

WWI PROCAT, S.L.



CORROSIÓN POR CORRIENTE ALTERNA Y PROTECCIÓN CATÓDICA

(extracto del documento del CEOCOR para estos efectos y algunas aportaciones)

Los nuevos fenómenos de corrosión aparecidos, relacionados con corriente alterna, normalmente son resultado de voltajes inducidos cuando la conducción sea paralela a la línea eléctrica de alto voltaje o por trenes electrificados con alterna, bien por inducción o por corrientes erráticas.

La importancia de estas interferencias cada vez es más importante.

Los factores que contribuyen a este aumento son:

- Incremento de la cantidad de líneas de alta voltaje
- La aparición e incremento de los trenes de alta velocidad
- La calidad de los revestimientos, con gran aislamiento, en los modernos revestimientos de tuberías.

Cuando hay interferencias con corriente alterna, los sistemas tradicionales de protección catódica no siempre garantizan una protección adecuada contra la corrosión, y se deben adoptar medidas de protección especiales.

Desde 1.986, se ha informado de varios casos de corrosión en tuberías de gas debido a AC (16 y 50 Hz).

En todos los casos las medidas de protección catódica, con las técnicas convencionales, eran satisfactorios para los criterios convencionales.

En los últimos años, en Europa, varios casos de corrosión han sido descubiertos que pueden ser claramente debidos a la corrosión por corriente alterna. De la información disponible (que probablemente es solo un pequeño porcentaje de todos los casos), se puede hacer el siguiente resumen (fuente: A.C. CORROSION ON CATHODICALLY PROTECTED PIPELINES del CEOCOR):

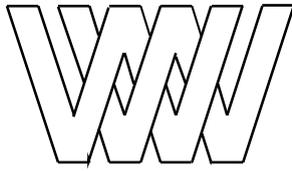
- N° de casos de corrosión conocidos en Europa: 23
- N° de fugas (perforaciones): 4
- N° de casos de ataques por corrosión observados: 709

Fuentes de Interferencias:

- Líneas aéreas o enterradas de alta tensión
- Paralelismo con líneas de corriente
- Sistemas de tracción de alta velocidad (normalmente alimentados por una línea de alimentación de 132 V y 25 KV).

Parámetros que afectan a la corrosión por corriente alterna

La corrosión, como en todos los caso de corrosión electroquímica, es causada por el intercambio



WWI PROCAT, S.L.

de corriente entre el metal y el electrolito.

La amplitud del voltaje inducido depende varios parámetros:

- Distancia entre los cables de las fases
- Distancia entre los cables de la línea y las tuberías
- Líneas que operan por encima de las tuberías
- Resistencia del revestimiento de la tubería

La corrosión en alterna es principalmente influida, o asociada, con:

- Densidad de corriente alterna
- Potenciales ON-OFF
- Tamaño de los defectos del revestimiento
- Resistividad del suelo
- Composición química del suelo
- Formación de sales en la fase metal-suelo debido a las reacciones de protección catódica.

ASPECTOS FUNDAMENTALES

Cuando una tubería de acero es interferida por corriente alterna, el voltaje puede medirse entre la tubería y un electrodo de referencia. Con referencia a la fig.2.1 las siguientes cantidades pueden ser identificadas:

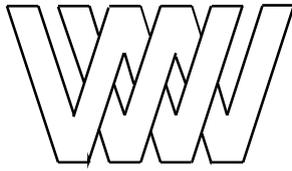
- Vac, ON es igual al voltaje en alterna que se mide entre la tubería y la tierra remota. Este voltaje incluye la caída IR existente en el suelo, así como al “verdadero voltaje en alterna” existente directamente en la superficie de la tubería.
- Vac. OFF. Es el voltaje existente, directamente en la superficie de acero “Verdadero voltaje o potencial en alterna”, sin la caída IR debida a la resistencia de difusión (resistencia por las sales acumuladas en la tubería desnuda).
- Ec, OFF es el potencial sin caída IR en la superficie de acero (potencial real)

Modelo eléctrico

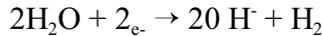
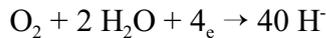
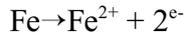
La impedancia total suelo-tubería puede ser vista como la suma de la impedancia de difusión y la de polarización, relacionada con la electroquímica de la interfase tubería-suelo. La caída IR es debido a la resistencia de difusión y a la caída de potencial entre la posición del electrodo de referencia y el defecto del revestimiento de la tubería.

La capacitancia puede jugar un papel importante en el comportamiento de la corrosión por C.A. en el sentido de que si la carga de la doble capa (capa de difusión) alcanza un valor crítico, con lo que se iniciaría un proceso electroquímico a través de la doble capa.

Las reacciones típicas en la disolución anódica del acero son:



WWI PROCAT, S.L.



La disolución del metal puede iniciarse, cuando el potencial supera el potencial de protección. La reducción del oxígeno da lugar a potenciales menores que el de equilibrio del electrodo de oxígeno, y la evolución del hidrógeno lleva a potenciales más bajos que el de equilibrio del hidrógeno.

La resistencia definida por este proceso electroquímico es conocida como resistencia de polarización (R_p).

La resistencia de polarización no es lineal. Depende de la química del suelo, y de los productos adheridos a la superficie del acero y del potencial de la tubería.

La impedancia de polarización puede verse como un acoplamiento de la resistencia de polarización y la capacitancia de la doble capa. Así esto incluye realmente una impedancia imaginaria que puede causar un retraso (ángulo de fase) entre el voltaje y la corriente, como se indica en la figura.

Estas ideas sobre el mecanismo de corrosión por corriente alterna no dirigen a los siguientes criterios para un inicio sobre el estudio del riesgo de corrosión por corriente alterna.

EVALUACIÓN DE RIESGO DE CORROSIÓN ALTERNA

Estos pueden ser evaluados de acuerdo a los siguientes enfoques:

CÁLCULO DE LA CORRIENTE ALTERNA INDUCIDA CON LA TUBERÍA

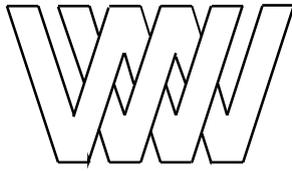
General

Esto es algo que se debe considerar durante el diseño de la línea eléctrica que puede causar el problema o el de la conducción que puede ser dañada.

Si se prevén voltajes excesivos en las tuberías, debido a las líneas de alta tensión o sistemas de tracción eléctrica con cables aéreos, la configuración de la estructura que causará los problemas, y de la que los sufrirá, así como los equipos conectados han de ser considerados desde un punto de vista eléctrico.

Ello supone:

- El comportamiento de la línea de alta tensión o de tracción (altura, corriente, tensión, líneas, localización relativa entre fases, etc.)
- El comportamiento eléctrico de la tubería en el medio en que está



WWI PROCAT, S.L.

(revestimiento, suelo, puesta a tierra, etc.), y el comportamiento eléctrico entre las distintas partes de la tubería (uniones equipotenciales, juntas aislantes.

- Situación geométrica entre la tubería y las líneas de alta tensión o cables de tracción (longitud de paralelismos, distancia entre ellas, ángulo de cruce, etc).

Para los cálculos se deben tener en cuenta las peores condiciones (voltajes, corrientes).

Evaluación de cuando los cálculos de corriente inducida deben ser hechos

Inadmisibles voltajes en tuberías debidos a líneas de tracción y de alto voltaje pueden esperarse y necesitar mayor examen en los siguientes casos:

- Cuando la distancia entre la línea aérea y la tubería es menos que:

$$d = 300 \cdot \rho^{1/2} \quad \text{donde:}$$

- d (m) = distancia entre los cables y la tubería
- ρ (ohm x cm) = resistividad del suelo

En medios urbanos, debido a la presencia de otras estructuras metálicas en el suelo (cables de alimentación en baja tensión y de telecomunicaciones, tuberías de gas y de agua), la distancia debe ser menor.

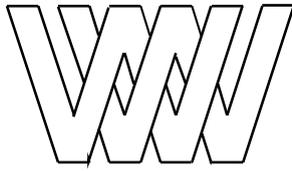
- Cuando la longitud del paralelismo es superior a 2.000 m

Parámetros que se deben considerar

Para los parámetros de las líneas eléctricas de alta tensión y de tracción, como se menciona más tarde, es importantes para el modelo matemático, describir la fuente de interferencia, y por lo tanto el propietario de esta fuente debe dar la siguiente información:

- Corrientes (Amp) y voltaje (V) de los conductores en condiciones de sobre carga o cortocircuito.
- La altura sobre el suelo y la posición de los cables de las fases, entre ellas (m), medidas en las torres de apoyos.
- La localización y características de los sistemas de puesta a tierra de las torres, y los dispositivos de limitación de voltaje.

Por todo ello los datos de entrada, que se deben tener en cuenta, para los cálculos matemáticos de las interferencias.



WWI PROCAT, S.L.

- Coordenadas de las tuberías y líneas de alta tensión (para calcular las distancias entre ambos sistemas)
- Longitud de la tubería dentro del área expuesta (km)
- Profundidad de la tubería enterrada (m)
- Diámetro exterior de la tubería (mm)
- Espesor de la pared de la tubería (mm)
- Espesor del revestimiento (mm)
- Resistencia del revestimiento (Ohm/m²)
- Resistividad de la tubería (Ohm x mm)
- Características eléctricas del fluido (si no es gas)
- Resistividad del suelo (Ohm x m)
- Localización y características de las puestas a tierra, limitación del voltaje por los dispositivos instalados para ello, celdas de polarización, equipos eléctricos o electrónicos, dispositivos de protección catódica, juntas aislantes.

Los cálculos considerados en las condiciones normales (voltajes, corrientes), pueden ser hechos y seguidos por comparación con las medidas en el campo.

Algoritmos de cálculos y resultados

- Los algoritmos de los cálculos se definen en el volumen III del ITU-T (CCITT).
- Capacitancia, inducción y conducción de los acoplamientos.

MEDIDAS “IN SITU”

Una primera aproximación o enfoque, como medida preliminar puede realizarse en las tuberías interferidas.

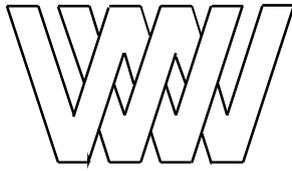
Dependiendo de los resultados, se pueden llevar a cabo más acciones específicas, como:

- Medidas con probetas
- Medidas específicas
- Inspecciones apropiadas

Medidas preliminares

En las secciones de tuberías dentro del área afectada, las siguientes medidas deben ser llevadas a cabo:

- Voltaje en alterna tubería-suelo, con un electrodo de referencia en las



WWI PROCAT, S.L.

tomas de potencial (medidas instantáneas), la hora de ejecución de cada medida deberá ser anotada, para proseguir el cálculo de la corriente inducida, siempre bajo las mismas condiciones durante las medidas.

- Medidas de corriente alterna en los sistemas de puesta a tierra existentes.
- Resistencia a tierra de la tubería.
- Resistividad del suelo en los sitios donde se mide el voltaje tubería-suelo.
- Registros de 24 horas AC en puntos donde se prueben las corrientes inducidas más altas.

Todas las medidas en tuberías deben llevarse a cabo en las siguientes condiciones:

- Todas las EPC, drenajes y conexiones deben estar en sus condiciones de funcionamiento normal.
- Todos los sistemas de puesta a tierra deberán conectarse (celdas de polarización, discriminadores de corriente AC-DC, descarga de corriente alterna, condensadores, etc.).
- El electrodo de referencia debe colocarse sobre el suelo lo más cerca posible de la tubería.

Medidas específicas

En los tramos donde los voltajes de alterna sean superiores a 10 V ó donde los voltajes a lo largo de la tubería muestren variaciones disminuyendo, indicando una posible descarga, deben tomarse medidas de tratamiento especiales.

No debe tenerse en cuenta, un solo criterio o medida para evaluar el riesgo de corrosión ya probado.

Algunas técnicas de medidas específicas con criterios asociados se utilizan:

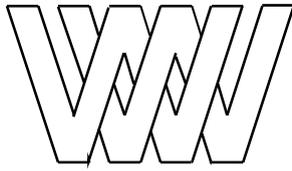
- Potencial tubería-suelo
- Densidad de corriente
- Relación entre corriente alterna y continua

Potencial tubería-suelo (con la utilización de electrodos probeta)

El potencial instantáneo OFF de las probetas debe medirse desconectando la probeta de la tubería (midiendo el potencial sin caída IR).

Para esto se puede utilizar un sistema de medida automático.

Este sistema de medida consiste en un data-logger, que lee y almacena periódicamente. El dispositivo mide el potencial cuando la probeta está conectada a la tubería (E ON), desconecta la probeta de la tubería por medio de un relé, mide el E OFF, normalmente entre 0,1 y 1 segundo



WWI PROCAT, S.L.

después de la desconexión y conecta la probeta otra vez a la tubería. Junto con el potencial E ON se mide la corriente de la probeta y es registrada en el data-logger.

Debido a la no sincronización del ciclo de medida dentro del periodo de interferencia de C.A., las medidas deben hacerse durante un tiempo dentro del que haya interferencias, incluyendo los valores de cresta.

Evaluación del riesgo de corrosión

Empleando esta técnica de medida, se considera que la tubería está protegida de la corrosión por interferencias de C.A. si el potencial E OFF es en todo momento más negativo que -850 mV y -950 mV en suelos anaerobios que contengan bacterias sulfato reductoras.

Densidad de corriente alterna

Método de medida

Se instala una probeta de acero desnuda cuya superficie sea conocida próxima de la tubería enterrada, y se conecta eléctricamente a ésta.

Se intercala un amperímetro en la conexión, entre el cable de la probeta y la tubería para medir el valor RMS de la corriente alterna. Deberán medirse pequeñas corrientes con un shunt de 1 Ω o menos, o bien se utilizará un amperímetro de resistencia cero. Entonces, se podrá calcular la densidad de corriente RMS.

Evaluación del riesgo de corrosión por C.A.

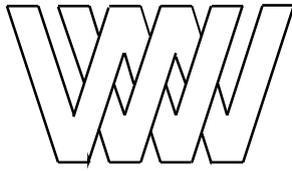
Si la densidad de corriente en alterna es superior a 30 A/m² puede considerarse que hay cierto riesgo de corrosión. En las normas de NACE este valor se fija, como severo riesgo de corrosión a 200 A/m².

Densidad de corriente media

Método de medida

Se entierra una probeta de acero desnudo con una superficie conocida, próxima a la tubería, y se conecta eléctricamente, para conocer la corriente de P.C y la interferencia de C.A. en la tubería investigada.

Se intercala un amperímetro entre el cable de la probeta y la tubería para medir la corriente continua y la corriente alterna RMS. Se medirán pequeñas corrientes, probablemente, con un shunt (1 Ω o menos), o



WWI PROCAT, S.L.

utilizando un amperímetro de resistencia cero.

Con estos valores se calcula la relación I_{ca}/I_{cc} .

Evaluación del riesgo de corrosión:

Con esta técnica de medida, si la relación entre la densidad de corriente alterna RMS y la continua

- Si es inferior a 3, el riesgo de corrosión pro CA puede considerarse muy bajo.
- Si esta relación está entre 3 y 10, el riesgo es medio, y el problema debe ser investigado más.
- si esta relación es superior a 10, el riesgo de corrosión por CA debe considerarse alto y deben tomarse medidas de mitigación inmediatas.

PROBETA, DISEÑO E INSTALACIÓN

Cuando empleamos probetas, se debe tener en cuenta que la resistencia de difusión será modificada por parámetros físicos (área, resistividad del suelo), así como también por otros químicos (formación de capas, o formación de sales higroscópicas) causadas por la corriente de protección catódica.

En las primeras investigaciones realizadas sobre daños de corrosión por C.A. los defectos de revestimiento tenían aproximadamente 1 cm^2 .

Por esta razón se recomienda para estas medidas de evaluación de los riesgos de corrosión por C.A. probetas de 1 cm^2 .

Los problemas de corrosión por C.A. aparecen principalmente cuando los defectos de revestimiento son pequeños y las densidades de corriente altas.

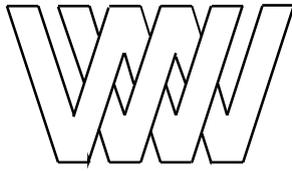
Características de las probetas portátiles, e instalación.

Redondos de acero con revestimiento que tengan un defecto de 1 cm^2 , se usan para medidas de pequeña duración.

Las medidas con probetas portátiles no contemplan los cambios químicos debidos a la corriente de protección.

Probetas permanentes, características e instalación

Estas probetas también son conocidas como probetas de corrosión. Se instalan



WWI PROCAT, S.L.

igual que las portátiles.

Después de cierto tiempo (por ej. 12 meses), la probeta de corrosión puede descubrir y examinar para observar su corrosión. Si hay señales de corrosión, pueden esperarse daños de corrosión en la tubería, donde haya defectos de revestimiento.

Los electrodos de referencia pueden instalarse para largo tiempo, pero puede fugarse la solución electrolítica del interior e incrementar la demanda de corriente de protección de la probeta. Esto se soluciona instalando electrodos probeta (la probeta incrustada en el cuerpo del electrodo) correctamente diseñados y fabricados.

LOCALIZACIÓN DE LOS DEFECTOS DEL REVESTIMIENTO Y CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

En los tramos interferidos se pueden realizar las siguientes medidas:

- Detección y localización de los defectos del revestimiento, por métodos capaces de detectar pequeños defectos (menores a 1 cm²).
- Medida de la resistividad del suelo a la profundidad de la tubería y en los puntos donde hay defectos.
- Descubrir la tubería en algunos puntos donde haya defectos, donde los cálculos de corrientes alternas inducidas den valores más altos.
- Registrar Vca durante 24 horas.

Si se encuentra corrosión en pequeños defectos, deben investigarse todos los defectos que tengan características similares y repararlas

Resistividad del suelo

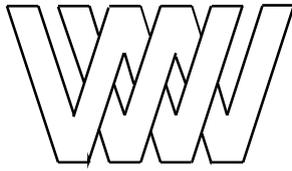
Resistividades bajas o muy bajas en las proximidades de la tubería pueden incrementar la corrosión por C.A.

La resistividad del suelo puede determinarse por el método Wenner, directamente sobre el suelo o con muestras del terreno.

La resistencia de difusión $R_s = C/2 d$; donde d (cm) = diámetro de la probeta
 C (ohm x m) = resistividad del suelo

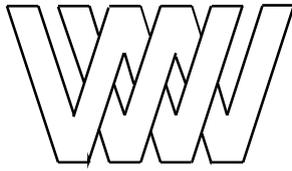
Esto significa que la resistencia de difusión de la probeta, puede ser vigilada con los cambios de resistividad en el suelo.

Debe cuidarse:



WWI PROCAT, S.L.

- La medida de resistividad del suelo sea a la profundidad suficiente (en campo)
- El empleo de muestras del suelo que sean de las proximidades de la tubería
- Medida del PH: los valores de PH próximos a la probeta tienen gran importancia. El valor debe determinarse inmediatamente después de descubrir la probeta, ya que la superficie alcalina de la probeta se neutraliza rápidamente en el CO₂ del aire.



WWI PROCAT, S.L.

IDENTIFICACIÓN DE UN CASO DE CORROSIÓN POR C.A.

Cuando aparece la corrosión en una tubería enterrada paralela a líneas de alta tensión de sistemas de tracción, se debe hacer una cuidadosa verificación del origen de la corrosión.

La presencia de voltajes, de C.A. tubería-suelo, es generalmente un requisito para atribuir la corrosión a la C.A. pero pueden durante la excavación en los sitios donde se sospecha hay corrosión por C.A., deben medirse la resistividad y el PH del suelo cerca del punto de excavación.

Deben tomarse conjunto de muestras del producto de corrosión y examinarlas en el laboratorio.

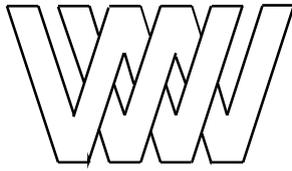
Para reconocer el caso de corrosión por C.A. se debe utilizar el siguiente cuestionario:

Si la mayoría de las respuestas es afirmativa, puede concluirse que muy probablemente de trata de un caso de corrosión por C.A.

	SI	NO
Presencia de voltajes de C.A. en las tuberías		
Presencia de un defecto de revestimiento (normalmente de pequeño tamaño, como mucho 1 cm ²)		
Presencia de corrosión		
Las medidas de potenciales de protección catódica no están dentro de un criterio aceptable		
El PH es bajo (normalmente por debajo de 10)		
La forma de la picadura por corrosión es redondeada (parecida a un cráter)		
La picadura de corrosión es mayor que el defecto de revestimiento		
Los productos de corrosión pueden retirarse con facilidad en una pieza		
Tras retirar los productos de corrosión, aparece una capa oscura-negra, en la superficie del acero		
Presencia de una capa, lejos del área corroída o dentro de los productos de corrosión que contiene grandes cantidades de carbonato de calcio		
Presencia de magnetita en los productos de corrosión (esto puede ser confirmado con un imán)		
Presencia de piedras en el suelo		

MITIGACIÓN DE LA C.A.

Si la salida de corriente del rectificador no puede ajustarse para obtener medidas valores de protección y se deben probar otras medidas, como evitar o reparar los defectos del revestimiento,



WWI PROCAT, S.L.

o reducir la densidad de corriente en los defectos del revestimiento.

Las diferentes soluciones que se pueden adoptar son:

- Incrementar la distancia entre la tubería y la línea de alta tensión.
- Optimizar la situación de las fases y de los cables a tierra
- Compensar el voltaje inducido
- Instalación de juntas aislantes
- Reparación de los defectos del revestimiento
- Cambiar el entorno (tipo de tierra) en las proximidades de la tubería
- Utilizar cables de tierra paralelos.

Medida adoptada	Ventajas	Desventajas
Incremento de la inyección de corriente de protección catódica	<ul style="list-style-type: none">• Costes bajos.• Sencillo de comprobar	<ul style="list-style-type: none">• Solo es sencillo donde las interferencias son bastante bajas.
Incremento de las distancia entre la tubería y la línea de alta tensión o del tren electrificado		<ul style="list-style-type: none">• Solución muy eficaz pero normalmente veces difícil de llevar a cabo.• No es factible en sistemas ya existentes.
Ajuste de las fases y puesta a tierra de la línea eléctrica		<ul style="list-style-type: none">• Solo es posible para nuevos diseños de las líneas de alta tensión.• La solución puede no ser aceptada por la compañía eléctrica.
Puesta a tierra de la tubería	Habitualmente es una buena y barata solución	Puede haber problemas en suelos con resistividades altas, por la alta resistencia de la puesta a tierra.
Compensación del voltaje en alterna		<ul style="list-style-type: none">• Difícil de instalar y ajustar.• Instalación y mantenimiento bastante costosos
Instalación de juntas aislantes	<ul style="list-style-type: none">• Posibilidad aceptable para variar la configuración óptima por los cálculos y diseño.	<ul style="list-style-type: none">• La instalación requiere interferencias con el funcionamiento de las tuberías si ya están instaladas.
Reparación de los defectos del revestimiento de la tubería		<ul style="list-style-type: none">• Requiere adoptar medidas complementarias.
Cambio de suelo en el entorno de la tubería		<ul style="list-style-type: none">• Discutible estado o calidad del nuevo relleno con el tiempo
Instalación de cables desnudos paralelos		<ul style="list-style-type: none">• Costes bastante altos y habitualmente poca eficacia.