horizontal y vertical).

Una vez calculadas las deformaciones por curvatura, es posible realizar un análisis en busca de anomalías (según criterios establecidos), identificar interacciones de deformación con accesorios del tubo y comparar las deformaciones calculadas con las de conjuntos de datos adicionales para determinar la probabilidad de movimiento del oleoducto.

Movimiento de Tubería.

Las desviaciones en el oleoducto se pueden cuantificar comparando las trayectorias de dos oleoductos en un intervalo de distancia especificado [2]. Por lo general, estas trayectorias se derivan utilizando las coordenadas este, norte y elevaciones generadas una vez que se ha navegado completamente la línea. Sin embargo, debe aplicarse un enfoque diferente a los datos parcialmente navegados de una plataforma IMU debido a los efectos del ruido y el desplazamiento en el conjunto de datos. La auto consistencia de la aceleración, el cambio angular, la deformación por curvatura y la trayectoria se pueden aprovechar para calcular la desviación de la trayectoria directamente utilizando el paso incremental, la azimuth y la distancia.

3. Desarrollo

El proceso de integración de unidades de mapeo inercial en herramientas de limpieza fue desarrollado de la siguiente manera:

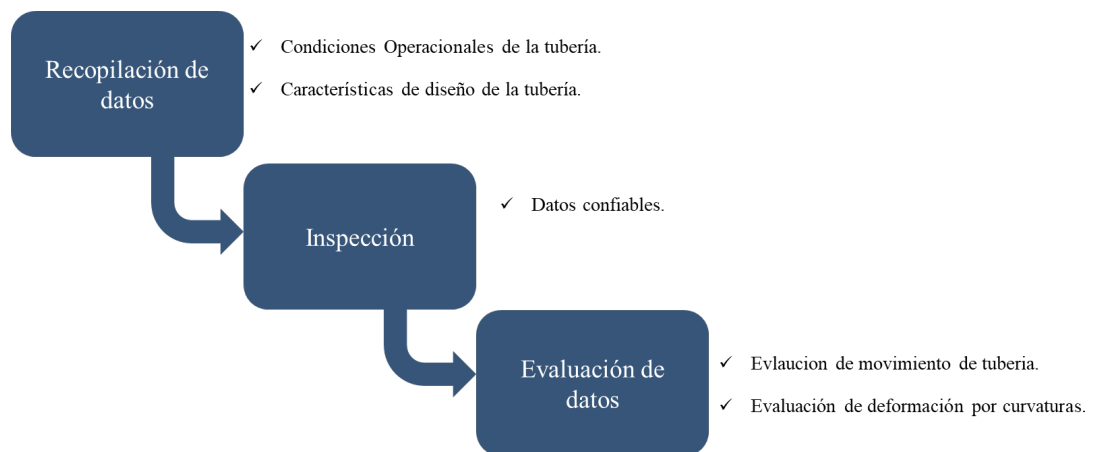


Gráfico 1. Proceso de inspección con unidad de mapeo integrada en herramienta de limpieza.

Recolección de Datos

Se recopiló información técnica y operativa del oleoducto, junto con los datos de la navegación que se utilizaron como línea base. Este oleoducto atraviesa extensos valles seguidos de montañas de altitud media y baja sobre suelos poco consolidados.

Inspección

Utilizando los datos técnicos recolectados (espesor, diámetros, condiciones operativas, etc.), se definió la configuración para realizar las inspecciones con la herramienta de limpieza, integrando la unidad de mapeo inercial. Antes de esto, se realizó una calibración para asegurar que no hubiera restricciones que dificultaran el paso de la herramienta de la limpieza. Se realizaron dos inspecciones con esta herramienta en Julio de 2023 y Noviembre de 2023.



Fotografía 1. Herramienta de limpieza de tuberías con unidad de mapeo integrada.

Evaluación de Datos

Después de recibir la herramienta de limpieza con la unidad de mapeo integrada, confirmando el éxito de cada inspección, se procedió a procesar datos. Con esta información se realizó la evaluación de las áreas de movimiento del oleoducto y las áreas de deformación por curvatura. Se usaron los siguientes criterios para reportar las áreas de movimiento del oleoducto, considerando la comparación entre dos inspecciones:

- ✓ Que la diferencia en la deformación por curvatura entre las dos inspecciones fuera $\geq 0.04\%$.
- ✓ Que el movimiento calculado del oleoducto fuera ≥ 0.2 m.
- ✓ Que la deformación por curvatura asociada con la dirección del movimiento mostrara un patrón característico de transición de deformación.
- ✓ Que la longitud del movimiento fuera mayor que una junta (es decir, 12 - 18 m).

Resultados.

Los resultados de las inspecciones realizadas en Julio de 2023 y Noviembre de 2023 detectaron las siguientes zonas de movimiento de tubería (se usó como con línea base una inspección ILI realizada en Diciembre de 2021):

Pipeline Movement Listing				
Anomaly No.	Anomaly	Max Pipeline Movement [m.]	Max Strain Difference [%]	Comment
PLMM #120660	Pipeline Movement	0.304 $\pm$ 0.20	0.080	downwards pipeline movement combined with bends
PLMM-AOI #121540	Area of Interest	-	0.075	combined with bends
PLMM-AOI #181790	Area of Interest	-	0.057	associated with BSTR #181790
PLMM-AOI #193280	Area of Interest	-	0.071	combined with bends

Tabla 1. Zonas de movimiento de tubería detectadas en las dos inspecciones.

Estas cuatro zonas de movimiento de tubería no representan una amenaza importante para tomar una acción correctiva de manera inmediata en estas zonas.

Los resultados de la evaluación permitieron identificar 110 zonas de deformación por curvatura, de las cuales dos zonas representan una amenaza importante para la integridad de la tubería.

Bending Strain Anomaly Number	Anomaly Type	Length [m]	Max Bending Strain [%]	Acceptability	Selected for Geohazard Review	Priority Nov 2022
BSTR #198460	Bending Strain	57.192	0.239	Unacceptable	Yes	P1
BSTR #238400	Bending Strain	55.690	0.232	Unacceptable	Yes	P1

Tabla 2. Zonas de deformación por curvatura con alta prioridad.

Zona de deformación por curvatura #198460



Imagen No 1. Zona de deformación por curvatura # 198460

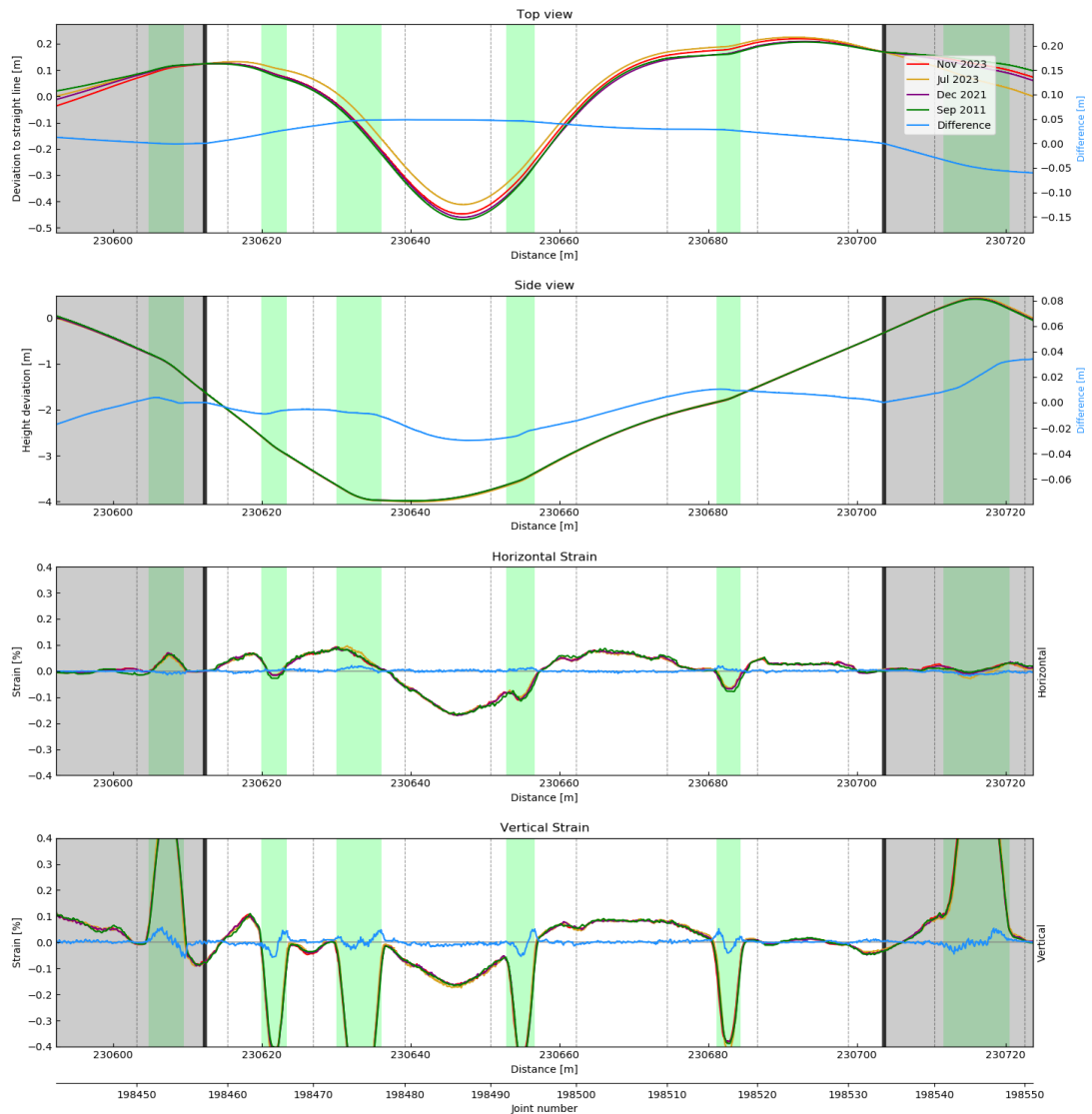


Imagen No 2. Vista planta, perfil del desplazamiento de la tubería y perfil de porcentajes de deformación horizontal y vertical de la zona de deformación por curvatura # 198460

La deformación máxima reportada de 0.239% es una curvatura horizontal hacia la izquierda con un componente de hundimiento vertical en la distancia de registro 230646.101 m. La deformación máxima excede el límite de deformación compresiva calculado basado en el espesor de la pared reportado durante la inspección ILI de 2021 que fue usada como línea base. Hay una desviación horizontal notable hacia la derecha de 500 mm a lo largo de ~50 m coincidente con la ubicación de la deformación máxima. El perfil del oleoducto y de la deformación son típicos de una carga de desplazamiento.

La trayectoria horizontal parece indicar un cambio muy leve en la dirección de la pendiente entre las inspecciones de julio de 2023 y noviembre de 2023. Sin embargo, los datos de julio de 2023 muestran una ligera desviación con respecto a los otros perfiles medidos, probablemente debido a la dinámica de la herramienta.

Esta área ha sido asignada una alta prioridad debido a los siguientes motivos:

- i) Hay una desviación horizontal en la dirección de la pendiente;
- ii) La inestabilidad activa adyacente a esta ubicación;
- iii) La deformación máxima excede el límite de deformación compresiva.

Con base en estos se resultados se contemplan las siguientes recomendaciones específicas para esta ubicación:

1. Realizar una verificación de campo del sitio para caracterizar la naturaleza de las pendientes existentes y la presencia de cualquier característica de inestabilidad en el derecho de vía a través de la colina. Esto implica un mapeo geomorfológico detallado del sitio para definir la naturaleza, extensión y estado de actividad de cualquier inestabilidad en desarrollo.
2. Verificar la disponibilidad de imágenes LiDAR para esta ubicación y extenderse 250 m a cada lado del derecho de vía. Si no están disponibles, considerar la adquisición de estos datos.
3. Instalar inclinómetros y piezómetros para monitorear la estabilidad y el movimiento de la pendiente. Las ubicaciones de estos instrumentos deben basarse en los resultados del mapeo realizado en la recomendación 1.
4. Realizar cálculos de la respuesta del oleoducto a la carga del deslizamiento de tierra. Esto proporcionará:
 - a. Una evaluación completa de la aceptabilidad de la integridad actual del oleoducto, incluyendo la contribución de las fuerzas axiales y también las cargas circunferenciales.
 - b. El desarrollo previsto de futuras cargas en el oleoducto que está vinculado a movimientos adicionales de inestabilidad, lo que permite establecer la integridad a partir de las mediciones de la pendiente en la recomendación 3. Esto proporciona un marco para determinar cuándo se requiere intervención.

Por la amenaza que esta zona representa para integridad de la tubería se planea realizar la implementación de estas recomendaciones en un periodo no mayor a doce meses.

Zona de deformación por curvatura #238400



Imagen No 3. Zona de deformación por curvatura #238400

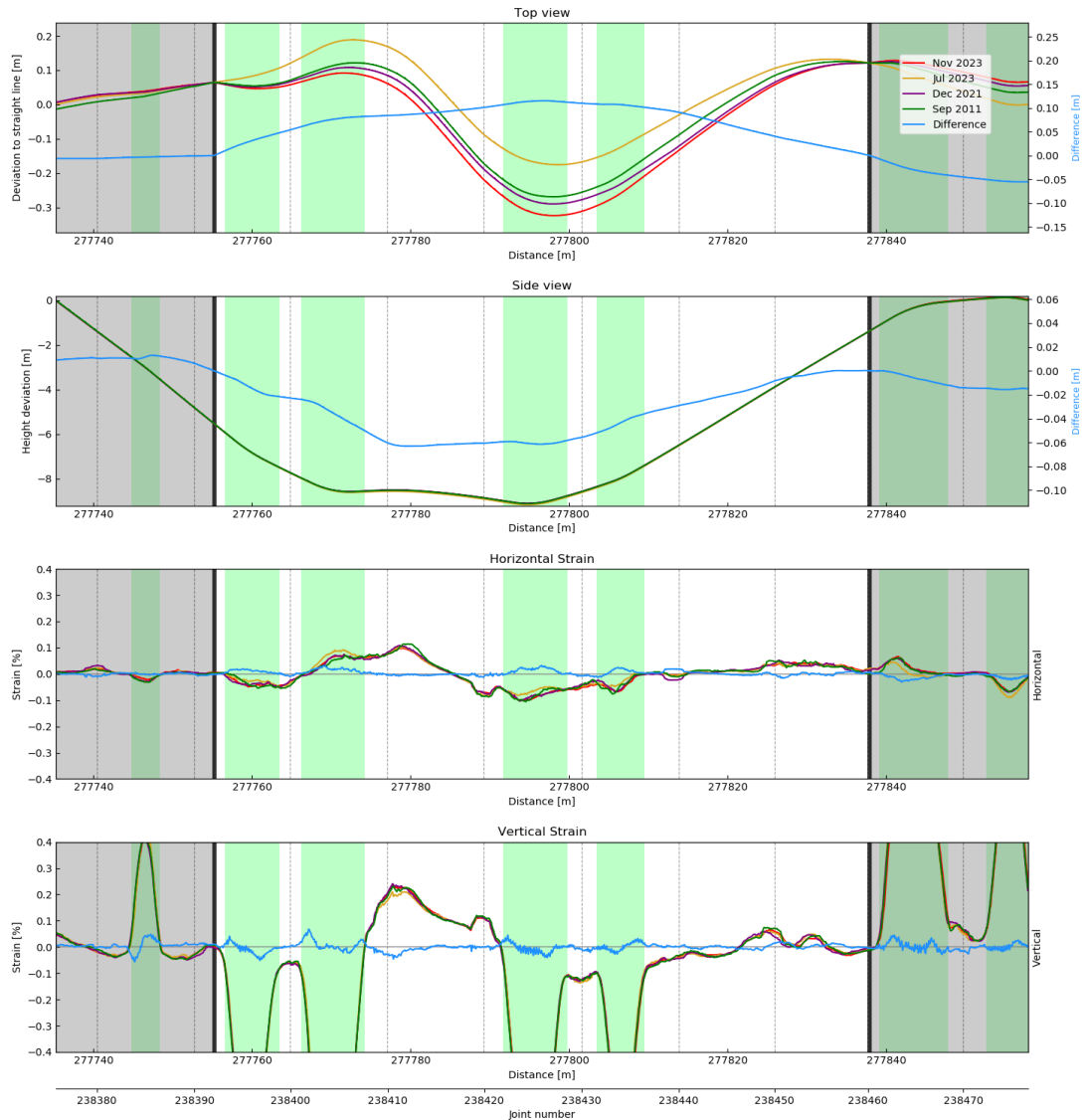


Imagen No 4. Vista planta, perfil del desplazamiento de la tubería y perfil de porcentajes de deformación horizontal y vertical de la zona de deformación por curvatura # 238400

La máxima deformación reportada de 0.232% es una flexión vertical excesiva con una ligera flexión horizontal hacia la derecha en la distancia de registro 277779.176 m. La máxima deformación se encuentra aguas abajo de una curva de campo con un componente de flexión horizontal hacia la derecha mínimo. La deformación máxima excede el límite calculado de deformación compresiva basado en el espesor de la pared reportado durante la inspección ILI realizada en 2021 que fue usada como línea base.

Hay una diferencia muy leve en la trayectoria horizontal hacia la derecha entre las inspecciones de 2021 y noviembre de 2023. La desviación horizontal fuera de la rectitud y el desplazamiento indicado del oleoducto después de 2021 están en dirección descendente. La desviación horizontal

fuera de la rectitud y el desplazamiento indicado del oleoducto después de 2021 están en dirección descendente.

La desviación horizontal fuera de la rectitud y el perfil de deformación por curvatura son típicos de una carga de desplazamiento. Esta área ha sido asignada de alta prioridad debido a:

- i) La desviación horizontal fuera de la rectitud y el desplazamiento indicado del oleoducto entre 2021 y noviembre de 2023 en dirección descendente.
- ii) La erosión parece haber aumentado y puede haber inestabilidad presente;
- iii) La deformación máxima excede el límite de deformación compresiva.

Con base en estos resultados se han contemplado las mismas recomendaciones de la zona descrita anteriormente.

Conclusión

La integración de unidades de mapeo inercial en herramientas de limpieza de tuberías cumple el objetivo de cerrar la brecha para obtener mediciones más frecuentes de movimiento de los oleoductos y la deformación por curvatura, especialmente durante eventos repentinos como inundaciones, terremotos y deslizamientos de tierra debido a lluvias intensas. Con la implementación de esta novedosa tecnología, ODL contará con información más precisa en el Sistema Integral de Aseguramiento de Oleoductos (SIAD), lo que permitirá una operación más segura y confiable.

Bibliografía

1. Czyz, Jaoslaw, Adams, John, “Computation of Pipeline-Bending Strains Based on Geopig Measurements”, Pipeline Pigging and Integrity Monitoring Conference, February 14-17, 1994.
2. Dotson, R., Brown, A., Taylor, J. Jacobs, L., “Beware the Shapeshifter: A Repeatability Study on Pipeline Movement and Bending Strain Assessments”, Pipeline Pigging and Integrity Management Conference, February 24-25, 2021.

Cv de autores

Orly Alvao

Título y lugar de Estudio: Ingeniero Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia.

Empresa: ODL – Oleoducto de los Llanos Orientales.

Trayectoria: Ingeniero civil, especialista en Gestión de Proyectos y Geotecnia Ambiental, con conocimientos en dirección de proyectos y experiencia laboral en estudios de ingeniería relacionados con geotecnia de ductos, estabilización de laderas, diseño de fundaciones, obras civiles y evaluación del riesgo por clima, fuerzas externas y daño mecánico por terceros. Tengo la capacidad de liderar procesos que apalanquen los objetivos estratégicos de las empresas y sus proyectos. Soy un profesional con excelentes relaciones interpersonales, integro, responsable, colaborador y con amplia disposición para el trabajo en equipo.

Cargo Actual: Especialista Civil y Geotecnia

Años de Experiencia: 16

John Jordan

Título y lugar de estudio: Ingeniero metalúrgico, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Empresa: ROSEN Group.

Cargo Actual: Gerente de línea de negocio de inspecciones inteligentes.

Trayectoria: Ingeniero Metalúrgico con Maestría en Administración de Negocios (MBA) y más de 15 años de experiencia en el gerenciamiento de proyectos en la industria de Oil & Gas en diversos países de América del Sur. Líder enfocado en resultados, con una sólida capacidad de liderazgo, responsabilidad y manejo de equipos de alto rendimiento, y un amplio conocimiento del mercado en América del Sur. Habilidad destacada en negociación y orientación al cliente, logrando objetivos y el más alto nivel de satisfacción del cliente en cada proyecto.

Años de Experiencia: 20.