

“ESTRATEGIAS EFECTIVAS PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN EN LA GESTIÓN DE ACTIVOS PARA EL TRANSPORTE DE ENERGÍA: UN ENFOQUE ECONÓMICO EN MERCADOS COMPETITIVOS”

JUAN GUILLERMO MAYA MONTOYA

ISA INTERCOLOMBIA S.A E.S.P. Calle 12 Sur # 18-168 – Medellín, Colombia

E.mail: jmmaya@intercolombia.com

Resumen

La corrosión es un proceso natural que deteriora materiales metálicos, especialmente en el sector eléctrico, con importantes consecuencias económicas y operacionales. Factores como ambientes industriales, marinos y la alta humedad aceleran la corrosión. En países tropicales, este problema es más grave, destacando la necesidad de implementar estrategias efectivas. Una gestión integral de la corrosión prolonga la vida útil de los activos, reduce costos y mejora la rentabilidad.

Introducción

La corrosión es un proceso natural que deteriora los materiales metálicos debido a reacciones químicas y electroquímicas con su entorno. En la industria del transporte de energía, este fenómeno representa un desafío crítico que afecta la integridad y eficiencia de los sistemas y equipos de transmisión, con importantes consecuencias económicas, operacionales y reputacionales. Los costos asociados no solo incluyen el reemplazo de materiales y componentes dañados, sino también los gastos en mantenimiento preventivo y correctivo de emergencia.

Diversos factores contribuyen a la corrosión en el transporte de energía, como la exposición a ambientes industriales y marinos, alta humedad, variaciones de temperatura y la presencia de contaminantes corrosivos. El envejecimiento de las infraestructuras y la falta de mantenimiento adecuado también pueden acelerar estos procesos. Dado el impacto significativo de la corrosión,

especialmente en países tropicales donde las velocidades de corrosión pueden ser hasta cinco veces mayores, es imprescindible implementar estrategias efectivas para su control. Estas estrategias deben integrar enfoques tecnológicos avanzados, prácticas de mantenimiento adecuadas y un análisis económico detallado para optimizar la inversión y los resultados. En mercados competitivos, donde la eficiencia y la reducción de costos son clave, el manejo adecuado de la corrosión puede ser una ventaja competitiva crucial.

En el entorno dinámico y altamente competitivo de los mercados actuales, la gestión efectiva de la corrosión en el sector energético se ha convertido en una prioridad estratégica. La corrosión no solo daña físicamente los activos, sino que también afecta significativamente la rentabilidad, la seguridad operativa y la sostenibilidad empresarial. Una gestión efectiva de la corrosión prolonga la vida útil de los activos, minimiza los costos de mantenimiento y reparación, y reduce el riesgo de desconexiones y accidentes. Empresas que integran tecnologías innovadoras con la gestión de activos tienen una ventaja importante. Estas tecnologías incluyen evaluaciones en línea de la condición por corrosión, capacitaciones mediante video learning, aplicación de recubrimientos especiales, y el uso de materiales avanzados como aceros inoxidable y fibra de vidrio, así como el monitoreo con drones y análisis forenses.

Este documento pretende analizar y proponer estrategias efectivas para el control de la corrosión

en la gestión de activos del transporte de energía, enfocándose en aspectos económicos en mercados competitivos. Se identificarán los factores que contribuyen a la corrosión, se evaluarán los impactos económicos y operacionales, se presentarán tecnologías y prácticas de mantenimiento avanzadas y se analizarán casos de estudio exitosos. Finalmente, se ofrecerán recomendaciones prácticas, teniendo en cuenta las particularidades de los países tropicales.

Marco Teórico

Las líneas de transmisión de energía son esenciales para los sistemas de interconexión energética a nivel mundial. La integridad y el buen desempeño de estas líneas garantizan un suministro confiable. Sin embargo, cuando se instalan en atmósferas agresivas, como regiones costeras, complejos industriales o cercanas a fuentes naturales como volcanes activos, los componentes pueden deteriorarse rápidamente debido a la corrosión. Este problema se agrava con la presión de los organismos reguladores para reducir los tiempos de mantenimiento y maximizar la disponibilidad operativa.

Las compañías de energía con activos en áreas de alta corrosividad deben optimizar sus procesos de mantenimiento para mantener los activos en funcionamiento durante el mayor tiempo posible, minimizando las fallas que generan interrupciones del servicio y mejorando la eficiencia de la red. Esto requiere capacitaciones dirigidas a todos los equipos de trabajo involucrados en el ciclo de vida de los activos, garantizando un funcionamiento eficiente y evitando desconexiones de emergencia o salidas súbitas de los circuitos debido a fallas de componentes corroídos.

Existen diversas metodologías para abordar la corrosión en las líneas de transmisión de energía. Una estrategia integral, idealmente, debe incluir la colaboración de expertos en corrosión y profesionales en gestión de activos para asegurar la efectividad de las medidas implementadas.

Tipos de Corrosión Comunes en las Líneas de Transmisión de Energía

En las líneas de transmisión de energía, la corrosión es un problema tan importante que puede comprometer la integridad y la eficiencia de los activos. A continuación, se presentan los tipos más comunes de corrosión:

1. Corrosión Atmosférica

La corrosión atmosférica es causada por la exposición de los componentes metálicos de los activos a los elementos presentes en la atmósfera, como el oxígeno, la humedad y los contaminantes como los cloruros y los sulfatos provenientes del mar o las industrias. Este tipo de corrosión afecta a elementos como las estructuras metálicas de las torres, herrajes, aisladores y cables conductores, reduciendo su vida útil.



Foto 1. Corrosión atmosférica en elementos estructurales de una torre de transmisión de energía.

Otros componentes de las líneas de transmisión de energía que resultan significativamente afectados por la corrosión atmosférica son las partes metálicas del aislamiento. Esta corrosión afecta tanto a los aisladores de vidrio y porcelana como a los aisladores poliméricos, tal como se puede observar en la siguiente imagen.



Fig. 2. Corrosión atmosférica en partes metálicas de aisladores de porcelana, vidrio y polimérico.

Los cables conductores de fase, al igual que los de apantallamiento, también se ven afectados por la corrosión atmosférica. Lo común es observar que el ataque corrosivo en los cables conductores de fase se presenta en los alambres interiores, mientras que, en los cables de apantallamiento, los efectos de la corrosión se presentan en los alambres exteriores.



Fig. 3. Corrosión atmosférica en un cable conductor de fase y en un cable de apantallamiento.

Los herrajes de anclaje en las torres de transmisión de energía también son vulnerables a la corrosión atmosférica. La falla súbita de estos herrajes debido a la corrosión es una de las principales causas de las desconexiones imprevistas en los circuitos.



Fig. 4. Corrosión atmosférica en diferentes tipos de herrajes de una línea de transmisión de energía.

2. Corrosión Galvánica

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes están en contacto directo en presencia de un electrolito, como el agua. Este contacto provoca la formación de una célula galvánica, donde uno de los metales actúa como ánodo y se

corroe más rápidamente, mientras que el otro actúa como cátodo y se protege.



Foto 2. Corrosión galvánica entre una grapa de puesta a tierra de cobre con un perfil de acero estructural.

3. Corrosión por Juntas

Este tipo de corrosión se produce en áreas donde se presentan uniones que permiten la acumulación de humedad y contaminantes, en estas áreas se aceleran los procesos corrosivos.

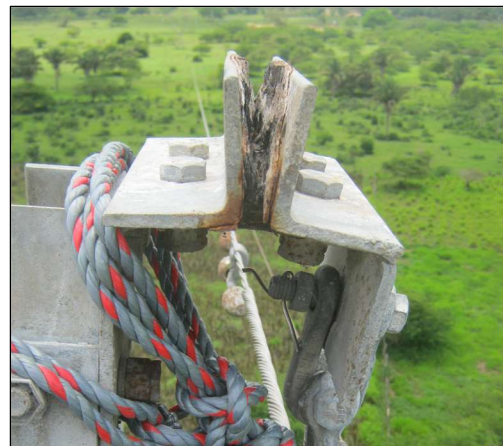


Foto 3. Corrosión por juntas en la estructura de soporte de un cable de apantallamiento.

4. Corrosión por Aireación Diferencial

La corrosión por aireación diferencial se da cuando hay diferencias en la concentración de oxígeno en distintas partes de un material. Las áreas con menor concentración de oxígeno tienden a corroerse más rápidamente que las áreas con mayor concentración.



Foto 4. Corrosión por aireación diferencial en pata de torre de transmisión de energía auto soportada.

5. Corrosión en Concretos

El concreto es un material que puede sufrir corrosión debido a la penetración de cloruros y otros contaminantes. Esta corrosión puede afectar a las barras de refuerzo de acero dentro del concreto, comprometiendo la integridad estructural de las cimentaciones de las torres.



Foto 5. Corrosión en concreto de una fundación de torre de transmisión de energía auto soportada.

6. Corrosión por Suelos

La corrosión por suelos ocurre cuando los elementos estructurales de las torres están enterrados y expuestos a suelos corrosivos. Factores como la humedad, el contenido de sales y

la actividad biológica en el suelo pueden acelerar los procesos corrosivos.



Foto 6. Corrosión por suelos en fundación metálica de torre de transmisión de energía auto soportada.

7. Corrosión Bajo Tensión

La corrosión bajo tensión se produce cuando un material está sometido a tensiones mecánicas y ambientales simultáneamente. Estas tensiones provocan la aparición de grietas y la corrosión localizada, afectando la resistencia y durabilidad del elemento.

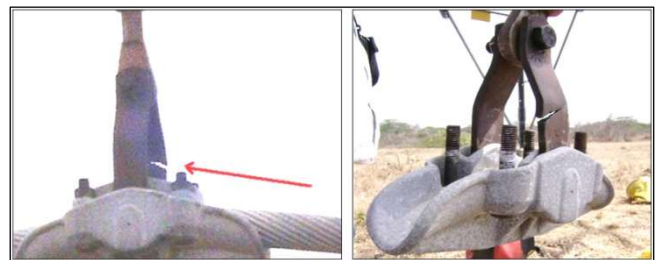


Fig. 5. Corrosión bajo tensión en una platina de acero inoxidable de una grapa de suspensión de una línea de transmisión de energía.

8. Corrosión Multi Factores

En las líneas de transmisión de energía, pueden presentarse varios casos de corrosión que no se pueden atribuir a un solo fenómeno corrosivo. Dos ejemplos de esto son los procesos corrosivos que afectan algunas grapas de sujeción de los

amortiguadores “Stock bridge” y a los terminales de blindaje de algunos cables de apantallamiento. En estos casos, pueden ocurrir fenómenos de corrosión atmosférica, corrosión por par galvánico, corrosión por aireación diferencial y corrosión por juntas.



Fig. 6. Corrosión multi factores en una grapa de anclaje de un amortiguados del tipo “Stock bridge” y en el blindaje en un cable de apantallamiento.

Estrategias para el Control de la Corrosión

Es indispensable diseñar estrategias para el control de la corrosión en las líneas de transmisión de energía porque la corrosión puede causar daños importantes a la infraestructura, comprometiendo la seguridad y la disponibilidad del sistema de transmisión. Las estrategias deben buscar establecer prácticas que abarquen todas las etapas del ciclo de vida de los activos, desde el diseño hasta la disposición final de estos.

Las estrategias se deben basar en prácticas técnica y económicamente efectivas, en condiciones de campo específicas y utilizando materiales, procedimientos y especificaciones de probada efectividad contra la corrosión. En mercados competitivos, es importante que estas estrategias no solo sean efectivas desde el punto de vista técnico, sino también rentables. Esto implica seleccionar soluciones que ofrezcan un equilibrio óptimo entre costo y rendimiento, asegurando que los costos de mantenimiento y reparación se minimicen. La implementación de estas estrategias puede proporcionar una ventaja competitiva significativa, al reducir costos operativos y mejorar la fiabilidad del sistema de transmisión de energía.

1. Capacitación Dirigida

La capacitación dirigida se refiere a sesiones de formación sobre corrosión que se diseñan específicamente para atender las necesidades y objetivos particulares de cada equipo de trabajo en cada etapa del ciclo de vida de los activos. Esta capacitación se caracteriza por ser altamente personalizada y enfocada en los conocimientos específicos necesarios para el desempeño de cada rol. Por ejemplo, la capacitación requerida por un equipo de diseño, que trabaja en la etapa de creación de los activos, debe enfocarse en el conocimiento detallado de los materiales resistentes a la corrosión utilizados en la fabricación de los componentes de los activos. Es diferente, un equipo de mantenimiento, que opera en la etapa de mantener el activo, necesita capacitación en los criterios de calificación de la condición por corrosión de los componentes de los activos instalados en zonas corrosivas. Este enfoque asegura que los participantes adquieran las competencias necesarias de manera eficiente y efectiva, mejorando así su desempeño en áreas críticas para la organización.

2. Manejo Integral de la Corrosión

Entendiendo los fenómenos de corrosión que sufren los componentes de los activos para el transporte de energía, es posible implementar una estrategia para el Manejo Integral de la Corrosión (MIC) para agregar valor a la compañía en cada etapa del ciclo de vida de los activos.

En la etapa de **creación**, conocer la agresividad corrosiva de las zonas de instalación de los activos permite definir las características de diseño de los componentes, seleccionar materiales adecuados y planificar estrategias de mantenimiento en el tiempo ideal, logrando así un desempeño óptimo de los activos.

Durante la **operación**, identificar riesgos de falla de componentes debido al deterioro por corrosión permite generar planes de contingencia que eviten impactos mayores en el sistema eléctrico ante la materialización de una falla.



En la etapa de **mantenimiento**, es crucial elaborar reglas de diagnóstico precisas para evaluar adecuadamente la condición por corrosión de los componentes. Un mal reporte de inspección o una interpretación incorrecta puede llevar a fallas en el circuito. Además, un procedimiento correctivo mal diseñado o ejecutado puede generar fallas graves, reprocesos o sobrecostos para la compañía. Finalmente, en la etapa de **renovación** y disposición final, se puede planificar adecuadamente la renovación de los activos, teniendo en cuenta el impacto ambiental y validando lo proyectado desde la creación del activo.

En síntesis, los beneficios de implementar un MIC se evidencian en impactos técnicos y económicos positivos a lo largo del ciclo de vida de los activos, garantizando la eficiencia y confiabilidad de las operaciones de la empresa.

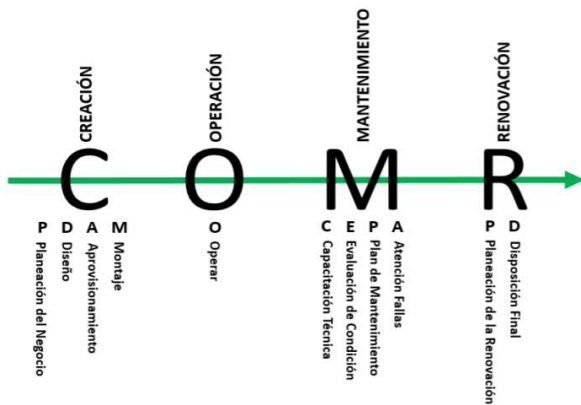


Fig. 7. Etapas del ciclo de vida de los activos y subprocesos donde se interviene para hacer un adecuado manejo integral de la corrosión.

3. Tecnologías para el control de la corrosión.

La tecnología para el control de la corrosión en activos para el transporte de energía está enfocada en desarrollar herramientas y plataformas digitales que puedan anticipar, detectar y responder a incidentes de corrosión de manera efectiva. Esto incluye software de análisis predictivo y dispositivos de inspección. Estas tecnologías permiten una detección y monitoreo precisos de la

corrosión, así como la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo.

Drones equipados con cámaras HD

Las inspecciones aéreas con drones representan una solución innovadora y efectiva para el control de la corrosión en la infraestructura eléctrica. Debido a la vasta extensión geográfica que cubren las líneas de transmisión de energía, los drones equipados con cámaras de alta definición son cada vez más utilizados para detectar signos de corrosión en los componentes.

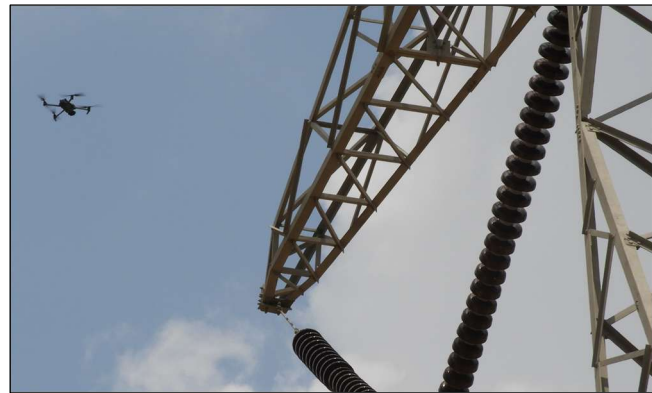


Foto 7. Inspección de corrosión con dron en componentes de torre de transmisión de energía.

Estos drones pueden transmitir en tiempo real datos exactos e imágenes de los componentes de las torres afectados por la corrosión a un centro de control especializado. Esta tecnología permite una inspección minuciosa y precisa al tiempo que facilita la identificación temprana de problemas, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento y mejora la eficiencia operativa.

Plataformas digitales

Las plataformas digitales para el control y prevención de la corrosión son soluciones avanzadas que recopilan y procesan datos sobre el estado o comportamiento futuro de las líneas de transmisión de energía. Algunas de estas plataformas utilizan mapas inteligentes con variables atmosféricas de alta precisión y algoritmos de inteligencia artificial para predecir y

determinar los niveles de agresividad corrosiva en puntos geográficos específicos.

Estas plataformas permiten una gestión eficiente y efectiva, generando información valiosa para las etapas de creación, mantenimiento y renovación de los activos. Ayudan a predecir y optimizar la vida útil de estos bienes, y simplifican la toma de decisiones al proporcionar datos útiles y generar informes sobre la expectativa de vida útil de los componentes de los activos instalados o por instalar en diversas zonas corrosivas.

Resultados

1. Eficiencia Operativa y Reducción de Costos.

Aplicar la estrategia del Manejo Integral de la Corrosión permitió a ISA INTERCOLOMBIA obtener resultados sobresalientes en términos de costo y desempeño, consolidándola como una empresa referente a nivel internacional en el referenciamiento ITOMS (International Transmission Operations & Maintenance Study). Este estudio compara el rendimiento de diversas empresas del sector de la transmisión de energía al evaluar niveles de servicio y costos de operación y mantenimiento. La siguiente imagen muestra los resultados obtenidos por ISA INTERCOLOMBIA en 2017, luego de implementar la metodología MIC en 2013.

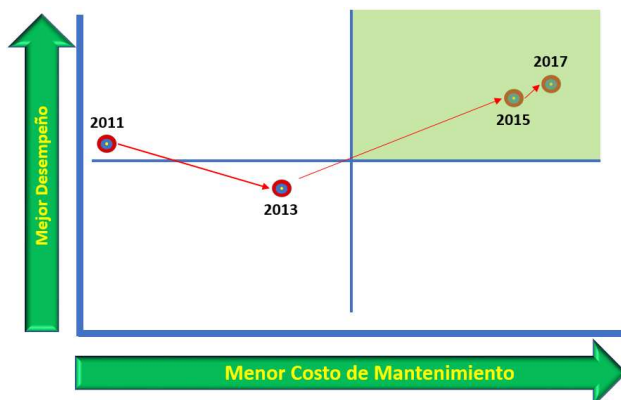


Fig. 8. Resultados ITOMS 2017 mantenimiento de líneas de transmisión ISA INTERCOLOMBIA

2. Aumento de Vida Útil

Se diseñaron procedimientos correctivos y preventivos para el cable de fibra óptica tipo OPGW propiedad de INTERNEXA, instalado en la red Centro-Norte del Perú. Estos procedimientos permitieron mantener la confiabilidad operativa del sistema y extender la vida útil del cable, lo que evitó una inversión cercana a los 10 millones de dólares. Desde el punto de vista económico, se evitaron inversiones aproximadas de USD 9.4 millones, lo cual representa un ahorro significativo comparado con la inversión inicial presupuestada.

Los aisladores poliméricos convencionales presentan el inconveniente de que sus extremos, son vulnerables a la corrosión, lo que obliga a reemplazarlos mucho antes del deterioro del componente aislante. Para solucionar este problema, se realizaron estudios y se logró identificar un tipo de acero inoxidable que supera incluso la vida útil del polímero, duplicando así la expectativa de vida útil de los aisladores poliméricos instalados en zonas con alta agresividad corrosiva.

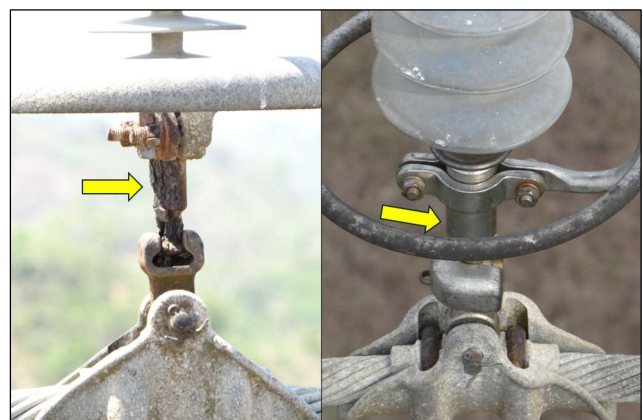


Fig. 9. Terminales de aisladores poliméricos en acero galvanizado afectado por la corrosión (izquierda) y el nuevo diseño en acero inoxidable sin afectación.

3. Uso de Tecnologías Avanzadas

Mediante una inspección minuciosa con drones, ISA INTERCOLOMBIA logró evaluar de manera rápida y efectiva un tramo de aproximadamente 20

kilómetros de línea de transmisión a 500 kV, sin necesidad de desconectar el circuito. El uso de drones permitió una evaluación ágil y evitó la movilización de gran cantidad de personal y recursos, así como la exposición a temperaturas extremas. Además, se alcanzó un alto nivel de precisión en la evaluación de la corrosión de los aisladores, respaldada por registros fotográficos de alta calidad.

ISA INTERCOLOMBIA cuenta actualmente con un mapa interactivo que le permite definir el nivel de agresividad corrosiva en cualquier punto geográfico de Colombia.



Fig. 9. Niveles de agresividad corrosiva definidos por ISA INTERCOLOMBIA.

Esta herramienta proporciona información crucial en cada etapa del ciclo de vida de los activos, tales como las características constructivas de los componentes, las frecuencias y tipos de mantenimiento requeridos y la expectativa de vida útil, lo que facilita la planificación de renovaciones futuras.

Conclusiones

Las estrategias para el control de la corrosión deben ser técnicamente sólidas y económicamente viables, abarcando desde el diseño hasta la disposición final de los activos, para garantizar la integridad y la fiabilidad de la infraestructura.

El manejo integral de la corrosión (MIC) reduce costos operativos y mejora la fiabilidad del sistema de transmisión de energía, proporcionando una ventaja competitiva significativa en mercados competitivos.

La capacitación personalizada y el uso de tecnologías avanzadas como drones y plataformas digitales permiten una detección y monitoreo precisos de la corrosión, optimizando el mantenimiento y prolongando la vida útil de los activos.

La implementación del MIC en compañías como ISA INTERCOLOMBIA ha demostrado resultados sobresalientes, reduciendo costos y mejorando la eficiencia operativa y la fiabilidad de los sistemas de transmisión.

Las estrategias deben ser colaborativas e integrales, involucrando a expertos en corrosión y gestión de activos para maximizar los beneficios técnicos y económicos a lo largo del ciclo de vida de los activos, contribuyendo a la sostenibilidad y competitividad de las empresas en el sector energético.

Las estrategias deben ser técnicas y económicamente efectivas, abarcando todas las etapas del ciclo de vida de los activos.

Juan Guillermo Maya Montoya

Ingeniero Electromecánico.

Especialista en Líneas de Transmisión de Energía de ISA INTERCOLOMBIA. con 37 años de experiencia en la Evaluación y el Control de la Corrosión en Líneas de Transmisión de Energía y Subestaciones Eléctricas.

Autor del libro “CORROSIÓN EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA DE ALTO VOLTAJE”

Móvil: +57 3117499801

E-mail: jmmaya@intercolombia.com