

Imágenes de Canva educativo

Corrosión inducida por corriente alterna en tuberías con protección catódica y perspectivas para México

Alternating current-induced corrosion in pipes with cathodic protection and prospects for Mexico

Juan Pablo Bohórquez-Rico[1], Ebelia Del-Angel-Meraz[1*], Andrés Carmona-Hernández[2]

RESUMEN

La corrosión inducida por corriente alterna (AC) en tuberías enterradas con protección catódica representa un mecanismo de deterioro de creciente relevancia para la integridad de los sistemas de transporte de hidrocarburos, particularmente en entornos que interactúan con infraestructura eléctrica. El objetivo fue realizar una revisión sistemática de literatura sobre los mecanismos electroquímicos, los factores que influyen en su desarrollo y los criterios empleados para su evaluación, así como del estado actual de su estudio en México. La revisión bibliográfica se desarrolló consultando las bases de datos ScienceDirect, SpringerLink y el motor de búsqueda Google Scholar de 2016 a 2026. Se identificaron 3 847 registros, de los cuales, se incluyeron 32 estudios en la revisión. Los estudios analizados mostraron que la exposición a densidades elevadas de AC (i_{AC}) puede generar respuestas electroquímicas no lineales y favorecer procesos de corrosión localizada, aun cuando el potencial de la tubería cumple los criterios tradicionales. Destaca la creciente importancia de la relación entre la i_{AC} y la densidad de corriente de protección catódica (i_{DC}), la cual, si $i_{AC}/i_{DC} > 5$, la tubería presenta un riesgo elevado de corrosión, siendo útil para una evaluación más representativa del riesgo de corrosión que los criterios tradicionales. En el contexto mexicano, existe una dependencia predominante de criterios internacionales para la evaluación de la corrosión por AC, así como una limitada disponibilidad de investigaciones específicas sobre corrosión AC, lo que evidencia la necesidad de desarrollar estudios experimentales bajo condiciones locales que permitan fortalecer la gestión de integridad de ductos.

PALABRAS CLAVE: protección catódica, corrosión por picadura, interferencia por AC, mecanismos electroquímicos, tuberías.

ABSTRACT

Alternating current induced corrosion (AC) in cathodically protected buried pipelines represents an increasingly relevant degradation mechanism affecting the integrity of hydrocarbon transportation systems, particularly in environments where pipelines interact with electrical infrastructure. The objective of this study was to conduct a systematic literature review of the electrochemical mechanisms, the factors influencing their development, and the criteria used for their assessment, as well as to examine the current state of research on this phenomenon in Mexico. The literature review was conducted using the Science Direct and SpringerLink databases and the Google Scholar search engine, covering the period from 2016 to 2026. A total of 3 847 records were identified, of which 32 studies were included in the review. The analyzed studies showed that exposure to high AC current densities (i_{AC}) may generate nonlinear electrochemical responses and favor localized corrosion processes, even when pipeline potentials comply with conventional cathodic protection criteria. Attention is drawn to the increasing importance of the relationship between AC current density (i_{AC}) and cathodic protection current density (i_{DC}). When the ratio i_{AC}/i_{DC} exceeds 5, the pipeline presents an elevated risk of corrosion. This parameter provides a more representative assessment of corrosion risk than conventional criteria alone. In the Mexican context, the assessment of AC-induced corrosion relies predominantly on international standards and criteria, while research specifically addressing this phenomenon remains limited. This highlights the need to conduct experimental studies under local environmental conditions to strengthen pipeline integrity management.

KEYWORDS: cathodic protection, pitting corrosion, AC interference, electrochemical mechanisms, pipelines.

***Correspondencia:** ebelia.delangel@ujat.mx**/Fecha de recepción:** 1 de marzo de 2026**/Fecha de aceptación:** 27 de octubre de 2026**/Fecha de publicación:** 17 de noviembre de 2026.

[1]Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica de Ingeniería y Arquitectura, carretera Cunduacán-Jalpa km 1, col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México, C. P. 86690. [2]Universidad Veracruzana, Instituto de Ingeniería, Boca del Río, Veracruz, México, C. P 94292.

CC BY NC SA

https://doi.org/10.29059/cienciauat.v21i1.2093

INTRODUCCIÓN

La corrosión externa de tuberías enterradas es un desafío crítico para la integridad de sistemas de transporte de hidrocarburos, mitigado tradicionalmente mediante recubrimientos y protección catódica (Wang y Qin, 2024). No obstante, la creciente interacción con infraestructura eléctrica ha dado lugar a mecanismos no controlados por criterios convencionales (Ma y col., 2021). En este contexto, la corrosión inducida por corriente alterna (AC, por sus siglas en inglés: Alternating Current) ha ido ganando relevancia. Dicho fenómeno se presenta entre los 16.7 Hz y 60 Hz, especialmente en gasoductos o poliductos de acero al carbono regulados por el Instituto Americano del Petróleo/American Petroleum Institute (API 5L) cercanos a líneas de alta tensión o vías férreas. La proximidad a estas infraestructuras genera inducción por AC y su posterior corrosión (Guo y col., 2025). Además, dicho tipo de corrosión se caracteriza por ataques localizados incluso bajo condiciones de protección catódica adecuadas (Giarola y col., 2022). Estudios recientes evidencian que altas densidades de corriente alterna (i_{AC}) generan respuestas electroquímicas no lineales, alteración de pH y degradación de películas protectoras, favoreciendo la disolución del acero (Pan y col., 2025; Torres-Hernández y col., 2017). Por ello, se han propuesto parámetros como la i_{AC} y la relación i_{AC}/i_{DC} (densidades de corriente continua) para una evaluación más representativa del riesgo (Al-Masoodi y Matloub, 2021; Farahani y col., 2024). En contraste, en México, el estudio sistemático de la corrosión inducida por AC es aún limitado (Farahani y col., 2024). A pesar de la expansión de la infraestructura energética y la diversidad de condiciones edáficas, las prácticas de evaluación continúan basándose principalmente en criterios desarrollados para escenarios dominados por procesos de corrosión asociados a (DC) por sus siglas en inglés: direct current), de acuerdo a la Información de la Asociación para la Protección y el Rendimiento de los Materiales/Association for Materials Protection and Performance (AMPP, 2014; 2024).

El objetivo de la presente revisión estructurada fue sintetizar los avances más recientes de la literatura científica sobre la corrosión inducida por corriente alterna (AC) en tuberías enterradas con protección catódica, particularmente en entornos que interactúan con infraestructura eléctrica, así como los mecanismos electroquímicos, los factores que influyen en su desarrollo y los criterios empleados para su evaluación, además de analizar el estado actual de su estudio en México.

Metodología

Se realizó una revisión narrativa con búsqueda sistematizada de la bibliografía mediante una adecuación de la metodología PRISMA (Page y col., 2021), seleccionando y revisando las bases de datos ScienceDirect, SpringerLink y el motor de búsqueda de literatura científica Google Scholar por su relevancia en el área, con un periodo de búsqueda de 2016 a 2026, iniciando el desarrollo metodológico a partir de la pregunta de investigación "¿Cuál es el estado actual del conocimiento sobre la corrosión inducida por corriente alterna en tuberías enterradas con protección catódica, sus mecanismos electroquímicos, criterios de evaluación y aplicación en el contexto mexicano?"

La búsqueda se realizó utilizando los operadores booleanos AND y OR, estableciendo la ecuación de búsqueda para ScienceDirect y Google Scholar: ("AC corrosion" OR "alternating current corrosion" AND "cathodic protection" AND "pipeline" OR "buried pipeline"); para SpringerLink: ((AC corrosion OR alternating current corrosion) AND (cathodic protection) AND (pipeline OR buried pipeline)), estableciendo como criterios de inclusión artículos revisados por pares, estudios experimentales, estudios de campo y revisiones bibliográficas. Se consideraron como criterios de exclusión estudios relacionados con corrosión AC en concreto reforzado, corrosión atmosférica, corrosión marina, sistemas sin protección catódica, resúmenes de congresos y documentos sin acceso completo.

Se obtuvieron 2 695 artículos en la base de datos de ScienceDirect, 396 en SpringerLink y

Preprint

756 en Google Scholar. Posterior a la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión, así como a una búsqueda de artículos duplicados en las bases de datos y el motor de búsqueda, se seleccionaron un total de 115 artículos, de los cuales, se incluyeron 32 para este estudio. El diagrama completo se presenta en la Figura 1; las bases de datos Scopus, Web of Science, entre otras, se considerarán para futuros estudios.

Si bien, existen revisiones recientes que abordan los mecanismos y criterios de evaluación de la corrosión inducida por AC desde una perspectiva internacional (Brenna y col., 2020; Farahani y col., 2024; Wang y Qin, 2024), no fue posible localizar alguna enfocada en el contexto mexicano.

Mecanismos electroquímicos de la corrosión inducida por AC

La corrosión inducida por AC en tuberías enterradas con protección catódica constituye un fenómeno electroquímico complejo, no lineal, el cual se asocia típicamente a frecuencias comprendidas entre 16.7 Hz y 60 Hz, de acuerdo a la información de la Organización Internacional de Normatividad/International Organization for Standardization (ISO, 2019), además de ser altamente dependiente de las condiciones locales del sistema metal-recubrimiento-suelo (Ma y col., 2021; Giarola y col., 2022). A diferencia de los procesos de corrosión asociados a DC, donde la dirección y magnitud de la corriente determina de manera directa las reacciones anódicas y catódicas, la corrosión AC se desarrolla bajo un régimen dinámico de polarización oscilatoria, caracterizado por cambios rápidos y periódicos del potencial superficial del acero (Lan y col., 2025). Los mecanismos de reacción que generan una corrosión inducida por AC primero se aplican a la interfaz acero-electrolito, donde una corriente alterna sinusoidal $i_{AC}(t)$ actúa sobre el sistema, ecuación (1) (Oluwadamilare y Friedman, 2025) (condición eléctrica externa).

$$i_{AC}(t) = i_0 \,\mathrm{sen}(\omega t) \qquad (1)$$

Donde:
i_0 = la amplitud de la corriente alterna.
$\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, incorporando la frecuencia convencional f.
$\langle i_{AC} \rangle = 0$ es el valor promedio temporal.
t = tiempo.

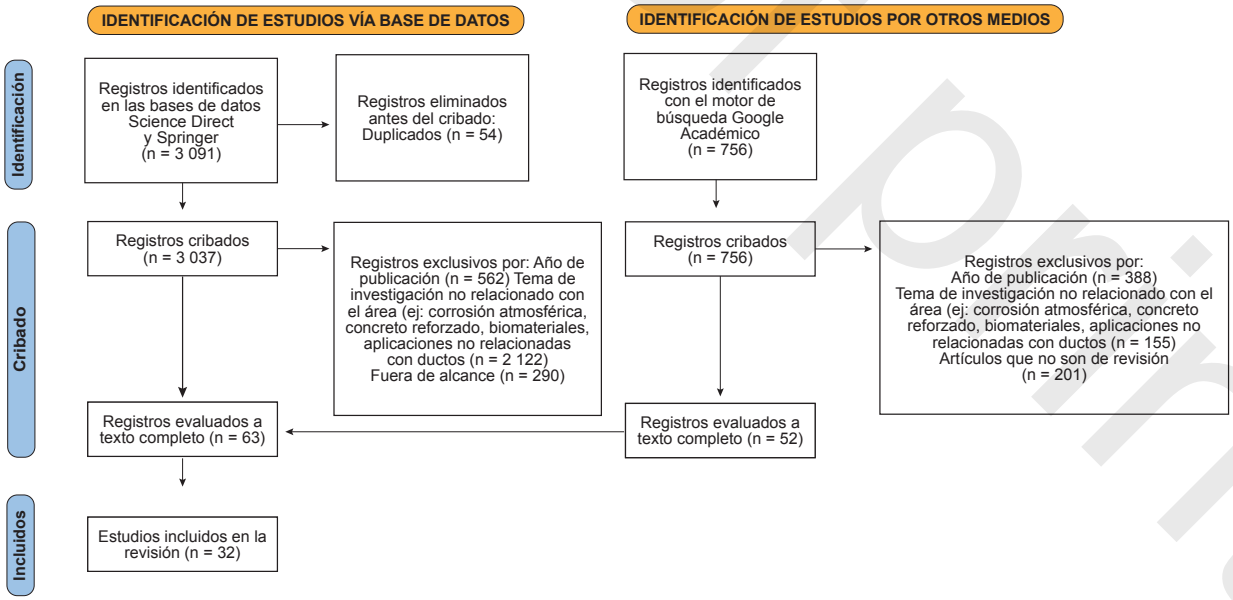


Figura 1. Diagrama de flujo tipo PRISMA 2020, para la revisión sistematizada del presente artículo.
Figure 1. PRISMA-style 2020 flow diagram for the systematized review in this article.

Preprint

Por lo cual, eléctricamente no existe corriente neta aplicada al sistema.

Posteriormente, la corriente AC induce una oscilación del potencial interfacial (E (t)) alrededor de un potencial medio E_m, ecuación (2) (Bard y Faulkner, 2022):

$$E(t) = E_m + \Delta E\ sen(\omega t) \quad (2)$$

Donde:
E_m= potencial medido.
ΔE = Amplitud de la oscilación del potencial.
$\omega = 2\pi f$ es la frecuencia angular, incorporando la frecuencia convencional f.
t = tiempo.

Este potencial controla directamente la velocidad de las reacciones electroquímicas mediante el sobrepotencial (η (t)), ecuación (3) (Bard y Faulkner, 2022):

$$\eta(t) = E(t) - E_{eq} \quad (3)$$

Donde:
$E(t)$ = potencial interfacial.
E_{eq} = el potencial de equilibrio del par redox dominante.

Ahora bien, las reacciones electroquímicas dominantes en el acero enterrado se relacionan a través de un par redox, y estas suceden sucede durante los semiciclos positivos (anódicos) representados por la ecuación (4) (Revie y Uhlig, 2008):

$$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^- \quad (4)$$

Donde:
F_e = hierro.
Fe^{2+}= catión divalente de hierro.
$2e^-$= dos electrones.

La reacción anódica es la disolución del hierro (Fe) en su catión (Fe^{2+}) liberando dos electrones. Esta ecuación tiene la particularidad de ser cinéticamente rápida, altamente dependiente del sobrepotencial positivo y verse favorecida cuando el recubrimiento presenta defectos. Mientras que la reacción catódica (reducción) se presenta durante los semiciclos negativos y se puede representar por las siguientes dos ecuaciones, las cuales relacionan el oxígeno diatómico (el agua H_2O, los electrones en reacción (e^-), hidróxidos (OH^-) e hidrógeno (H_2) presente. En suelos neutros a alcalinos, ecuación (5) (Revie y Uhlig, 2008):

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^- \quad (5)$$

Donde:
O_2 = oxígeno diatómico.
H_2O = agua
e^- = electrones en reacción.
OH^- = ion hidróxido.

Cuando se presenta la condición de una sobreprotección catódica, los electrones que se adicionan al sistema modifican la reacción, donde la reacción de evolución de hidrógeno se vuelve termodinámicamente favorable, ecuación (6) (Revie y Uhlig, 2008):

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \quad (6)$$

Donde:
H_2O= agua
$2e^-$ = electrones en reacción.
H_2= hidrógeno.
OH^- = ion hidróxido.

De manera particular, estas reacciones de reducción presentan cinéticas diferentes a la reacción anódica. Además, se encuentran limitadas por la transferencia de masa (oxígeno) y modifican el pH local del área donde se encuentra el defecto.

Debido a la interacción entre la corriente AC con la tubería, la cinética del sistema es no lineal, por lo cual, la densidad de corriente faradaica instantánea generada se encuentra gobernada por la ecuación de Butler-Volmer, como se presenta a continuación por la ecuación (7) (Yang, 2020):

$$i_f = i_0 \left[\exp\left(\frac{\alpha_a nF\eta}{RT}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha_c nF\eta}{RT}\right)\right] \quad (7)$$

Accepted Preprint

Donde:
i_f = densidad de corriente faradaica instantánea.
i_0 = es la densidad de corriente de intercambio.
α_a = coeficiente de transferencia de carga anódico.
α_c = coeficiente de transferencia de carga catódico.
F = constante de Faraday.
η = es el sobrepotencial, algo clave de esta representación es que la respuesta no es simétrica para $+\eta$ y $-\eta$.
R = constante universal de los gases ideales.
T = temperatura absoluta.
n = número de electrones transferidos.

Esta asimetría faradaica se manifiesta en cada semiciclo AC. Durante el semiciclo anódico se genera la condición de que el sobrepotencial es superior a cero ($\eta > 0$) por lo cual la exponencial anódica (i_a) queda representada mediante la ecuación (8) (Bard y Faulkner, 2022):

$$i_a = i_0 \ exp\left(\frac{\alpha_{an} F\eta}{RT}\right) \quad (8)$$

Siendo característica la alta tasa de disolución de Fe^{2+}.
n = número de electrones transferidos.

Mientras tanto el semiciclo catódico presenta las características de un sobrepotencial menor a cero $\eta < 0$, por lo cual la exponencial catódica (i_c) queda representada de la siguiente manera, ecuación (9) (Bard y Faulkner, 2022):

$$i_c = \ i_0 \ exp\left(-\frac{\alpha_{cn} F\eta}{RT}\right) \quad (9)$$

Siendo característica una menor magnitud debido a una limitación cinética y control difusional. Posteriormente, al integrar en la ecuación de la carga eléctrica total (Q), la corriente faradaica ($i_f(t)$) en un ciclo completo, como se presenta en la ecuación (10) (Revie y Uhlig, 2008):

$$Q = \int_0^T i_f(t)dt \quad (10)$$

Donde:
Q = carga eléctrica total.
$\int_0^T i_f(t)$= integral de la corriente faradaica desde 0 hasta T.
dt = diferencial tiempo.

Se obtiene que la carga eléctrica anódica (Q *anódico*) es diferente del valor absoluto de la carga eléctrica catódica (Q *catódico*), lo cual se expresa a través de la ecuación (11) (Revie y Uhlig, 2008):

$$Q_{anódico} \neq |Q_{catódico}| \quad (11)$$

Donde:
Qanódico = carga eléctrica anódica.
Qcatódico = carga eléctrica catódica.

Por lo tanto, la corriente faradaica neta es diferente de cero $\langle i_f \rangle \neq 0$, lo que implica la existencia de una corriente faradaica neta anódica, incluso en ausencia de corriente alterna ($\langle i_{AC} \rangle = 0$). El límite de 30 A/m^2 si DC > 1 A/m^2 establecido en la norma ISO 18086 (ISO, 2019) corresponde a ($\langle i_{AC} \rangle$), por lo que la influencia de la rectificación faradaica debe analizarse como un mecanismo electroquímico asociado a la perturbación AC, considerando además el nivel de polarización catódica y las condiciones del electrolito.

Esta interacción de la corriente AC con la tubería y el electrolito, tiene consecuencias metalúrgicas de degradación localizada sobre el acero (semiciclo anódico), donde la carga neta anódica produce una disolución localizada del acero, representada por la ecuación (12) (Revie y Uhlig, 2008):

$$m = \frac{QM}{nF} \quad (12)$$

Donde:
m = la masa disuelta.
M = la masa molar del hierro.
n = 2.
F = constante de Faraday.

Pero, incluso a valores pequeños de corriente Faradaica neta $\langle i_f \rangle$ se generan pérdidas de material localizado, formación de picaduras profundas y un daño acelerado en defecto del recubrimiento.

Diversos estudios han demostrado que, aunque la señal alterna aplicada tiene un valor promedio nulo, la respuesta electroquímica del sistema no es simétrica durante los semiciclos

Preprint

positivos y negativos (Lan y col., 2025; Zhang y col., 2024). Como se observa en la Figura 2, esta asimetría se atribuye principalmente a diferencias cinéticas entre las reacciones de disolución anódica del hierro y las reacciones catódicas de reducción, así como a la dependencia no lineal de la corriente faradaica con el sobrepotencial. Como consecuencia, se genera una corriente faradaica neta que favorece la disolución localizada del acero, particularmente en zonas donde la impedancia del recubrimiento es mínima (Lan y col., 2025; Wang y col., 2024a).

La caracterización electroquímica de la corrosión inducida por AC se ha basado principalmente en ensayos potenciostáticos y galvanostáticos, así como en curvas de polarización para estimar densidades de corriente y velocidades de corrosión (Farahani y col., 2024). La literatura reporta un uso limitado de técnicas electroquímicas avanzadas para el estudio de la corrosión AC (Jadhav y Gelling, 2019), aunque algunos trabajos han empleado espectroscopia de impedancia electroquímica para analizar la respuesta interfacial del sistema, su aplicación termina siendo reducida en comparación a otras metodologías (Wang y col., 2025). De igual forma, no se identificaron estudios, dentro del alcance de búsqueda de esta revisión, que empleen la técnica de ruido electroquímico, a pesar de que dicha técnica ha demostrado ser una herramienta sensible para la detección y evaluación de fenómenos localizados. Esta situación evidencia una oportunidad de investigación para profundizar en la comprensión de los mecanismos asociados a la corrosión AC.

Insuficiencia de los criterios tradicionales de protección catódica frente a la interferencia por AC

En la Tabla 1, se presentan los criterios tradicionales de protección catódica, los cuales han sido desarrollados históricamente bajo el supuesto de un régimen electroquímico dominado por DC estacionarias, donde el control del potencial metal-electrolito constituye el principal indicador de mitigación de la corrosión (Kim y col., 2021). Criterios ampliamente aceptados, como el potencial mínimo de -850 mV respecto a un electrodo de referencia $Cu/CuSO_4$ para acero al carbono en suelos aireados o bien criterios de polarización de 100 mV, han demostrado ser eficaces para la mayoría de los escenarios de corrosión externa convencional (AMPP, 2024). Sin embargo, la evidencia experimental y de campo acumulada en las últimas décadas ha puesto de manifiesto que dichos criterios resultan conceptualmente insuficientes cuando las tuberías están sometidas a interferencias de AC (Chen y col., 2024; Pan y col., 2025). Además, los equipos tradicionalmente usados incorporan filtros pasa-bajas para atenuar los componentes alternos de alta frecuencia y estabilizar la lectura del potencial DC. Por otra parte, los filtros pasa-banda permiten aislar componentes específicos de frecuencia, como los asociados a interferencias de 50 Hz a 60 Hz; si bien, estos filtros facilitan la medición de la componente DC, pueden atenuar o excluir la oscilación AC del registro convencional (Büchler, 2020). Desde un punto de vista electroquímico fundamental, la medición de potenciales DC no captura la naturaleza transitoria y oscilatoria de los procesos inducidos por la AC (Farahani y col., 2024). La señal AC superpuesta genera fluctuaciones rápidas del potencial superficial del acero que pueden alcanzar amplitudes del orden de cientos de milivoltios, sin que dichas oscilaciones sean detectadas por instrumentos convencionales de medición de potencial promedio (Farahani y col., 2024). En consecuencia, un sistema puede cumplir estrictamente con los criterios normativos tradicionales de protección como los expresados en la Tabla 1, y simultáneamente experimentar condiciones locales altamente favorables para la disolución anódica localizada, además de que los criterios tradicionales no consideran la distribución espacial de la corriente ni su concentración en defectos de recubrimiento (Lan y col., 2025). Como se observa en la Figura 3, en presencia de interferencia AC, la corriente inducida se canaliza preferentemente a través de discontinuidades del recubrimiento, donde la impedan-

Preprint

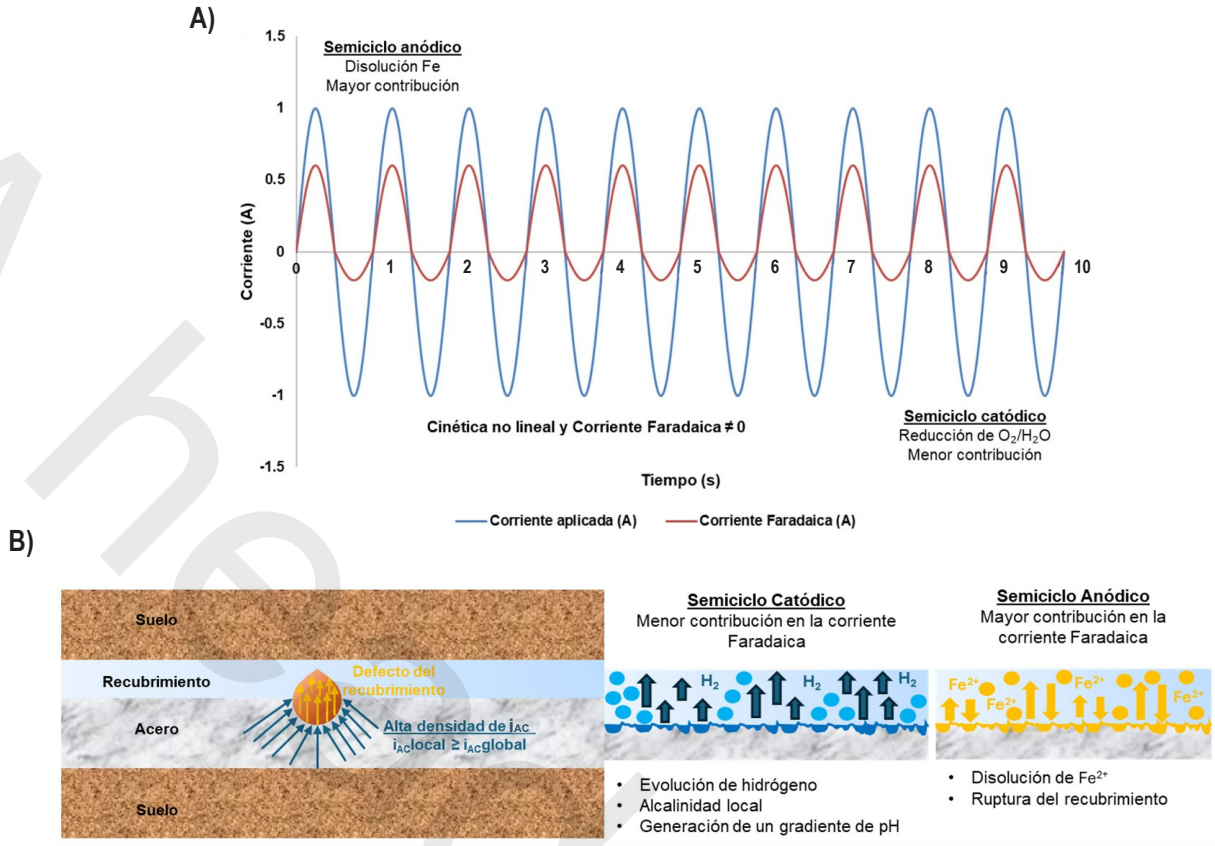


Figura 2. Mecanismo conceptual de corrosión inducida por AC en defectos de recubrimiento bajo protección catódica, A) respuesta electroquímica asimétrica, B) procesos microelectroquímicos. Figure 2. Conceptual mechanism of alternating current-induced corrosion in coating defects under cathodic protection, A) asymmetric electrochemical response, B) microelectrochemical processes.

cia local es mínima (Tang y col., 2024) permitiendo el paso de iones agresivos presentes como SO_4^{2-} y Cl-. De manera particular, en condiciones anaeróbicas, la presencia de especies sulfurosas (H_2S, HS-) pueden incrementar la agresividad del medio (Wang y col., 2024b). La frecuencia de la señal AC constituye un parámetro relevante en la impedancia interfacial y la distribución de la corriente en defectos de recubrimiento, afectando la magnitud de la rectificación electroquímica y por ende la disolución neta del metal (Büchler, 2020). En el rango típico de operación de Europa (50 Hz) y México (60 Hz), la frecuencia es uno de los factores más determinantes en la disolución, otros parámetros, como la relación i_{AC}/i_{DC} o las condiciones del suelo (resistividad, pH y química local) tienen un impacto mayor (Farahani y col., 2024).

Evolución y fundamentos de los criterios normativos específicos para la corrosión inducida por AC

El reconocimiento de las limitaciones de los criterios tradicionales ha impulsado el desarrollo de enfoques normativos específicos orientados a la evaluación de la corrosión inducida por AC. Los nuevos criterios (Tabla 1) se fundamentan en la premisa de que el riesgo de corrosión AC no puede ser evaluado únicamente a partir del potencial DC, sino que requiere la cuantificación explícita de las corrientes alternas que interactúan con la interfaz metal-electrolito y su relación con la corriente de protección catódica (Farahani y col., 2024). La norma ISO 18086 establece un cambio conceptual al definir parámetros cuantitativos directamente vinculados al daño por corrosión AC, formalizando el uso de la i_{AC} y la relación

Ahead of Print

Tabla 1. Criterios de protección catódica para tuberías enterradas y variación según las condiciones del medio.
Table 1. Cathodic protection criteria for buried pipes and variation according to environmental conditions.

Criterio	Especificación normativa	Condición del suelo	Normatividad técnica	Referencias
Tradicionales				
Potencial mínimo de protección (tubería-suelo)	≤ -850 mV vs Cu/$CuSO_4$	Aplicable a suelos comunes, bien aireados.	NACE SP0169 /NOM-008-SECRE-1999 (cancelada)	AMPP, 2024; Secretaría de Energía, 1999
Criterio alternativo de polarización	≥ 100 mV de polarización catódica	Requiere medición con interrupción de corriente	NACE SP0169/ ISO 15589-1	AMPP, 2024; ISO, 2015
Potencial en suelos anaerobios con actividad bacteriana	≤ -950 mV vs Cu/$CuSO_4$	Suelos con bacterias sulfato-reductoras (SRB) baja aireación	NOM-008 SECRE-1999 (cancelada)/ literatura NACE	Secretaría de Energía, 1999
Límite inferior por sobreprotección	No más negativo que -1 200 mV vs Cu/$CuSO_4$	Evitar evolución excesiva de hidrógeno y desadherencia del recubrimiento	ISO 15589-1/ NACE SP0169	AMPP, 2024; ISO, 2015
Potencial libre de caída óhmica (IR-free)	≤ -850 mV vs Cu/ CuSO4 (IR-free)	Especialmente relevante en suelos de baja resistividad	ISO 15589-1	ISO, 2015
Recientes				
Densidad de corriente AC tolerable	≤ 30 A/m^2 si DC > 1 A/m^2 ≤ 100 A/m^2 si DC < 1 A/m^2	Condición del umbral típico para minimizar corrosión inducida por AC	ISO 18086	ISO, 2019
Tensión AC máxima (seguridad y corrosión)	≤ 15 V RMS	Interferencia por líneas eléctricas o ferrocarriles	NACE SP0177/ ISO 18086	AMPP, 2014; ISO, 2019

AC: alternating current/corriente alterna; DC: direct current/corriente continua.

i_{AC}/i_{DC} en coherencia con los lineamientos previamente desarrollados en la norma EN 15280 (CEN, 2014). La i_{AC} emerge como un indicador primario del riesgo de corrosión, al estar directamente relacionada con la magnitud de las perturbaciones electroquímicas inducidas en los defectos de recubrimiento (Büchler, 2020). Dichas normativas establecen rangos de referencia para i_{AC}, reconociendo que valores elevados incrementan de manera significativa la probabilidad de corrosión localizada, especialmente en combinación con determinadas condiciones de suelo y recubrimiento (Amaya-Gómez y col., 2021; Büchler, 2020). Un avance adicional de gran relevancia es la incorporación de la relación entre i_{AC}/i_{DC} como parámetro adimensional de evaluación (Farahani y col., 2024). Este indicador refleja el balance dinámico entre los efectos despolarizantes de la señal alterna y la capacidad estabilizadora de la protección catódica. Desde un punto de vista físico, la relación i_{AC}/i_{DC} permite evaluar si la corriente DC aplicada es suficiente para contrarrestar las perturbaciones inducidas por la interferencia AC, o si, por el contrario, el sistema se encuentra en un

Preprint

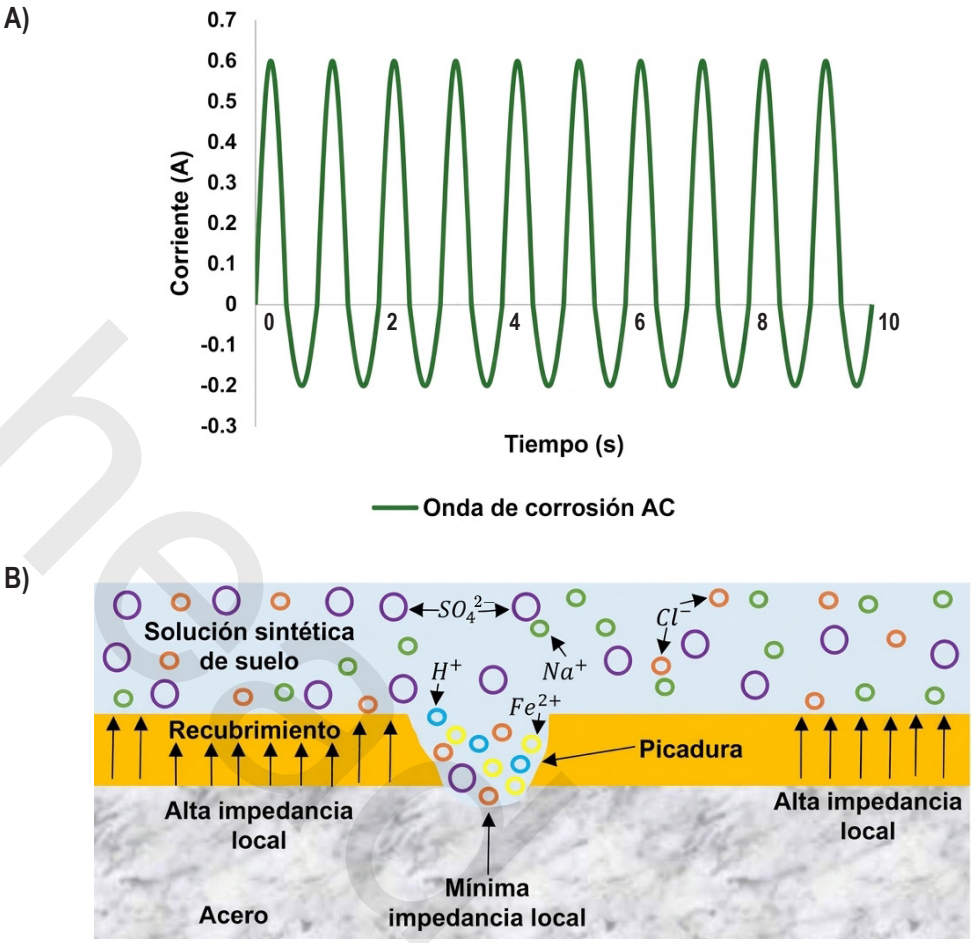


Figura 3. Diagrama de degradación local: A) representación asimétrica de la interferencia por AC; B) superficie afectada por la interferencia por AC e interacción de los principales iones en solución aeróbica.

Figure 3. Local degradation diagram: A) Asymmetric representation of AC interference; B) Area affected by AC interference and interaction of the main ions in an aerobic solution.

régimen dominado por procesos alternos que favorecen la corrosión localizada (Su y col., 2025). La relación i_{AC}/i_{DC} es un parámetro clave para evaluar la corrosión AC, donde normativamente valores > 3 indican riesgo de corrosión, mientras que valores > 5 corresponden a un riesgo elevado (ISO, 2019): Aunque algunos estudios reportan que una relación entre 5 i_{AC}/i_{DC} a 10 i_{AC}/i_{DC} representa solo un riesgo moderado a alto de corrosión AC (Thakur y col., 2022), estos valores se deben considerar como observaciones específicas y no como criterios normativos. La evaluación de la corrosión inducida por AC se fundamenta actualmente en parámetros como la i_{AC}, la relación i_{AC}/i_{DC} y el voltaje AC tubería-suelo, los cuales complementan los criterios tradicionales basados únicamente en potenciales. Dicho enfoque representa una evolución sustancial respecto a los criterios clásicos, al integrar explícitamente la interacción entre ambos tipos de corriente y reconocer que la mitigación de la corrosión AC no puede lograrse únicamente mediante el incremento de la corriente de protección (Olesen y col., 2019). Así mismo, el estándar de la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión/ National Association of Corrosion Engineers (NACE SP21424) (AMPP, 2018) complementa dichos enfoques mediante metodologías de evaluación de riesgo basadas en mediciones de campo, fortaleciendo la interpretación de

Ahead of Print

parámetros como i_{AC} y la relación i_{AC}/i_{DC}. Otro aspecto relevante es la interpretación del voltaje AC tubería– suelo, donde valores ≤ 15 V RMS se establecen principalmente como criterios de mitigación asociados a la seguridad eléctrica, pues para emplearlo como herramienta de detección se debe complementar con medición de i_{AC} y la relación i_{AC}/i_{DC} (AMPP, 2014; 2024).

Situación de la corrosión inducida por AC en México y comparativa global

En México, la corrosión inducida por AC en tuberías enterradas con protección catódica es un fenómeno emergente con una alta relevancia técnica para el país. En la última década, este problema ha crecido debido a la expansión paralela de la infraestructura energética y eléctrica. De hecho, según la Secretaría de Energía (2024) la instalación de líneas de transmisión eléctrica, incluidas las de alta tensión, aumentó de 108 015 km en 2018 a 111 138 km en 2024, lo que representa un crecimiento del 2.8 %.

Dicho incremento de líneas (en su mayoría de 400 kV) ha ocurrido principalmente en corredores industriales y regiones con alta concentración de ductos, generando complejos escenarios de interferencia por AC. A pesar de ello, el país aún no cuenta con un informe público oficial que documente estas afectaciones.

En Europa, la situación es distinta, ya que cuentan con más antecedentes. Hacia el año 2000, el Comité Europeo para el Estudio de la Corrosión y la Protección de Tuberías y Sistemas de Conducción (CEOCOR, 2001) ya reportaba 23 casos documentados de corrosión AC, vinculados a 709 ataques corrosivos identificados y al menos cuatro fugas en ductos enterrados. Estos antecedentes contribuyeron al reconocimiento internacional de la corrosión AC como amenaza real para la integridad de tuberías protegidas catódicamente.

Desde el punto de vista normativo, la gestión de la corrosión externa en México se ha apoyado tradicionalmente en estándares internacionales ampliamente reconocidos, como los documentos de NACE/AMPP e ISO (AMPP, 2014; 2024; ISO, 2015; 2019). Dichos documentos han sido adoptados como referencia técnica por operadores y organismos reguladores.

Históricamente, el referente principal en el ámbito nacional fue la NOM-008-SECRE-1999, que presentaba correspondencia técnica con lineamientos internacionales como la ISO 15589-1. Sin embargo, se canceló mediante aviso publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de junio de 2011. La aplicación de dichos estándares ha estado enfocada en la mitigación de la corrosión por DC, sin una incorporación sistemática de criterios específicos de corrosión AC (Farahani y col., 2024). En el contexto nacional, no existen normas oficiales específicas para la evaluación y mitigación de la corrosión inducida por corriente AC, por lo que este vacío se suple mediante la adopción de estándares internacionales. En la práctica, ello se traduce en evaluaciones de integridad basadas predominantemente en potenciales DC promedio, mediciones de estudio de intervalos cortos (CIS, por sus siglas en inglés: Close Interval Survey) y levantamiento de Gradiente de Voltaje de Corriente Continua (DCVG, por sus siglas en inglés: Direct Current Voltage Gradient), lo que limita la detección del riesgo real asociado a interferencia por AC (Brenna y col., 2020).

En términos operativos, numerosos sistemas de ductos en México atraviesan suelos de baja a media resistividad, característicos de regiones costeras, zonas tropicales y áreas con alta humedad estacional (Contreras y col., 2020; Delgado-Rodríguez y col., 2021; Godoy y col., 2011). Estas condiciones favorecen el acoplamiento eléctrico entre la tubería y las fuentes de interferencia AC, incrementando la susceptibilidad a la corrosión localizada en defectos de recubrimiento (Xu y col., 2022). A ello, se suma la coexistencia frecuente de recubrimientos envejecidos, con niveles variables de degradación, que amplifican la concentración de corriente alterna en áreas expuestas del acero. Ahora bien, la comparación entre el estado del

Preprint

arte global y la situación mexicana en materia de corrosión inducida por AC revela contrastes significativos tanto en el nivel de madurez técnica como en la profundidad del conocimiento científico disponible. A nivel internacional, particularmente Europa y algunas regiones de Asia, la corrosión AC ha sido reconocida desde hace varias décadas como un mecanismo de daño crítico, lo que ha derivado en el desarrollo de normativas específicas, programas de monitoreo avanzados y una base sólida de investigación experimental y numérica (AMPP, 2014; 2024; Olesen y col., 2019), mientras que a nivel nacional la supervisión de la integridad de ductos recae en organismos regulatorios como la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y la Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (ASEA), las cuales aunque establecen disposiciones para operación, mantenimiento e inspección, no incluyen algún criterio para corrosión por AC (ASEA, 2017; 2024).

En el ámbito global, los estudios se han orientado hacia la cuantificación de parámetros electroquímicos directamente relacionados con los mecanismos de corrosión, tales como la i_{AC} en defectos de recubrimiento, la relación i_{AC}/i_{DC} y la respuesta transitoria de la interfaz metal-electrolito (Su y col., 2025). Estos enfoques han permitido establecer criterios de evaluación más refinados y desarrollar estrategias de mitigación basadas en fundamentos físicos y electroquímicos. En contraste, en México, la evaluación del riesgo continúa dependiendo en gran medida de indicadores indirectos, como el voltaje AC tubería-suelo, cuya correlación con la tasa real de corrosión es limitada (Su y col., 2025) y aunque el criterio de i_{AC} se encuentra definido en estándares internacionales de referencia, existe información pública limitada sobre su implementación y seguimiento bajo condiciones operativas nacionales (ASEA, 2017; 2024).

Una limitación recurrente identificada en la literatura es que la mayoría de los estudios experimentales han sido desarrollados bajo condiciones controladas de laboratorio o entorno representativos de Europa, Norteamérica y Asia. Aunque trabajos como los realizados por Lan y col. (2025) y Olesen y col. (2019) han contribuido significativamente a la comprensión de los mecanismos de corrosión AC, la extrapolación de sus resultados a otros países como México debe realizarse con cautela, debido a diferencias en las características de los suelos, las condiciones climáticas y las prácticas operativas (Farahani y col., 2024; Kim y col., 2021).

Áreas de oportunidad de investigación

A partir de los hallazgos y limitaciones identificadas en la presente revisión, se proponen líneas futuras de investigación, sin jerarquización alguna, pero con una orientación primaria a aquellas orientadas a la generación de datos experimentales y la validación de criterios normativos en ambientes nacionales o de laboratorio representativos, orientadas a fortalecer el conocimiento científico y la gestión práctica de la corrosión inducida por AC:

Es prioritario desarrollar estudios experimentales sistemáticos que evalúen la respuesta electroquímica del acero bajo interferencia AC en suelos característicos de las distintas regiones del país. Estos estudios deben considerar la variabilidad de parámetros como tipo de suelo, resistividad, pH, composición iónica, humedad y estacionalidad, con el fin de generar datos confiables que permitan contextualizar los criterios normativos internacionales, así como el uso de cupones de corrosión en muestras de suelo de zonas representativas del país (Wang y col., 2021; Yang y Wang, 2026).

Se requiere profundizar en la evaluación del efecto del tamaño, geometría y distribución de los defectos de recubrimiento sobre la concentración de AC y la localización del daño. La combinación de técnicas experimentales de alta resolución y simulaciones numéricas permitiría establecer relaciones cuantitativas entre las características del recubrimiento y la severidad de la corrosión AC, fijando la frecuencia de experimentación en 60Hz, valor presentado en la red nacional.

Preprint

Es necesario realizar estudios comparativos que evalúen la aplicabilidad de los criterios normativos internacionales de corrosión AC bajo condiciones del país. Esta línea de investigación podría derivar en recomendaciones técnicas específicas o en la adaptación de rangos de referencia que reflejen de manera más precisa las condiciones locales de operación y entorno.

El desarrollo de modelos numéricos que integren de manera acoplada fenómenos eléctricos, electroquímicos y de transporte de especies constituye una línea de investigación clave. Estos modelos deben ser calibrados y validados con datos experimentales de campo, con el objetivo de mejorar su capacidad predictiva y su aplicabilidad en escenarios reales de operación (Yang y Wang, 2026).

CONCLUSIONES

Los criterios tradicionales basados en potenciales DC son insuficientes para evaluar la corrosión inducida por AC en ductos con protección catódica. En su lugar, parámetros como la i_{AC} y la relación i_{AC}/i_{DC} ofrecen una caracterización más precisa del riesgo de corrosión localizada. En México, la falta de normativa específica para corrosión inducida por AC y la limitada información técnica disponible sobre su evaluación y monitoreo evidencian una brecha de conocimiento que genera una fuerte dependencia de indicadores internacionales para evaluar este fenómeno. Como medida inicial, los programas nacionales de integridad de ductos podrían incorporar la medición sistemática de i_{AC}, relación i_{AC}/i_{DC} y voltaje AC tubería-suelo en corredores con potencial interferencia eléctrica, empleando como referencia los criterios establecidos en ISO 18086 y NACE SP21424. La implementación de estas prácticas podría ser promovida por organismos reguladores (CRE, ASEA y SENER) y operadores del sector energético como parte de las actividades de monitoreo y evaluación de integridad. Como línea futura, el desarrollo de estudios experimentales en suelos representativos de México y la validación de criterios internacionales bajo condiciones locales se identifican como prioridades para fortalecer la gestión de integridad de ductos.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon no tener conflictos de intereses de ningún tipo.

REFERENCIAS

Al-Masoodi, F. S. & Matloub, F. K. (2021). Investigation the effect of ICCP and SACP on carbon steel corrosion in salt solution at different parameters. *Journal of Physics: Conference Series*, 1973(1), 012031. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012031.

Amaya-Gómez, R., Bastidas-Arteaga, E., Muñoz, F., & Sánchez-Silva, M. (2021). Statistical Soil Characterization of an Underground Corroded Pipeline Using In-Line Inspections. *Metals*, 11(2), 292. https://doi.org/10.3390/met11020292.

AMPP, Association for Materials Protection and Performance (2014). NACE SP0177-2014: Mitigation of alternating current and lightning effects on metallic structures and corrosion control systems. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.5006/NACE_SP0177-2014. Fecha de consulta: 15 de enero de 2026.

AMPP, Association for Materials Protection and Performance (2018). NACE SP21424-2018: Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.5006/NACE_SP21424-2018. Fecha de consulta: 20 de abril de 2026.

AMPP, Association for Materials Protection and Performance (2024). NACE SP0169-2024: Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems. [En línea]. Disponible en: https://doi.org/10.5006/NACE_SP0169-2024. Fecha de consulta: 15 de enero de 2026.

ASEA, Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (2017). Norma Oficial Mexicana NOM-009-

Preprint

ASEA-2017, Administración de la integridad de ductos de recolección, transporte y distribución de hidrocarburos, petrolíferos y petroquímicos, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: https://sidof.segob.gob.mx/notas/docFuente/5548790. Fecha de consulta: 25 de octubre de 2026.

ASEA, Agencia de Seguridad, Energía y Ambiente (2024). Norma Oficial Mexicana NOM-020-ASEA-2024, Transporte de gas natural por medio de ductos terrestres, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5767026. Fecha de consulta: 25 de octubre de 2026.

Bard, A. J. & Faulkner, L. R. (2022). Electrochemical methods: Fundamentals and applications (Third edition). *John Wiley & Sons*. ISBN 978-1-119-49768-0.

Brenna, A., Beretta, S., & Ormellese, M. (2020). AC corrosion of carbon steel under cathodic protection condition: Assessment, criteria and mechanism. *A Review. Materials*, 13(9), 2158. https://doi.org/10.3390/ma13092158.

Büchler, M. (2020). On the mechanism of cathodic protection and its implications on criteria including AC and DC interference conditions. *Corrosion*, 76(5). https://doi.org/10.5006/3379.

CEN, European Committee for Standardization (2014). UNE-EN 15280:2014. Evaluation of a.c. corrosion likelihood of buried pipelines applicable to cathodically protected pipelines. CEN. [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0052739. Fecha de consulta: 16 de enero de 2026.

CEOCOR (2001). A.C. corrosion on cathodically protected pipelines: Guidelines for risk assessment and mitigation measures. *Comité d'Étude de la Corrosion et de la Protection des Canalisations*. [En línea]. Disponible en: https://ceocor.lu/download/misc/AC-Corrosion-Booklet-on-cathodically-protected-pipelines-ed-2001.pdf. Fecha de consulta: 20 de abril de 2026.

Chen, L., Du, Y., Wang, M., Liu, Y., Liang, Y., Zhu, Z., & Zhang, L. (2024). In situ and ex situ investigation on the product films evolution of pipeline steel under AC interference and high cathodic protection conditions. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 967, 118308.https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118308.

Contreras, A., Quej, L. M., Liu, H. B., Alamilla, J. L., & Sosa, E. (2020). Role of Mexican clay soils on corrosiveness and stress corrosion cracking of low-carbon pipeline steels: A case study. *Corrosion*, 76(10). https://doi.org/10.5006/3515.

Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Nakamura-Labastida, E., & Shevnin, V. (2021). Application of Quantitative Electromagnetic Technology to Assess Coating Integrity of Pipelines in Mexico. *Geofísica Internacional*, 60(3), 241-257. https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.3.2041.

Farahani, E. M., Su, Y., Chen, X., Wang, H., Laughorn, T. R., Onesto, F., Zhou, Q., & Huang, Q. (2024). AC corrosion of steel pipeline under cathodic protection: A state-of-the-art review. *Materials and Corrosion*, 75(3), 290-314. https://doi.org/10.1002/maco.202313955.

Giarola, J. M., Santos, B. A. F., Souza, R. C., Serenario, M. E. D., Martelli, P. B., Souza, E. A., Gomes, J. A. C. P., & Bueno, A. H. S. (2022). Proposal of a novel criteria for soil corrosivity evaluation and the development of new soil synthetic solutions for laboratory investigations. *Materials Research*, 25. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0521.

Godoy, A., De-Silva-Munoz, L., Rubi, F., De-León-Ibarra, A., Martinez-De-la-Escalera, L. M., Canto, J., Canto, J., de-Silva-Munoz, L., Ascencio, J., & Martínez, L. (2011). Likelihood evaluation of pipelines corrosion in the Mexican soil assisted by geographic information systems. *In NACE - International Corrosion Conference Series*, 1-9. https://doi.org/10.5006/c2011-11401.

Guo, S. T., Zhu, M., Yuan, Y. F., & Guo, S. Y. (2025). A research on AC corrosion of B30 alloy in simulated seawater. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 35(4), 3593-3606. https://doi.org/10.1007/s11665-025-11792-4.

ISO, International Organization for Standardiza-

Ahead of print

tion (2015). ISO 15589-1:2015. Petroleum, petrochemical and natural gas industries — cathodic protection of pipeline transportation systems — Part 1: On-land pipelines. *ISO*. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/es/contents/data/standard/05/45/54503.html. Fecha de consulta: 25 de enero de 2026.

ISO, International Organization for Standardization (2019). ISO 18086:2019. Corrosion of metals and alloys — determination of AC corrosion — Protection criteria. *ISO*. [En línea]. Disponible en: https://www.iso.org/standard/78148.html. Fecha de consulta: 16 de enero de 2026.

Jadhav, N. & Gelling, V. J. (2019). Review—The use of localized electrochemical techniques for corrosion studies. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(11), C3461-C3476. https://doi.org/10.1149/2.0541911jes.

Kim, C., Chen, L., Wang, H., & Castaneda, H. (2021). Global and local parameters for characterizing and modeling external corrosion in underground coated steel pipelines: A review of critical factors. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1(1), 17-35. https://doi.org/10.1016/J.JPSE.2021.01.010.

Lan, W., Wei, B., Li, Q., Feng, B., Wang, F., Bi, W., & Liu, D. (2025). Corrosion mechanisms of pipelines with adjacent coating defects under AC interference: An interfacial process analysis. *Materials & Design*, 256, 114295. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2025.114295.

Ma, Z., Wu, W., Zhao, P., & Dan, Y. (2021). Effect of dc currents and strain on corrosion of x80 steel in a near-neutral environment. *Metals*, 11(10). https://doi.org/10.3390/met11101601.

Olesen, A. J., Dideriksen, K., Nielsen, L. V., & Møller, P. (2019). Corrosion rate measurement and oxide investigation of AC corrosion at varying AC/DC current densities. *Corrosion*, 75(9). https://doi.org/10.5006/3168.

Oluwadamilare, T. & Friedman, E. G. (2025). AC biased SFQ clock splitters for current mitigation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 35(9). https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3629027.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., & Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

Pan, M., Liu, C., Li, N., Ma, H., & Liu, Z. (2025). Combined effect of alternating current interference and cathodic protection on stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*. https://doi.org/10.1007/s11665-025-11746-w.

Revie, R. W. & Uhlig, H. H. (2008). Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering: Fourth Edition. *John Wiley and Sons*. https://doi.org/10.1002/9780470277270.

Secretaría de Energía (1999). Norma Oficial Mexicana NOM-008-SECRE-1999, Control de la corrosión externa en tuberías de acero enterradas y/o sumergidas, en *Diario Oficial de la Federación*. [En línea]. Disponible en: https://www.ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Federal/wo69925.pdf. Fecha de consulta: 25 de enero de 2026.

Secretaría de Energía (2024). Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nación (PRODESEN 2023-2037). Gobierno de México. [En línea]. Disponible en: https://www.cenace.gob.mx/Docs/16_MARCOREGULATORIO/Prodecen/18%202023-2037%20Cap%C3%ADtulos%201%20al%206.pdf. Fecha de consulta: 19 de abril de 2026.

Su, Y., Majdabadi Farahani, E., Huang, Q., & Zhou, Q. (2025). AC-induced corrosion of cathodically protected pipelines: Experimental study and probabilistic modeling. *Corrosion and Materials Degradation*, 6(2). https://doi.org/10.3390/cmd6020026.

Tang, J., Yang, M., & Kainuma, S. (2024). Electrochemical interaction behaviours between adjacent coating defects in steel structure associated with corrosion acceleration effects. *Corrosion Science*, 227, 111730. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111730.

Thakur, A. K., Arya, A. K., & Sharma, P. (2022). Ana-

Article in Press

lysis of cathodically protected steel pipeline corrosion under the influence of alternating current. *Materials Today: Proceedings,* 50, 789-796. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.548.

Torres-Hernández, J. R., Del-Angel-Meraz, E. y Veleva, L. (2017). Evaluación de un sistema de protección catódica de un gasoducto enterrado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 37(1), 19-26.

Wang, C. & Qin, G. (2024). Corrosion of underground infrastructures under metro-induced stray current: A review. *Corrosion Communications*, 14, 23-38. https://doi.org/10.1016/J.CORCOM.2023.08.005.

Wang, C., Wang, Y., Xu, S., Song, A., Ding, W., Li, W., & Wang, S. (2025). Effect of stray current interference on hydrogen embrittlement sensitivity of Q235 pipeline steel considering local deformation on the steel surface and environmental pH value. *Construction and Building Materials*, 501, 144223. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.144223.

Wang, C., Xu, S., Li, W., Wang, Y., Shen, G., & Wang, S. (2024a). Multi-physics coupled simulation and experimental investigation of alternating stray current corrosion of buried gas pipeline adjacent to rail transit system. *Materials & Design*, 247, 113394. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113394.

Wang, T., Xu, D., Qu, L., Fu, J., & Li, Z. (2021). An extension approach to estimate soil corrosivity for buried pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 192, 104413. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104413.

Wang, Y., Chen, X., Li, S., Zhang, G., Song, B., & He, C. (2024b). Synergistic effect of microorganisms and a direct current electric field on X70 steel corrosion in a near-neutral solution. *Engineering Failure Analysis*, 163, 108554.https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108554

Xu, W., Chen, Y., Chen, L., Huang, H., & Li, C. (2022). Effect of cathodic protection potential change caused by alternating current interference on corrosion behavior of X90 steel in 3% NaCl solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 17(10), 221019. https://doi.org/10.20964/2022.10.10.

Yang, L. (2020). Techniques for corrosion monitoring. *Elsevier*. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103003-5.09991-4.

Yang, X. & Wang, H. (2026). Impact assessment of dynamic soil moisture on long-term corrosion behavior of buried steel pipelines using an integrated computational framework. Corrosion Science, 267, 113880. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2026.113880.

Zhang, S., Yan, J., Chen, Z., Huan, H., & Ye, C. (2024). The corrosion behaviors of X70 steel under the effect of alternating current and sulfate-reducing bacteria in seawater. *Corrosion,* 80(6), 630-644. https://doi.org/10.5006/4480.

Article in print