

Optimización de Planes de Reparación en Líneas de Transporte de Hidrocarburos Mediante Predicción del Crecimiento y Análisis de Desviaciones de Anomalías de Pérdida de Metal

Autores:

Adriana Andrade Caballero – Especialista Análisis de Integridad

Oscar Gilberto Páez Ortiz – Líder de Análisis de Integridad

GIE GROUP

Colombia

Correo-e:

andrdecaballero@giegroup.net

paez@giegroup.net

Resumen

El presente trabajo aborda la programación de mantenimiento de sistemas críticos de transporte de hidrocarburos, enfatizando en la paquetización de excavaciones, la optimización basada en proyecciones de pérdidas de metal y el efecto de la desviación de las proyecciones con respecto a lo encontrado en campo, para determinar un programa óptimo. En la búsqueda de maximizar la eficiencia operativa y garantizar la sostenibilidad económica, se muestra el efecto de las desviaciones de las proyecciones de crecimiento de corrosión frente a los costos de mantenimiento como función de la cantidad de anomalías programadas.

1. Introducción

En el contexto del mantenimiento de sistemas de transporte de hidrocarburos, la gestión eficiente de los recursos se enfrenta a desafíos cada vez mayores debido a su complejidad y la necesidad de garantizar la seguridad y continuidad operativa, mientras se viabiliza la sostenibilidad económica del negocio. De tal manera, se hace indispensable la implementación de estrategias de mantenimiento que no solo aseguren la funcionalidad de los equipos, sino que también optimicen los costos asociados.

En este documento se explora una metodología que integra técnicas de paquetización de actividades de mantenimiento y herramientas de análisis predictivo de la condición estructural de los sistemas basadas en la proyección de pérdidas de metal, con el enfoque de evidenciar que la optimización de los planes de mantenimiento y la reducción de

desviaciones presupuestarias debe ir más allá de la obtención de una tasa de corrosión, evolucionando a integrar datos de inspección directa para ajustar dinámicamente los planes en función de las condiciones reales del activo y las desviaciones de lo encontrado vs lo proyectado.

2. Evaluación y proyección en el tiempo de anomalías de pérdida de metal.

La pérdida de metal en tuberías representa un desafío crítico en términos de seguridad y eficiencia operativa. El monitoreo constante y las proyecciones de las pérdidas de capacidad estructural son esenciales para garantizar la integridad de los activos y evitar pérdidas de contención.

Las proyecciones de pérdidas de metal son una herramienta fundamental para la definición óptima de los planes. Estas proyecciones permiten predecir el deterioro de los activos a

lo largo del tiempo, proporcionando información clave para la toma de decisiones estratégicas y la determinación de planes de intervención. El uso de proyecciones de pérdidas de metal en la gestión de mantenimiento permite una aproximación proactiva y basada en datos, transformando el mantenimiento de un enfoque reactivo a uno preventivo y predictivo.

La evaluación de las anomalías inicia con el emparejamiento de anomalías individuales entre dos corridas ILI. El primer paso consiste con la alineación de las soldaduras circunferenciales entre ambas inspecciones, posteriormente se realiza el emparejamiento entre anomalías individuales reportadas en cada junta de la línea, considerando el tipo de indicación, distancia de soldadura aguas arriba, posición horaria, dimensiones de anomalías y pared de tubería. Las anomalías de la última inspección ILI que no se logran emparejar, son consideradas “huérfanas” y tienden a incrementar la velocidad de corrosión en la junta evaluada.

La velocidad de corrosión utilizada para la evaluación de cada anomalía de pérdida de metal es la velocidad de corrosión promedio de todas las anomalías individuales contenidas en cada junta de la línea y agrupadas por posición de pared. La estimación de la velocidad de corrosión de las anomalías individuales es realizada considerando los siguientes dos modelos:

- **Modelo WOT:** estimación de velocidad de corrosión sin incluir tolerancias de dimensionamiento de profundidad de la corrida ILI.

$$Vel_{WOT_i} = \frac{(prof_{ult} - prof_{prev})}{tiempo} * t$$

Donde:

- Vel_{WOT_i}: Velocidad de corrosión de anomalía individual sin tolerancias de herramienta ILI, [mm/año].
- prof_{ult}: Profundidad de anomalía individual reportado en la corrida inspección, [%].

- prof_{prev}: Profundidad de anomalía individual reportado en la inspección previa, [%].
- tiempo: Tiempo entre inspecciones ILI, [años].
- t: espesor de la tubería, mm.

- **Modelo WT:** Modelo de estimación de velocidad de corrosión por anomalía individual incluyendo tolerancias de dimensionamiento de profundidad de la corrida ILI

$$Vel_{WT_i} = \frac{(prof_{ult} - prof_{prev})}{tiempo} * t + \frac{\sqrt{Tol_1^2 + Tol_2^2}}{tiempo} * t$$

Donde:

- Vel_{WT_i}: Velocidad de corrosión de anomalía individual sin tolerancias de herramienta ILI, [mm/año].
- prof_{ult}: Profundidad de anomalía individual reportado en la corrida inspección, [%].
- prof_{prev}: Profundidad de anomalía individual reportado en la inspección previa, [%].
- tiempo: Tiempo entre inspecciones ILI, [años].
- t: espesor de la tubería, mm.
- Tol₁ y Tol₂: Tolerancia de dimensionamiento de profundidad de las inspecciones ILI, [%].

Para el caso de anomalías huérfanas se asume un valor de prof_{prev} del 5% (punto medio de umbral de detección de corridas ILI).

Posteriormente se realiza la proyección en el tiempo de la pérdida de metal de cada una de las anomalías reportadas en la última inspección ILI, considerando las tolerancias citadas por la compañía de inspección y la velocidad de corrosión estimada para cada junta.

Los criterios para la evaluación de las anomalías ILI tipo pérdida de metal corresponden a profundidad y el factor de reparación ERF, definiendo los límites de aceptación en función a la condición mecánica y antecedentes del activo.

Los resultados de la evaluación de anomalías de pérdida de metal incluyen:

- Mapas de pérdida de metal: Representaciones gráficas que muestran las áreas críticas con mayor probabilidad de deterioro.
- Velocidad de pérdida de espesor estimada: Valores cuantitativos que permiten priorizar intervenciones.
- Proyecciones a largo plazo: Predicciones de la condición del activo en horizontes temporales específicos.

3. Consolidación de Bloques de Reparación

La consolidación de bloques de reparación consiste en la paquetización de actividades de mantenimiento basado en los siguientes principios:

- I. Consolidación de Atención de Anomalías: Las actividades que comparten características comunes, como ubicación, tipo de mantenimiento (correctivo, preventivo o predictivo) o requerimientos de recursos, se agrupan para su ejecución simultánea. Esto reduce redundancias y facilita la planificación.
- II. Minimización de paradas operativas: Se busca reducir el número de paradas programadas al agrupar actividades que puedan realizarse durante la misma intervención. Esto incluye la coordinación con otros departamentos para sincronizar las ventanas de intervención.
- III. Optimización de recursos: Al agrupar actividades, se optimiza el uso de personal, equipos y herramientas, reduciendo costos y tiempos de ejecución. Además, se facilita la logística de adquisición y transporte de materiales.
- IV. Priorización basada en criticidad: Las actividades se jerarquizan considerando la criticidad del activo y el impacto potencial de su falla en la operación. Esto incluye la evaluación de riesgos operativos y financieros asociados a cada activo.

V. Flexibilidad y adaptabilidad: La metodología permite ajustes dinámicos en función de cambios en las condiciones operativas o descubrimientos realizados durante las inspecciones. Esto asegura que los planes se mantengan relevantes y efectivos.

VI. Soporte en datos predictivos: La utilización de datos provenientes de herramientas de monitoreo continuo y análisis predictivo garantiza una toma de decisiones más precisa y basada en condición.

La paquetización se complementa con las proyecciones de pérdidas de metal, que proporcionan información clave para priorizar actividades y definir los bloques de reparación. Este enfoque integrado permite ajustar dinámicamente los planes de mantenimiento en función de los resultados obtenidos en las inspecciones y análisis predictivos, asegurando así una gestión más efectiva.

La generación de bloques se realiza asumiendo un principio de cubrimiento de anomalías que se activan de acuerdo con los criterios de evaluación, profundidad y ERF en las vigencias a ser definido el plan de reparaciones, de doce (12) metros, (longitud nominal de cada tubería) seleccionando el escenario en donde se maximiza la atención de anomalías. Una vez se establecen bloques por cubrimiento, se realiza la definición del tipo y cantidad de reparaciones a realizar en cada bloque.

Es una estrategia clave para consolidar actividades relacionadas con la ejecución basado en condición de anomalías cercanas y que pueden atenderse en un solo bloque de ejecución, con el objetivo de minimizar interrupciones, optimizar recursos y garantizar la integridad del activo a largo plazo.

Las actividades identificadas se clasifican según criterios como:

- Criterio de activación
- Tipo de reparación
- Ubicación geográfica del activo y proximidad entre bloques.
- Sistema afectado

La consolidación de bloques de reparación ofrece beneficios tangibles, entre los que destacan:

- Reducción de costos operativos: Menor número de paradas y optimización del uso de recursos humanos y materiales.
- Mayor eficiencia operativa: Ejecución simultánea de actividades relacionadas, lo que maximiza la utilización de recursos.
- Mejor gestión del riesgo: Intervenciones más planificadas y menos reactivas, reduciendo la probabilidad de fallas inesperadas.
- Aumento de la disponibilidad de activos: Reducción significativa del tiempo de inactividad, lo que incrementa la producción.
- Cumplimiento normativo: Mayor alineación con estándares internacionales y requisitos regulatorios.

4. Análisis de Desviaciones Datos Proyectados vs Inspección Directa

La base de la optimización radica en identificar y analizar las desviaciones entre las proyecciones de pérdida de metal generadas y las mediciones reales obtenidas en inspecciones directas. Este enfoque permite:

- Validar Proyecciones: Determinar si las proyecciones se alinean con las condiciones reales del sistema.
- Detectar anomalías: Identificar discrepancias significativas que puedan

indicar problemas inesperados o aceleración del deterioro.

- Ajustar planes de atención: Redefinir las prioridades de mantenimiento basándose en datos actualizados.
- Reducir incertidumbre: Incorporar datos reales para mejorar la precisión de futuras proyecciones.

El análisis de desviaciones consiste en la recolección y comparación de datos, mediante un estudio estadístico del comportamiento de los datos de pérdida de metal proyectados y los reportados por la inspección directa, para determinar tendencias centrales y atípicas y valores de aceptación/ rechazo de los criterios. Una vez se establecen las tendencias centrales y atípicas se definen los valores límite de los criterios para identificar las proyecciones con desviación por fuera del rango esperado.

El proceso comienza con la recopilación de datos de pérdida de metal reportados por la inspección directa y su comparación con las proyecciones de pérdidas de metal previamente generadas. Esto incluye:

- Organización de datos de inspección directa: recolectar y organizar la información recolecta en las inspecciones directas verificando que los datos tengan una antigüedad que permitan establecer la condición reciente del activo y estableciendo una disponibilidad de datos emparejados (inspección directa - ILI) suficientes para realizar el análisis.
- Asignación de dato proyectado: establecer el dato de pérdida de metal de las zonas donde se realizó la inspección directa según la fecha de la inspección.
- Cálculo de desviaciones: Determinar la diferencia entre los valores de pérdida de metal proyectados y los reportados por la inspección directa.

- Análisis estadístico de las desviaciones: La consistencia de las proyecciones de pérdida de metal estimas con la inspección directa se define mediante las siguientes condiciones:
 - Establecer que el promedio de las desviaciones inspección directa-proyección que no exceda el límite establecido, para evitar sobreproyección.
 - Garantizar un margen de seguridad, asegurando que las proyecciones estén ligeramente por encima de los valores de inspección directa.
 - Verificar que las desviaciones estén dentro de un rango de $\pm 10\%$, garantizando consistencia estadística entre inspección directa y proyección.
 - Analizar que las desviaciones $>30\%$ no superen el umbral definido, limitando la influencia de valores extremos.

5. Optimización Continua

Una vez identificados los sistemas o zonas del activo con una desviación por fuera del rango esperado, se procede a la validación y calibración de los modelos predictivos o sus variables mediante el ajuste iterativo hasta mejorar la concordancia entre las predicciones y los datos reales.

Entre los beneficios de la optimización basada en análisis de desviaciones se resaltan los siguientes:

- Aumento de la precisión: Los planes se basan en datos actualizados, lo que mejora la efectividad de las intervenciones.
- Reducción de costos: Al evitar intervenciones innecesarias y priorizar las atenciones críticas.

- Mitigación de riesgos: Identificar y abordar áreas de alta desviación reduce la probabilidad de fallas catastróficas.
- Mejora continua: El análisis de desviaciones proporciona retroalimentación para mejorar los modelos predictivos.

En la práctica, este enfoque ha demostrado ser efectivo para abordar la programación de mantenimiento de sistemas críticos de transporte de hidrocarburos, enfatizando en la consolidación de bloques de reparación, la optimización basada en proyecciones de pérdidas de metal y el efecto de la desviación de las proyecciones con respecto a lo encontrado en la inspección directa, para determinar un programa de reparación óptimo.

En la búsqueda de maximizar la eficiencia operativa y garantizar la sostenibilidad económica, en la *Figura 1* se muestra el efecto de las desviaciones de las proyecciones de crecimiento de la corrosión en un periodo de tiempo de tres (3) años frente:

- Al número de anomalías que se activan y que se requieren intervenir dado que proyectan una profundidad mayor al 80% y/o un ERF mayor a 1, barras de color verde.
- Al número de bloques de reparación requeridos para atender las anomalías activas, barras de color rojas.
- A la longitud por intervenir dados los bloques de reparación definidos, línea color amarillo.

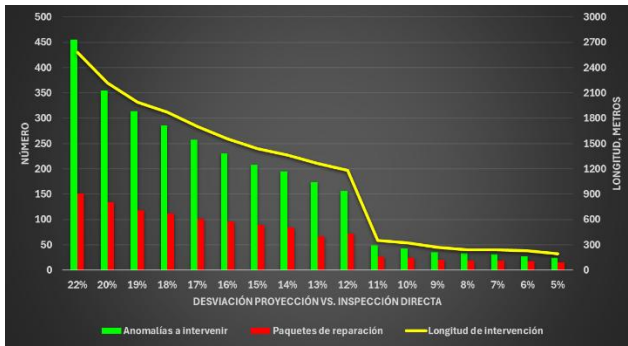


Figura 1. Efecto del porcentaje de la desviación proyección vs inspección directa.

Como se observa en la *Figura 1*, se presenta una relación directamente proporcional entre la desviación (inspección directa vs proyectado) y el número de anomalías por intervenir y por consiguiente también en el número de bloques de reparación y longitud de intervención, pasando de veinticinco (25) anomalías por intervenir cuando la desviación es del cinco por ciento (5%) a aproximadamente veinte (20) veces más cuando la desviación es del veintidos por ciento (22%). Adicionalmente, cuando la desviación supera el umbral del diez por ciento (10%), las diferencias entre el número de bloques y longitud por intervenir se triplica con respecto a la tendencia que se presenta cuando la desviación es menor al diez por ciento (10%).

Al traducir la *Figura 1* en costos de reparación, se llega a un aumento en el costo de reparación en quince (15) veces el valor de las reparaciones cuando la desviación es mínima (5%), como se observa en la *Figura 2*. Estableciéndose una relación directa entre los costos de mantenimiento y la cantidad de anomalías por intervenir en el periodo de tiempo de tres (3) años.

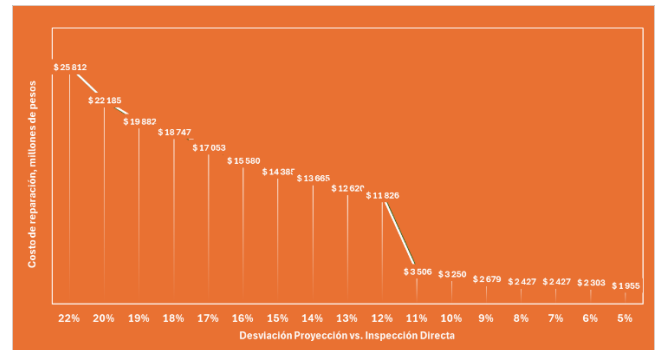


Figura 2. Costo de reparación en función de la desviación proyección versus inspección directa.

6. Ventajas y Limitaciones

La implementación de proyecciones de pérdidas de metal como parte del proceso de gestión de mantenimiento ofrece ventajas significativas, tales como:

- Reducción de riesgos: Al identificar áreas críticas con antelación, se mitigan posibles fallas catastróficas.
- Mejor planificación: Los datos predictivos permiten diseñar planes de mantenimiento más precisos y efectivos.
- Optimización de costos: La identificación temprana de la condición real del activo y la retroalimentación sistemática de la proyección reduce costos asociados con reparaciones.
- Mayor vida útil de los activos: Las intervenciones por condición basadas en proyecciones maximizan la durabilidad de los componentes.
- Cumplimiento normativo: Alineación con estándares internacionales.

Aunque las proyecciones de pérdidas de metal representan un avance significativo, existen limitaciones y desafíos asociados, como:

- Dependencia de datos de alta calidad: Las predicciones precisas requieren datos confiables y consistentes.
- Incertidumbre inherente: Las proyecciones siempre estarán sujetas a variabilidad debido a errores intrínsecos en herramientas y equipos de medición.

7. Conclusiones

- El trabajo desarrollado permite evidenciar la importancia del análisis de desviaciones de proyección vs inspección en campo, sobre el análisis basado exclusivamente en tasa de corrosión para la optimización de los planes de mantenimiento y la reducción de desviaciones presupuestarias
- La metodología desarrollada permite optimizar planes de mantenimiento en sistemas de hidrocarburos mediante:
 - Proyección precisa de pérdidas de metal
 - Consolidación de bloques de reparación
 - Análisis de desviaciones entre datos proyectados e inspeccionados
- El análisis estadístico reveló una relación crítica entre desviaciones de proyección y costos de mantenimiento:
 - Desviaciones del 5%: Reparaciones con costos equivalente al óptimo
 - Desviaciones del 22%: Costos de reparación hasta 15 veces superiores al óptimo
- La metodología descrita ofrece la optimización de costos mediante la programación de intervenciones basadas en condición.

planes de mantenimiento, análisis estadístico de la información para el mejoramiento continuo del proceso de gestión de integridad.

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

Adriana Milena Andrade Caballero

2. Teléfono:

- Residencia: 6018985766
- Oficina: 6012186580
- Celular: 3168200481

3. Dirección del autor(es)

- Residencia: Carrera 9 # 15-45 Conjunto Panorama, casa 3. Cota-Cundinamarca
- Oficina: Carrera 27 # 83 - 67 Bogotá, Colombia

c. E. mail:

andradecaballero@giegroup.net

d. Ciudad: Cota

e. País: Colombia

Adriana Milena Andrade Caballero Ingeniera Química, con 16 años de experiencia en la gestión de proyectos referentes al manejo de la integridad de activos, valoración del riesgo y condición mecánica para la definición de
