

**Propuesta metodológica para la inspección del sistema de protección catódica mediante la
toma de potenciales en el oleoducto OBC**

Diego Esteban Vargas Camacho

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Tecnología en Automatización Electrónica Industrial

2025

**Propuesta metodológica para la inspección del sistema de protección catódica mediante la
toma de potenciales en el oleoducto OBC**

Diego Esteban Vargas Camacho

Director

Bustos Miranda, Joan Sebastian

Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD
Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería ECBTI
Tecnología en Automatización Electrónica Industrial

2025

Resumen

El problema que se encuentra en la empresa OBC es la corrosión de estructuras metálicas, Para abordar este problema, el objetivo principal es evaluar la eficiencia del sistema de protección catódica mediante la toma de potenciales, esto permitirá identificar áreas donde la protección puede ser deficiente. La corrosión es uno de los problemas más importantes que operan en estructuras metálicas enterradas, offshore, sumergidas y otras estructuras en contacto directo con un electrolito. Si la corrosión no se controla, esto puede derivar en un costo grande de reparación o reemplazo de partes.

La corrosión natural o espontánea se debe a la acción localizada de celdas sobre la superficie de la estructura. Estas celdas se originan por las diferencias de potencial causadas por factores como irregularidades en la superficie, cáscara de laminación, concentraciones de oxígeno, diferencias en el electrolito alrededor de la estructura, y otros. Las reacciones por la existencia de corrientes vagabundas ocurren cuando una fuente de corriente, externa a la estructura, provoca corrosión en la misma.

La metodología que se realizará será mediante la técnica de inspección indirecta, llamada la toma de potenciales estructura a electrolito. Esto implica medir el potencial eléctrico en diferentes puntos de la estructura para determinar la efectividad de la protección catódica en prevenir la corrosión. La inspección de sistemas de protección catódica es crucial para garantizar la eficacia y seguridad de las infraestructuras de tuberías y tanques de almacenamiento, especialmente en entornos propensos a la corrosión. Este proceso implica el monitoreo regular y la evaluación de la integridad del sistema de protección catódica instalado para prevenir la corrosión.

Como solución, se propone un monitoreo. Este sistema permitirá un seguimiento continuo y preciso del estado de la protección catódica, asegurando así su eficacia a largo plazo y minimizando el riesgo de corrosión en las estructuras metálicas de la empresa OBC.

Palabras claves: corrosión, protección catódica, tuberías.

Abstract

The problem encountered by the OBC company is the corrosion of metal structures. To address this problem, the main objective is to evaluate the efficiency of the cathodic protection system by taking potentials, this will allow identifying areas where protection may be deficient. Corrosion is one of the most important problems that operate in buried, offshore, submerged metal structures and other structures in direct contact with an electrolyte. If corrosion is not controlled, this can lead to a large cost of repair or replacement of parts.

Natural or spontaneous corrosion is due to the localized action of cells on the surface of the structure. These cells originate from potential differences caused by factors such as surface irregularities, rolling shells, oxygen concentrations, differences in the electrolyte around the structure, and others. Reactions due to the existence of stray currents occur when a current source, external to the structure, causes corrosion in it.

The methodology that will be carried out will be through the indirect inspection technique, called taking structure-to-electrolyte potentials. This involves measuring the electrical potential at different points in the structure to determine the effectiveness of cathodic protection in preventing corrosion. Inspection of cathodic protection systems is crucial to ensure the effectiveness and safety of pipeline and storage tank infrastructures, especially in corrosion-prone environments. This process involves regular monitoring and assessment of the integrity of the cathodic protection system installed to prevent corrosion.

As a solution, monitoring is proposed. This system will allow continuous and accurate monitoring of the status of cathodic protection, thus ensuring its long-term effectiveness and minimizing the risk of corrosion in OBC's metal structures.

Keywords: corrosion, cathodic protection, pipelines.

Tabla de Contenido

Generalidades.....	10
Planteamiento del Problema	10
Justificación.....	14
Objetivos.....	15
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos	16
Marco de Referencia.....	17
Marco Teórico Conceptual	17
El Concepto de Corrosión.....	17
Principales Factores que Influyen en la Corrosión	18
Estrategias de Control y Mitigación de la Corrosión.....	19
Síntesis del Estado de Arte o Antecedentes.....	23
Metodología	28
Tipo de Investigación	28
Procedimiento	28
Población	29
Resultados.....	30
Comparación de Técnicas de Inspección.....	30
Condiciones Generales para el Desarrollo de la Inspección.....	33
Flujograma Para la Inspección- Guía Propuesta.....	34
Resultados Obtenidos, Análisis y Discusión	37
Las Convenciones Establecidas para Analizar Dicha Tabla son las Siguietes.....	38

Para esta Figura las Principales Abreviaturas son las Siguietes	40
Estructura del Reporte Final	42
Conclusiones.....	43
Recomendaciones	46
Sobreprotección Registrada.....	46
Bibliografía	47

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Corrosión en Tanques</i>	13
Figura 2 <i>Corrosión en Tuberías</i>	13
Figura 3 <i>Esquema Protección Catódica Aplicada a Tuberías Metálicas</i>	19
Figura 4 <i>Compilación de Ejemplos de Aplicación de Inhibidores</i>	21
Figura 5 <i>Esquema de la Medición de Potencial</i>	35
Figura 6 <i>Flujograma del Proceso Inspección</i>	36
Figura 7 <i>Evidencia de Prueba de Inspección Realizada. Análisis de Datos</i>	37
Figura 8 <i>Análisis de la URPC EL VIENTO</i>	39
Figura 9 <i>Curvas de Análisis de Potencial en la Prueba de Inspección</i>	41
Figura 10 <i>Síntesis del Reporte Ejecutivo Final</i>	42

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Análisis de las Principales Técnicas Para Inspección- Caso Tuberías</i>	31
---	----

Generalidades

Planteamiento del Problema

La corrosión es un proceso que afecta los materiales, principalmente los metales, debido a reacciones químicas en entorno lo que conlleva un alto nivel de degradación. Este fenómeno ocurre cuando un metal puro se transforma en una forma más estable, que bajo la acción de factores ambientales como la humedad, oxígeno y temperatura; genera óxidos, sulfatos o hidróxidos (Harsimran et al., 2021).

Los problemas derivados de la corrosión son significativos tanto en términos económicos como de seguridad. Se estima que las pérdidas económicas debido a la corrosión pueden representar entre el 1% y el 5% del PIB de un país. Además, la corrosión puede provocar fallas estructurales en maquinaria industrial, infraestructuras y equipos metálicos, generando riesgos para la seguridad y la vida humana. Asimismo, afecta propiedades esenciales de los metales, como la conductividad y la resistencia mecánica, reduciendo el valor y la vida útil de los productos afectados. En el ámbito ambiental, la corrosión también puede contaminar fuentes de agua potable y otros recursos naturales (Bender et al., 2022; Harsimran et al., 2021).

Ahora bien, en el caso de Colombia el problema es significativo, en muchos casos por situaciones asociadas a efectos atmosféricos (principalmente contaminación), especialmente en entornos urbanos e industriales. Evidencias científicas demuestran que las corrosiones más elevadas se presentan en lugares con alta actividad industrial y cercanía a vías con alto tráfico vehicular (Santa et al., 2024). Otra experiencia que presenta el impacto de la corrosión en el sector de la construcción es la relacionada por (Ospino Ospino & Martínez Gamero, 2021). En este trabajo se relaciona la afectación en la durabilidad y seguridad estructural de las edificaciones, generando altos compromisos de reparación y mantenimiento.

El sector de mayor interés para este trabajo de grado es el de hidrocarburos. La experiencia presentada por Cao et al. (2022) muestra que la corrosión en el sector hidrocarburos es un problema crítico que impacta significativamente la integridad de los equipos y la seguridad de toda la operación. Uno de los problemas más graves es la corrosión bajo aislamiento (CUI, por sus siglas en inglés), la cual ocurre en tuberías, recipientes a presión y otros equipos metálicos que están cubiertos con aislamiento térmico. Este fenómeno se produce cuando el agua penetra en el material aislante y entra en contacto con la superficie metálica, generando corrosión acelerada. La detección de CUI es compleja, ya que el aislamiento oculta el daño hasta que las fallas estructurales se hacen evidentes.

En este mismo sentido, el trabajo presentado por Yeganeh et al. (2025), desarrolla el efecto que la corrosión tiene principalmente en tuberías y equipos para extracción, transporte y refinamiento de petróleo y gas. Particularmente se revisa el efecto que ocurre en las tuberías de acero de alto rendimiento (API), las cuales son muy importantes para la industria; las cuales están expuestas a múltiples tipos de corrosión, como la corrosión uniforme, por picaduras, microbiológicamente influenciada (MIC), galvánica y por agrietamiento inducido por esfuerzos (SCC). Estas formas de corrosión pueden provocar fallos estructurales, fugas de hidrocarburos y graves impactos ambientales.

Particularmente, el presente trabajo de grado se desarrolla en una empresa contratista del sector hidrocarburos encargada, entre otros proyectos, de dar soporte operativo al Oleoducto Bicentenario de Colombia- OBC (Bnamericas, 2023), y donde el gran reto radica en la falta de una estrategia integral y efectiva de inspección de sistemas de protección catódica para la mitigación de la corrosión en tuberías. Esta falta de enfoque puede conducir a:

Corrosión no detectada: La falta de inspección regular puede permitir que la corrosión progrese sin ser identificada sobre todo el efecto corrosivo del agua acompañante del petróleo, contaminada con H₂S, sobre el acero (Zapata, 2023).

Ineficacia del sistema de protección catódica: Sin una inspección adecuada, los sistemas de protección catódica pueden no funcionar correctamente, lo que resulta en una protección insuficiente contra la corrosión; afectando la integralidad del sistema de transporte (May et al., 2022)

Riesgos para la seguridad: La corrosión no controlada puede comprometer la integridad de las estructuras, lo que podría dar lugar a fugas, derrames u otros incidentes que ponen en peligro la seguridad de las personas y el medio ambiente (May et al., 2022).

El oleoducto OBC se encuentra en la región caribe de Colombia, es decir al norte del país lo cual representa altos índices de humedad oscilan entre el 77% y el 83%. Esto genera un agravante a la situación de la corrosión, la cuál debe ser examinado y atendido (Bnamericas, 2023).

Algunas evidencias del fenómeno se presentan a continuación. presenta evidencias reales de la corrosión en tanques; algunas de estas que afectan directamente ala integridad y seguridad del proceso. De otra parte, muestra evidencias de corrosión en tuberías, en un estado de alta gravedad que hace inoperante el dispositivo.

Figura 1

Corrosión en Tanques

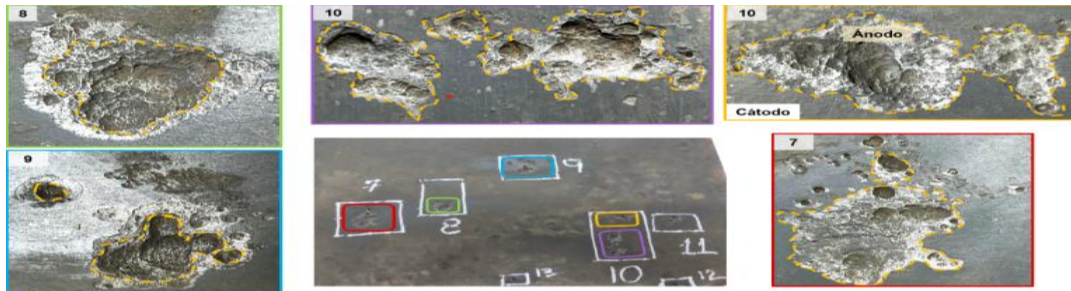


Figura 2

Corrosión en Tuberías



Para contrarrestar este problema, se utilizan sistemas de protección catódica, los cuales aplican corriente eléctrica para prevenir o reducir la corrosión en las estructuras metálicas. Sin embargo, la efectividad de estos sistemas depende en gran medida de su correcto funcionamiento y mantenimiento. Para mitigar estos efectos, es fundamental implementar estrategias de prevención y control, como el uso de recubrimientos adecuados, el monitoreo continuo de

estructuras y la aplicación de normativas como la NSR-10, que establece requisitos específicos para el diseño y construcción de edificaciones resistentes a la corrosión.

El presente trabajo de grado pretende relacionar una estrategia para mitigar este fenómeno; a partir de la comprensión del comportamiento electromagnético de la corrosión y la comprensión, a través de mediciones cuantitativas, de la situación particular.

Justificación

Las inspecciones periódicas de los sistemas de protección catódica son requisitos reglamentarios establecidos por agencias gubernamentales y organismos reguladores. Cumplir con estas regulaciones es esencial para evitar multas y sanciones, así como para garantizar la seguridad y protección del medio ambiente (Coronado Alvarado, 2021).

En este sentido, poder garantizar la inspección de sistemas de protección catódica para la mitigación de la corrosión en tuberías y tanques de almacenamiento es fundamental por varias razones. Uno de los puntos clave para llevar a cabo esta intervención es mitigar la velocidad de corrosión, que a su vez se resume en pérdida de espesor en las tuberías y tanques de almacenamiento, la protección catódica busca garantizar la mínima pérdida de espesor por año siempre y cuando se cumplan los estándares de NACE International (Asociación nacional de Ingenieros de Corrosión) de protección los cuales se encuentran disponibles en las normas específicas, como por ejemplo MR0175 y MR0103 (Classic Filters, 2013). El no garantizar los estándares de protección catódica NACE producen una velocidad de corrosión crítica resumida en pérdida por año. Es así que buscar garantizar la operación dentro de los rangos óptimos (por ejemplo: -850 mV para el potencial instant OFF y -1.250 mV para el potencial instant OFF); es fundamental para mitigar la degradación por corrosión en las tuberías (Bush et al., 2004).

También es importante destacar que una de las principales razones para aplicar estrategias de mitigación de la corrosión, es sin duda la debilitación de las estructuras de tuberías y tanques, lo que aumenta el riesgo de fallas catastróficas que pueden resultar en derrames, fugas y otros incidentes graves con consecuencias ambientales y económicas significativas. La inspección regular ayuda a identificar y abordar problemas de corrosión antes de que se conviertan en riesgos de seguridad. Este tipo de trabajos de grado aporta a la prolongación de la vida útil de las instalaciones, que a partir de la inspección periódica y el mantenimiento adecuado de los sistemas de protección catódica ayudan a prolongar la vida útil de las instalaciones, maximizando así el retorno de la inversión y reduciendo los costos a largo plazo (Case & Bezensek, 2021).

Otro aspecto clave los derrames y fugas causados por la corrosión pueden tener graves impactos ambientales, contaminando suelos, aguas subterráneas y cuerpos de agua cercanos. La inspección adecuada de los sistemas de protección catódica ayuda a prevenir estos incidentes, protegiendo así el medio ambiente y cumpliendo con las responsabilidades corporativas y sociales en términos de sostenibilidad ambiental.

Finalmente, otro argumento clave en muchas industrias, es que existen regulaciones y normativas estrictas relacionadas con la prevención y control de la corrosión. La inspección de los sistemas de protección catódica es fundamental para cumplir con estas normativas y evitar posibles sanciones legales y financieras asociadas con el incumplimiento (Bender et al., 2022).

Objetivos

Luego del contexto realizado, en esta sección se presentan los objetivos del trabajo de grado en Tecnología en Automatización Electrónica Industrial:

Objetivo General

Implementar una estrategia de inspección del recubrimiento de tuberías basado en la toma de potenciales eléctricos; orientado a mitigar corrosión en el oleoducto OBC (Oleoducto Bicentenario de Colombia).

Objetivos Específicos

Identificar las principales estrategias que se encuentran en el sector para realizar la inspección de fenómenos de corrosión en los oleoductos.

Proponer una guía para llevar a cabo una inspección, poste a poste, con el fin de determinar puntos críticos del oleoducto.

Realizar una inspección detallada del recubrimiento del oleoducto OBC; presentando recomendaciones y lineamientos para mejorar la gestión y protección del mismo.

Marco de Referencia

Marco Teórico Conceptual

En esta sección se realizará una descripción de los conceptos más importantes asociados al presente proyecto.

El Concepto de Corrosión

La corrosión es el proceso asociado al desgaste o deterioro de materiales metálicos debido a reacciones químicas y electroquímicas. Este fenómeno ocurre porque los metales buscan alcanzar un estado de menor energía potencial, lo que los lleva a reaccionar con el entorno. La mayoría de los procesos de corrosión involucran reacciones de reducción-oxidación, donde participan tres elementos clave: Un ánodo (donde ocurre la oxidación del metal), un cátodo (donde ocurre la reducción) y un electrolito (un medio conductor, generalmente una solución acuosa). Este fenómeno afecta considerablemente la infraestructura y seguridad de muchos procesos (Salazar-Jimenez, 2015).

Este fenómeno ha sido estudiado por más de un siglo, ya que si bien ocurre de forma natural, pueden establecerse estrategias para mitigarlo. Aparte de las consecuencias económicas, la corrosión ha provocado varias fallas estructurales que han tenido graves consecuencias para la salud, la vida humana y el medio ambiente circundante. Las preocupaciones de seguridad y ambientales tienden a ser muy difíciles de definir en términos de costo. Por lo tanto, los problemas de corrosión deben abordarse por seguridad y para minimizar la contaminación ambiental. Se ha producido una transformación inevitable del tema de la corrosión desde una condición de aislamiento y oscuridad a una disciplina científica e ingenieril conocida. A lo largo del tiempo, se han producido avances considerables en el campo de la corrosión y el control de la corrosión (Zehra et al., 2022).

Otro aspecto importante es comprender que la corrosión tiene una parametrización y caracterización específica. Esta se puede clasificar como química o electroquímica, según el entorno. La corrosión también se clasifica según las formas de morfología en la superficie de los materiales corroídos o según las causas que promovieron la corrosión. Las formas más comunes de corrosión incluyen la corrosión general y la corrosión localizada. Ejemplos de la corrosión clasificada según las causas incluyen el agrietamiento por corrosión bajo tensión y la corrosión con influencia microbiana (Cragolino, 2021).

Principales Factores que Influyen en la Corrosión

Según se presenta en Salazar-Jimenez (2015), Cao et al. (2022) y Bender et al. (2022) la corrosión puede ser afectada por diversos factores, entre los cuales se destacan:

Acidez de la Solución (pH): Las soluciones ácidas ($\text{pH} < 7$) aceleran la corrosión al aumentar la concentración de iones hidrógeno, los cuales pueden aceptar electrones y facilitar la oxidación del metal.

Sales Disueltas: Algunas sales pueden incrementar la velocidad de corrosión al alterar el pH de la solución electrolítica (ej. cloruro de hierro y cloruro de amonio). Otras sales, como el fosfato trisódico y el carbonato de sodio, pueden reducir la corrosión al aumentar el pH.

Capas Protectoras: Algunas capas naturales o artificiales pueden proteger el material, como los óxidos pasivos en metales como el aluminio o el cromo.

Concentración de Oxígeno: En materiales ferrosos, una mayor concentración de oxígeno incrementa la corrosión. A su vez, en materiales pasivables, el oxígeno puede facilitar la formación de una capa protectora.

Temperatura: Un aumento en la temperatura acelera las reacciones químicas y, por ende, incrementa la velocidad de corrosión.

Velocidad de Flujo de un Fluido (en sistemas de transporte de líquidos): Finalmente se encuentra el fenómeno de la velocidad de un fluido, la cual puede acelerar la corrosión al facilitar el acceso de sustancias corrosivas a la superficie del material. También puede erosionar capas protectoras, dejando al metal más expuesto a la corrosión.

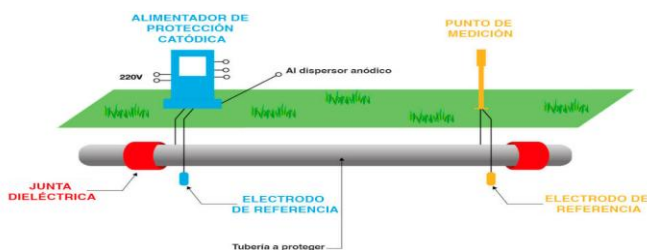
En este sentido, el fenómeno de la corrosión es multivariado y debe ser abordado desde múltiples disciplinas como la química, la electrónica, la ingeniería, entre otros.

Estrategias de Control y Mitigación de la Corrosión

Protección catódica: Según expone Ossai (2012) esta estrategia es una de las más efectivas para prevenir la corrosión en tuberías de petróleo y gas. Esta consiste en alterar el potencial electroquímico del metal a proteger, generando que se convierta en el cátodo de una celda electroquímica, lo que hace que se mitigue la oxidación. Esta estrategia genera finalmente que exista un ánodo de “sacrificio”, es decir un metal que se conecta a la tubería y que es finalmente el que termina afectado por el fenómeno de la corrosión (ejemplo de esto zinc, aluminio y magnesio). También existen procedimientos que se emplean fuentes de corriente externa para forzar un flujo de electrones y evitar la corrosión del metal base. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ilustra un esquema general de la protección catódica.

Figura 3

Esquema Protección Catódica Aplicada a Tuberías Metálicas



Nota. <https://www.fiorentini-iberia.com/es/experiencia/proteccion-catodica/proteccion-catodica-pasiva-y-activa/>

Ahora bien, precisando un poco más los dos tipos principales de protección catódica citados hasta este punto, se relaciona lo siguiente:

Protección galvánica: La protección catódica galvánica (o de sacrificio) hace uso práctico de la corrosión de metales diversos. Es importante recordar que debe existir una diferencia de potencial, o potencial impulsor entre un ánodo galvánico y la estructura a proteger. El ánodo galvánico se conecta a la estructura directamente o a través de una estación de medición, para poder monitorearlo. Algunos operadores instalan un ánodo galvánico en cada uno de los puntos donde se repara una pérdida, en lugar de instalar un sistema de protección catódica completo. Estos casos pueden darse en sistemas de metal desnudo o pobremente revestido, en los que la protección catódica completa sería poco práctica desde el punto de vista del costo. Este método implica la conexión de un metal más reactivo, conocido como ánodo de sacrificio, a la estructura que se desea proteger. El ánodo de sacrificio se corroerá preferentemente en lugar de la estructura protegida, sacrificándose para protegerla (Alamri, 2020).

Protección mediante corriente impresa: Esta estrategia se presenta como una alternativa en la protección catódica. En este enfoque, se aplica una corriente eléctrica externa a la estructura metálica, lo que la hace funcionar como el cátodo en un circuito electroquímico. Esto evita que se produzcan las reacciones de corrosión en la estructura. Un sistema por corriente impresa consiste en una fuente externa de energía y ánodos. La fuente externa hace que la corriente circule desde el ánodo hacia la estructura a través del electrolito. Los ánodos que se utilizan en un sistema por corriente impresa generalmente están hechos de un material relativamente inerte. Los principales componentes para este proceso son: rectificador, ánodos inertes, cables de conexión, electro de referencia y tubería metálica (Espinoza Huamaní, 2014).

Aplicación de recubrimientos y revestimientos: Una segunda estrategia es el uso de recubrimientos para fomentar la protección contra la corrosión, ya que actúa como una barrera entre el metal y el ambiente agresivo. Se considera en la literatura tres tipos de recubrimientos: Orgánicos, metálicos y no metálicos (López Miguel et al., 2021). Entre los principales beneficios se encuentra la reducción de la exposición del metal a agentes corrosivos, la posibilidad de combinar con protección catódica para mayor eficiencia y la mejora en la resistencia mecánica de las estructuras.

Los mecanismos de acción se centran en adsorción física, la adsorción química, las barreras de difusión y la reducción en la reactividad del metal. Ahora bien, en el proceso de aplicación de revestimientos es importante considerar: 1- Análisis del medio corrosivo, 2- Selección del inhibidor apropiado, 3- Determinación de la dosis adecuada, 4- La aplicación en la tubería por estrategias como inyección directa, aplicación por pulso, recirculación del inhibidor, entre otros; y 5- Monitoreo y evaluación de la eficiencia (Yeganeh et al., 2025). En la figura 4, **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presente un ejemplo de la aplicación de este tipo de productos

Figura 4

Compilación de Ejemplos de Aplicación de Inhibidores



Nota. <https://formacion-industrial.com/2023/12/04/proteccion-catodica-de-tuberias/>

Monitoreo e inspección de la corrosión: Uno de los aspectos de mayor interés para este proyecto de grado es la estrategia de monitoreo e inspección de la corrosión, los cuales son esenciales para mitigar fallas críticas que se puedan producir. Entre los principales beneficios se encuentra, sin lugar a dudas, la detección temprana de corrosión, la optimización de los planes de mantenimiento y la mejora de seguridad en instalaciones críticas. Entre las limitaciones o retos más importantes se encuentra el costo cuando son grandes infraestructuras y el nivel de capacitación para interpretar los resultados. Existen varios métodos o técnicas, entre esas los métodos directos (inspección visual, por ultrasonido y radiografía) y los métodos indirectos (medición de potencial electroquímico, sensores de hidrógeno, análisis de PH, entre otros). Estas técnicas son muy utilizadas para el sector de la construcción y de la inspección en sistemas de transporte de crudo (Castañeda et al., 2001; Vera, 2021).

Entre las técnicas más utilizadas para realizar estas inspecciones se encuentran, según cita Hedges et al. (2015), Yang (2020) y Vanaei et al. (2017), las siguientes estrategias:

Inspección visual y evaluación de daños: La inspección visual es el método más básico y consiste en revisar visualmente las superficies internas y externas de tuberías y tanques para identificar signos de corrosión, picaduras, agrietamientos y pérdida de material. Es un método simple y de bajo costo, no requiere tecnología avanzada y puede identificar daños evidentes. En cuanto a las desventajas no detecta corrosión oculta y depende altamente de la experiencia del inspector.

Medición de Pérdida de Espesor con Ultrasonido (UT): Esta estrategia se considera por la literatura como no destructiva, ya que mide la reducción del espesor del material debido a la corrosión, permitiendo detectar puntos de desgaste en tuberías y tanques sin necesidad de abrirlos. Entre las ventajas principales se encuentran los métodos no destructivos, permite

monitoreo en tiempo real y tiene alta precisión. Las desventajas es que no se pueden encontrar corrosiones internas en capas múltiples, requiere calibración constante y puede verse altamente afectado por las irregularidades en la superficie.

Medición de Corrosión con Resistencia Eléctrica (ER): Este método mide la corrosión en función de la variación de la resistencia eléctrica de una sonda expuesta al medio corrosivo. Es excelente si se decide realizar mediciones en tiempo real, además que permite cuantificar la velocidad de corrosión en ambientes líquidos y gaseosos. Como desventaja es que no se logra determinar una distribución espacial clara, y requiere la instalación de sensores en contacto con el medio corrosivo.

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS): Esta técnica de bastante interés para el sector hidrocarburos se orienta a la medición de la respuesta eléctrica de una superficie metálica expuesta a una solución corrosiva en diferentes frecuencias. Es un método con alta sensibilidad para la detección, siendo esto una clara ventaja; y es útil para estudiar mecanismo de corrosión. Tiene la desventaja de requerir equipo de alto costo y un personal altamente capacitado.

Con los elementos presentados hasta este punto, se cuenta con un fundamento teórico y conceptual básico. A continuación se realiza una breve revisión de artículos científicos que son de interés para la investigación.

Síntesis del Estado de Arte o Antecedentes

Para el presente trabajo de grado de tecnología, se realizó la revisión de artículos internacionales de interés sobre el tema. Se seleccionaron dos bases de datos para la revisión: Sciencedirect (por su amplitud multidisciplinar) e IEEE Xplorer (por su especificidad en el tema eléctrico).

El artículo propuesto por Li et al. (2020) aborda la detección de la corrosión por fisura de baja tensión, denominada en la literatura como SCC, particularmente en aceros inoxidable. Este fenómeno se considera un problema crítico en la industria petroquímica debido a su dificultad de detección y su impacto en la integridad estructural de tuberías. El estudio evalúa técnicas no destructivas como ultrasonido de alta frecuencia (UT), corrientes Eddy (ECT) y radiografía digital (DRT), comparando su efectividad en la identificación de microfisuras superficiales y subsuperficiales. Los resultados indican que una combinación de UT y ECT es la más efectiva para la detección temprana de SCC, ya que ofrece alta precisión sin comprometer la operatividad de los sistemas inspeccionados.

Este trabajo es altamente relevante para la presente investigación, ya que proporciona una base de comparación de tecnologías aplicables. La estrategia propuesta puede observarse como una ruta interesante para disminuir costos de mantenimiento.

De otra parte, el artículo propuesto por Chen et al. (2020) analiza la corrosión intergranular en tuberías de acero inoxidable utilizadas en una subestación de 220 kV para el suministro de agua potable. La investigación destaca que este tipo de corrosión ocurre en los límites de los granos del material debido a la segregación de impurezas y la formación de carburos de cromo, lo que debilita la estructura metálica y reduce su resistencia mecánica.

A través de pruebas de análisis químico, microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS), se determinó que la alta concentración de cloruros en el medio aceleró el proceso de corrosión, llevando a la fisuración de la tubería. Se concluyó que la soldadura sin un tratamiento adecuado favorece la formación de zonas empobrecidas en cromo, lo que aumenta la susceptibilidad a la corrosión intergranular. Como solución, se recomienda reducir el contenido de carbono en el material y añadir elementos estabilizadores

como titanio y niobio, además de mejorar los procedimientos de soldadura y aplicar tratamientos térmicos de solución sólida para restaurar la homogeneidad del material.

Esta investigación es pertinente para el trabajo de grado pues da cuenta de evidencia empírica del impacto de la composición química y los procesos de soldadura en la corrosión intergranular.

Otro trabajo interesante es el expuesto en la investigación de Norli et al (2019), ya que analiza la detección de fisuración por corrosión bajo tensión (SCC) en tuberías de gas utilizando ultrasonido acoplado a gas. La SCC es una amenaza significativa para la integridad de tuberías subterráneas de acero al carbono debido a la combinación de esfuerzos mecánicos y ambientes corrosivos. Las tecnologías actuales de inspección en línea presentan limitaciones en la identificación y dimensionamiento de fisuras pequeñas, por lo que el estudio propone una nueva técnica basada en Guided Ultrasonic Waves (GUW) acopladas mediante gas presurizado a 60 bar en un entorno experimental controlado. Los resultados muestran que esta tecnología puede detectar defectos reales en tuberías de gran diámetro, con imágenes reconstruidas que permiten identificar fisuras superficiales, campos de grietas y otras irregularidades en la pared de la tubería. Este ejemplo es valioso para el trabajo de grado pues introduce una técnica avanzada de detección no destructiva que mejora la precisión en la identificación de defectos en tuberías de gas.

En relación con esta revisión se encuentra también la experiencia expuesta en el trabajo de Mu et al. (2021) el cuál se orienta a abordar la necesidad de desarrollar tecnologías avanzadas para la inspección de corrosión en tanques de almacenamiento de petróleo sin necesidad de vaciarlos o abrirlos. Los métodos tradicionales requieren intervenciones invasivas que aumentan costos y tiempos de inactividad. Para solucionar este problema, el estudio propone un sistema de

navegación para robots de inspección basado en realidad virtual (VR). Este sistema permite controlar y monitorear robots en entornos no visibles mediante un modelo tridimensional del tanque, mejorando la planificación de rutas y la precisión en la detección de corrosión. El sistema combina sensores, planificación de rutas y técnicas de correspondencia virtual-real para optimizar la navegación y garantizar la cobertura completa del área de inspección sin intervención humana directa.

En experiencias más recientes, el trabajo de Wang et al. (2024) aborda una revisión integral del uso y desempeño de las tuberías de polietileno (PE) en la industria del gas natural, centrándose en sus mecanismos de falla, modelos de predicción de vida útil, métodos de inspección y estrategias de reparación. La principal problemática abordada es la susceptibilidad de estas tuberías a fallas por crecimiento lento de grietas, degradación térmica y química, así como defectos en uniones por fusión. Estas fallas pueden comprometer la seguridad en redes de distribución de gas, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Para abordar este problema, se analizan diversas estrategias de monitoreo, incluyendo ensayos de presión hidrostática, análisis de mecánica de fractura y técnicas de inspección no destructiva (NDT).

Además, el artículo resalta la necesidad de mejorar los modelos predictivos de fallas, integrando el impacto del envejecimiento del material y los efectos de defectos preexistentes en la resistencia mecánica de las tuberías. Esta experiencia es altamente interesante para el trabajo de grado ya que discute ya que proporciona una visión detallada de los mecanismos de falla en tuberías de PE y la importancia de aplicar técnicas de monitoreo adecuadas. La identificación temprana de defectos mediante métodos como ultrasonido, termografía infrarroja y ensayos de fractura mecánica permite mejorar la seguridad operativa y reducir costos de mantenimiento en infraestructuras críticas.

Una estrategia que se ha popularizado bastante en los últimos años son los métodos de inspección en línea (ILI). La principal problemática identificada es que la corrosión, el daño mecánico y la deformación comprometen la seguridad del transporte de hidrocarburos, lo que puede provocar fallas estructurales y pérdidas económicas significativas. Para abordar esto, se analiza la revisión de literatura expuesta en Zhang et al. (2025), en el cuál se analizan técnicas diversas como: Magnetic Flux Leakage (MFL), Eddy Current Testing (ECT), Ultrasonic Testing (UT) y Alternating Current Field Measurement (ACFM). Este trabajo es fundamental para un estudio sobre inspección de corrosión en tuberías, ya que proporciona un análisis comparativo de métodos tradicionales y emergentes, permitiendo elegir estrategias más precisas y eficientes en función del tipo de tubería y condiciones operativas.

Finalmente, pero no menos importantes, se encuentra la investigación de Hu (2024) quien desarrolla una investigación sobre el problema de la predicción de la tasa de corrosión interna en tuberías de petróleo y gas, destacando que los métodos tradicionales de predicción no consideran de manera efectiva todos los factores críticos y carecen de interpretabilidad, lo que limita su aplicación práctica. Para resolver este problema, el estudio relaciona un modelo de aprendizaje automático, utilizando el algoritmo de ExtraTreeRegression para mejorar con esto la precisión de las proyecciones. Este estudio es pertinente, ya que proporciona un enfoque basado en inteligencia artificial para la predicción y análisis de corrosión interna, mejorando la precisión y permitiendo una mejor planificación del mantenimiento.

Con el panorama presentado hasta este punto, es posible observar el avance de las técnicas de supervisión e inspección de la corrosión. En el siguiente capítulo se abordará la metodología propuesta para el proyecto y la ruta elaborada para la generación de resultados y el cumplimiento de los objetivos.

Metodología

En el presente capítulo se desarrolla la propuesta metodológica del proyecto. El ejercicio, como parte de un proceso formativo de tecnología, se centrará en la aplicación de conocimientos en contexto, así como el abordaje técnico y tecnológico, desde la electrónica y la automatización; aplicada en el sector hidrocarburos.

Tipo de Investigación

La presente propuesta se centrará en una ruta cuantitativa, orientada a presentar una estrategia aplicada de inspección del sistema de protección catódica mediante la toma de potenciales a lo largo del oleoducto OBC. Esta estrategia será considerada en un entorno real, con datos obtenidos por el autor en su experiencia de trabajo de campo. La aplicación de este conocimiento permitirá generar una evidencia de la aplicación, desde la electrónica industrial, en el contexto de la mitigación de la corrosión.

Procedimiento

La metodología se aplica en el contexto de una empresa real, contratista del sector petrolero en Colombia, y que por motivos de confidencialidad será denominada con el nombre genérico de Empresa ABC de la Corrosión. Los pasos principales que se desarrollan en la investigación son los siguientes:

Realizar una revisión de literatura de las estrategias más importantes y reconocidas en el proceso de inspección de fenómenos de corrosión en oleoductos. En esta actividad es fundamental la comparación entre técnicas clásicas y modernas; y cotejarlas con la realidad del entorno organizacional de la empresa donde se realiza el trabajo.

Presentar un cuadro comparativo de diferentes estrategias como evidencia de la revisión, delimitando claramente técnicas principales, descripción, ventajas y desventajas.

Establecer condiciones generales para el desarrollo de las pruebas en campo, realizando una planificación detallada de la inspección. Es importante considerar los protocolos propuestos por las normas discutidas en el presente trabajo de grado, principalmente la norma NACE (Classic Filters, 2013).

Organizar y presentar un flujograma claro del procedimiento con el suficiente detalle para ser un experimento reproducible.

Establecer recomendaciones o guías para llevar a cabo la inspección determinando puntos críticos a considerar.

Realizar la inspección en una tubería real con recubrimiento del oleoducto OBC, presentando resultados técnicos del análisis.

Generar recomendaciones y conclusiones, desde la perspectiva tecnológica, para mejorar la gestión y protección del mismo.

Población

El presente trabajo se considera una aplicación tecnológica en contexto. El eje central de la revisión será determinar, a partir de un análisis, las estrategias de inspección más adecuada para el caso del oleoducto de interés; y con eso llevar a cabo un ejercicio piloto de inspección. Para efectos metodológicos, y dada esta justificación, no se considera una población específica para el proyecto.

Resultados

En este capítulo se presenta el desarrollo de la investigación. Se espera que la descripción presentada en todo el documento de cuenta de los objetivos propuestos, y su coherencia con una solución en contexto real.

Comparación de Técnicas de Inspección

Uno de los procesos más importantes en este momento de la presentación de resultados es poder reconocer la diferencia entre diferentes técnicas para llevar a cabo la inspección de tuberías. Las fuentes de información principales para este análisis son presentadas y soportadas en los desarrollos.

Tabla 1*Análisis de las Principales Técnicas Para Inspección- Caso Tuberías*

Nombre Técnica	Descripción	Síntesis del procedimiento	Ventajas	Desventajas
Pipeline Current Mapper (PCM)	Localiza tuberías subterráneas y detecta fugas de corriente mediante una señal de corriente alterna. Permite mapear el trayecto de la tubería y evaluar defectos en el recubrimiento.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se introduce una señal de corriente alterna en la tubería. 2. Se usa un receptor para mapear la señal y ubicar fugas de corriente. 3. Se registra la información de la ruta y profundidad de la tubería. 	<p>No requiere contacto físico con la tubería.</p> <p>Permite mapear la profundidad y ubicación exacta.</p>	<p>Puede ser afectado por interferencias electromagnéticas.</p> <p>No proporciona información sobre el estado del recubrimiento.</p>
Alternating Current Voltage Gradient (ACVG)	Detecta puntos de fuga en el recubrimiento de tuberías mediante la medición del gradiente de voltaje inducido por corriente alterna. Es útil para identificar áreas de riesgo.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se aplica una corriente alterna a la tubería. 2. Se usa un A-Frame para medir gradientes de voltaje. 3. Se identifican defectos en el recubrimiento a partir de las lecturas. 	<p>Detecta defectos sin necesidad de excavar.</p> <p>Alta sensibilidad en defectos pequeños.</p>	<p>Requiere calibración y equipos específicos.</p> <p>No mide la profundidad del daño.</p>
Direct Current Voltage Gradient (DCVG)	Mide las diferencias de voltaje en el suelo causadas por fugas en la protección catódica, permitiendo detectar defectos en el recubrimiento de tuberías enterradas.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se interrumpe la corriente de protección catódica. 2. Se miden gradientes de voltaje con dos electrodos. 3. Se identifican defectos en el recubrimiento y su severidad. 	<p>Localiza defectos con alta precisión.</p> <p>Determina la severidad de los daños en el recubrimiento.</p>	<p>Sensible a las condiciones del suelo.</p> <p>Requiere interrupción de la corriente de protección.</p>

Nombre Técnica	Descripción	Síntesis del procedimiento	Ventajas	Desventajas
Close Interval Potential Survey (CIPS)	Evalúa la efectividad de la protección catódica midiendo el potencial eléctrico entre la tubería y el suelo en intervalos cortos, proporcionando un perfil detallado de protección.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se instala un electrodo de referencia en el suelo. 2. Se mide el potencial en intervalos regulares. 3. Se compara con estándares para evaluar la protección catódica. 	<p>Proporciona un perfil detallado de la protección catódica.</p> <p>Método no invasivo.</p>	Depende de factores externos como resistividad del suelo. Puede ser costoso en tuberías de gran longitud.
Ultrasonic Testing (UT)	Método no destructivo que usa ondas ultrasónicas para medir el espesor del material y detectar corrosión en tuberías sin necesidad de intervención física.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se limpia la superficie de la tubería. 2. Se aplica gel acoplante y se coloca el transductor ultrasónico. 3. Se mide el tiempo de retorno de las ondas para calcular el espesor. 	<p>Alta precisión en la medición del espesor restante.</p> <p>Método no destructivo.</p>	<p>No detecta corrosión interna en capas múltiples.</p> <p>Puede verse afectado por irregularidades en la superficie.</p>
Electromagnetic Inspection (EMI)	Utiliza campos electromagnéticos para detectar defectos en tuberías, incluyendo fisuras y pérdida de material. Es ampliamente usado en la industria petrolera y gasífera.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se coloca un sensor electromagnético sobre la tubería. 2. Se analiza la respuesta magnética para identificar anomalías. 3. Se registran y evalúan los defectos encontrados. 	<p>Detecta defectos ocultos en tuberías sin interrumpir operaciones.</p> <p>Sensible a una amplia gama de defectos estructurales.</p>	<p>Costos elevados de implementación.</p> <p>Requiere personal altamente capacitado.</p>

Nota. Análisis de las principales técnicas Para inspección caso tuberías

Con este panorama de técnicas, se proponen ahora las condiciones generales para el desarrollo de la inspección, teniendo como referencia el contexto del Oleoducto OBC y la disposición de equipamiento de la empresa contratista citada en el presente estudio.

Condiciones Generales para el Desarrollo de la Inspección

Antes de iniciar actividades en campo y posterior a la revisión y aprobación del Análisis de Riesgo, solicitarlos permisos de trabajo respectivos, ante la autoridad de área competente en el lugar de ejecución de las actividades. La elaboración y aprobación del permiso de trabajo aplica únicamente si éste constituye un requerimiento por parte del cliente para llevar a cabo las actividades (Hu, 2024).

Este contexto permite establecer los controles requeridos de acuerdo con la Matriz de Identificación de Peligros, Evaluación y Control de Riesgos establecida por el personal HSE, con el fin de que todas las actividades en campo se lleven a cabo de manera segura.

También es muy importante en estas condiciones iniciales, verificar que los equipos involucrados que requieran calibración cuentan con certificado de calibración vigente. En caso de que éstos no requieran calibración, sólo se debe comprobar que se encuentren operando correctamente y que cuenten con los accesorios requerido para el levantamiento de información (Classic Filters, 2013).

En caso de presentarse condiciones ambientales inadecuadas para el desarrollo de las actividades en campo, se debe suspender el trabajo hasta tanto éstas permitan continuar con la actividad. Será el encargado de la presente investigación (trabajo de grado) quien define si las condiciones son propicias para continuar con la actividad o alternativamente, si éstas no permiten el desarrollo de las mismas (Li et al., 2020).

Flujograma Para la Inspección- Guía Propuesta

En la presente investigación se acota un flujograma de procedimiento, basada en los estándares NACE, en las condiciones electroquímicas y ambientales del oleoducto y en la disposición de equipamiento. El panorama general, centrado en fases, se presenta a continuación.

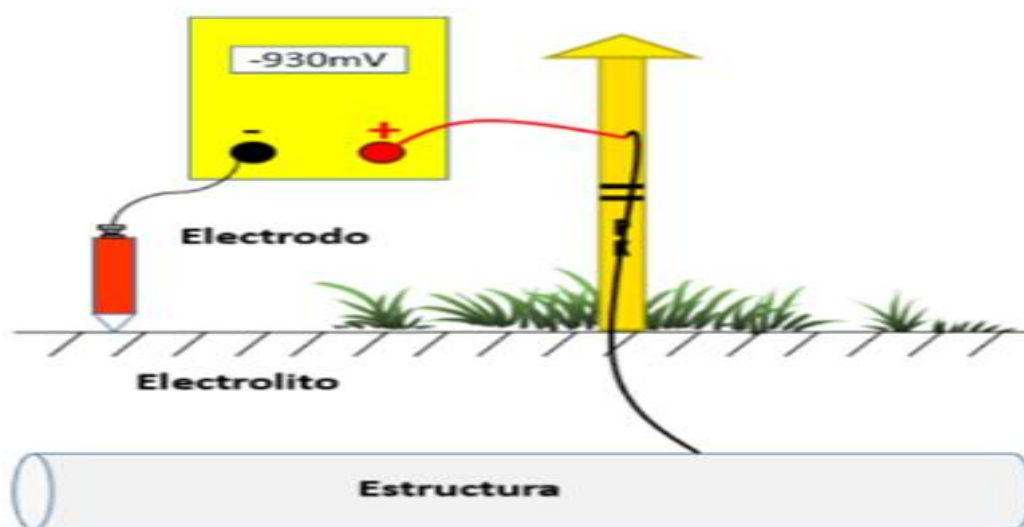
Fase 1- Identificación de fuentes de alimentación: Se identificará las fuentes de corriente del sistema de protección catódica de la estructura a inspeccionar. Esto se podrá realizar en conjunto con el cliente el cual indicará mediante coordenadas los puntos de alimentación para la protección catódica, además de ello se realizará un recorrido previo a la inspección el cual garantizará la identificación plena de las alimentaciones para la tubería a inspeccionar. Se realizará una inspección previa, correspondiente a unos puntos clave mediante los cuales podremos garantizar que las fuentes de alimentación sean las previamente identificadas. Esto se realizará mediante el uso de un multímetro de alta impedancia, una camioneta la cual nos transportará.

Fase 2 - Interrupción de fuentes de alimentación: Se realizará la interrupción sincronizada de todas las fuentes de corriente identificadas, mediante interruptores de corriente, el ciclo de interrupción a configurar será de 3 a 1 (ON – OFF), no dejando atrás que existen otros tipos de configuración que pueden emplearse ya sea por solicitud del cliente o por criterio propio. El equipo que se implementará para la interrupción de la corriente será un Interruptor de Corriente Sincronizable, disponible en la empresa contratista previamente citada en este trabajo. Se realizará la identificación de los puntos donde serán medidos los potenciales, estas facilidades (estaciones de monitoreo) están instaladas a lo largo del oleoducto a inspeccionar, en este caso se encuentran a cada kilómetro.

Fase 3- Toma de mediciones: Una vez identificado e interrumpidos las fuentes de corriente, como también identificadas las estaciones de monitoreo, procederé a realizar la medición con un multímetro de alta impedancia en la escala de mV/V DC. Luego conectare el terminal negativo (negro, COM) del multímetro al electrodo de referencia y el terminal positivo (rojo) a la conexión de la estructura presente (facilidad), de acuerdo a como se observa.

Figura 5

Esquema de la Medición de Potencial



Nota. <https://triplenlace.com/2012/12/09/potenciometria-ii-los-electrodos/>

Debe conectarse el electrodo para el que el potencial de circuito abierto es constante y conocido bajo condiciones similares de medida, los cuales son usados para medir potenciales respecto a otros electrodos.

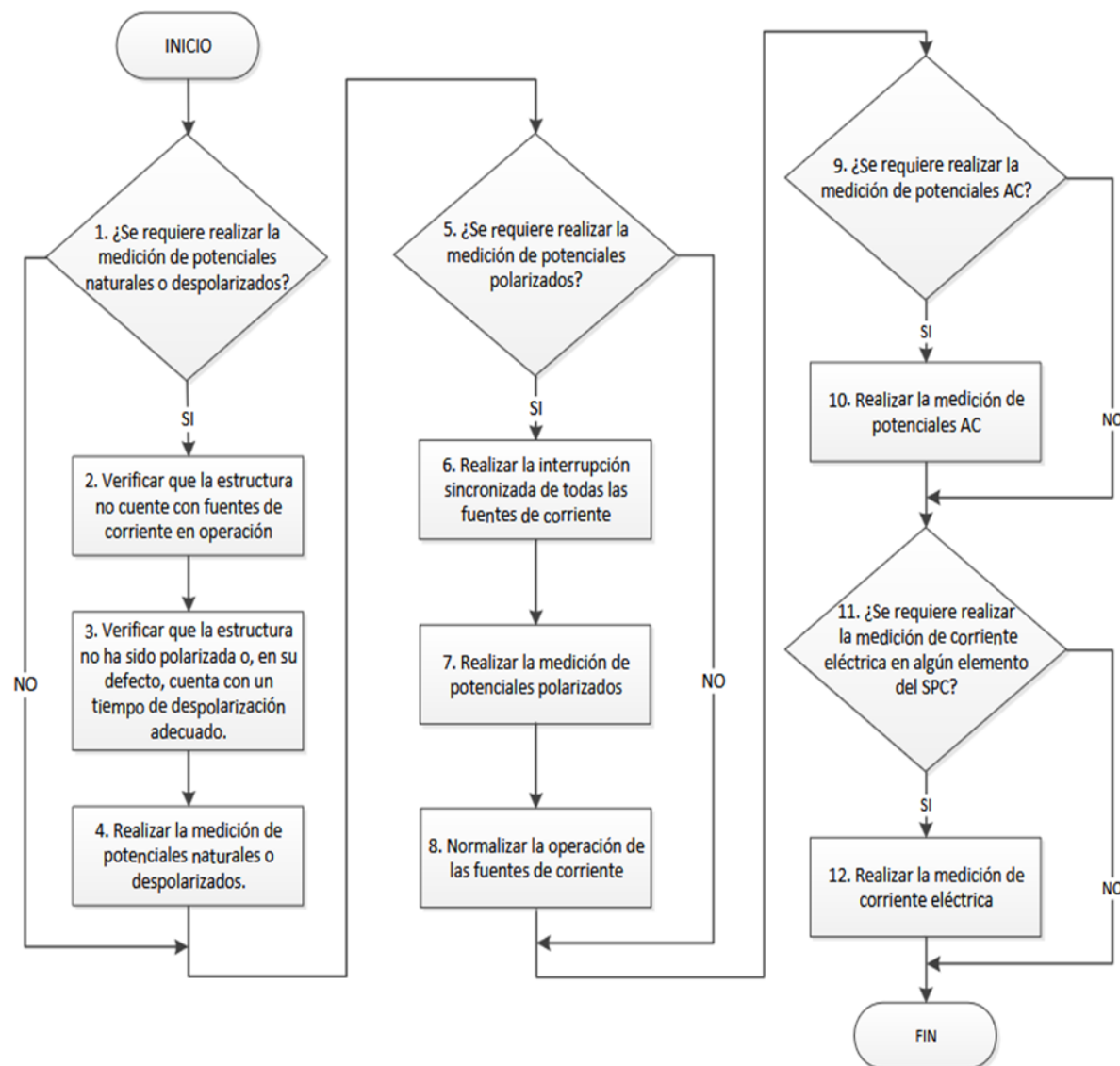
El electrodo que se utiliza en esta inspección será un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) es esencial en la protección catódica para medir los potenciales electroquímicos de las estructuras metálicas. Este electrodo proporciona un punto de referencia estable y conocido contra el cual se pueden comparar los potenciales de la estructura

protegida. Durante la inspección, el electrodo Cu/CuSO₄ se coloca en contacto con el suelo, y su potencial se mide en relación con la estructura metálica.

Ahora bien, para generar un panorama paso a paso de esta iniciativa se ha diseñado en flujograma (con 12 subactividades), que se presenta en la

Figura 6

Flujograma del Proceso Inspección



Nota. https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Diagrama-de-flujo-del-proceso-de-inspeccion-de-transporte-vertical_fig2_361244049

Resultados Obtenidos, Análisis y Discusión

A continuación, se presentarán los resultados obtenidos de la inspección, los cuales se están plasmados en la posterior a la tabla se relaciona la explicación de cada uno de los ítems para facilitar la comprensión del reporte, ya que esta sigue la estructura establecida por la organización.

Figura 7

Evidencia de Prueba de Inspección Realizada. Análisis de Datos

ITEM	FECHA	UBICACIÓN POSTE	ABSCISA	TIPO DE POSTE	REGISTRO DE POTENCIALES Vs Electrodo Cu/CuSO ₄				ESTADO POSTE					OBSERVACIONES / SUGERENCIAS
					Terminal OVC			Estado	ESTRUCTURA A POSTE	VERTICALIDAD A POSTE	ESTADO PINTURA POSTE GENERAL	ESTADO PINTURA MARCACIÓN POSTE	ESTADO BORNERA	
					ON (V)	Instant OFF (V)	AC (mV)							
1	01/nov/24	PK 00+700	000+765	Poste PC	-1882	-1200	1095	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
2	01/nov/24	PK 1+000	001+054	Poste PC	-1816	-1275	712	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
3	01/nov/24	PK 2+121	002+204	Poste PC	-2187	-1021	910	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
4	02/nov/24	PK 3+000	003+057	Poste PC	-2124	-1080	753	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
5	02/nov/24	PK 3+313	003+386	Poste PC	-2171	-1108	788	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
6	03/nov/24	PK 3+860	003+922	Poste PC	-2021	-980	694	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
7	03/nov/24	PK 4+000	004+033	Poste PC	-2193	-1107	721	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
8	03/nov/24	PK 5+000	005+012	Poste PC	-2080	-1112	712	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	Sincordado
9	04/nov/24	PK 6+000	005+996	Poste PC	-1943	-840	534	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
10	04/nov/24	PK 7+000	006+998	Poste PC	-2106	-1108	744	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No aplica
11	05/nov/24	PK 8+000	008+034	Poste PC	-2164	-1120	1083	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	Sincordado
12	07/nov/24	PK 9+000	009+042	Poste PC	-	-	-	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	No Medido, Por presencia de aristas y babilas
13	07/nov/24	PK 10+000	010+042	Poste PC	-2159	-1140	882	Protegido	POSTE METALICO BUEN ESTADO	NIVELADO	BUENA	BUENA	BUENA	Sincordado

Nota. Inspecciones realizadas

Las Convenciones Establecidas para Analizar Dicha Tabla son las Siguietes

En la primera columna se puede encontrar los ítems que van del 1 al 13 los cuales permiten identificar la cantidad de filas y así mismo dan orden a la tabla.

En la segunda columna se relaciona la fecha correspondiente a la toma de los valores.

En la tercera columna se relaciona la ubicación del poste. Este valor permite identificar en un contexto geográfico la línea que se está inspeccionado.

En la cuarta columna se encuentra el número de abcisado, este permite identificar la ubicación del poste en metros a lo largo de la tubería, cabe aclarar que este numero lo obtenemos luego de realizar un trazado geográfico en el sistema que permite precisar su ubicación geográficamente.

En la quinta columna se observa la función del poste a inspeccionar, en este caso son postes de protección catódica (bancos de prueba).

En la sexta columna se puede encontrar el valor de potencial instantáneo ON que corresponde al resultado obtenido cuando el sistema de protección catódica se encuentra encendido (fuentes de alimentación encendidos).

En la séptima columna se relaciona el potencial instantáneo OFF, correspondiente al potencial polarizado de un electrodo de semi celda, tomado inmediatamente después de que la corriente de protección catódica ha parado de fluir; el cual se aproxima al potencial libre de la caída IR (Potencial polarizado) cuando la corriente está encendida (ON), en este punto es donde encontramos algunas de las casillas de color verde, rojo o amarilla, las cuales se encuentran en esos colores de acuerdo al cumplimiento del criterio norma NACE SP0169, de la cual hablamos en la casilla novena.

En la octava columna se relaciona el voltaje AC generalmente se representa como una onda senoidal, que varía de manera continua entre valores positivos y negativos

En la novena columna se presenta el estado actual basado en la norma NACE SP0169 establece los criterios para la protección catódica de sistemas metálicos enterrados o sumergidos. Según esta norma, uno de los criterios es que el potencial de protección catódica debe ser -850 mV o más negativo cuando se mide con respecto a un electrodo de cobre/cuatro sulfatos de cobre saturado (Cu/CuSO₄).

En la siguientes columnas ubicadas en el estado del poste se encuentra el estado a nivel general de poste (Banco de prueba), como lo es la estructura del poste que en este caso son metálicos, la verticalidad del poste que habla acerca de su nivel, es decir, reporta si esta nivelado o ladeado, el estado de su pintura, el estado de su marcación, el estado de su bornera, es decir, la bornera es el lugar donde se toman las medida con el multímetro de alta impedancia, uno de los extremos del cable se encuentran conectados ala tubería enterrada y el otro extremo ala bornera que es una platina, llamado banco de prueba.

En la ultima columna se plasman algunas observaciones, correspondientes a hallazgos en la zona de inspección (Banco de prueba); realizada por el autor del trabajo de grado.

La siguiente información a medir y analizar es la proveniente de la URPC (Unidad Rectificadora de Protección Catódica) EL VIENTO. Esta información es importante al momento de considerar las correcciones o mejoras en el fenómeno de la corrosión. La información es proporcionada en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Figura 8

Análisis de la URPC EL VIENTO

Rectificador	Fecha	Hora	Voltaje TP [VAC]	Corriente TP [AAC]	Voltaje TS [VAC]	Corriente TS [AAC]	Taps [G/F]	Frecuencia [Hz]	Tensión Multímetro [VDC]	Tensión Voltímetro [VDC]	Corriente Amperímetro [ADC]	Tensión Shunt [mV]	Relación del Shunt	Corriente Calculada Shunt [ADC]	Piña Amperímetro [ADC]	Frecuencia DC [Hz]	Horómetro DC	Horómetro AC
URPC El Viento	02/nov/24	14:52	120.02	0.60	14.15	3.20	A5	60.00	13.23	13.10	2.60	3.57	1.00	3.570	2.200	120.000	No funciona	1222.480

Para esta Figura las Principales Abreviaturas son las Siguietes

DC: Corriente Directa.

V AC: Tensión en corriente alterna.

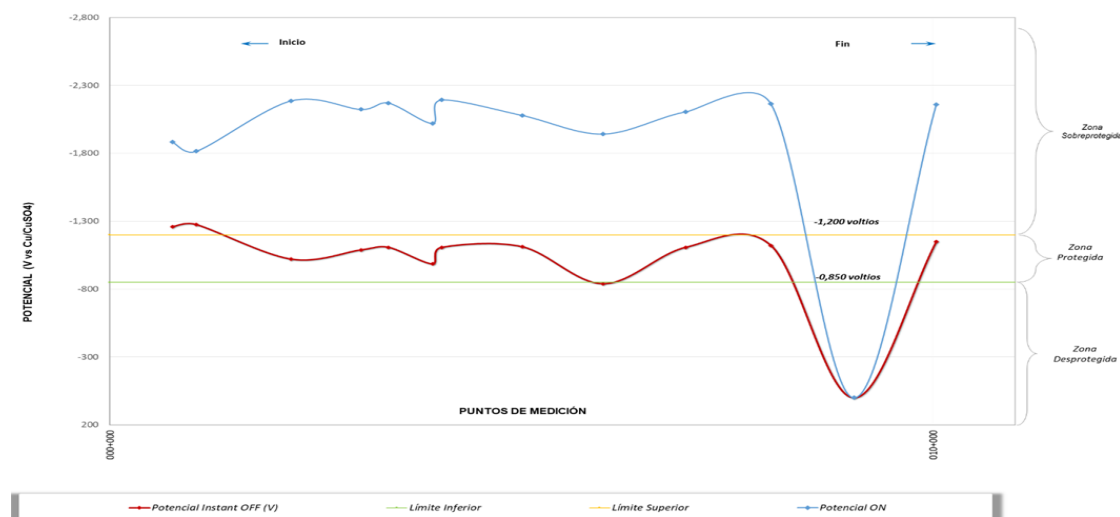
V DC: Tensión en corriente directa

RECTIFICADOR o URPC: dispositivo eléctrico que convierte la corriente alterna “AC” en corriente continua “DC”, generalmente está constituido por un transformador, diodos de silicio o selenio, medidores y otros accesorios cuando se emplean en sistema de protección catódica.

FRECUENCIA: La frecuencia de voltaje, también conocida como frecuencia de corriente alterna (AC), se refiere al número de ciclos completos de una onda senoidal que ocurren en un segundo. Se mide en hertzios (Hz).

HOROMETROS: Un horómetro es un dispositivo utilizado para medir y registrar el tiempo de funcionamiento de una máquina o equipo.

Ahora bien, luego de estas consideraciones es posible obtener una traza general que describe el comportamiento del fenómeno en el oleoducto. Esta información es presentada en la siguiente ilustración.

Figura 9*Curvas de Análisis de Potencial en la Prueba de Inspección*

Nota. <https://bookdown.org/antogiego/calibracion/Calibracion.html>

Sobre los análisis anteriores, es posible afirmar que a lo largo del oleoducto OBC encontramos el 60% de longitud protegido bajo el criterio NACE SPC 169, el 20% de se encuentra sobreprotegido excediendo los límites establecidos, para la caída que se encuentra al final de la gráfica se debe a que el 10% no e logro inspeccionar debido presencia de anfibios en la zona y e ultimo 10% corresponde al no protegido, es decir no cumple el criterio requerido de protección.

Vale la pena indicar los siguientes tres aspectos al analizar la traza anterior:

En la línea azul se evidencia el potencial ON registrado a lo largo de la inspección
(Bancos de prueba)

En la línea roja se evidencia el potencial OFF registrado a lo largo de la inspección
(Bancos de prueba)

Dentro de la línea verde y amarilla se encuentran los límites expuestos en la norma NACE SP0169-2013: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping System.

Estructura del Reporte Final

Luego de finalizada la inspección, el autor de este proyecto propone un reporte final para ser entregado a la organización interesada. Esta información fue compartida a través de un informe ejecutivo, cuyos resultados más destacados son presentados a continuación.

Figura 10

Síntesis del Reporte Ejecutivo Final

1. RESUMEN EJECUTIVO

Estructura: Oleoducto OBC

Fecha Inspección: Entre el 1 de Noviembre y el 8 de Noviembre del 2024, se realizó la medición de potenciales poste a poste del oleoducto OBC

1. OBJETIVO

Llevar a cabo la valoración del sistema de protección catódica del oleoducto OBC, mediante la medición de potenciales en los postes de monitoreo, ubicados a lo largo del sistema de transporte.

2. ALCANCE

*Medición de potenciales ON e Instant OFF en las estaciones de monitoreo ubicadas a lo largo del oleoducto OBC.

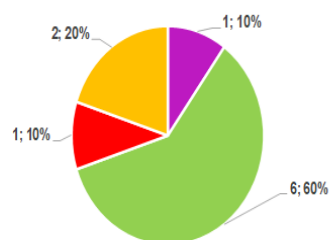
Para la ampliación de las actividades desarrolladas en campo ver el numeral **2. Metodología** y, asimismo, el numeral **4. Resultados potenciales**.

El resumen del cumplimiento del criterio de protección se presenta a continuación:

Tabla 1. Resumen Cumplimiento Criterio

RESUMEN CUMPLIMIENTO CRITERIO	No.	%
Postes no Medidos	1	10.0%
Postes de Medición Protegidos	6	60.0%
Postes de Medición no Protegidos	1	10.0%
Postes de Medición Sobreprotegidos	2	20.0%
TOTAL	10	100%

Resumen Estado Oleoducto OBC



- Postes no medidos
- Postes de medición protegidos
- Postes de medición no protegidos
- Postes de Medición Sobreprotegidos

Nota. Resumen ejecutivo Oleoducto

Conclusiones

El presente trabajo de grado permitió evaluar la eficiencia del sistema de protección catódica del oleoducto OBC mediante la toma de potenciales, un aspecto clave en la mitigación de la corrosión en infraestructuras metálicas de la industria de hidrocarburos. A lo largo del proyecto, se implementó una metodología de inspección indirecta basada en mediciones estructuradas, lo que permitió analizar la integridad del sistema y detectar deficiencias en la protección.

Los resultados indican que, aunque gran parte del oleoducto está protegido, existen sectores con sobreprotección y otros con niveles insuficientes, representando un riesgo para la seguridad y operación del sistema. Un hallazgo importante es que aproximadamente un 30% de la tubería presenta condiciones críticas, ya sea por falta de protección o sobreprotección. Esto es relevante, ya que una corriente de protección catódica inadecuada puede acelerar la corrosión o fragilizar el material. También se detectaron variaciones en la corriente de protección posiblemente influenciadas por fuentes externas, lo que sugiere la necesidad de estudios adicionales para comprender mejor estas influencias y su impacto en el sistema de protección.

El análisis de los potenciales ON y OFF mostró que el 60% de la tubería cumple con los estándares de la norma NACE SP0169-2013, lo que indica que la protección es efectiva en la mayoría de los tramos inspeccionados. No obstante, el 20% de la tubería mostró sobreprotección, lo que podría derivar en daños por hidrógeno, mientras que un 10% tenía valores por debajo del umbral mínimo, indicando falta de protección contra la corrosión externa. Además, un 10% del oleoducto no pudo ser inspeccionado debido a obstáculos en el terreno, resaltando la necesidad de estrategias complementarias para una cobertura total.

Las condiciones ambientales juegan un papel importante en la efectividad de la protección catódica. La humedad relativa en la región varía entre 77% y 83%, lo que favorece la corrosión. Esto resalta la importancia del monitoreo continuo y la implementación de estrategias de ajuste dinámico de la corriente de protección para responder a estas variaciones ambientales. En términos metodológicos, la toma de potenciales resultó ser una herramienta efectiva para evaluar el sistema de protección catódica, permitiendo identificar puntos críticos sin intervención directa en la infraestructura. Sin embargo, la metodología presenta limitaciones, como la necesidad de calibraciones periódicas y la dependencia de condiciones ambientales para una adquisición de datos precisa.

En cuanto a la mitigación de la corrosión, se concluye que la protección catódica es una de las estrategias más efectivas para prolongar la vida útil de las tuberías en la industria de hidrocarburos. Su éxito depende de una adecuada configuración y monitoreo del sistema. Se recomienda ajustar los rectificadores en zonas con sobreprotección para evitar daños y aumentar la corriente de protección en áreas con baja protección, además de realizar inspecciones más frecuentes para monitorear la evolución del fenómeno corrosivo.

Es importante incorporar tecnologías complementarias para mejorar la detección y diagnóstico de la corrosión en el oleoducto. Métodos como ultrasonido, espectroscopia de impedancia electroquímica y modelos predictivos basados en inteligencia artificial pueden mejorar significativamente la capacidad de monitoreo y predicción de fallas. La combinación de estas tecnologías con la toma de potenciales ofrecería un enfoque integral para la gestión de la corrosión en infraestructuras críticas.

Finalmente, este trabajo de grado evidencia la importancia de la protección catódica en la mitigación de la corrosión en tuberías del sector hidrocarburos y la necesidad de optimizar los

sistemas de monitoreo para garantizar su eficiencia a largo plazo. Los hallazgos obtenidos proporcionan una base para futuras investigaciones y mejoras en la inspección y mantenimiento de oleoductos, contribuyendo a la seguridad, sostenibilidad y rentabilidad de las operaciones en la industria petrolera.

Recomendaciones

En esta sección se presentan algunas recomendaciones que el autor, desde su experiencia en la electrónica y en los procesos de corrosión, se permite realizar la identificación de posibles sistemas de protección catódica que puedan estar influenciando al sistema de protección catódica del oleoducto OBC y, asimismo, realizar pruebas de influencia ciclando estos sistemas, Finalmente, se sugiere realizar la rutina de poste a poste del año 2025, interrumpiendo las fuentes que se determine tengan influencia sobre el oleoducto OBC

Sobreprotección Registrada

Realizar ajuste del rectificador El Viento, con el fin de disminuir la sobreprotección en el sector.

Verificar, en algunos puntos de control definidos a partir del presente poste a poste, cómo se comporta el potencial luego de los ajustes en las URPC de El Viento en noviembre del 2025, determinando si se requiere llevar a cabo el ajuste de la corriente de este rectificador.

Realizar estudio de interferencias en el PK 6 debido al bajo potencial que se registran en esta zona.

Instalar una estación de prueba con cupones para la medición de potencial ON e Instant OFF libres de caída óhmica, con el fin de tener una medición de potencial Instant OFF libre de fuentes externas, en las zonas con potencial más altos.

Realizar control de riesgos biológicos en los siguientes postes:

En el PK 9+000: presencia de babillas y avispas.

Realizar la instalación de candados en los siguientes postes:

PK 5+000.

En el PK 10+000.

Bibliografía

- Alamri, A. H. (2020). Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines—An overview. *Engineering Failure Analysis, 116*, 104735.
- Bender, R., Féron, D., Mills, D., Ritter, S., Bäbler, R., Bettge, D., De Graeve, I., Dugstad, A., Grassini, S., & Hack, T. (2022). Corrosion challenges towards a sustainable society. *Materials and Corrosion, 73*(11), 1730–1751.
- Bnamericas. (2023). *Oleoducto Bicentenario de Colombia (OBC) Fase 1*.
<https://www.bnamericas.com/es/perfil-proyecto/oleoducto-bicentenario-de-colombia-obc-fase-1>
- Bush, D. R., Lewis, K. R., & Brown, J. C. (2004). An overview of NACE international standard MR0103 and comparison with MR0175. *Corrosion* (NACE-04649).
- Cao, Q., Pojtanabuntoeng, T., Esmaily, M., Thomas, S., Brameld, M., Amer, A., & Birbilis, N. (2022). A review of corrosion under insulation: A critical issue in the oil and gas industry. *Metals, 12*(4), 561.
- Case, R., & Bezensek, B. (2021). Fracture toughness assessment of the susceptibility for sulfide stress corrosion cracking in high-strength carbon steels: A review. *Corrosion, 77*(1), 5–15.
- Castañeda, J., Almeraya, F., Tiburcio, C., Vázquez, G., & Villafañe, A. M. (2001). Inspección de la corrosión en puentes de concreto reforzado mediante un monitoreo autónomo a distancia. *Revista Ingeniería de Construcción, 16*(2), 87–96.
- Chen, H., Yu, X., Tan, X., & Xie, L. (2020). Analysis on intergranular corrosion of direct drinking water pipe used in 220kV substation. En *2020 3rd International Conference on*

Electron Device and Mechanical Engineering (ICEDME) (pp. 14–17).

<https://doi.org/10.1109/ICEDME50972.2020.00011>

Classic Filters. (2013). *Estándares NACE*. <https://www.classicfilters.com/es/sin-categorizar/estandares-nace-que-son/?cn-reloaded=1>

Coronado Alvarado, J. A. (2021). *Diseño de sistema de protección catódica para tubería en campo de producción de petróleo*.

Cragolino, G. A. (2021). Corrosion fundamentals and characterization techniques. En *Techniques for Corrosion Monitoring* (pp. 7–42). Elsevier.

Espinoza Huamaní, C. A. (2014). *Protección catódica por corriente impresa para control de corrosión externa de tanques sumideros enterrados usados en la producción de petróleo Pavayacu-Loreto*.

Harsimran, S., Santosh, K., & Rakesh, K. (2021). Overview of corrosion and its control: A critical review. *Proc. Eng. Sci.*, 3(1), 13–24.

Hedges, B., Papavinasam, S., Knox, T., & Sprague, K. (2015). Monitoring and inspection techniques for corrosion in oil and gas production. *NACE* (NACE-2015).

Hu, J. (2024). Prediction of the internal corrosion rate for oil and gas pipelines and influence factor analysis with interpretable ensemble learning. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 212, 105329. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105329>

Li, Y.-T., Dai, H.-B., Song, C., & Liang, L.-H. (2020). A study on techniques to detect surface stress corrosion cracking in austenite stainless steel. En *2020 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT)* (pp. 96–100).

<https://doi.org/10.1109/FENDT50467.2020.9337555>

López Miguel, A., Perez Quiroz, J., Martinez Madrid, M., Ortega Borges, R., Rendon Belmonte, M., Teran Guillen, J., & Arroyo Olvera, M. (2021). Estudio cinético y caracterización del recubrimiento anticorrosivo base níquel (Ni) para su aplicación en sistemas de protección catódica por corriente impresa (PCCI) como ánodo en estructuras de concreto.

Publicación Técnica, 620.

May, Z., Alam, M. K., & Nayan, N. A. (2022). Recent advances in nondestructive method and assessment of corrosion undercoating in carbon–steel pipelines. *Sensors*, 22(17), 6654.

Mu, H., Li, Y., Chen, D., Li, J., & Wang, M. (2021). Design of tank inspection robot navigation system based on virtual reality. En *2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* (pp. 1773–1778).

<https://doi.org/10.1109/ROBIO54168.2021.9739389>

Norli, P., Vallée, E., Aanes, M., Prieur, F., Bjåstad, T. G., Standal, Ø. K.-V., Brende, O. M., & Frijlink, M. (2019). Ultrasonic detection of stress corrosion cracks in pipe samples in gaseous atmosphere. En *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)* (pp. 1624–1627). <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2019.8925831>

Ospino Ospino, F. M., & Martínez Gamero, J. M. (2021). *Análisis de los efectos de la corrosión en el comportamiento estructural para una edificación aporticada convencional de concreto reforzado en Colombia*.

Ossai, C. I. (2012). Advances in asset management techniques: An overview of corrosion mechanisms and mitigation strategies for oil and gas pipelines. *International Scholarly Research Notices*, 2012(1), 570143.

Salazar-Jimenez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: Tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Tecnología en Marcha*, 28(3), 127–

136. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0379-39822015000300127&script=sci_abstract&tlng=es

- Santa, A. C., Montoya, D. A., Tamayo, J. A., Gómez, M. A., Castaño, J. G., & Baena, L. M. (2024). Atmospheric corrosion of carbon steel: Results of one-year exposure in an Andean tropical atmosphere in Colombia. *Heliyon*, *10*(8).
- Vanaei, H., Eslami, A., & Egbewande, A. (2017). A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, *149*, 43–54.
- Vera, R. A. V. (2021). Actualidad de las técnicas de análisis de corrosión en estructuras de concreto reforzado. *E-IDEA Journal of Engineering Science*, *3*(8), 1–10.
- Wang, H., Shah, J., Hawwat, S.-E., Huang, Q., & Khatami, A. (2024). A comprehensive review of polyethylene pipes: Failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, *4*(2), 100174. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2024.100174>
- Yang, L. (2020). *Techniques for corrosion monitoring*. Woodhead Publishing.
- Yeganeh, M., Heydarie, Y., Shahryari, Z., Asadi, N., Kahkesh, H., & Ramezanalizadeh, H. (2025). Corrosion inhibitor of API pipeline steels: A review. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, *11*(2), 44.
- Zapata, D. R. (2023). *Sistema para la gestión de la integridad de ductos para el transporte de hidrocarburos. Corrosión y medidas preventivas*.
- Zehra, S., Mobin, M., & Aslam, J. (2022). An overview of the corrosion chemistry. En *Environmentally Sustainable Corrosion Inhibitors* (pp. 3–23).

Zhang, J., Sun, M., Qin, L., Lin, D., Liu, C., Li, J., Li, C., Wen, S., & Han, C. (2025). In-line inspection methods and tools for oil and gas pipeline: A review. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 214, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2024.105409>