



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

**INFLUENCIA DEL CAMPO MAGNÉTICO
EN PROBLEMAS DE CORROSIÓN**

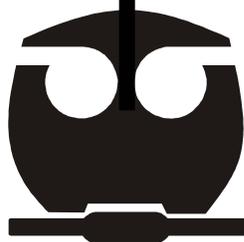
T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A

JOSÉ ANTONIO MAYA CORNEJO



MÉXICO, DF.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: JUAN GENESCÁ LLONGUERAS

VOCAL: FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

SECRETARIO: JOSÉ JUAN CARLOS SÁNCHEZ GHENNO

1er. SUPLENTE: CARLOS RODRÍGUEZ RIVERA

2o. SUPLENTE: MARCO ANTONIO TALAVERA ROSALES

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA

LABORATORIO DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO E INSTALACIONES DE
PETRÓLEOS MEXICANOS

ASESOR: M en C JOSÉ JUAN CARLOS SÁNCHEZ GHENNO _____

SUPERVISOR TÉCNICO: Dr. ELICEO SOSA HERNÁNDEZ _____

SUSTENTANTE: JOSÉ ANTONIO MAYA CORNEJO _____

Agradecimientos

A Dios, por darme una nueva oportunidad de vivir.

A mis abuelos Carlos(†) y Eladio(†) por ser los pilares de mi familia y sus inseparables compañeras Maria de Lourdes y Maria Guadalupe por su cariño y amor incondicional.

A mi familia, Rosy y Toño por cuidarme, amarme, educarme, por toda su paciencia y comprensión porque sin ellos no sería la persona que ahora soy.

A mi hermanita Tere, gracias por tu apoyo incondicional y tú cariño que siempre he tenido.

A mis familiares, que me supieron apoyar en todo momento, en especial a Alex y Angie porque sin su apoyo no hubiera podido estudiar en ésta ciudad. Gracias por su comprensión y paciencia.

A todos los profesores de esta gran Universidad, en especial a los del Departamento de Ingeniera Metalúrgica, por transmitirme sus conocimientos tanto personales como académicos a lo largo de mi carrera.

A mis amigos Adair, Leonardo, Juan Manuel, Walter, Yanet, Manuel, Ángel, Emerson, Israel, Jesús, Fernando, Laura, Cesar, Saúl, Marcos Hugo, Daniel, Yosafat, Juan Ramón, José, Benjamín y Lucero, por su amistad, su compañerismo, su apoyo en momentos difíciles durante la carrera y por todas las horas de sana diversión.

A mi Asesor M. en C. José Juan Carlos Sánchez Ghenno, a mi supervisor técnico Dr. Eliceo Sosa Hernández, a todo el personal de la Superintendencia de PEMEX Gas y Petroquímica Básica de Venta de Carpio así como al todo el personal del Instituto Mexicano del Petróleo porque gracias a ellos se pudo realizar ésta tesis.

A Priscila, por todo tu amor, comprensión, paciencia, ternura, amistad y por dejarme compartir momentos inolvidables a tu lado. Eres parte de mi inspiración.

“Ponte metas más allá de las que puedas alcanzar”



ÍNDICE

1. Introducción	1
1.1 Suelo	1
1.1.1 Clases de suelo	2
1.1.2 Clasificación de los suelos	3
1.1.3 Estructura del suelo	4
1.1.4 Agresividad del suelo	5
1.1.4.1 Resistividad del suelo	5
1.1.4.2 Potencial REDOX	6
1.1.4.3 pH	8
1.2 Electroquímica	8
1.2.1 Termodinámica	8
1.2.1.1 Componentes de una celda electroquímica	8
1.2.1.2 Celdas electroquímica	9
1.2.1.3 Energía libre y ecuación de Nernst	11
1.3 Cinética	12
1.4 Corrosión	15
1.4.1 Tipos de corrosión externa en un ducto	16
1.4.1.1 Corrosión en grietas (Crevice Corrosion)	17
1.4.1.2 Corrosión localizada por picaduras (Pitting Corrosion)	20
1.4.1.3 Corrosión inducida por microorganismos (MIC)	22
1.4.1.4 Corrosión asistida por esfuerzos (Strees-corrosion cracking)	24
1.4.1.4.1 Daño por hidrógeno	26
1.4.1.4.1.1 Ampollamiento por hidrógeno	27
1.4.1.4.1.2 Fragilización por hidrógeno	28
1.4.1.4.1.3 Ataque por hidrógeno o descarburización	28
1.5 Recubrimientos	29
1.6 Protección catódica	33
1.6.1 Tipos de protección catódica	33
1.6.1.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio (ánodos galvanices)	33
1.6.1.2 Protección catódica con corriente impresa	33
1.6.2 Principio en el que se basa la protección catódica	34
1.6.3 Criterios de protección catódica	35
1.6.3.1 -850mV (CSE) con protección catódica aplicada "ON"	35
1.6.3.2 Criterio de potencial de polarización -850mV (CSE) OFF"	36
1.6.3.3 Criterio de polarización 100mV	36
1.7 Interferencias en los sistemas de protección catódica	37
1.7.1 Campo magnético	37
1.7.2 Interferencias por corriente alterna inducida (AC)	41
1.7.2.1 Efecto de las tormentas solares	41
1.7.2.2 Efecto de movimientos telúricos	42
1.7.2.3 Efecto de las líneas de transmisión eléctrica	42
1.7.3 Evaluación y control de la corrosión por AC	43
1.7.3.1 Nuevo criterio de protección catódica propuesto	43
1.7.3.2 Control de corrosión por AC (mitigación de las corrientes	45

inducidas)	
1.7.4 Antecedentes históricos de fallas por AC	47
2. Desarrollo experimental	50
3. Resultados	54
3.1 Medidas de campo magnético	54
3.2 Evaluación de potenciales DC, potenciales AC y densidades de corriente	56
3.2.1 Mediciones a condiciones para el ducto de PEMEX en el DDV	57
3.2.2 Evaluación del prototipo experimental en el DDV	58
3.2.3 Densidades de corriente graficadas en el esquema del criterio de protección catódica propuesto	59
4. Análisis de resultados	60
5. Conclusiones	65
6. Bibliografía	66
Apéndice 1	68

Resumen

Una de las prácticas más utilizadas en la industria del transporte de hidrocarburos por ducto es la de protección catódica por corriente impresa, en nuestro país los ductos están alojado en el derecho de vía los cuales en algunos casos están cercanos o por debajo de las torres de transmisión lo que genera corrientes inducidas debidas a los campos magnéticos que producen las líneas eléctricas.

Las corrientes eléctricas inducidas en los ductos se sobreponen a la corriente de protección catódica originando que el potencial de protección encuentre variaciones significativas en su valor, generando zonas sin protección en el ducto. También se puede presentar el caso en el cual se tengan un potencial de protección y éste no presente variaciones significativas en su valor, en el ducto existe la posibilidad de que se generen zonas de corrosión al existir una corriente inducida por el campo magnético.

Debido a lo anterior se decidió el simular y medir estos fenómenos realizando experimentos que consistirán en realizar mediciones en un tubo de acero, el cual simulará el ducto, a dicho tubo se le aplicará la técnica de protección catódica por corriente impresa. EL ducto será expuesto al campo magnético generado por las líneas de transmisión eléctrica y serán medidas las corrientes inducidas y las variaciones del potencial de protección en el ducto. Posteriormente, se realizaron mediciones en campo sobre ductos de PEMEX para determinar el efecto generado por el campo magnético y realizar comparaciones entre el dispositivo experimental y las mediciones reales en campo.

Todo lo anterior se realizará con el fin de determinar el efecto del campo magnético como factor en el proceso de corrosión o de protección en los ductos.

1. Introducción

1.1 Suelos

El suelo es la cubierta de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica[1,2].

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado, están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos[1,2].

Los componentes primarios del suelo son:

- 1) Compuestos inorgánicos, no disueltos, producidos por la meteorización y la descomposición de las rocas superficiales.
- 2) Los nutrientes solubles utilizados por las plantas.
- 3) Distintos tipos de materia orgánica, viva o muerta.
- 4) Gases y agua requeridos por las plantas y por los organismos subterráneos.

La naturaleza física del suelo está determinada por la proporción de partículas de varios tamaños. Las partículas inorgánicas tienen tamaños que varían entre el de los trozos distinguibles de piedra y grava hasta los de menos de 1/40.000 centímetros. Las grandes partículas del suelo, como la arena y la grava, son en su mayor parte químicamente inactivas; pero las pequeñas partículas inorgánicas, componentes principales de las arcillas finas, sirven también como depósitos de los que las raíces de las plantas extraen nutrientes. El tamaño y la naturaleza de estas partículas inorgánicas diminutas determinan en gran medida la capacidad de un suelo para almacenar agua[1,2].

La parte orgánica del suelo está formada por restos vegetales y restos animales, junto a cantidades variables de materia orgánica amorfa llamada humus. La fracción orgánica representa entre el 2 y el 5% del suelo superficial en las regiones húmedas, pero puede ser menos del 0.5% en suelos áridos o más del 95% en suelos de turba.

El componente líquido de los suelos, denominado por los científicos solución del suelo, es sobre todo agua con varias sustancias minerales en disolución, cantidades grandes de oxígeno y dióxido de carbono disueltos. Los principales gases contenidos en el suelo son el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono [1,2].

1.1.1 Clases de suelo

Los suelos muestran gran variedad de aspectos y características químicas en función de los minerales y materiales orgánicos que lo forman. El color es uno de los criterios más simples para clasificar las variedades de suelo. La regla general, con excepciones, es que los suelos oscuros son más fértiles que los claros. La oscuridad suele ser resultado de la presencia de grandes cantidades de humus. A veces, sin embargo, los suelos oscuros o negros deben su tono a la materia mineral o a humedad excesiva. Los suelos rojos o castaño-rojizos suelen contener una gran proporción de óxidos de hierro (derivado de las rocas primigenias) que no han sido sometidos a humedad excesiva. Por tanto, el color rojo es, en general, un indicio de que el suelo está bien drenado y no es húmedo en exceso. Casi todos los suelos amarillos o amarillentos deben su color a óxidos de hierro que han reaccionado con agua y son de este modo señal de un terreno mal drenado. Los suelos grisáceos pueden tener deficiencias de hierro u oxígeno, o un exceso de sales alcalinas, como carbonato de calcio [1,2].

La textura general de un suelo depende de las proporciones de partículas de distintos tamaños que lo constituyen. Las partículas del suelo se clasifican como arena, limo y arcilla. La arena tiene partículas de diámetros entre 2 y 0.05 mm, el limo entre 0.05 y 0.002 mm y la arcilla son menores de 0.002 mm. En general, las partículas de arena pueden verse con facilidad y son rugosas al tacto. Las partículas de limo apenas se ven sin la ayuda de un microscopio y parecen harina cuando se tocan. Las partículas de arcilla son invisibles si no se utilizan instrumentos y forman una masa viscosa cuando se mojan [1,2].

En función de las proporciones de arena, limo y arcilla, la textura de los suelos se clasifica en varios grupos definidos de manera arbitraria. Algunos son: la arcilla arenosa, la arcilla limosa, el limo arcilloso, el limo arcilloso arenoso, el fango arcilloso, el fango, el limo arenoso y la arena limosa. Los suelos con un porcentaje elevado de arena suelen ser incapaces de almacenar agua suficiente. Los suelos que contienen una proporción mayor de partículas pequeñas, por ejemplo las arcillas y los limos, son depósitos excelentes de agua.

1.1.2 Clasificación de los suelos

Los suelos se dividen en clases según sus características generales. La clasificación se suele basar en la morfología y la composición del suelo, con énfasis en las propiedades que se pueden ver, sentir o medir por ejemplo, la profundidad, el color, la textura, la estructura y la composición química. La mayoría de los suelos tienen capas características, llamadas horizontes; la naturaleza, el número, el grosor y la disposición de éstas también es importante en la identificación y clasificación de los suelos [1,2].

Clasificación Nº 1

- Suelos zonales: Suelos que reflejan la influencia del clima y la vegetación como los controles más importantes.
- Suelos azonales: Son aquellos que no tienen límites claramente definidos y no están mayormente influenciados por el clima.
- Suelos intrazonales: Son aquellos que reflejan la influencia dominante de un factor local sobre el efecto normal del clima y la vegetación. Ej.: los suelos hidromórficos (pantanos) o calcimórficos formados por calcificación.

Clasificación Nº 2

- Pedocales: Suelos con acumulación de carbonatos de calcio, generalmente están en ambientes áridos y semiáridos.
- Pedalfers: Suelos con alta lixiviación y segregación de Al y Fe, generalmente están en ambientes húmedos.

1.1.3 Estructura del suelo

La estructura de los suelos es definida por el estado de agregación de las partículas, componentes minerales y componentes orgánicas. También depende de la disposición de sus partículas y de la adhesión de éstas. La permeabilidad del suelo al agua y al aire también depende de la estructura [1,2].

A continuación se presentan las diferentes estructuras de los suelos:

Tipos de estructuras de suelos

Estructuras simples o no desarrolladas:

- a) Estructura particular: Suelos compuestos por partículas individuales sin estructura y frecuentemente son suelos arenosos, fácilmente penetrables.
- b) Estructura masiva: Son aquellos con agregados consolidados en una masa uniforme, con cierto porcentaje de arcillas y materia orgánica, más difícil de penetrar en seco.
- c) Estructura cementada: Son aquellos en que los agregados han sido deformados, comprimidos o uniformados (pisoteo, laboreo, senderos).

Estructuras compuestas:

- a) Estructura grumosa: Suelos con agregados o grumos redondeados, migajosos o granulares, esto producto de la acción de las raíces y la descomposición de la materia orgánica fresca.
- b) Estructura laminar: Estructura con agregados en cuyas dimensiones predominan los ejes horizontales. Este tipo de estructura pone gran impedimento a la penetración de las raíces, al drenaje interno y a la germinación de las raíces.
- c) Estructura en bloques: Son equidimensionales, es frecuente en los horizontes inferiores, en suelos pesados de textura fija (arcillas).
- d) Prismática o columnar: Con bordes más o menos aristados, son de una buena productividad cuando son pequeños los prismas. Cuando pierden esta característica es sinónimo de degradación.

1.1.4 Agresividad de suelos

Como se ha mencionado, las características del suelo están determinadas por su composición química y sus propiedades físicas. Para que un suelo sea corrosivo algunas condiciones deben cumplirse para que se lleve a cabo una reacción electroquímica: debe haber oxígeno presente (o bacterias anaerobias), humedad y sales solubles del propio suelo.

Los factores más comunes para controlar el nivel de corrosividad de una masa de suelo son: Oxígeno, sales disueltas y elementos formadores de ácidos. Las pruebas que se deben realizar para la evaluación del nivel de agresividad del suelo debe incluir la medición de pH, mediciones de cloruros y sulfatos, resistividad de total de suelo, acidez total de suelo y potencial REDOX.

Es necesario conocer el nivel de agresividad del suelo con el propósito de evaluar el riesgo de potencial de corrosión que este representa, así como la uniformidad o distribución relativa de las propiedades a lo largo del sistema de estudio.

1.1.4.1 Resistividad de suelos

La resistividad es una de las propiedades con mayor importancia en suelos y ha sido largamente usado como un indicador de la capacidad de un suelo para promover la corrosión de una estructura metálica. Dicha resistividad depende de la naturaleza y de la cantidad de sales disueltas en el suelo, así como la temperatura y del porcentaje de humedad [5].

Los estudios sobre suelos han identificado como suelos corrosivos los que presentan una baja resistividad, una clasificación típica de resistividad de suelo como un grado de la agresividad o corrosividad del suelo. La técnica para medir la resistividad de un suelo es conocida como el método de Wenner de los cuatro electrodos y es utilizada en el control de la corrosión de estructuras enterradas [5].

Corrosividad del suelo	Resistividad del suelo (ohm-cm)
Muy Corrosivo	< 1000
Corrosivo	1000 – 10000

Poco corrosivo	10000 – 100000
Nulo	> 100000

Tabla 1.- Grado de corrosividad del suelo en función de la resistividad [5].

Cuando un ducto atraviesa suelos con varias resistividades se desarrollan celdas de corrosión entre las áreas de baja y alta resistividad. Secciones del ducto localizadas en áreas de baja resistividad se hacen anódicas respecto a áreas de ducto localizadas en suelos con resistividad alta. La magnitud de las variaciones en resistividad es tan importante como el valor absoluto de las resistividades. Entre más grande sea el intervalo de resistividades en suelos diferentes, mayor será la tendencia a tener áreas catódicas y anódicas y por lo tanto se tendrán mayores zonas de corrosión [5].

1.1.4.2 Potencial REDOX

La medición del potencial de oxidación-reducción (REDOX) es una manera de identificar las condiciones del suelo que pueden generar un medio propicio para el crecimiento de bacterias anaerobias tales como las bacterias sulfato-reductoras. El potencial REDOX es una medida intensiva sensible al pH. El oxígeno es el receptor de electrones más fuerte, pero para suelos carentes de oxígeno los microorganismos son los donadores de electrones. Las unidades asignadas a los potenciales REDOX son una medida de la tendencia de una sustancia para donar o aceptar electrones, también llamadas potenciales de electrodo. Un potencial REDOX (Eh) positivo alto ($Eh > 400\text{mV}$) determina que las sustancias aceptan fácilmente electrones (reducción), mientras un valor por debajo ($Eh < 100\text{mV}$) determina que las sustancias donan de electrones (oxidación). En teoría, la medición REDOX mide la disponibilidad más que la cantidad de electrones. Es un estimado de la cantidad de agentes reductores presentes en la muestra de la tierra [5].

La figura 1 muestra la forma de medición de potenciales REDOX mediante el contacto de los electrodos de platino y Cu/CuSO_4 con el suelo [5,11].

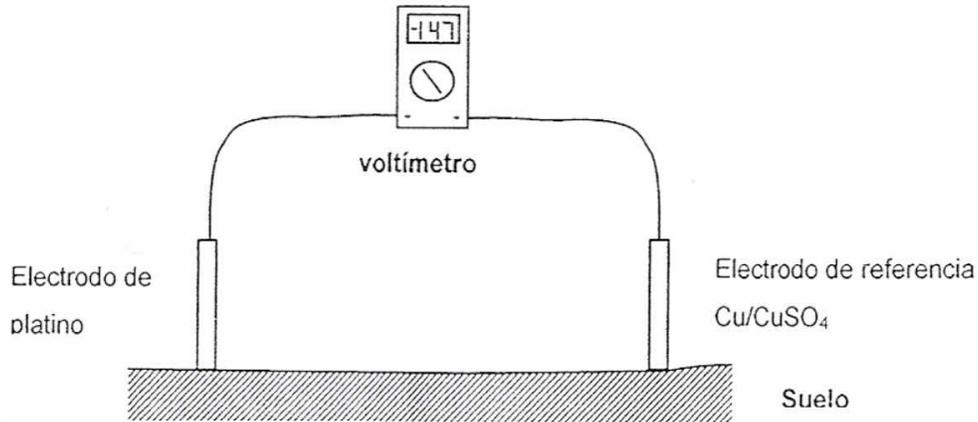


Figura 1.- Medición del potencial REDOX.

A continuación se muestra una tabla con los potenciales REDOX y la tendencia de corrosión del suelo [5].

Grado de agresividad potencial	Potencial REDOX en mV vs electrodo Cu/CuSO ₄	Potencial REDOX en mV vs electrodo estándar de hidrógeno (SHE)
Muy corrosivo	< -200	< 100
Corrosivo	-200 a -100	100 a 200
Poco corrosivo	-100 a 100	200 a 400
Nulo	> 100	> 400

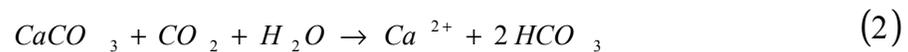
Tabla 2.- Agresividad del suelo en función del potencial REDOX [5].

Los potenciales REDOX son inestables hasta por 24 horas, algunos procedimientos de prueba recomiendan que las mediciones sean realizadas inmediatamente a la colección de muestras. Sin embargo, los cambios más visibles ocurren durante la exposición inicial a oxígeno y continúa cambiando hasta por 24 horas después. Si la precisión de REDOX es deseable, es necesario realizar un monitoreo continuo por un periodo tan largo como tome al valor estabilizarse. En la mayoría de los casos las pruebas largas no son prácticas y se realizan lecturas en periodos más cortos [5].

1.1.4.3 pH

Otro parámetro importante en suelos es el pH, dicho parámetro representa la concentración de iones H^+ y OH^- para determinar el grado de acidez o alcalinidad del suelo. Esta acidez o alcalinidad está en función de las sales contenidas en el suelo y la humedad del mismo. El pH también representa el grado de corrosividad del suelo, es considerado como suelo corrosivo un suelo con un $pH < 5$ y se les llama suelos ácidos, para suelos con un $pH > 5$ son suelos neutros o alcalinos dependiendo del pH medido [5].

La química del pH en el suelo esta determinada por la cantidad de CO_2 disuelto en medio acuoso, a continuación se presentan las reacciones involucradas en el equilibrio del suelo:



1.2 Electroquímica

1.2.1 Termodinámica

1.2.1.1 Componentes de una celda electroquímica.

La corrosión es un proceso electroquímico en el cual un metal se encuentra en contacto e interaccionando con un electrolito. Por esta razón, es necesario entender cómo se lleva a cabo dicha interacción y es necesario conocer qué tipo de evento se presenta en la interacción metal-electrolito. A los tipos de eventos que se presentan se les llama celdas electroquímicas.

Para que una celda electroquímica pueda funcionar, es necesaria la presencia de ciertos componentes en dicha celda [8].

A continuación se presentan estos componentes básicos con los que debe contar la celda electroquímica:

- **Cátodo:** Es la zona del metal en contacto del electrolito donde se llevan a cabo las reacciones de reducción de las especies.
- **Ánodo:** Es la zona del metal en contacto del electrolito donde se llevan a cabo las reacciones de oxidación de las especies.
- **Electrolito:** Es donde se encuentran las especies que interactúan con el metal.
- **Conductor electrónico:** Es el encargado de unir el cátodo y el ánodo, además es el encargado de transportar la corriente eléctrica.

1.2.1.2 Celdas electroquímicas

Existen dos diferentes tipos de celdas, una de ellas es la celda galvánica y la otra es la celda electrolítica.

La celda galvánica consta de dos diferentes metales los cuales actúan como ánodo y cátodo respectivamente. En este tipo de celdas, se produce una corriente eléctrica que se obtiene de la energía química la cual fluye del cátodo al ánodo a través del conductor eléctrico. Este flujo de corriente eléctrica se debe a la reacción REDOX que se presenta espontáneamente en estas celdas sin necesidad de una corriente externa. Esta reacción espontánea es determinada por el potencial de reducción que tiene cada especie. Para tener una idea más clara de este fenómeno, es necesario consultar la serie electromotriz. En dicha serie electromotriz se presentan los valores de potencial de reducción de especies metálicas [4,7].

	Reacción	Potencial Estándar de reducción (V) vs. (SHE)
↑ Noble	$Au^{3+} + 3e^- = Au$	+1.498
	$Pt^{2+} + 2e^- = Pt$	+1.200
	$Pd^{2+} + 2e^- = Pd$	+0.987
	$Ag^+ + e^- = Ag$	+0.799
	$Hg_2^{2+} + 2e^- = 2Hg$	+0.788
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$	+0.401
	$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	+0.337
	$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000
	$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$	-0.126
	$Sn^{2+} + 2e^- = Sn$	-0.136
	$Ni^{2+} + 2e^- = Ni$	-0.250
	$Co^{2+} + 2e^- = Co$	-0.277
	$Cd^{2+} + 2e^- = Cd$	-0.403
	$Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.440
	$Cr^{3+} + 3e^- = Cr$	-0.744
	$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.763
Activo ↓	$Al^{3+} + 3e^- = Al$	-1.662
	$Mg^{2+} + 2e^- = Mg$	-2.363
	$Na^+ + e^- = Na$	-2.714
	$K^+ + e^- = K$	-2.925

Figura 2.- Serie electromotriz

Si el potencial de reducción de una especie metálica es más negativo que el de la otra especie metálica, la especie con el potencial más negativo se comportará ánodo y la otra especie metálica (su par galvánico) se comportará como cátodo.

A diferencia de una celda galvánica, una celda electrolítica se utiliza una fuente de poder externa para que se lleve a cabo dicha reacción redox. En este tipo de celdas los electrodos pueden ser del mismo metal o de dos metales diferentes.

A continuación se presenta una tabla con las características de cada celda electroquímica.

Nombre de la celda	Galvánica		Electrolítica	
	Cátodo	Ánodo	Cátodo	Ánodo
Signo	+	-	-	+
Reacción	$M^+ + 1e^- \rightarrow M^0$	$M^0 \rightarrow M^+ + 1e^-$	$M^+ + 1e^- \rightarrow M^0$	$M^0 \rightarrow M^+ + 1e^-$
Energía libre	$\Delta G < 0$		$\Delta G > 0$	
Potencial de celda	$E > 0$		$E < 0$	
Flujo de electrones	De ánodo a cátodo		De ánodo a cátodo	
Sentido de la corriente eléctrica	De cátodo a ánodo		De cátodo a ánodo	

Tabla 2.- Celdas electroquímicas.

1.2.1.3 Energía libre y ecuación de Nernst

La energía libre de un sistema se encuentra definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln k \quad (3)$$

donde

k es la constante de equilibrio del sistema.

R es la constante de los gases.

T es la temperatura del sistema.

El potencial de un sistema se relaciona con la energía libre del sistema con la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -nFE \quad (4)$$

donde

n es el número de electrones presentes en la reacción.

F es la constante de Faraday.

E es el potencial del sistema.

Si se sustituye la ecuación 1 en la ecuación 2 se obtiene la siguiente ecuación:

$$-nFE = -nFE^\circ + RT \ln k \quad (5)$$

Despejando E se obtiene la ecuación de Nernst, con la cual es posible calcular el potencial de una celda electroquímica fuera del equilibrio.

$$E = E^\circ - \frac{RT}{nF} \ln k \quad (6)$$

La aplicación de esta ecuación surge de la necesidad de conocer potenciales de media celda fuera del equilibrio, es decir, a diferentes concentraciones, temperaturas y presión parcial de oxígeno.

Una de las aplicaciones más importantes de esta ecuación es en la construcción de diagramas E-pH (Pourbaix).

1.3 Cinética

Las velocidades de corrosión están determinadas por una corriente aplicada para producir una curva de polarización (es el grado de cambio del potencial como función a un aumento en la corriente aplicada) para la superficie de un metal. Cuando el potencial de un metal es polarizado debido a la aplicación de una corriente en sentido positivo, se dice que fue realizada una polarización anódica. Cuando el sistema es polarizado en sentido negativo significa que se realizó una polarización catódica. El grado de polarización es una medida de como las velocidades de las reacciones anódicas y catódicas son retardadas por diferentes ambientes (concentración de iones metálicos, oxígeno disuelto, etc. en solución) y/o procesos en la superficie (adsorción, formación de películas, facilidad de soltar electrones, etc.). El primer proceso es llamado control difusional y el otro proceso se le llama control activacional. La variación en el potencial es una función de la densidad de corriente, permitiendo el estudio del efecto en la velocidad de los procesos de concentración y de activación. Por lo tanto, las mediciones de polarización pueden ser determinadas por medio de las velocidades de las reacciones que se encuentran involucradas en el proceso de corrosión [4,7,8].

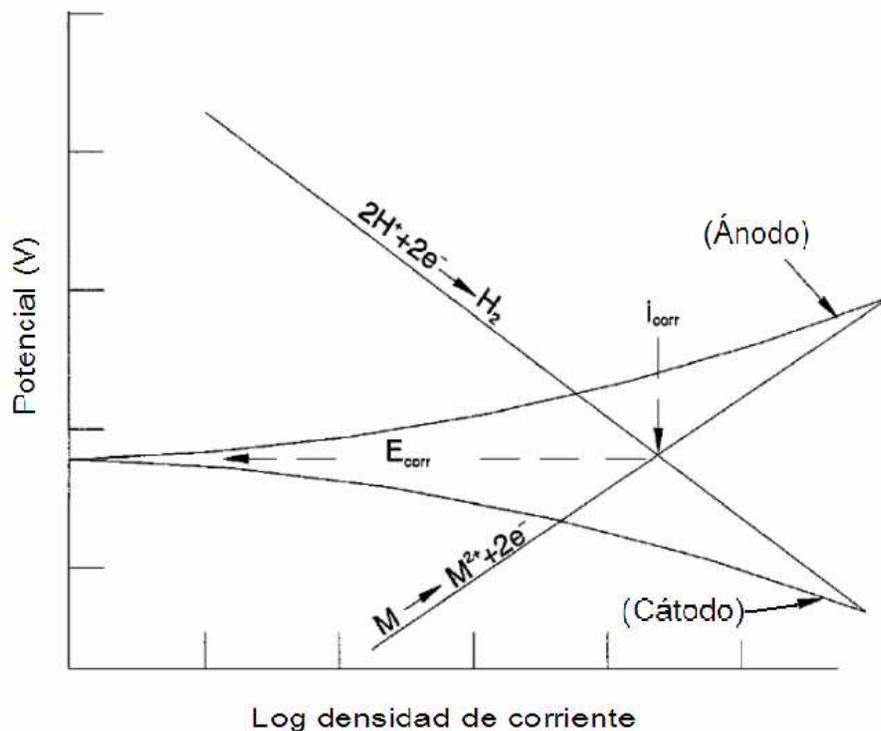


Figura 3.- Curva de polarización.

La figura 3 muestra las curvas de polarización anódicas y catódicas las cuales están representadas por la reacción anódica (disolución del metal) y la reacción catódica (reducción de oxígeno o formación de hidrógeno). En la figura 3 el potencial (E) es graficado como una función del logaritmo de la densidad de corriente (i) [7].

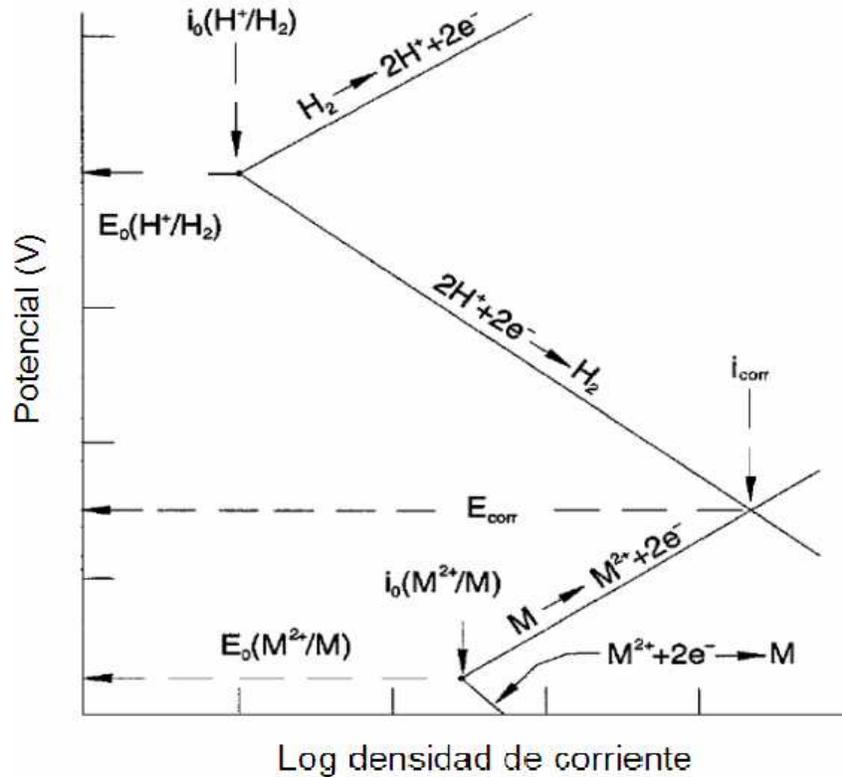


Figura 4.- Diagrama de Evans.

En la figura 4 $E_0(H^+/H_2)$ y $E_0(M^{2+}/M)$ son los potenciales de equilibrio para cada una de las reacciones consideradas. Si el comportamiento anódico del metal es extrapolado y el comportamiento catódico de la reacción de reducción es extrapolado, se obtiene una interacción entre las dos especies existentes formando así un proceso de corrosión entre dos especies diferentes. Dicha extrapolación es posible debido a que las reacciones buscan tener un equilibrio en la superficie del metal, sin embargo la corrosión lo impide y al existir un proceso de corrosión hay un flujo de electrones y dicho equilibrio electroquímico no existe. De este modo ambos sistemas (catódico y anódico) desvían sus potenciales de equilibrio (se polarizan) alcanzando un potencial en común o uniforme, al cual se le llama potencial de corrosión (E_{corr}) y a la densidad

de corriente que se presenta en este punto se le llama densidad de corrosión (i_{corr}), de donde es posible la obtención de la velocidad de corrosión. Esta intersección indica a qué potencial se va a presentar dicha interacción y con qué velocidad se llevará a cabo esta interacción entre las especies existentes. La velocidad de corrosión del proceso está determinada por la corriente de corrosión aplicando leyes de Faraday [4,7,8].

De manera más general, se presenta la siguiente ecuación para determinar la velocidad de corrosión de un metal, estos factores cambian dependiendo el sistema de unidades que se esté utilizando.

$$\frac{cm}{seg} = \frac{i * M}{F * n * \rho}$$

donde

m es la masa pérdida del metal en gramos

n es el número de electrones presentes en la reacción

ρ es la densidad del metal en gr/cm^3

i es la densidad de corriente en A/cm^2

M es el peso atómico del metal

F es la constante de Faraday (96500 coulombs/eq)

Son muy importantes los parámetros de potencial de corrosión y la corriente de corrosión en un proceso electroquímico, ya que dichos parámetros indican si termodinámicamente se llevará a cabo el proceso de corrosión (potencial de corrosión) y la cinética de este proceso de corrosión (corriente de corrosión) en un metal [4,7,8].

1.4 Corrosión

Una definición general para el fenómeno de la corrosión es la degradación de un metal que se encuentra interactuando en un ambiente [7,10]. Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en cierto grado, como por ejemplo el aire y la humedad; el agua salada, atmósferas industriales, vapores y otros gases como el cloro, amoníaco, H_2S , dióxido de azufre y gases combustibles; ácidos como el ácido clorhídrico, sulfúrico y nítrico; ácidos orgánicos como el ácido acético y fórmico; diferentes tipos de suelos, solventes, petróleo y sus derivados, etc.

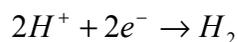
Cuando una superficie metálica se encuentra expuesta a un electrolito se generan zonas de oxidación de especies donde se llevan a cabo las reacciones anódicas, las cuales producen electrones, y a su vez también son generadas zonas de reducción de especies donde se llevan a cabo las reacciones catódicas, las cuales consumen los electrones producidos por las reacciones anódicas [6,7,8,10].

La reacción anódica es la oxidación del metal dando como resultado la disolución de éste y su incorporación al electrolito como iones o como compuestos insolubles del metal, en este caso óxidos metálicos. La reacción catódica es la reducción del oxígeno disuelto en el electrolito o la reducción del agua para la formación de hidrógeno. Todo en conjunto genera una celda de corrosión ya que existen un ánodo, un cátodo, un electrolito y un conductor eléctrico. A continuación se presentan las reacciones en el ánodo y en el cátodo [7,8,10]:

Reacción anódica



Reacción catódica



1.4.1 Tipos de corrosión externa en un ducto

Las tuberías o ductos juegan un papel muy importante en el mundo para el transporte de gases y líquidos en distancias muy largas. La corrosión en ductos u otras estructuras enterradas comúnmente se presenta debido a celdas de corrosión diferencial incluyendo en estas las celdas de aeración diferencial y otros tipos de celdas de acuerdo con características específicas [7,15].

Las celdas de aeración diferencial son las celdas de corrosión más comunes para ductos y estructuras enterradas. En una celda de aeración diferencial un área sobre el ducto se encuentra expuesta a altas concentraciones de oxígeno y dicha área se convierte en el cátodo de la celda, mientras que en otra parte del ducto existe una escasez de oxígeno dando como resultado que dicha zona se convierta en ánodo de la celda. La corriente eléctrica abandona la superficie del metal en el ánodo (debido al consumo de electrones en el cátodo por la reacción de reducción) incrementando la velocidad de corrosión. Este tipo de celdas de corrosión pueden ser autocatalíticas; debido al exceso de cargas positivas en el ánodo, se promueve la migración de cargas negativas para mantener la electroneutralidad en el electrolito produciendo compuestos metálicos que promueven la hidrólisis del agua en dicha zona reduciendo el pH local [15].

Otro ejemplo de una celda de corrosión es el caso de la corrosión galvánica, esta se presenta cuando se tienen dos materiales con diferentes potenciales de reducción. Estos materiales pueden ser otros metales e incluso el mismo recubrimiento del ducto.

Otro factor, como ya se ha mencionado anteriormente, son las propiedades del suelo en que se encuentra enterrado el ducto. Estas propiedades pueden promover las celdas de aeración diferencial.

Los factores antes mencionados pueden generar diferentes formas en las cuales se puede presentar la corrosión exterior de un ducto, tales formas son: corrosión en grietas, corrosión por picaduras, corrosión microbiológica y corrosión por esfuerzos. Todos estos tipos de corrosión se explicarán de manera más detallada a continuación.

1.4.1.1 Corrosión en grietas (Crevice Corrosion)

La corrosión localizada intensa ocurre con frecuencia dentro de grietas en la superficie del metal expuesto a corrosión. Este tipo de ataque está comúnmente asociado con pequeños volúmenes de solución estancada a causa de huecos, juntas en la superficie, uniones dobladas y grietas debajo de tornillos y/o cabezas de remaches. Como resultado, este tipo de corrosión es llamada corrosión en grietas o en algunas ocasiones corrosión en juntas [10,11].

Los ejemplos de depósitos que pueden producir corrosión por grietas son arena, tierra, productos de corrosión y otros sólidos. Los depósitos actúan como escudos y crean el estancamiento de la solución por debajo de estos.

El contacto entre el metal y superficies no metálicas puede causar corrosión en grietas como un caso de juntas. Madera, plásticos, caucho, vidrio, concreto, asbesto, cera son ejemplos de materiales que pueden causar este tipo de corrosión [10,11].

El mecanismo de la corrosión en grietas es el resultado de una diferencia del ion metálico y de la concentración de oxígeno entre la grieta y sus alrededores, generando una celda de aereación diferencia.

Para entender el mecanismo de corrosión en grietas fueron propuestas las siguientes reacciones de manera general, las cuales involucran la disolución de un metal M y la reducción del oxígeno al ion hidroxilo [10,11].



Inicialmente estas reacciones ocurren de manera uniforme sobre toda la superficie, incluyendo el interior de la grieta. La conservación de la carga se mantiene en el metal y la solución. Todo electrón producido durante la disolución del metal (oxidación) es consumido por la reacción de reducción del oxígeno. Después de un corto intervalo de tiempo, el oxígeno dentro de la grieta es agotado debido a la restringida convección del fluido estancado. Esta falta de oxígeno no causa un cambio en el comportamiento corrosivo del proceso [10,11].

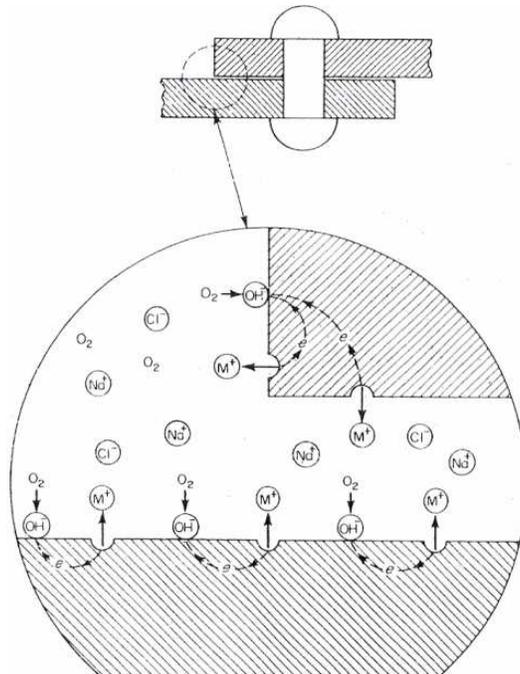


Figura 5.- Mecanismo en la corrosión en grietas en su estado inicial

El agotamiento de oxígeno tiene una importante influencia. Al no ocurrir la reacción de reducción del oxígeno dentro de la grieta, el metal seguirá disolviéndose, ya que el oxígeno que se encuentra afuera de la grieta reaccionará en la superficie metálica externa consumiendo los electrones generados en el interior de la grieta. La tendencia a producir cargas positivas en exceso dentro de la grieta implica que éstas sean balanceadas generando una migración de iones cloruro hacia la grieta dando como resultado un incremento en la concentración de cloruro metálico dentro de la grieta [10,11].

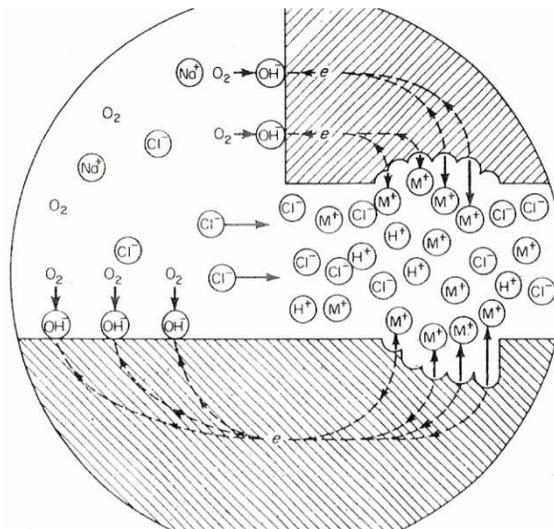
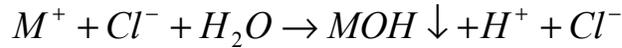


Figura 6.- Mecanismo en la corrosión en grietas cuando la concentración de oxígeno disminuye y comienza la hidrólisis del agua.

Las sales metálicas, que incluyen cloruros y sulfatos, se hidrolizan [10,11]:



Esta reacción muestra la disociación del cloruro metálico en un hidróxido metálico insoluble y en ácido. Por lo tanto dentro de la grieta se lleva a cabo una migración de iones cloruro y la hidrólisis del agua, y como consecuencia la velocidad de disolución del metal es incrementada. Este incremento en la disolución del metal incrementa la migración de los iones cloruro dando como resultado un proceso autocatalítico. La acidificación de la grieta puede alcanzar valores de pH entre 2 y 3. No hay que olvidar que a medida que la disolución del metal se lleve a cabo dentro de la grieta, la reducción del oxígeno que se encuentra alrededor de la grieta se incrementará en la superficie externa [10,11].

A continuación se presentan algunos métodos y procedimientos para combatir o minimizar la corrosión en grietas [10,11].

1. Utilizar una soldadura en lugar de unir dos piezas con tornillos o clavos. Se debe realizar una buena soldadura para evitar porosidad en ésta.
2. Cerrar las grietas si existen empalmes doblados con una soldadura continua.
3. Diseñar recipientes con un completo drenado, eliminar esquinas agudas y zonas de estancamiento. También es necesario tomar en cuenta que los recipientes o tanques se puedan secar fácilmente así como se facilite su limpieza.
4. Inspeccionar con frecuencia los equipos para remover los depósitos existentes.
5. Remover los sólidos en suspensión.
6. Si es posible, proveer un ambiente uniforme.

1.4.1.2 Corrosión localizada por picaduras (Pitting Corrosion)

La corrosión por picaduras es una forma de ataque localizado extremo y como resultado se presentan agujeros en el metal. Estos agujeros pueden presentar diámetros pequeños o grandes, pero en la mayoría de los casos se presentan diámetros pequeños. Las picaduras en algunas ocasiones se presentan de manera aislada o demasiado cerca entre sí aparentando una vasta zona de daño haciendo creer que se trata sólo de un daño superficial [10,11].

Las picaduras son uno de los tipos de corrosión más destructivas, provoca en los equipos fallas debido a la perforación de estos con tan sólo un pequeño porcentaje en la pérdida de peso de la estructura completa. Es muy común que las picaduras sean difíciles de detectar porque tienen un tamaño muy pequeño y porque las picaduras se encuentran cubiertas con productos de corrosión. Adicionalmente es difícil realizar mediciones cuantitativas y compararlas con otras picaduras ya que cada picadura encuentra variaciones en su profundidad y en el número de picaduras que se presentan bajo condiciones idénticas. Las picaduras son difíciles de predecir tanto a nivel laboratorio como a nivel industrial, ya que a veces requieren tiempos largos para que se presenten [11].

Las picaduras usualmente crecen en la dirección de la fuerza de gravedad, la mayoría de las picaduras se desarrollan y crecen hacia abajo de una superficie horizontal [10,11].

Las picaduras comienzan su formación cuando existe un defecto en la película protectora, esto da como resultado la formación de una celda electroquímica. Es un proceso autocatalítico el que se da dentro de la picadura, es decir, el proceso de corrosión dentro de la picadura produce condiciones necesarias para que siga activada la picadura. Este tipo de mecanismo es muy parecido al que se presenta en la corrosión en hendiduras [10,11].

El metal M es picado por una solución de cloruro de sodio que se encuentra oxigenada. La disolución ocurre de manera rápida dentro de la picadura mientras que en la superficie cercana se lleva a cabo la reducción del oxígeno. La rápida disolución del metal dentro de la picadura tiende a producir un exceso de cargas positivas y como resultado se tiene la migración

de cargas negativas (en este caso cloruros) para mantener la electroneutralidad dentro de la picadura. Ahora, dentro de la picadura existe una gran cantidad de cloruro metálico (MCl) y este compuesto provoca la hidrólisis (como en la corrosión en hendiduras) y una gran concentración de iones H^+ como se muestra en la siguiente reacción [10,11]:

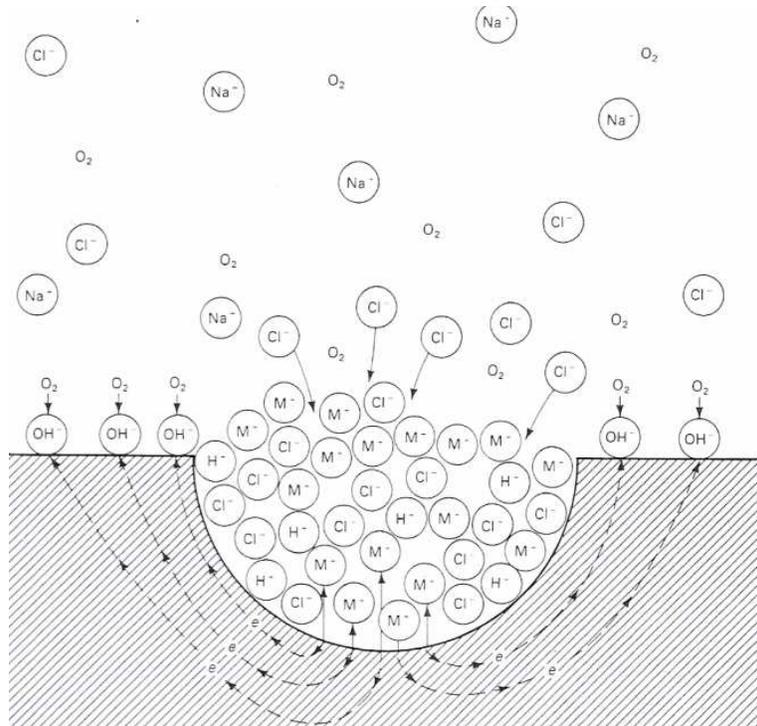
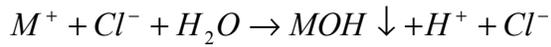


Figura 7.- Mecanismo de corrosión en una picadura.

La existencia de iones H^+ y Cl^- estimula la disolución del metal ya que la picadura se acidifica alcanzando valores de pH pequeños (como en la corrosión en hendiduras) y con el tiempo se acelera dicho proceso de corrosión. Dentro de la picadura no se lleva a cabo la reacción de reducción del oxígeno. La reducción del oxígeno en la superficie cercana a la picadura tiende a suprimir la corrosión del metal [10,11].

Es muy importante tomar en cuenta que si el área donde se lleva a cabo la reacción catódica (reducción del oxígeno) es muy grande y la picadura es pequeña, la velocidad de corrosión será muy rápida, tomando en cuenta que siempre existe en la solución oxígeno para reducir [10,11].

Es importante hacer notar que la corrosión por picaduras tiene un mecanismo de corrosión similar al de la corrosión en hendiduras, pero no son iguales. La corrosión por picaduras se lleva a cabo en superficies metálicas con los siguientes defectos [10,11]:

- Superficie rayada o mecánicamente lastimada donde se presente la falla o rompimiento de una película protectora continua.
- Dislocaciones emergentes hacia la superficie o en zonas de tensión de fatiga residual.
- Una composición heterogénea en la superficie, inclusiones y segregación de alguna fase.

Para prevenir o minimizar la corrosión por picaduras en alguna superficie metálica es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones [10,11]:

1. Reducir la agresividad del ambiente (electrolito o solución) como: Eliminar concentraciones elevadas iones cloruro y disminuir la acidez del medio.
2. Realizar una mejor selección de materiales para condiciones de operación específicas.
3. Mejorar el diseño de equipos con la finalidad de eliminar zonas de estancamiento de solución.

1.4.1.3 Corrosión inducida por microorganismos (MIC)

La corrosión inducida por microorganismos (MIC) se define como una corrosión que es influenciada por la actividad y presencia de microorganismos en los cuales se incluyen bacterias y hongos [7,15].

Los microorganismos que se encuentran localizados en la superficie del metal no atacan directamente a éste. Los productos o desechos de los microorganismos producen varias formas de corrosión entre las que destacan la corrosión por picaduras y la corrosión en hendiduras. Es importante mencionar que los productos de dichos microorganismos no generan el defecto o la grieta para que se lleve a cabo la corrosión localizada, los productos de los microorganismos aceleran el proceso de oxidación del metal en dicho defecto [15].

Los microorganismos que producen la corrosión en una estructura metálica son bacterias, algas y hongos. Todos ellos forman una capa que contiene productos de corrosión y agua llamada biocapa, la cual tiene un espesor aproximado de 250µm. Si una estructura no tiene un recubrimiento continuo, las bacterias fomentarán la formación de picaduras en la estructura metálica. En la intercara metal-biocapa se ven modificados el pH, la concentración de oxígeno y la concentración de iones en solución [7,10,11].

Las bacterias son clasificadas de acuerdo con las condiciones en donde pueden existir y a continuación son presentadas [7,10,11,15]:

- Anaerobias: Pueden sobrevivir sin la presencia de oxígeno en el ambiente.
- Aerobias: Necesitan la presencia de oxígeno en el ambiente para sobrevivir.

Las bacterias sulfato reductoras (SRB) son anaerobias, éstas se encuentran las bacterias *desulfovibrio*, *desulfotomaculum* y *desulfomonas*. Su forma de ataque es localizado y muchas de las veces se observa el ataque como una picadura y la tipo de ataque que realizan ellas se les llama corrosión anaerobia. Este tipo de bacterias se presentan en diversos ambientes tales como suelos saturados de agua con un pH cercano a neutro, lodos de ríos y especialmente en suelos que contengan materia orgánica [11].

La corrosión bajo condiciones de oxigenación, generalmente promueve la formación de metabolitos ácidos. La bacteria sulfuro-oxidante (*Thiobacillus*) puede crear un ambiente arriba del 10% de H₂SO₄, por lo tanto genera una rápida corrosión. Otro tipo de bacterias generan ácidos orgánicos que tienen similares resultados. Este tipo de corrosión puede ser localizado o uniforme en la superficie del metal. Al tipo de corrosión que se presenta con estas bacterias se le llama corrosión aerobia [7,11].

A continuación se presentan algunos de los parámetros que promueven la corrosión microbiológica (MIC):

- Altas Temperatura
- Amplio rango de pH
- Presencia de agua estancada
- Concentración de oxígeno (corrosión aerobia)

Para mitigar la corrosión inducida por microorganismos, es necesaria aplicar al ducto un potencial de -950mV (CSE) [7,11].

1.4.1.4 Corrosión asistida por esfuerzos (Strees-corrosion cracking)

Stress-corrosión cracking (SCC) es un término utilizado para describir fallas en servicio en ingeniería de materiales, la cual ocurre debido a una inducción ambiental lenta de la propagación de la fractura. Se ha observado que la propagación de la fractura es el resultado combinado de esfuerzos mecánicos y reacciones de corrosión. Esta es una definición muy simple para un tema tan complejo [11].

La fractura inicia y se propaga con una velocidad lenta. La secuencia de eventos que se presentan en el proceso de SCC está dividida en los siguientes pasos [11]:

- Rompimiento inicial y el paso 1 la propagación.
- Paso 2 o estado estacionario de la propagación de la fractura.
- Paso 3 propagación de la fractura o fractura final.

Es difícil hacer una distinción entre los pasos porque la transición ocurre de manera continua [11].

Se han propuesto muchos mecanismos diferentes para explicar la interacción esfuerzo-corrosión que ocurre en una fractura. Los mecanismos propuestos pueden ser clasificados dentro de dos categorías básicas:

- Mecanismos anódicos.
- Mecanismos catódicos.

Durante la corrosión, las reacciones anódicas y catódicas ocurren y el fenómeno resulta en la propagación de la fractura, la cual se puede asociar con el tipo de reacción. El mecanismo anódico más obvio es una simple disolución activa de metal, con esto, es removido material dentro de la fractura. El mecanismo catódico más obvio es la evolución o generación de hidrógeno, adsorción, difusión y fragilidad.

Los mecanismos que han sido propuestos requieren que ocurran una secuencia de ciertos procesos o eventos para que se lleve a cabo la propagación de la fractura. A continuación se presenta una secuencia de eventos que determinan la velocidad de propagación de la fractura [11]:

- Transporte de masa a lo largo de la fractura
- Reacciones en la solución cercana a la fractura
- Adsorción en la superficie cercana a la fractura
- Difusión en la superficie
- Reacciones en la superficie
- Absorción en el seno del fluido
- Difusión en el estado sólido
- Reacción en el estado sólido
- Avance de la fractura

Diferentes parámetros ambientales se conocen como influencia en la velocidad de crecimiento de la fractura, los cuales se presentan a continuación [11]:

- Temperatura
- Presión
- Especies en solución
- Concentración de especies y su actividad
- pH
- Potencial electroquímico
- Viscosidad de la solución

De todos estos parámetros antes mencionados, el pH es el más importante, diferentes estudios realizados sobre SCC han mostrado dos mecanismos típicos [12]:

- Mecanismo pH cerca del neutro (NNpH)
- Mecanismos a altos pH

Alterando alguno de estos parámetros se puede ver alterada la velocidad de los pasos de crecimiento de la fractura y con esto disminuir la velocidad de propagación de la fractura [11].

1.4.1.4.1 Daño por hidrógeno

El daño por hidrógeno es una forma de falla ambientalmente asistida que resulta en el mayor de los casos de la acción combinada del hidrógeno y un esfuerzo tensil aplicado o residual [10]8.

El hidrógeno atómico (H) es la única especie que difunde dentro del acero y en otros metales. Este hidrógeno se obtiene de la reacción catódica del electrolito que se puede generar en la superficie de la metálica cuando existe una sobreprotección catódica generando hidrógeno como se muestra en la reacción $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$, pero como el hidrógeno molecular no difunde en el acero, la reacción correcta es la reacción de formación del hidrógeno atómico $H^+ + e^- \rightarrow H$ [10,11].

El daño por hidrógeno se puede clasificar en los siguientes tipos y posteriormente se explicaran dicha clasificación [10,11]:

- Ampollamiento por hidrógeno
- Fragilización por hidrógeno
- Ataque por hidrógeno o Descarburización

1.4.1.4.1.1 Ampollamiento por hidrógeno

Se presenta comúnmente en contenedores que contienen electrolitos ácidos y el exterior se encuentra expuesto a la atmósfera. La evolución del hidrógeno se presenta en la superficie del metal como resultado de la reacción de reducción debida a la protección catódica. En un tiempo, existe una concentración de hidrógeno atómico sobre la superficie del metal y algunos de estos átomos difunden dentro del metal. Muchos de estos átomos difunden hasta el exterior de la pieza metálica combinándose en la superficie metálica exterior dando como resultado hidrógeno molecular. Sí el hidrógeno atómico difunde dentro del metal hasta encontrar un espacio vacío, que puede ser una vacancia o un poro, en donde se combina el hidrógeno atómico para formar hidrógeno molecular. Como se ha mencionado anteriormente, el hidrógeno molecular no difunde en el metal así es que en el espacio vacío comienza a aumentar la concentración de hidrógeno y la presión ejercida por este gas se incrementa dentro del espacio vacío y cuando existe la suficiente presión comienza la ruptura del metal [10,11].

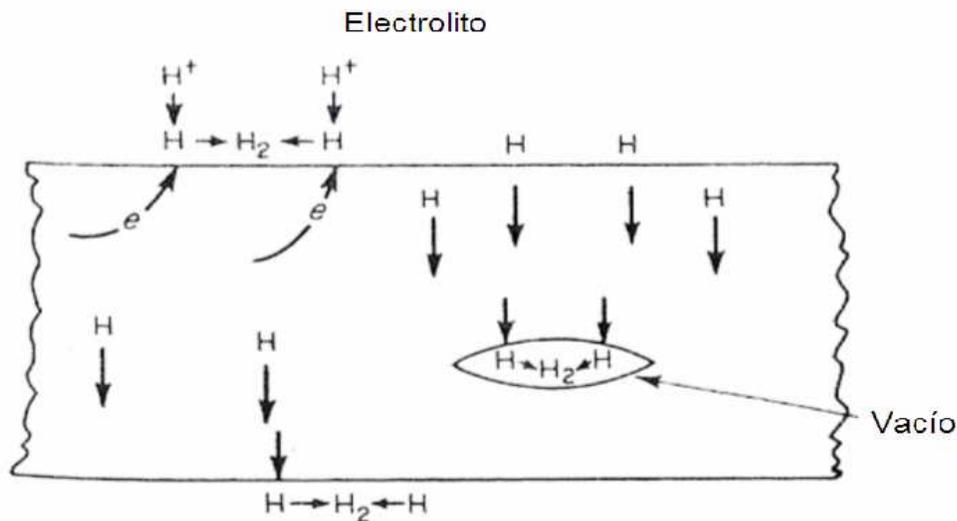


Figura 8.- Mecanismo de adsorción, difusión de hidrógeno en el metal.

1.4.1.4.1.2 Fragilización por hidrógeno

El mecanismo de la fragilización por hidrógeno es muy parecido al mecanismo de ampollamiento por hidrógeno pero no es el mismo. En el inicio sí es el mismo, ya que también el hidrógeno atómico penetra en el metal. Pero en este caso, el hidrógeno atómico no se combina para formar hidrógeno molecular, sino que reacciona con los elementos aleantes dentro del metal y con la misma matriz metálica formando compuestos frágiles [10,11].

1.4.1.4.1.3 Ataque por hidrógeno o descarburización

Este tipo de ataque es un daño por hidrógeno a alta temperatura, esto ocurre en aceros al carbono de baja aleación los cuales se encuentran expuestos a altas presiones y a altas temperaturas en presencia de compuestos que tienen hidrógeno.

El hidrógeno dentro del acero reacciona con el carbono que se encuentra en solución o como compuesto (carburo) para formar gas metano disminuyendo sus propiedades mecánicas. Este proceso depende de la temperatura, dicha temperatura en donde se puede presentar el daño es aproximadamente 200°C [10,11].

1.5 Recubrimientos

Los primeros intentos para controlar la corrosión en tuberías se realizó con el uso de recubrimientos con la razón de aislar la tubería metálica del contacto directo con la tierra a su alrededor. Este concepto es completamente razonable y lógico[6]. Además, un recubrimiento puede ser efectivo, disminuyendo la velocidad de corrosión, si el material con el que se desea recubrir cuenta con las siguientes características de manera general[6,7]:

- Un efectivo aislador eléctrico.
- Se pueda aplicar sin rupturas o defectos.
- Formar inicialmente una película perfecta.

Si bien los recubrimientos por ellos mismos no son una perfecta solución para el control de la corrosión, son muy efectivos cuando se utilizan de una manera apropiada. Muchas empresas utilizan a los recubrimientos junto con la técnica de protección catódica en todas sus tuberías[6,7]. Una apropiada selección y aplicación del recubrimiento puede proveer toda la protección necesaria en todas las superficies de las tuberías que sean aplicadas, pero como ya se ha comentado que los recubrimientos no son perfectos es mejor combinarlos con la protección catódica para darle una protección total[7].

De acuerdo con la norma RP0169-96 sección 5 de la NACE de recubrimientos, los recubrimientos deben cumplir con las siguientes características[7]:

- Aislante eléctrico efectivo.
- Efectiva barrera para la humedad.
- Fácil de aplicar, sin afectar las propiedades de la tubería.
- Resistencia al desarrollo de fallas en el recubrimiento con el tiempo.
- Buena adherencia a la superficie de la tubería.
- Resistencia a la degradación por rayos UV.
- Habilidad para mantener una resistencia eléctrica constante al paso del tiempo.
- Resistencia al desprendimiento del recubrimiento.
- Interacción no tóxica entre el recubrimiento y el ambiente.

Además de las características ya mencionadas, los siguientes factores deben ser considerados para la realización de un buen recubrimiento para la tubería, sin dejar a un lado la más importante que es la vida media del recubrimiento seleccionado para la aplicación [6,7].

- Tipos de ambientes.
- Temperaturas de operación de las tuberías.
- Temperatura ambiente durante la aplicación del recubrimiento.
- Métodos de instalación de la tubería.
- Preparación previa de la superficie de la tubería.

Todas las características anteriores son importantes en cualquier situación en la que se presente una tubería enterrada, pero particularmente se deben cumplir cuando la protección catódica se esté utilizando como complemento al recubrimiento [6,7].

Los potenciales que se presentan en un ducto pueden ser muy negativos produciendo degradación en el recubrimiento por ampollamiento debido a la generación de hidrógeno (generado por la reacción catódica). C.G. Munger y R.C. Robinson, que se mencionan en la referencia [5], proponen que para potenciales más negativos a -1000mV vs. Cu/CuSO_4 no se usen recubrimientos cuando se utilice sobre el ducto la técnica de protección catódica.

E. Elikes, que se mencionan en la referencia [5], propone en una tabla el tipo de recubrimiento que presenta mejores propiedades para un potencial suelo-ducto específico. A continuación se muestra la tabla antes mencionada [5].

Recubrimientos	Potencial (mV) vs. Cu/CuSO ₄
Óleo-resinoso	-850 a -1050
Aluminio-bitumen	-1150
Hule clorinado	-1150
Vinil	-1150 a -1250
Alquitrán de hulla epóxico	-1650
Epóxico	-2050

Tabla 4.- Potenciales aceptables para diferentes tipos de recubrimientos [5].

A continuación se presentan los tipos de recubrimientos para ductos y sus características de protección [7].

Recubrimiento para ducto	Característica deseada	Limitaciones
Alquitrán de hulla	Más de 80 años de uso. Mínima susceptibilidad a fallas. Bajos requerimientos de corriente. Buena resistencia al desprendimiento catódico. Buena adherencia al acero.	Fabricación limitada. Limitación en aplicación.
Cinta aplicada con molino	Más de 30 años de uso. Mínima susceptibilidad a fallas. Fácil de aplicar. Buena adherencia al acero. Bajos requerimientos de energía para su aplicación.	Envío e instalación. Altas temperaturas. Desprendimiento del acero.
Polyolefin extruído con adhesivo butil	Más de 40 años de uso. Mínima susceptibilidad a fallas. Bajos requerimientos de corriente. Fácil de aplicar. No contaminante. Bajos requerimientos de energía para su aplicación.	Mínima adhesión sobre el acero. Limitación en almacenamiento.
Polyolefin dual extruído con adhesivo butil	25 años de uso. Bajos requerimientos de corriente. Excelente resistencia al desprendimiento catódico. Fácil de aplicar. No contaminante. Bajos requerimientos de energía para su aplicación.	Dificultad para remover el recubrimiento. Limitación en aplicación.
Recubrimiento fundido	35 años de uso. Bajos requerimientos de corriente. Excelente resistencia al desprendimiento catódico. Excelente adherencia al acero. Excelente resistencia a hidrocarburos.	Aplicación de los parámetros exactos. Aplicación a altas temperaturas. Baja resistencia al impacto y la abrasión.
Epóxicos multicapa	Muy bajos requerimientos de corriente. Muy altas resistencia al desprendimiento catódico. Excelente adherencia al acero. Excelente resistencia a hidrocarburos. Alta resistencia al impacto y a la abrasión.	Limitación en aplicación. Costo inicial alto.

Tabla 3.- Características y limitaciones de los recubrimientos [7].

En un sistema real, el potencial del ducto encuentra variaciones en su valor de protección catódica debido a los diferentes tipos de suelos, al diferente porcentaje de humedad del suelo, a la irregularidad del terreno (diferentes profundidades a las cuales se encuentra enterrado el ducto) y por estas razones es difícil aplicar un recubrimiento específico para un sólo comportamiento, con lo cual es mejor aplicar un recubrimiento que pueda cubrir todas las necesidades de protección que el ducto requiera.

De manera industrial para la protección de ductos enterrados se utilizan conjuntamente los recubrimientos y la técnica de protección catódica para el control de la corrosión. Es importante mencionar que una sola de estas técnicas sería insuficiente para evitar la corrosión económicamente hablando pero es necesario utilizar ambas para disminuir en mayor medida la velocidad de corrosión.

1.6 Protección catódica

La protección catódica es una de las técnicas con éxito dentro de la protección de estructuras metálicas enterradas y en el control de la corrosión. Está basada en la eliminación del uno de los electrodos, en este caso el ánodo, de la celda electroquímica que puede formarse en la superficie del ducto, haciendo éste se comporte como un cátodo evitando la disolución del metal en el electrolito [4,7].

1.6.1 Tipos de protección catódica

1.6.1.1 Protección catódica con ánodos de sacrificio (ánodos galvánicos)

Una celda de corrosión se presenta al poner en contacto dos diferentes metales, como ya se ha explicado anteriormente. En dicha celda, uno de los electrodos tendrá un potencial más bajo, con respecto a un electrodo de referencia, en comparación con el otro electrodo que presentará un potencial más alto, con respecto a un electrodo de referencia. El electrodo con más bajo potencial presentará un comportamiento anódico (reacción de oxidación) haciendo que el electrodo se disuelva en el electrolito, en tanto que el otro electrodo presentará un comportamiento catódico (reacción de reducción) quedando protegido contra la corrosión. Para el caso de ductos, el metal más utilizado es el hierro y sus aleaciones, haciendo necesaria la utilización de metales con potenciales más negativos que el del hierro. De acuerdo a la serie electromotriz los metales económicamente más viables para cumplir la función de ánodos son el aluminio, magnesio, zinc y sus aleaciones [4,7,10].

1.6.1.2 Protección catódica con corriente impresa

En éste tipo de protección catódica, para obtener un valor de potencial asociado con el potencial de inmunidad del metal, es suministrada una corriente sobre la superficie del ducto a través de una fuente de poder. El ducto que se desea proteger es conectado al polo negativo de la fuente de poder, haciendo que dicho ducto se comporte como un cátodo, en tanto que el polo positivo es conectado al electrodo auxiliar o cama de ánodos, haciendo que los electrodos se comporten como ánodo. Dichos ánodos deben ser insolubles [4,7,10].

1.6.2 Principio en el que se basa la protección catódica

Toda estructura metálica enterrada en un suelo presenta un potencial electroquímico en su superficie exterior. Este potencial puede ser medido utilizando un voltímetro con un electrodo de referencia en una de sus puntas y la otra punta conectada a la estructura. Idealmente una medición precisa consistiría en acercar el electrodo de referencia a la estructura metálica lo más cercano posible para obtener valores de dicho potencial cercanos al valor real.

La protección catódica se basa en la aplicación de una cantidad de corriente eléctrica al ducto enterrado que se desee proteger, esto se realiza con la finalidad de polarizar dicho ducto hasta un determinado potencial en el cual se comportará como cátodo. El potencial suelo-ducto que se desee obtener debe encontrarse dentro de la zona de inmunidad de acuerdo con el diagrama de Pourbaix para que dicho ducto éste protegido [4].

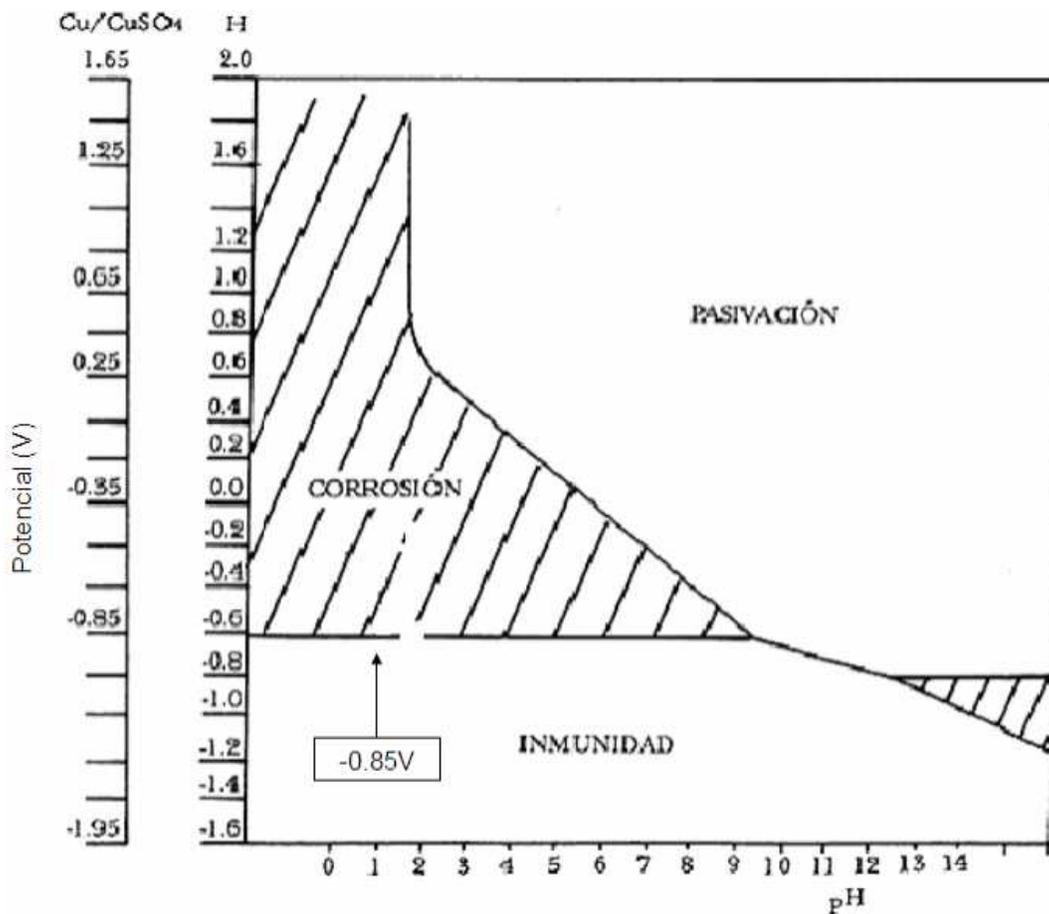


Figura 9.- Diagrama de Pourbaix para el hierro.

1.6.3 Criterios de protección catódica

Los tres criterios de protección catódica para ductos de acero enterrados son enlistados en la norma NACE RP-01-69 y a continuación se presentan dichos criterios de protección [4,7,16]:

1. -850mV (CSE) con protección catódica aplicada (Prueba en "ON").
2. Potencial de polarización de -850mV (CSE) (Prueba en "OFF").
3. 100mV de polarización.

1.6.3.1 -850mV (CSE) con protección catódica aplicada "ON"

Un potencial negativo (catódico) menor a -850mV con protección catódica aplicada. Este potencial es medido con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄ saturado en contacto con el electrolito [4,7,16].

Este criterio es el más utilizado para determinar si un ducto enterrado se encuentra dentro de los parámetros establecidos por las normas de protección catódica. Esta técnica se basa en el potencial que presenta un ducto enterrado en contacto con el suelo (electrolito) el cual debe de presentar un valor de aproximado de -850mV con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄ saturado. Este criterio originalmente fue adoptado basándose en la el potencial natural de un electrolito en contacto con una estructura de acero el cual es de -800mV (Cu/CuSO₄ saturado). Al asumir una macro celda de corrosión, ésta puede ser mitigada si la corriente de protección catódica es suficiente para mantener un potencial más negativo que el potencial natural. El potencial de -850mV provee un margen de 50mV de protección y la efectividad de este criterio se ha demostrado por muchos años [4,7,16].

Este criterio tiene un número de limitaciones, una de ellas es la caída ohmica. Dicha caída ohmica es una resistencia presentada por suelo, la cual no permite realizar una medición del valor de potencial real del ducto, con lo cual se puede obtener un potencial de ducto en el cual se encuentra protegido pero en realidad el potencial del ducto puede tener valores en los cuales se puede encontrar desprotegido. La caída ohmica se puede eliminar colocando el electrodo de referencia lo más cercano posible al ducto [4,7,16].

1.6.3.2 Criterio de potencial de polarización -850mV (CSE) "OFF"

Este criterio es una polarización negativa (en sentido catódico) del potencial al menos de -850mV del potencial natural ducto-suelo con respecto al electrodo de referencia Cu/CuSO₄ saturado. El potencial de polarización es medido directamente después de realizar una interrupción en todos los suministros de corriente y se le llama potencial en OFF, cuando se reestablece la corriente eléctrica se le llama potencial en ON. La diferencia entre el potencial ducto-suelo en ON y el potencial ducto-suelo en OFF se le llama caída ohmica [4,7,16]. Este criterio es aplicado para conocer los errores generados por la caída ohmica al realizar las mediciones de potencial de protección catódica ducto-suelo, con la finalidad de conocer el valor real del sistema. Este criterio es muy común encontrarlo en ductos recubiertos en donde es aplicada una corriente de protección [4,7,16]. Una importante limitación de este criterio es que el suministro de la corriente eléctrica debe ser interrumpido y el tiempo que tarda en despolarizarse el ducto.

1.6.3.3 Criterio de polarización 100mV

Este criterio se basa en un mínimo de 100mV de polarización catódica entre la superficie del ducto y el electrodo de referencia [4,7,16]. Este criterio es basado en la disminución de la velocidad de corrosión con un aumento en la proporción de la reacción de reducción del metal, esto se logra polarizando a partir del potencial natural ducto-suelo en sentido catódico (negativamente) el ducto enterrado [4,7,16]. El criterio de 100mV de polarización es utilizado en ductos con un mal recubrimiento (defectos en el recubrimiento), cuando se dificulta o resulta costosa la aplicación del criterio de -850mV en OFF. Algunas de las limitaciones acerca de este criterio son el tiempo que tarda en despolarizarse el ducto, lo cual puede llevar días, y la medición en áreas que presenten corrientes parásitas que puedan afectar la medición del potencial de alcanzado por la polarización [7,16].

Existen algunos factores que intervienen de manera dañina en el control y mitigación de la corrosión, uno de estos factores son las interferencias que se producen cuando una tubería protegida catódicamente se encuentra próxima a una tubería sin protección. Otro factor que interviene en los criterios de protección catódica son las corrientes inducidas o parásitas que se generan por campos magnéticos cercanos a la tubería protegida catódicamente [7,16].

1.7 Interferencias en los sistemas de protección catódica

1.7.1 Campo magnético

La corriente eléctrica de protección catódica así como el potencial de protección catódica pueden verse afectada por factores externos como campos magnéticos generados por otros conductores eléctricos cercanos (como una línea de transmisión eléctrica), tormentas electromagnéticas espaciales y también por el campo magnético terrestre [17,18].

En este estudio sólo se considerará el efecto del campo magnético generado por líneas de transmisión eléctrica en ductos para determinar la velocidad de corrosión generada por la corriente eléctrica inducida.

Cuando existe un movimiento de cargas en un conductor eléctrico se dice que existe una corriente eléctrica la cual genera un campo magnético, sino es así, sólo existirán campos eléctricos generados por las cargas estáticas [9].

La corriente eléctrica se define como la carga neta que pasa a través de una superficie en un intervalo de tiempo. Para generar este movimiento de cargas es necesario contar o aplicar una diferencia de potencial en los extremos del conductor eléctrico y dichas cargas se moverán con una velocidad llamada velocidad de arrastre [9]. Esta velocidad de arrastre es de suma importancia conocerla para obtener, más adelante, la fuerza magnética generada por el campo magnético. El lugar ocupado por un campo magnético se define como el espacio alrededor de un imán o de un conductor de corriente eléctrica. Vectorialmente se define que el campo magnético es perpendicular al vector de velocidad de las cargas eléctricas, como resultante de estos dos vectores se obtiene el vector de fuerza magnética que también es perpendicular al vector de velocidad de las partículas como se muestra en la figura 10.

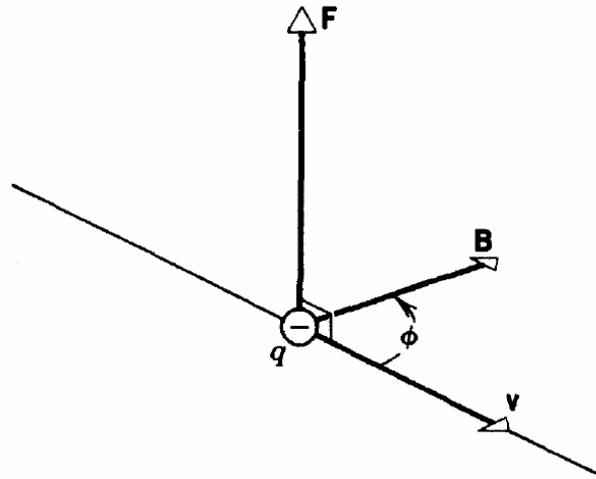


Figura 10.- Vectores que representan el campo magnético, la velocidad de la partícula cargada y la fuerza magnética

donde

B: Vector de campo magnético

V: Vector de velocidad de la partícula

q: Carga de la partícula

F: Vector de fuerza magnética.

A continuación se muestra la ecuación que representa la magnitud de la fuerza magnética generada a partir del campo magnético (B) es [9]:

$$F = qvB \sin \phi \quad (7)$$

La ecuación (7) representa de manera escalar la fuerza magnética donde encuentra su máximo valor cuando $\phi = 90^\circ$.

Existen similitudes y diferencias entre el campo magnético y el campo eléctrico. Estos dos campos son generados de manera simultánea cuando existe una corriente eléctrica que es transmitida por un conductor eléctrico. Una muy importante diferencia entre estos dos campos son las líneas de campo que generan cada uno, el campo eléctrico genera líneas de campo eléctrico que siempre comienzan en las cargas y siempre terminan en las cargas y la fuerza eléctrica generada por el campo eléctrico es paralelo a dicho campo; en tanto que las líneas de campo magnético siempre forman anillos concéntricos alrededor del conductor eléctrico y la fuerza magnética generada por el campo magnético es perpendicular a dicho campo.

Las unidades de medición del campo magnético son Tesla

$$1 \text{ Tesla} = 1T = 1 \frac{\text{Newton}}{\text{coulomb} * \text{metro} / \text{seg}} = 1 \frac{\text{Newton}}{\text{ampere} * \text{metro}}$$

La ley de Biot-Savart representa la magnitud del vector de campo magnético generado por una corriente eléctrica que pasa por un conductor y a continuación se muestra [9]. Esta ley describe la magnitud del campo magnético generado en función de la cantidad de corriente que corre sobre un conductor eléctrico:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r} \quad (8)$$

donde

r: Distancia del conductor eléctrico al punto de observación o de medición.

μ_0 : Permitividad magnética del medio

i : Corriente eléctrica.

De acuerdo con el experimento realizado por Faraday, el cual consiste en acercar y alejar un imán en un conductor eléctrico conectado a un amperímetro, a medida que el imán es acercado y alejado del conducto eléctrico, el amperímetro toma medidas de una corriente eléctrica que es inducida por el campo magnético. También se da el caso en el que un conductor eléctrico por el cual fluye una corriente eléctrica genera un campo magnético, el cual ejercerá su influencia sobre otro conductor eléctrico, si la corriente eléctrica presenta variaciones en el conductor por el que fluye dicha corriente, el campo magnético inducirá una corriente eléctrica sobre el conductor eléctrico cercano [9].

La característica común entre estos dos casos es el movimiento o cambio. La causa de las corrientes inducidas es el movimiento del imán o la corriente eléctrica cambiante. Cuando el imán se encuentra en movimiento o la corriente eléctrica encuentra variaciones el número de líneas de campo magnético que pasan a través de una superficie cambia. Lo que realmente genera la corriente inducida es la fem inducida por el campo magnético y específicamente lo que

determina esta fem inducida es la velocidad de cambio en el número de líneas de campo magnético que pasan a través de una superficie[9].

Para tener un valor cuantitativo de flujo de campo magnético se tiene la siguiente ecuación

$$\Phi = \int B * dA \quad (9)$$

donde

B : Es el campo magnético.

dA : Es un elemento de área de la superficie.

Esta ecuación representa la cantidad de líneas de campo magnético que ejerce su efecto sobre una superficie conocida.

La integración se lleva a cabo sobre toda la superficie a través de la cual deseamos calcular el flujo de campo magnético. La unidad del flujo de campo magnético es:

$$1weber = 1 Tesla * metro^2$$

En términos del flujo magnético, la fuerza electromotriz (fem) inducida en un circuito está dada por la ley de inducción de Faraday:

“La fem inducida en un circuito es igual al negativo de la velocidad con la que cambia con el tiempo el flujo magnético a través del circuito”:

En términos matemáticos, la ley de Faraday es:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (10)$$

donde

\mathcal{E} : Es la fem inducida.

$d\Phi_B$: Es la diferencial del flujo de campo magnético

dt : Es la diferencial del tiempo en el cual el flujo de campo magnético perturba el conductor eléctrico.

Si el valor del flujo de campo magnético está dado en webers por segundo, la fem tiene unidades de volts[9].

Cuando el flujo magnético a través de un material conductor cambia, aparecen corrientes inducidas en el material. Estas corrientes se llaman corrientes de Foucault o corrientes parásitas. En ciertos casos las corrientes parásitas pueden producir efectos indeseables.

1.7.2 Interferencias por corriente inducida (AC)

Las corrientes erráticas o parásitas se definen como corrientes eléctricas que fluyen desde afuera del sistema[16]. El origen de las corrientes puede estar asociado a líneas de transmisión de alto voltaje, actividad solar y movimientos telúricos de la tierra[17,19,20,21].

1.7.2.1 Efecto de las tormentas solares

La mayoría de los campos geomagnéticos tienen un patrón similar a una distribución bipolar, presentan variaciones temporales y espaciadas de acuerdo con su origen. La intensidad de estas variaciones está relacionada con la frecuencia y la fuerza de la actividad solar[17]. Esta actividad solar causa cambios en el viento solar y como consecuencia induce tormentas espaciales lo cual genera perturbaciones en la magnetosfera y en la ionosfera. Esto causa cambios temporales en el campo geomagnético, conocidas como disturbios o tormentas geomagnéticas[17,19]. La variación diaria tiene valores entre 50 a 250 nT en las zonas ecuatoriales y de 30 a 60 nT en latitudes medias durante días tranquilos. Las variaciones se incrementan a valores por arriba del 100% durante días con tormentas geomagnéticas y teniendo períodos de segundos a horas[17].

Como se mencionó anteriormente, los ductos cuentan con la técnica de protección catódica para minimizar los efectos corrosivos que se puedan presentar. La fluctuación de las corrientes inducidas en el ducto están relacionadas con la actividad geomagnética y el efecto en el potencial ducto-suelo presenta variaciones por dicha fluctuación[17,18,19,20]. La resistividad del suelo es un factor de suma importancia, ya que si el ducto se encuentra enterrado en un suelo conductor (baja resistividad) la corriente inducida puede disminuir en dicho ducto, en

cambio si el ducto se encuentra enterrado en un suelo no conductor (alta resistividad) la corriente inducida se puede incrementar en el ducto. Esto se debe a que los suelos con resistividades bajas drenan la corriente inducida del ducto y los suelos con resistividades altas no drenan las corrientes inducidas dejándolas en el ducto. Estos resultados se ven reflejados en un aumento en la velocidad de corrosión en el ducto enterrado [18,19,20].

1.7.2.2 Efecto de movimientos telúricos

Las fluctuaciones en corriente y potencial en ductos atribuidos a corrientes de movimientos telúricos se han observado por varios años. El impacto de esta corriente geomagnética inducida es considerado como un problema al realizar las mediciones de los parámetros de protección catódica provocando preocupación cuando existe un nivel de corrosión [21].

Durante el tiempo en el que la corriente del movimiento telúrico se transfiere del ducto a la tierra (porción positiva del ciclo telúrico) genera reacciones de oxidación en la superficie del ducto y si éste cuenta con defectos en el recubrimiento, reacción de oxidación que se presenta será la del acero aún cuando esté protegido catódicamente. Cuando la corriente se transfiere de la tierra hacia el ducto, las reacciones que se presentan en la superficie del ducto son reacciones de reducción, en este caso la reducción del agua y esto es cierto cuando la corriente telúrica se encuentra en la fase negativa de la onda. El aumento en la corrosión ocurre durante el periodo positivo y esto depende directamente de la intensidad del disturbio telúrico [21].

1.7.2.3 Efecto de las líneas de transmisión eléctrica

El riesgo de corrosión por corriente alterna (AC) en ductos enterrados es incrementado debido a la creciente tendencia de instalar ductos en lugares cercanos donde las líneas de transmisión eléctrica pasen por arriba de estos. Ha sido reconocido de manera general que los ductos pueden sufrir corrosión por AC a pesar de satisfacer el criterio de protección catódica basado en la medición del potencial suelo-ducto de $-0.85V$ (CSE) [22].

El 5% de todas las fallas por corrosión externa en Europa se debieron a corrosión por AC influenciadas por líneas de transmisión eléctrica [22].

1.7.3 Evaluación y control de la corrosión por AC

1.7.3.1 Nuevo criterio de protección catódica propuesto

Los estudios realizados por Hosokawa [22] han derivado en un nuevo criterio que debe ser tomado en cuenta cuando un ducto se encuentra protegido catódicamente.

Estos estudios han derivado en la investigación de los efectos que producen las densidades de corriente por DC y AC en una posible corrosión por AC. Fueron colocados cupones de acero desnudo simulando un defecto en la superficie del metal con un área de 10cm^2 los cuales fueron conectados al ducto en estudio y se realizaron mediciones de las corrientes DC y AC simultáneamente [22].

La figura 11 muestra los efectos de las densidades de corriente DC y AC en la velocidad de corrosión obtenidas por la técnica de pérdida de peso en laboratorio y en mediciones de campo [22]. Cuando la densidad de corriente AC fue alta, la velocidad de corrosión tiene valores de 0.01mm/año . También es importante destacar que la densidad de corriente AC tiene valores de 70A/m^2 , el acero sufre corrosión aún cuando la densidad de corriente DC se encuentra en valores de 1A/m^2 siendo este valor generalmente aceptado como un valor no dañino como se muestra en la figura 11.

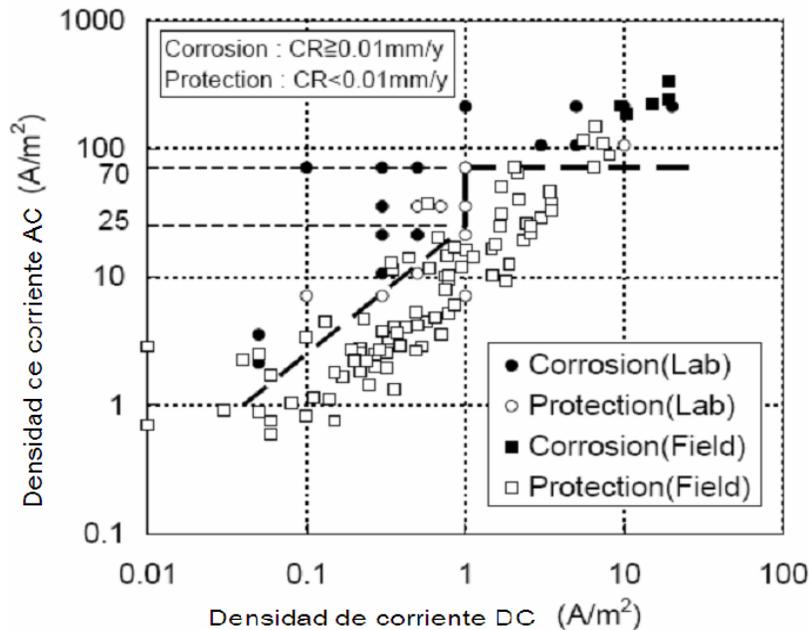


Figura 11.- Efecto de las densidades de corriente DC y AC en la velocidad de corrosión de los cupones de acero.

De acuerdo con la figura 12, el nuevo criterio de protección catódica para evaluar apropiadamente el riesgo de corrosión por AC es el siguiente [22]:

$$0.1 \frac{A}{m^2} \leq I_{DC} < 1.0 \frac{A}{m^2} \quad y \quad I_{AC} < 25 * I_{DC} \quad (I)$$

$$1 \frac{A}{m^2} \leq I_{DC} < 40 \frac{A}{m^2} \quad y \quad I_{AC} < 70 \frac{A}{m^2} \quad (II)$$

A continuación se muestra de manera esquemática este nuevo criterio de protección catódica.

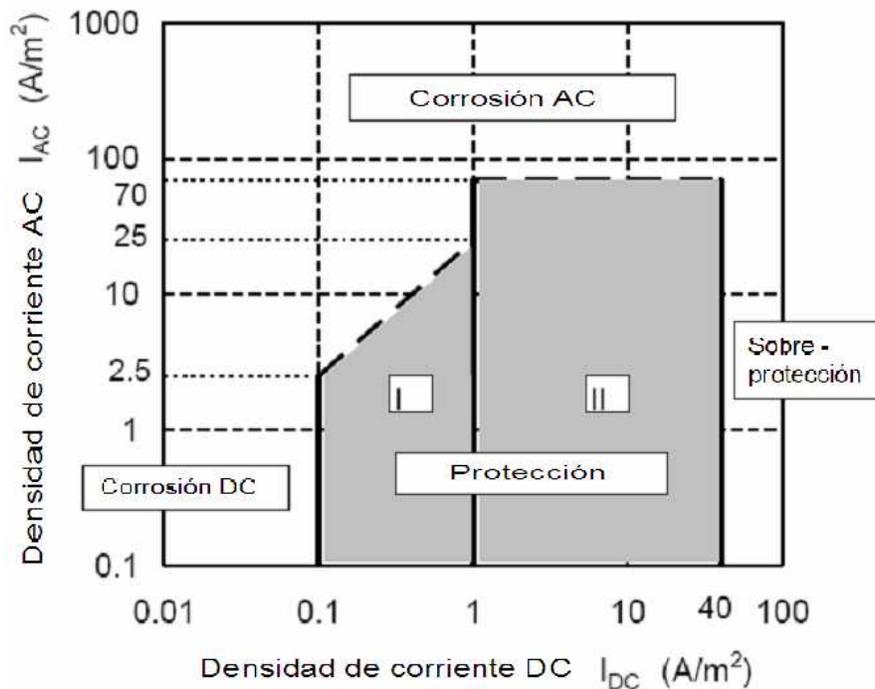


Figura 12.- Nuevo criterio de protección catódica basado en los cupones de densidad de corriente DC y AC [22].

La parte superior fue delimitada por los cupones con densidad de corriente AC de acuerdo con los experimentos realizados y mostrados en la figura 11, los cuales indican los valores de riesgo por corrosión AC. Asimismo, la parte inferior es delimitada por los cupones con densidad de corriente DC de acuerdo con los resultados obtenidos de la figura 11 y determinan la zona de protección catódica de la figura 12 [22].

Es importante tomar en cuenta este nuevo criterio de protección catódica, ya que relaciona los efectos que pueden tener las corrientes inducidas de AC en la corrosión del ducto, aún cuando éste se encuentre protegido catódicamente.

La densidad de corriente AC puede ser calculada por una ecuación que relaciona la resistividad del suelo, el voltaje AC en el ducto y el diámetro de un defecto en el recubrimiento del ducto. A continuación se presenta dicha ecuación [23]:

$$i_{AC} = \frac{8 * V_{AC}}{\rho * \pi * d} \quad (11)$$

donde

i_{AC} : Densidad de corriente AC.

V_{AC} : Voltaje AC en el ducto.

ρ : Resistividad del suelo.

d : Diámetro del defecto en la superficie del ducto.

1.7.3.2 Control de la corrosión por AC (mitigación de las corrientes inducidas)

Para disminuir el efecto de las corrientes inducidas, y por lo tanto disminuir el riesgo de corrosión por AC, es necesario como primer requisito identificar y localizar la línea de transmisión eléctrica o la fuente de estas corrientes parásitas, realizar mediciones de voltajes AC y DC en el ducto, obtener la mayor cantidad de información acerca de las características y propiedades del suelo (resistividad, pH, concentración de cloruros, tipo de suelo, color del suelo, etc.) y sí es posible realizar una inspección visual del recubrimiento del ducto en busca de defectos. Con toda la información anterior y los resultados experimentales, se podrá tomar una decisión ya sea la de colocar un sistema de ánodos de magnesio enterrados para drenar las corrientes que se inducen en el ducto o simplemente se aumentaría la densidad de corriente DC. Todo esto depende en qué zona se encuentre el ducto de acuerdo con el nuevo criterio de protección catódica propuesto [22,23].

Además es importante enterrar y conectar cupones de acero desnudo para el monitoreo de las densidades de corriente DC y AC en los puntos en los cuales exista un alto riesgo de corrosión por AC [22,23].

Todo lo anterior se puede ver de una mejor manera en la figura 13.

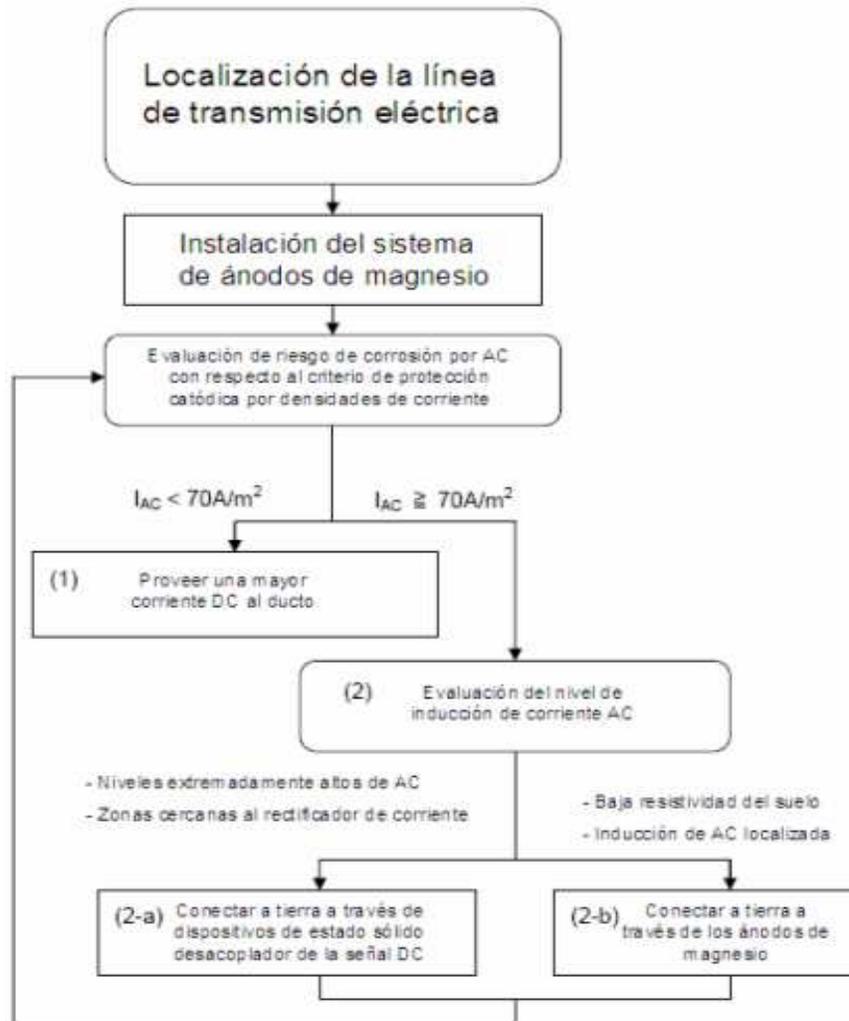


Figura 13.- Metodología para la mitigación de AC en ductos.

Las razones por la cual se utilizan ánodos de magnesio son [22]:

- 1) Los ánodos de magnesio no sólo proveen la mitigación de las corrientes inducidas AC, sino que también protegen catódicamente el ducto durante su colocación en la zona destinada a ser colocado.
- 2) La reducción de la eficiencia de la protección catódica puede ser minimizada cuando el ducto ya se encuentre protegido catódicamente por corriente impresa.

El estudio anterior ha presenta una forma de evaluar y disminuir los riesgos de corrosión por AC en ductos, además se ha generado un nuevo criterio de protección catódica. Con los resultados obtenidos a partir de la aplicación del nuevo criterio de protección catódica se ha demostrado la influencia que tienen las corrientes inducidas debidas a fuentes de campo magnético [22].

1.7.4 Antecedentes históricos de fallas por AC

- Primer caso

En septiembre de 1991, después de sólo 4 años de operación, una falla por corrosión ocurrió en un ducto de gas de alta presión de 300mm de diámetro en la ciudad de Kitchener, Canadá. El ducto estaba recubierto con una doble capa de polietileno extruido. Dicho ducto estaba protegido catódicamente usando de ánodos de magnesio de 7.7Kg y el potencial se encontraba en un rango de -1.45V (CSE) a -1.50V (CSE). Una línea de alto voltaje se encontraba a 14m del ducto, corriendo en paralelo a lo largo de 4400m de dicho ducto. Los voltajes de AC presentes en este ducto se encontraban dentro del rango de 6V a 10V, pero algunas veces cuando fallaba el sistema de mitigación de corrientes de AC, alcanzaba valores de 26V AC. En enero de 1992, cuando se comenzó a realizar la investigación se encontraron voltajes de 28V de AC [23].

La causa de la corrosión no fue identificada. Se especuló que la causa de esta falla pudo haber sido por una celda de corrosión debido a una alta concentración de cloruros, otra causa probable pudo haber sido corrosión inducida por microorganismos. Pero debido a la alta densidad de corriente AC en el ducto, que fue calculada con al ecuación 11, dando como resultado valores de densidades de corrientes de AC de 1100 A/m². Los parámetros que fueron tomados en cuenta fueron el voltaje AC con un valor de 28V, una resistividad del suelo de 130Ω-cm y un diámetro del defecto de 50mm. Es importante hacer notar que los valores de densidad de corriente en los cuales se presenta la corrosión por AC son mayores a 70A/m² [23].

- Segundo caso

En 1976, un ducto de productos de aceite de 250mm de diámetro operada por Trans-Northern Pipelines Inc. de Toronto, fue colocado en la cercanía de un transformador eléctrico. Este ducto se encontraba recubierto con polietileno extruido y protegido catódicamente con la técnica de corriente impresa [23].

En una inspección interna al ducto que realizaron en 1986, fue identificada una anomalía menor (menos del 25% de penetración). Posteriormente en una nueva inspección interna en 1994, utilizando un equipo de ultrasonido, fue encontrada una anomalía significativa en el mismo sector la cual resultó ser una picadura. Esta picadura de 50mm de largo, 45mm de ancho y 6.9mm de profundidad resultó en un 88% de penetración en el ducto el cual tiene 7.8mm de espesor. Asumieron que la picadura aumentó de 25% a 88% de penetración en más de 8 años con relación a la primera inspección que realizaron y con estos datos determinaron una velocidad de corrosión de 0.61mm/año [23].

El potencial ducto-suelo presentaba un valor más negativo a -1.27V (CSE) en ON, con lo cual se satisfacía el potencial de protección catódica. Incluso el potencial medido en el lugar de la picadura fue de -1.18V (CSE). La resistividad del suelo donde se encontraba la picadura en el ducto fue de 300Ω-cm con una concentración de cloruros de 1920ppm [23].

El voltaje AC presentaba un valor de 15V durante la investigación y de 12V un año previo a la investigación. Utilizando la ecuación 11 la densidad de corriente por AC calculada fue de 200A/m². Con este resultado se sobrepasa el valor de 70A/m² que se marca como límite máximo para el inicio de corrosión por AC [23].

- Tercer caso

Un ducto de 500mm de alta presión de gas natural con un recubrimiento alquitrán de hulla fue instalado en 1972 por Union Gas. Aproximadamente 40Km de los 74Km de longitud del ducto corre paralelamente a una línea de alto voltaje. En 1995, se realizó una inspección interna con un equipo de ultrasonido. Como resultado se encontraron anomalías en el ducto donde corre paralelamente la línea de alto voltaje. Los defectos tenían una profundidad de corrosión del 40% del espesor del ducto que es de 7.1mm, estas profundidades fueron encontradas del kilómetro

7.55 al 8.14 y del kilómetro 18.1 al 19.5. Dos anomalías de mayor severidad fueron localizadas en el kilómetro 7.59 y en el kilómetro 18.53, las cuales tenían una penetración estimada de 80% y 63% respectivamente [23].

El estudio realizado mostró que en las zonas donde el porcentaje de penetración presentaba valores grandes, los potenciales de AC medidos alcanzaban valores de 33V AC. El potencial de protección catódica medido para el ducto fue de -1.49V a -1.56V (CSE) con lo cual se encontraba dentro del criterio de protección catódica. La resistividad del suelo alrededor del ducto era de $2000\Omega\text{-cm}$. Con estos datos fue calculada la densidad de corriente AC, la cual presentaba un valor de 84A/m^2 con lo cual el ducto se encuentra en la zona de corrosión por AC [23].

- Cuarto caso

En 1997, Nova Gas Transmisión Ltd. de Calgary, reconoció la posibilidad de corrosión por AC ya que satisfacía aspectos que derivan en voltajes AC inducidos en un ducto de 1200mm de diámetro. Paralelamente a éste ducto corría una línea de transmisión eléctrica de 240kV por 14.3km. Se realizaron mediciones de voltaje AC y se encontró un valor de 20V AC, con los estudios de resistividad de suelo y suponiendo el peor caso de defecto en el recubrimiento que es de 1cm^2 se calculó la densidad de corriente AC presentando valores en un rango de 100 a 400A/m^2 . Con estos valores de densidad de corriente AC el ducto se encontraba en la zona de corrosión por AC [23].

Estos son algunos de los casos de corrosión por AC que se han estudiado, pero así como existen estos casos, hay ductos que están siendo afectados por corrientes inducidas o parásitas promoviendo, a pesar de la protección catódica suministrada al ducto, una corrosión por AC.

2. Desarrollo experimental

Los experimentos fueron realizados en un ducto de 1 m de longitud y 8" de diámetro, con un recubrimiento fundido que protege al ducto y dicho ducto se encontraba enterrado en arena contenida en una caja de acrílico como lo muestra la figura 14 y a todo lo anterior se le denominó prototipo experimental. Este fue evaluado previamente en el laboratorio en ausencia de interferencias inducidas por el campo magnético, así como en presencia de interferencias inducidas propias del laboratorio (0.006 G).



Figura 14.- Prototipo experimental.

Para realizar mediciones en ausencia de interferencias, se realizaron evaluaciones experimentales como el potencial suelo-ducto e impedancia del sistema dentro de una caja de Faraday, la cual tiene unas dimensiones de 190cmx80cmx90cm. A continuación se muestra la caja de Faraday construida.

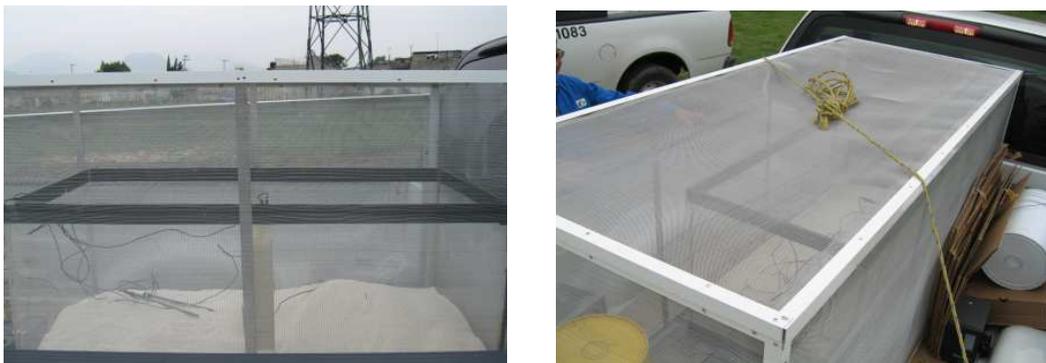


Figura 15.- Caja de Faraday con el dispositivo experimental en su interior.

También se realizaron mediciones sobre un ducto de PEMEX el cual transporta gas, dicho ducto cuenta con un diámetro de 12". Este ducto se encuentra alojado en el derecho de vía (DDV) Venta de Carpio - San Juan Ixhuatepec (Figura 16).



Figura 16.- Ducto de PEMEX en el DDV.

Los ductos bajo estudio son del tipo X52, los contraelectrodos utilizados en la experimentación fueron de grafito, para el caso del ducto en suelo altamente resistivo, y de acero inoxidable, para el ducto de PEMEX alojado en el derecho de vía, el electrodo de referencia utilizado fue el electrodo de cobre-sulfato de cobre saturado. También fueron utilizados cupones de acero desnudo de 7x5cm. Estos cupones serán de gran utilidad, ya que al conectarlos al sistema se comportarían como un defecto en el recubrimiento.

Los puntos del derecho de vía donde se realizaron las mediciones experimentales fueron en los kilómetros 5.5 y 6 respectivamente. Estos puntos fueron escogidos debido a que a pesar de que se encuentran protegidos catódicamente existen daños en el recubrimiento según el estudio de DCVG para este tramo [5]. En el kilómetro 6 del DDV se encuentra el rectificador de corriente llamado Gran Canal. Cabe mencionar que este derecho de vía se comparte con el DDV de líneas de alta tensión que salen de la planta termoeléctrica "Valle de México". Eso permitió realizar las mediciones en presencia de interferencia.

A continuación se muestra una gráfica con los potenciales de protección catódica en los puntos analizados.

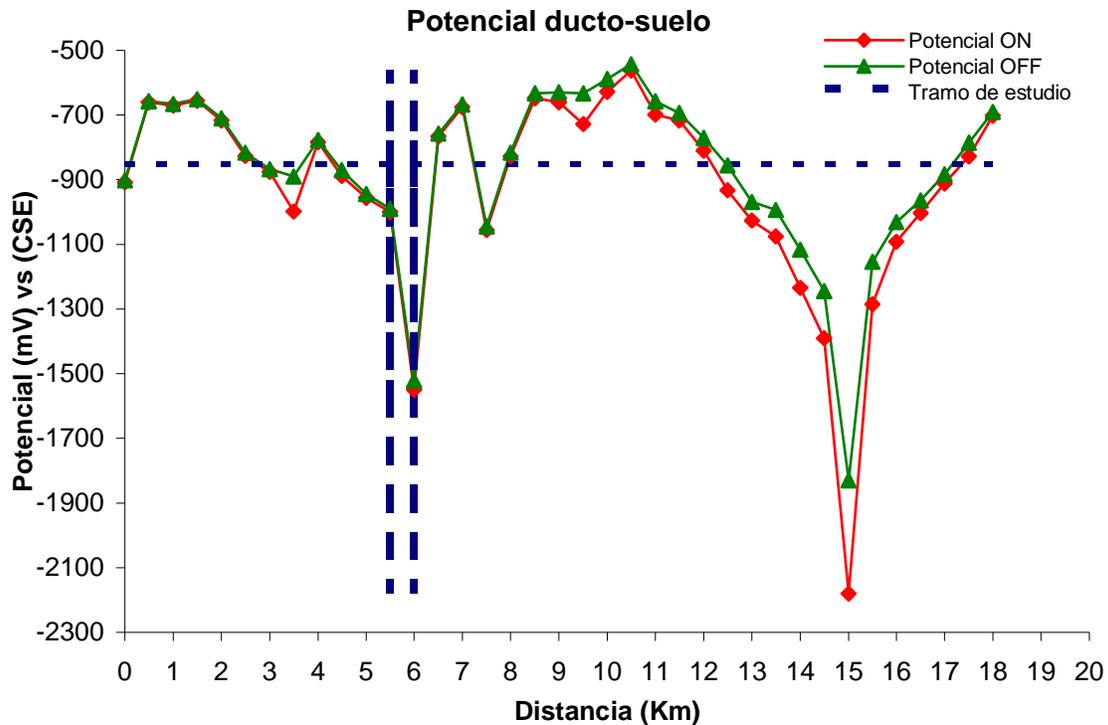


Figura 17.- Potencial del DDV Venta de Carpio - San Juan Ixhuatepec referencia [5].

Como se mencionó anteriormente y de acuerdo con datos de inspección de campo [5], del kilómetro 4 al 8 se encuentra la mayor cantidad de daños en el recubrimiento y el tramo en estudio se encuentra dentro de ésta zona de defectos. Estos datos no aseguran que los daños en el recubrimiento hayan alcanzado la superficie del ducto. El ducto se encuentra protegido catódicamente y a pesar de estar protegido existe daño en el recubrimiento, por esta razón se propone la existencia de corrosión por AC teniendo en cuenta que el ducto se encuentra debajo de líneas de transmisión eléctrica.

Para el prototipo experimental se realizaron las mediciones experimentales en el kilómetro 5.5 y 6 del DDV así como en el laboratorio; también se realizaron mediciones experimentales en el DDV para el ducto de PEMEX, siguiendo la metodología propuesta anteriormente para ambos casos:

En laboratorio

- Medición de la resistividad del suelo para el prototipo experimental.
- Medición de la intensidad del campo magnético en el laboratorio.
- Medición de potencial DC en el prototipo experimental.
- Aplicación de la técnica electroquímica de impedancia al prototipo experimental a cuatro diferentes frecuencias (0.1, 1, 5, 10 Hz) en el laboratorio.

En campo

- Medición de la resistividad del suelo.
- Medición de la intensidad de campo magnético generado por líneas de transmisión eléctrica cercanas.
- Medición de potencial DC en el ducto de PEMEX y en el prototipo experimental.
- Medición de potencial AC en el ducto de PEMEX y en el prototipo experimental.
- Aplicación de la técnica electroquímica de impedancia al prototipo experimental a cuatro diferentes frecuencias (0.1, 1, 5, 10 Hz) en presencia de la interferencia de las líneas de transmisión eléctricas.
- Obtención de las densidades de corriente AC.
- Valoración de los datos obtenidos.
- Determinación de la existencia de corrosión por AC

3. Resultados

Los resultados de las mediciones de campo magnético generado de las líneas de transmisión eléctrica, así como la evaluación de los potenciales DC y AC, y la determinación de las densidades de corriente fueron realizadas en el DDV para el ducto de PEMEX. De la misma manera se realizaron las mediciones para el prototipo experimental en el DDV y en el laboratorio. Todos los resultados se presentan a continuación de acuerdo a las condiciones que se presentaron.

3.1 Medidas de campo magnético

En la tabla 5 se presentan las mediciones de la intensidad de campo magnético medido en los dos puntos del DDV y en el laboratorio, estas mediciones se realizaron con un gaussímetro. Posteriormente se presenta una tabla comparativa para estos valores. Es importante recordar que estos dos puntos del DDV fueron seleccionados porque se encuentran protegidos catódicamente y existe daño en el recubrimiento como se menciona en el capítulo anterior.

Ubicación del punto de medición	Campo magnético con ambiente seco (G)	Campo magnético con ambiente húmedo (G)
Laboratorio	0.06	-----
Km. 5.5 DDV	35	70
Km. 6 DDV	27	60

Tabla 5.- Magnitud del campo magnético en dos puntos del DDV.

El campo magnético en laboratorio no cambia ya que las condiciones de operación son las mismas: Laboratorio cerrado, lámparas encendidas y monitores de computadoras encendidos.

Es importante tener un punto de comparación para las mediciones de campo magnético realizadas en el DDV, por esta razón se presenta la tabla 6 con diferentes fuentes de campo magnético y sus magnitudes.

Ubicación del campo magnético	Campo magnético (G)
Superficie de una estrella de neutrones	1×10^{12}
Cerca de un imán superconductor	50,000
Cerca de un electroimán grande	10,000
Línea de alta tensión de 500KV	200
Línea de alta tensión de 230KV	150
Imán pequeño de barra	100
Superficie de la tierra	1
Cerca de luces fluorescentes	0.04
Cerca de un monitor de computadora	0.014

Tabla 6.- Magnitudes de campos magnéticos [7,24].

Las magnitudes de campo magnético para las líneas de transmisión eléctrica que se presentan en la tabla 5 son menores en comparación con las magnitudes de campo magnético presentados en la tabla 6. Esto puede deberse a la distancia a la que la fuente de campo magnético se encuentra del punto de medición.

Para proporcionar una idea más clara del tipo de fuente de campo magnético se muestran en la figura 18 y 19 los tipos de torres de transmisión eléctrica que se encuentran instaladas en el DDV.



Figura 18.- Tipos de torres de transmisión eléctrica en el DDV bajo estudio.

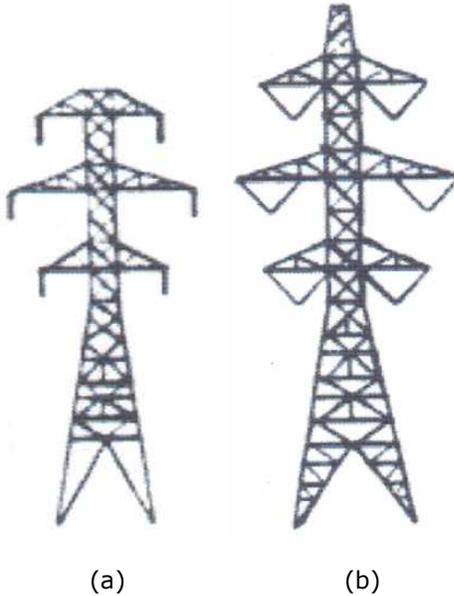


Figura 19.-Esquema de las torres de transmisión eléctrica instaladas en el DDV.

La torre (a) trabaja con un voltaje de transmisión de 230KV y genera un campo magnético de 150 G. La torre (b) trabaja con un voltaje de transmisión 500KV y genera un campo magnético de 200 G.

3.2 Evaluación de potenciales DC, potenciales AC y densidades de corriente

Uno de los parámetros más importantes en la medición y estudio de los potenciales y las densidades de corriente es la resistividad del suelo, la tabla 7 presenta los valores de resistividad para el suelo donde se encuentra alojado el ducto de PEMEX y el prototipo experimental respectivamente.

Tipo de suelo	Resistividad promedio (Ω -cm)
Arcilloso para el kilómetro 5.5	2400[s]
Arcilloso para el kilómetro 6	942[s]
Arena	1000000

Tabla 7.- Resistividad de suelos.

La resistividad del suelo presenta valores muy diferentes y esto se debe a la naturaleza del suelo. La resistividad promedio se toma del promedio de la resistividad del suelo seco y la del suelo húmedo, ya que el suelo puede estar seco en su superficie, pero el suelo en contacto con el ducto puede estar húmedo. Las magnitudes de resistividad de suelo se deben, como se mencionó en el capítulo 1, a la naturaleza de cada suelo. La arena a diferencia de las arcillas tienen una baja retención de la humedad, esto se debe a que tienen una alta precolación. Por lo tanto, esta característica tiene influencia sobre la agresividad del medio y la conductividad de los suelos.

3.2.1 Mediciones a condiciones para el ducto de PEMEX en el DDV

La tabla 8 muestra los resultados de potencial DC y AC obtenidos en el ducto de PEMEX alojado en el DDV.

Ubicación del punto de medición en DDV (Km.)	Potencial DC ducto-suelo seco (V)	Potencial DC ducto-suelo húmedo (V)	Potencial AC suelo seco (V)	Potencial AC suelo húmedo (V)
5.5	-1.2	-1.26	2.577	1.93
6	-1.81	-1.89	1.105	1.19

Tabla 8.- Potencial DC y AC en el ducto de PEMEX alojado en el DDV.

Es importante notar que en el kilómetro 6 el ducto se encuentra sobreprotegido.

La tabla 9 muestra los resultados de densidad de corriente AC y DC obtenidos en el ducto de PEMEX alojado en el DDV.

Ubicación del punto de medición en DDV (Km.)	Densidad de corriente DC suelo seco (A/m ²)	Densidad de corriente DC suelo húmedo (A/m ²)	Densidad de corriente AC suelo seco (A/m ²)	Densidad de corriente AC suelo húmedo (A/m ²)
5.5	0.964	1.152	5.573	21.415
6	2.902	3.473	5.971	13.204

Tabla 9.- Densidad de corriente DC y AC en el ducto de PEMEX alojado en el DDV.

Los valores de densidad de corriente se obtuvieron a partir de los resultados de la ecuación 11 [23].

3.2.2 Evaluación del prototipo experimental en el DDV

Los resultados que a continuación se presentan para el prototipo experimental se realizaron sólo en el kilómetro 5.5 del DDV, ya que en este lugar el campo magnético es más intenso en comparación del kilómetro 6.

La tabla 10 presenta los resultados obtenidos de potencial DC y AC en el DDV para el prototipo experimental.

Ubicación del punto de medición en DDV (Km.)	Potencial de PC ducto-suelo DC (V)	Potencial AC sin caja de Faraday (V)	Potencial AC con caja de Faraday (V)
5.5	-1.2	0.50	0.154

Tabla 10.- Potencial DC y AC para el ducto alojado la caja de acrílico.

El potencial AC presenta una disminución en su valor cuando se coloca la caja de Faraday sobre el prototipo experimental.

La tabla 11 presenta los resultados obtenidos de densidad de corriente DC y AC en el DDV para el prototipo experimental.

Ubicación del punto de medición en DDV (Km.)	Potencial de PC ducto-suelo DC (V)	Densidad de corriente DC sin Faraday (A/m ²)	Densidad de corriente DC con Faraday (A/m ²)	Densidad de corriente AC sin Faraday (A/m ²)	Densidad de corriente AC con Faraday (A/m ²)
5.5	-1.2	1.142	0.786	0.002546	0.000784

Tabla 11.- Densidad de corriente DC y AC para el ducto alojado la caja de acrílico.

Los valores de densidad de corriente se obtuvieron a partir de los resultados de la ecuación 11 [23].

3.2.3 Densidades de corriente graficadas en el esquema del criterio de protección catódica propuesto

A partir de los valores de las tablas 9 y 11 en la figura 20 se presentan los resultados de densidad de corriente DC y AC obtenidos durante la experimentación en el DDV sobre el diagrama del nuevo criterio de protección catódica.

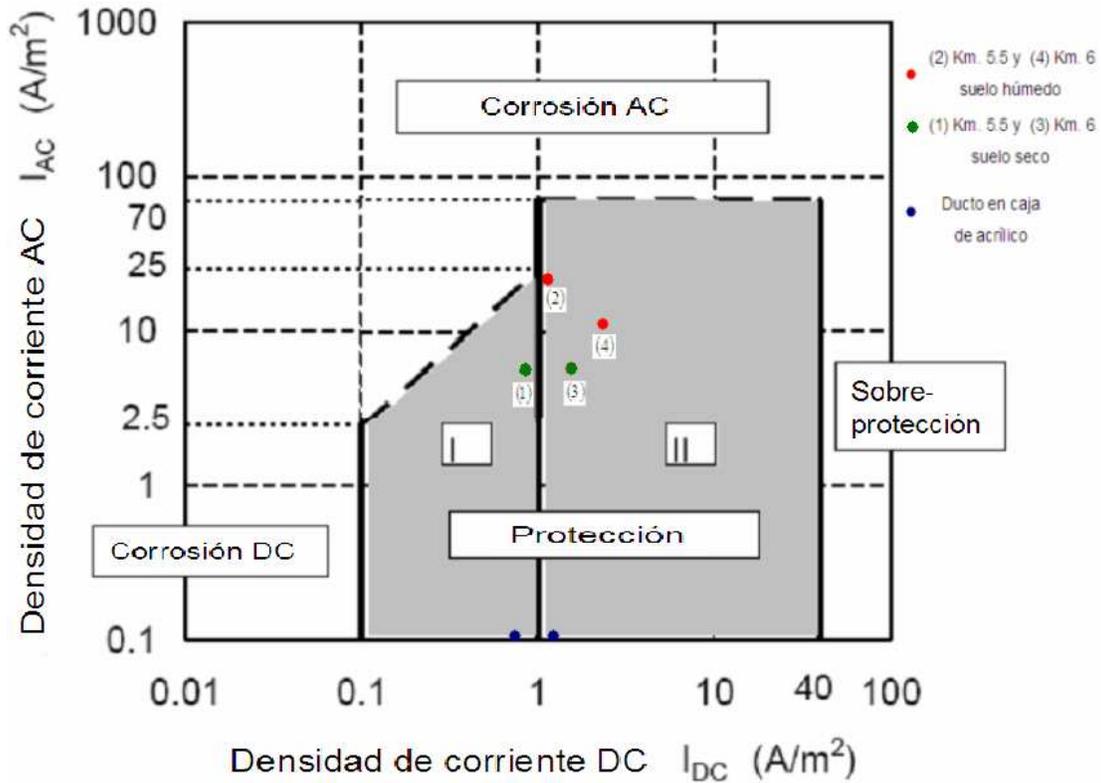


Figura 20.- Resultados experimentales en el nuevo criterio de protección catódica.

Es importante notar que los resultados graficados en el criterio de protección catódica presentan una diferencia de valores considerable, ya que el ducto de PEMEX estaba alojado en un suelo arcilloso y el prototipo experimental contaba con arena.

4. Análisis de resultados

Desde un punto de vista de ingeniería eléctrica y operación, las líneas de transmisión eléctricas no deberían generar campo magnético ya que la señal se envía desfasada provocando que las líneas de campo magnético se anulen entre sí, obteniendo una magnitud de campo magnético cercana a cero, pero en la realidad el campo magnético existe. Las magnitudes de campo magnético medido en los dos puntos del DDV, kilómetro 5.5 y 6, así como la magnitud del campo magnético en el laboratorio fueron presentados en la tabla 5. Posteriormente la tabla 6 presenta diferentes fuentes de campo magnético con sus respectivas magnitudes. En el laboratorio la magnitud del campo magnético se debe a las condiciones normales de operación del laboratorio y dicha interferencia es generada por 8 balastras de las lámparas fluorescentes y 5 monitores de computadoras encendidas. El valor obtenido es normal para estas condiciones de operación del laboratorio, ya que los equipos electrodomésticos como el monitor de la computadora y las lámparas fluorescentes presentan campos magnéticos de 0.014 G y 0.04 G a una distancia cercana [24]. Como se muestra en la tabla 6 las magnitudes de campo magnético en líneas de transmisión eléctrica son mayores a 100 Gauss, esto se debe a que la intensidad del campo magnético es una función de la cantidad de corriente eléctrica que pasa a través de un conductor eléctrico, por esta razón las magnitudes de los campos magnéticos son diferentes en condiciones de laboratorio y en campo. Los voltajes de las líneas de transmisión que se encuentran en el DDV son iguales a los presentados en la tabla 6 (230 y 500 KV) de acuerdo al tipo de torre de transmisión eléctrica que se encuentra en el DDV, pero las magnitudes de campo magnético medidas en campo son menores. Esto se debe a que en el kilómetro 5.5 del DDV el ducto se encuentra a 25m aproximadamente y en el kilómetro 6 a 100m aproximadamente. Esta distancia se ve reflejada en la magnitud del campo magnético en los dos puntos de medición. Si el ducto se encontrase a una menor distancia de las líneas de transmisión eléctrica o por debajo de éstas, la magnitud del campo magnético se vería incrementada incluso a valores muy cercanos a los reportados en la literatura. La mayor intensidad de campo magnético fue registrada en el kilómetro 5.5, en donde las líneas de transmisión eléctrica se encuentran a una menor distancia. Las condiciones ambientales también son un factor importante en la medición de la magnitud de campo magnético ya que cuando se

realizaron las mediciones con humedad en el ambiente las magnitudes registraron un incremento en comparación con las magnitudes registradas en condiciones de ambiente seco.

El ducto de PEMEX alojado en el DDV presenta valores de potencial DC ducto-suelo se encuentran dentro del criterio de protección catódica para la condición de suelo seco y húmedo respectivamente, como se muestra en la figura 17, con esto se corrobora que el ducto de PEMEX se encuentra protegido. A fin de conocer los valores de voltaje AC y el efecto de la corrosión por AC externa, en el kilómetro 5.5 y 6 se realizaron mediciones de los valores de voltaje AC. En el kilómetro 5.5 se presentan los voltajes AC de mayor valor en comparación con los valores de voltaje AC en el kilómetro 6. Esta disminución en el voltaje AC para el kilómetro 6 podría deberse a la resistividad del suelo, ya que en éste la resistividad es menor que en el kilómetro 5.5 por lo tanto, las corrientes parásitas del ducto se disiparán mejor en el kilómetro 6 obteniendo con esto un menor voltaje AC. Sin embargo, es importante y no se debe olvidar el efecto que se presenta debido a la distancia a la que se encuentra la fuente de campo magnético. Para el kilómetro 5.5 la fuente de campo magnético se encuentra a una menor distancia que en el kilómetro 6 por lo tanto en el kilómetro 5.5 se inducirá una mayor corriente AC en el ducto generando y con esto un mayor voltaje AC. Es importante hacer notar que a pesar de que el suelo se encuentre húmedo y la resistividad del suelo cambia poco de un punto a otro, es posible mencionar que la resistividad del suelo no tiene un efecto trascendental para este caso, aún cuando esta variable es importante, ya que en el kilómetro 5.5 con suelo húmedo el valor de voltaje AC continúa siendo mayor al valor de voltaje AC del kilómetro 6. La magnitud de campo magnético es mayor cuando el ambiente se encuentra húmedo que cuando se encuentra seco. Contrario a lo anterior, cuando el ambiente es seco el voltaje AC es mayor. Esto se debe a que el suelo, cuando se encuentra seco, disminuye su conductividad impidiendo que las corrientes que se inducen en el ducto se disipen en el suelo y este efecto se ve reflejado en un aumento del voltaje AC. Sin embargo, para este caso no existe diferencia considerable en las magnitudes de resistividad de suelo. Por lo tanto las magnitudes de los voltajes AC son influidos directamente por el campo magnético y por la distancia a la que se encuentra la fuente de campo magnético, recordando que en el kilómetro 5.5 la fuente de campo magnético (líneas de transmisión eléctricas) se encuentra a una menor distancia dando como resultado voltaje AC

mayor que en el kilómetro 6. Existen muchas variables que deben tomarse en cuenta ya que afectan de manera directa el problema de la corrosión por AC como la resistividad eléctrica, pero el voltaje AC se ve influenciado directamente por la distancia a la que se encuentra la fuente de campo magnético y la intensidad de éste campo magnético.

Los valores que se presentan en la tabla 9 muestran las densidades de corriente tanto DC como AC para el ducto de PEMEX en el kilómetro 5.5 y en el kilómetro 6. Los valores de densidad de corriente DC para los puntos de medición se encuentran dentro de la zona de protección de acuerdo con la figura 17, comprobando una vez más que el ducto se encuentra protegido catódicamente. La densidad de corriente AC que se obtuvo a partir de la ecuación 11 [23] presentan diferencias en los valores esperados para condiciones de suelo seco y de suelo húmedo. Para las condiciones de suelo seco, la densidad de corriente en el kilómetro 5.5 es ligeramente menor que en el kilómetro 6. Es importante recordar que en kilómetro 5.5 la resistividad del suelo es mayor que en el kilómetro 6 pero las resistividades no encuentran diferencias significativas entre sí. Se esperaría que la densidad de corriente AC en el kilómetro 5.5 fuese mayor a la del kilómetro 6, ya que en el kilómetro 5.5 la fuente de campo magnético y la magnitud de este campo son mayores que en el kilómetro 6, pero de acuerdo con los resultados la densidad de corriente AC para el kilómetro 6 es ligeramente mayor. Esto se debe a que la resistividad del suelo, en condiciones de suelo seco, impide disipar las corrientes parásitas del ducto teniendo un efecto en la densidad de corriente AC aún cuando la fuente de campo magnético se encuentre a una distancia menor. En caso contrario, la densidad de corriente AC en condiciones de suelo húmedo presenta valores más grandes en el kilómetro 5.5 en comparación con la densidad de corriente AC en el kilómetro 6. Esto se debe a que, a pesar que la resistividad del suelo no presenta diferencias significativas en sus magnitudes como ya se ha mencionado anteriormente, el suelo húmedo aumenta su conductividad disipando una mayor cantidad de corrientes parásitas y en combinación con un campo magnético de mayor magnitud y la cercanía de la fuente de campo magnético se presentan densidades de corrientes más grandes para los puntos en los cuales se presente esta combinación de factores. Esta combinación de factores se presenta en el kilómetro 5.5 haciendo que en este punto los valores

de densidad de corriente AC sean mayores. Para el caso de la densidad de corriente AC, al igual que para el caso del voltaje AC, las variables con mayor importancia son las condiciones del suelo ya que la resistividad del suelo es una función de esas condiciones, la distancia a la que se encuentra la fuente de campo magnético y la magnitud de este campo.

Como se mencionó en el capítulo 3, las mediciones realizadas para el prototipo experimental sólo se realizaron pruebas para el prototipo experimental en el kilómetro 5.5 del DDV ya que en este punto la fuente de campo magnético se encuentra a una menor distancia y la magnitud del campo magnético es mayor. Cabe mencionar que el prototipo experimental se evaluó con un sólo tipo de suelo, que para este caso fue arena. Con esto se están controlando las variables de magnitud de campo magnético, la distancia de la fuente de campo magnético y la resistividad del suelo. Los resultados obtenidos de voltaje DC y AC para el prototipo experimental se presentan en la tabla 10. El voltaje DC se le impuso al prototipo experimental para llevarlo a una zona de protección catódica adecuado. Los voltajes AC presentan cambios en su valor con respecto al tipo de medición realizada. La medición para el prototipo experimental realizada sin la caja de Faraday presentan valores de voltaje AC mayores en comparación a los valores obtenidos cuando la medición en el prototipo experimental se realiza con caja de Faraday. Por lo tanto, al colocar el prototipo experimental en la caja de Faraday las interferencias que se generan debidas al campo magnético son disminuidas. Estos resultados demuestran la existencia de corrientes parásitas generadas por el campo magnético de las líneas de transmisión eléctrica. Los valores de densidad de corriente DC que se presentan en la tabla 11 muestran nuevamente que el prototipo experimental se encuentra en una zona de protección de acuerdo con el criterio de protección catódica propuesto. Los resultados de la densidad de corriente AC son los esperados, ya que la mayor densidad de corriente se presenta cuando la prueba se realiza sin la caja de Faraday que elimine la interferencia. Los valores de densidad de corriente de AC son muy bajos ya que la arena es un suelo con baja conductividad y las corrientes parásitas no son disipadas.

La figura 20 muestra el nuevo criterio de protección catódica propuesto [22] con los resultados experimentales obtenidos del ducto de PEMEX alojado en el DDV. Como se puede observar, los puntos graficados dentro del criterio se encuentran en la zona de protección. Estos resultados demuestran la probable existencia de corrosión por AC pero dichos valores no exceden los límites donde se presenta corrosión por AC en el momento de las mediciones. No hay que olvidar que el campo magnético no es constante y existe la posibilidad de encontrar valores de mayor intensidad que se verán reflejado en un aumento del potencial AC desplazando al ducto hacia una zona de corrosión por AC, así como una disminución en la densidad de corriente de protección catódica podría dejar al ducto en zona de corrosión por AC. Es importante tomar en cuenta otras fuentes de campo magnético que pueden inducir corrientes, esos factores que pueden influenciar en la cantidad de corriente inducida son los movimientos telúricos y las tormentas eléctricas que se puedan presentar en esta zona. Lo anterior se menciona ya que la existencia de daño en el recubrimiento es una de las características de corrosión por AC.

5. Conclusiones

- La distancia de la fuente de campo magnético al punto de medición es una de las variables importantes de este problema, ya que a partir de esta distancia las magnitudes de campo magnético pueden aumentar o disminuir generando cambios que afecten el voltaje AC y en la densidad de corriente AC.
- El aumento en la magnitud del campo magnético genera un aumento en el voltaje AC aun cuando el suelo presente una alta resistividad.
- Las variables como la magnitud de campo magnético, la distancia de la fuente magnética y la resistividad del suelo son las que determinan la magnitud de los valores de densidad de corriente AC.
- Los valores de voltaje AC medidos con la caja de Faraday presentaron una disminución considerable en comparación con los voltajes AC medidos sin caja de Faraday en el DDV. Con esto se demuestra la existencia de corrientes inducidas por AC presentes en el ducto debidas al campo magnético generado por las líneas de transmisión.
- De acuerdo con el nuevo criterio de protección catódica propuesto [22] y con los resultados obtenidos experimentalmente del ducto de PEMEX alojado en el DDV, no existe corrosión por AC en los puntos analizados en el DDV. Es importante señalar que existen otros factores pueden influenciar el voltaje AC teniendo como consecuencia un aumento en la densidad de corriente AC y en algunos casos desplazar los valores a zonas donde el ducto pueda presentar corrosión por AC.
- El nuevo criterio de protección catódica propuesto permitirá al personal encargado de operación de ductos contar con una herramienta adicional en la toma de decisiones. Ya que se contará con dos criterios para determinar la integridad de un ducto.
- Para las zonas donde se presuma la existencia de campos magnéticos que puedan inducir corrientes parásitas se proponer utilizar la metodología presentada en esta tesis para la prevención y control de la corrosión por AC.

6. Bibliografía

- [1] www.fortunecity.es/expertos/profesor/171/suelos.html
- [2] <http://edafologia.ugr.es/clasol/cindice.htm>
- [3] Morgan, J., *Cathodic protection*, NACE International, Second Edition, January 1993
- [4] Genescá, J., *Más allá de la herrumbre*, Fondo de cultura económica, México, 1985.
- [5] Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Informe técnico final "Evaluación y diagnóstico de la protección catódica en el LPG ducto de 12" en el derecho de vía de Venta de Carpio – San Juan Ixhuatepec"*, Junio 2004.
- [6] Manríquez, Federico, *Fundamentos, medición y control de la corrosión*, Capacitación y pruebas no destructivas de México S.C., Noviembre 2005.
- [7] Peabody, A. W. *Control of pipeline corrosion*, NACE International, Second Edition, 2001.
- [8] Kruger, Jerome, *Electrochemistry of corrosion*, The Johns Hopkins University Baltimore, April 2001.
- [9] Resnick, R. Halliday, D. Krane, K., *Física Vol. 2 Electromagnetismo*, Tercera Edición en Español, Sexta Reimpresión, 1999.
- [10] Fontana, Mars G., Greene, Norbert D., *Corrosion Engineering*, Editorial McGraw-Hill, segunda edición, 1967.
- [11] American Society of Metals. *ASM Handbook Vol. 13. Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection*. 2003.
- [12] Leis, B. N., Forte, T. P., *Managing the Integrity of Early pipelines crack growth analysis and revalidation intervals*, BATTELLE, February 2005.
- [13] Jones, Denny A., *Principles and prevention of corrosion*, Maxwell MacMillan International Editors, 1992.
- [14] ASTM Standard Test Method. *Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method*. American Society for Testing and Materials, 2001.
- [15] Beavers, John A., Thompson, Neil G., *External corrosion of oil and natural gas pipelines*. ASM International, 2006.
- [16] NACE Standard, *RP-01-96 Criteria for CP of underground or submerged pipelines*, NACE International, 1996 (Revision).
- [17] Osella, A., Favetto, A., López, E., *Currents induced by geomagnetic storm on buried pipelines as a cause of corrosion*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 38, page 219-233, 1998.

- [18] Osella, A., Favetto, A., *Effects of soil resistivity on currents induced on pipeline*, Journal of Applied Geophysics, Vol. 44, page 303-312, 2000.
- [19] Pirjola, R., Viljanen, A., Pulkkinen, A., Amm, O., *Space weather risk in power systems and pipelines*, Phys. Chem. Earth, Vol. 25, N° 4, page 333-337, 2000.
- [20] Boteler, D. H., *Geomagnetic effects on the pipe-to-soil potentials of a continental pipeline*, Adv. Space Res. Vol. 26 N° 1, page 15-20, 2000.
- [21] Gummow, R. A., P. Eng, *GIC effects on pipelines corrosion and corrosion control system*, Journal of Atmospheric and solar-terrestrial Physics, Vol. 64, page 1755-1764, 2002.
- [22] Hosokawa, Y., *Overcoming the new threat to pipeline integrity – AC corrosion assessment and its mitigation*, 23rd World Gas Conference, Amsterdam 2006.
- [23] Walkelin, R. G., Gummow, R. A., Segall, S. M., *AC Corrosion- Case histories, test procedures and mitigation*, Corrosion 98, Paper No. 565.
- [24] www.nachi.org/emfs.htm

Apéndice I

Aplicación de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica a bajas frecuencias al prototipo experimental para la evaluación de la velocidad de corrosión en el DDV

A continuación se presentan las gráficas obtenidas a partir de la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica en función del tiempo para prototipo experimental a cuatro diferentes frecuencias como se menciona en el capítulo 2. Estos valores presentan el módulo de la impedancia del prototipo experimental, fueron obtenidos en el kilómetro 5.5 de DDV ya que en este punto la fuente de campo magnético se encuentra a una menor distancia. A su vez fue evaluada la impedancia simulando una falla en el recubrimiento mediante la conexión en serie de cupones al prototipo experimental. El efecto de conectar el cupón en serie al prototipo experimental se ve reflejado en las gráficas como una disminución rápida en los valores de módulo de impedancia.

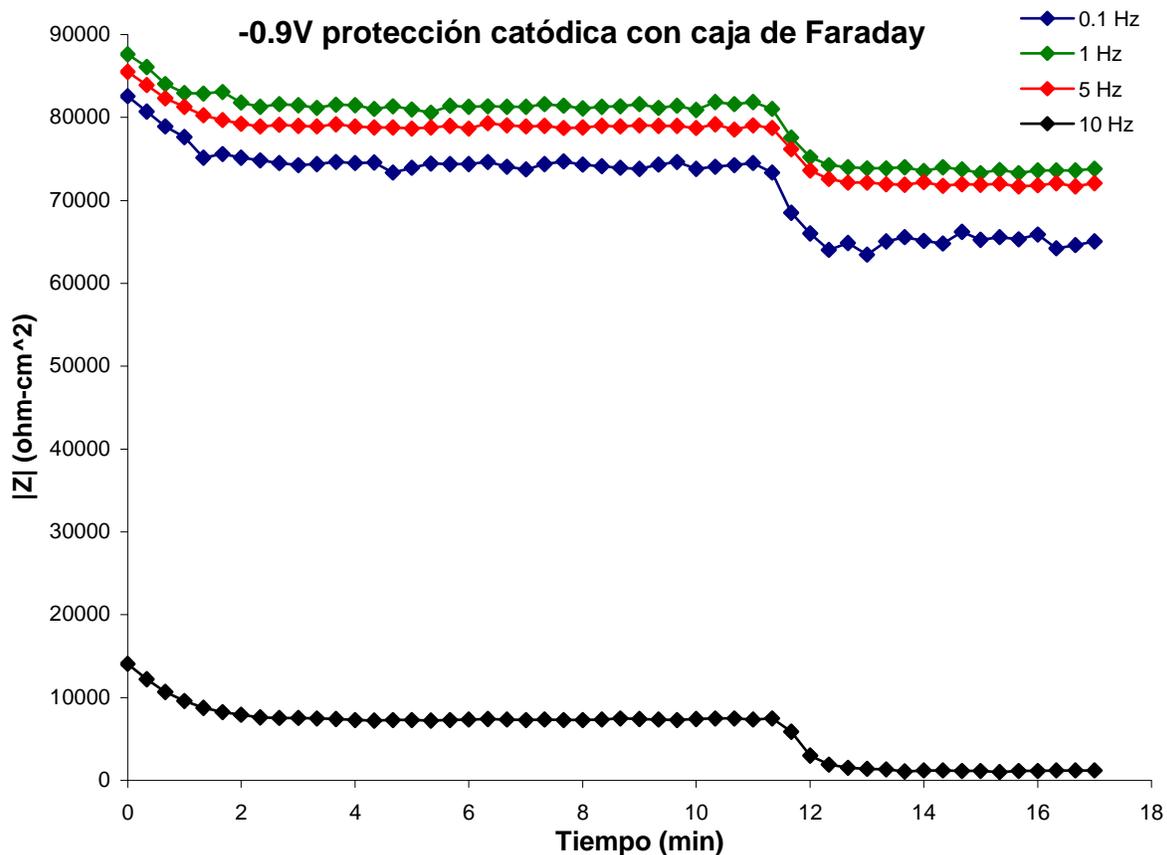


Figura 21.- Tendencia del módulo de la impedancia en función del tiempo.

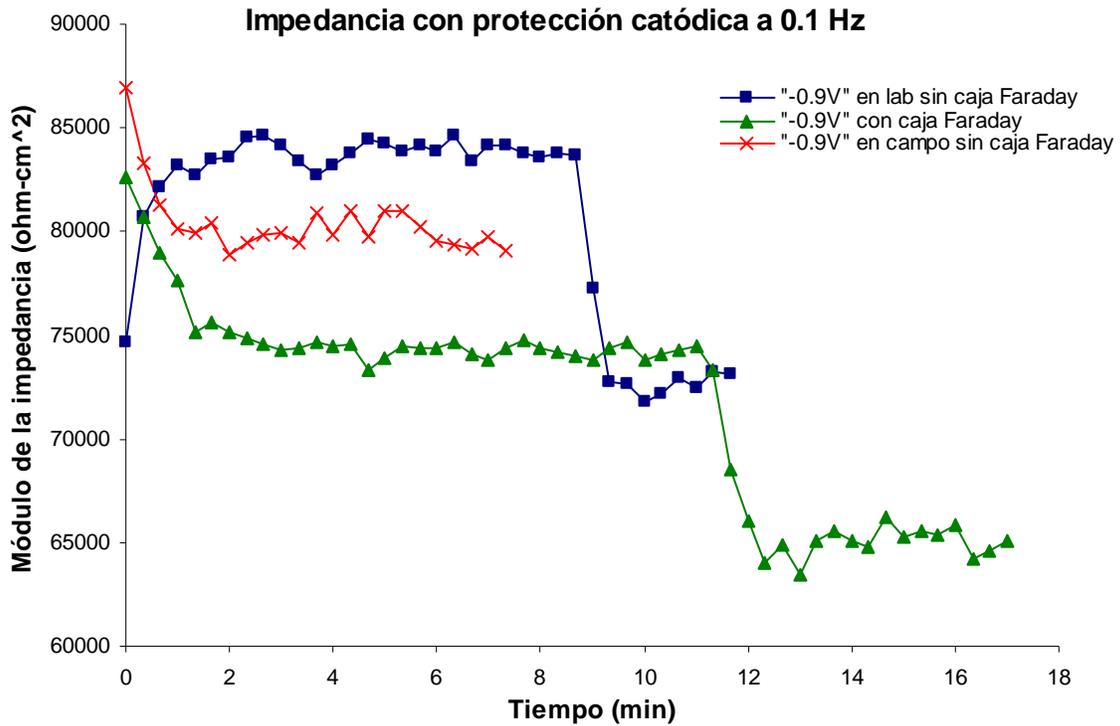


Figura 22.- Curvas de impedancia en función del tiempo para una frecuencia de 0.1Hz a un potencial de -0.9V vs. CuSO₄.

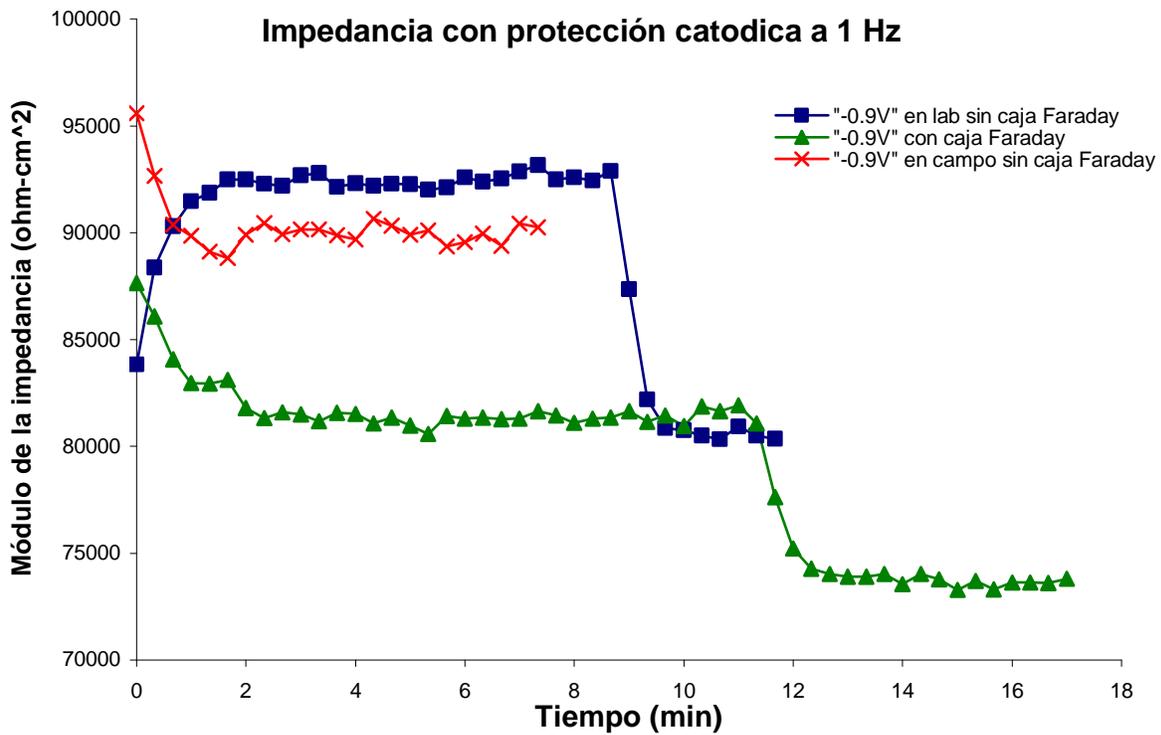


Figura 23.- Curvas de impedancia en función del tiempo para una frecuencia de 1Hz a un potencial de -0.9V vs. CuSO₄.

Impedancia con protección catódica a 5 Hz

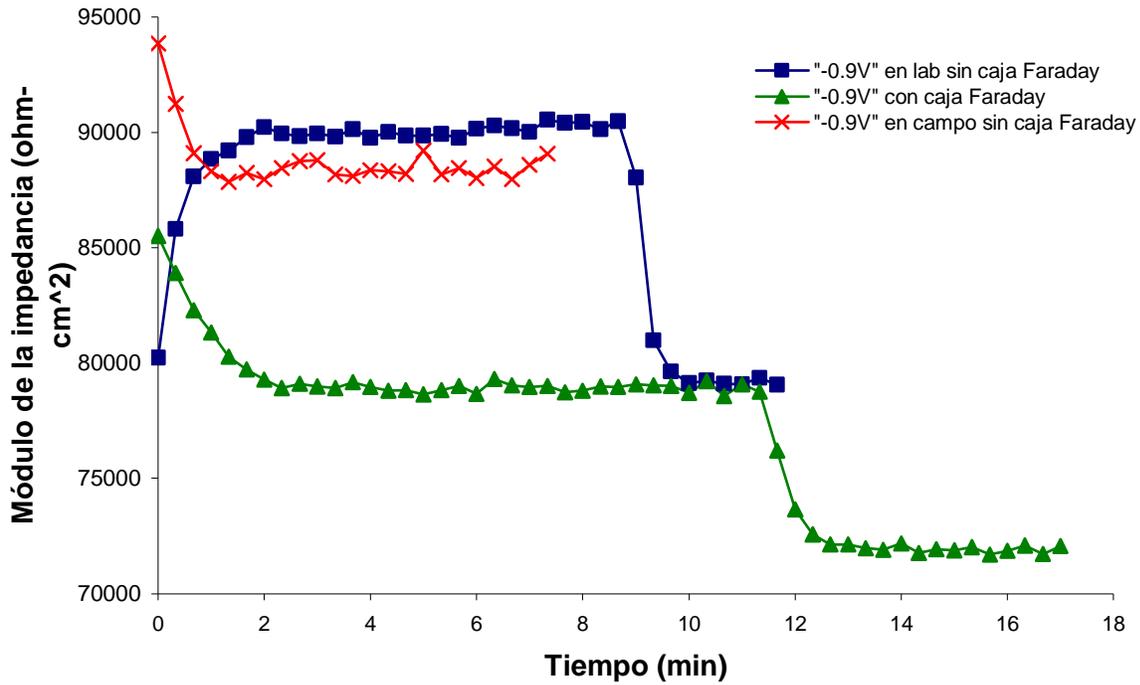


Figura 24.- Curvas de impedancia en función del tiempo para una frecuencia de 5Hz a un potencial de -0.9V vs. CuSO_4 .

Impedancia con protección catódica a 10 Hz

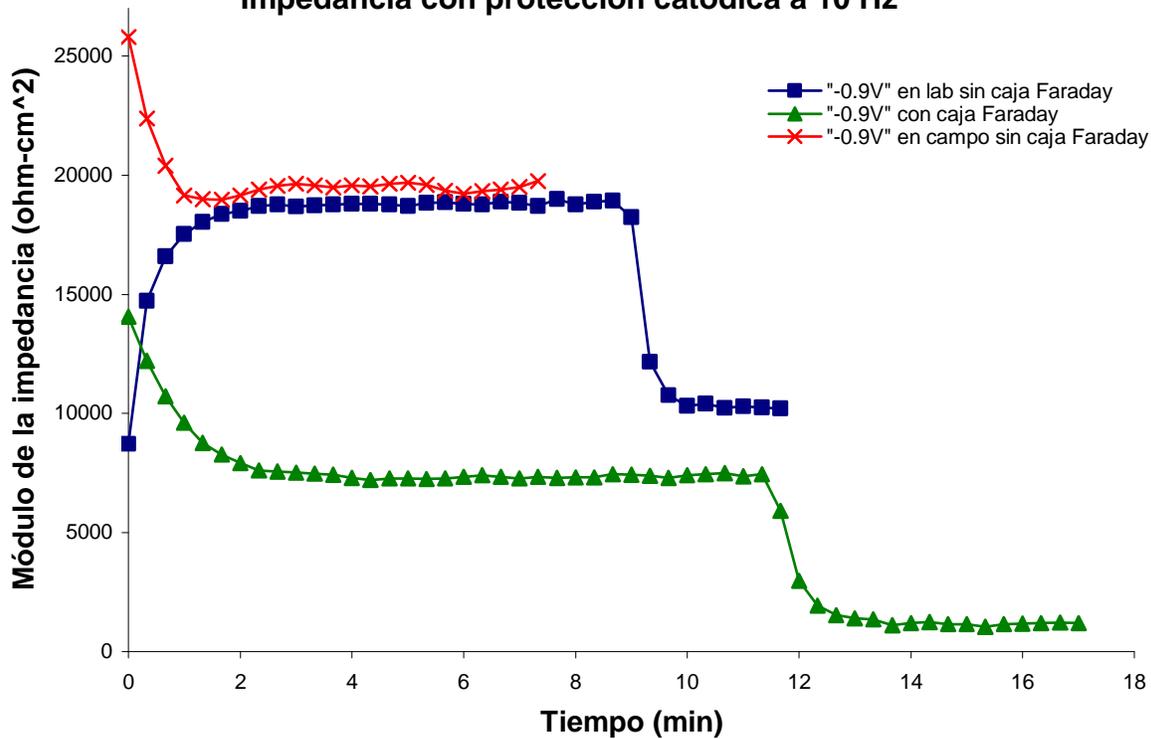


Figura 26.- Curvas de impedancia en función del tiempo para una frecuencia de 10Hz a un potencial de -0.9V vs. CuSO_4 .

A continuación se presenta el diagrama de Nyquist en la zona de baja frecuencia generados a partir de los experimentos realizados en el prototipo experimental.

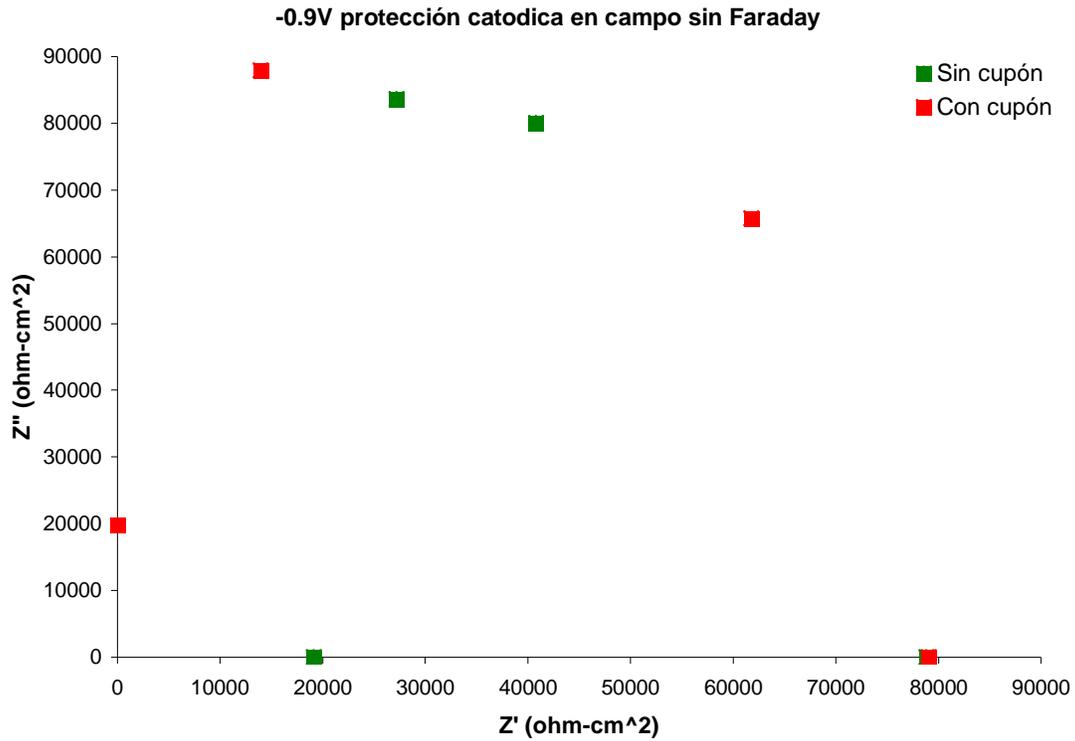


Figura 25.- Diagrama de Nyquist para los experimentos realizados en campo y sin caja de Faraday

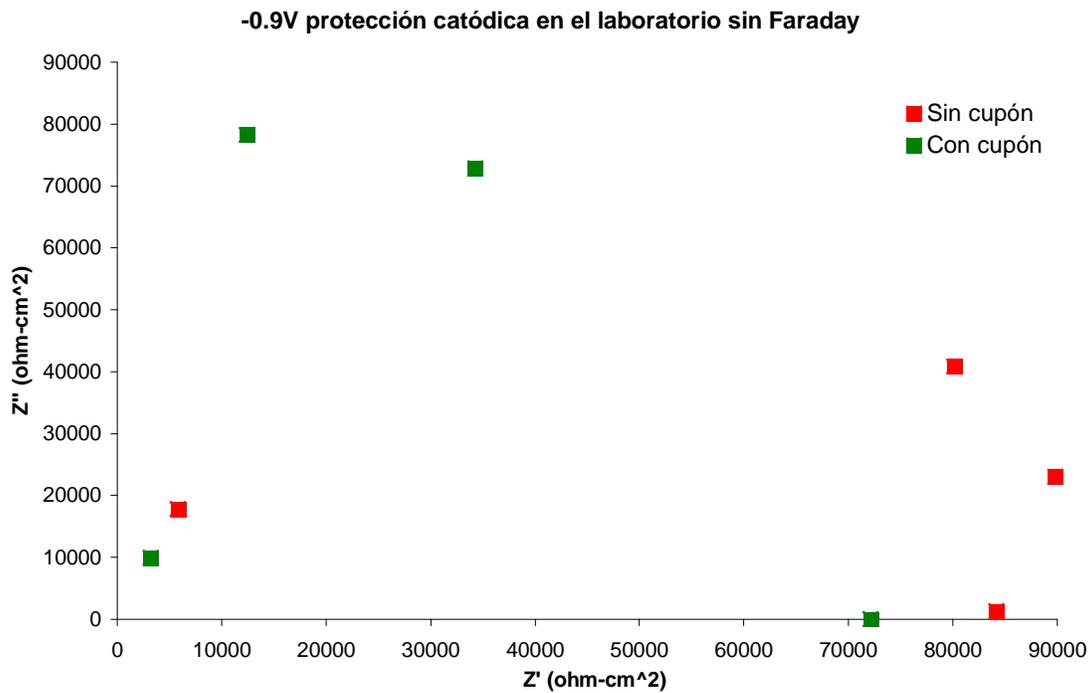


Figura 26.- Diagrama de Nyquist para los experimentos realizados en el laboratorio y sin caja de Faraday

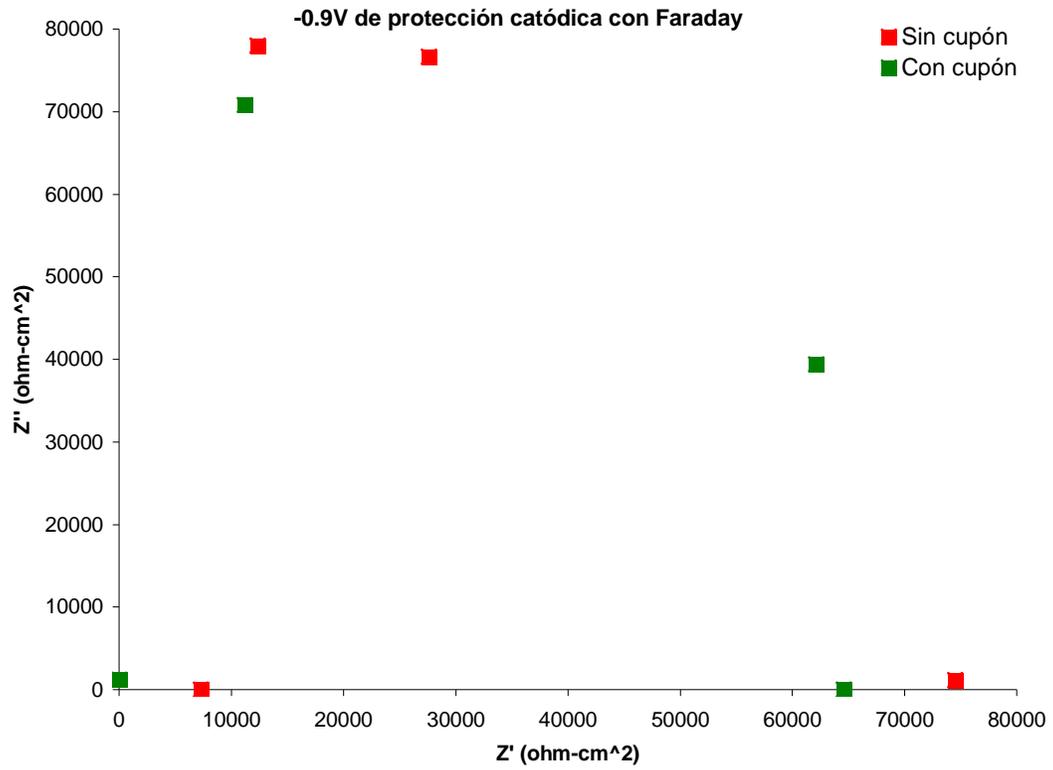


Figura 27.- Diagrama de Nyquist para los experimentos realizados en el laboratorio y con caja de Faraday