



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA

"AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA INDUSTRIA PETROLERA
PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN EXTERNA EN
SISTEMAS DE DUCTOS"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O Q U Í M I C O

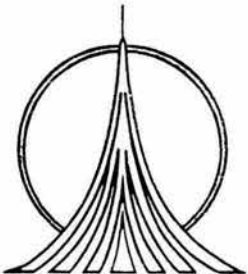
P R E S E N T A :

JOSÉ ARNULFO AGUILAR CHÁVEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. RENÉ DE LA MORA MEDINA

MÉXICO, D. F.

2004





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA
DE INGENIERIA QUIMICA**

OFICIO: FESZ/JCIQ/010/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: AGUILAR CHÁVEZ JOSÉ ARNULFO
P r e s e n t e.

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

Presidente:	M. en I. Alejandro Rogel Ramírez
Vocal:	I.Q. René de la Mora Medina
Secretario:	I.Q.I. Rosario Tapia Aguilar
Suplente:	I.Q. Angel Gómez González
Suplente:	I.Q. Julio Félix Martínez Reyes

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”

México, D. F., 12 de Marzo de 2004

EL JEFE DE LA CARRERA

M. en C. ANDRÉS AQUINO CANCHOLA

AGRADECIMIENTOS.

A Dios por haberme permitido existir

A mi madre (q.e.p.d.) por darme la vida, por su amor, comprensión y haberme guiado con sus sabias palabras hacia el camino en el cual me encuentro, y aunque ya no esté conmigo siempre la llevaré en mi corazón y a quien dedico este trabajo.

José Arnulfo Aguilar Chávez

A mis hermanos: Rubén, Teresa, Anicelo, Leticia, Francisco y Araceli por su gran amor, comprensión, apoyo y haber creído en mí durante mi carrera y siempre.

A mis sobrinos Rubén, Arumai, Edzgar, Cecilia, Eduardo, Exon, Francisco, Edwin y Eric.

A la Familia Segura por haberme albergado como parte de ellos con su cariño y apoyo incondicional en momentos de alegría y de tristeza.

A la Familia Reyes Chorle y por su cariño, amistad y apoyo.

A Vialriz por su gran amor y darme la oportunidad de compartir momentos felices con ella, así como el apoyo mutuo en los momentos difíciles y ser participe en la elaboración de este trabajo.

José Arnulfo Aguilar Chávez

Al Ing. René de la Mora Medina por haber confiado en mi dándome la oportunidad de crecer profesionalmente, compartir sus conocimientos, su apoyo, amistad y dirigir este trabajo.

Al Ing. Julio Félix Martínez, por su apoyo y amistad.

Al Ing. Ángel Gómez González por sus consejos y apoyo.

Al M. C. Alejandro Rogel por haber compartido sus conocimientos y experiencia durante mi estancia en la Facultad.

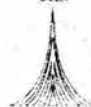
A la Ing. Rosario Tapia Aguilar por su participación.

A mis Profesores de la Fes Zaragoza por compartir sus conocimientos y formarme como un profesionalista en busca del éxito.

A todos mis compañeros de trabajo por su amistad, sus palabras de apoyo y conocimientos.

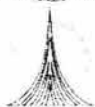
A las Autoridades de la UNAM por su ayuda durante el proceso de Titulación

José Arnulfo Aguilar Chávez



ÍNDICE

CONTENIDO	PAGINA
INTRODUCCIÓN	
Objetivos.	1
Planteamientos del Problema.	1
CAPÍTULO I. GENERALIDADES.	
I.1 Conductores	4
I.1.1 Conductores de primer orden	5
I.1.1 Conductores de segundo orden.	5
I.1.1 Conductores mixtos o de tercer orden.	5
I.2 Aislantes.	6
I.3 Carga y corriente.	6
I.4 Unidad de diferencia de potencial. el Volt.	7
I.5 Potencial eléctrico	7
I.6 Fuerza electromotriz.	8
I.7 Resistencia	8
I.8 Ley de ohm	9
I.9 Resistores en serie	10
I.10 Resistores en paralelo	11
I.11 Importancia práctica de la resistencia interna de una celda	12
I.12 Arreglos de celdas	13
I.13 Pérdida o caída de voltaje" cuando una celda produce corriente en un circuito	14
I.14 Resistividad eléctrica.	18



CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO DE LA CORROSIÓN EXTERNA EN DUCTOS.

II.1 Principios de corrosión.	21
II.1.1 ¿Qué es la corrosión?	21
II.1.2 Par Galvánico.	26
II.1.3 Celda Galvánica.	29
II.1.4 Corrosión generalizada	27
II.1.5 Corrosión localizada	30
II.2. Factores que contribuyen a la corrosión externa en ductos.	31
II.2.1 Materiales diferentes.	32
II.2.2 Escoria.	32
II.2.3 Cascarilla de Laminación.	33
II.2.4 Suelos diferentes.	34
II.2.5 Diferencia en contenido de oxígeno.	35
II.2.6. Bacterias.	36
II.2.6.1 Bacterias Sulfato Reductoras.	37
II.2.6.2 Bacterias productoras de ácidos.	38
II.2.7 Impurezas.	38
II.2.9 Regularidades superficiales.	39
II.2.10 Tensiones.	39
II.2.10.1 Corrosión por Corriente Alterna (AC).	39
II.2.10.2 Características de corrosión por Corriente Alterna	40
II.2.11 Diferencia de Concentración	41
II.2.12 Interfase Concreto-Suelo.	41
II.2.13 Corrientes Parásitas.	42
II.2.14 Diseño incorrecto de la protección catódica.	42
II.2.15 Tubería Nueva y Tubería Vieja.	42
II.2.16 Célula Diferencial de Aireación en Cruces de Carreteras.	43
II.2.17 Acero en Concreto.	43
II.2.16.1 Agentes que impiden que el concreto proporcione	44



protección contra la corrosión.

II.2.16.2 Mecanismos de Penetración de cloruros.	47
--	----

CAPÍTULO III. EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

III.1 Breve historia.	52
III.2 Protección Catódica.	54
III.3 Fundamentos de la protección catódica	56
III.4 Propiedades de un material anódico	62
III.5 Características electroquímicas del zinc (Zn), Magnesio (Mg) y aluminio (Al).	64
III.6 Intensidad de la corriente anódica	67
III.7 Protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio.	70
III.7.1 Vida útil de los ánodos	71
III.7.2 Fijación de los ánodos	72
III.7.3 Relleno Backfill.	73
III.7.4 Cálculo del número de ánodos.	74
III.7.5 Aleaciones para ánodos.	74
III.7.6 Ánodos de Zinc.	75
III.7.7 Ánodos de Magnesio.	77
III.7.8 Ánodos de Aluminio	79
III.7.9 Campos de aplicación del Zinc, Aluminio, Magnesio y sus aleaciones como ánodos galvánicos.	80
III.7.10 Ventajas y limitaciones de la protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio.	84
III.8 Sistema de Protección Catódica por corriente impresa.	84



III.8.1 Ánodos para Corriente Impresa.	85
III.8.2 Tipos de ánodos para corriente Impresa.	85
III.8.2.1 Chatarra.	86
III.8.2.2 Grafito Impregnado.	86
III.8.2.3 Hierro – Silicio.	86
III.8.2.4 Aleación de Plomo/Plata.	87
III.8.2.5 Electrodo Bimetalicos de Plomo/Platino.	87
III.8.2.6 Ánodos de Titanio Platinizado.	87
III.8.2.7 Niobio Platinizado-Tantalio Platinizado.	87
III.8.2.8 Aluminio.	88
III.8.2.9 Magnetita.	88
III.8.3 Relleno Especial para ánodos subterráneos de corriente impresa.	88
III.8.4 Tipos de Fuente de Corriente Directa (CD).	89
III.8.5 Cables y Empalmes para sistemas de Protección Catódica.	91
III.8.6 Niveles Aceptables de Protección catódica.	93
III.8.7 Ventajas y Desventajas de los sistemas de Protección catódica por corriente Impresa.	95

CAPÍTULO IV. SELECCIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

IV.1 Selección y diseño.	97
IV.2 Cálculos y Especificaciones de Diseño.	99
IV.2.1 Requerimientos de corriente.	99
IV.2.1.1 Densidad de corriente.	101
IV.2.1.1 Sobreprotección.	102
IV.2.2 Número de ánodos requeridos.	103
IV.2.3 Resistencia de los ánodos.	102
IV.3 Lineamientos normativos para la aplicación de la protección catódica.	105
IV.4 Tipos de camas de ánodos.	107



IV.4.1 Camas de ánodos Remota.	107
IV.3.1.1 Generalidades.	107
IV.3.1.2 Requerimientos de diseño y operación.	108
IV.3.1.3 Pasos a seguir durante el diseño.	109
IV.4.2 Cama de ánodos distribuidos.	113
IV.4.2.1 Generalidades.	113
IV.4.2.2. Consideraciones teóricas.	115
IV.4.2.3. Factores de distorsión.	116
IV.4.2.4. Pruebas en terrenos de Resistividad variable.	116
IV.4.2.5. Ubicación de los ánodos en un sistema de ánodos distribuidos.	118
IV.4.2.6. Circuito simple. Alimentación simple.	118
IV.4.2.7. Circuito simple. Alimentación doble.	119
IV.4.2.8. Circuito múltiple. Áreas separadas.	120
IV.4.2.9. Circuito múltiple. Áreas concurrentes.	121
IV.4.3. Camas de ánodos profundas.	122
IV.4.3.1 Generalidades.	122
IV.4.3.2. Uso de camas de ánodos profundas.	122
IV.4.3.3. Función de cama de ánodos profunda en relación a distintos tipos de suelo.	123
IV.3.3.3.1 Suelos Uniformes.	123
IV.3.3.3.2 Suelo de alta resistividad cerca de la superficie.	124
IV.3.3.3.3 Suelo de baja resistividad cerca de la superficie, alta resistividad por debajo.	126
IV.4.3.4 Perfil de Potencial a lo largo de una tubería protegida por una cama de ánodos profunda.	129
IV.4.3.5 Interferencias relacionadas con camas de ánodos Profundas.	130



IV.4.4. Sistemas de Combinados.	130
IV.5 Consideraciones al diseñar un sistema de Protección catódica.	131
IV.6. Pasos a seguir para el diseño de una cama de ánodos distribuidos.	137
IV.7 Recubrimientos.	138
IV.7.1 Recubrimientos ricos en Zinc.	139
IV.7.2 Pinturas inhibidoras Orgánicas.	139
IV.7.3 Capas.	139
IV.7.4 Recubrimientos térmicos.	141
IV.7.5 Termoplásticos o Solventes depositados por el tipo de recubrimiento.	141
IV.7.6 Criterios para la selección del recubrimiento.	141
IV.7.6.1 La selección del recubrimiento.	142
IV.7.7 Almacenaje, manejo y mezclas de materiales.	143
IV.7.8 Equipo de Aplicación.	144
IV.7.9 Uso de Sistemas de Recubrimientos Típicos.	144
IV.7.10 Recubrimientos para los equipos de construcción y tuberías localizados en plataformas.	145
IV.7.11 Problemas especiales en los programas de recubrimiento en costa.	145

CAPÍTULO V. NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

V.1 Requerimientos para la implementación de los sistemas automatizados de protección catódica.	149
V.2 Beneficios de implementar estos sistemas.	151
V.3 Corrosión -Control y Prevención-.	153
V.4 Oportunidades para Mejoras y Barreras para el progreso.	153
V.5 Las recomendaciones y Estrategia de Aplicación.	154
V.6 Resumen de problemas.	154
V.7 Costos de inversión en instalaciones nuevas.	155
V.8 Proyección de futuras inversiones.	155
V.9 Costo por Corrosion en ductos.	156



V.10 Costos por recubrimiento y Protección Catódica (CP).	157
V.11 El costo de la corrosión permisible.	157
V.12 El costo por Especificación y diseño.	157
V.13 El Costo total de Corrosión para la Construcción.	157
V.14 Costo por reemplazo de la infraestructura del ducto.	158
V.16 El Costo anual para el Reemplazo de ductos.	158
V.17 La depreciación de la inversión Existente.	159
V.18 Los Costos totales.	159
V.19 La Operación y Mantenimiento (Control de Corrosión).	159
V.20 Protección Catódica.	160
V.21 Funcionamiento del sistema de protección catódica automático.	161
V.21.1 Software Para El sistema de Monitoreo.	163
V.21.2 Sistema de Interrogación y Supervisión Remota Móvil.	166
V.2.5 Forma de Operación.	169
V.2.4 Usuarios.	170
CONCLUSIONES.	171
ANEXO I	175
GLOSARIO DE TÉRMINOS	179
BIBLIOGRAFÍA.	184



INTRODUCCIÓN

Objetivos.

En el presente trabajo se establecerán los fundamentos que provocan la corrosión externa en ductos enterrados de acero, esbozar los tipos de corrosión externa, determinar los tipos de sistemas de prevención de la corrosión externa, el manejo y la importancia de la protección catódica en los ductos terrestres, establecer el mecanismo de la protección catódica y presentar las nuevas tecnologías aplicadas para el monitoreo y control de la corrosión por medio de la protección catódica.

Planteamiento del problema.

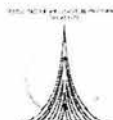
Desde hace muchos años el sector petrolero en todo el mundo ha luchado por evitar que las estructuras de acero sean dañadas por la corrosión, y en especial en la infraestructura de ductos enterrados o submarinos que transportan y almacenan hidrocarburos (poliductos, oleoductos, gasoductos, tanques, etc). Esto se ha hecho con el objeto de evitar las repercusiones económicas, ambientales y sociales que una fuga de hidrocarburo puede provocar.

Una vez instalada una estructura de acero subacuático ó enterrado en el suelo, los recubrimientos orgánicos ó inorgánicos no brindan una protección mecánica total en contra del deterioro natural por periodos de tiempo prolongados. El fenómeno de la corrosión provoca grandes daños en instalaciones enterradas, sumergidas y superficiales hechas de acero. Por esta razón, es necesaria la técnica de protección catódica. El mecanismo de la corrosión se fundamenta en los principios de la electroquímica, donde se presentan cambios fisicoquímicos e indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la **corrosión** la causante de grandes perjuicios económicos en instalaciones enterradas, sumergidas y superficiales hechas de acero.

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión externa, que está siendo aplicada cada día con mayor éxito en el mundo entero, en el que cada día se hacen necesarias nuevas instalaciones de ductos para transportar hidrocarburos,



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS



INSTITUTO MEXICANO DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS

productos terminados, agua, etc. Así como, en tanques de almacenamientos, cables eléctricos, cables telefónicos enterrados y otras instalaciones importantes.

Mediante un sistema de protección catódica bien diseñado es posible que todas las áreas puedan quedar protegidas, simulando el efecto de una celda galvánica, donde son involucrados un ánodo un cátodo y un electrolito.

Con base en los avances tecnológicos se establecen los métodos de protección catódica se pretende resolver el problema de la corrosión externa en sistemas de ductos enterrados, analizando el fenómeno de la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas.

La modernización de los sistemas de protección catódica es de suma importancia dentro de la industria petrolera, mediante la utilización de instrumentación primaria y software de monitoreo, telecontrol y automatización, telecontrol y automatización de equipos, hardware de telemedición de potenciales de protección catódica en segmentos de ductos, integración de bases de datos históricos, sistemas de información operativa tanto a nivel regional como a nivel central en tiempo real.

El contenido de este trabajo se divide en cinco capítulos en el cual el capítulo I, se presentan conceptos básicos de electricidad, ya que es importante tener conocimiento de ellos para que pueda comprender algunos términos que se manejan dentro del contexto.

Así mismo en el Capítulo II se aborda la teoría, los principios y los mecanismos que provocan la corrosión.

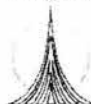
Para el capítulo III se contemplan una breve historia de su evolución, los fundamentos de la protección catódica, sus tipos, sus ventajas y desventajas de cada uno.

En el Capítulo IV, los temas son el diseño y selección y se menciona la normatividad nacional e internacional aplicada para un sistema de protección catódica por corriente impresa en sistemas de ductos.



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE ENERGÍA

SECRETARÍA DE ENERGÍA



ESTADOS UNIDOS MEXICANOS
SECRETARÍA DE ENERGÍA

Y finalmente, en el capítulo V, se mencionan los avances tecnológicos que se están desarrollando y aplicando en la automatización del monitoreo y control de la Corrosion externa en ductos al modernizar los sistemas de protección catódica por corriente impresa y hacerlos más eficientes. Así también se presentan costos relacionados a los ductos y los beneficios esperados en términos de un ahorro económico al utilizara éstos sistemas.



CAPÍTULO I

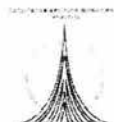
GENERALIDADES

Para entender el funcionamiento de la protección catódica aplicada en estructuras metálicas en contra de la corrosión es necesario hacer una breve introducción de algunos principios y definiciones básicas de electricidad, donde un flujo eléctrico pasa a través de un circuito, y más adelante será necesario aplicar estos conocimientos fundamentales al analizar un circuito de protección catódica para determinar los indicadores de la eficiencia de un proceso, tales como el voltaje de celda, las caídas de corriente en diversas partes del circuito, la distribución de corriente, etcétera. La mayor parte de este capítulo fue tomado del libro de "Mas allá de la herrumbre II" [2], ya que la forma de descripción es de manera sencilla y clara y que el lector podrá comprender con facilidad.

Para describir un circuito eléctrico simple estudiaremos un sistema de protección catódica el cual puede consistir simplemente en una fuente de poder conectada a uno o más componentes, principalmente resistores, que serán explicados posteriormente, por medio de un alambre hecho de un material conductor (cobre, por ejemplo), el circuito eléctrico simple constituye una fuente de poder que va a proporcionar una fuerza electromotriz estableciendo diferencias de potencial a través de los varios componentes del circuito e impulsando la corriente a través de ellos. Todos estos componentes ofrecerán varios grados de resistencia al flujo de la corriente [1].

En cualquier circuito eléctrico existen varios fenómenos que podemos medir:

- 1) La corriente, medida en amperes (**A**);
- 2) La fuerza electromotriz y la diferencia de potencial, ambas medidas en voltios (**V**);
- 3) La resistencia, medida en ohms (Ω).



I.1. Conductores^[2].

La conductividad eléctrica es el movimiento de la carga eléctrica. La habilidad de diferentes substancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga el material^[2].

I.1.1 Conductores de primer orden

Son aquellos que poseen conductancia eléctrica, en los cuales los portadores de la carga son los electrones. Se caracterizan por tener una conducción sin transferencia substancial de masa. La mayoría de los metales, el grafito y algunos óxidos muestran este tipo de conducción y su conductividad decrece cuando aumenta la temperatura.

I.1.2 Conductores de segundo orden.

Los conductores de segundo orden poseen conductancia iónica o electrolítica, y los portadores de la carga son los iones. En este tipo de conductores se da una transferencia de masa asociada con la conductividad, como por ejemplo las soluciones acuosas con sales disueltas, los suelos y las sales iónicas. Su conductividad aumenta cuando se incrementa la temperatura.

I.1.3 Conductores mixtos o de tercer orden.

Algunos materiales, llamados comúnmente semiconductores, poseen tanto conductancia iónica como eléctrica. Predomina el carácter eléctrico. Su conductividad es demasiado baja en general, pero aumenta rápidamente con la temperatura. La mayoría de los óxidos metálicos (**NiO**, **ZnO**, etc.) y algunos metales (**Si**, **Ge**) se agrupan dentro de esta categoría.



I.2 Aislantes^[2].

La conductancia en los aislantes es muy difícil, sin importar el tipo de mecanismo que participe en la conductividad, sobre todo si se les compara con la de los conductores mencionados antes.

La influencia del proceso de conducción en la conducta electroquímica de las reacciones es muy importante. Cada reacción de corrosión, así como las presentes en sistemas de protección catódica, tienen un origen electroquímico y se presentan en la interfase entre un conductor de primer orden (eléctrico) y uno de segundo orden (electrolítico). Por ejemplo, si un metal (conductor) tiene una película de óxido o una capa de pintura (aislantes) sobre su superficie, se estaría esperando con esto que tuviera una alta resistencia en la transferencia de electrones. Esto cambiaría la velocidad de la reacción y la energía requerida para llevarla a cabo.

I.3 Carga y corriente^[2].

Como un electrón en una unidad muy pequeña para poderla medir se necesita una unidad más grande denominada Coulomb. un Coulomb corresponde a 6.24 trillones de electrones (6.24×10^{12}). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (intensidad [I]).

El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones (corriente eléctrica) o por iones (corriente iónica). El flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones. Un electrolito es aquella sustancia que conduce corriente por flujo iónico.

La unidad básica de la corriente eléctrica (I) es el ampere (A). Un ampere se define como la velocidad de flujo de una carga (Q) de un Coulomb, por segundo. Se emplean comúnmente dos submúltiplos de esta unidad que son el miliampere (mA: 0.001 A) y el microampere (A: $0.000001 \mu\text{A}$).

Resumiendo, podemos decir que:

1 ampere = 1 Coulomb/segundo



$$A = \frac{Q}{\text{seg}} \dots\dots\dots 1.1$$

La cantidad total de electricidad (**Q**), en coulombs, que pasa por cualquier punto de un circuito eléctrico es el producto de la corriente (**I**), en amperes, y el tiempo (**t**) en segundos:

Coulombs = Amperes x segundos:

$$Q = It \dots\dots\dots 1.2$$

I.4 Unidad de diferencia de potencial, Volt.

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (que se mide en joules), cuando un Coulomb de electricidad se mueve de un punto al otro. A la unidad con que se mide la diferencia de potencial eléctrico se le llama Volt y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 Volt cuando se realiza un trabajo de 1 joule por cada Coulomb de electricidad que transita de un punto al otro; por lo tanto^[2]:

$$\text{Volt} = \text{joule/coulomb}$$

por lo tanto,

$$V = J/Q \dots\dots\dots 1.3$$

I.5 El potencial eléctrico

Todos los conceptos que hemos desarrollado para el caso de la interacción gravitacional se pueden aplicar, de la misma forma, al caso de la interacción eléctrica. Si existe un campo eléctrico presente en el espacio, entonces también existe un



potencial en el espacio, y la trayectoria de una partícula cargada será en el sentido de la máxima diferencia de potencial eléctrico hacia la de menor potencial eléctrico.

El potencial de un metal es una medida de su estado de energía. Dado que no se puede medir el potencial, lo que se hace es medir una diferencia de potencial.

1.6 Fuerza electromotriz^[2].

La fuerza electromotriz (**fem**) de una celda se mide en Volts y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda.

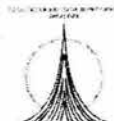
La **fem** de una celda en Volts se define entonces como el trabajo total efectuado en joules por los coulombs de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada.

1.7 Resistencia^[2].

Es la capacidad de un material ó sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor, se dice, tiene una resistencia pequeña y un mal conductor, una resistencia alta. Por consiguiente, la resistencia de un material depende de sus dimensiones y de la sustancia con que está hecho. Para un cable de dimensiones dadas, la plata ofrece la menor resistencia al paso de la corriente, pero como éste metal es demasiado caro para un uso común, se usa el cobre.

Cuando se requiere de una alta resistencia, se emplean casi siempre ciertas aleaciones especiales, para reducir la corriente en un circuito, como el constantan, el manganin y el nicromel.

El constantan se emplea para uso general en la reducción de la corriente, mientras que el manganin se emplea más bien para manufacturar resistores estandarizados de alta calidad, ya que estas aleaciones presentan pequeños cambios en la resistencia debidos a la temperatura.



1.8 Ley de ohm^[2].

En 1826 el profesor de física Simon Ohm estableció la siguiente ley como resultado de varios experimentos que efectuó para investigar la relación entre la corriente que pasa por un alambre y la diferencia de potencial establecida entre los extremos del mismo:

La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos". El conductor que siga esta relación (los conductores eléctricos) obedece a la ley de Ohm:

$$\text{(diferencia de potencial)} = \text{(constante)} \times \text{(corriente)} \dots\dots\dots 1.4$$

El valor de la constante en la ecuación anterior (que es alto cuando el valor de la corriente es pequeño y bajo cuando la corriente es grande) puede ser usado como una medida de la resistencia del alambre:

$$\frac{\text{Diferencia de Potencial}}{\text{Corriente}} = \text{Resistencia} \dots\dots\dots 1.5$$

En otras palabras, la resistencia de un conductor es la proporción de la diferencia de potencial a través de él y la corriente que fluye. A la unidad de resistencia eléctrica se le llama ohm y se define como: "la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 Volt en sus extremos y una corriente de 1 ampere fluye por él":

$$\frac{\text{voltios}}{\text{amperes}} = \text{ohms} \dots\dots\dots 1.6$$

Lo que formalizado de otra manera es:

$$V = IR \dots\dots\dots 1.7$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero la resistencia de otros materiales conductores, como el carbón por ejemplo, decrece con la temperatura. En otras sustancias, como los semiconductores (germanio, silicio y selenio), las



disoluciones iónicas que contienen las sales y los suelos, la resistencia también disminuye cuando aumenta la temperatura.

1.9 Resistores en serie^[2].

Se dice que un número de resistores, ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$) están conectados en serie si su conexión es consecutiva extremo con extremo, de tal suerte que la misma corriente (I), en amperes, fluya a través de cada una (Figura I.1)^[2].

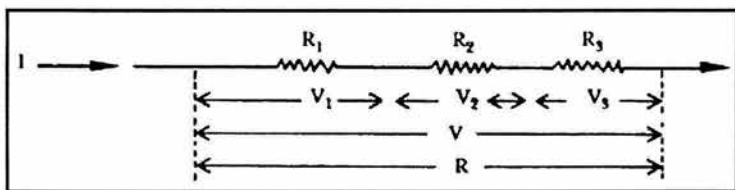


Figura I.1. Parte de un circuito eléctrico^[2].

Si R es la resistencia combinada y V , en Volts, es la diferencia de potencial total a través de los resistores:

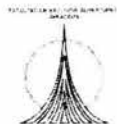
$$V = IR \dots \dots \dots 1.8$$

pero como V es igual a la suma de las diferencias de potencial individuales a través de

R_1, R_2 y R_3 :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \dots \dots \dots 1.9$$

$$V = IR_1 + IR_2 + IR_3 \dots \dots \dots 1.10$$



por lo tanto:

$$IR = IR_1 + IR_2 + IR_3, \dots \dots \dots 1.11$$

Y dividiendo todo entre I, tenemos que:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n \dots \dots \dots 1.12$$

1.10 Resistores en paralelo^[2].

Se dice que los resistores están en paralelo cuando son colocados uno al lado del otro y sus extremos permanecen unidos (Figura 1.2). La misma diferencia de potencial será entonces aplicada a cada uno, pero compartirán la corriente en el circuito.

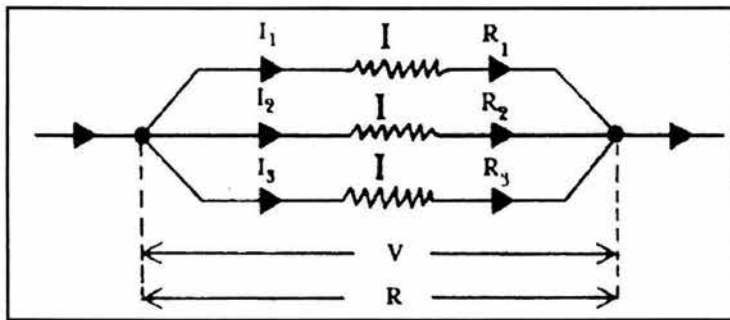


Figura 1.2. Parte de un circuito eléctrico^[2].

Supondremos que la corriente (I) se divide en I_1 , I_2 , e I_3 al pasar por R_1 , R_2 y R_3 , respectivamente, y que la diferencia de potencial común es V .

Si R es la resistencia combinada, se puede re-escribir:



$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots 1.13$$

la corriente total es:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots\dots\dots 1.14$$

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \dots\dots\dots 1.15$$

$$I = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} \dots\dots\dots 1.16$$

Por lo tanto, y dividiendo todo entre V, tenemos que:

$$\frac{I}{V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \dots\dots\dots 1.17$$

I.11 Importancia práctica de la resistencia interna de una celda^[2].

Existen diversos tipos de celdas como por ejemplo; las pilas secas, que pueden obtenerse de tamaños diferentes. Las fuerzas electromotrices de estas celdas serán idénticas en tanto estas últimas sean fabricadas con el mismo material exactamente y con concentraciones de electrolitos iguales. La fuerza de la corriente que se obtiene de una celda no sólo depende de su fuerza electromotriz, sino también de la resistencia interna propia. Con el fin de obtener una corriente grande, la resistencia interna debe de ser baja.

En el caso de un acumulador, esto significa que las placas de plomo deben de tener una gran área y deben estar espaciadas a muy corta distancia. Asimismo, la concentración del electrolito debe ser tal que su resistencia sea la más baja posible.

De acuerdo con su tamaño y construcción, la resistencia interna de una pila seca varía de 0.5 a 1.0 ohm, y la **fem** es aproximadamente de 1.5 V. Por lo tanto, si las terminales



de una pila seca son cortocircuitadas con un pedazo grueso de alambre de cobre cuya resistencia sea despreciable, la máxima corriente que se obtiene sería de 3 a 0.5 A.

La marcha eléctrica de un motor de automóvil necesita de una corriente alta para poder operar. Por esto, las baterías o acumuladores de coches de combustión interna son fabricadas de celdas que contienen muchas placas delgadas con pequeños espaciamentos entre ellas. Ocho pilas secas en serie tendrán la misma **fem** que la batería de 12 V de un coche, pero serían inoperativas para arrancar la marcha en virtud de su alta resistencia interna.

I.12 Arreglos de celdas^[2].

Se denomina batería a un grupo de celdas conectadas entre sí. Normalmente las celdas se conectan en serie, o sea que el polo positivo de una es conectado al extremo negativo de la próxima celda, etc. (véase la Figura I.3). Sin embargo, pueden ser conectadas en paralelo, es decir, todos los extremos positivos conectados entre sí, lo mismo que los extremos negativos (Figura I.4).

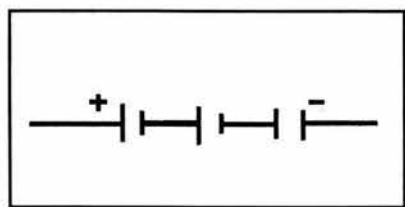


Figura I.3. Celdas en serie.

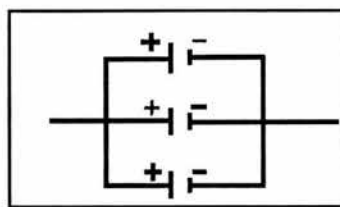


Figura I.4. Celdas en paralelo.

Cuando se requiere de la corriente máxima de un número dado de celdas, el arreglo empleado dependerá de la resistencia del circuito externo. Hablando de manera general, se usa una conexión en serie si cuando la resistencia del circuito es alta, comparada con la de las celdas, y se emplea una en paralelo cuando la resistencia es baja.

Cuando las celdas están conectadas en serie, la **fem** total producida de la batería es igual a la suma de las **fem**'s por separado y la resistencia interna es igual a la suma de



las resistencias internas de las celdas por separado. Cuando celdas de igual **fem** y resistencia son conectadas en paralelo, la fem que resulta es la misma que la de una sola celda y la resistencia interna de la batería se calcularía de acuerdo con la fórmula de los resistores en paralelo.

Una ventaja que se obtiene al conectar celdas en paralelo es que existe un drenaje menor de corriente en las celdas, ya que éstas comparten la corriente total, mientras que en las conexiones en serie la misma corriente principal es proporcionada por cada una de las celdas.

Las celdas nunca se deben dejar conectadas en paralelo cuando no están en uso, ya que si la **fem** de una es ligeramente mayor que la de la otra, comenzará a circular corriente en la batería misma y las celdas se agotarán rápidamente. Esto no sucede cuando se conectan en serie.

1.13 "Pérdida o caída de voltaje" cuando una celda produce corriente en un circuito^[2].

Por razones prácticas, la **fem** de una celda puede medirse con un valor muy aproximado si tomamos la lectura de un voltímetro de alta resistencia conectado directamente a través de las terminales de la celda cuando ésta no se encuentre conectada a ningún circuito.

Supongamos que un voltímetro conectado a las terminales de una pila seca, con una resistencia interna de 2Ω , da una lectura de 1.5 V: Esta es la fem de la pila (Figura 1.5 a).

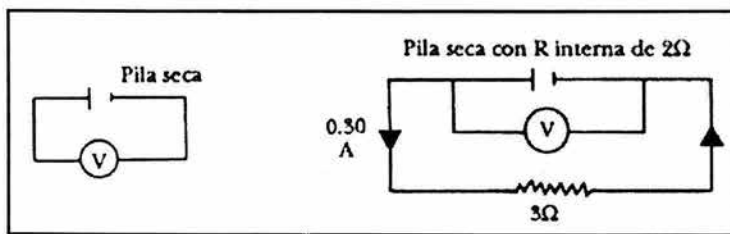


Figura 1.5. (a) El voltímetro de alta resistencia mide una *fem* de 1.5 V (se desprecia el flujo de corriente). (b) El voltímetro mide sólo 0.90 V. Una pérdida de voltaje de 0.60 V impulsa la corriente a través de la resistencia interna^[2].

Cuando un resistor de 3Ω se conecta a las terminales de la celda y una corriente fluye a través de él, se observa que la lectura del voltímetro ha caído a 0.90 V (Figura 1.5 b). La celda parece haber "perdido" 0.6 V (1.5 - 0.9 = 0.6 V). Esto puede explicarse como sigue: la corriente que circula por el circuito está dada por:

$$I = \frac{FEM}{RESISTENCIA\ TOTAL} = \frac{E}{R + B} \dots\dots\dots 1.18$$

En donde:

- E = fem
- R = resistencia del circuito externo
- B = resistencia interna de la celda.

$$I = \frac{1.5}{3 + 2} = 0.3A \dots\dots\dots 1.19$$

La diferencia de potencial (**dp**) requerida para impulsar esta corriente a través de la resistencia externa de 3 Ω es:

$$\begin{aligned} V &= IR \\ V &= 0.30 \times 3.0 \\ V &= 0.90 \text{ V,} \end{aligned}$$



Que es el valor de la lectura del voltímetro.

El voltímetro está conectado a las terminales de la celda, pero en cambio si estuviera conectado a través de los extremos de la resistencia de 3Ω , no habría diferencia alguna en la lectura. Esto se debe al hecho de que los alambres que conectan la celda a la resistencia tienen una resistencia despreciable y por consiguiente su dp también es despreciable; por lo tanto, la dp en las terminales de la celda es igual a la dp en el resistor. La dp requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda está dada por:

Corriente multiplicada por $= 0.30 \times 2.0 = 0.60 \text{ V}$, la resistencia interna valor igual al "voltaje perdido" o sea la "caída de potencial" de la celda. Se dijo al principio de esta sección que un voltímetro daría un valor muy aproximado de la fem de la celda. Esto se debe a que incluso un voltímetro de muy alta resistencia drena algo de corriente y por esta razón una pequeña parte de la fem de la celda se "**perderá**" en impulsar dicha corriente a través del equipo de medición. Sin embargo, si la resistencia del voltímetro es muy alta, comparada con la resistencia de la celda, la corriente drenada será muy pequeña y en consecuencia la "caída de potencial" en este caso será numéricamente despreciable.

Ejemplo ilustrativo^[2].

Un ejemplo ilustrará mejor lo expuesto líneas atrás: Dos estructuras metálicas enterradas, **A** y **B**, se encuentran conectadas eléctricamente en paralelo a una batería de 12 V , cuya resistencia interna total es de 0.6Ω , tal y como se representa en la Figura I.6. Las resistencias del terreno para **A** y **B** son de 4 y 6Ω , respectivamente, y la resistencia total del cable es de 1Ω . Se trata entonces de encontrar la corriente que fluye a través del suelo entre **A** y **B**. En la Figura I.6 simplificada, se supone que cualquier otra caída de potencial se ignorará por el momento.

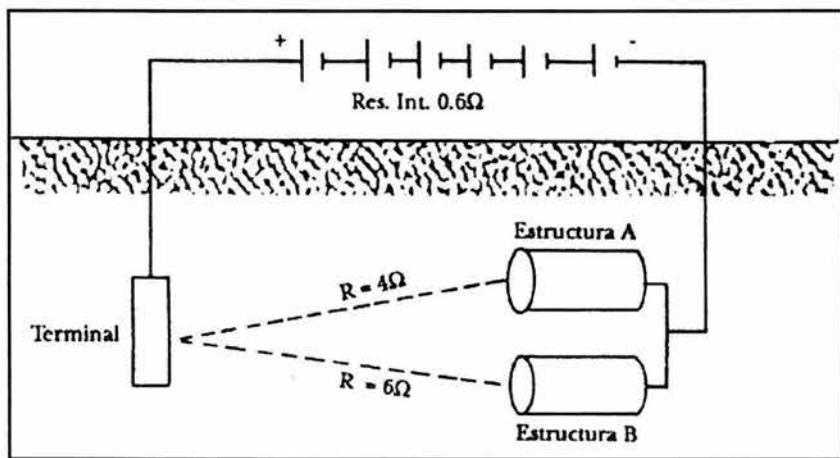


Figura 1.6. Estructuras metálicas enterradas, conectadas eléctricamente a una batería^[2].

El primer paso para estudiar un problema eléctrico es dibujar un diagrama del circuito:

La resistencia combinada (R), en ohms, de **A** y **B** está dada por:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{6+4}{24} \quad R = 2.4$$

por tanto, la resistencia total del circuito es:

$$R = 0.6 + 1 + 2.4 = 4$$



$$\text{corriente principal} = \frac{\text{fem}}{\text{resistencia total}} = \frac{12}{4} = 3A$$

La **dp** a través de A y B (la corriente multiplicada por la resistencia combinada) es igual, entonces, a:

$$3 \times 2.4 = 7.2$$

Por lo tanto, la corriente a través de **A** es igual a:

$$\frac{dp}{\text{resistencia}} = \frac{7.2}{4} = 1.8A,$$

Y la corriente a través de **B** resultará como sigue:

$$3 - 1.8 = 1.2A$$

I.14 Resistividad eléctrica^[2].

Cuando se fabrica un resistor, se emplea alambre grueso y corto si se quieren obtener bajas resistencias y, al revés, alambre delgado y largo si se desean resistencias altas. Además de la longitud y del espesor, existe otro factor importante que se debe tomar en cuenta cuando se toma la decisión de seleccionar la longitud y el calibre de alambre para una resistencia en particular: el material del que esté hecho el alambre.

Supongamos, por ejemplo, que la longitud de un alambre es duplicada, lo que duplica a su vez la resistencia, puesto que ahora la longitud del alambre equivale a dos resistencias iguales en serie. Si la longitud del alambre es aumentada cinco veces, la resistencia aumentará de igual manera su valor previo cinco veces. Las resistencia de un alambre por lo tanto es directamente proporcional a su longitud, situación que formalizamos así:

$$R \propto L$$



Con respecto al espesor o área de sección transversal del alambre, los alambres gruesos pueden ser considerados como equivalentes a un número de alambres delgados de área transversal igual, que se encuentren unidos en paralelo. Al duplicarse el área, la resistencia del alambre disminuirá por tanto a la mitad. En otras palabras, la resistencia de un alambre es inversamente proporcional al área de su sección transversal (**A**):

Si combinamos estos dos últimos resultados, tenemos:

$$R \propto \frac{1}{A}, \dots\dots\dots 1.20$$

Esta relación puede convertirse en una ecuación que introduzca una constante, de la siguiente manera:

$$R = \frac{p}{A} \dots\dots\dots 1.21$$

en donde p es una constante llamada resistividad del material del alambre. Si en esta ecuación damos a **l** un valor de 1 cm y **A** vale 1cm², tenemos:

$$R = \rho \times \frac{1 \text{ cm}}{1 \text{ cm}^2} = \frac{\rho}{1 \text{ cm}} \dots\dots\dots 1.22$$

donde: $\rho = R$ (ohm x cm)

Con esta fórmula, vemos que la resistividad de un material es expresada en una unidad ohm centímetro y es numéricamente igual a la resistencia de un conductor hecho de material con una longitud de 1 cm y de sección transversal de 1 cm².

Se puede decir también que la resistividad es una constante del material, lo cual es independiente de la forma geométrica del resistor. Por ejemplo, la resistencia que presenta un suelo al paso de la corriente eléctrica es una variable que depende, como dijimos anteriormente, de la longitud y del área transversal al flujo de corriente. Sin embargo, la resistividad de ese suelo tiene un valor fijo, e independiente del flujo de



corriente, del área transversal y de la longitud del terreno. Su valor sólo variará con la temperatura, el contenido de humedad, el de acidez y otros factores.

Lo contrario a la resistividad es la conductividad. Un material con alta conductividad tiene baja resistividad y viceversa. De esta manera se tiene que la *resistencia al flujo de corriente es mínima* cuando:

- a) El medio presenta baja resistividad (alta conductividad),
- b) Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente, y
- c) Tenemos un área transversal grande para el flujo de corriente.

En cambio, la *resistencia al flujo de corriente es máxima* cuando:

- a) el medio presenta alta resistividad (baja conductividad),
- b) las distancias son grandes para el flujo de corriente, y
- c) el área transversal es pequeña para el flujo de corriente.

Las resistividades del suelo a menudo son mayores de **10 000 Ω -cm**. Las resistencias al flujo de corriente en sistemas de protección catódica en estos suelos pueden tener a veces valores menores a 1 ohm. La resistencia puede ser baja en un medio con una alta resistividad si el área transversal al flujo de corriente es grande.

Tabla I.1 Valores de resistividad típicos para ciertos materiales^[2].

Material	Resistividad (Ω -cm)
Aluminio	0.000003
Latón	0.000008
Hierro	0.000010
Plomo	0.000022
Mercurio	0.000094
Suelo típico	10 000
Vidrio	100 000 000 000
Agua de mar típica	30.00



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO DE LA CORROSIÓN EXTERNA EN DUCTOS.

II.1 Principios de corrosión.

Ya que, en líneas de tuberías enterradas y/o sumergidas en un electrolito se ha observado que los procesos de corrosión son electroquímicos, se analizará la corrosión que ocurre por reacciones electroquímicas. En estos procesos de corrosión se tiene la presencia de un par galvánico activo (Los pares galvánicos son el resultado de la diferencia de potencial entre los materiales) originado por uno o diversos factores, mismos que se ilustrarán y analizarán posteriormente.

II.1.1 ¿Qué es la corrosión?

La corrosión es un proceso electroquímico en donde una estructura metálica está sujeta a una pérdida de metal causada por una descarga de corriente de la estructura al electrolito circundante.

A continuación se describe el proceso mediante el cual se lleva a efecto la corrosión por reacciones electroquímicas.

Al sumergir un material metálico, tal como el hierro, en un electrolito los átomos del metal tienden a disolverse. Estos átomos reciben el nombre de iones y al desprenderse de la masa metálica llevan consigo una carga eléctrica positiva, como se muestra en la Figura II.1. Con el desprendimiento del ión de la masa metálica, ésta pierde cargas positivas, generando entonces con respecto al electrolito una diferencia de potencial.

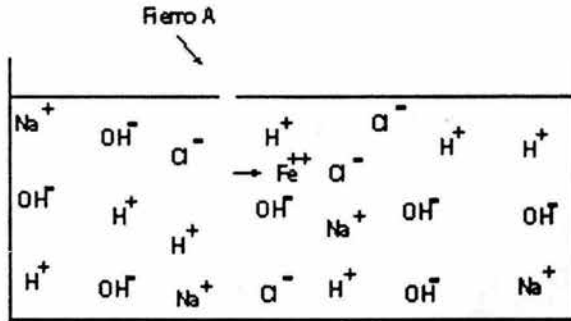


Fig. II.1 Disolución de un metal en un electrolito.

Para conocer el valor del potencial que adquiere la masa metálica con respecto al electrolito, se utiliza un electrodo de referencia estable, tal como el electrodo de cobre sulfato de cobre. Si se introduce otra placa del mismo material (fierro B) en el electrolito se observa que esta adquiere un potencial diferente a la del fierro A.

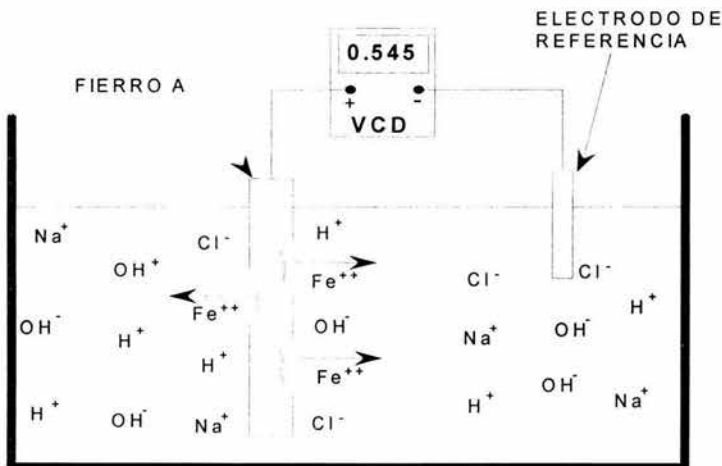


Fig II.2 Medición del potencial de un metal.



Las diferencias en el potencial se originan por factores tales como:

- Impurezas en los materiales
- Diferentes grados de limpieza de las superficies
- Diferencias en la concentración del electrolito, etc.

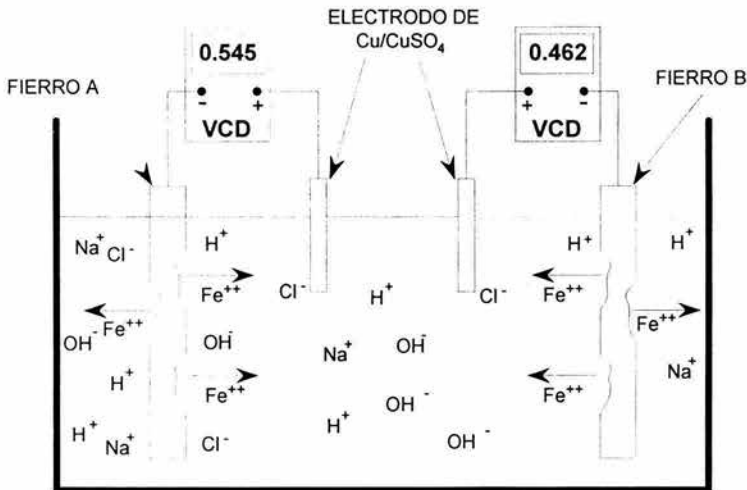


Fig II.3. Medición del potencial de un metal.

Cuando distintas partes de una masa metálica sumergidas en un electrolito adquieren diferencias de potencial dan origen a una "celda de corrosión". En la celda de corrosión al material más electronegativo (el que cede electrones) se le llama ánodo y al material más electropositivo (el que recibe electrones por el conductor metálico) se le denomina cátodo. En la celda de corrosión los electrones abandonan al ánodo y se mueven por el conductor metálico para llegar al cátodo. Los electrones que salen del ánodo se deben a las reacciones de oxidación que ocurren en este, la llegada de electrones al cátodo origina reacciones de reducción en las moléculas o ión del electrolito.

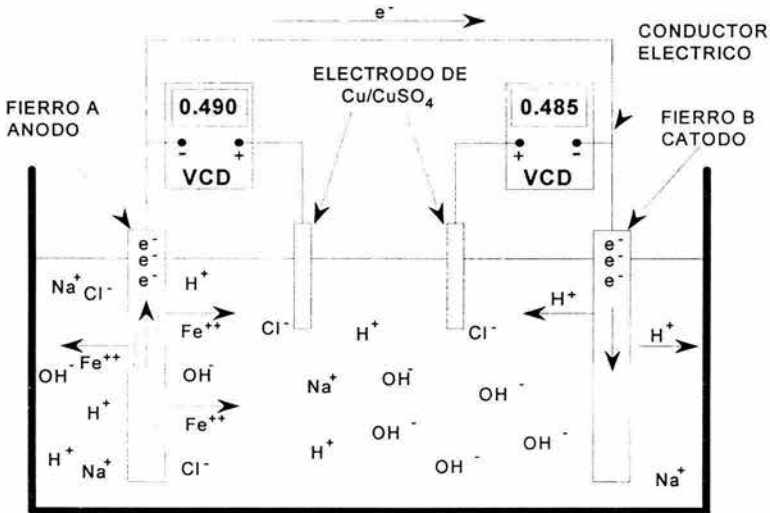


Fig II.4 Componentes de la celda de corrosión

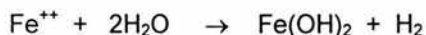
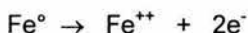
Reacciones básicas de óxido - reducción que ocurren en la celda de corrosión en líneas de acero al carbón.

En el ánodo al ocurrir la reacción de oxidación el material se disuelve originando la pérdida de éste.

En el cátodo al ocurrir la reacción de reducción el material permanece intacto. Las reacciones básicas de óxido - reducción que se presentan a continuación son algunas de las múltiples que pueden ocurrir ya que los componentes iónicos del electrolito influyen en éstas.



Reacción de oxidación:



Reacción de reducción:



Si tuviéramos la posibilidad de conectar en serie un amperímetro entre el ánodo y el cátodo se podría medir la corriente de corrosión. En la práctica esto no es posible debido a que se requiere separar la zona catódica de la anódica para instalar el amperímetro.

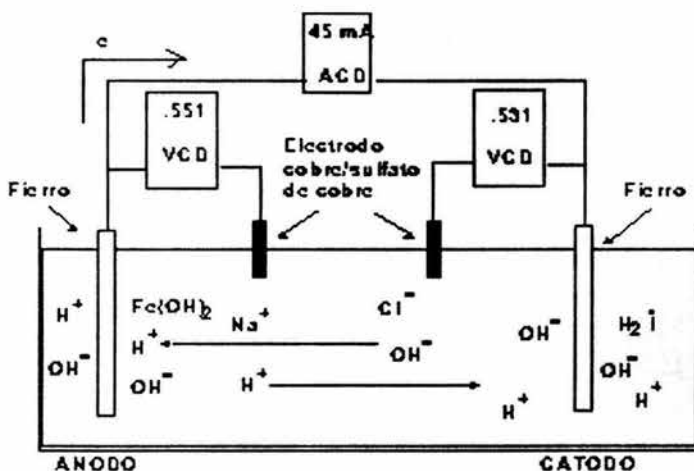
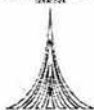


Fig II.5 Medición de corriente de una celda de corrosión.

En las ilustraciones anteriores se describió el mecanismo de la corrosión electroquímica tal como ocurre en líneas de tubería subterránea y/o sumergida.



II.1.2 Par Galvánico.

Los pares galvánicos son el resultado de la diferencia de potencial entre los materiales. La serie galvánica de los metales nos ilustra el hecho de que hay una diferencia de potencial natural entre los metales en un electrolito conductor. Sin embargo, no existe otra forma que no sea por la medición de los potenciales en el medio de interés, para presidir los potenciales exactos de los metales y la dirección resultante del efecto galvánico de dicho medio.

Un cátodo en un par galvánico de corrosión es la parte metálica del electrodo en la cual fluye corriente directa desde el electrolito. El metal catódico normalmente no sufre corrosión.

II.1.3 Celda Galvánica.

Una celda electroquímica es una combinación de los siguientes tipos:

- 1. Celda Galvánica o pila:** Si la celda electroquímica produce energía eléctrica, causada por el consumo de energía química, se dice que tenemos una *celda galvánica o pila*.
- 2. Celda electrolítica:** Si consume corriente de una fuente de corriente externa, almacenando como consecuencia energía química, se dice que tenemos una *celda electrolítica*.
- 3. Celda de Concentración:** Si la celda consume corriente cuando existen electrodos de un mismo metal en electrolitos diferentes

En la Figura II.6 se muestra el funcionamiento de una celda galvánica para producir una corriente eléctrica en el caso de las pilas comunes. Y en la figura II.9 se muestra el mismo principio, pero en un proceso de corrosión.

En cada una de estas celdas el ánodo es consumido mientras que el cátodo es protegido contra la corrosión. En el siguiente diagrama se muestra la figura II.6 una



celda galvánica o pila, mientras que en la Figura II.7 se muestra una celda de concentración. En cada figura la corriente eléctrica fluye del cátodo al ánodo con el circuito externo. La corriente abandona del ánodo para entrar al electrolito produciendo así una reacción química en la superficie del ánodo. Esta reacción involucra el ión del ánodo metálico y el ión negativo como un producto de corrosión. La corriente migra a través del electrolito y entre el cátodo. En la superficie del cátodo se liberan iones positivos de la solución, generalmente en forma de hidrógeno atómico.

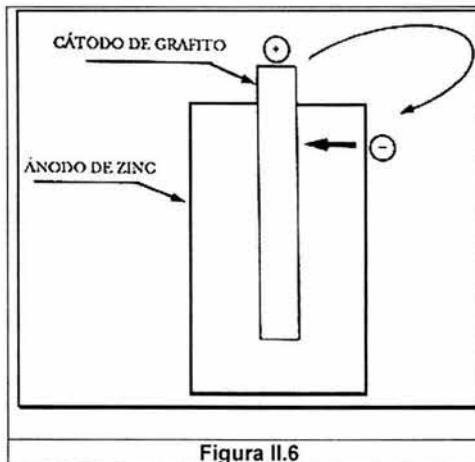


Figura II.6

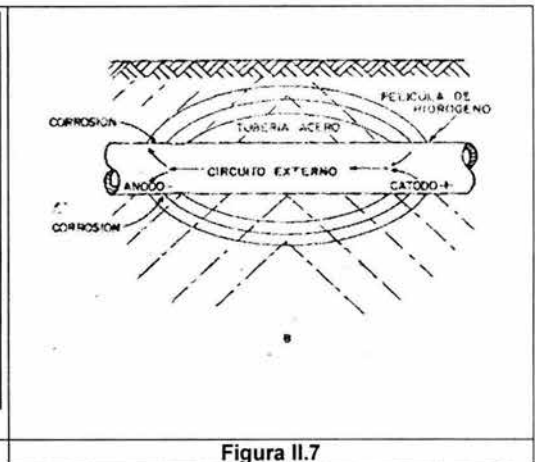


Figura II.7

La corrosión que resulta de un par galvánico es una reacción de tipo electroquímico, donde ocurren reacciones químicas y un flujo de corriente eléctrica.

Hay cuatro condiciones necesarias para que ocurra la corrosión:

- Debe existir un ánodo y un cátodo.
- El ánodo y el cátodo deben estar en contacto con un electrolito que tenga la propiedad de ser un conductor electrolítico, tal como el agua o el suelo.
- Se requiere de una conexión metálica entre el ánodo y el cátodo.
- Debe haber un potencial CD entre el ánodo y el cátodo. el potencial CD causará un flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo.



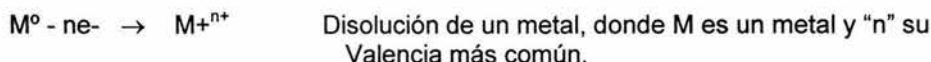
Un ánodo en un par galvánico de corrosión en la parte metálica del electrolito.

El ánodo sufre corrosión (es decir, se consume) por esta acción.

Un cátodo, en un par galvánico de corrosión, es la parte metálica del electrodo al cual fluye corriente directa desde el electrolito. El metal catódico normalmente no sufre corrosión.

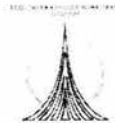
Muchas formas de corrosión son el resultado de un par galvánico activo que puede presentarse debido a diversos factores, algunos de los cuales se discuten a continuación. La corrosión electroquímica requiere de cuatro componentes por separado pero de igual importancia. Estos son:

1. **El ánodo.** Un electrodo en donde ocurre la oxidación o corrosión. Una reacción anódica común sería:



2. **El cátodo.** un electrodo que esta siendo protegido contra la corrosión:

- | | |
|---|--|
| 1. $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ | Evolución de hidrógeno en electrolitos ácidos. |
| 2. $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ | Reducción de oxígeno en electrolitos ácidos. |
| 3. $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ | Reducción de oxígeno en electrolitos ácidos. |
| 4. $M^{+n} + (n-1)e^- \rightarrow M^+$ | Reducción de ión metálico. |
| 5. $M^{+n} + ne^- \rightarrow M^0$ | Deposición de un metal. |



3. **El electrolito.** Un conductor iónico entre el ánodo y el cátodo, generalmente es una solución acuosa o tierra húmeda.
4. **El circuito eléctrico.** Un conductor metálico entre el ánodo y el cátodo.

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas; el electrolito es, en caso de no estar sumergido o enterrado el metal, el agua condensada de la atmósfera, para lo que la humedad relativa deberá ser del 70%.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica, dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

Ya que la corrosión de los metales en ambientes húmedos es de naturaleza electroquímica, una aproximación lógica para la corrosión sería mediante métodos electroquímicos. Los métodos electroquímicos para la protección contra la corrosión requieren de un cambio en el potencial del metal para prevenir o al menos disminuir su disolución.

II.1.4 Corrosión Generalizada.

Los ánodos tienen carga positiva y los cátodos tienen carga negativa. Los ánodos y los cátodos muy pequeños se forman uno junto al otro debido a pequeñas diferencias de superficie. Las áreas anódicas y catódicas cambian constantemente conforme las capas de corrosión se forman o se eliminan. Esto resulta de una pérdida de metal uniforme. La **corrosión general** a menudo ocurre cuando el metal está al aire. Normalmente no es una amenaza significativa para las tuberías.

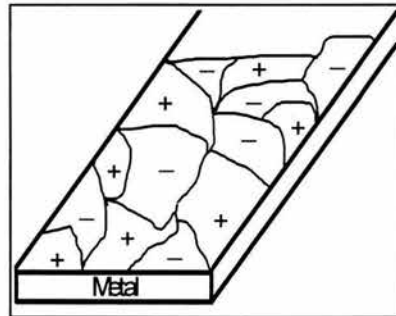


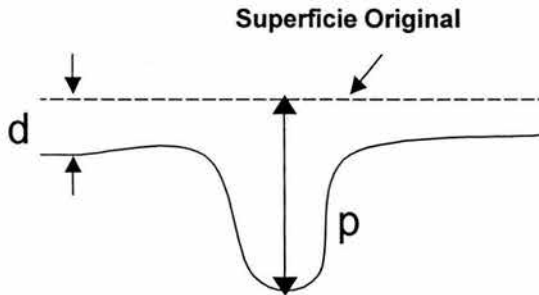
Figura II.8 Corrosión Generalizada con pares galvánicos.

II.1.5 Corrosión localizada.

La corrosión localizada se presenta en muchas formas, y por lo general se asocia con un área catódica grande y un área anódica pequeña. De esta forma mientras que las corrientes anódicas y catódicas se mantienen iguales, la densidad de corriente anódica es mayor, causando una penetración más rápida de la pared.

En las tuberías de acero al carbón el tipo de corrosión localizada que más se observa es la corrosión por picadura. (puntos Locales). Las picaduras pueden ser relativamente poco profundas dependiendo de intensidad de la corrosión. Una vez que se inicia la picadura, ésta puede continuar creciendo: el proceso de corrosión genera condiciones dentro de la picadura que ayudan al proceso de corrosión. Las reacciones involucradas en las picaduras pueden ser complejas. Las picaduras tienen un contenido reducido de oxígeno y por lo general son de pH ácido.

En las tuberías de acero al carbón, el tipo de corrosión localizada es la que más se observa.



El Factor

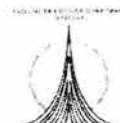
de Picadura = p/d

Figura II.9 Corrosión localizada.

II.2. Factores que contribuyen a la corrosión externa en ductos.

Hay varios factores físicos y del medio ambiente que puede contribuir a la corrosión externa en ductos y entre los principales se tienen los siguientes:

- 1) Materiales diferentes.
- 2) Escoria.
- 3) Cascarilla de Laminación
- 4) Suelos diferentes.
- 5) Diferencia en contenido de oxígeno.
- 6) Bacterias anaeróbicas.
- 7) Impurezas.
- 8) Irregularidades superficiales.
- 9) Tensión.
- 10) Diferencia de concentración.
- 11) Interfase concreto-suelo.
- 12) Corrientes parásitas.
- 13) Diseño incorrecto de la protección catódica.
- 14) Tubería Nueva y Tubería Vieja.
- 15) Célula Diferencial de Aireación en Cruces de Carreteras.
- 16) Acero en Concreto.



II.2.1 Materiales diferentes.

Una diferencia de potencial entre dos metales que están en contacto (por ejemplo Zinc y hierro en agua de mar) tendrán como resultado un paso de corriente del metal menos noble (más activo o anódico) hacia el electrolito dando como resultado la corrosión de dicho metal.

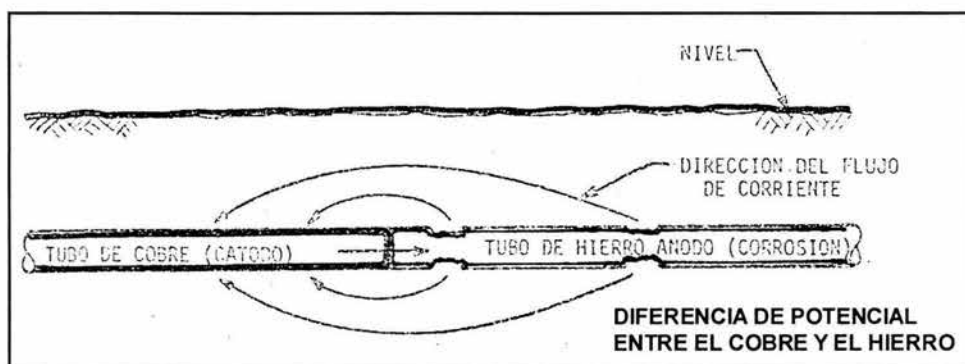


Figura II.10 Corrosión por diferentes Materiales.

II.2.2 Escoria.

Una escoria cerca de un ducto subterráneo puede ocasionar un par galvánico que a su vez causará corrosión del metal. La escoria es esencialmente carbón y existe una gran diferencia de potencial entre el carbón y el acero. La corriente fluye de la tubería en un área muy pequeña. Aunque la cantidad de corrosión asociada con este par será muy pequeña, la corrosión hasta perforar el ducto puede ocurrir en un periodo corto de tiempo.

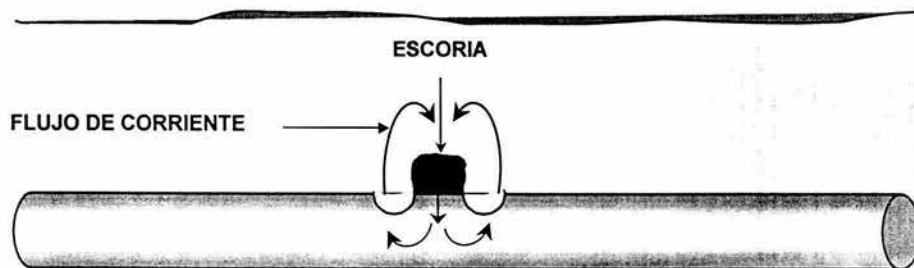


Figura II.11 Corrosión por escoria en un Ducto enterrado.

II.2.3 Cascarilla de laminación.

La cascarilla de Laminación es una película de óxido firmemente adherida que se forma en la superficie del acero rolado en caliente a medida que el acero sale del proceso. Aunque este tipo de cascarilla no es un metal, es de tipo conductivo y tiene un potencial más noble que el acero. La diferencia de potencial puede variar desde -0.2 voltios hasta -0.5 voltios, siendo el acero el metal que sufre la corrosión. La corrosión del acero puede ser rápida en una falla de la cascarilla debido a la concentración de la descarga de la corriente anódica en un área pequeña.

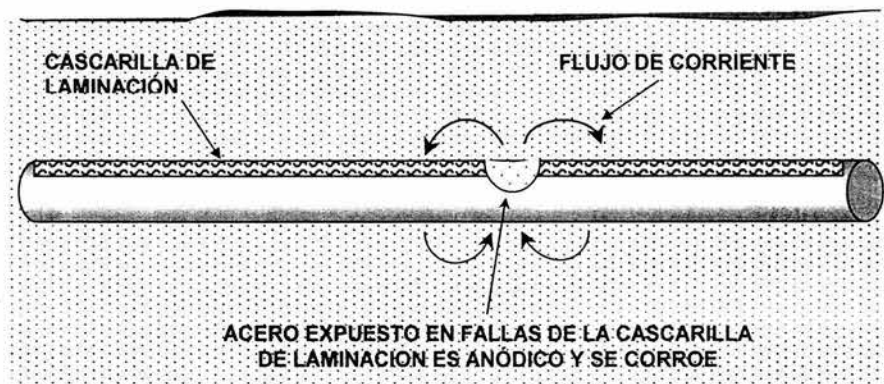


Figura II.12 Corrosión por cascarrilla de laminación.

II.2.4 Suelos diferentes.

Si la estructura metálica, como por ejemplo un oleoducto, atraviesa suelos de diferente composición se pueden establecer pares galvánicos entre el metal de un tipo de suelo y el mismo metal en un tipo diferente de suelo.

Los cambios en la naturaleza que un ducto al recorrer cierta distancia. Esto también se puede visualizar en una instalación vertical y en dicho caso, el ducto sería representativo de un pilote de acero o de una camisa de un pozo. Si el potencial de la tubería en el suelo A se midiera contra un electrodo de referencia, se vería que es diferente al potencial en el suelo B. La corriente de corrosión fluiría del área del cátodo al área del ánodo en el circuito externo (en este caso la tubería), y del área del ánodo (que está sufriendo corrosión) en el circuito interior (en este caso el suelo). Este es un caso muy común ya que la mayoría de los suelos no son totalmente homogéneos.

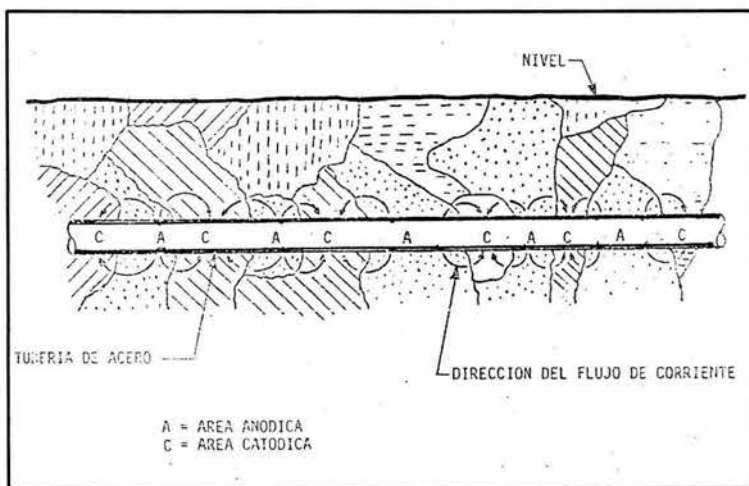


Figura II.13 Corrosión producida por suelos diferentes.

II.2.5 Diferencia en contenido de oxígeno.

Una superficie metálica enterrada-sumergida parcialmente en un área con alto contenido de oxígeno y con otra parte con un área con poco contenido de oxígeno (suelo-agua), se corroe en el área con bajo contenido de oxígeno.

Estructuras enterradas generalmente están sujetas a la corrosión como resultado de una diferencia en contenido de oxígeno. En la Figura II.14 se muestra un ejemplo de una de las causas de diferencia de contenido de oxígeno, donde la parte rica en oxígeno (relativamente hablando) de la estructura es el cátodo, y la parte de la estructura con un suministro pobre de oxígeno es la parte anódica y sufrirá corrosión.

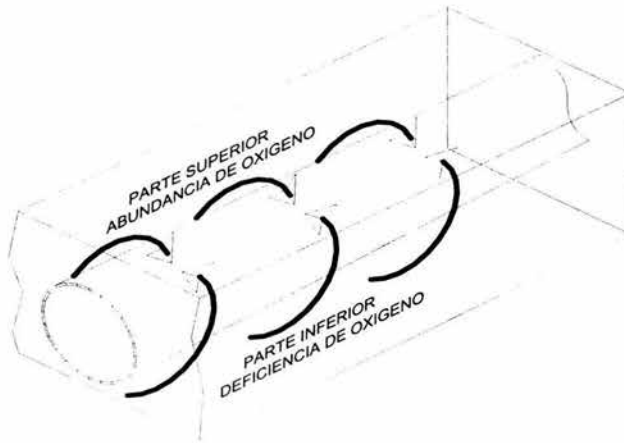


Figura II.14 Corrosión producida por diferencia de oxígeno.

II.2.6. Bacterias.

La corrosión por influencia Microbiológica influyó en la corrosión, Microbiologically Influenced Corrosion, sus siglas en inglés (MIC), se define como corrosión que es propiciada por la presencia y actividades de microorganismos, incluso las bacterias y hongos. Se ha estimado que del 20 al 30 por ciento de toda la corrosión en las tuberías están relacionadas por este tipo de corrosión; y puede afectar el exterior o las superficies interiores de una tubería. Los Microorganismos localizados a la superficie del metal no atacan el metal directamente o causan una única forma de corrosión. Los subproductos de los organismos promueven formas severas de corrosión, incluyendo picaduras, grietas y depósitos. Típicamente, los productos que aceleran el crecimiento de una colonia microbiológica y aceleran el proceso de corrosión son:

1. Interactuación recíproca con los productos corrosivos para prevenir la formación de una capa natural con características de los productos de corrosión que inhibirían la corrosión extensa.



2. Una reacción de reducción adicional acelerará el proceso de corrosión.

Las variedades de bacterias que se han implicado a la corrosión de tuberías subterráneas están clasificadas en aeróbicas y anaeróbicas. Obligadamente las bacterias aeróbicas sólo pueden sobrevivir en la presencia de oxígeno, mientras que las bacterias anaeróbicas sólo pueden sobrevivir en ausencia del mismo. Una tercera clasificación es aquellas bacterias aeróbicas que aunque prefieren las condiciones aeróbicas, puede vivir bajo las condiciones anaeróbicas. Comúnmente, la bacteria anaerobia implicada que obliga a la corrosión, en la reducción de sulfatos y la oxidación del metal. Las bacterias aeróbicas provocan la corrosión por la oxidación del metal, mientras las bacterias productoras de ácido son las bacterias con facultades aeróbicas. Los ataques más agresivos generalmente tienen lugar con la presencia de comunidades microbianas que contienen una variedad de tipos de bacterias. En estas comunidades, las bacterias actúan cooperativamente para producir las condiciones favorables al crecimiento de cada especie. Por ejemplo, las bacterias anaeróbicas pueden crecer en los ambientes aeróbicos cuando ellos están presentes bajo biopelículas depositadas en que las bacterias aeróbicas consumen el oxígeno. En el caso de tuberías subterráneas, el ataque más agresivo ha sido asociado con ácido producido en las tales comunidades bacterianas.

II.2.6.1 Bacterias sulfato reductoras.

Las SRB reducen los sulfatos a sulfuros y el sitio de la corrosión en el acero por lo general tiene un depósito de sulfuro de hierro negro que cuando se limpia, muestra una superficie metálica brillante (corrosión activa).

La reacción de la corrosión produce hidróxido de hierro y sulfuro de hierro:



El sulfuro de hidrógeno también se genera (olor a huevos descompuestos). Las SRB pueden causar altas tasas de corrosión debido a que consumen hidrógeno. Esto despolariza la reacción catódica (la acelera) lo que a la vez acelera la reacción anódica.



II.2.6.2 Bacterias productoras de ácidos.

Algunas bacterias (APB) y hongos pueden producir ácidos orgánicos e inorgánicos. Estos Disminuyen el pH en la biocapa y provocan la disolución en ácido en el acero. Los ácidos orgánicos son a menudo cadenas cortas de ácidos grasos como el acético y el propiónico y se producen por un proceso de fermentación. Los ácidos inorgánicos incluyen el ácido sulfúrico y el ácido carbónico. Por lo general las APB se encuentran en suelos arenosos ó arcillosos.

La detección se hace usualmente por aislamiento y enumeración (dejando crecer y contando colonias). Existen "kits" para pruebas de campo para SRB y APB y pueden ser más fáciles de usar que la alternativa de guardar muestras para análisis de laboratorio. No obstante, algunos tipos de bacterias son sensibles al ambiente, el conteo puede dar indicaciones falsas sobre el nivel real de actividad bacteriana.

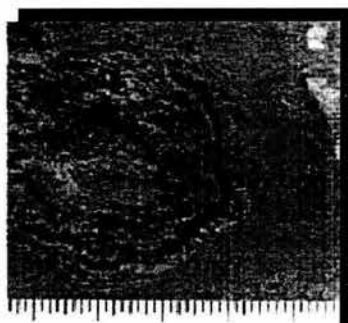
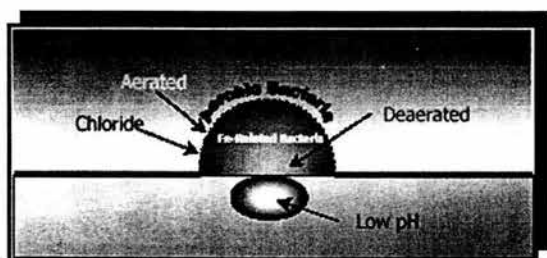


Figura II.15 Corrosión causada por bacterias.

II.2.7 Impurezas.

Las impurezas en el grano metálico de la estructura puede causar pares galvánicos muy locales.



II.2.8 Irregularidades superficiales.

Si se utiliza una llave inglesa para tubería, los dientes de esta llave pueden dañar la superficie de la tubería, causando ralladuras en la misma. Estas ralladuras serán anódicas al resto de la tubería. Si se hacen excavaciones cerca de una tubería y se raya ésta con la maquinaria de excavación, esta área "deformada" será anódica con respecto al resto de la tubería.

II.2.9 Tensiones.

Si, por alguna razón hay un área de tensión en cualquier parte de una tubería enterrada, o en cualquier otra estructura subterránea, la sección o parte bajo tensión será anódica con respecto a otras secciones o partes que no estén bajo tensión.

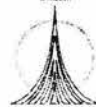
II.2.9.1 Corrosión por corriente alterna (AC).

Las líneas aéreas de alto voltaje que corren paralelas a las tuberías o cerca de ellas pueden causar que se induzca voltaje de corriente alterna. Por lo general, la magnitud de efecto depende de la carga en la línea de alto voltaje, la longitud del paralelismo y la distancia de alto voltaje y la tubería. En condiciones de falla en la línea de alto voltaje, el potencial de la tubería suele alcanzar los miles de voltios. Esto puede representar un problema de seguridad significativo.

En condiciones normales de carga, la AC puede causar corrosión en tuberías en pequeños defectos de revestimiento incluso en líneas que cuentan con un sistema de Protección catódica totalmente efectivo, al respecto, en Europa, ha habido cuatro fallas atribuidos a la corrosión por AC. El proceso de corrosión es irreversible y por lo tanto, la corrosión puede ocurrir durante la mitad anódica del ciclo de la corriente alterna.

La investigación ha demostrado que el riesgo de corrosión por AC está relacionado con la densidad de corriente de la AC:

- $< 30 \text{ A/m}^2$ No ocurre Corrosión.
- $30 < 100 \text{ Amp/m}^2$ la corrosión por AC es incierta.



➤ > 100 Amp/m² habrá corrosión por AC.

En palabras simples la densidad de corriente y el voltaje de la AC se relaciona con la magnitud del efecto y la resistividad del suelo por medio de la siguiente ecuación:

$$I_{AC} = \frac{8V_{AC}}{\rho\pi d} \dots\dots\dots 2.1$$

Donde:

I_{AC} = Densidad de corriente de AC (A/m²)

V_{AC} = Voltaje de AC.

ρ = resistividad del suelo (ohm-cm)

d = Diámetro del Revestimiento Defectuoso (cm).

II.2.9.2 Características de corrosión por corriente alterna.

- Si la resistividad del suelo es baja, la corrosión externa puede ocurrir en voltajes de sólo unos cuantos voltios.
- La densidad de corriente de la AC aumenta conforme disminuye el Tamaño del área defectuosa, y alcanza el máximo alrededor de 1 cm². Se piensa que el producto de la corrosión podría restringir el flujo en áreas defectuosas menores que ésta.
- La tasa de corrosión externa aumenta en suelos no aireados.
- Se cree que la tasa de corrosión disminuye con el tiempo.
- La picadura de corrosión tiene pH alto (10 y 12).
- A menudo hay una incrustación de carbonato duro en la parte superior de la picadura y sobre el recubrimiento externo un oscurecimiento del revestimiento alrededor de la picadura.

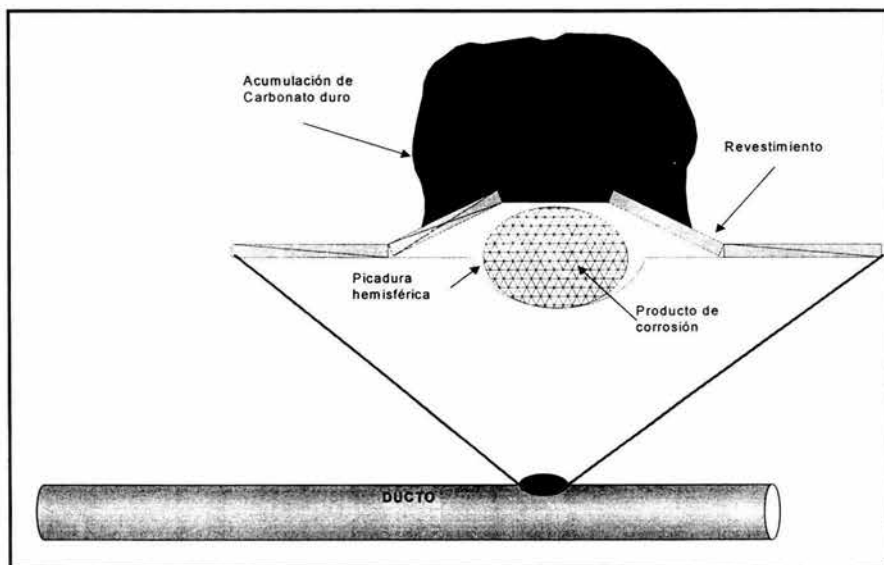


Figura II.16 Corrosión causada por estructuras de corriente alterna cercana al ducto, provocando la formación de una capa de carbonato y debajo la picadura del ducto.

II.2.10 Diferencia de concentración.

En un electrolito grande, puede haber diferencias de pH entre la interfase del electrolito-metal de un lugar con respecto a la interfase en un lugar diferente.

II.2.11 Interfase concreto-suelo.

Si una estructura metálica se encuentra parcialmente instalada en concreto y parcialmente en suelo, se establecerá un par galvánico entre las superficies metálicas instaladas en los diferentes medios.

El área de la estructura que no se encuentra instalada en concreto será anódica respecto a la que sí se encuentra instalada en concreto.



II.2.12 Corrientes parásitas.

Las corrientes directas (CD) se pueden generar de fuentes que no tienen conexión con la estructura en cuestión.

Según estas corrientes circulan por el suelo que contienen las estructuras en cuestión, parte puede ser recogida por la estructura.

Sin embargo, la corriente debe retornar a su fuente y por lo tanto, se debe descargar en algún lugar de la estructura. La corrosión ocurrirá en puntos de descarga de la corriente parásita hacia el electrolito.

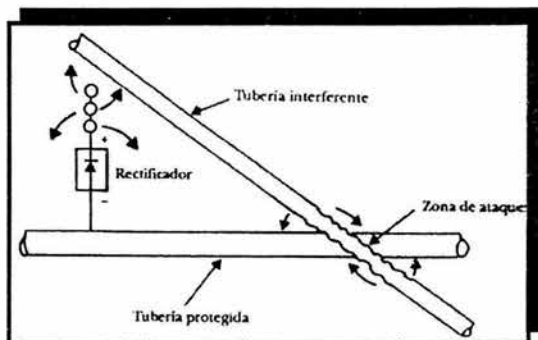


Figura II.17 Corrosión causada por corrientes parásitas.

II.2.13 Diseño incorrecto de la protección catódica.

Una protección catódica mal diseñada puede dar como resultado daños de corriente parásita hacia otras estructuras vecinas.

Por otro lado, la aplicación de una corriente de protección catódica excesiva puede tener como resultado daños a la estructura protegida, desprendiendo el recubrimiento y aunque éste tipo de daño no es corrosión, es igual de, o quizás más dañina que ésta.

II.2.14 Tubería nueva y tubería vieja.

La tubería nueva tiene un potencial diferente al de la tubería vieja, y se convertirá en el ánodo cuando se solde a la tubería vieja. La protección catódica puede superar este mecanismo.



II.2.15 Célula diferencial de aireación en cruces de carreteras.

El pavimento de las carreteras restringe el suministro de oxígeno a la tubería que está bajo la carretera y crea una célula diferencial de oxígeno. Las tuberías sin protección catódica a menudo tienen problemas de corrosión en las áreas de cruces de carretera.

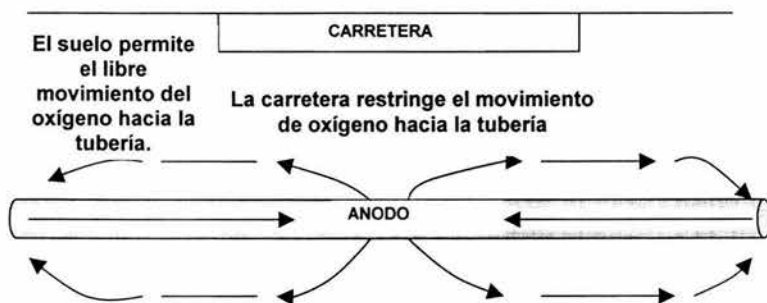


Figura II.18 Corrosión causada por una diferencia de aireación.

II.2.16 Acero en concreto.

La corrosión en estas estructuras, muestra tres zonas importantes:

- Una zona completamente sumergida de la estructura, que puede presentar algún grado de corrosión no muy alto, en el que el acero se corroe a muy baja razón. Aún cuando el nivel de Cloruros en esta sección sumergida excede el límite requerido para iniciar la corrosión en el acero de refuerzo, la disponibilidad de oxígeno en la interfase concreto-acero se convierte en un factor de control. La difusión del oxígeno en concreto totalmente saturado es muy bajo y solo puede soportar bajas tasas de corrosión.
- Una zona intermedia, la más importante desde el punto de vista de la corrosión; comprendida entre la alta y baja marea o Zona de Splash. Un continuo humedecimiento seguido por un secamiento, prevé al concreto tanto de altas concentraciones de Cloruros como de suficiente oxígeno. Esta



situación tiende a ser peor por el desarrollo de macrocélulas entre regiones altas de la estructura de concreto; las cuales aún no sufren de corrosión pero disponen de Oxígeno en grandes cantidades y con la presencia de Cloruros terminan por corroer esta zona. Un alto porcentaje de corrosión ocurre en la zona de Splash.

- Inmediatamente arriba de la zona Splash generalmente presenta un menor grado de corrosión debido a dos causas: primera, los Cloruros son transportados allí por el viento en menor cantidad y segunda el contenido de humedad del concreto es bajo.

II.2.16.1 Agentes que impiden que el concreto proporcione protección contra la corrosión.

El concreto confiere una buena protección al hacer de refuerzo tanto química como físicamente. Proporciona un ambiente alcalino que envuelve al acero proporcionando la formación de una capa de óxido, llamada "**capa pasivante**" que lo protege contra la corrosión. El recubrimiento de concreto protege a la estructura de acero de la humedad y de los agentes iniciadores de la corrosión. El grado de protección que el concreto le pueda dar a la varilla depende principalmente de las propiedades del mismo, del espesor del recubrimiento y de aplicar buenas prácticas de construcción. Generalmente el concreto es atacado por sustancias químicas en solución que sobrepasan un determinado nivel de concentración. El concreto es más vulnerable cuando se encuentra bajo el ataque de sustancias agresivas en solución ejerciendo presión sobre su superficie, pues la presión tiende a reforzar la entrada de la solución agresiva. Entre las principales causas por las cuales el concreto no proporcione la protección adecuada al acero se mencionan a continuación:

a) Sulfatación.

Algunos sulfatos están en forma natural en el suelo, agua subterránea o ambiente marino y al estar en contacto con el concreto le ocasiona daños. Existen dos reacciones químicas en el ataque de concreto por sulfatos.



1. Combinación de los sulfatos con hidróxido de calcio (Ca(OH)_2 , cal hidratada) liberado durante el proceso de hidratación del cemento. De esta combinación se obtiene sulfato de calcio (CaSO_4 , yeso).
2. Combinación de yeso y aluminato de calcio hidratado (C_4AlH_6) para formar sulfoaluminato de calcio ($\text{C}_3\text{Al}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$, estrigita).

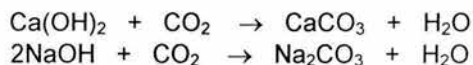
Estas dos reacciones dan como resultado un aumento de volumen. Debido a la segunda reacción se producen expansiones y rupturas del concreto causadas por soluciones de sulfatos que están en contacto con la superficie del concreto y producen un debilitamiento y desintegración de éste.

b) Carbonatación.

El aire contiene normalmente dióxido de carbono (CO_2) que en la atmósfera es del orden de 0.003%; al estar en contacto con el concreto reacciona con los hidróxidos que hay en éste. Al ocurrir estas reacciones se reduce la alcalinidad del concreto reduciendo así su eficacia como medio protector. Este proceso se le conoce como “**carbonatación**”.

El proceso de carbonatación se lleva a cabo de la siguiente manera:

El aire que está en contacto con la superficie del concreto penetra por los poros capilares y el CO_2 que contiene reacciona rápidamente con los hidróxidos en la solución del poro:



El aire entra a los poros y ya no contiene dióxido de carbono, creándose de esta manera una diferencia de concentración de CO_2 entre el aire del exterior y del interior. Esta diferencia produce la difusión de más CO_2 atmosférico hacia el interior de los poros

Los productos precipitados durante la reacción del CO_2 con los hidróxidos disminuyen la permeabilidad del concreto y reducen el pH de la solución del



poro. Si la carbonatación continúa, entonces la fase sólida de la pasta de concreto también reacciona con el CO_2 desligando los cloruros de los cloroaluminatos incrementando de esta manera el peligro de corrosión.

La principal consecuencia de la carbonatación es la caída abrupta del pH de la solución del poro y por lo tanto aparece un **“frente de carbonatación”** separando dos zonas, una hacia la superficie, con un pH menor de 8 y otra hacia el interior del concreto arriba de 12. Estas zonas se pueden distinguir fácilmente por medio de un indicador de pH, como la fenolftaleína, sin embargo, se han desarrollado algunas investigaciones para obtener otros métodos de medición.

Cuando el frente de carbonatación llega al refuerzo, la capa pasiva se vuelve inestable rompiendo la protección que le confiere al acero e iniciándose el proceso de corrosión. Este último, en este caso, es generalizado y homogéneo, tal y como si el refuerzo estuviera simplemente expuesto a la atmósfera sin ninguna protección, pero con el agravante de que la humedad permanece en el interior del concreto y por lo tanto en contacto con el acero durante más tiempo.

Dicha circunstancia produce, a lo largo, una reducción en la sección transversal de la barra y una cantidad significativa de óxidos y productos de corrosión, los cuales pueden inducir esfuerzos de tensión en el concreto agrietándolo o bien pueden difundir a través de los poros hasta la superficie del concreto produciendo manchas en el acabado. Cuando la carbonatación se produce en un concreto que contiene cloruros, los efectos dañinos de la primera se suman a los dos segundos y generan una corrosión severa.

c) Cloruros.

Cuando los cloruros están presentes desde el agua de masado o penetran desde el medio ambiente, el concreto deja de proteger al acero iniciándose la despasivación cuando ellos tienen contacto con éste.

La situación más agresiva y común que puede desencadenar la corrosión localizada en el acero de refuerzo del concreto es la presencia de cloruros.



Existen otros iones despasivantes, como los sulfuros y sulfatos, pero son menos frecuentes y peligrosos que los cloruros.

El ingreso de cloruros puede ocurrir varias formas del exterior a través de los poros del concreto, por la adición durante la fabricación o por el uso de materiales contaminados.

Los cloruros también pueden ingresar al concreto a través de aditivos acelerantes del fraguado, o reductores de agua. Por ejemplo, en muchos países se ha prohibido el uso de CaCl_2 como acelerante del fraguado por su elevada agresividad en la corrosión del acero de refuerzo.

En países con clima frío, el empleo de NaCl para evitar la formación de hielo provoca un severo deterioro por corrosión del acero de refuerzo.

En las regiones tropicales de México, la principal fuente de contaminación de cloruros es la sal proveniente de la brisa marina en las costas.

II.2.16.2 Mecanismo de penetración de cloruros.

Los cloruros pueden penetrar al concreto por capilaridad del agua salada en el concreto más ó menos seco a través de la red de poros. Por medio de este proceso, el agua salada puede penetrar con gran rapidez produciendo daños severos por corrosión en poco tiempo.

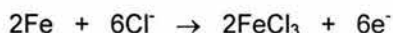
En cambio, en las estructuras sumergidas, los cloruros pueden penetrar principalmente por difusión, debido al gradiente de concentración de la solución de poro. Con base en cierta hipótesis es posible modelar el fenómeno de difusión en el concreto.

Mecanismo de ataque de cloruros.

Una vez que han llegado a la barra de refuerzo en cantidades suficientes, los cloruros pueden destruir la pasividad natural del acero de refuerzo provocando su corrosión. Aún se discute el mecanismo por el cual estos



iones destruyen la pasividad, sin embargo, se han propuesto varias teorías, entre ellas, la de **"formación de compuestos"**. Esta teoría plantea que los cloruros libres forman un compuesto soluble con el hierro.



Que difunde hacia otra zona alejada del ánodo, donde el pH y la concentración de oxígeno disuelto son altos. En consecuencia, el compuesto se disocia precipitando el hidróxido de hierro y liberando los iones cloruro:



Debido a que los cloruros no se agotan en este proceso y la corrosión no se detiene por la alta concentración de hierro en la vecindad del acero, el proceso puede continuar por sí mismo. Los iones de hierro migran desde el acero y reaccionan con el oxígeno para formar óxidos de hidróxidos. Por lo tanto, en vez de que la corrosión se propague a lo largo de la estructura de acero, continúa en las zonas anódicas, desarrollándose picaduras profundas.

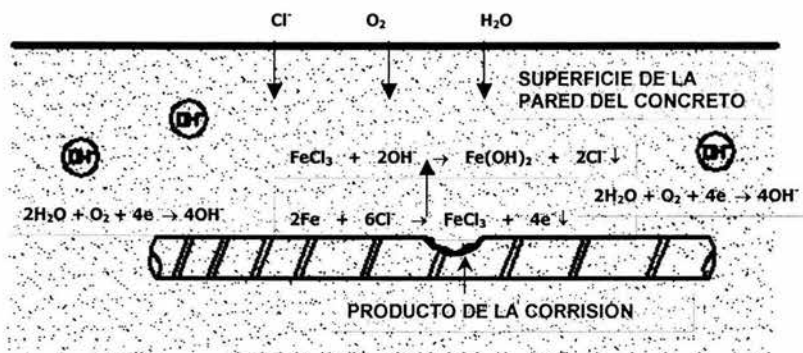


Figura II.19 Corrosión causada por picadura debido al ataque de Cloruros.



En general estas teorías que sólo los cloruros libres, es decir los disueltos en la solución de poro, participan en el proceso de corrosión. Sin embargo, es posible que los cloruros que se han unido a algún compuesto de hidratación del cemento rompan este enlace y regresen otra vez a la solución.

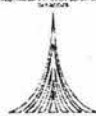
Factores que afectan a la corrosión del acero embebido en concreto depende de diversos factores entre los que se encuentran los que a continuación se mencionan:

- Factores que dependen del concreto.
- Factores que dependen del acero.

Factores que dependen del concreto

- Permeabilidad.** La acción pasivante del concreto, debida a su elevada alcalinidad puede ser mantenida sólo por la protección física y durabilidad de éste. La permeabilidad depende de la relación agua/cemento, tamaño de grava, métodos de compactación y curado.
- Porosidad.** En las pastas de cemento existen dos tipos de poros: Poros de gel (pequeños poros entre la pasta) y poros capilares (poros más grandes entre las partículas de gel). Y existe otro tipo de porosidad relativamente grande que se forma por debajo de la grava. Esas porosidades pueden ser ocupadas por gases ó líquidos y provocar corrosión. Las características físicas del concreto como aislantes están relacionadas con la estructura de la red de poros que se genera, debido al exceso de agua que es necesario utilizar en la mezcla (fabricación de concreto) para hacer suficiente trabajable el cemento. La porosidad total está constituida tanto por los poros cerrados como por una red de poros cuyos tamaños oscilan entre unos pocos Å a 100 Å hasta el orden de mm.

Todos están comunicados entre si y están relacionados con lo que se denomina permeabilidad, que no es otra cosa sino la característica fundamental que va a controlar la llegada de agentes hasta el acero de refuerzo.



- c. **Tipo de cemento.** Todos los cementos producen una alcalinidad suficiente en el agua de sus poros como resultados de la hidratación de los componentes anhidros del cemento, situando al acero en una región de pH entre 12 y 14, en la cual se pasiva. Se tienen reportados decrementos en la magnitud de las concentraciones de cloruros solubles en pastas de cementos endurecidas y conteniendo un 2% de CaCl_2 en el agua de amasado, de hasta cinco órdenes de magnitud, cuando la composición de Ca_3Al (aluminio tricálcico) aumenta de 0 a 12.6%. Concretos que se prepararon con cementos similares mostraron menos grietas cuando los contenidos de Ca_3Al fueron altos.
- d. **Agregados (grava, arena y finura).** Contribuyen a la corrosión en virtud de que pueden arrastrar consigo sustancias peligrosas como son las sales de cloruros o sulfatos que pueden contaminar los agregados. Sin embargo, es posible que los contaminantes vengan ya con el material, como por ejemplo, la arena que se utiliza en las construcciones de las zonas costeras, ya que son altas en contenido de cloruros.
- e. **Finura.** Esta tiene un gran efecto en la corrosión, ya que un cemento con alto contenido en finos puede mostrar una mayor concentración al fraguar que otro con bajo contenido de finos. Esto aumenta la probabilidad de fractura del concreto, permitiendo la rápida penetración de agentes agresivos. También un aumento en la finura del cemento causa que la demanda de amasado sea mayor, incrementando entonces la relación neta de agua/cemento (a/c) y por lo tanto, la permeabilidad del concreto. Los cementos que contienen escoria granulada de alto horno también pueden tener influencia, ya que pueden contener hasta 1% de sulfuros y, éstos también pueden ocasionar la corrosión.

Existen otros factores que no por ser menos importantes no deben de tomarse en cuenta como son:

- Aditivos
- Espesor del recubrimiento
- Puesta en obra.



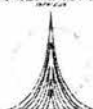
Factores que dependen del acero.

- Naturaleza Química.
- Naturaleza Física.
- Condición Superficial (óxido superficial, metalizados, recubrimientos orgánicos).
- Propiedades Mecánicas (tensión, compresión y torsión).

Si la superficie metálica está llena de heterogeneidades, existirán diferencias en el potencial efectivo estableciéndose celdas de corrosión química sobre la superficie, capas discontinuas o aún, diferencias en la textura. Otra posible fuente de diferencias se debe a los esfuerzos estáticos o cíclicos presentes en el acero de refuerzo.

Otros Factores que dependen del acero.

- Humedad Relativa.
- Degradación Biológica.
- Acción de diversas sustancias como Cl^- , O_2 , SO_4 , SO_2 , CO_2 .



CAPÍTULO III

EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

III.1 Breve historia.

En el año de 1800, Volta describió cómo producir una corriente eléctrica al apilar discos de cobre, plata o latón juntándolos con discos de zinc, de tal forma que cada par de disco estaba separado por un material absorbente impregnado con agua salada. Sir Humphrey Davy llevó a cabo experimentos con los cuales demostró que en cada caso los discos metálicos permanecían intactos. Experimentos posteriores realizados por Davy lo llevaron a establecer el concepto de las series electroquímicas.

En el año de 1823, se le atribuye al inglés Davy la paternidad del descubrimiento de la protección catódica. Por encargo de la Real Sociedad, Davy comenzó a estudiar métodos que previnieran la corrosión en el revestimiento exterior de cobre de los barcos de la marina Inglesa. Los resultados de estos estudios establecieron el concepto de la protección catódica por ánodos sacrificables. Davy consideró la posibilidad de la protección catódica de corriente impresa, pero pensó que el uso de pilas eléctricas en aquella época era impráctica, para proteger la envoltura de cobre de los buques de guerra británicos utilizó, por vez primera, bloques de zinc, con lo que se inició lo que se conoce en la actualidad como protección catódica. La realización de la protección catódica con ánodos de sacrificio o galvánicos se lleva a cabo normalmente con tres metales característicos: Zinc (Zn), Magnesio (Mg), Aluminio (Al) y sus aleaciones. El zinc ha sido siempre el material anódico clásico, y es el pionero en el desarrollo de la protección catódica. Los ánodos de aleaciones de magnesio han sido también utilizados con éxito; principalmente se emplean para la protección de estructuras que requieren de una polarización rápida, o en medios agresivos de resistividad elevada, como los suelos. El aluminio es un material anódico de gran interés por sus características electroquímicas. Sin embargo, la obtención de aleaciones de aluminio adecuadas para ánodos de sacrificio ha sido más lenta que las de los dos otros metales, que en los últimos años han tenido un gran desarrollo.

En el año de 1890 Edison trató de lograr la protección catódica por corriente impresa de un barco en alta mar por medio de un ánodo que éste remolcaba.



En el año de 1911, Herman Gebbert, de nacionalidad alemana, obtuvo una patente que describía "un método para proteger a los objetos de las corrientes parásitas". El objeto principal de la patente está formulado de tal forma que abarca también la protección catódica por ánodos de corriente impresa.

Aproximadamente al mismo tiempo que se empezaron a usar tranvías eléctricos, también aparecieron los cables subterráneos con forro de plomo para el cableado telefónico. Los primeros diseños para los tranvías especificaban que el polo positivo de la fuente CD (Corriente Directa) estuviese conectado directamente a los rieles del tranvía, y el polo negativo estuviese conectado al cable aéreo del tranvía. Parte de esta corriente tomaría una vía paralela a los rieles y regresaría a la barra colectora negativa, a través del suelo. Esto significaba que otras estructuras subterráneas estaban recogiendo corrientes parásitas en la vecindad del generador y descargando corriente en los puntos más alejados de éste. Por lo tanto, una corrosión ocurría en las estructuras en las márgenes de la ciudad.

La primera constancia que se tiene de algún tipo de cooperación entre los proveedores de servicios públicos con respecto al problema de interferencias producidas por corrientes parásitas es en Boston cuando la compañía ATT y la compañía local dueña de los tranvías se unieron para estudiar el problema. Los resultados obtenidos en este estudio resultaron en la inversión de la polaridad del generador.

Los servicios subterráneos entonces experimentaron un ligero grado de protección catódica en los puntos alejados del generador y una corrosión acelerada en las cercanías del generador. La corriente "parásita" era entonces "disipada" a la barra colectora negativa del generador a través de un cable. Según este sistema se adoptó en otras ciudades, la corrosión de servicios públicos subterráneos dejó de ser un problema mayor.

Cuando los tranvías comenzaron a desaparecer en la década del los 30's, las compañías de servicios públicos comenzaron a tener problemas de corrosión normales y entonces se dieron cuenta del beneficio que se había obtenido por el flujo de la corriente de los tranvías. Este descubrimiento ocurrió simultáneamente con la expansión extensa de la construcción de oleoductos en los Estados Unidos como consecuencia del desarrollo de recursos de gas natural y petróleo. Se empezaron a requerir nuevas técnicas para introducir corriente directa (CD) en la tierra y el resultado de esto fue un desarrollo más amplio de la protección catódica impresa.



En el año de 1931 se llevaron a cabo experimentos en el estado de Texas en un tramo de 4 millas de largo de un oleoducto de 6" de diámetro.

La cama de ánodos consistió de tubería de desecho colocada a una distancia aproximada de 1200 pies del oleoducto.

La conexión negativa al oleoducto se hacía por medio de un cable aéreo. La unidad de rectificación consistía de un transformador y de un banco de 88 válvulas rectificadoras de óxido de cobre. La protección catódica como se conoce ahora en día comenzaba a tomar forma.

En el año de 1936, la Asociación Mid-Continent para protección catódica fue creada para discutir e intercambiar información sobre la protección catódica. Esta se convertía en la base para la creación de la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión.

III.2 Protección catódica.

Ya que la corrosión de los metales en ambientes húmedos es de naturaleza electroquímica, una aproximación lógica para intentar parar la corrosión sería mediante métodos electroquímicos. Los métodos electroquímicos para la protección contra la corrosión requieren de un cambio en el potencial del metal para prevenir o al menos disminuir su disolución.

La protección catódica es un tipo de protección (electroquímico) contra la corrosión, en el cual el potencial del electrodo del metal en cuestión se desplaza en la dirección negativa. Los principios de la protección catódica pueden ilustrarse mediante un diagrama termodinámico potencial - pH, como se muestra en la Figura III.1, en el caso del hierro (Fe).

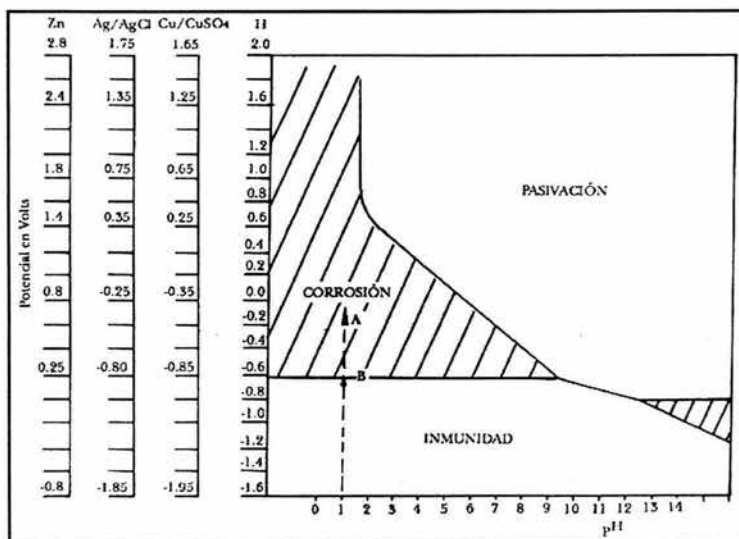


Figura III.1. Diagrama potencial -pH para el Hierro (Fe) [2].

Si se considera una muestra de acero al carbono sumergido en una solución de ácido clorhídrico (HCl) de concentración 0.1M. La reacción que se llevará a cabo hará que el acero se disuelva con desprendimiento de hidrógeno (H₂).

El potencial de corrosión del espécimen quedará entre los potenciales de equilibrio correspondientes al electrodo de H₂ y Fe (puntos A y B en la Figura III.1).

De acuerdo con el diagrama, hay un camino para prevenir la corrosión mediante un cambio de potencial. Aplicando una corriente catódica, el potencial del espécimen de acero se desplazará en la dirección negativa, hacia la zona de inmunidad, en la cual el metal, termodinámicamente, se encuentra estable (no se puede corroer). Para lograr este desplazamiento del potencial en la dirección negativa, el objeto que se corroe se une eléctricamente a un metal más negativo en la serie electroquímica, un ánodo, formando una celda galvánica en la que actuará como cátodo. Para que el metal esté protegido catódicamente, el valor de su potencial de electrodo tiene que quedar por debajo de su potencial de corrosión en la solución mencionada. Su disolución será así prevenida totalmente (protección catódica completa) o al menos disminuirá (protección catódica incompleta). Como consecuencia de la corriente que circule en la celda



galvánica formada, en el metal protegido catódicamente tendrá lugar el desprendimiento de hidrógeno o la reducción de oxígeno.

III.3 Fundamentos de la protección catódica

Como se ha señalado, para que exista la corrosión electroquímica o húmeda, como se le conoce también, es fundamental que se ponga en funcionamiento una pila galvánica que denota la existencia de un *ánodo*, un *cátodo* y un *electrolito*. En el momento en que uno de estos tres elementos básicos para el funcionamiento de una pila falle, ésta dejará de funcionar y por tanto se detendrá la corrosión.

Los sistemas de protección contra la corrosión están basados en la eliminación de alguno de estos elementos o en hacerlos inoperantes.

El procedimiento que elimina todos los ánodos de la superficie metálica haciéndola toda catódica, se conoce con el nombre de *protección catódica*.

Para conseguir que una superficie metálica se convierta en un cátodo totalmente se tienen los siguientes procedimientos:

- a. Conectando el metal que se trata de proteger a otro menos noble que él, es decir, más negativo en la serie electroquímica (Figura III.2). Este sistema se conoce como "**protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio**" y consiste realmente en la creación de una pila galvánica en que el metal a proteger actúe forzosamente de cátodo (polo positivo de la pila), mientras que el metal anódico se "sacrifica", o sea que se disuelve (Figura III.2). Como el metal más comúnmente utilizado en la práctica por su bajo precio y alta resistencia mecánica es el acero, los metales que se puedan conectar a él y que deben tener un potencial más negativo quedan reducidos en la práctica son el zinc (**Zn**), aluminio (**Al**), magnesio (**Mg**) y a sus aleaciones. Y así como también la "**protección catódica por corriente impresa**".

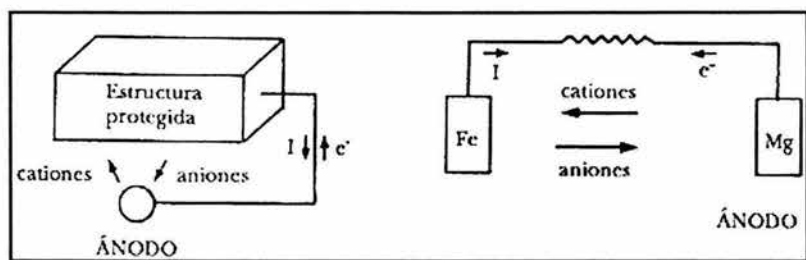
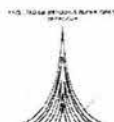


Figura III.2. Protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio^[2].

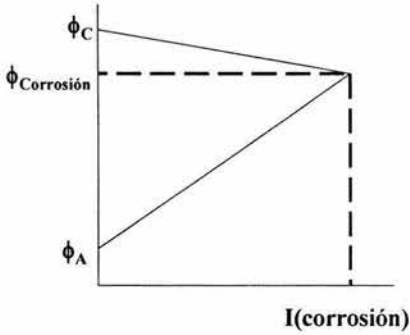
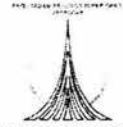
La protección catódica se basa en la existencia de un potencial y de una zona de inmunidad, en el correspondiente diagrama de estabilidad termodinámica o diagrama potencial - pH. Si consideramos este diagrama para el caso del hierro (acero), se puede observar en él que están perfectamente delimitadas las zonas de corrosión, inmunidad y pasividad. Para poder pasar el hierro a la zona de inmunidad hay que rebajar su potencial a un valor de -0.62 V con respecto al electrodo de referencia de hidrógeno, que equivale a -0.80 V con respecto al Ag/AgCl . Esta será, pues, otra definición de la protección catódica. La densidad de corriente que será necesario aplicar para conseguir rebajar el potencial de la estructura a proteger (-0.80 V) al valor señalado. Éste será un dato de gran valor ya que influirá directamente en la economía del sistema.

El sistema de protección catódica está basado en dos principios generales:

1. El acero se corroe porque la porción, del material en el suelo o en algún otro medio propicio, y son anódicos y otros son catódicos.
2. La corrosión no ocurrirá si toda la porción del acero es catódico.

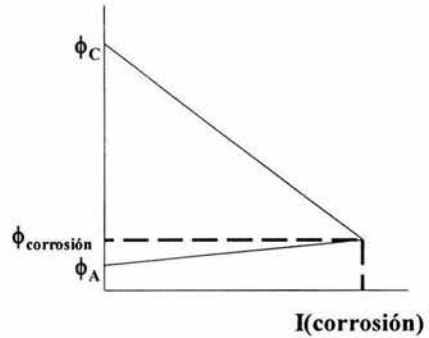
Por lo tanto, el éxito de la protección es hacer un cátodo del acero. Esto se hace aplicando una corriente en el ducto y proveyendo un ánodo el cual se corroerá en lugar de la tubería. Esto no sólo reducirá la corrosión sino que la parará.

De un estudio de varios tipos de celdas de corrosión, sabemos que tan pronto, una celda inicia a conducir una corriente eléctrica, un proceso llamado **polarización** toma lugar en el cual la diferencia de potencial de cada celda se reduce hasta una condición existente de equilibrio. Estas celdas de equilibrio pueden existir en varios estados.



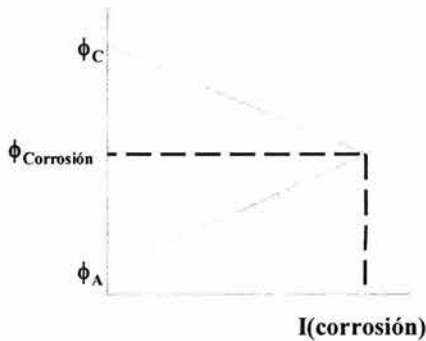
ϕ : Potencial

Figura III.3. Protección catódica por control anódico.



ϕ : Potencial

Figura III.4. Protección catódica por control Catódico.



ϕ : Potencial

Figura III.5. Protección catódica por control mezclado.

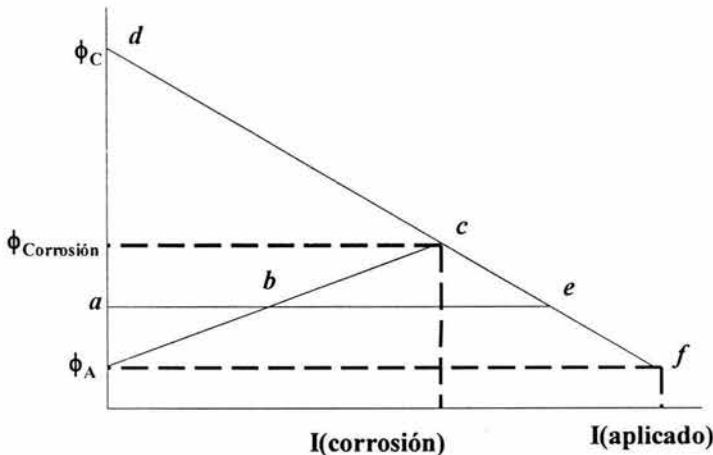
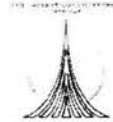
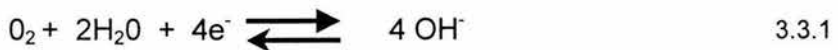


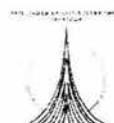
Figura III.6. Diagrama de Polarización ilustrando el principio de la Protección catódica.

Al aplicar una corriente extra de un dispositivo externo, todas las celdas pueden estar bajo control catódico. Esta corriente extra puede estar identificada por ΔI , el cual es necesaria para la protección catódica y de esta manera la estructura enterrada pasa a convertirse en un cátodo. Para hacer esto nosotros tuvimos que haber tenido un ánodo externo. Si es más alta en la serie electropositiva, entonces el acero y el electrolito pueden conducir la corriente eléctrica, y esto sirve como una celda de protección catódica. Si el acero es usado como un ánodo externo, entonces la fuente de corriente directa puede estar funcionando. Esto es usualmente proporcionado por un rectificador.

El resultado será que la estructura protegida es ahora polarizada así que la superficie es catódica y no sufrirá corrosión.

En los sistemas en corrosión en los cuales la reacción catódica predominante es la reducción del oxígeno, O_2 , agua de mar por ejemplo, según la formula 3.3.1





Se tiene un control catódico. La intensidad de corriente depende de la disponibilidad del O_2 que llega a la interfase metal/electrolito, la cual está limitada por la velocidad con que el O_2 llega del seno del electrolito hasta la interfase.

Por lo general, un sistema de protección catódica puede considerarse como una pila o celda galvánica. Teniendo en cuenta una micropila de corrosión cualquiera, como la que se muestra en la Figura III.7(a), o un esquema equivalente de la misma (Figura 15(b)), se tiene:

$$I_a = I_c = I_o = I_{corr} \dots\dots\dots 3.3.2$$

En esta misma figura, E_a es el potencial del ánodo, E_c el potencial del cátodo, R_a la resistencia del ánodo y R_c la resistencia del cátodo. Existe siempre una resistencia asociada al ánodo y al cátodo que limita la corriente producida por una pila de corrosión, I_o , que como se desprende del circuito eléctrico de la Figura III.7(b), debe ser igual a la corriente que circula por ambos electrodos, I_a e I_c , o sea: conocida como la corriente de corrosión de la pila I_{corr} .

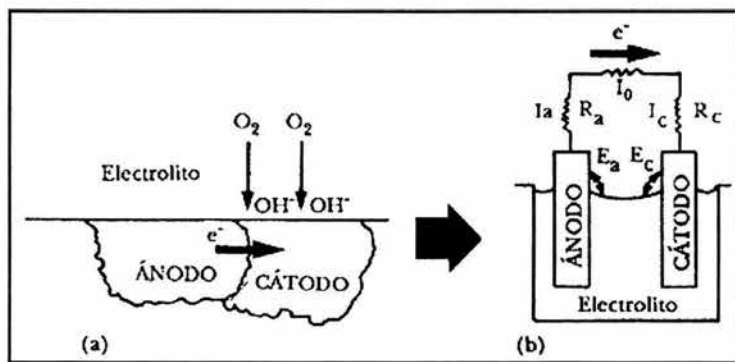


Figura III.7^[2]. (a) Micropila corrosión. (b) Esquema eléctrico equivalente.

Si se introduce en el sistema anterior un tercer electrodo, un ánodo galvánico, designado como P, tendremos una pila con tres electrodos (Figura III.8). Si aplicamos la ley de Kirchoff se obtiene:



$$I_c = I_a + I_p \dots\dots\dots 3.3.3$$

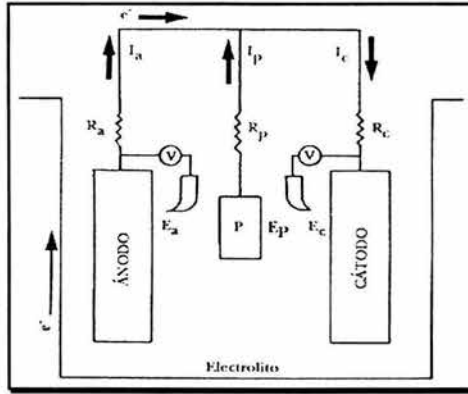


Figura III.8. Esquema eléctrico equivalente^[2].

La fuerza electromotriz (FEM) entre el ánodo y el cátodo es:

$$E_c - E_a = I_c * R_c - I_a * R_a \dots\dots\dots 3.3.4$$

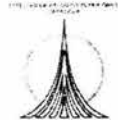
Y como

$$I_c = I_a + I_p \dots\dots\dots 3.3.5$$

Resulta:

$$E_c - E_a = (I_a + I_p)R_c + I_a * R_a = I_a * R_c + I_p R_c + I_a R_a \dots\dots\dots 3.3.6$$

$$E_c - E_a = I_a(R_c + R_a) + I_p R_c, \dots\dots\dots 3.3.7$$



De donde, despejando I_a se tiene lo siguiente:

$$I_a = \frac{(E_c - E_a) - I_p * R_c}{R_c + R_a} \dots\dots\dots 3.3.8$$

Por otro lado,

$$\frac{E_c - E_a}{R_a + R_c} = I_o \dots\dots\dots 3.3.9$$

Y haciendo

$$\frac{R_c}{R_a + R_p} = K \dots\dots\dots 3.3.10$$

Haciendo que $K I_p = I_o$, se tiene que $I_a = 0$, o sea la condición de que la corriente de corrosión sea cero, para lo cual se tiene que cumplir que

$$I_p = \frac{I_o}{K} = \frac{R_a + R_p}{R_c} \dots\dots\dots 3.3.11$$

$$I_a = I_o - K * I_p \dots\dots\dots 3.3.12$$

Anulando así la corriente de corrosión, se proporciona el sistema de protección.

III.4 Propiedades de un material anódico

Tomando en cuenta la serie electroquímica de los metales (Cuadro 3), un metal tendrá carácter anódico respecto de otro si se encuentra arriba de él en dicha serie. Así, por ejemplo, el hierro será anódico con relación al cobre y catódico respecto al zinc. El metal que actúa como ánodo que se "sacrifica" (se disuelve) en favor del metal que



actúa como cátodo; por esto el sistema se conoce como **protección catódica con ánodos de sacrificio**. Lo anterior se ilustra en un esquema de la Figura III.9.

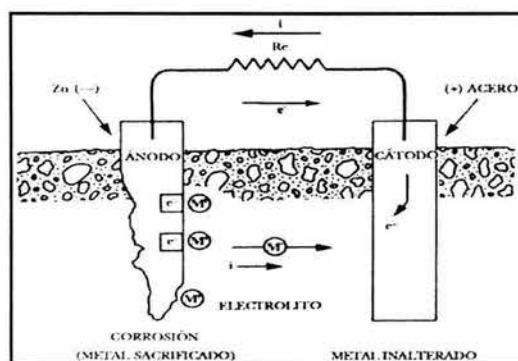


Figura III.9. Mecanismo de protección catódica con ánodo de sacrificio^[2].

Las propiedades que debe reunir un material anódico son las siguientes:

- 1) Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo como para polarizar la estructura de acero (que es el metal que normalmente se protege) a -0.80 V. Sin embargo, el potencial no debe ser excesivamente negativo ya que eso motivaría un gasto innecesario de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre -0.95 V y -1.7 V.
- 2) Cuando el metal actúe como ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, no debe desarrollar películas pasivantes protectoras y debe tener un elevado sobrepotencial para la formación de hidrógeno.
- 3) El metal debe tener un elevado rendimiento eléctrico, expresado en amperes-hora por kg. de material (Ah/kg.) lo que constituye su capacidad de drenaje de corriente.



- 4) En su proceso de disolución anódica, la corrosión deberá ser uniforme.
- 5) El metal debe ser de fácil adquisición y deberá de poderse fundir en diferentes formas y tamaños.
- 6) El metal deberá tener un costo razonable, de modo que en conjunción con las características electroquímicas correctas, pueda lograrse una protección a un costo bajo por ampere-año.

Estas exigencias ponen de manifiesto que solamente el zinc, el magnesio y el aluminio y sus respectivas aleaciones pueden ser considerados como materiales para ser utilizados prácticamente como ánodos de sacrificio.

III.5 Características electroquímicas del zinc (Zn), Magnesio (Mg) y aluminio (Al).

Las propiedades que deben reunir los materiales anódicos para que puedan ser utilizados como tales en la práctica, remiten, pues, al **Zn**, **Al** y al **Mg** como metales seleccionados. Otros posibles candidatos, como los metales alcalinos (**Li**, **Na**, **K**) y los alcalino-térreos (**Be**, **Ca**, **Sr**), quedan descartados porque son demasiado activos (tienen un sobrepotencial de hidrógeno pequeño y un potencial de disolución muy elevado) y otros, como el cromo (**Cr**), porque son fácilmente pasivables.

En una reacción electroquímica, un metal se disuelve de acuerdo con la ley de Faraday, la cual dicen que, prácticamente, el paso de una cantidad de corriente de 96 500 coulombs (número de Faraday) disuelve una cantidad equivalente de cualquier elemento químico. Por tanto, si una cantidad de electricidad de **Q** coulombs pasa la cantidad de metal disuelto será:

$$QC = \frac{1 \text{equiv}}{96500C} \times \frac{1 \text{mol}}{n - \text{equiv}} \times \frac{P.A. - g}{1 \text{mol}} = p.g. \dots \dots \dots 3.5.1$$



Tomando en cuenta que:

1 Coulomb = Ampere multiplicado por segundo, tenemos que:

$$p = I \times t \times \frac{P.A. - g}{n \times 96500} \dots\dots\dots 3.5.2$$

En donde:

- p** = peso en gramos de metal disuelto
- I** = intensidad de la corriente en amperes (A)
- t** = tiempo en segundos (s)
- P.A.** = peso atómico del metal en gramos (g)
- n** = valencia del elemento, número de electrones que pierde el metal al disolverse.

El cociente P.A./96 500 X n es el equivalente electroquímico.

De esta manera se puede calcular la cantidad de metal consumido para suministrar la cantidad determinada de corriente. Estos datos se presentan en la Tabla III.1.



Tabla III.1. Propiedades físicas y electroquímicas del Mg, Zn y Al^[2].

PROPIEDADES	Mg	Zn	Al
Peso atómico (g)	24.32	65.38	26.97
Peso específico a 20°C, g/cm ³	1.74	7.14	2.70
Punto de Fusión (°C)	651	419.4	660.1
Resistividad eléctrica (Ω-cm)	4.46 X 10 ⁻⁶	6.0 X 10 ⁻⁶	2.62 X 10 ⁻⁶
Valencia	2	2	2
Equivalente-gramo	12.16	32.69	9.00
Equivalente electroquímico (mg/C)	0.12601	0.3387	0.0931
Capacidad eléctrica teórica (A-h/kg)	2204	820	2982
Capacidad eléctrica teórica (A-h/dm ³)	3836	5855	8501
Capacidad eléctrica práctica (A-h/kg)	1322	738	1491
Rendimiento de corriente (%)	60	60	60
Consumo Teórico (kg/A-año)	3.98	10.69	2.94
Consumo Teórico (dm ³ kg/A-año)	2.3	1.5	1.1
Potencial Normal 25°C (V vs Ag/AgCl)	-2.63	-1.05	-1.93
Potencial disolución en agua de mar (V vs Ag/AgCl)	-1.55	-1.05	-1.85

Estos valores consideran que el metal no sufre autocorrosión, es decir, que se utiliza íntegramente para producir corriente. Para un rendimiento de corriente del 100%, el aluminio es el que sufrirá la pérdida de peso más pequeña ya que, es el que proporciona mayor capacidad eléctrica, o sea el mayor número de coulombs por kg de metal disuelto. Siguiendo el razonamiento, para suministrar una misma intensidad de corriente, sobre la base de un rendimiento en corriente del 100% (digamos 2 982 A-h), necesitaríamos 1 kg de aluminio, 3.64 kg de zinc y 1.35 kg de magnesio, lo cual implica, en porcentajes, un rendimiento práctico para el zinc de 27.5% y para el magnesio de 74% de corriente aproximadamente.



Ahora bien, los rendimientos prácticos no alcanzan nunca el 100%, ya que en la práctica industrial no se pueden fabricar ánodos galvánicos puros, porque resultan incosteables. Los rendimientos normales están entre 50% y 90% del rendimiento teóricamente considerado. En la Tabla III.2 se presentan los valores teóricos y prácticos de la capacidad eléctrica para los metales comúnmente utilizados como ánodos de sacrificio.

III.6 Intensidad de la corriente anódica^[2].

A partir de la ley de Faraday que se enuncia a continuación:

$$W = k I t \dots\dots\dots 3.6.1$$

Donde:

- W= Pérdida de peso
- k= Equivalente electroquímico.
- I= Intensidad de corriente.
- t= tiempo

Para una cantidad conocida de corriente en un tiempo conocido la variable que determinará la pérdida de peso real será el equivalente electroquímico (k). Para cada metal tiene su propio equivalente electroquímico, que es una característica propia del metal.

La Tabla III.2 muestra los equivalentes electroquímicos (en gramos/coloumb) y las relaciones de desgaste de algunos metales (en libras). También se incluye en ésta tabla el volumen de metal que se pierde por amperes por año. Y la pérdida de peso del metal (Lb-A)/Año y la pérdida de volumen (in³ A/año) sirve para ilustrar la cantidad de metal que se pierde de cierta estructura para una cantidad determinada de corriente.



Tabla III.2 Equivalentes electroquímicos y desgaste de metales.

METAL	EQUIVALENTE ELECTROQUÍMICO (g/Colomb)	RELACION DE CONSUMO (Lb/Amp/año)	VOLUMEN DE METAL CONSUMIDO (Amp/Año por in ³)
Carbono (C ⁴⁺)	0.4149E-4	2.89	36.99
Aluminio (Al ³⁺)	0.9316E-4	6.48	69.99
Magnesio (Mg ²⁺)	1.26E-4	8.76	141.47
Hierro (Fe ²⁺)	2.8938E-4	20.12	70.81
Níquel (Ni ²⁺)	3.0409E-4	21.15	67.06
Cobre (Cu ¹⁺)	6.5875E-4	45.81	142.89
Zinc (Zn ²⁺)	3.3875E-4	23.56	90.87
Estaño (Sn ²⁺)	6.1502E-4	42.77	162.43
Plomo (Pb ²⁺)	10.736E-4	74.65	181.68

* El carbono no está realmente clasificado como metal sino como un metaloide, pero se desgasta como un metal

Se puede calcular la intensidad de corriente que es capaz de suministrar 1 kg de metal en su actuación anódica. Ahora bien, este valor está muy lejos de ser significativo, ya que no tiene en cuenta que:

- La intensidad que es capaz de dar un metal en su actuación anódica es función de su forma geométrica; es decir, 1 kg de metal en forma cilíndrica suministrará una intensidad de corriente menor que si tiene forma de estrella. Por otra parte, hay que tener en cuenta que cualquiera que sea su superficie, ésta va disminuyendo a medida que el ánodo se va gastando, lo cual es un factor que habrá que tener en cuenta en el cálculo real de la intensidad.
- El valor obtenido a partir de las ley de Faraday equivale a un rendimiento electroquímico del 100%, que como ya se ha indicado, nunca se puede alcanzar en la práctica. La pila formada por el ánodo galvánico y su estructura darán un valor máximo de corriente en el instante de iniciar su funcionamiento, el cual decrecerá después por los procesos de polarización que tienen lugar en los electrodos. Por otra parte, la autocorrosión que, en mayor o menor grado,



presentan los tres metales empleados como ánodos galvánicos hará siempre que su rendimiento sea inferior al 100%.

Cada tipo de ánodo, sumergido o enterrado, tendrá una resistencia determinada que dependerá de la resistividad del medio (ρ), de su longitud y del llamado radio equivalente y que viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(2.3 \log \frac{4L}{r} - 1 \right) \dots\dots\dots 3.6.2$$

En donde:

- R = resistencia del ánodo, en ohms (Ω)
- L = longitud, en cm
- ρ = resistividad del medio, en ohms por cm (Ω -cm)
- r = radio equivalente, en cm.

El *radio equivalente* es el radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo, cuando éste se haya consumido en 40%. Si la sección del ánodo es: $S = \pi r^2$

Despejando r se tiene:

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi * 0.6}} \dots\dots\dots 3.6.3$$

Cada ánodo podrá suministrar una intensidad de corriente que vendrá fijada por la ley de Ohm

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots 3.6.4$$



En donde:

V = diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección (-0.80 V con respecto al electrodo de referencia Ag/AgCl para el acero).

R = resistencia del ánodo, calculada según la ley de ohm.

III.7 Protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio.

Se fundamenta en el mismo principio de la corrosión galvánica, en la que un metal más activo es anódico con respecto a otro más noble, corroyéndose el metal anódico.

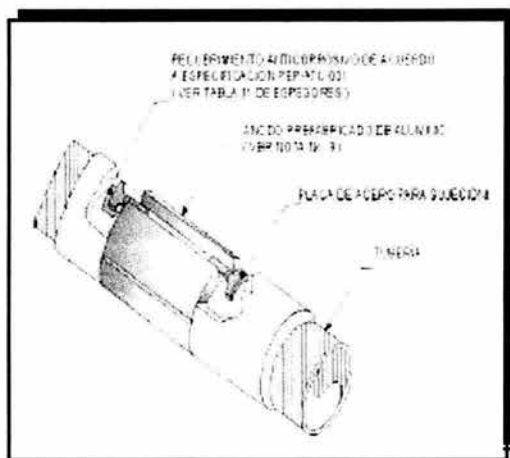


Figura III.10. Ánodo Galvánico de Sacrificio

En la protección catódica con ánodos galvánicos, se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la tubería a proteger, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión, descargando suficiente corriente, para la protección de la tubería.



La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la tubería a proteger, es de bajo valor porque este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, pequeñas estructuras y en medio de baja resistividad.

III.7.1 Vida útil de los ánodos

Un factor importante que se debe tener en cuenta es la duración o "vida" de los ánodos. La vida para cada valor de intensidad de corriente será una función del peso del ánodo (ley de Faraday) y no del número de ánodos que se coloquen. Si se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo y su peso (kg), teniendo en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente (Tabla III.3) así como su rendimiento y su factor de utilización, se puede calcular fácilmente su duración. El factor de utilización puede ser de 85%, ya que, cuando un ánodo se ha consumido, este porcentaje debe sustituirse, pues el material que queda es insuficiente para mantener un porcentaje adecuado de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar.

Tabla III.3. Valores electroquímicos para el cálculo de la vida de los ánodos.

Metal anódico	Capacidad de corriente teórica (A-año/kg)	Rendimiento	Factor utilizado
Zinc (Zn)	0.094	90	85
Aluminio	0.340	90	85
Magnesio	0.251	50	85

La vida del ánodo puede calcularse de la siguiente manera:

Por ejemplo, la vida de un ánodo de Zn de 14 kg de peso, capaz de suministrar una intensidad de corriente de 0.1 A, será:

$$820 \frac{A-h}{kg} \dots\dots\dots 3.7.1$$



Capacidad de corriente.

Teniendo en cuenta que un año tiene **8 760 horas**

$$0.094 \frac{A - \text{año}}{kg} \dots\dots\dots 3.7.2$$

Rendimiento **90%**

Factor utilizado de 85%. Por tanto, su:

$$Vida \frac{0.094 \times 14 \times 0.9 \times 0.85}{0.1} = 10.07 \dots\dots\dots 3.7.3$$

III.7.2 Fijación de los ánodos

Los ánodos se pueden colocar en la estructura a proteger con distintos procedimientos, pero siempre con ayuda del alma que los atraviesa que suele ser redonda y de acero. Los extremos que sobresalen del alma pueden doblarse ligeramente y soldarse, lo que es el caso más común. Ahora bien, se utilizan también con frecuencia sistemas de grapas o espárragos o simplemente se atornillan.

Cuando van enterrados se introducen en una bolsa de tela y son rodeados de una mezcla de componentes de baja resistividad que proporcionan un funcionamiento homogéneo del ánodo. Por medio de un cable se une el alma de acero del ánodo con la estructura que se quiere proteger (en la Figura III.11 se presenta el detalle de instalación de ánodos de sacrificio).

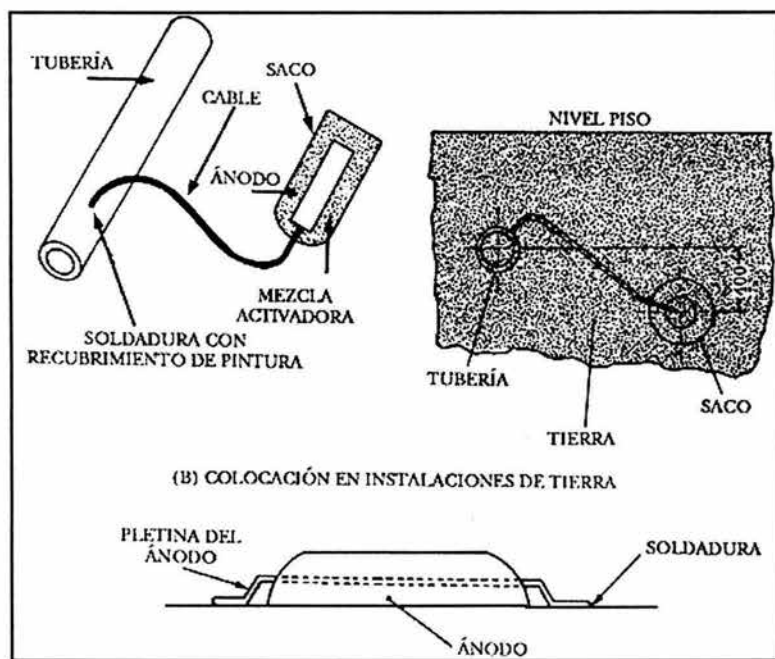


Figura III.11. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio.

III.7.3 Relleno Backfill.

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos entre ellos el de Backfill especialmente con ánodos de Zinc y Magnesio, estos productos químicos que rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:



- Promover mayor eficiencia
- Desgaste homogéneo del ánodo
- Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo
- Absorben humedad del suelo manteniendo dicha humedad permanente.

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso (CaSO_4), bentonita, sulfato de sodio, y la resistividad de la mezcla varía entre 50 a 250 ohm-cm.

III.7.4 Cálculo del número de ánodos.

Para conocer el número de ánodos que se van a necesitar para llevar a efecto la protección catódica es necesario determinar la superficie a proteger y conocer la densidad de corriente de protección. El producto de la superficie a proteger (en m^2) por la densidad de corriente de protección (en mA/m^2) nos dará la intensidad total necesaria para la protección catódica (I_t).

Por otra parte, como se conoce la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo, tendremos que

$$\text{Número de ánodos} = \frac{I_t}{I_{\text{ánodo}}} \dots\dots\dots 3.7.4$$

III.7.5 Aleaciones para ánodos.

La composición de los ánodos tiene una gran importancia ya que actúa de una forma muy directa sobre las cuatro propiedades que permiten apreciar el valor de un metal o aleación para poder ser utilizado como ánodo de sacrificio: el potencial de disolución, el rendimiento de corriente, la polarizabilidad y la homogeneidad en la corrosión del ánodo. Asimismo tiene una gran influencia sobre las propiedades de los productos de corrosión formados en el ánodo durante su actuación: porosidad, adherencia, dureza, conductividad eléctrica, etcétera.



III.7.6 Ánodos de zinc

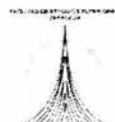
Entre sus impurezas, las más perjudiciales son el hierro (Fe) y el plomo (Pb). Se ha encontrado que porcentajes de hierro superiores al 0.01% causan la pérdida de actividad del ánodo. Trabajos posteriores recomiendan no sobrepasar el 0.002%.

En aplicaciones de ánodos de Zn en agua de mar, es recomendable un límite máximo de 0.0002% de Fe, aunque los ánodos de esta composición no se puedan obtener comercialmente.

Por otro lado, parece estar bien demostrado que la adición de pequeños porcentajes de Al, de Al y cadmio (Cd), o Al y silicio (Si) al Zn es un recurso útil para contrarrestar los efectos del Fe como impureza. Ello queda reflejado en la nueva especificación MIL-A-18001 G (véase Tabla III.4), que permite hasta 0.005% de Fe, pero exige, al mismo tiempo, contenidos de un 0.025 - 0.15% de Cd y 0.10 - 0.50% de Al.

Tabla III.4. Composiciones exigidas a los ánodos de zinc, según especificaciones militares norteamericanas.

Composición	Especificaciones militares en E.U.	
	MIL-A-18001	MIL-A-18001 G
Plomo (Pb)	0.006 máximo	0.006 máximo
Hierro (Fe)	0.0014 máximo	0.005 máximo
Cadmio (Cd)	0.004 máximo	0.025-0.15
Cobre (Cu)	0.005 máximo	0.005 máximo
Aluminio (Al)	0.1 máximo	0.10-0.5
Silicio (Si)	-----	0.125 max
Zinc (Zn)	-----	-----



Entre los elementos de aleación utilizados con resultados satisfactorios, para mejorar el rendimiento de los ánodos de sacrificio de Zn, son principalmente el litio (Li), el cromo (Cr), el Mg, el Al y el Cd. En la Tabla III.5 se presentan las calidades de Zn según la especificación B6-46 de la Asociación Americana para el Ensayo de Materiales (ASTM).

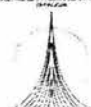
Tabla III.5. Calidades del zinc según la especificación ASTM B6-46

Calidad	Contenido máximo en impurezas				
	Pb	Fe	Cd	Total	Zn
Superior especial	0.006	0.005	0.004	0.01	99.99
Superior	0.07	0.02	0.07	0.1	99.9
Intermedia	0.2	0.03	0.5	0.5	99.5
"Brass especial"	0.6	0.05	0.5	1.00	99
"Selected"	0.8	0.04	0.75	1.25	98.75
"Prime Western"	1.6	0.08	----	----	98.32

Las aleaciones más utilizadas en la actualidad son las MIL, norteamericanas, cuya composición se indica en los cuadros Tabla III.4 y III.6.

Tabla III.6. Composición comercial típica de ánodos de zinc (aleación Zn-Al-Cd).

	MIL A-18001 H	Comercial	Comercial
Cu	0.005 máximo	0.005 máximo	0.005 máximo
Al	0.1-0.5	0.3-0.5	0.9-0.6
Si	0.125 máximo	0.003 máximo	0.125 máximo
Fe	0.005 máximo	0.002 máximo	0.0015 máximo
Pb	0.006 máximo	0.005 máximo	0.3 máximo
Cd	0.0025-0.15	0.025-0.100	0.075-0.125
Rendimiento	95%	95%	95%
Potencial (V)	-105 vs Ag/AgCl	-105 vs Ag/AgCl	-105 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h-kg)	780	780	780



III.7.7 Ánodos de magnesio

Se ha estudiado una amplia serie de aleaciones de Mg con vistas a ser utilizada como ánodos de sacrificio. Las Tablas III.7 y 8 se muestran estas composiciones. El rendimiento en corriente de estas aleaciones crece con la densidad de corriente.

Tabla III.7. Composiciones de magnesio y sus aleaciones utilizadas como ánodos de sacrificio.

Marcas	Al	Cu	Fe	Ni	Mn	Zn
Galvomag	0.1 máx.	0.02	0.03	0.001	0.5-1.3	----
Magnesio cell	0.01	0.01	0.027	0.001	0.1	0.01
Dowmetal Fs-1	2.6	0.003	0.005	0.001	0.4	1.1
Dowmetal H	6.0	0.01	0.009	0.001	0.26	2.5
Dowmetal H-1	6.5	0.01	0.001	0.001	0.24	3.4
Dowmetal J-1	6.5	0.005	0.001	0.001	0.23	0.78

Tabla III.8. Composición comercial típica de los ánodos de magnesio.

	MIL A-21412	Comercial	Comercial
Cu	0.1 máximo	0.02 máximo	0.02 máximo
Al	5-7	5.3-6.7	0.1 máx
Si	0.3 máximo	0.1 máximo	-----
Fe	0.003 máx	0.003 máximo	0.003 máximo
Mn	0.15 máximo	0.15 máximo	0.5-1.3
Ni	0.003 máximo	0.002 máx	0.001
Zn	2-4	2.5-3.5	-----
Otros	0.3 máx. (c/u)	2.5-3.5	Pb, Sn 0.01 máx
Rendimiento	50%	50%	50%
Potencial (V)	-105 vs Ag/AgCl	-105 vs Ag/AgCl	-105 vs Ag/AgCl
Capacidad (A-h-kg)	1100	1230	1230



El Dowmetal H - I es la aleación que ha tenido un comportamiento más satisfactorio frente al agua de mar por lo que es la aleación que más se utiliza en este medio. Presenta una buena distribución del ataque anódico y un consumo homogéneo del ánodo, una susceptibilidad muy pequeña a la polarización con el tiempo y un rendimiento de corriente entre los más elevados que se pueden obtener con ánodos de Mg (55-67%).

La mayoría de los metales son catódicos en relación con el Mg; así pues, las impurezas constituyen un peligro de corrosión espontánea, si se desean obtener buenos rendimientos es necesario mantenerlas dentro de límites bien determinados. El hierro es particularmente perjudicial; su influencia es pequeña en tanto no exceda el 0. si sube hasta el 0.03%, la corrosión espontánea del ánodo se multiplica aproximadamente 500 veces. El bajo rendimiento de la aleación "cell" (véase Tabla III.8) se atribuye a su elevado contenido de Fe (0.03%). El níquel (Ni) ocasiona efectos desastrosos sobre los ánodos de Mg. Se ha comprobado que contenidos superiores a 0.001% dan lugar a la disolución del ánodo por corrosión espontánea y a potenciales de disolución sensiblemente nobles (positivos).

El cobre (Cu) es otro elemento que ejerce una acción nociva en el Mg. Si el contenido de Cu permanece inferior a 0.5%, no se observan cambios notables en el potencial de disolución del ánodo. Contenidos superiores dan lugar a un aumento en el potencial y a una disminución de la intensidad de corriente proporcionada por el ánodo para la protección de una estructura determinada. Cuando el contenido de Cu alcanza 4%, el potencial de disolución se vuelve tan positivo que se produce una inversión de la polaridad del magnesio.

La acción que ejerce el Al como elemento de aleación del magnesio es eliminar gran parte del Fe durante la preparación de la aleación. Las aleaciones MgAl tienen una buena resistencia a la corrosión espontánea.

El Zn produce efectos favorables como elemento de aleación del Mg. Por una parte favorece el consumo homogéneo del ánodo, especialmente con contenidos entre 2.5 y 3.5% y por otra, actúa dando un margen mayor a la acción de las impurezas; se puede admitir hasta un 0.01% de Fe sin afectar el rendimiento. Por último, el manganeso (Mn) ejerce, en general, una acción favorable, ya que tiende a eliminar los efectos del Fe y a compensar los del cobre.



III.7.8 Ánodos de aluminio

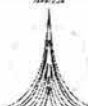
El Al, a pesar de ser, por sus características electroquímicas, el material idóneo para ser utilizado como ánodo de sacrificio, su empleo como tal es relativamente reciente. La razón estriba en que este metal, aleado o no, presenta un inconveniente: se le forma una película de óxido de aluminio (pasivación anódica) que lo hace muy resistente a la corrosión y por tanto al "sacrificio".

Para la utilización del Al como ánodo galvánico se han realizado numerosas investigaciones cuyo objetivo principal ha sido la búsqueda de elementos de aleación que limiten la pasivación anódica del mismo. La Tabla III.9 reúne las características de algunas de las aleaciones de Al desarrolladas.

Tabla III.9. Composición comercial típica de ánodos de aluminio.

Si	0.11-.21	0.1 máximo	0.1 máximo
Fe	0.10 máx	0.13 máx	0.13 máx
Zn	0.3-0.5	3.5-5.0	4.0-5.0
Sn	-----	-----	0.08-0.16
Mg	-----	-----	0.08-0.16
Hg	0.02-0.05	-----	-----
In	-----	-----	-----
Cu	0.006 máx	0.006	0.01 máx
Rendimiento	95%	90%	50-80%
Potencial	-1.05 Ag-AgCl	-1.10 vs Ag-AgCl	-1.10 vs Ag-AgCl
Capacidad (A-h/kg)	2830	2700	-----

El camino seguido en estas investigaciones fue determinar los efectos que un gran número de elementos, en forma aislada, ejercían sobre el potencial del Al. El Cu y Mn hacían más catódico el potencial del Al. El Zn, Cd, Mg y bario (Ba) hacían de -0.1 a -0.3V más anódico dicho potencial y el galio (Ga), mercurio (Hg), estaño (Sn), e indio (In) lo hacían también más anódico (entre -0.3 y -0.9V).



Las combinaciones que en principio tenía un interés especial fueron las de Al-Hg-Sn y Al-Hg-Bi, cuyo comportamiento es muy similar, pues tienen potenciales parecidos a los de las aleaciones Al-Hg.

Las aleaciones Al-Hg-Zn, Al-Sn-Zn y Al-In-Zn tienen potenciales alrededor de -1.05V y rendimientos elevados. La aleación Al-Hg-Zn ha sido estudiada sistemáticamente; se ha tenido en cuenta en esto el efecto de la variación de la composición, la densidad de corriente y la pureza del Al empleado. Para este tipo de aleación se alcanzan rendimientos del 95%. Esta aleación y la de Al-In-Zn son de las más utilizadas en la actualidad.

Las aleaciones con Hg tienen un problema específico que vale la pena señalar y que, a pesar de sus importantes características electroquímicas, hace que su utilización tienda a ser cada vez más reducida: la acción contaminante del Hg.

III.7.9 Campos de aplicación del zinc, aluminio, magnesio y sus aleaciones como ánodos galvánicos.

La gran utilización del Zn como ánodo de sacrificio está justificada porque es el primer metal que se empleó como tal. El valor relativamente elevado de su potencial de disolución le confiere un alto rendimiento de corriente.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del Zn es la resistividad del medio agresivo. Es aconsejable que su empleo quede limitado a las resistividades inferiores a los 5 000 ohms-cm. También hay que cuidar su utilización en presencia de aguas dulces a temperaturas arriba de 65°C, ya que en estas condiciones puede invertir su polaridad y hacerse catódico con relación al acero.

Como ánodo galvánico o de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar: buques, pantalanos, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, boyas, plataformas de perforación de petróleo, depósitos de agua, condensadores, etcétera.

El Al, por su situación en la serie electroquímica, es el metal más idóneo para la protección catódica, pues ocupa una posición intermedia entre el Zn y el Mg, y tiene una capacidad elevada de corriente. Debido precisamente a su elevada capacidad



de corriente, un solo ánodo de Al puede ejercer la acción de tres de iguales características de Zn, para una misma duración del ánodo. Estas circunstancias han motivado que estos ánodos estén siendo muy utilizados en construcción naval, para la protección catódica de tanques de lastre de cargalastre y en los petroleros. Aunque el precio del Al es más elevado que el del Zn, al tenerse que colocar menos ánodos esta diferencia se compensa y si se considera además, el ahorro de mano de obra en la colocación de los ánodos de aluminio, éstos pueden llegar a ser incluso más económicos que los de Zn.

El campo de aplicación de los ánodos de Al es semejante al de los de Zn y su comportamiento es satisfactorio en la protección catódica de estructuras sumergidas en aguas dulces.

Tabla III.10. Características electroquímicas de algunas aleaciones de zinc, aluminio y magnesio utilizadas en la actualidad^[2].

Aleación	Potencial (V) Ag/AgCl	Potencial respecto a acero protegido	Capacidad de drenaje de corriente A-h/kg
Zn	-1.05	0.25	780
Al-Zn-Sn	-1.07	-0.27	2420
Al-In	-1.15	-0.35	2740
Al-Hg	-1.05	-0.25	2830
Mg	-1.5 a -1.7	-0.7 a -0.9	1050 a 1200

La utilización del Mg y sus aleaciones resulta del valor bastante bajo de su potencial de disolución (Tabla III.10), que implica un bajo rendimiento de corriente y una disminución, a veces bastante grande, del potencial de la estructura a proteger. El magnesio puede utilizarse para la protección catódica de estructuras provistas de un recubrimiento de mala calidad situadas en un medio de resistividad elevada (10,000 ohms-cm) tal como es el caso de un suelo arenoso.



No son recomendables estos ánodos para su utilización en agua de mar, ya que su elevada autocorrosión hace que los rendimientos sean muy bajos; y su mejor campo de aplicación es en medios de resistividad elevada (entre 5,000 y 20,000 ohms-cm).

La Tabla III.11 resume lo anterior y puede ayudar en la selección de un material anódico en función de la resistividad del medio.

Tabla III.11. Ánodos de sacrificio recomendables en función de la resistividad del medio.

Material	Medio	Resistividad Ω -cm
Agua		
Al		Hasta 150
Zn		Hasta 500
Mg (-1.5V)		> 500
Suelo		
Zn y Backfill		Hasta 1500
Mg (-1.5V) con backfill		Hasta 4000
Mg (-1.7V) con backfill		4000-6000

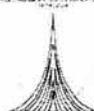
III.7.10 Ventajas y limitaciones de la protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio.

Las ventajas y desventajas de la protección con ánodos galvánicos se resumen en la Tabla III.12. Esencialmente la protección con ánodos de sacrificio puede utilizarse cuando se requiere de una corriente pequeña y la resistividad del medio agresivo es baja. Puede usarse además como complemento de la protección catódica con corriente impresa, para proteger alguna parte de la estructura o bien para eliminar la posibilidad de corrosión por corrientes vagabundas.



Tabla III.12 Ventajas y desventajas del sistema de protección Catódica por ánodos Galvánicos.

Ventajas	Desventajas.
1. Son independientes de cualquier fuente de energía eléctrica.	1. Su uso en instalaciones subterráneas se puede ver limitada a la protección de estructuras bien revestidas o a proporcionar protección de tipo local debido a la corriente limitada que está disponible.
2. Su instalación es relativamente sencilla; se pueden hacer modificaciones hasta obtener el efecto deseado	2. Su uso puede ser impráctico excepto en suelos o en agua con una resistividad baja.
3. Es improbable que dañen cualquier estructura vecina debido a que la entrega de corriente en cualquier punto es baja.	3. Su inspección involucra el llevar a cabo pruebas con instrumentos portátiles, en cada uno de los ánodos o entre pares adyacentes de ánodos.
4. Su entrega de corriente no puede ser controlada pero hay una tendencia a que su corriente sea auto-ajustable ya que si las condiciones cambian de tal forma que el metal a ser protegido se vuelve menos negativo, entonces la entrega de corriente del ánodo aumenta. Es posible, al seleccionar el material, asegurar que el metal de la estructura no pueda llegar a un potencial que es lo suficiente negativo como para dañar los revestimientos.	4. Se puede requerir de ellos en un gran número de posiciones. Su vida útil varía con las condiciones, de tal forma que se pueden requerir reemplazos a intervalos de tiempo diferentes, en diferentes partes de un sistema.
5. Pueden ser unidos por pernos o soldados directamente a la superficie que va a ser protegida, evitando así la necesidad de perforar el metal de los cascos de los barcos, a ser protegidas en su interior, etc.	5. Su volumen puede restringir el flujo y/o causar turbulencia y restringir el acceso en los sistemas de circulación de agua. Causan arrastre en el caso de los barcos.
6. Sus conexiones se protegen catódicamente.	
7. No puede haber error en la conexión. No se puede invertir la polaridad y por lo tanto conectar equivocadamente.	



III.8 Sistema de protección catódica por corriente impresa.

Un sistema de corriente impresa utiliza una fuente externa de voltaje que es impresa entre la estructura (Cátodo) y el electrodo que está en contacto con el electrolito (los ánodos). La fuerza externa es generalmente CA (Corriente Alterna) que se reduce a un voltaje aceptable y se convierte a CD (Corriente Directa) con un rectificador.

1. Alimentación eléctrica 220 V. 50 hz.
2. Unidad central y de control de potencia.
3. Puesta a tierra.
4. Cable apantallado.
5. Lecho de ánodos.
6. Tanques y tuberías a proteger.
7. Sonda de referencia.

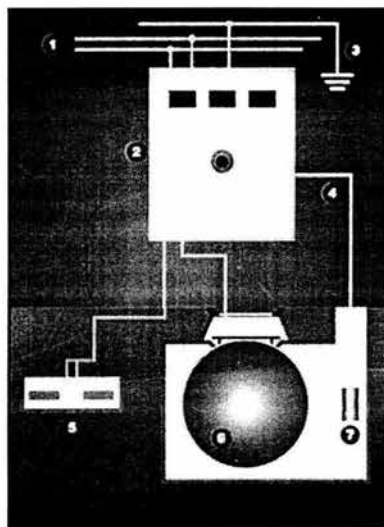


Figura III.12. Protección catódica por corriente impresa.

La corriente de CD es suministrada por el rectificador. La corriente que sale de la terminal positiva del rectificador fluye a los ánodos y después a través del electrolito a la estructura. La estructura (Cátodos) recoge la corriente y la devuelve a la terminal negativa del rectificador. La cantidad de corriente que fluye depende del voltaje (la mayoría de los voltajes de entrega de los rectificadores se pueden variar al seleccionar diversos enrollados secundarios para los transformadores) y de la resistencia del circuito.



III.8.1 Ánodos para Corriente Impresa.

Hay varios tipos de ánodos de corriente impresa. Algunos son utilizados para las instalaciones subterráneas y otros para las instalaciones submarinas. En la siguiente Tabla III.13 muestra una lista de los diversos tipos de ánodos y de sus principales usos.

Tabla III.13 Ánodos de corriente impresa y sus áreas de uso.

MATERIAL	USO PRINCIPAL
Chatarra Hierro/Acero	Subterráneo/Marino
Grafito Impregnado	Subterráneo/Marino/Intercambiadores de calor
Alineación de hierro Fundido/Plata	Marino
Electrodo Bimetálico de Plomo/Platino	Marino (naviero)
Titanio Platinizado	Marino/Submarino/Intercambiadores de Calor
Niobio Platinizado	Marino/Submarino/Intercambiadores de Calor
Magnetita	Subterráneo/Marino

III.8.2 Tipos de ánodos de corriente Impresa.

Hay muchos materiales que se pueden utilizar en la fabricación de ánodos de corriente impresa. Entre los que se mencionan a continuación.



III.8.2.1 Chatarra.

Los ánodos de corriente impresa originalmente utilizados para proteger una estructura subterránea eran de chatarra, en la forma de una tubería vieja. Hoy en día todavía se utiliza este tipo de ánodos sobre todo en las zonas en donde el costo de la mano de obra es bajo, y en donde el costo del flete hace prohibitivo el uso de ánodos manufacturados.

Muchas compañías han diseñado muchos ánodos de chatarra que consisten de ruedas de carros de ferrocarril soldadas para formar un ánodo. En otro caso, se hizo uso de un casco de barco hundido, el cual se utiliza como ánodo remoto para lograr la protección catódica de un muelle.

Algunas desventajas de este material son el consumo tan alto de la chatarra debido a la corrosión, una corrosión no uniforme y los productos coloridos en las vecindades próximas.

III.8.2.2 Grafito impregnado.

Está sujeto a deterioro, tanto mecánico, como electroquímico, en aguas. Actúa bien en agua salada, pero su suavidad y el hecho de ser tan quebradizo son desventajas. Aún se utiliza en trabajos subterráneos, especialmente en suelos que contienen cloruro. También se utiliza en camas de ánodo profundas, (hoyos taladrados a profundidades mayores de 25') en donde la gravedad específica baja de material simplifica los problemas de suspensión de los ánodos.

III.8.2.3 Hierro-Silicio.

Estos ánodos son por naturaleza quebradizos. A pesar de esto, son los ánodos de corriente impresa que más se utilizan en trabajos subterráneos. En ánodos profundos, su alta gravedad específica es una desventaja, pero su confiabilidad en general los ha hecho los preferidos. Es un buen material para utilizar en aguas frescas. Para condiciones de agua salada, se agrega cromo a la aleación.



III.8.2.4 Aleación de Plomo/Plata.

Solo son útiles en aguas saladas, pero son particularmente útiles en donde es deseable tener un ánodo con buenas propiedades mecánicas y capaces de operar a densidades moderadas de corriente. No se utilizan mucho porque la película conductora de óxido que forma, y que retarda el desgaste del ánodo, pues puede despasivarse debido a incrementos de la temperatura, de la resistividad a un cambio en la densidad de corriente.

III.8.2.5 Electrodo bimetalico de Plomo/Platino.

Se utiliza como ánodos externos en cascos de barcos y son capaces de densidades altas de corriente hasta de aproximadamente 185 amperes por pie cuadrado (2,000 amperes por metro cuadrado) con muy poco desgaste.

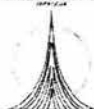
III.8.2.6 Ánodos de Titanio Platinizado.

Son fabricados por diversos métodos de tal forma que el platino que descarga corriente no cubre el 100% de la superficie del cuerpo de titanio de ánodo. El titanio generalmente se vuelve inerte a potenciales bajos de CD y no descarga corriente hacia el electrolito. A potenciales mayores de 10 voltios, la película inerte se desgasta rápidamente y ocurre flujo de corriente del titanio hacia el electrolito, resultando en una corrosión acelerada del titanio del tipo de picadura.

Es por esta razón que el voltaje de los sistemas de corriente impresa de titanio platinizado debe mantenerse por debajo de los 10 voltios.

III.8.2.7 Niobio Platinizado Tantalio Platinizado.

Estos ánodos se utilizan en situaciones en donde no se puede utilizar el titanio platinizado. El concepto es básicamente el mismo con la excepción de que los metales a base de Niobio o Tantalio pueden soportar voltajes más elevados.



III.8.2.8 Aluminio.

Aún cuando no se utiliza normalmente como ánodos de corriente impresa, ciertas aleaciones y formas de este metal, se utilizan para protección catódica por corriente impresa de tanques de almacenamiento de agua potable. Estos ánodos generalmente por compañías especializadas en este tipo de instalación, diseño y servicio.

III.8.2.9 Magnetita.

Estos ánodos han sido utilizados en Europa durante los últimos 15 años. En años recientes, su actuación ha sido mejorada y se encuentra disponibles para uso submarino/subterráneo en el hemisferio occidente.

La Magnetita (Fe_2O_3) es en si un producto de corrosión. Por lo tanto casi no hay corrosión involucrada con la descarga de corriente de la superficie anódica. El precio de estos ánodos es alto, casi el doble del ánodo de aleación de hierro/silicio. Sin embargo, su vida útil prolongada puede hacer que sean la mejor opción en ciertas aplicaciones.

III.8.3 Relleno especial para ánodos subterráneos de corriente impresa.

Es posible prolongar la vida útil de una cama de ánodos y de reducir su resistencia total al colocar ánodos grafito y de aleación de hierro fundida/silicio en rellenos especiales de carbón. Esto se puede lograr al colocar los ánodos en una cama preparada de coque pulverizada (material que sobra en una planta de coque) o de coque calcinado de petróleo. Se coloca coque adicional alrededor y sobre los ánodos antes de que se rellene el agujero del ánodo. El coque tiene la característica de ser conductivo y uno de los efectos es el transferir la reacción electroquímica anódica del ánodo al coque. Esto tiende a prolongar la vida útil del ánodo ya que el coque ofrece un área mayor al suelo circundante. También se reduce la resistencia al suelo de la cama de ánodos. Pero, se debe tener cuidado de que la instalación se haga correctamente.

También se utilizan con frecuencia los ánodos preempaquetados. A los ánodos se les coloca en un recipiente de lámina metálica y se rellena con coque pulverizado.



El tamaño efectivo del ánodo se aumenta ligeramente y el beneficio electroquímico del relleno, se mantiene. Este tipo de instalación no reduce la resistencia del tamaño total del ánodo total del ánodo sería menor. Sin embargo, esta opción facilita la instalación dando como resultado un costo reducido. Una desventaja de este tipo de instalación es que no se puede comprobar si el ánodo en sí está roto dentro del recipiente y que tan buena es la conexión cable ánodo.

III.8.4 Tipos de fuente de corriente directa (CD).

Cualquier fuente de CD, es aplicable para ser utilizada en un sistema de protección catódica de corriente impresa, siempre que sea capaz de proporcionar el voltaje y la entrega de corriente necesaria durante el lapso requerido. La fuente de CD más usada es el rectificador de Corriente Alterna (CA) a Corriente directa (CD).

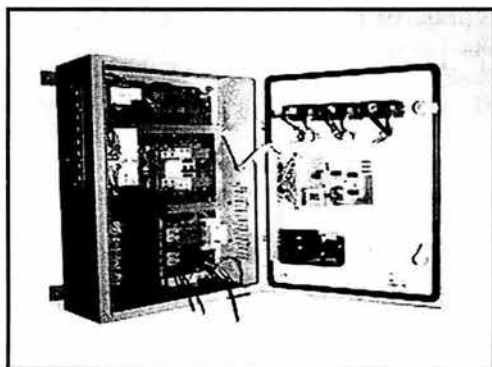
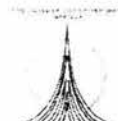


Figura III.13. Rectificador.

Básicamente los rectificadores convierten a la CA de fuente comercial (como 120, 240 ó 440 Voltios, monofásica o trifásica) , reducen el voltaje y lo rectifican a corriente directa (CD). La entrega de voltaje de CD generalmente se puede ajustar de tal forma que la corriente deseada pueda fluir a través de una resistencia en el circuito. Los rectificadores se pueden obtener comercialmente y se ofrecen en una gran variedad, según la capacidad de entrega de corriente y voltaje de CD. Dependiendo de los requerimientos, pueden ser enfriados con aire, con aceite o ser a prueba de explosiones o vandalismo.



Los rectificadores de tipo estándar no son fuentes de energía reguladas, y sus entregas cambian con las variaciones de resistencia del circuito, lo cual puede ocurrir dependiendo de la temporada (tal como la zona de marea en instalaciones portuarias). Los requerimientos totales de corriente pueden cambiar periódicamente, como cuando un carguero de petróleo se ata a un muelle que ha sido protegido catódicamente.

El casco robaría al muelle algo de corriente de protección catódica y los potenciales del muelle comenzarían a decrecer a medida que la estructura se despolariza. En otras áreas, variaciones grandes y rápidas del potencial, son causadas por las operaciones de CD. Algunas de estas variaciones son beneficiosas y un constante suministro de corriente catódica que la necesaria.

Se han desarrollado dos tipos de rectificadores con circuitos electrónicos que son capaces de detectar cambios indeseables de corriente y cambios de potencial de estructura. Estos son el rectificador de corriente constante y el rectificador de potencial constante, respectivamente.

El rectificador de corriente constante, se utiliza cuando se considera necesaria una entrega de corriente constante bajo condiciones muy variables.

Estos rectificadores utilizan un medidor de corriente y circuitos de retroalimentación para controlar la entrega de corriente dentro de los límites específicos.

El rectificador de potencial constante utiliza un electrodo de referencia permanente que se coloca en un sitio clave cerca de la estructura. Este electrodo se conecta a un circuito comparador con un potencial pre-establecido, que proporciona una retroalimentación para ajustar la entrega de corriente del rectificador según se requiera para mantener un potencial constante.

Los rectificadores de potencial constante para la protección catódica de los cascos de los barcos, muchas veces utilizan varios electrodos de referencia. Estos electrodos se conectan alternadamente (y automáticamente) en forma rotativa, al rectificador a través de circuitos adecuados para ajustar las entregas individuales de corrientes para un barco pueden variar desde una cantidad mínima de 4 amperes (revestimiento del casco en buenas condiciones, barco atado al muelle) hasta una cantidad mayor de 200 amperes (revestimiento muy gastado, barco navegando a velocidad máxima, por lo que se despolariza el casco). Otras fuentes de energía de



CD, que se pueden utilizar es la de los motores generadores que utilizan propano o gas natural como combustible; los generadores termoeléctricos que utilizan una fuente de combustible para calentar una serie de uniones metálicas térmicas que generan corriente directa; y en algunas áreas se pueden utilizar generadores de molino de viento que desarrollan la energía de CD necesaria.

También se han desarrollado aparatos que utilizan energía solar, que combinados con acumuladores, pueden proporcionar energía de CD. Estas son especialmente útiles en áreas alejadas en donde la corriente comercial de CA no está disponible. Estas instalaciones pueden llegar a ser muy costosas ya que la tecnología es relativamente nueva. El número de acumuladores que se requiere dependerá de la latitud donde este instalado, así como del por ciento de luz solar anual y los requerimientos de corriente.

III.8.5 Cables y empalmes para sistemas de protección catódica.

Los requerimientos para los cables y empalmes en los sistemas de protección catódica por corriente impresa o galvánica son muy diferentes. Ya que los sistemas galvánicos dependen de la diferencia de potencial entre los metales para su operación, es fácil de ver que cualquier cableado subterráneo o sumergido asociado con este tipo de sistema sería catódico con relación al material del ánodo. Debido a esto, es tan importante el evitar daño al aislamiento del cableado, y el aislante debe ser tan resistente para los sistemas de corriente impresa. En los sistemas galvánicos, las raspaduras y otros daños al aislamiento de los cables deben repararse con dos capas de cinta eléctrica, cubriendo una pulgada más a cada lado del área en donde se presenta el daño. Los cables para los sistemas galvánicos son cables estándares que se usan para cableados eléctricos bajo condiciones severas de servicio. Un cable colector de corriente en un sistema galvánico sería típicamente del No. 8 o hasta el No 10. Por otra parte los empalmes requeridos para los sistemas galvánicos pueden ser ya sea del tipo de perno o del tipo de compresión. El aislamiento de los empalmes pueden ser el mismo que para la vaporización del aislamiento, que consiste en dos capas de cinta de hule vulcanizado seguido por dos capas de cintas de plástico.



En los sistemas de corriente impresa, los cables de los ánodos son la parte más anódica del sistema. Tomando en cuenta las caídas de potencial (IR) en los cables, estos operan a un voltaje más alto que los ánodos. Los sistemas de corriente impresa se utilizan cuando los requerimientos de voltaje son más altos que los voltajes suministrados por los sistemas galvánicos. Por lo tanto, el potencial a tierra de todos los elementos del sistema de los ánodos es altamente anódico.

Debido a que la corrosión del cable en la falla es severa, los materiales de aislamiento de los cables serán robustos y diseñados para instalación subterránea bajo condiciones adversas, y es necesario tomar precauciones adicionales durante el diseño y durante la instalación de los cables en sistemas de corriente impresa.

El aislamiento de los empalmes y el aislamiento usado para las reparaciones de ser a prueba de agua, porque de otra forma parte de la corriente rectificadora se descargará directamente del cable hacia el electrolito y como resultado el cable fallará debido a la corrosión. Por esta razón es que se ha utilizado con éxito un sistema de dos partes de recubrimiento epóxico en empalmes de cables para sistemas de corriente impresa. El epóxi se vacía en un molde especial que se coloca alrededor del empalme, su endurecimiento, generalmente tarda una media hora, dependiendo de la temperatura ambiente. El empalme no se debe recubrir con tierra o no se debe sumergir hasta que el epoxi esté completamente endurecido. Se debe evitar cualquier daño al aislamiento de los cables, pero en donde es necesario llevar a cabo reparación del aislamiento, también se debe utilizar el sistema de epóxi mencionado anteriormente.

Los cables subterráneos utilizados en los sistemas de corriente impresa. Generalmente, son más grandes que aquellos utilizados para sistemas galvánicos, ya que deben conducir cantidades más grandes de corriente. Los materiales aislantes que más se utilizan en estos cables son los polietilenos de alto peso molecular. Para trabajos en condiciones severas se utilizan sistemas con doble aislamiento; uno interior de Kinar; y uno exterior de polietileno de peso molecular alto o de poliolefinas.



III.8.6 Niveles aceptables de protección catódica.

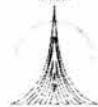
Como ya se mencionó, el área de la estructura metálica que recoge la corriente directa (CD) se llama el cátodo. Si una cantidad suficiente de corriente es recogida por la estructura de tal forma que cualquier descarga de corriente que estuviera ocurriendo de dicha estructura se elimina, toda la estructura se convierte en catódica, entonces se dice que la estructura ha sido protegida catódicamente.

En los EEUU y muchos otros países, para determinar si se está logrando una protección catódica apropiada en una estructura de acero, se llevan a cabo pruebas eléctricas para establecer si el nivel de protección obtenido satisface uno de los criterios establecidos por la NACE (U.S.A. National Association of Corrosion Engineers).

Los tres criterios más comúnmente usados son los siguientes:

- Un potencial entre la estructura y el suelo de -0.85 voltios ó más negativo medido contra un electrodo de referencia de CuSO_4 colocado directamente encima o adyacente a la estructura, se ha logrado a todo lo largo de la estructura, este es el criterio más usado (sobre todo en estructuras con revestimiento) ya que es el más fácil de comprobar.
- Un cambio de potencial de 300 mil voltios o más, en dirección negativa, se observa en la estructura al energizar el sistema de protección catódica. Este criterio se ha utilizado en tuberías sin revestimientos o en aquellos casos en los que no se justifique el satisfacer el criterio de -0.85 voltios.
- Un potencial de polarización de 100 mil voltios mucho más se establece en la estructura. La cantidad de polarización se determina al interrumpir el sistema de protección catódica y medir instantáneamente el potencial de la estructura.

Subsecuentemente, el potencial decaerá a una velocidad mucho más lenta. La diferencia entre el potencial medido inmediatamente después de interrumpir el sistema de protección catódica y el potencial medido después del decaimiento del potencial determinará la cantidad de polarización lograda en la estructura.



Este criterio se utiliza más comúnmente para determinar el grado de protección en los pozos profundos, aunque en años recientes se ha utilizado más frecuentemente para tuberías.

Hay otros criterios que se pueden aplicar bajo condiciones especiales, pero los descritos anteriormente son los que se utilizan más comúnmente.

Otros dos criterios que se podrían utilizar en casos especiales son:

- Un potencial entre la estructura y el electrolito por lo menos tan negativo (catódico) como aquel originalmente establecido por el electrodo de referencia. El potencial de estructura electrolito deberá medirse entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrolito.
- Una corriente de protección neta del electrolito hacia la superficie de la estructura medida por un equipo medidor instalado en puntos preseleccionados de la estructura que descargen corriente (anódicos).

Este criterio no se utiliza con regularidad porque es muy difícil determinar todos los puntos anódicos de una estructura y es muy difícil de probar cuando realmente se está logrando una corriente protección neta.

La selección de uno de los tres primeros criterios depende de factores individuales que sólo son aplicables a cada caso. En muchos casos, por ejemplo, la polarización total de una estructura puede no llegar a ocurrir debido a los agentes o condiciones que tendrían que prevenir el desarrollo de una película de polarización. En este caso, la selección de los dos primeros criterios sería lo indicado. En áreas con corrientes parásitas en donde los potenciales de la tubería al suelo pueden variar grandemente debido a operaciones de ferrocarril de CD, el uso del criterio de cambio de 300 mil voltios pueden dar resultados erróneos.

Esto es debido a que en áreas con mucha corriente parásita, el potencial de la estructura con el sistema de protección catódica energizado, puede ser demasiado bajo. El criterio no puede considerarse absolutamente seguro, ya que en algunos casos, una caída de potencial (IR) en el suelo puede resultar en lecturas indicativas de protección con el electrodo instalado sobre el suelo, y no son indicativas de las condiciones existentes, en la superficie del tubo.



III.8.7 Ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica por corriente impresa.

Una ventaja que tienen los sistemas de corriente impresa sobre los sistemas de ánodos galvánicos es que dentro de ciertas limitaciones, el voltaje de entrega del rectificador se puede ajustar (ya sea manual o automáticamente) para cumplir con los requerimientos de las condiciones variables. La Tabla III.14 muestra algunas ventajas y desventajas de los sistemas de corriente impresa.

En muchos casos el mayor elemento de resistencia del circuito, para sistemas de corriente impresa o galvánicos, es la resistencia al suelo de los ánodos, o como se conoce más comúnmente, de la cama de ánodos. Los parámetros que se deben considerar al diseñar una cama de ánodos.

Tabla III.14 Ventajas y desventajas de protección catódica por corriente impresa

Ventajas	Desventajas.
1. Se puede aplicar a una gran variedad de estructuras, incluyendo, si fuese necesario, a estructuras grandes, no revestidas.	1. Requiere de un suministro de corriente o de alguna otra fuente de energía eléctrica.
2. El uso es menos restringido en el suelo o el agua.	2. Requiere que se revise la polaridad durante la instalación ya que una mala conexión puede invertir la polaridad y por lo tanto acelerar la corrosión de la estructura.
3. Requiere de un cuidadoso diseño aún cuando la facilidad con la cual se puede ajustar la entrega de corriente permite cambios en las condiciones que afectan al sistema.	3. Requiere que las conexiones al lado positivo del rectificador que están en contacto con el suelo o el agua sean propiamente aisladas. De otra forma, las conexiones se corroerán severamente.



Tabla III.14 Ventajas y desventajas de protección catódica por corriente impresa (continuación).

<p>4 Requiere de inspección en pocos lugares; se pueden colocar instrumentos (normalmente en los lugares de suministro de corriente) en donde tengan fácil acceso.</p>	<p>4. Requiere que se tomen en cuenta los efectos a otras estructuras que se encuentran cerca de la cama de ánodos, pero, si fuese necesario, la interferencia en la mayor parte de los casos se puede corregir fácilmente.</p>
<p>5. En general requiere de un número menor de ánodos.</p>	<p>5. Puede causar potenciales altos que podrían resultar en separación del revestimiento.</p>
<p>6. Requiere de controles relativamente simples y pueden ser del tipo automático para mantener los potenciales dentro de los límites especificados a pesar de las grandes variaciones en las condiciones que afectan al sistema. Ya que el voltaje de entrega es generalmente más alto que el de los ánodos galvánicos, es posible que debido a un control deficiente o a ajustes incorrectos de la entrega, por ejemplo se pueden ocasionar daños a los revestimientos.</p>	<p>6. Requiere de perforación en todos los casos, en cascos de barcos, equipo de plantas, etc., para lograr que se proporcione una conexión aislada.</p>
<p>7. Permite el uso de ánodos más pequeños cuando se usan materiales adecuados; el arrastre en los barcos es insignificante.</p>	



CAPÍTULO IV

SELECCIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

IV.1 Selección y diseño.

La velocidad de corrosión de una estructura subterránea puede variar según las características químicas y eléctricas del suelo, la intensidad de los pares galvánicos de corrosión que se pueden formar debido a la selección del material y a otros parámetros relacionados con detalles de instalación. Algunas de las estructuras que generalmente requieren de consideración para el control de la corrosión son las tuberías. Los tanques de almacenamiento y los pilotes de acero.

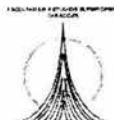
Existen diferentes tipos de sistemas de protección que se pueden utilizar para proteger a una estructura del medio ambiente corrosivo. Sin embargo, el sistema a seguir más práctico y más utilizado es la protección catódica junto con o sin utilizar revestimientos de protección.

Al seleccionar y diseñar un sistema de protección catódica para una estructura, es recomendable seguir los siguientes pasos.

- a) **Análisis de los datos.** Al tratar de seleccionar el mejor tipo de protección para una estructura se debe tomar un punto de vista analítico para evaluar todos los parámetros que podrían llegar a contribuir a la corrosión de la estructura en un medio ambiente determinado. Como mínimo, los siguientes parámetros deben ser analizados y tomados en consideración al seleccionar los revestimientos de protección y los sistemas de protección catódica.

a.1) Datos físicos.

- Tipo de estructura que va a ser protegida.
- Composición del material.
- Tamaño de la estructura.
- Revestimiento de protección



- Años de instalada.
- Función de la estructura.
- Geometría física de estructura.

a.2) Datos del medio ambiente.

- Suelo removido o no removido.
- Diferentes tipos de subsuelo (roca, arcilla, arena, etc.)
- Resistencia y pH de los diferentes estratos.
- Elevación del nivel de agua.
- Resistencia y pH del agua del subsuelo.
- Bacteria anaeróbica.
- Presencia de posibles fuentes de corrientes parásitas.

Cuando se ha completado el análisis de estos datos y se ha hecho la determinación de que se requieren medidas preventivas de corrosión, entonces se debe de considerar el tipo de diseño detallado en el inciso b) que sigue.

b) Diseño.

1) *Revestimiento.* Los sistemas de revestimiento se deben seleccionar para estructuras nuevas, de forma que sean los más apropiados para el medio ambiente y que sean compatibles con el sistema de protección catódica propuesto.

2) *Protección Catódica.* Los sistemas de protección catódica se deben seleccionar basándose en:

- Habilidad para proporcionar la protección requerida bajo las condiciones particulares que afectan directamente a la estructura.
- Mantenimiento requerido.
- Costo del material, instalación, operación y mantenimiento.



IV.2 Cálculos y Especificaciones de Diseño.

Los siguientes cálculos deben llevarse a cabo cuando se va a diseñar un sistema de protección catódica.

IV.2.1 Requerimientos de corriente.

Se debe calcular el área de la superficie de la estructura que va a ser protegida. En el caso de estructuras marinas, si es relevante, la estructura deberá dividirse en zonas: de oleaje, sumergidas y de suelo. Cada una de estas zonas debe dividirse a su vez en descubierta y revestida.

Una vez que se han calculado todas las áreas, cada una de ellas deberá multiplicarse por la densidad de corriente. Todos los valores obtenidos son sumados para determinar la cantidad de corriente que el sistema de ánodos debe entregar. El sistema debe diseñarse de tal forma que como mínimo, la corriente total requerida para la polarización pueda lograrse, a menos que se pueda utilizar una fuente de energía externa.

Después de la polarización, los ánodos galvánicos se auto-regulan por medio de un sistema de corriente llamado rectificador, al valor requerido. Debe hacer notar que la cantidad de corriente requerida para la protección catódica variará dependiendo de si la estructura está instalada en el suelo o en agua estancada o en movimiento (Ver Tabla IV-1A y B) (La densidad de corriente requerida variará según la zona de la tierra donde se encuentre, como se muestra en la Tabla IV-2.

Tabla IV.1A Densidad de Corriente Requerida.

Densidad de Corriente				
Zona	Acero Revestido (mA/m^2)		Acero Descubierta (mA/m^2)	
	Requerida para polarización	Después de Polarización	Requerida para la polarización	Después de la Polarización
Suelo	5-10	1-5	40-50	10-15
Agua estancada	10-13	5-10	150-250	40-70
Agua en Movimiento	30-50	10-15	300-350	70-100



Tabla IV.1B Resistividad de distintos tipos de suelos y sus características.

CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DE ACUERDO A SU RESISTIVIDAD	
Ohms-cm	Propiedad
0-1,000	Altamente Corrosivo
1,000-5,000	Moderadamente Corrosivo
5,000-10,000	Poco Corrosivo
10,000 en adelante	Muy poco Corrosivo
VALORES DE RESISTIVIDAD PROMEDIO DE ACUERDO AL TIPO DE SUELO	
Tipo de Suelo	Resistividad Ohms-cm
Tierra Orgánica Húmeda	1,000
Tierra Húmeda	10,000
Tierra Seca	100,000
Roca	1,000,000

Tabla IV.2 Efectos del Medio ambiente sobre la Densidad de Corriente.

EFFECTOS DE MEDIO AMBIENTE EN LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN ESTRUCTURAS MARITIMAS			
Zona Geográfica	Resistividad del Agua	Temperatura (°C)	Densidad de Corriente Típica (mA/m²)
Costa Este de EU	30	15	80-90
Costa Oeste de EU	24	15	70-80
Golfo de México	20	22	50-60
Bahía de Cook	50	2	350-400
Mar del Norte	26	12	80-150
Golfo Pérsico	15	30	70-100
Indonesia	19	24	50-60

La manera más efectiva de determinar los requerimientos de la protección catódica para una estructura instalada en un medio ambiente específico es el de llevar a cabo pruebas de requerimiento de corriente. Estas pruebas se llevan a cabo instalando sistemas de protección catódica temporales en pequeña escala para obtener datos de diseño más reales.



IV.2.1.1 Densidad de corriente.

Para obtener la densidad de corriente requerida para la protección catódica (D_p), es posible determinarla en función del estado superficial del acero, que puede contar con recubrimiento ó no y que se encuentran resumidos en la **Tabla IV.3.**

Tabla IV.3 Densidad de corriente para acero en diferentes medios^[2].

Estado Superficial	Medio Agresivo	Densidad de corriente mA/m ²
Acero desnudo.	Agua de mar (velocidad 0.5 m/s).	80-200
Acero desnudo.	Agua de mar (velocidad 1-15 m/s).	150-600
Acero pintado (epoxi, vinilica, cloro-caucho).	Agua de mar.	25-35
Acero pintado sujeto a roces por hielos, fondos etc.	Agua de mar.	50-210
Acero pintado (aluminio bituminosa).	Agua de mar.	35-50
Tanques de carga de lastres de petróleo.	Agua de mar.	100
Tanques de carga de lastre ligero.	Agua de mar.	170
Tanques de carga de lastre limpio.	Agua de mar.	190
Acero desnudo	Agua dulce estancada.	56
Acero desnudo	Agua dulce en movimiento.	56-66
Acero desnudo	Agua dulce, turbulenta ó caliente.	56-170
Acero desnudo	Suelo neutro ó estéril	5-7
Acero desnudo	Suelo aereado y seco	5-7
Acero desnudo	Suelo húmedo	28-66
Acero desnudo	Suelo muy ácido	56-170
Acero desnudo	Suelo con bacterias.	450
Acero bien revestido	Suelo normal	0.1-0.2
Acero muy bien revestido	Suelo normal	0.01



La densidad de corriente que se necesita para la protección catódica en ductos ó estructuras enterradas es muy variada debido a que los suelos pueden ser muy heterogéneos y la velocidad de corrosión es muy cambiante, ya que en el suelo podemos encontrar arena, limo, cal ó arcilla. Más aún, si en el suelo no existe suficiente oxígeno pueden propiciar la formación de bacterias anaeróbicas, como el *Soporovibrio desulfuricans*, que origina formación de sulfuro de hierro dando al suelo un color negrusco y la corrosión sobre la estructura.

La densidad de corriente requerida para ductos con recubrimiento será menor a medida que la eficiencia del recubrimiento sea mayor.

Podemos definir la eficiencia del recubrimiento (φ) como el porcentaje de la superficie metálica efectivamente revestida o cubierta. Esto quiere decir que si un revestimiento tiene el 90% de eficiencia, entonces esta recubierta en un 90% de su totalidad, y sólo se requiere un 10% de protección por protección catódica. En términos generales podemos formalizarlo en la ecuación 4.1:

$$I_R = I(1 - \varphi) \dots\dots\dots 4.1$$

- I_R = Densidad de corriente de Protección catódica desnuda.
- I = Densidad de corriente de protección catódica de la estructura recubierta.
- φ = Eficiencia del recubrimiento.

IV.2.1.2 Sobreprotección.

Aquí es muy importante considerar que una densidad de corriente excesiva aplicada a un ducto enterrado puede tener consecuencias muy graves al recubierto, provocando ampollamiento por la formación de hidrógeno al presentarse una reacción química de reducción del agua, y como consecuencia una presión del gas sobre el recubrimiento. Así como, la posibilidad de fragilización del acero, la degradación del mismo, y aunado a esto, el gasto inútil de corriente eléctrica.



Así también, en la superficie de la estructura protegida se obtienen valores de pH de 11, ya que se presenta una reacción de reducción del oxígeno:



Otra causa de ampollamiento es debido a la filtración de agua hacia la interfase de la estructura de acero y el recubrimiento, y a la influencia del campo eléctrico generado, llamado (electroósmosis). Se debe evitar a toda costa que se formen este tipo de ampollamientos.

En la siguiente tabla se muestran valores límites de potencial para distintos tipos de pinturas.

Tabla IV.4 Potencial de distintos tipos de recubrimientos.

Pintura	Potencial (V) vs Ag/AgCl
Óleo-resinosa	-0.8 a -1.0
Bituminosa al aluminio	-1.1
Cloro-caucho	-1.1
Vinílica	-1.1 a -1.2
Epoxy-Alquitrán	-1.6
Epoxidica	-2.0

IV.2.2 Número de ánodos requeridos.

Basándose en la cantidad de corriente requerida para la protección de la estructura y en la vida útil deseada para el sistema, se puede establecer el número de ánodos necesarios. Otros factores que también se deben considerar en estos cálculos, son el grado de desgaste del material.

IV.2.3 Resistencia de los ánodos.



Se debe de tener en consideración en utilizar las fórmulas correctas para determinar cual será la resistencia de la cama de ánodos. En el caso de ánodos galvánicos conectados individualmente, se calcula la resistencia de cada ánodo. En el caso de camas de ánodos que están instalados en línea recta, se debe tomar en cuenta el efecto de acoplamiento entre los ánodos. Los factores de acoplamiento (parlleling) ya han sido incorporados a las fórmulas existentes para calcular la resistencia de varios ánodos colocados en línea recta.

- a) Determinación del tamaño de cables colectores y cables de retorno (negativo). Estos cálculos se hacen para sistemas de corriente impresa. Su propósito es el asegurar que los conductores puedan llevar la corriente total sin establecer grandes caídas de potencial (IR) que resultarían en pérdidas grandes de energía y en grandes diferencias en la entrega de corriente de cada ánodo.
- b) Requerimientos de continuidad eléctrica. Este tema se relaciona principalmente con los sistemas de corriente impresa en donde es imperativo que todos los miembros de la estructura que va a ser protegida estén unidos eléctricamente para evitar la probabilidad de efectos de interferencia sobre los miembros que no se encuentran correctamente unidos.
- c) Determinación del tamaño de los rectificadores. Una vez que se han completado los cálculos anteriores, el tamaño del rectificador se determina al tomar en cuenta la resistencia de la cama de ánodos y de los cables del circuito, la entrega total de corriente del sistema y el contra voltaje del material del ánodo (normalmente alrededor de dos voltios). A los rectificadores siempre se les especifica con alguna capacidad de reserva tanto en el voltaje como en la capacidad de corriente para tomar en cuenta el deterioro de las camas de ánodos, el deterioro de los revestimientos y posibles expansiones futuras de la estructura.
- d) Planos y especificaciones. Cuando se considere necesario, se debe preparar un juego completo de planos y especificaciones. Los planos deben mostrar todos los detalles de instalación incluyendo los detalles de fijación de los ánodos (cuando se requiera). Los detalles de las especificaciones dependerán en sí del trabajo que se realizará con recursos internos o si se pondrá a concurso. En el caso último, además de todas las descripciones de las instalaciones, la especificación deberá incluir temas tales como alcance del



trabajo, a ser suministrado por el dueño, a ser suministrado por el contratista, requerimientos de seguridad y de salud, y una sección de la propuesta en sí. La especificación deberá incluir una lista completa y detallada de materiales, indicando todas las posibles alternativas.

- e) Estimados de costo. Después de que se ha diseñado el sistema, se debe preparar un estimado del costo para propósitos de control. Además, siempre que exista la duda sobre cual es la opción más económica, se deben hacer estimados sobre las diferentes alternativas existentes. Las principales variables que se deben considerar incluyen (o no), el uso de revestimientos y la opción de usar un sistema galvánico o de corriente impresa. Esto implica el hacer estimados separados para cada posibilidad y el cálculo de los "costos anuales" o "costos al día".
- f) Procedimientos de operación y mantenimiento. En aquellas áreas en donde la instalación es de un tipo único o en donde los procedimientos de operación y Mantenimiento para instalaciones similares no están disponibles, se deben preparar procedimientos de operación y mantenimiento propios.

Los procedimientos deben incluir como mínimo, un programa de las pruebas a ser conducidas periódicamente y técnicas para la reparación de problemas que se puedan presentar en las áreas principales del sistema.

IV.3 Lineamientos normativos para la aplicación de la protección catódica.

Debido a que la protección catódica es uno de los métodos más efectivos para el control de la corrosión de estructuras enterradas o sumergidas, es necesario fijar los parámetros normativos, su diseño y selección de éstos sistemas.

Cualquier ducto o estructura mencionada en las normas, debe protegerse catódicamente en toda su longitud, de acuerdo con los criterios establecidos, a menos que se tenga un estudio técnico que indique que deba utilizarse otro tipo de protección adicional al recubrimiento dieléctrico.

Los objetivos de normar es establecer los criterios, metodologías y requisitos mínimos, para el diseño, selección de materiales, instalación y mantenimiento de los sistemas de



protección catódica en estructuras enterradas o sumergidas, utilizadas para la explotación, transporte y almacenamiento de hidrocarburos y sus derivados.

A continuación se citan las Normatividad que se puede consultar:

- En México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM 008 SECRE 1999 "Control de la corrosión exterior en tuberías enterradas y/o sumergidas", capítulo 4 y párrafos 5.11, 5.12 y 5.13.
- Comité de normalización de Petróleos Mexicanos y Organismos Subsidiarios diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de protección catódica PROY-NRF-047-PEMEX-2002 REV.: 0 página 31 de 44.
- An American National Standard ASME B31.8a-000 addenda B31.8-i999 gas transmission and distribution piping systems Chapter VI Corrosion Control.
- API. Design, Construction, Operation, and Maintenance of offshore hydrocarbon pipelines (limit state design) API recommended practice 1111 third edition, July 1999. Chapter 10 Corrosion Control.
- DOT (Department of Transport) Part 192 y 195--Transportation of natural and other gas by pipeline: minimum federal safety standards:
Subpart I--Requirements for Corrosion Control
- NORMAS PEMEX: No. 2.413.01, No. 3.413.01, No. 2.411.01, No. 3.411.01 y No. 4.411.01).
 - ◆ NORMA PEMEX No. 4.411.01, Capítulo 6, Capítulo 4, Capítulo 5.
 - ◆ NORMA PEMEX No. 3.411.01, Capítulo 5, párrafo 5.4.
 - ◆ NORMA PEMEX No. 3.411.01, Capítulo 5, párrafo 5.4.5.
 - ◆ NORMA PEMEX No. 3.411.01, Capítulo 5, párrafos 5.3 y 5.4.
 - ◆ NORMA PEMEX No. 2.413.01, Capítulo 6.
 - ◆ NORMAS PEMEX No. 3.413.01, Capítulo 4, párrafo 4.7 y No. 2.413.01, Capítulo 4, párrafo 4.2.1.
 - ◆ NORMA PEMEX No. 3.411.01, Capítulo 5, párrafo 5.4.

IV.4 Tipos de camas de ánodos.



Hay varios tipos de camas de ánodos que se pueden diseñar e instalar para diferentes estructuras:

- Camas de ánodos remotas (tuberías subterráneas/sumergidas y estructuras marinas).
- Camas de ánodos distribuidos (todo tipo de estructuras).
- Camas de ánodos profundos (tuberías y tanques subterráneos/sumergidos).

IV.4.1 Camas de Ánodos Remotas.

IV.4.1.1 Generalidades.

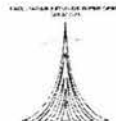
Las camas de ánodos remotas están colocadas a una distancia de la estructura a ser protegida. El término "*remota*" significa que el gradiente de voltaje desarrollado por la descarga de la corriente de los ánodos hacia la tierra no se puede detectar por medio de pruebas en ningún punto cerca de la estructura. Básicamente, la corriente de los ánodos ha entrado a la masa general de la tierra y no se puede detectar en la superficie cerca de la estructura.

Los efectos de una cama de ánodos remota pueden ser considerables. Los efectos de una cama de ánodos remota sobre una tubería bien revestida a campo traviesa, pueden notarse hasta 50 millas de distancia.

"Remota" puede significar una distancia que puede variar desde 100 pies de la estructura protegida hasta una distancia de varias millas.

La distancia real a puntos que se puedan clasificar como remotos con respecto a una estructura, depende de tales factores como la resistividad del suelo, el tamaño de la cama de ánodos, la cantidad de corriente, tamaño y forma de la estructura a ser protegida.

IV.4.1.2 Requerimientos de diseño y operación.



El sitio para la cama de ánodos remota debe ser lo suficientemente grande como para acomodar el número de ánodos y proporcionar el espacio requerido para tener una operación efectiva. La resistividad del suelo debe ser la apropiada. El sitio físico también debe ser la apropiada. El sitio físico también debe ser apropiado, de tal forma si es posible, que no haya interferencia física o eléctrica con otras estructuras. La cama de ánodos debe localizarse en un lugar en donde haya disponibilidad de corriente alterna (CA).

La Figura IV.1 muestra el efecto de una cama de ánodos remota en los potenciales de una estructura con respecto al suelo. Como se muestra en la ilustración, los ánodos que forman parte de la cama se colocan en suelo eléctricamente remoto de la estructura protegida. Una vez que se ha forzado el flujo de corriente a través de la resistencia a tierra remota de la cama de ánodos (que produce el gradiente de potencial anódico mostrado en la ilustración), la corriente está libre para fluir (sin pérdida apreciable de voltaje) a través de la masa de la tierra para llegar a todas las porciones de la estructura que no estén apantalladas.

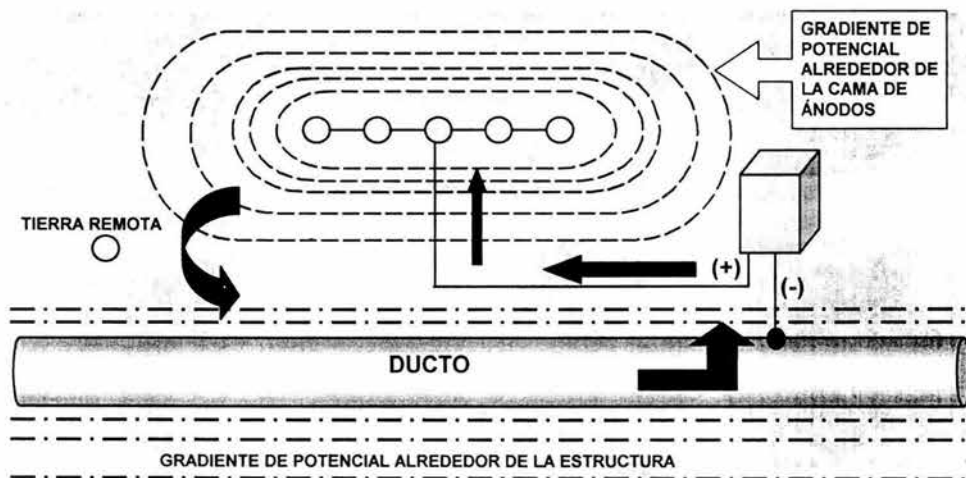


Figura IV.1 Cama de ánodos remota.



En la estructura, la corriente de protección catódica fluye hacia la estructura a través de la resistencia de la estructura a tierra produciendo el gradiente catódico que se muestra en la ilustración. La caída de voltaje a través del campo de gradiente catódico resulta en que la estructura se vuelve negativa con respecto a la tierra remota. Con estructuras bien revestidas, la mayor parte de la caída del voltaje es a través de la resistencia del revestimiento. La densidad del flujo de corriente es tan pequeña en la tierra que es poca la caída de gradiente sobre ella en la tierra y por lo tanto las mediciones de la estructura en el suelo, es básicamente, remota.

Cuando se trabaja con estructuras descubiertas, la densidad del flujo de corriente de la protección catódica es lo suficientemente grande como para causar un campo de gradiente catódico substancial alrededor de la estructura.

IV.4.1.3 Pasos a seguir durante el diseño.

1. **Análisis de los ánodos.** Antes de diseñar una cama de ánodos remota, se deben analizar ciertos datos. Entre estos están:
 - Requerimientos de corriente (determinados por pruebas en el sitio).
 - Resistividad del suelo.
 - Datos físicos del sitio.
 - Economía.
 - Impacto del medio ambiente.
2. **Cálculos de diseño.**
 - a. Determinar los requerimientos de corriente incluyendo requerimientos de corriente incluyendo requerimientos futuros. (Tales como aquellos que debido al deterioro en los revestimientos, etc.).
 - b. Si se conoce la resistividad efectiva del suelo y si se usan las fórmulas apropiadas, entonces se puede proseguir con la determinación del número de ánodos requeridos. Los factores a considerar son:
 - Costo de materiales.



- Costo de instalación.
- Costo del derecho de vía.

c. determinar la resistencia total del circuito. Esto incluye:

- Resistencia a tierra de la cama de ánodos.
- Resistencia a tierra de la estructura (generalmente se puede descartar).
- Resistencia de todos los cables del sistema (resistencia del cable colector anódico al primer ánodo, resistencia efectiva del cable de regreso negativo de la tubería).

La resistencia efectiva del cable colector que se encuentra entre los ánodos es la mitad de la resistencia total del cable colector entre los ánodos porque toda la corriente no fluye a través de la totalidad de la cama de ánodos sino que se ve disminuida a medida que cada ánodo que se conecta al cable descarga parte de la corriente.

- d. Calcular la caída total de voltaje en el circuito multiplicando la corriente requerida por la resistencia total del circuito.
- e. Agregar el contra voltaje (generalmente de 2.0 volts) que existe entre los ánodos y la tubería y que está en oposición al voltaje aplicando (caída total del voltaje).
- f. Calcular la vida útil de los ánodos utilizados ya sean gráficas o fórmulas. Las siguientes fórmulas son útiles para desarrollar curvas de diseño para tamaños específicos de ánodos que podrían usarse en un sistema de ánodos que podrían usarse en un sistema dado.

Ánodo individual instalado verticalmente (fórmula de HB Dwight).

$$R_v = \frac{(0.00521)P}{L} \left(2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 \right) \dots\dots\dots 4.2$$



En donde:

Rv: Resistencia a tierra de un ánodo vertical en ohms.

P: Resistividad efectiva del suelo en ohms-cm.

L: Largo del ánodo en ft.

d: Diámetro del ánodo en ft

Ánodos verticales en paralelo (Erling O. Sunde).

$$R = \frac{(0.00521)P}{NL} \left(2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2.3 \log 0.656N \right) \dots\dots\dots 4.3$$

En donde:

R: Resistencia a tierra, en ohms, de los ánodos verticales en paralelo.

P: Resistividad efectiva del suelo en ohms-cm.

N: Número de ánodos verticales en paralelo.

d: Diámetro del ánodo en ft.

L: Largo del ánodo en ft.

S: Distancia entre los ánodos en ft.

Ánodo individual instalado horizontalmente, (H.B. Dwight).

$$R_H = \frac{(0.00521)P}{L} \left(2.3 \log 4L^2 + \frac{4L\sqrt{S^2+L^2}}{dS+L} + S - \sqrt{\frac{S^2+L^2}{L}} - 1 \right) \dots\dots\dots 4.4$$

En donde:

R_H: Resistencia a tierra, en ohms, del ánodo horizontal.

P: Resistividad efectiva del suelo en ohms-cm.

L: Largo del ánodo horizontal en ft.

D: Diámetro del ánodo en ft.

S: El doble de la profundidad del ánodo en ft.

Cuando se utilizan rellenos especiales (tales como coque para los rellenos especiales como coque para los ánodos de corriente impresa), las



dimensiones de la columna especial de relleno deben utilizarse en la fórmula y no la dimensión del ánodo en sí.

3. Especificaciones

1) Especificaciones de equipo.

Hay varias ventajas definitivas al estandarizar tanto como sea posible los tipos de equipos que se utilizarán en las instalaciones de protección catódica. Esto simplifica considerablemente la selección de materiales y permitirá la preparación de especificaciones estándar.

Al preparar una especificación, se detallan todas las características comunes y se dejan espacios en blanco para ser llenados para cada diseño individual y/o compra. Las especificaciones se pueden escribir para diferentes artículos como serían rectificadores, ánodos pre-empacados, cables, diseños típicos de camas de ánodos, instalación de rectificadores, etc.

2) Especificaciones de construcción.

Las especificaciones de construcción deben ser lo más comprensible posible para asegurar una instalación apropiada y exitosa. Los factores que determinan el grado de detalle dependerán de que si el proyecto va a ser instalado por un contratista de fuera o de si se utilizará la mano de obra propia de la compañía.

Generalmente, hay procedimientos estándar dentro de una compañía y el personal está familiarizado con ellos.

Para los contratistas de fuera, además de los requerimientos legales que formarían parte de cualquier contrato, deben incluirse también secciones sobre seguridad, responsabilidades, programas del proyecto, etc. Debe haber una descripción del alcance del trabajo, referencias (planos, documentos), entregas por el contratistas/vendedores. La instalación de la cama de ánodos debe ser descrita por secciones que detallen lo siguiente:



- Instalación del rectificador.
- Instalación de los ánodos.
- Requerimientos de excavaciones y de relleno.
- Conexiones de los cables y alambres a la estructura.
- Estaciones de prueba, si las hubiera.

IV.4.2 Cama de ánodos distribuidos.

IV.4.2.1 Generalidades.

a) Las camas de ánodos distribuidas se utilizan por una o más de las siguientes razones:

- No es posible adquirir un derecho de vía para la construcción de una cama de ánodos remota.
- Un tipo de cama de ánodos remota causaría corrientes parásitas inaceptables que ocasionarían problemas de interferencia en estructuras ajenas.
- La geometría de la estructura protegida es tal que ocurriría un apantallado excesivo de la corriente de protección catódica.

b) Características de diseño y de operación.

Las camas de ánodos distribuidas se basan en el concepto del potencial de la tierra.

Con una cama de ánodos del tipo remota, la estructura se vuelve más negativa en respecto al suelo circundante. Con los ánodos distribuidos, el suelo circundante se vuelve positivo con respecto a la estructura y se vuelve negativa con respecto al suelo.



La Figura IV.2 se ilustra un ánodo y como cambia el potencial de la tierra en la vecindad de la estructura.

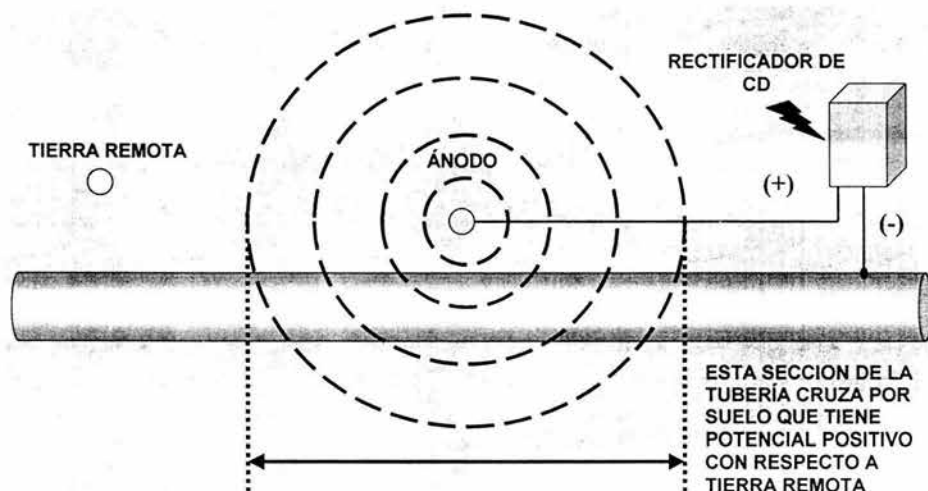


Figura IV.2. Gradiente de Potencial por Ánodos Distribuidos.

El concepto de variar el potencial de la tierra como se utiliza con los sistemas anódicos distribuidos, requiere que las estructuras corten el campo de gradiente anódico que rodea a los ánodos. En la Figura IV.3 muestra esto para el caso de un solo ánodo

Como se puede ver en la Figura IV.3, aquella parte de la estructura que está dentro del campo de gradiente anódico está en tierra que es positiva desde el punto de vista electrónico con respecto a la tierra remota. Esto significa que dentro del campo de gradiente de los ánodos, la estructura es negativa con respecto a la tierra adyacente aún cuando no pueda volverse más negativa con respecto a la tierra remota. Dentro del campo del gradiente de los ánodos, aquella parte de la estructura más cercana al ánodo es normalmente más negativa con respecto a la tierra adyacente.

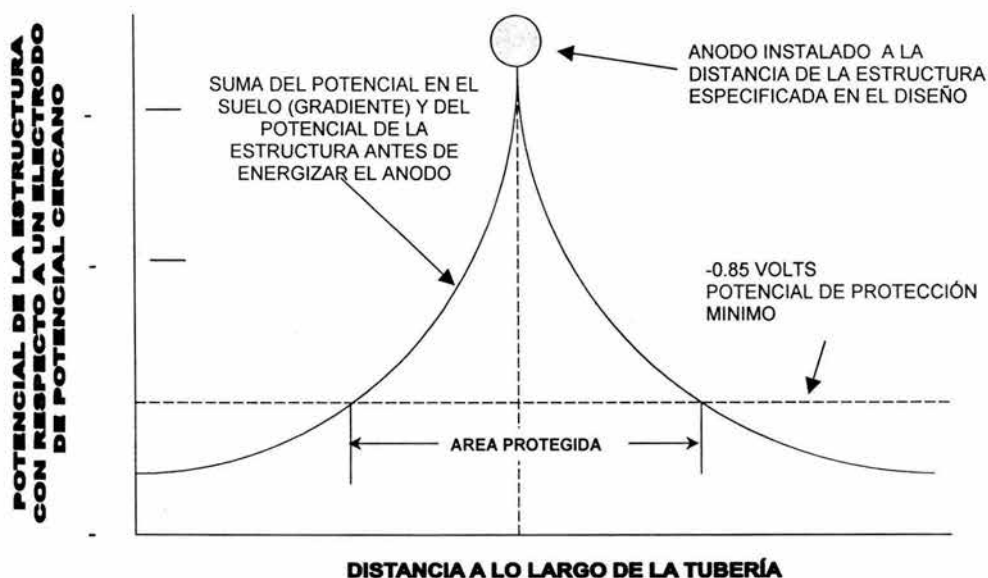


Figura IV.3. Gradiente de Potencial vertical de un ánodo vertical.

IV.4.2.2. Algunas consideraciones teóricas.

El concepto de ánodos distribuidos que utiliza el efecto del campo de gradiente de los ánodos depende del establecimiento de una diferencia de potencial entre la estructura y la tierra adyacente, y esta diferencia de potencial es de mayor importancia que la entrega de corriente para este tipo de cama de ánodos

Por supuesto, la entrega de corriente está involucrada en obtener el gradiente de potencial, ya que el gradiente es creado por la corriente que fluye a través de una resistencia (tierra).



El gradiente de potencial de un ánodo vertical puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$V_x = \frac{0.038IP}{\pi y} \log_{10} \left(\frac{y + \sqrt{y^2 + X^2}}{X} \right) \dots\dots\dots 4.5$$

En donde:

- Vx: Potencial de la tierra con respecto a tierra remota a una distancia X del ánodo.
- I: Corriente del ánodo a tierra en amperes.
- P: Resistividad de la tierra en ohm-cm.
- y: Largo del ánodo vertical en ft.
- X: Distancia del ánodo en ft.

Usando esta fórmula, se puede desarrollar una curva como aquella mostrada en la Figura IV.3

IV.4.2.3. Factores de distorsión.

El tipo de curva desarrollada en la sección anterior se basa en condiciones razonablemente uniformes. Si la resistividad varía considerablemente entre las distintas capas del suelo, se puede distorsionar la forma y el tamaño de la curva del gradiente.

IV.4.2.4. Pruebas en terrenos de resistividad variable.

Cuando se planea un sistema de ánodos distribuidos y hay razón para creer que la resistividad del suelo no es uniforme, se deben obtener curvas de gradientes reales para propósitos del diseño. Esto se puede lograr al instalar ánodos de prueba del tipo que se van a utilizar y midiendo el gradiente alrededor de cada ánodo, mientras se descarga de cada ánodo una cantidad conocida de corriente.

Aún cuando esto tomará más tiempo, el hacer pruebas de campo adicionales, mejorará la efectividad del diseño y permitirá instalar el menor número posible de ánodos. Esto bien vale la pena, ya que el sistema de ánodos distribuidos tienden a



tener un costo elevado y un diseño correcto puede ayudar a reducir el número de ánodos.

Por otro lado, los resultados pueden mostrar que el espacio entre los ánodos debe ser mucho menos que lo indicado por las curvas teóricas. Sabiendo esto, se podrán instalar suficientes ánodos durante la instalación y así evitar la necesidad de tener que rehacer la instalación para agregar más ánodos.

El efecto entre adyacentes puede verse por los resultados mostrados en la Figura IV.4.

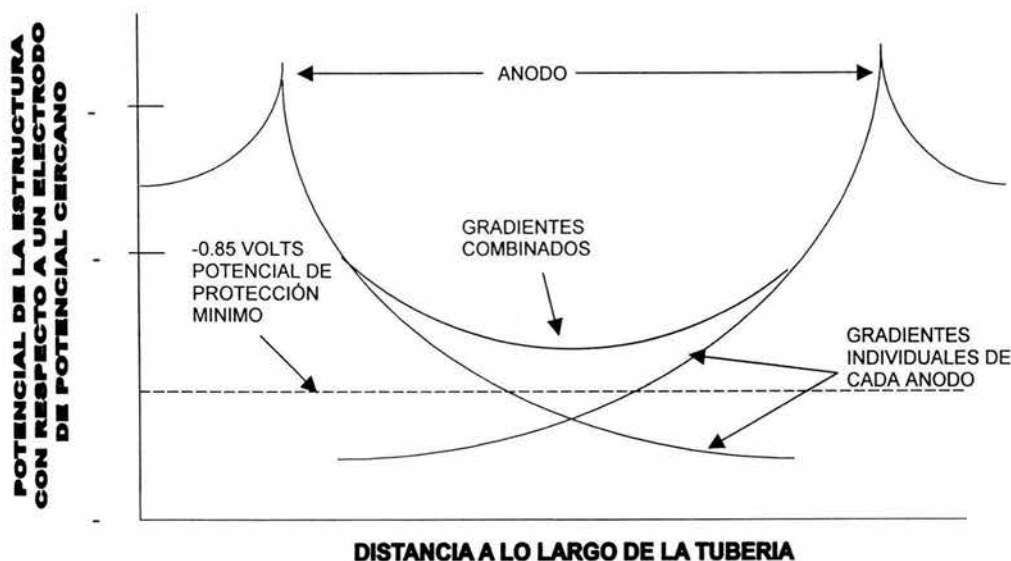


Figura IV.4. Gradiente combinado de Potencial ánodos distribuidos adyacentes.

Hay un punto importante que siempre hay que tomar en cuenta cuando se utilizan múltiples ánodos en un sistema de ánodos distribuidos. El punto es que en el lugar



central entre ánodos adyacentes, los efectos de gradiente de los ánodos pueden ser mayor que el espacio obtenido

Hay un punto importante que siempre hay que tomar en cuenta cuando se utilizan múltiples ánodos distribuidos. El punto es que en el lugar central entre ánodos adyacentes son aditivos. Esto significa que el espacio obtenido entre los ánodos puede ser mayor que el espacio de la curva de gradiente para un solo ánodo, como se mostró en la Figura IV.4.

IV.4.2.5. Ubicación de los ánodos en un sistema de ánodos distribuidos.

Los ánodos distribuidos con los sistemas de corriente impresa, generalmente involucran un gasto más elevado que las camas de ánodos del tipo remota. Esto es porque los ánodos, como ya se mencionó, tienen que ser distribuidos a todo lo largo de estructura que va a ser protegida. Cuando se están instalando los ánodos en la estructura que está dentro de una red compleja subterránea, los movimientos de tierra y la instalación de los mismos pueden ser muy costosos. De igual forma, en una red compleja hay una gran probabilidad de que se dañe el cable colector de los ánodos, al realizar otros trabajos de excavación en el área.

El tipo de distribución de ánodos dependerá en un alto grado de la complejidad del área usada y de la vulnerabilidad de los cables colectores a ser dañados por otros. En donde la complejidad y el riesgo son grandes, el tipo de distribución de ánodos más caro puede llegar a ser el más barato a la larga.

IV.4.2.6. Circuito simple. Alimentación simple.

Este es el tipo más barato de diseño de ánodos distribuidos. Se utilizarían, por ejemplo, en una sección de tubería descubierta en un área en donde no se encuentran otras estructuras y la cual es de fácil acceso para propósitos de mantenimiento y de reparación.

Como se puede ver en la Figura IV.5, una rotura en cualquier sección del sistema del cable colector, desenergizará por lo menos un ánodo y podría resultar en la pérdida de todo el sistema de ánodos.

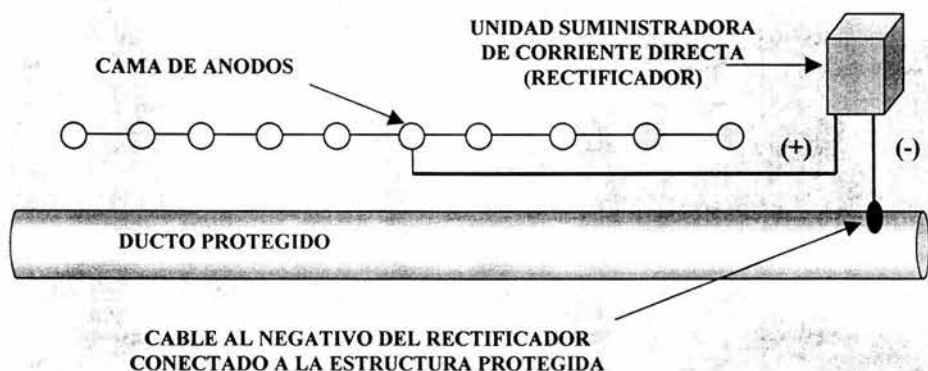


Figura IV.5. Cama ánodos distribuidos-circuito simple-alimentación simple.

IV.4.2.7. Circuito simple. Alimentación doble.

Esta distribución de ánodos es más confiable que el arreglo de circuito simple. Requiere de un costo más elevado para el cableado y puede también ser más elevado el costo del zanqueo. Una distribución típica se muestra en la Figura IV.6.

El sistema de doble alimentación que se muestra en la Figura IV.6 tiene la gran ventaja que cualquier rotura en el cable colector no causará una desenergización de ninguno de los ánodos.

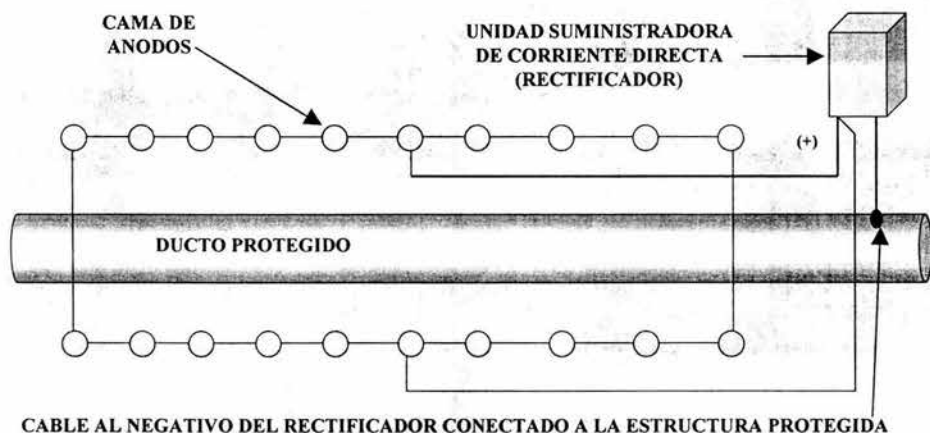


Figura IV.6. Cama ánodos distribuidos-circuito simple-alimentación doble.

IV.4.2.8. Circuito múltiple. Áreas separadas.

Este tipo de instalación se utiliza en áreas donde es muy posible el daño a los cables colectores. No involucra un costo mucho más elevado que el sistema de circuito sencillo, alimentación doble, pero sí mejora la confiabilidad.

Los parámetros esenciales se muestran en la Figura IV.7. Como fue el caso con la distribución mostrada en la Figura IV.6, se tendrían que tener dos roturas de cables colectores para causar la pérdida de cualquier ánodo.

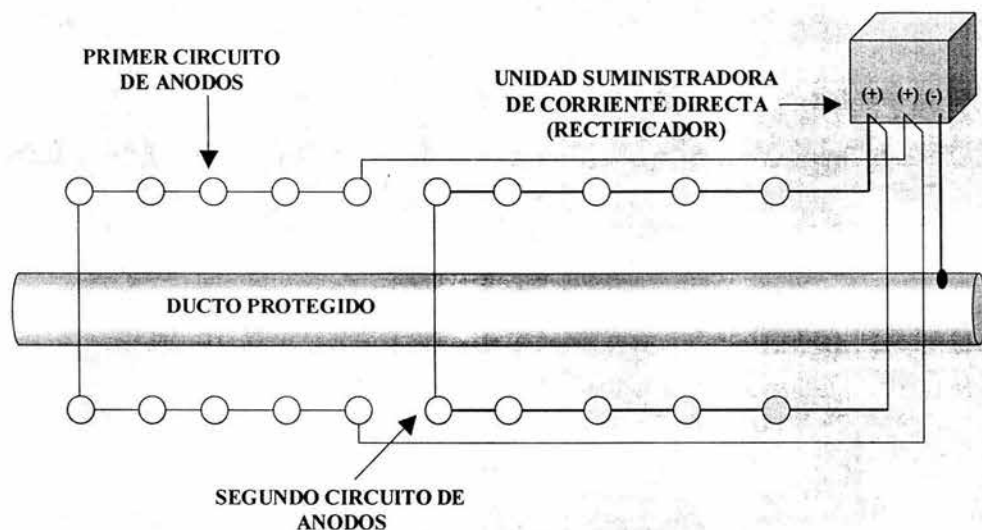


Figura IV.7. Cama ánodos distribuidos-circuito múltiple-alimentación individual.

IV.4.2.9. Circuito múltiple. Áreas concurrentes.

Este arreglo es el más costoso de construir, pero aunque suene redundante, mejora la confiabilidad. El arreglo se muestra en la Figura IV.8.

La ventaja particular del arreglo ilustrado es que, si se pierde un circuito anódico completo por cualquier razón, todavía habrá por lo menos protección catódica parcial para la estructura, proporcionada por el otro circuito anódico.

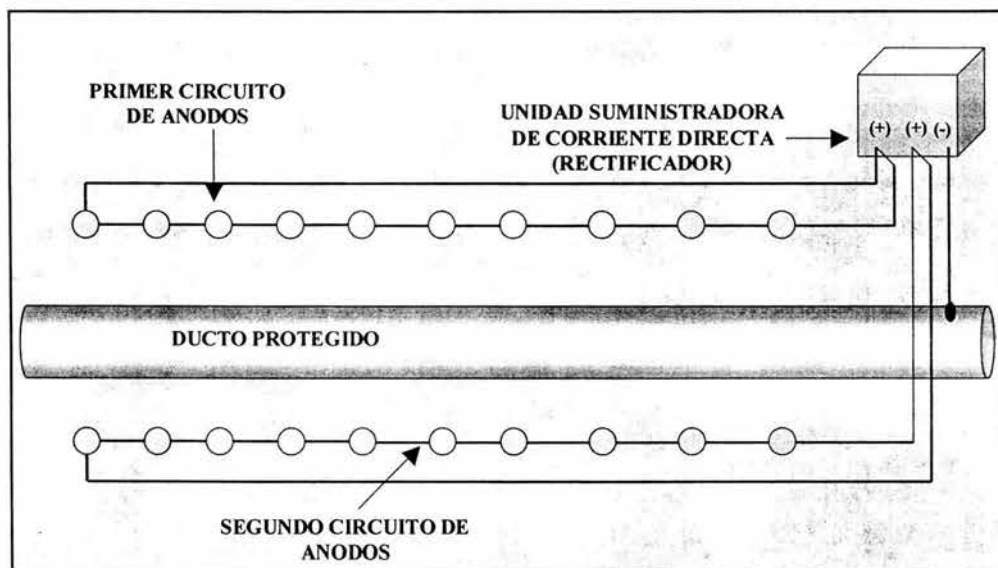


Figura IV.8. Cama ánodos distribuidos-circuito múltiple-alimentación Múltiple.

IV.4.3. Camas de ánodos profundas.

IV.4.3.1 Generalidades.

En ocasiones es conveniente instalar una cama de ánodos con algunas de las características de una cama de ánodos remota pero para la cual no hay espacio disponible. En tales casos, la única forma de colocar a los ánodos a distancia remota de la estructura, es instalándolos a mayores profundidades por debajo de la estructura.

IV.4.3.2. Uso de camas de ánodos profundas.

En general, una cama de ánodos profunda es más costosa de construir que una convencional de capacidad similar. Además, el material anódico activo de una cama de ánodos profunda está muy por debajo de la superficie de la tierra, a una distancia inaccesible para propósitos de mantenimiento o de reparación, si fuese necesario, en el caso de que hubiera fallas en el material anódico utilizado, o en los cables de



conexión. Por estas razones es deseable utilizar el tipo de cama de ánodos profunda sólo cuando el otro tipo más accesible y menos costoso de camas de ánodos es impráctico o indeseable por una u otra razón. Algunas aplicaciones típicas para una cama de ánodos profunda son:

- 1) En donde los suelos de la superficie no son los apropiados para camas de ánodos convencionales.
- 2) En donde no se puede obtener derecho de vía para las camas de ánodos remotas convencionales
- 3) En donde el congestionamiento de estructuras subterráneas hace impráctico el localizar una cama convencional en donde no se crearán problemas de corrientes parásitas.

IV.4.3.3. Función de cama de ánodos profunda en relación a distintos tipos de suelo.

IV.4.3.3.1 Suelos uniformes.

En donde la estructura del suelo se puede considerar razonablemente uniforme, desde la superficie hasta una profundidad considerable por debajo del punto en donde se localizaría la cama de ánodos profunda, habrá muy poca diferencia entre la operación de una cama de ánodos de tipo convencional y una profunda. Esto se muestra en la Figura IV.9. La única diferencia entre una cama de ánodos profunda y una convencional, es que la resistencia a tierra de la cama profunda es un poco menor que de la convencional, si los ánodos se instalan a una distancia uniforme de aproximadamente 20 ft. Esto se debe a la extensa masa de tierra sobre el material anódico activo en la construcción de cama de ánodos profunda comparada con la de la convencional.

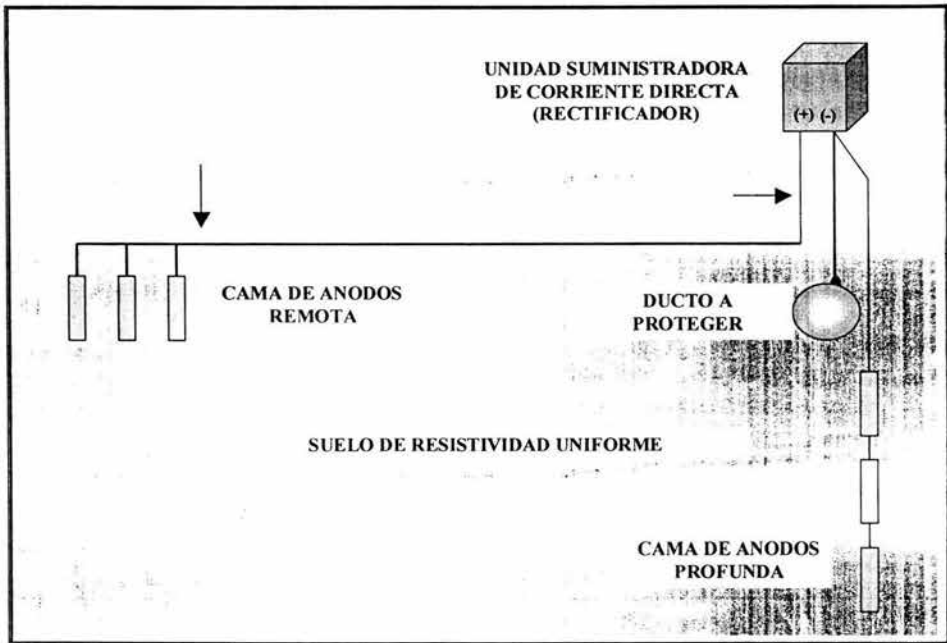


Figura IV.9. Suelo Uniforme.

IV.4.3.3.2 Suelo de alta resistividad cerca de la superficie.

Este tipo de suelo puede ser como el que se muestra en la Figura IV.10 para una cama de ánodos profunda situada a una distancia considerable de la superficie. El caso que se muestra en la Figura IV.10 es especialmente ventajoso para lograr una excelente operación de la cama de ánodos profundas.

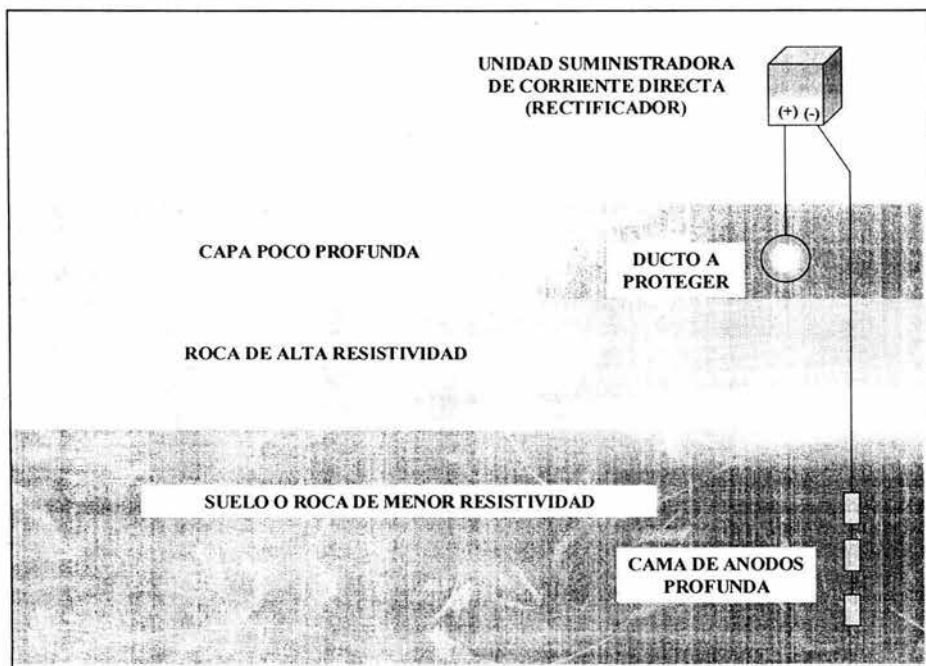


Figura IV.10. Suelo Favorable a cama de ánodos profunda.

Este tipo de término se ilustra en la Figura IV.10, y se encuentra ocasionalmente en trabajos de tubería en donde existe una capa poco profunda (a veces sólo llega a la profundidad de la tubería) de suelo de baja resistividad sobre una capa de roca de alta resistividad. Si debajo de esta roca de alta resistividad existe algún material de menor resistividad que es apropiado para una cama de ánodos profunda, entonces la descarga de corriente de suelo profundo se extenderá lateralmente, en ocasiones, por distancias considerables y atravesará por la roca de alta resistividad hasta llegar al suelo superficial donde se encuentra la tubería. Estas condiciones son probablemente las más favorables para la actuación de camas de ánodos profundas cuando se utilizan con tuberías bien revisadas. El material que se encuentra por debajo de la roca de alta resistividad puede no ser necesariamente de muy baja resistividad, pero si dicha resistividad es bastante



más baja que la de la capa de roca, de tal forma que se descarga una cantidad de corriente adecuada de la cama de ánodos al aplicar un voltaje razonable, entonces se obtendrá una operación satisfactoria.

IV.4.3.3 Suelo de baja resistividad cerca de la superficie, alta resistividad por debajo.

En contraste con lo explicado en el párrafo anterior, pueden existir situaciones en donde los subsuelos son de tales resistividades que no se logran condiciones favorables al uso de las camas de ánodos profundas. Si hay un suelo cerca o en la superficie, de una resistividad relativamente baja, se puede utilizar con bastante éxito camas de ánodos convencionales de tal forma que no se debe considerar el utilizar camas de ánodos profundas.

La Figura IV.11 muestra una situación en donde una cama de suelo grueso de baja resistividad se encuentra en la superficie de la tierra, con una capa de roca u otro material de alta resistividad por debajo de ella. En este caso, las camas de ánodos convencionales deben funcionar también como cualquier tipo de instalación que se pudiera hacer, con la posible excepción de un sistema de ánodos distribuidos a todo lo largo de la tubería protegida.

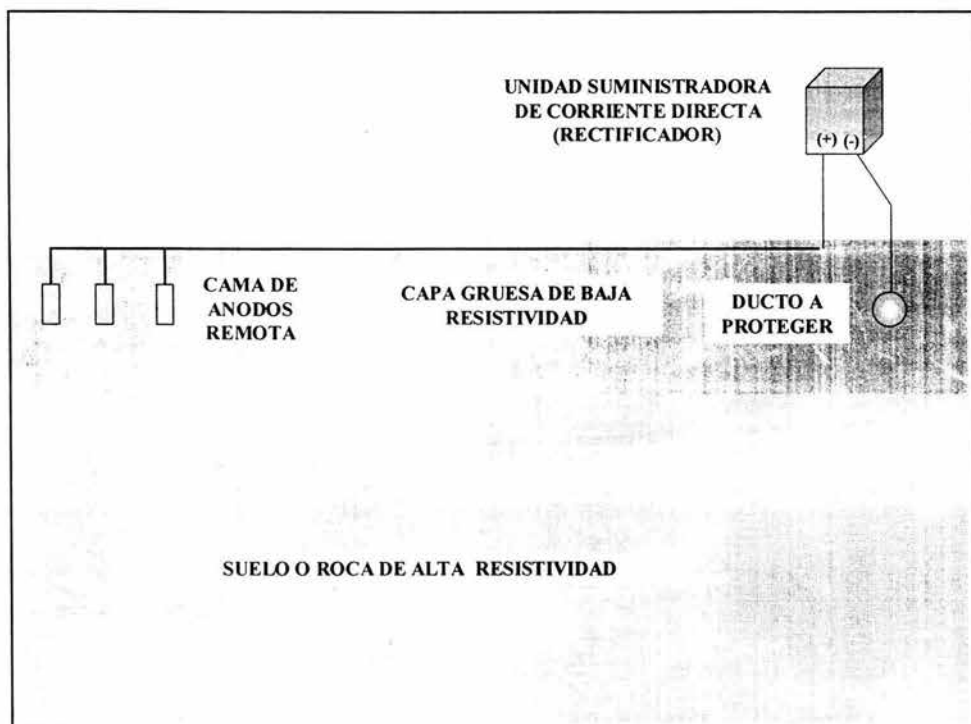


Figura IV.11. Suelo Favorable a cama de ánodos remota.

La Figura IV.12 muestra una situación en donde la resistividad del suelo en o cerca de la superficie puede ser de una resistividad tan alta que tendría como consecuencia que la cama de ánodos convencional resultaría inoperable económicamente. Sin embargo, si hay una capa gruesa de resistividad relativamente baja por debajo de esa capa poco profunda, puede ser posible el instalar los ánodos que una cama convencional, lo suficientemente profundos como para estar en la roca de baja resistividad, y se podría obtener una operación razonablemente aceptable de la cama de ánodos instalados. La pregunta que aquí surge es ¿cuándo se considera que una cama de ánodos es del tipo profunda y no del tipo convencional?. Como guía podemos decir



que los ánodos que son ilustrados a profundidades de menos de aproximadamente 50 ft, se pueden considerar como del tipo de construcción convencional.

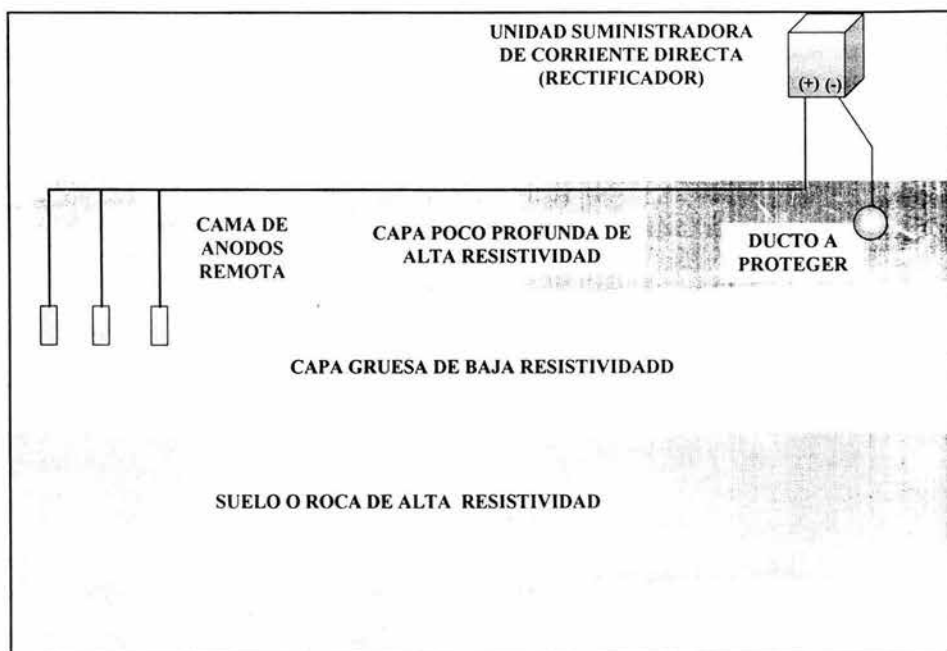


Figura IV.12. Suelo Favorable a cama de ánodos remota.



IV.4.3.3.4 Perfil de Potencial a lo largo de una tubería protegida por una cama de ánodos profunda.

Un perfil de potencial típico a lo largo de una tubería protegida con un cama de ánodos profunda sería aproximadamente como se muestra en la Figura IV.13, siempre que la cama profunda esté ubicada en una formación de suelo apropiada como ya se discutió anteriormente. Se hará notar que el pico de la curva del gradiente de potencial próxima a la cama de ánodos no es severo.

El resultado de una curva de gradiente de potencial es el proteger mucho más cantidad de tubería por unidad de corriente descargada por el rectificador de la cama de ánodos. Tales resultados pueden obtenerse cuando la cama de ánodos profunda se coloca a una buena profundidad y por debajo de formaciones de suelo favorable, y que en efecto esté ubicada en la tierra remota con respecto a la tubería. Esto evita que la tubería esté dentro del área de influencia que rodea a la cama de ánodos.

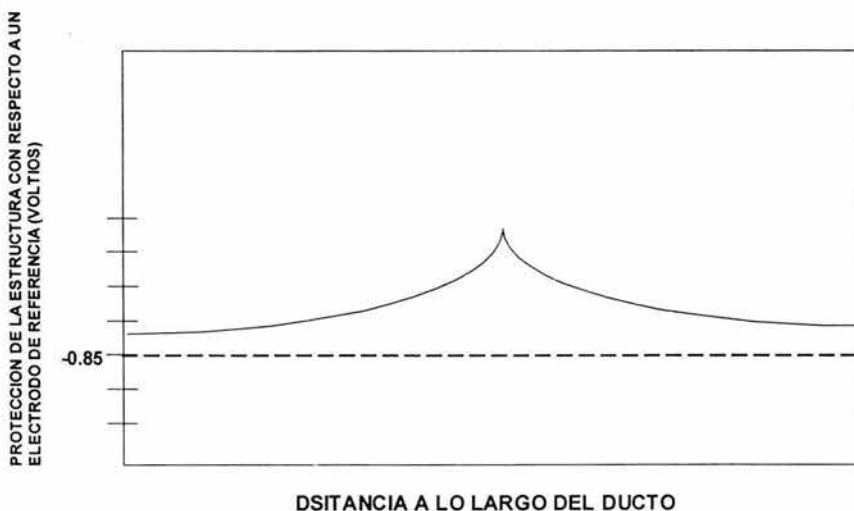


Figura IV.13. Curva de potencial resultante de la protección por cama de ánodos profunda.



IV.4.3.5 Interferencias relacionadas con camas de ánodos profundas.

Aún cuando las camas de ánodos profundas tienden estar relativamente libres de efectos de interferencia en áreas congestionadas, esto no significa que necesariamente esté libre de todos estos efectos. En áreas en donde hay otras estructuras verticales tales como pozos de petróleo, de gas o de agua, es posible que tales estructuras recojan corriente de la cama de ánodos profunda y por lo tanto puedan sufrir un efecto de interferencia dañina. El que esto suceda o no, será principalmente debido a la falta de espacio. Si la cama de ánodos profunda es colocada del tal forma que las otras estructuras están dentro del campo del gradiente de potencial ("área de influencia") que rodea a la columna vertical anódica, estas otras estructuras tenderán a recoger corriente cuando pasan por el área de influencia. Esta corriente entonces será descargada en otro lado de la estructura, con efectos dañinos a menos que se tomen medidas preventivas.

IV.4.4. Sistemas combinados.

Podrá haber casos en donde no se espera en un tiempo que la cama de ánodos proporcione suficiente protección catódica a una estructura. En estos casos, se utiliza una combinación de sistemas. Típicamente, se puede utilizar una cama de ánodos remota para proporcionar protección a una estación generadora, suplementada por sistemas de ánodos distribuidos en áreas en donde la corriente de la cama de ánodos remota está apantallada por redes complejas de estructuras subterráneas. Las camas de ánodos profundas, distribuidas a través de una estación generadora, "quizás nueve o diez para cubrir dos millas cuadradas del área de una planta" se utilizan para la protección de este tipo de planta.

El tipo de cama de ánodos que se escoja siempre debe estar basado en las características particulares de las estructuras que deba proteger.



IV.5 Consideraciones al diseñar un sistema de protección catódica.

1. Para una tubería subterránea.

Hay dos alternativas de diseño:

a) El método de "corte y prueba".

Con este método, un ingeniero experto en protección catódica instalará un cierto número de ánodos posteriormente realizará pruebas para ver si la instalación es efectiva. Si la instalación no proporciona la suficiente corriente, entonces se instalarán más ánodos hasta que ésta sea efectiva. Se debe hacer énfasis en que "el ingeniero con experiencia en protección catódica" debe estar familiarizado con el área y generalmente es un empleado de la compañía que es propietaria de la estructura que esta siendo protegida. Este tipo de trabajo generalmente esta hecho por el personal de mantenimiento de la compañía.

- b) El segundo método de diseño que es el más usado, es el matemático. Esto permitirá al diseñador predecir con bastante exactitud el número y la localización de los ánodos, el tamaño del rectificador el costo total del sistema. En caso de sistemas de corriente impresa, se necesitan más pruebas después de la instalación para determinar si se han creado problemas de corrosión de corrientes parásitas en estructuras ajenas.
- c) Los siguientes párrafos examinan los pasos a seguir en el diseño de camas de ánodos remotas.

Una vez que se han analizado los resultados de las pruebas, el primer cálculo se requiere es la cantidad de corriente de protección necesaria:

$$I_p = (A_p)(I_D)(1 - CE) \dots\dots\dots 4.6$$

En donde:

I_p : La corriente total de protección para la tubería.

A_p : Área total de la tubería en m^2 .

I_D : La cantidad de corriente de protección en mA/m^2 .



CE: Eficacia del revestimiento en por ciento estimado del área superficial en toda la tubería que está revestida, expresado en una fracción decimal.

Analizar las pruebas de requerimientos de corriente para varias secciones de la tubería, si es posible.

2. Otra consideración para el prediseño es determinar la vida útil deseada para el sistema de protección catódica. Una vida útil típica de 15 a 20 años; sin embargo, algunas compañías diseñan una vida útil más grande.

3. La siguiente consideración en el diseño de un sistema de protección con corriente impresa sería notificar al comité local coordinador de control de corrosión si es que existe, la decisión de instalar un sistema de corriente impresa se debe determinar en una etapa temprana en el diseño, si cualquier estructura ajena cercana puede ser aceptada por el rectificador propuesto a protección catódica.

4. Seleccionar arbitrariamente un material, un peso y dimensiones para los ánodos.

- Los datos de la Tabla IV.5 muestran los tamaños y los pesos de los ánodos de hierro fundido con alto contenido de silicio. Este proceso de selección es realmente arbitrario. El costo económico debe calcularse y entonces debe tomarse una decisión sobre cual material se debe usar.
- Una vez que se selecciona un ánodo, se debe determinar la recomendación del fabricante para la densidad de corriente para el electrolito involucrado, (tierra o agua).

5. Calcular el número de ánodos requeridos para cumplir con los requerimientos de la densidad de corriente y de vida útil.

$$N = \frac{I_p}{(i)(Aa)} \dots\dots\dots 4.7$$

En donde:

N: Número de ánodos requeridos.

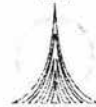
I_p: La cantidad de corriente de protección total requerida en amperes.



- i: La máxima densidad permisible de corriente del ánodo en Amp/ft².
Aa: El área superficial del ánodo en ft².

Tabla IV.5 Tamaño y pesos de distintos tipos de ánodos para corriente impresa.

Tamaño Nominal	Peso de c/u en lb	Área (ft ²)	Uso General.	Características Especiales.
1"X60"	12	1.4	Tanques de agua fresca.	Cada extremo Agregando a 1-1/2" de diámetro con abertura para empalme.
1-1/2" X 60"	25	2.0	Enfriadores de caja abierta que requieren de largos mayores de 5 ft	Diámetros uniformes de 1-1/2" con abertura en ambos lados para empalmes.
1-1/2"X 60"	26	2.0	Cama relleno.	Un extremo agregando a 2" de diámetro para los empalmes.
1-1/2" X 60"	26	2.0	Cama ánodos con relleno que permite conectar los ánodos en serie.	Cada extremo agregando a 2" diámetro en una abertura para conectar el cable.
2"X60"	44	2.6	Cama de ánodos sin relleno	Diámetro uniforme de 2" con conexión sólo en un extremo.
2"X 60"	60	2.8	Pozo ligeramente salino o ánodo profundo, sin relleno	Cada extremo agregando a 3" de diámetro para el empalme.
3" X 36"	80	2.5	Suelo agresivo, ánodo profundo, o agua de mar, sin relleno.	Sólo un extremo agrandando a 5" de diámetro para conexión del cable.
3" X 60"	110	4.0	Suelo agresivo, ánodo profundo, o agua de mar, sin relleno.	Sólo un extremo agregando a 4" de diámetro, con abertura para conexión del cable.
4-1/2" X 60"	220	5.5	Agua de mar con fuerte descarga de corriente por cada ánodo.	Diámetro uniforme de 4-1/2" con apertura en cada extremo. Permite que se conecten 2 cables si fuese necesario.



6. Selección del lugar de instalación para la cama de ánodos y resistencia total de la cama de ánodos.

- Determinar si una cama de ánodos del tipo cercano o remota debe ser escogida, basándose en las siguientes consideraciones:
 - a) Cama de ánodos remota o de punto.
 1. Generalmente más barata.
 2. Se puede proteger tramos largos de tubería si tienen un buen revestimiento.
 3. Puede causar problemas severos de corrosión por corrientes parásitas.
 4. Es posible proteger excesivamente la tubería y causar separación del revestimiento.
 - b) Cama de ánodos profunda o de punto. Los mismos comentarios que el inciso anterior.
 - c) Cama de ánodos cercana o distribuida:
 1. Generalmente más cara.
 2. Se reducen los problemas de corrosión por corriente parásita.
 3. Generalmente se utiliza para estructuras descubiertas o mal revestidas o para aquellas en áreas congestionadas y/o apantalladas.
 4. La distribución no es tan prevalente.
- Distribución de los ánodos en una cama de ánodos remota de punto y cálculo de la resistencia de la cama de ánodos.
 - a) El primer ánodo puede estar a más de 500" de la tubería.
 - b) El resto de los ánodos están especificados en centros de 10" a 40".
 - c) La cama de ánodos debe correr perpendicularmente a la tubería si el derecho de vía lo permite.
 - d) Si es posible, la cama de ánodos debe ubicarse en el punto medio de la distancia de la tubería a ser protegida por cada instalación.
 - e) Las camas de ánodos del tipo de punto, si es posible, se deben situar en suelos de baja resistividad. La profundidad del ánodo debe ser tal que siempre se encuentre en un área de alta humedad permanente.



- f) Una cama de ánodos de punto puede causar serios problemas de corrosión por corriente parásita a estructuras ajenas cercanas. Es bueno localizar este tipo de cama lo más lejos posible de otras estructuras.
- g) Los cálculos para la resistencia de una cama de ánodos de punto con ánodos verticales son:

$$R_{\text{ánodos}} = \frac{(0.00521)P}{NL} \left[\ln\left(\frac{8L}{d}\right) - 1 + \frac{2L}{S} \ln(0.656N) \right], \dots\dots\dots 4.8$$

En donde:

$R_{\text{ánodos}}$ = La resistencia total equivalente de N ánodos en paralelo en ohms.

P = La resistividad del suelo en ohm-cm.

N= el número de ánodos/columnas de relleno en paralelo.

L= El largo de la columna de relleno en ft.

S= La distancia de centro a centro entre ánodos/columna de relleno en ft.

7. Calcular la resistencia total de cableado.

- a. Una vez que se ha localizado la cama de ánodos y que se ha determinado la resistencia del centro de la cama a la estructura protegida, se requiere determinar el tamaño de cable más económico y la resistencia total del cable.
- b. Para determinar cual es el tamaño más económico del cable, se debe de considerar el costo anual de operación causado por pérdidas en el cable y los primeros costos asociados de materiales y de mano de obra para varios diámetros de cable.
- c. Para calcular la resistencia total del cable, una vez que se conoce el total del largo del cable, la resistencia total se puede determinar.

8. Calcular la resistencia de la tubería al suelo.



- a. La estructura a ser protegida, presentará una resistencia al flujo de corriente basada en la resistencia efectiva del revestimiento por ft² promedio de área superficial (calidad de revestimiento).
- b. Para desarrollar la fórmula que se requiere para calcular R_c (la resistencia del cátodo al suelo, debemos considerar:

- La resistencia efectiva del revestimiento que puede ser determinada por pruebas de campo, realizadas al mismo tiempo que se están llevando a cabo las pruebas de requerimiento de corriente.
- La resistencia efectiva del revestimiento es un número que representa la resistencia promedio sobre un área típica de 1 ft² de superficie de tubería. Todas estas superficies están en paralelo con el suelo, de tal forma que para determinar la resistencia equivalente de la tubería, debemos usar la ley de resistencias paralelas.

$$R_c = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \dots\dots\dots 4.9$$

en donde n es el número de resistencias en la combinación paralela.

- Para una tubería, la "n" es el número de áreas de 1 ft² de superficie a lo largo de la tubería. Ver el área superficial total de la tubería. Además:

$$R_1 = R_2 = R_3 \dots = R_n \dots\dots\dots 4.10$$

ya que se supone que R es una resistencia promedio para un área superficial de 1ft².

- Substituyendo en la fórmula la información anterior:



$$R_c = R_{eq} = \frac{1}{\frac{n}{R}} = \frac{R}{n} \dots\dots\dots 4.11$$

En donde:

R_c = Es la resistencia del cátodo a la tierra en ohms.

R = Es la resistencia efectiva de revestimiento en ohms para un área superficial de 1 ft².

n = es el área superficial de la tubería en ft²

9. Resistencia total del circuito.

Es la suma de todas las resistencias.

10. Calcular el voltaje del rectificador.

Ya que se conoce la corriente total de protección y la resistencia total del circuito, ya sólo es necesario aplicar la ley de ohm para determinar el voltaje del rectificador requerido:

$$V = I_p \times R_{total} \dots\dots\dots 4.12$$

IV.6 Pasos a seguir para el diseño de una cama de ánodos distribuidos.

Los siguientes párrafos enumeran los pasos a ser seguidos para el diseño de una cama de ánodos cercana o distribuida y para los cálculos para determinar la resistencia de la cama de ánodos:

1. Los ánodos se pueden colocar a una distancia de 5" a 30" en una forma lateral, a lo largo de la tubería. El espacio entre los ánodos puede ser hasta de 100" dependiendo de los gradientes de potencial de la tierra, de la interferencia y de los efectos de apantallado.

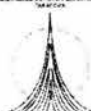


2. El cable colector del rectificador se puede instalar simple o doble, dependiendo de la confiabilidad y de las restricciones de costo. En ocasiones se pueden usar dos rectificadores, uno a cada extremo de la cama de ánodos distribuida.
3. Hay que tener en cuenta que esta cama de ánodos trabaja sobre el principio que si la tubería protegida está en la "zona de influencia" de un ánodo en particular, entonces habrá un flujo de corriente del ánodo a la tubería.
4. En la Figura IV.3 muestra gráficamente el gradiente de potencial de la tierra desarrollado alrededor de un solo ánodo y la Figura IV.4 muestra que se obtiene una protección completa entre los ánodos A y B debido a su efecto aditivo, mientras que cada ánodo por sí sólo, no protegería a la mitad de la tubería entre ánodos.
5. Para distribuir los ánodos, el primer paso es establecer el campo de gradiente del ánodo basándose en los datos de resistividad del suelo y en la influencia de estructuras cercanas. Esto se puede calcular y plantear utilizando el trabajo hecho por Runderberg. Las curvas de gradiente se sobreponen para determinar el espacio máximo que debe existir entre los ánodos y aún lograr una protección total.
6. Para determinar el tamaño del Rectificador, el primer paso es instalar la cama de ánodos distribuida y posteriormente ver el tamaño requerido del rectificador basándose en pruebas de campo.

IV.7 Recubrimientos.

Es importante que los recubrimientos en tuberías enterradas ó sumergidas sean bien aplicados, ya que de ello depende mucho en buen desempeño del sistema de protección catódica. La pinturas convencionales, preparación de la superficie, y los métodos de aplicación no podrían ser usados en ambientes extremos de zonas costeras. Entonces el costo de mantenimiento es extremadamente alto, el tiempo de vida de la protección del recubrimiento se puede especificar. El apropiado uso de estos materiales demanda la preparación rigurosa de la superficie y la habilidad de la aplicación e inspección. Esto podría ser registrado de preferencia el sobresaliente trabajo de las especificaciones.

Los protectores primarios del acero y capa del recubrimiento, provee una superficie compatible con ambos del acero y el recubrimiento, y promotor de la adhesión de la capa. El primer usado incluye:



Lavado primario (Esto son recubrimientos que contienen resina de vinil butyral solución solvente, pigmentado con zinc o cromato de estroncio, más importante para la aplicación, estos recubrimientos son mezclas con un segundo componente, consistiendo de una solución de alcohol ácido fosfórico. Son aplicados como capas delgadas que no excedan $\frac{1}{2}$ mil ($13\mu\text{m}$). En contacto con la superficie del acero, generan una pasividad en el acero las capas de fosfato. La primera capa podría ser para minimizar alguna ruptura por oxidación.

IV.7.1 Recubrimientos ricos en Zinc.

Estos son recubrimientos orgánicos o inorgánicos con alto contenido de zinc, en contacto con la humedad. Tienen a proteger el sustrato por acción galvánica. Desde reactantes con ambos ácidos y fuertes álcalis, las pinturas ricas en Zinc pueden ser aplicados con resistencia química cuando se usa en zonas costeras al ser expuesto a lodos alcalinos y ácidos. Las pinturas ricas en Zinc son excelentes como pinturas durante la preconstrucción por que su abrasión, resistencia al impacto y su capacidad para proteger el acero durante largo tiempo. Debe tomarse en cuenta que la superficie debe mantenerse limpia para colocar el recubrimiento.

IV.7.2 Pinturas inhibidoras Orgánicas.

Estos materiales pueden ser termoplásticos, los cuales se curan en seco o se secan por la pérdida de solventes o recubrimientos térmicos, los cuales requieren mezclarse con un segundo componente. Característicamente, estos recubrimientos incluyen una pigmentación especial, rojo de plomo, cromato de estroncio, plomo básico, cromato de silicio, etc. En contacto con la humedad los pigmentos tampoco generan alcalinos o condiciones iónicas que retardan la corrosión de la base del metal. Entonces, generalmente estas pinturas contienen pigmentos reactivos y solo son una parte del sistema de protección, podrían ser protegidos con capas para funcionar como una barrera efectiva al ambiente.

IV.7.3 Capas.

Todas las pinturas usadas en plataformas en costa fuera pueden ser sobrecubiertas con intermedios y/o recubrimientos finales. La función de estos recubrimientos como primera barrera protectora previene la introducción de agua, oxígeno y iones activos químicos. Las capas protectoras pueden proveer una resistencia a solventes, así como liso, sin poros. El recubrimiento final, comúnmente de algunos tipos genéricos



así como de intermedios, pueden seleccionarse en un color específico para facilitar o proveer una identificación de color organizacional. Las características de las películas de los recubrimientos se muestran en la Tabla IV.6.

Tabla IV.6. Sistemas de Recubrimientos Típicos

Recubrimientos	Espesor de Película Seca (μmm)
Primera mano	0.5
Vinil, intermedio y capas protectoras (de 3 a 4 capas)	8-10
Primera mano	0.5
Goma clorinatada, intermedio y capas protectoras (de 3 a 4 capas)	8-10
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc	3
Recubrimiento intermedio tóxico	5
Capa protectora de vinil acrílico	2
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc	3
Compuesto epóxico intermedio y capas protectoras (2 capas)	10
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc	3
Capa intermedia de vinil	4-6
Capas protectoras de vinil (2 capas)	2
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc post-curado	3
Capa intermedia epóxica	5
Capa final de vinil acrílico	2
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc post-curado	3
Capa fijadora epóxica	2
Capa intermedia epóxica	4-6
Acrílico vinil	2
Primera mano de compuesto inorgánico de zinc post-curado	3
Capa fijadora de copolímero	2
Capa final de vinil de alta estructura	6-10



VI.7.4 Recubrimientos térmicos.

Estos materiales son usualmente epóxicos, epoxifenólicos o poliésteres y son curados por mezclas con un segundo componente llamado catalizador o convertidor. Estos recubrimientos, los cuales son típicamente aplicados en películas de cuatro micras (100 μm) de espesor por capa, que tienen excelentes propiedades a la resistencia química. Entonces estos materiales continúan curándose en la exposición, comenzando a incrementar la dureza, lo quebradizo y la resistencia a solventes con la edad. Estos tipos de recubrimientos tienden a llenarse de tiza al exponerse a los rayos ultravioleta. Estos materiales son sensibles a temperaturas durante el curado y requieren de temperaturas de entre 40 a 50°F (5 a 10°C) para tener una adherencia confiable y buen funcionamiento de la resistencia química de la película. Tienen una excelente resistencia al desgaste catódico.

VI.7.5 Termoplásticos o Solventes depositados por el tipo de recubrimiento.

Estos materiales incluyen acrílicos vinílicos, o gomas clorinadas. Esos recubrimientos secan solamente por la evaporación de solventes los cuales se distinguen de los epóxicos, poliésteres y otros recubrimientos térmicos desde el cambio de forma líquida al estado sólido y no es acompañado por ningún cambio sólido. Este modo de secado permite la aplicación del recubrimiento en humedades relativas por arriba del 90% y temperaturas menores de 32°F (0°F). Esas películas de recubrimiento tienen excelente resistencia a los rayos ultravioleta y otras condiciones severas del ambiente. Esas películas solubles en solventes se depositan entre un recubrimiento fresco y uno previo. La principal desventaja de estos recubrimientos es que sus límites de la resistencia de la temperatura es de entre 140 a 170°F; 60 a 77°C), reduce la resistencia a los solventes, y contenido bajo en sólidos, el costo adicional puede ser requerido para registrarse el valor deseado.

IV.7.6 Criterios para la selección del recubrimiento.

Acelerando las pruebas de diseño para seleccionar un recubrimiento incluye:

- (a) Pruebas de spray (4000) de acuerdo al ASTM estándar B117. (Para detalles de procedimientos de pruebas, referidos en NACE -T-1G-12.)



(b) Pruebas hidráulicas (2000 horas) en acorde con ASTM estándar E42-65.

(c) Pruebas de humedad (4000 horas).

Algunos operadores corren combinaciones sobre las pruebas en bases rotatorias, así como 1000 horas en rocío de sal, 1000 horas en pruebas hidráulicas, seguidas por una adicional de 1000 horas en solución de sal.

IV.7.6.1 La selección del recubrimiento.

La consideración podría incluir lo siguiente:

1. Las consideraciones podrían ser dadas para las pinturas de recubrimiento para proteger el acero por períodos de construcción prolongados con posición de abrasión asociado con tratamiento y fabricación con un mínimo de un año.
2. De preferencia podría ser dado para sistemas de recubrimiento que pueden ser aplicados y el mantenimiento convencional y la aplicación rápida con equipo especial.
3. Para estructuras en lugares de latitudes del norte, donde los recubrimientos son expuestos a bajas temperaturas, de preferencias podrían darse para recubrimientos de secado por evaporación de solventes y no involucran el uso de catalizador.
4. Para áreas de plataforma en costa fuera donde son expuestos a desgaste, abrasión asociado con operaciones, y derrames de lodos de perforación, formación de fluidos, combustible diesel, lubricantes y otros compuestos completos. Para estas áreas, las consideraciones pueden darse para recubrimientos los cuales tienen alto impacto a la resistencia para derrames de solventes y corrosivos químicos y los materiales térmicos.
5. Los recubrimientos de costa fuera son usualmente expuestos a altas intensidades de luz ultravioleta. Las consideraciones podrían darse para materiales que resistan cenizas y los cambios de color.



6. Para sistemas las capas de recubrimiento está asociado con solventes, termoplásticos, o recubrimientos con solventes depositados generalmente son más fáciles de reparar.

IV.7.7 Almacenaje, manejo y mezclas de materiales.

1. Todos los materiales usados en el recubrimiento inicial de estructuras de costa pueden ser provistos del material de origen, sin abrir contenedores, claramente etiquetados para identificar el contenido. Los materiales podrían almacenarse de una manera que previenen exposiciones a ambientes extremos, con 50 a 90°F (10 a 32°C).
 - 1.1 Tiners, diluyentes o limpiadores de materiales, podrían cumplir con las recomendaciones de los fabricantes o, podrían ser de composiciones los cuales son aprovechados por los fabricantes de los recubrimientos.
 - 1.2 Mantener un solo proveedor para uso de recubrimientos primarios, intermedios y recubrimientos finales.
 - 1.3 Todos los materiales de recubrimiento deben ser agitados por completo para aplicarlos. Si hay estancamiento del pigmento, podría ser redispersado con agitación para formar una mezcla uniforme. Para materiales con dos componentes, las mezclas de catalizadores también pueden ser agitados. Para recubrimientos pigmentados pesados, como primers ricos en zinc, la agitación deberá ser continua durante la aplicación para prevenir estancamientos.
 - 1.4 Para remover partículas extrañas de las mezclas de recubrimientos o partículas no dispersables en las soluciones de las mezclas pueden ser removidas por medio mallas de entre 30 a 60.
 - 1.5 Cuando a las mezclas se les incorpora un catalizador o convertidores, adicionan más allá de los niveles tienen un efecto de deterioro en el funcionamiento del recubrimiento.



- 1.6 Mantener los solventes que pueden compactarse todo el tiempo para prevenir el ingreso de aire húmedo, el cual puede conducir la humedad condensada.

IV.7.8 Equipo de Aplicación.

1. Los métodos más comunes para la aplicación de los recubrimientos es por Spray convencionales a presión. Estos equipos cuentan reguladores duales y un compresor. Todos los equipos de spray pueden ser equipados con agujas y cápsulas de aire con las recomendaciones del fabricante. La línea de suministro de aire del tanque podría ser ajustado con una lubricación y un eliminador de humedad. Para la aplicación por spray se requiere de una bomba hidráulica, la cual logra un mínimo de presión a razón de 30:1.
2. Los limpiadores y coladores podrían ser provistos para mezclas de materiales utilizados en los recubrimientos.
3. La fuente de aire suministrará un mínimo de 30 ft³ por minuto (0.014 m³/s) a 100 psig (689 kPa) para la operación del rocío.

IV.7.9 Uso de Sistemas de Recubrimientos Típicos

La tabla 4 muestra los sistemas de recubrimientos actuales que son comúnmente usados para plataformas de costa fuera y equipos asociados. Estos sistemas no presentan recomendaciones y el orden de la lista no indica la preferencia de que un sistema es superior a otro. La selección de un sistema de recubrimiento se basa en los programas de pruebas y/o resultados de las experiencias en campo y programas de mantenimiento.

El mantenimiento de los recubrimientos podría ser compatible con los recubrimientos originales.

La frecuencia y extensión de los recubrimientos o el trabajo de retoques podrían hacerse bajo las siguientes consideraciones:



- a. Extensión y localización de algún punto en la plataforma.
- b. Esfuerzo o carga de los miembros de la plataforma.
- c. Peligro de derrames y fugas de las tuberías y recipientes.
- d. Los costos de trabajo de recubrimiento, incluyendo la instalación de cargas.
- e. El costo de la producción diferida y algún equipo durante la operación del recubrimiento.
- f. Seguridad y moral del personal.
- g. Factores y apariencias.

IV.7.10 Recubrimientos para los equipos de construcción y tuberías localizados en plataformas.

Para la mayoría de los equipos que operan a temperaturas menores de 200°F (93°C) y están en uso prolongado.

Algunas superficies en calentadores, compresores u otros equipos pueden tener elevadas temperaturas. Si los recubrimientos son necesarios en esas superficies, entonces son recomendables los recubrimientos especiales para altas temperaturas. Otros procesos, tales como, metalización, porcelanización o recubrimientos cerámicos pueden ser recomendados.

Para formas intrínsecas, tales como, múltiples y árboles de navidad, se deberá tener cuidado para evitar la aplicación del recubrimiento demasiado grueso.

IV.7.11 Problemas especiales en los programas de recubrimiento en costa fuera.

La minuciosa planeación es necesaria para la aplicación de los recubrimientos en costa afuera. El problema de logística, accesibilidad, inventarios, alojamiento y almacenaje son más críticos comparados con la aplicación de recubrimiento en tierra y también son más costosos.

Las plataformas al ser recubiertas tendrán que estar supervisadas con representantes de las compañías de los contratistas, para considerar los siguientes aspectos de la estructura:



- a. La medición precisa del área.
- b. Condiciones del acero.
- c. Equipo de protección requerido.
- d. Tipo y cantidad de andamios y equipos de seguridad requeridos.
- e. Espacio de cubierta y alojamiento.
- f. Viabilidad para transportación de hombres, materiales y suministros.
- g. Exceso de equipos en plataformas, los cuales puedan requerir moverse.

En los programas de operaciones y coordinación de plataformas, el trabajo de recubrimientos deberá de darse con consideraciones especiales. El personal de compañía deberá ser informado de los trabajos de recubrimiento para prevenir agua salada y salpicaduras del aceite o lodos químicos durante la limpieza o preparación de la superficie. El trabajo extra, como perforado o construcción puede estorbar o entorpecer el trabajo de recubrimiento.

El personal e inspectores deberán estar familiarizados con el programa y los requerimientos de la preparación de la superficie y la capacidad de los materiales de los recubrimientos.

Durante la aplicación del recubrimiento sobre arreglos intrincados o en áreas congestionadas del ducto y es difícil la aplicación de películas delgadas, los recubrimientos tales como pinturas inorgánicos de zinc, deberá evitarse el exceso de película durante su aplicación, ya que son susceptibles a agrietamientos en espesores mayores de $6\mu\text{mm}$ ($150\mu\text{m}$).



CAPITULO V

NUEVAS TECNOLOGIAS APLICADAS EN LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

La mayoría de los daños ocasionados a las estructuras semi-sumergidas ó enterradas se presenta en la zona de humedad, y es en esta dirección hacia donde se han dirigido las investigaciones tendientes a dar protección. El éxito alcanzado mediante la sistemas de protección catódica contra la corrosión, en estructuras enterradas, así como, en losas de puentes y muchas otras estructuras de acero con concreto reforzado, ha hecho que ésta protección llame la atención para ser utilizada también en las subestructuras marinas, subterráneas y en muchas otras aplicaciones.

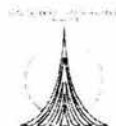
Desde hace muchos años el sector petrolero en México se ha esforzado por prevenir la corrosión en la infraestructura metálica de transporte de hidrocarburos (poliductos, oleoductos, tanques, etc), esto se ha hecho con el objeto de evitar las repercusiones económicas, ambientales y sociales que una fuga de hidrocarburo puede provocar.

Los avances tecnológicos en el área de la protección catódica se han enfocado más en el monitoreo y control de sus sistemas, mediante la automatización, utilizando instrumentos electrónicos, tales como: hardware de monitoreo, telecontrol y automatización equipos, hardware de telemedición de potenciales de protección catódica en distintos tramos de ductos, integración de Bases de Datos históricos, sistemas de información operativa tanto a nivel regional como a nivel central.

Así mismo, se busca coadyuvar a mitigar el fenómeno de la corrosión exterior, incrementando el control en la operación y supervisión de los sistemas de protección catódica con el propósito de hacer estos más confiables y precisos, así como la detección inmediata de actos de vandalismo y/o sabotaje, interrupciones en el suministro de energía eléctrica y contar con un diagnóstico remoto de las causas de falla de un equipo.

Con esto se está en condiciones de optimizar la operación de los sistemas de protección catódica mediante la integración de Bases de Datos históricos, analizar las tendencias de la protección catódica, determinar oportunamente el desgaste de las camas anódicas y su rehabilitación; pero sobre todo, reducir los costos por inspección y

Avances Tecnológicos en la industria petrolera para el control de la corrosión externa en Sistemas de Ductos.



mantenimiento correctivo de la red nacional de ductos, y que actualmente en México, se cuenta con una infraestructura de una red de ductos de más de 30,000 km para el transporte de petróleo crudo a las Refinerías, manejo de productos Refinados a las terminales de almacenamiento y distribución y líneas de Gas natural y gas licuado de Petróleo.

Debido a que la resistividad del terreno en donde se alojan las instalaciones de protección catódica se modifica constantemente por cambios de humedad, salinidad, así como cambios en el estado del recubrimiento, etc., es necesario ajustar manualmente y de una manera frecuente la salida de corriente directa (CD) de los rectificadores para mantener el potencial de protección catódica en su valor óptimo. Esto obliga a utilizar una gran cantidad de recursos humanos, materiales y financieros.

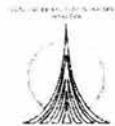
El sistema de protección catódica de los ductos en el país requiere para su operación de una revisión semanal de los equipos que proveen la corriente directa (rectificadores, equipos fotovoltaicos, aerogeneradores) y la medición de los potenciales tubo/suelo a lo largo de los derechos de vía (bimestralmente en zonas urbanas a espaciamientos de 50 metros y semestralmente en zonas rurales a espaciamientos de 1000 metros).

La información que se maneja y recopila, se presenta a continuación el número programado de actividades principales del mantenimiento preventivo por año.

Tabla V.1 Resumen de lecturas tomadas para el monitoreo de protección catódica en México.

CONCEPTO	CANTIDAD	ACTIVIDAD
Toma de potenciales en zonas urbanas	176,160	Lecturas
Toma de potenciales en zonas rurales	70,798	Lecturas
Rectificadores	18,770	Revisiones

Durante estas actividades se miden las magnitudes de las variables de operación, el consumo de energía eléctrica de los medidores de la compañía suministradora y se realiza el mantenimiento menor programado. Dado que estos equipos están dispersos y trabajan prácticamente inatendidos, que es posible que al presentarse una falla o una interrupción en el suministro de energía eléctrica, ésta tarde hasta 8 días en promedio en detectarse y tomarse las acciones correctivas pertinentes, esto sin tomar en cuenta



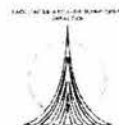
el caso de actos vandálicos, lo que imposibilitaría su reparación inmediata al no contar con equipos y refacciones. Con el advenimiento de las modernas redes de comunicación y de datos por medio de sistemas de telecomunicaciones integrados por equipos digitales de radio comunicación, y el desarrollo paralelo de equipos de monitoreo y telecontrol para operación de sistemas de protección catódica se hace factible la implementación de un sistema de este tipo, el cual permitirá de reducir el uso de la flotilla vehicular, destinar al personal de mano de obra o labores de mejoramiento y corrección (lo cual actualmente se hace mayormente por contratos de obra), optimizar la operación del sistema (detección inmediata y diagnóstico de causas de interrupciones de la operación) y la posibilidad de ajustar la potencia de salida de los equipos para compensar la falta de alguno.

V.1 Requerimientos para la implementación de los sistemas automatizados de protección catódica.

Los proyectos de modernización comprenden:

- Ingeniería.
- Suministro.
- Instalación.
- Puesta en operación.
- Capacitación de los usuarios y operadores de un sistema automático para monitorear y controlar la operación de los rectificadores existentes para la protección catódica.
- Adecuación de casetas y construcción de infraestructura.
- Instalaciones requeridas con oficinas de monitoreo con equipo de computo en la estación maestra, la cual automáticamente monitoreará y controlará a los rectificadores de una cierta área.
- Unidad remota (UTR) que se instalará en cada rectificador y en cada poste de medición.
- Rectificadores Automáticos.

Con los datos operativos del sistema en el sitio de cada uno de los rectificadores se implementará un sistema de control de información que permitirá optimizar los trabajos de mantenimiento y eficientar el monitoreo de la protección catódica.



La información operativa que se requiere de cada sector ó región será transmitida a un centro de recepción en donde se almacenará y procesará en una estación central para fines administrativos, operativos y toma de decisiones.

En la estación central de la región se generará y transmitirá hacia el centro de control para la toma de decisiones, como se muestra en la Figura V.1.

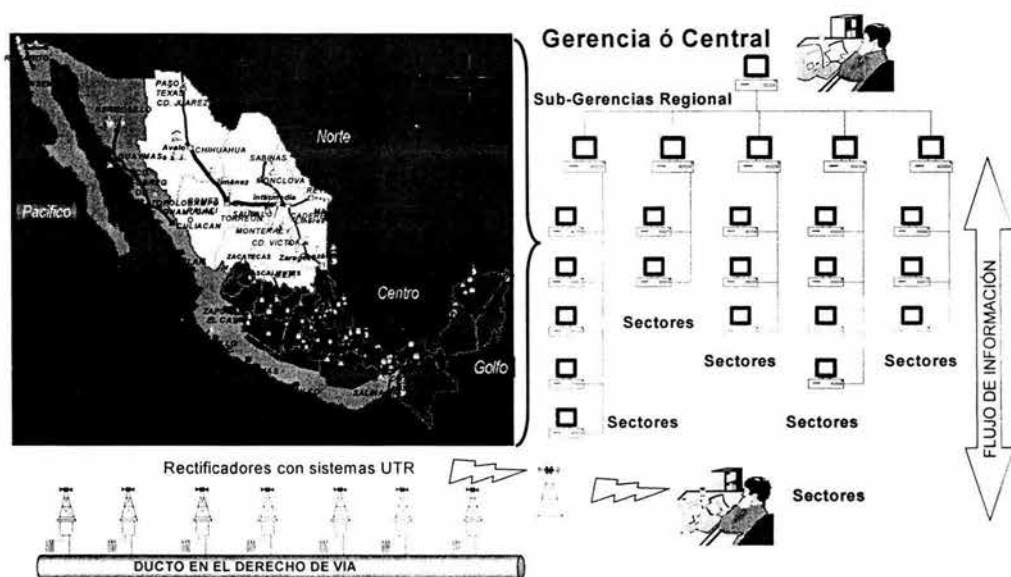
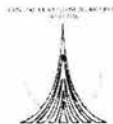


Figura V.1 Esquema del monitoreo y Control automático de los sistemas de protección catódica para la red de ductos del País.



V.2. Beneficios de implementar estos sistemas.

El beneficio esperado para su realización de estos proyectos se vería reflejado en 3 puntos importantes de ahorro que son:

- Consumo de energía eléctrica
- Velocidad de consumo de camas anódicas
- Visita del personal en campo

Con el desarrollo de estos proyectos se pretende mejorara las prácticas de mantenimiento preventivo, con lo que la prevención de la corrosión exterior de los ductos prolongará la integridad de los mismos disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de una fuga e incrementando la seguridad y confiabilidad de las operaciones.

Permitirá la operación de los procedimientos operativos de mantenimiento actuales, mediante la adquisición de datos confiables en tiempo real; lo cual apoya para la toma de decisiones efectiva en costos.

Evitará la incertidumbre en la medición de los niveles de protección catódica de los ductos y la problemática de establecer la tendencia de la protección con lo cual se podrán preveer con mayor antelación las medidas correctivas, así mismo permitirá reducir los costos de operación.

En la Tabla V.2 consideraremos los siguientes costos por unidad de componentes y su mantenimiento asociado, para dar una idea del beneficio esperado:

En la Tabla V.3, se muestra los beneficios esperados en ahorro en pesos para la implementación de monitoreo automático vía remota, para la red de ductos de una empresa petrolera mexicana, y reflejados tres rubros: consumo de energía eléctrica, velocidad de consumo de camas anódicas y visita del personal en campo.

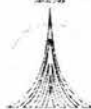


Tabla V.2 Costo de un sistema de Protección catódica por corriente impresa por unidad y el costo por mantenimiento de forma común ^[Fuente confidencial].

Componente	Costo por unidad
Rectificador Automático	\$ 5462.00 USD
Estación de medición tubo suelo	\$ 462.00 USD
Transmisor de datos	\$ 885.20 USD
Modulo transmisor de Datos	\$ 49.30 USD
Tarjeta Modem	\$ 244.00 USD
Aerial	\$ 188.00 USD
Poste	\$ 15.00 USD
Adaptadores	\$ 5.00 USD
Cable	\$ 158.00 USD
Enchufes	\$ 463.00 USD
Mantenimiento por milla*	\$2,970 USD
TOTAL	\$10,911.00 USD

NOTA: Falta incluir datos de consumo de energía eléctrica, gastos por visita a campo y consumo de ánodos. No se cuenta con información.

*El mantenimiento incluye: medición y señalamientos para instalación de postes, suministro e instalación de pintura en postes, cable de conducción, prueba de choque, reparación para puenteo eléctrico, suministro e instalación de ánodo de grafito, ánodo de magnesio y suministro e instalación de poste de inspección.

Tabla V.3 El beneficio esperado para el monitoreo automático vía remota de los sistemas de protección catódica en México ^[7].

Concepto	Ahorro Anual Rectificadores	Ahorro Anual total	Ahorro en 5 años	Ahorro en 10 años
Energía Eléctrica	\$10,722.00	\$4,128,082.4	\$20,640,312.00	\$41,280,624.00
Velocidad de Consumo de ánodos.	\$989.44	\$380,934.4	\$1,904,672.00	\$3,809,344.00
Visita a Campo	\$17,520.00	\$6,745,200.00	\$33,726,000.00	\$67,452,000.00
TOTAL	\$29,231.68	\$11,254,196.80	\$56,270,984.00	\$112,541,968.00

NOTA: Datos referenciados en pesos.



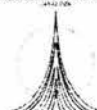
V.3 Corrosión -Control y Prevención-

El costo relacionado a las líneas de transporte dentro de la industria petrolera es de aproximadamente de \$5.4 a \$8.6 billones de dólares anualmente en EU. Estos pueden dividirse en costos por falla y operación/mantenimiento, con 10,38 y 52% respectivamente. Se han desarrollado sistemas de adquisición de datos, la cuantificación por medio del uso de dispositivos de posicionamiento, monitoreos remotos, equipo electrónico para controlar y monitorear los ductos terrestres y marinos. Han sido pocos los cambios que se han hecho para un buen manejo del control y la prevención de la corrosión. Y esos cambios han sido en el desarrollo estrategias y administración del riesgo, así como también, en programas de mantenimiento para asegurar la integridad del ducto.

Dada las consecuencias de gravedad, los costos asociados a las fallas en ductos, asciende a \$541 mil millones de dólares que cuesta el reemplazar un ducto, de acuerdo al estudio de **Neil g. Thompson, Gas and liquid transmission pipelines**. Así como también, basada en la experiencia en años anteriores, los esfuerzos se han enfocado en la seguridad en los ductos. Esto ha llevado a los gobiernos a que implanten nuevas regulaciones más estrictas para la operación de los mismos. Desde el punto de vista de costo, una de las medidas tomadas para atacar el problema de la corrosión es la inspección, mantenimiento y el monitoreo continuo de sus sistemas anticorrosivos para evitar y prevenir una falla.

V.4 Oportunidades para mejoras y barreras para el progreso.

Desarrollando un acercamiento óptimo que incluye la inspección y las estrategias de prevención de corrosión son críticas a la seguridad futura y el funcionamiento rentable de los ductos de transporte. La meta global de la industria de la tubería debe ser conservar la tubería como un recurso (\$541 mil millones de dolares el costo por reemplazo). La corrosión consume el recurso que no puede recuperarse; esto hace una parte crítica de cualquier estrategia para la prevención de ésta. Entendiendo que la prevención de corrosión nunca será 100 por ciento eficaz, los programas estratégicos de inspección ("el hallar y reparar"), junto con la estrategia de prevención de la corrosión, se requieren para esas tuberías que tienen una probabilidad mayor de corroerse. El ahorro es posible perfeccionando la inspección y los programas de prevención de corrosión. Para lograr tal optimización, los modelos de la predicción mejorados para corrosión interior y la corrosión externa necesitan ser desarrolladas adecuadamente.



V.5 Las recomendaciones y estrategia de aplicación.

Los Modelos de prevención de corrosión necesitan ser desarrollados en orden para determinar los intervalos de la inspección más precisos y priorizar las estrategias de prevención de corrosión más eficaces. El desarrollo de nuevas y mejoradas técnicas de la inspección son requeridas para extender las capacidades de inspección del ducto y atacar las fallas que no pueden ser detectadas comúnmente y mejorar la resolución para las herramientas existentes.

V.6 Resumen de problemas.

Problema	Solución
Conciencia del costo por corrosión y los costos potenciales.	El impacto de regulaciones pueden incrementar los costos del control de corrosión por 50% durante los próximos 5 a 7 años. Estrategias, que utilizando las mejores prácticas de la ingeniería pueden generar economías sanas y seguras.
Percepción del cambio que nada puede hacerse sobre la corrosión.	Las prácticas de prevención de corrosión están bien definidas y generalmente conocidas en el Sector de Ductos.
El cambio las prácticas técnicas para comprender los costos en la economía de la corrosión.	Las prácticas técnicas tendrán que cambiar basadas en nuevas regulaciones que involucran la inspección de los ductos. Incorporando éstos métodos de la inspección en la práctica de la prevención de corrosión en un costo efectivo de manera que será crítico para los operadores.
Avance en la predicción de vida y los métodos de evaluación.	Los modelos de la predicción de vida para la corrosión interior y exterior es un punto crítico a la dirección de integridad y rentabilidad de los ductos. Estos modelos no siempre están disponibles y son, en general, específicos para las condiciones de la tubería individual. El crecimiento de corrosión y modelos para la predicción de vida, se requieren para establecer la frecuencia de la inspección y la prevención de corrosión como una prioridad.



El avance tecnológico (la investigación, desarrollo, y aplicación).	Avances de tecnología necesitan incluir técnicas de inspección mejoradas (una mejor rentabilidad, resolución y la detección de grietas).
Mejora de educación y capacitación para el control de la corrosión.	Las nuevas regulaciones federales requieren entrenamiento de técnicos de corrosión. NACE Internacional (la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión) ha puesto hoy en día cursos y certificaciones para las técnicas de Protección Catódica.

V.7 Costos de inversión en instalaciones nuevas.

Para todas las compañías de líneas de gas, el total de la inversión de la planta de gas en EU. entre 1998 fue de \$63.1 mil millones de dólares. "La planta de Gas" se refiere a las instalaciones físicas usadas para mover el gas natural, como los compresores, estaciones de medición y tuberías. De esta inversión, se generó un rédito total de \$13.6 billones de dólares. Para las compañías de tuberías que transportan líquidos, la inversión en la propiedad del portador era \$30.2 mil millones. El crédito total para estas compañías fue de \$6.9 mil millones de dólares. Por consiguiente, la inversión total para la industria de ductos de transporte fue de \$93.3 mil millones a partir de 1998.

V.8 Proyección de futuras inversiones.

Se prevé que para el año 2010, el crecimiento en el mercado de gas natural en E.U. requerirá una inversión de \$32.2 mil millones a \$34.4 mil millones en los nuevos ductos e infraestructuras de almacenamiento. Esto como adición a la inversión del capital anual actual para la industria de ductos. Una porción significativa de este crecimiento viene de la generación de energía y los sectores industriales. Este crecimiento se requerirá debido a la Agencia de Protección del ambiente Federal (EPA) las regulaciones para reducir los contaminantes atmosféricos. La reducción en la contaminación se logrará principalmente usando gas natural que es un combustible más limpio para los usos de generación de energía y plantas que actualmente están operando. De \$93.3 billones invertidos en líquidos peligrosos y las compañías que transportan gas natural a partir de 1998, las compañías de ductos de transporte gastaron \$6.4 mil millones en las mejoras importantes en 1998 de que aproximadamente 75 por ciento eran asociados con el sistema de ductos (\$4.8 mil millones). (4,7) Agregando éste \$4.8 mil millones al aumento esperado en la deuda de la inversión a un aumento en el mercado de gas



natural de \$3.3 mil millones, \$32.2 mil millones a \$34.4 billón dividido por 10 años, da un requisito importante anual de \$8.1 mil millones.

V.9 El costo por corrosión en ductos.

El costo promedio de reemplazo asociado a la corrosión en ductos de gas, entre 1998 y 1999 fue de \$746,000 por km (\$1.2 millones por milla). (4,7). Estos costos están bajo las categorías siguientes:

- Los materiales (el ducto de la línea, el recubrimiento, y protección catódica).
- Labores.
- Misceláneos (inspección, diseño, celaje ó vigilancia, contingencias, equipo de telecomunicaciones, concesiones para fondos usados durante la construcción, y las cuotas del relleno regulador).
- Derecho de Vía (los costos por obtener caminos libres y no permitir los daños y perjuicios).

La Tabla V.4 muestra los costos de cada categoría de entre 1998 y 1999 para los proyectos de construcción de ductos de Gas Natural en E.U.

Tabla V.4 Resumen de costos de construcción para los años que comprenden entre 1998 y 1999 en proyectos de sistemas ductos (gas natural).

	COSTO POR MILLA		
	Construcción 1998	Construcción 1999	Promedio entre 1998y 1999
	(\$USD x MILES)	(\$USD x MILES)	(\$USD x MILES)
Material	488	276	382
Labores	500	468	484
Misceláneos	219	283	251
Daños y rehabilitación del Derecho de Vía	35	76	56
TOTAL	\$1,242	\$1,103	\$1,173

* Costos estimados en dólares por labores y misceláneos basados en un proyecto.



V.10 Costos por recubrimiento y Protección Catódica (CP).

El costo de corrosión, por lo que se refiere a los materiales, es de \$237,400 dólares por km (\$382,000 por milla) en los costos de material, es decir, recubrimiento del ducto, protección catódica (CP), etc. El costo del recubrimiento se estima en 7 por ciento a 10 por ciento del costo total de material del ducto, o \$17,000 a \$24,000 por km (\$27,000 a \$38,000 por milla).

El costo promedio del sistema de CP para la nueva construcción es aproximadamente \$12,000 dólares para 24 km (15 mi) de ducto, o \$500 USD por km (\$800 por milla). El costo del Recubrimiento y la CP están incluidos en el costo de materiales y mantenimiento asociado con la aplicación y la instalación.

V.11 El costo de la corrosión permisible.

Aunque, un factor de seguridad se considera dentro de los cálculos de diseño, este no ha sido específicamente hecho como una parte de los cálculos del diseño. Además, el espesor de pared del ducto en las áreas de alto riesgo todavía se aumenta más allá para proporcionar un nivel global de seguridad de los peligros de integridad. Aunque se considera el factor de corrosión como un medio de seguridad para el espesor del ducto, sin ese factor de seguridad, se requerirá de una concesión máxima permisible. Se estima que el costo de la corrosión permisible para la pared del ducto va del 5 al 10 por ciento del costo material, o \$12,000 a \$24,000 por km (\$19,000 a \$38,000 por milla).

V.12 El costo por especificación y diseño.

Se estima que la Protección Catódica y el recubrimiento, diseño y la compra asociada comprende del 2 al 5 por ciento de los costos ó \$3,000 a \$7,760 por el km (\$5,000 a \$12,500 por el mi).

V.13 El costo total de corrosión para la construcción

Un costo total de corrosión puede estimarse para una nueva construcción de la tubería va de \$32,500 a \$55,500 dólares por el km (\$51,800 a \$89,300 por milla) de tubería, o 4.4 por ciento a 7.6 por ciento (el promedio de 6 por ciento) del costo total de construcción de la tubería. Esto se desglosa a continuación en:



- \$17,000 a \$24,000 por km para el recubrimiento del ducto.
- \$500 por km para el sistema de CP.
- \$12,000 a \$24,000 por km para la Corrosion permisible.
- \$3,000 a \$7,000 por km para la especificación y diseño.

Todos estos datos están referenciados en dólares.

V.14 Costo por reemplazo de la infraestructura del ducto.

Con el costo de la construcción de nuevas tuberías es de \$694,100 dólares por km (\$1,117,000 por el mi) [que es el costo total mínimo del Derecho Vía (DDV)] y 778,900 km (484,000 mi) de las necesidades de los ductos; el costo del reemplazo de la infraestructura de ductos es de \$541 mil millones. Esto se compara con el valor de total de \$93.1 mil millones por operación de los ductos.

V.15 El Costo anual para el Reemplazo de ductos.

Es supuesto que 25 por ciento de los costos de \$8.1 billón son para el reemplazo de ductos viejos. Además, se sabe que todos los reemplazos se relacionan a la corrosión. Por consiguiente, el costo más importante anual es debido a la corrosión para el reemplazo de infraestructura del ducto que es de \$2.02 mil millones de dólares.

V.16 El Costo anual por "No-reemplazo" para un Capital nuevo.

El costo por **NO** reemplazar la tubería se incrementa a \$6.08 billones de dólares (8.1 billones y 2.02 billones como mínimo). Asumiendo que el porcentaje promedio de los costos de construcción se le atribuye a la corrosión que es de 4.4 a 7.6% y puede ser aplicado al costo total. El incremento del capital relacionado al costo por corrosión es de \$268 a \$462 millones (4.4 a 7.6% de \$6.08 billones). Aunado con los costos que pudieran implicar los daños potenciales, debido a alguna fuga por corrosión, al ambiente, a la población y al negocio (entre los que se pueden encontrar los costos por remediación al ambiente, indemnización por daños a terceros ó muertes, pérdida de producto, y daños en propiedad privada, etc.).



V.17 La depreciación de la inversión existente.

Asumiendo que el costo por corrosión para el total de los sistemas de ductos es de (\$93.3 mil millones) es similar al costo para la construcción, Esto es de \$4.1 mil millones a \$7.1 mil millones (4.4 a 7.6 por ciento de \$93.3 mil millones) asociado a corrosión. Amortizando estos costos a una razón anual de 5 por ciento dando un costo anual por corrosión de \$205 millones a \$355 millones.

V.18 Los costos totales.

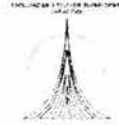
El costo total por corrosión para los artículos importantes se estima en \$2.50 mil millones a \$2.84 mil millones de dólares (\$2.02 mil millones para la inversión por reemplazo, \$0.27 mil millones a \$0.46 mil millones para una inversión nueva, y \$0.21 mil millones a \$0.36 mil millones para la depreciación de la inversión existente).

V.19 La operación y mantenimiento (Control de Corrosión).

El significado de los costos por mantenimiento para la operación de los ductos está asociado con el control de la corrosión y el manejo de la integridad. El manejo de los recursos para el gasto en dólares es preservar los recursos de los ductos que son igual a \$93.3 mil millones y \$541 mil millones el costo por reemplazo y asegurar el funcionamiento correcto sin fallas que arriesguen la seguridad pública, resultando en pérdidas de producto causando daños a la propiedad y al medio ambiente, los cuales son estimados en \$470 millones a \$875 millones por año

Un reciente estudio de las más importantes compañías de ductos indicaron que la causa primaria de pérdida de protección de corrosión es debido al deterioro del recubrimiento (30 %) y la protección catódica aplicando una corriente (20 %). Otras causas que contribuyen son los cortos (12 %) y la corriente perdida (7 %). La mayoría de mantenimiento general es asociada con supervisar y reparar estos problemas. El mantenimiento de la integridad es enfocado a la valoración de la condición, la mitigación de corrosión, valoración de vida útil.

El uso de recubrimientos protectores, junto con CP, es la fórmula más usada para la protección en contra de la corrosión en ductos. Desde los años cincuenta, se han utilizado varios sistemas de recubrimientos, incluyendo la fusión epóxica, polietileno, el esmalte de alquitrán de hulla, epoxy líquido, cinta, poliuretano y cera. Los recubrimientos de cada uno de estos sistemas se utilizan hasta hoy en día. La capa



ampliamente especificada usada en las nuevas tuberías es la unión con recubrimiento epóxico por fusión. Los nuevos recubrimientos con multi-capas se encuentran actualmente en el mercado.

Se han especificado recubrimientos de toda nueva construcción de ductos desde los años sesenta. Como se mencionó anteriormente, el costo promedio de un recubrimiento de un ducto nuevo se estima en \$24,000 dólares por km (\$38,000 por milla). Si este costo se aplica a la longitud total de ducto es de [778,900 km (484,000 milla)], El costo total de la inversión para el recubrimiento de todo el ducto es estimado en \$18.4 mil millones de dólares en los costos por reemplazo.

V.20 Protección Catódica.

Debido a que los ductos terrestres son áreas muy grandes a proteger, el método más usado para el control de la corrosión, en México, es el Sistema de Protección Catódica por corriente Impresa, esto debido a sus ventajas anteriormente mencionadas en el Capítulo III, frente al sistema de Protección catódica por ánodos galvánicos.

Los sistemas de PC por corriente impresa representan la inmensa mayoría de los sistemas de PC para ductos terrestres. El sistema permite ajustarse y compensar los cambios en la cantidad de corriente que requiere la protección de la estructura de una manera adecuada; sin embargo, ellos también pueden contribuir a la interferencia de otras estructuras vecinas. Dependiendo del tipo de suelo, las propiedades del recubrimiento, y el tamaño del ducto, los sistemas de PC por corriente impresa pueden usarse para proteger longitudes largas de ductos. Sin embargo, los sistemas de CP impresa actuales requieren de instalaciones más caras, equipo, supervisión continua y un mayor consumo de corriente eléctrica. Se estima que en EU hay entre 48,000 y 97,000 rectificadores de PC en el funcionamiento [778,900 km (484,000 mi) de ductos con los rectificadores cada 8 a 16 km (5 a 10 millas)]. Con un costo promedio de la instalación de \$12,000 dólares por rectificador, la inversión está entre \$0.6 mil millones y \$1.2 mil millones de dólares. Se estima que la inversión anual por las compañías de ductos en los sistemas de PC por corriente impresa es \$40 millones de dólares (las nuevas instalaciones y reemplazo de sistemas existentes).

Los ánodos de sacrificio se usan para proteger las tuberías de distribución de hidrocarburos, pero es aplicado más como una medida terapéutica para las áreas de mayor problema en los ductos. Los ánodos de sacrificio son relativamente baratos, no requieren un suministro de poder externo, y no requieren supervisión regular del ánodo.



Debido a sus voltajes manejados son relativamente bajos, los ánodos sacrificio no son aplicables en todo los ambientes y no tienen el poder para proteger longitudes largas de tubería. Los ánodos sacrificio se usan a menudo para complementar a los sistemas de PC por corriente impresa proporcionando protección a las áreas locales dónde se requiere una protección adicional debido a la inadecuada calidad del recubrimiento. Se estima que \$30 millones de ánodos de sacrificio (cinc y magnesio) es comprada por la industria de ductos cada año. Si es supuesto que 30 por ciento de las ventas son para los ductos, el costo anual es \$9 millones de dólares. La mayoría \$21 millones va a la distribución de los ductos.

V.21 Funcionamiento del sistema de protección catódica automático.

El modo de operación de los rectificadores utilizados para estos sistemas automáticos permite operar por medio de dispositivos electrónicos que trabajan mediante el control o regulación de la variable de voltaje, logrando con esto que, al establecer un valor de voltaje previamente calculado para lograr la protección catódica del sistema, el valor de voltaje establecido se mantenga constante independiente de las variaciones que presente el sistema, como él que se muestra en la figura V.2.



Figura V.2 Tipo de rectificador automático.



Así también trabaja por medio de una señal dada por la celda de referencia permanente de Cobre Sulfato de Cobre (Cu-CuSO_4) integrada como parte integral del sistema. El rectificador mantendrá automáticamente y en forma constante el valor de Potencial previamente establecido, a través de su control, (Valor que se indica en el voltímetro analógico del equipo), a pesar de existir variaciones en el sistema (ver figura V.3).



Figura V.3 Sistema de Monitoreo y control remoto de la PC.



El rectificador controla y monitorea:

- Niveles altos y bajos de corriente y voltaje.
- Alarmas de fallas en el Rectificador.
- Niveles y altos de Potencial.
- Distintas alarmas basadas en sensores de presencia, códigos de acceso.
- Fallas en el suministro de alimentación.

La unidad Remota (UTR) tiene la facilidad de monitorear y controlar, por medio de 32 canales diferentes, los parámetros del rectificador y el medio ambiente que lo rodea, (Voltaje, corrientes, celdas, individuales por cada ducto, alarmas, etc.), además de poder tener la capacidad de ser expandible hasta 280 canales si así se requiere.

V.21.1 Software para el sistema de monitoreo

Existen una gran variedad de Software en el mercado, tal como es CDEGS, que un poderoso grupo de paquetes de software de ingeniería integrados, diseñados para ayudar en el desarrollo de estudios de puestas a tierra (grounding), análisis de fuerzas electromagnéticas (EMF), estudios de mitigación de interferencia AC, y para ayudar a resolver una variedad de problemas de protección catódica. Estos calculan los potenciales de tierra y de los conductores, y los campos electromagnéticos generados por redes arbitrarias de conductores energizados en cualquier parte, bajo o sobre la superficie, para condiciones de operación normal, de falla, transitorias y descargas atmosféricas. Permiten modelar conductores simples y de componentes múltiples, incluyendo tuberías desnudas y/o revestidas, sistemas de cable encerrado en tubería y complejas estructuras (mallas) de tierra.

Las capacidades de estos programas son:

- Análisis de la resistividad de los suelos e interpretación de la estructura de los mismos.
- Análisis de alta y baja frecuencia, y de transitorios en sistemas de puesta a tierra.
- Parámetros para conductores y disposiciones complejas de cable por ductos.
- Varios aspectos críticos de diseño de protección catódica y de cama anódica.
- Distribución de corrientes de falla y de estado estable en cables aéreos, neutros, blindajes, y otros caminos metálicos.



- Interferencia conductiva, inductiva y capacitiva en corredores comunes.
- Análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia de campos electromagnéticos generados por redes arbitrarias de conductores energizados (subestaciones, líneas de distribución y transmisión, plantas industriales, etc.).

Cuentan con herramientas que pueden solucionar cualquier problema electromagnético que involucre una red de conductores terrestres arbitrariamente orientados y conductores enterrados, energizados por cualquier número de fuentes de voltaje y corriente, y que puede proveer soluciones precisas para problemas transitorios y de estado estable, en rangos de frecuencia desde 0 a miles de megahertz.



Figura V.4



Figura V.5

El Software utilizado trabaja bajo un ambiente Windows versión 95 en adelante (Figuras V.4 y V.5). La precisión de las lecturas entre la unidad terminal Remota (UTR) y la estación maestra no debe exceder del 1% de variación.



Figura V.6



Figura V.7

En las figuras V.6 y V.7 se muestra que el Software contiene archivos de ayuda integrada en el mismo, tiene la capacidad de que, se podrán controlar varios equipos de rectificadores en una sola computadora personal.

El Software administrador tiene la habilidad de filtrar todos los mensajes recibidos de esta manera sólo aquellos mensajes que el usuario desea revisar son visibles en la pantalla de mensajes recibidos. Este proceso de filtración permitirá el registro continuo de cualquier otro mensaje que este siendo recibido para poder ser revisado posteriormente

El administrador de personal (Figuras V.8 y V.9) graba todos los eventos que acontezcan en el equipo y es posible imprimirlos, en el momento en caso de solicitarlo. Este sistema cuenta con la capacidad de administrar todo el personal involucrado, en todos los niveles de la compañía, de manera que permita enviar mensajes de alarma y advertencia automática y manualmente a las personas responsables en el momento justo y en la localización geográfica de la instalación.

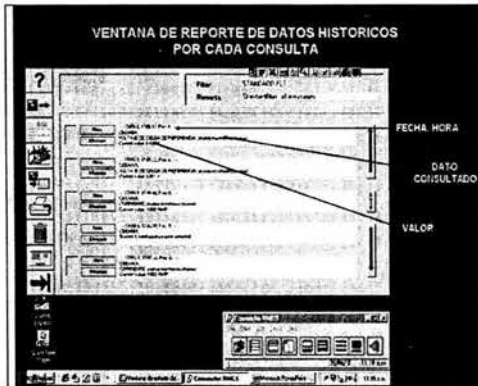


Figura V.8



Figura V.9

El administrador de personal mantiene un banco de datos de personas, sus horarios de trabajo y de guardia, su tiempo fuera de su trabajo, período de vacaciones y trabajo fuera de horas de oficina, siendo capaz de enviar por medio de radios localizadores o Fax, a cualquiera, ya sea personal o equipo predeterminados por el personal a cargo de las instalaciones. Los mensajes contendrán información exacta sobre la causa de la alarma y su localización.

V.21.2 Sistema de interrogación y supervisión remota móvil.

En México las empresas encargadas de la distribución y transportación de hidrocarburos y sustancias peligrosas por vía terrestre en la modalidad de ductos debe cumplir de forma Normativa con el monitoreo periódico del Sistema de Protección Catódica, y para ello se toman las lecturas de los potenciales Tubo/Suelo a lo largo de los Derechos de Vía en donde se encuentran los Ductos. Tales lecturas deberán ser monitoreadas de acuerdo a la Norma y que para el caso de Zonas Rurales deberá ser con una periodicidad de cada seis meses, y para el caso de zonas Urbanas, esta deberá ser cada dos meses.

Las lecturas de los Potenciales de Tubo/Suelo son tomadas por medio de postes de medición conectados al ducto y a un electrodo de Referencia, que por lo regular es un electrodo de cobre sumergido en una solución de Sulfato de Cobre. Para considerar que los Sistemas de Protección catódica están trabajando adecuadamente, los especialistas en corrosión consideran que las lecturas deberán



encontrarse en un rango de entre -0.85 y -2.5 Volts, dependiendo de las condiciones de acidez del suelo y las condiciones de humedad. De esta manera los encargados en corrosión pueden controlar la corrosión externa en ductos enterrados.

En la figura V.10 se da un ejemplo de las lecturas, a lo largo de un ducto, de los potenciales Tubo/suelo.

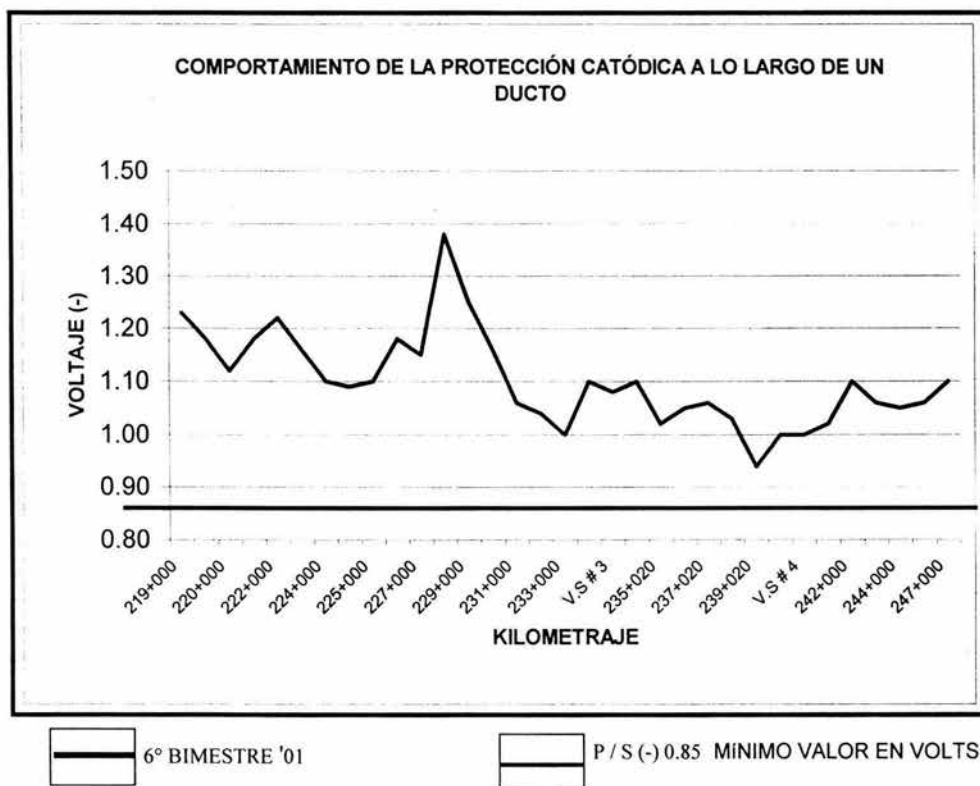


Figura V.10 Comportamiento gráfico de la toma de potenciales tubo/suelo a lo largo de un ducto.



Fecha	Kilometraje	(-Voltaje)
Febrero-01	219+000	1.23
Febrero-01	T.D.D.	1.18
Febrero-01	220+000	1.12
Febrero-01	221+000	1.18
Febrero-01	222+000	1.22
Febrero-01	223+000	1.16
Febrero-01	224+000	1.10
Febrero-01	V.S # 1	1.09
Febrero-01	225+000	1.10
Febrero-01	226+000	1.18
Febrero-01	227+000	1.15
Febrero-01	228+000	1.38
Febrero-01	229+000	1.25
Febrero-01	230+000	1.16
Febrero-01	231+000	1.06
Febrero-01	232+000	1.04
Febrero-01	233+000	1.00
Febrero-01	V.S # 2	1.10
Febrero-01	V.S # 3	1.08
Febrero-01	234+020	1.10
Febrero-01	235+020	1.02
Febrero-01	236+020	1.05
Febrero-01	237+020	1.06
Febrero-01	238+020	1.03
Febrero-01	239+020	0.94
Febrero-01	240+020	1.00
Febrero-01	V.S # 4	1.00
Febrero-01	241+000	1.02
Febrero-01	242+000	1.10
Febrero-01	243+000	1.06
Febrero-01	244+000	1.05
Febrero-01	246+000	1.06
Febrero-01	247+000	1.10



Como parte complementaria de la modernización de un sistema de Protección Catódica es parte importante que la supervisión por vía remota también se cuente con un sistema de Interrogación y Supervisión que se puede instalar en un vehículo (automóvil, lancha, helicóptero, avión, etc.) para realizar la toma de potenciales tubo suelo en puntos remotos de hasta 325 metros de distancia **sin la necesidad de que el conductor detenga el vehículo**. Esto se logra a velocidades de hasta 115KM/H para automóviles o 260 KM/H para helicópteros, como se puede ver en la figura V.11.

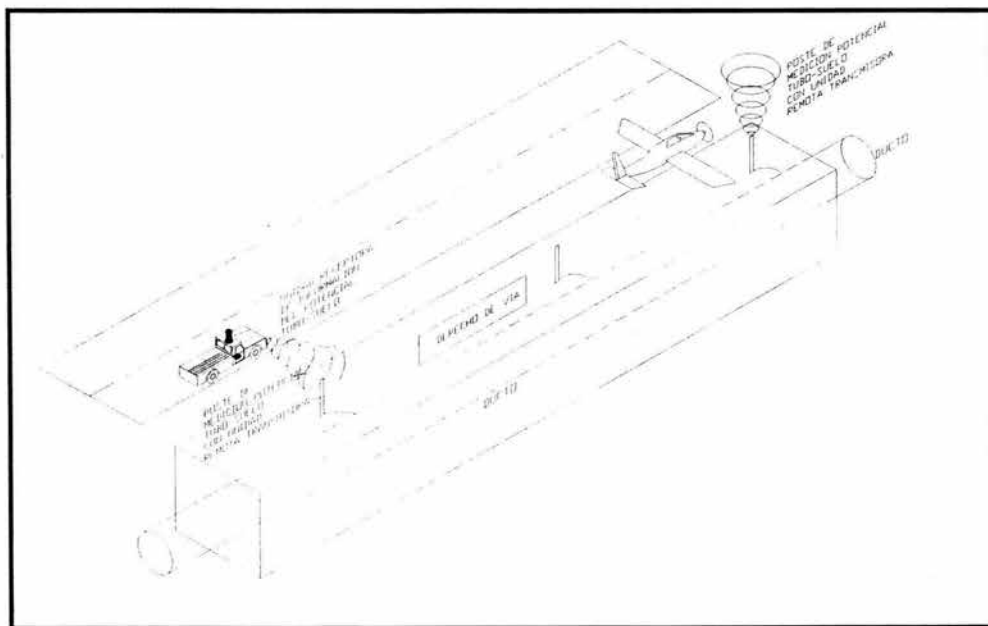


Figura V.11 Monitoreo de los Potenciales Tubo/suelo de forma remota por medio de vehículos a lo largo del Derecho de Vía y en zonas de difícil acceso.

Lo más innovador de esta tecnología es que se pueden supervisar puntos **bajo tierra** desde una distancia de 100 metros.

V.22.3 Forma de Operación.

Se activa con la frecuencia programada de toma de lecturas (cada hora, cada día, cada semana, cada mes, etc.) por el usuario. Automáticamente toma hasta 12



lecturas, las graba y espera a ser interrogado. El **Interrogador** graba las ubicaciones **GPS** exactas de cada punto y las integra a mapas **GIS** instalados en un Organizador Personal.

Las industrias del Petróleo y Gas principalmente, se enfrentan con dos situaciones que requieren solución:

- Supervisión de puntos de difícil acceso o acceso restringido.
- Aparatos de supervisión no visibles para prevenir vandalismo.

La urgencia por una tecnología que cubra estas necesidades existe desde hace varios años. Por ejemplo, durante la última década, compañías de distribución de gas en zonas urbanas con infraestructuras muy complicadas como han hecho innumerables esfuerzos por diseñar equipos que permitan transmitir señales desde los registros (estaciones de prueba bajo tierra) hacia el exterior; en todos estos casos la interferencia de las estructuras enterradas lo había hecho hasta ahora imposible con esta nueva tecnología.

Se han aplicado tecnologías de punta, en otros países, en sistemas como **GPS** (Global Positioning System), **GIS** (Geographic Information System), Antenas para Radio Transmisión, Organizadores Personales y Microprocesadores.

Se ha revolucionado el concepto de supervisión de rectificadores y estaciones de prueba, excediendo los requerimientos de los reglamentos impuestos por el Departamento de Transporte (DOT) en los Estados Unidos.

V.22.4 Usuarios

Entre las empresas más interesadas en el desarrollo de tecnologías de monitoreo vía automática y remota Estados Unidos están compañías como: distribución de Gas y Energía Eléctrica, Consolidated Edison of New York, Commonwealth Edison of Chicago y Peoples Gas of Chicago; así como compañías petroleras, como British Petroleum; instituciones de investigación, como El Instituto de Tecnología para Gas (GTI), entre otras. Estas empresas han probado estas nuevas tecnologías obteniendo excelentes resultados y actualmente están en la fase de instalación de cientos de unidades en áreas metropolitanas como Nueva York y Chicago y en zonas rurales de los Estados Unidos.



CONCLUSIONES

Como ya se mencionó el proceso de corrosión en estructuras metálicas, y en específico en materiales hechos de acero, obedece al fenómeno electroquímico que semeja a una celda galvánica, donde se presenta una pérdida de electrones y un metal pasa de un estado inestable al estado más estable de su naturaleza propia, en el cual está involucrando un cátodo, un ánodo y un electrolito.

El fenómeno de corrosión externa en ductos, ya sea en ductos enterrados o marinos, se presenta este proceso, y es común que se puedan encontrar las tres condiciones para que se lleve a cabo la corrosión.

Se logró establecer los posibles mecanismos de corrosión externa que pueden afectar a una estructura metálica, y en especial en sistemas de ductos enterrados como son: Materiales diferentes, escoria, cascarilla de Laminación, suelos diferentes, diferencia en contenido de oxígeno, bacterias anaeróbicas, impurezas, irregularidades superficiales, tensión, diferencia de concentración, interfase concreto-suelo, corrientes parásitas, diseño incorrecto de la protección catódica, tubería Nueva y Tubería Vieja, célula Diferencial de aireación en cruces de carreteras, acero en concreto.

Las posibles recomendaciones ó soluciones que se pudieran tomarse son:

- Los materiales utilizados en los ductos de acero deberán tener las mismas características y especificaciones de acuerdo a NORMA (ASME, API u otra).
- Las soldaduras y trabajos de reparación, instalación ó cambio de tramo deberán cumplir con los procedimientos normativos (ASME ó API u otra).
- Las Laminaciones deberán de ser eliminadas de inmediato cambiando tramos de ductos en cuanto se tenga conocimiento de su existencia en ductos.
- Debido a que el suelo puede variar de una región a otra, el utilizar un rectificador automático, permite variar la corriente que se alimenta a la estructura a proteger con el sistema de protección catódica por corriente impresa, ajustando el suministro eléctrico de acuerdo a las necesidades de potencial tubo/suelo.
- Dado que, los ductos terrestres en México son enterrados, es normal que el contenido de oxígeno sea deficiente, y la corrosión se puede presentar en estas condiciones, es importante que el recubrimiento instalado sobre la estructura sea



- eficiente, y se inspeccione de acuerdo a los requerimientos de la empresa, con el fin de evitar que la estructura de acero interactúe de manera directa con el ambiente. Así como también, evitar la corrosión por bacterias.
- Se deberán cambiar tramos de tubo donde se identifique irregularidades superficiales considerables.
 - Los derechos de vía no deberán pasar cerca ni cruzar por líneas de alta Tensión, ó deberán ser ubicados una distancia donde no interfiera con el sistema de protección catódica, induciendo la corriente y provocando picaduras.
 - Los tubos que cuenten con encamisados de concreto deberán estar a una profundidad de cuando menos 1.50 m, el tubo y la camisa deben ser concéntricos y deben conservarse en esa posición por medio de aisladores y centradores de fábrica diseñados para este fin. El espacio anular entre la tubería y el tubo protector debe sellarse en los dos extremos, debiéndose realizar la operación tan pronto como se haya introducido el ducto dentro de la camisa. Así también el tubo deberá estar eléctricamente aislado de la camisa y monitoreada continuamente, tomando el potencial de la camisa.
 - En los casos donde los ductos crucen corrientes de agua, ríos, lagunas, terrenos inundados y/o pantanos, deberán cumplir con los estándares de ingeniería correspondientes. El cruzamiento se debe realizar tendiendo la tubería lastrada (NRF-033 PEMEX-2002) bajo el cauce de la corriente en forma semejante al tendido general del ducto, enterrándola en el fondo a una profundidad mínima de 1.80 m a partir del lomo de la tubería, para garantizar que el ducto quede fuera de la posible erosión del agua a todo lo ancho del cauce.
 - El diseño de protección catódica deberá ser el correcto, y evitar que se fugue corriente ó dañe el recubrimiento.

Para las Compañías que transportan hidrocarburos y sustancias peligrosas por medio de ductos están obligados, por los gobiernos, bajo normatividad, a monitorear y controlar la corrosión externa: esto como parte importante del mantenimiento y operación. Así como también, asegurar la integridad mecánica de los ductos que transportan estas sustancias, y que en caso de presentarse un evento podrían tener graves consecuencia afectaciones al medio ambiente, a la población y al negocio.

La protección catódica puede ser aplicada de dos formas; la llamada protección catódica por ánodos galvánicos; y la otra, la protección catódica por corriente impresa. Ambos métodos son muy eficaces en su función pero ambos presentaron sus puntos fuertes con respecto uno de otro. El sistema de protección catódica por corriente impresa presenta ciertas ventajas sobre el sistema de protección catódica por ánodos



galvánicos, que al ser aplicado, éstos últimos en ductos enterrados, se puede ver limitada a la protección de estructuras bien revestidas y proporcionar protección sólo de tipo local debido que la corriente está limitada; así como, su uso puede ser impráctico excepto en suelos con resistividad baja, ó en agua, y no proporcionar una protección adecuada en estructuras de gran longitud. Esto hace que el sistema de protección catódica por corriente impresa sea el más empleado en muchas compañías petroleras en Estados Unidos y en México principalmente en este tipo de instalaciones.

Cabe mencionar y hacer énfasis en que la protección catódica, por cualquiera de los dos métodos ya mencionados, no es la panacea para resolver en su totalidad los problemas de corrosión en ductos enterrados, pero si es una parte muy importante en el mantenimiento y la integridad del mismo, ya que dentro de la integridad se involucran otros aspectos importantes, como son inspecciones internas por medio de instrumentos de alta tecnología para detectar fallas a lo largo de un segmento de ducto, análisis de esfuerzos en función de las presiones manejadas, pruebas de presión hidrostáticas, entre otros medios que intervienen en el monitoreo de la integridad mecánica de los ductos de acero. Si consideramos que el costo por reemplazo de tubería es de USD\$ 694,100 por kilómetro y aproximadamente y en México se cuenta con una red de 26,000 km, tenemos que el costo total por reemplazo de toda la red sería 18 mil millones de pesos. Este recurso debe conservarse y no permitir que se pierda, por ello, es importante que se tenga un buen programa de mantenimiento y se aplique los mejores métodos para monitoreo e inspección para conservarlo el mayor tiempo posible de vida útil.

Los avances tecnológicos que se han tenido en los últimos años en la protección catódica en estructuras de acero en contra de la corrosión externa, por el método de corriente impresa, se han enfocado en las formas de monitorear y controlar los suministros de corriente proporcionada por el rectificador hacia la estructura a proteger, así como monitorear las mediciones de los potenciales Tubo/suelo, el desgaste de las camas de ánodos, posibles fugas de corriente e identificación de daños en los recubrimientos externos de los Ductos, entre otros.

Debido a que en México cuenta con una red nacional de más de 26,000 kilómetros de ductos de transporte terrestres de acero, es importante mencionar que éstos utilizan, en su mayoría, el sistema de protección catódica por corriente impresa como un método para prevenir y controlar la corrosión externa. La modernización de estos sistemas, como ya se explico en el Capítulo V, consiste en supervisar y realizar ajustes de forma



automática y remota, así como también, contar con información en tiempo real, para la toma de decisiones de forma oportuna y acertada.

Si se considera que la implementación de este tipo de proyectos, implicaría un ahorro económico de \$11,254,196.80 de pesos por año, en comparación a como se ha venido estado haciendo en los últimos años, la industria petrolera en México debe tomar muy en cuenta aprovechar las ventajas que ofrecen estas nuevas tecnologías y desarrollar otras.



ANEXO I

CÁLCULO PARA UN EJEMPLO DE UN DISEÑO DE PROTECCIÓN CATÓDICA.

Como un ejemplo para calcular un sistema de protección catódica por corriente impresa podemos considerar una tubería con área superficial de 3284 m², con una eficiencia de revestimiento del 95% y una intensidad de corriente de 30 mA/m².

1. Calcular la corriente total de protección requerida con la siguiente ecuación:

$$I_p = (\text{Area}_{\text{protegida}}) (\text{Densidad de corriente})(1-\text{Eficiencia del recubrimiento})$$

$$I_p = (3,284 \text{ m}^2)(30 \text{ mA/m}^2)(1-0.95)$$

$$I_p = 4926 \text{ mA} = 4.9 \text{ A}$$

2. Se calcula el número de ánodos requeridos.

Consideremos que se seleccionó un ánodo de hierro fundido con un alto contenido de silicio de 2 X 60 in en el relleno de coque, y de dimensiones de 10X84 in. La densidad máxima de descarga del ánodo es de 10753 mA/m² y un área superficial del ánodo de 0.261 m².

Calculando con la ecuación:

$$\text{Número de } _ \text{ánodos} = \frac{\text{Intensidad de corriente requerida}}{(\text{Intensidad de corriente del ánodo})(\text{Área superficial } _ \text{ánodo})}$$



Obtenemos:

$$\text{Número de ánodos} = \frac{4926 \text{ mA}}{(10,753 \text{ mA/m}^2)(0.261 \text{ m}^2)}$$

Número de ánodos = 1.8 ánodos

3. Se calcula la vida útil con la siguiente ecuación:

$$\text{Vida útil} = \frac{(\text{Número de ánodos})(\text{Peso de ánodo kg})}{(\text{Pérdida de peso del ánodo kg/A/año})(\text{Intensidad de corriente requerida } A)}$$

Si consideramos que la velocidad teórica de pérdida de material es de 0.453 kg/A-año y un peso del ánodo de 27.22 kg:

$$\text{Vida útil} = \frac{(1.8)(27.22 \text{ kg})}{(0.453 \text{ kg/A-año})(4.926 \text{ A})}$$

Vida útil = 21 años

4. Se calcula la resistencia total equivalente de una cama de cuatro ánodos que se pretenden instalar, con el fin de mantener la resistencia total de la cama de ánodos por debajo de 4 ohms, y están separados a una distancia de 20 ft con una resistencia de suelo de 5000 ohm-cm y colocados verticalmente. Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{(0.00521)P}{NL} \left(2.3 \log \frac{8L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2.3 \log 0.656N \right)$$



En donde:

R: Resistencia a tierra, en ohms, de los ánodos verticales en paralelo.

P: Resistividad efectiva del suelo en ohms-cm.

N: Número de ánodos verticales en paralelo.

d. Diámetro del ánodo en ft.

L: Largo del ánodo en ft.

S: Distancia entre los ánodos en ft.

Tenemos que:

$$R = \frac{(0.00521)(5,000\Omega - cm)}{4(84/12)} \left(\text{Ln} \frac{(8)(84)}{10} - 1 + \frac{2(84/12)}{20} \text{Ln}(0.656 * 4) \right)$$

R=3.603 ohms.

5. Se calcula la resistencia del cátodo al suelo para la tubería a proteger. Si en las pruebas en campo se obtuvo que la resistencia efectiva promedio del revestimiento es de 3500 ohms/ ft² de área superficial, y tenemos que:

$$\text{Re resistencia del cátodo} = \frac{\text{Re resistencia revestimiento ohms} / \text{ft}^2}{\text{Área proteger ft}^2}$$

$$\text{Re resistencia cátodo} = \frac{3500 \text{ ohms} / \text{ft}^2}{(3284 / .093) \text{ft}^2}$$

Re resistencia del cátodo = 0.099 ohms

6. Se calcula la resistencia total de todo el sistema sumando todas las resistencias involucradas. Aquí hay que considerar también la resistencia del cable y para este ejemplo será de .081 ohms.



$$R_{TOTAL} = 3.603 + 0.099 + .081$$

$$R_{TOTAL} = 3.783 \text{ ohms}$$

7. Se calcula el voltaje del rectificador:

$$V_{RECTIFICADOR} = I_{REQUERIDA} \times R_{TOTAL}$$

$$V_{RECTIFICADOR} = 4.9 \times 3.783$$

$$V_{RECTIFICADOR} = 18.53 \text{ VOLTS}$$

8. Se aplica un factor de seguridad que es de 1.5.

$$V_{RECTIFICADOR} = 18.3 \times 1.5 = 27.45 \text{ V}$$



GLOSARIO DE TÉRMINOS.

Ampere. Se define como la velocidad de flujo de una carga (Q) de un Coulomb, por segundo.

Ánodo: Elemento emisor de corriente eléctrica; es el electrodo de una celda en el cual ocurre el fenómeno de oxidación.

Ánodo galvánico o de sacrificio: Metal con potencial de oxidación más electronegativo que el de la tubería por proteger y que al emitir corriente eléctrica de protección, se consume.

Aterrizamiento: Conexión eléctrica, intencional o no, entre un conductor y tierra (suelos y cuerpos de agua).

Ánodo inerte: Electrodo auxiliar metálico o no metálico que forma parte del circuito de protección catódica y que se conecta a la terminal positiva de una fuente externa de corriente eléctrica directa.

Caída de voltaje: Cambio de potencial debido al paso de una corriente eléctrica "I" en un circuito de resistencia "R". Esta caída debe ser considerada para una interpretación válida en la medición de potenciales en los sistemas de protección catódica.

Cama anódica: Grupo de ánodos, ya sea inertes o galvánicos que forman parte del sistema de protección catódica.

Carga y corriente. A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (intensidad [I]).



Cátodo: Electrodo de una celda en el que ocurren las reacciones electroquímicas de reducción en un sistema de protección catódica.

Coulomb. .Corresponde a 6.24 trillones de electrones.

Corriente de protección catódica: Corriente eléctrica directa necesaria para obtener los valores del potencial de protección de una estructura metálica enterrada o sumergida en un electrolito.

Corriente parásita: Corriente eléctrica directa o alterna que proviene de otra fuente de energía distinta al circuito previsto y que llega a la tubería a través del electrolito o por contacto directo. Cuando en una tubería metálica entra una corriente eléctrica parásita se produce corrosión en aquellas áreas donde dicha corriente eléctrica abandona la tubería metálica para retornar a su circuito de origen.

Corrosión: Destrucción del metal por la acción electroquímica de ciertas sustancias.

Defecto en el recubrimiento: Discontinuidad en el material anticorrosivo que expone la superficie del metal al medio electrolítico que lo rodea.

Densidad de corriente: Corriente eléctrica directa por unidad de área, expresada usualmente en miliamperios por metro cuadrado o miliamperios por pie cuadrado.

Derecho de vía: Franja de terreno donde se encuentra alojada una tubería enterrada o superficial.

Electrodo de referencia: Media celda electroquímica cuyo potencial es constante. Es un electrodo no polarizable.

Electrolito: Conductor iónico de corriente eléctrica directa. Se refiere al subsuelo o al agua en contacto con una tubería metálica enterrada o sumergida.



Fuerza electromotriz. Se define entonces como el trabajo total efectuado en joules por los coulombs de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada.

Interfaces: Transición a la que se somete la tubería al cambiar de electrolito, pudiendo ser ésta tierra-aire, tierra-concreto-aire, aire-agua, tierra-agua, etc.

Ley de ohm. La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos.

Material de relleno: Mezcla de materiales sólidos que envuelven al ánodo para incrementar su conductividad eléctrica en el terreno donde se alojan.

Multímetro: Instrumento electrónico multifuncional con escalas para medir magnitudes eléctricas.

Norma: Conjunto de requerimientos mínimos establecidos de manera estandar.

Polarización: Magnitud de la variación de un circuito abierto en un electrodo causado por el paso de una corriente eléctrica.

Potencial crítico: Voltaje de protección catódica de valor inferior en relación al valor de cualquiera de los criterios de protección catódica.

Potencial natural: Potencial espontáneo (sin impresión de corriente eléctrica directa) que adquiere una estructura metálica al estar en contacto con un electrolito. También denominado potencial de corrosión.



Potencial tubo/suelo: Diferencia de potencial entre una tubería de acero enterrada y/o sumergida protegida catódicamente y un electrodo de referencia en contacto con el electrolito.

Protección catódica: Procedimiento eléctrico para proteger las estructuras metálicas enterradas o sumergidas contra la corrosión exterior, el cual consiste en establecer una diferencia de potencial para que convierta a las estructuras metálicas en cátodo, mediante el paso de corriente eléctrica directa proveniente del sistema de protección seleccionado.

Prueba de requerimiento de corriente: Aplicación de corriente eléctrica directa a la tubería por proteger catódicamente con el fin de cuantificar la corriente eléctrica de protección y determinar los alcances de protección para cada uno de los puntos de drenaje eléctrico.

Punto de drenaje eléctrico: Sitio en el que se imprime la corriente eléctrica directa de protección a una tubería enterrada y/o sumergida.

Recubrimiento anticorrosivo: Material que se aplica y adhiere a la superficie externa de una tubería metálica para protegerla contra los efectos corrosivos producidos por el medio ambiente.

Rectificador: Equipo que convierte corriente eléctrica alterna en corriente eléctrica directa controlable.

Resistividad: Resistencia eléctrica por unidad de volumen del material. Las mediciones de esta propiedad indican la capacidad relativa de un medio para transportar corriente eléctrica.



Sistema de protección catódica: Conjunto de elementos como: ánodos galvánicos o inertes, rectificadores de corriente eléctrica, cables y conexiones que tienen por objeto proteger catódicamente una tubería de acero.

Tubería enterrada o sumergida: Es aquella tubería terrestre que está alojada bajo la superficie del terreno o en el lecho de un cuerpo de agua (pantano, río, laguna, lago, etc.). No se refiere a tuberías instaladas en el lecho marino.

Volt. Es la unidad con que se mide la diferencia de potencial eléctrico.

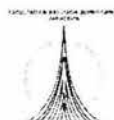


BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Ávila J. y J. Genescá, Más Allá de la herrumbre I, FCE-SEP-CONACYT, México. 1986 (Colección La Ciencia desde México, Núm. 9).
- [2] Avila J. y J. Genescá, Más Allá de la herrumbre II, FCE-SEP-CONACYT, México. (Colección La Ciencia desde México, Núm. 9).
- [3] Varios, Seminario sobre protección Anticorrosiva, *Enebal S.A. de C.V.* México D.F.
- [4] Parker M.E., *Pipeline Corrosion and Cathodic Protection*, Gulf Publishing Co.. Houston, 1954.
- [5] Marshall E. Parker/ Edward G. Peattie. *Pipeline Corrosion and Cathodic Protection. A practical Manual for Corrosion engineers, technician, and field personnel.*
- [6] Applegate L.M., *Cathodic Protection*, McGraw-Hill, Nueva York, 1960.
- [7] Pemex, Revista Ductos, No 18 Año 3 Marzo-Abril 2000.
- [8] PEMEX, Norma NRF-047-PEMEX.pdf. Diseño, Instalación y Mantenimiento de los Sistemas de Protección Catódica. México 26 de Agosto del 2002.
- [9] Part 192--transportation of natural and other gas by pipeline: minimum federal safety standards: Subpart I--Requirements for Corrosion Control
- [10] NRF-030-PEMEX-2003, Rev. 0. "DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO DE DUCTOS TERRESTRES PARA TRANSPORTE Y RECOLECCIÓN DE HIDROCARBUROS". 24-junio-2003
- [11] NOM 008 SECRE 1999 "Control de la corrosión exterior en tuberías enterradas y/o sumergidas", capítulo 4 y párrafos 5.11, 5.12 y 5.13.
- [12] ASME B31.4- "PIPELINE TRANSPORTATION SYSTEMS FOR LIQUID HYDROCARBONS AND OTHER LIQUIDS", Chapter VIII Apart 461.1.3 Cathodic Protection System. The American Society of Mechanical Engineers. Edition 2002



- [13] DOT Part. 192, Transportation of Natural and Other Gas By Pipeline; Annual Reports, Incident Reports and Safety Related Condition Reports. Parts. 192-459, 192-483, 192-485, 192-487 y 192-489, 1995.
- [14] 192.455 External Corrosion Control: Buried or submerged pipelines installed after July 31, 1971.
- [15] 192.457 External Corrosion Control: Buried or submerged pipelines installed before August 1, 1971.
- [16] 192.459 External corrosion control: Examination of buried pipeline when exposed.
- [17] 192.461 External Corrosion Control: Protective coating.
- [18] 192.463 External Corrosion Control: Cathodic protection.
- [19] 192.465 External Corrosion Control: Monitoring.
- [20] 192.469 External Corrosion Control: Test stations.
- [21] 192.471 External Corrosion Control: Test leads.
- [22] 192.473 External Corrosion Control: Interference currents.
- [23] 192.475 Internal Corrosion Control: General.
- [24] 192.477 Internal Corrosion Control: Monitoring.
- [25] 192.479 Atmospheric Corrosion Control: General.
- [26] 192.481 Atmospheric Corrosion Control: Monitoring.
- [27] 192.483 Remedial Measures: General.
- [28] 192.485 Remedial Measures: Transmission lines.
- [29] 192.487 Remedial Measures: Distribution lines other than cast iron or ductile iron lines.



- [30] 192.489 Remedial Measures: Cast Iron and Ductile Iron pipelines.
- [31] 192.491 Corrosión Control Record.
- [32] www.avisora.com. 17/08/2002. Protección Catódica.
- [33] [www.wilsonwalton.es/wilsonwalton /protecci.htm](http://www.wilsonwalton.es/wilsonwalton/protecci.htm), 21/08/2002, Principios sobre Corrosión.
- [33] <http://www.tecnicsuport.com/dades/usuarios/index.php>, 18/09/2002. Vida útil de los ánodos.
- [34] http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_7.htm, 21/09/2002, Protección Catódica con Ánodos Galvánicos.
- [36] <http://www.arrakis.es/~gasparcr/corrosio.htm>, 26/09/2002, Sistemas de protección Contra la Corrosión.
- [37] http://mailweb.udlap.mx/~tesis/mgd/hernandez_m_js/capitulo4.pdf, 27/09/2002, Diseño de protección Catódica.
- [38] <http://www.monografias.com/trabajos3/corrosion/corrosion.shtml>, Protección Catódica, 12/10/2002
- [39] http://www.gas-training.com/art_tecnico/St17v2.htm, Protección Contra la Corrosión, Jorge Gregorio Rendón.

BIBLIOGRAFIA INFORMATIVA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

- Atkinson J.T.N. y H. Van Droffelaar, *Corrosion and its Control. An introduction to the Subject*, NACE, Houston, 1982.
- Bockris J.O'M., N. Bonciocat y F. Gutmann, *An Introduction to Electrochemical Science*, Wykeham Pub., Londres, 1974.
- Fontana M.G. y N.D. Greene, *Corrosion Engineering*, McGraw Hill, Nueva York, 1978.
- Galvele J.R., *Corrosion*, OEA, Washington, 1979 (Monografía núm. 21).
- González José A. (comp.), *Teoría y Práctica de la Lucha Contra la Corrosión*, CSIC, Madrid, 1984.



- Uhlig H.H., *Corrosión y Control de la Corrosión*, Ed. Urmo, Bilbao, 1975.
- Van Delinder L.S., (comp.), *Corrosion Basics, An Introduction*, NACE, Houston, 1984.
- Byran W.T., *Designing Impressed Current Cathodic Protection Systems with Durco Anodes*, The Duriron Co., Dayton, 1970.
- Lazzari L. y P. Pedefferri, *Protezione Catodica*, CLUP, Milán, 1982.
- Morgan J.H., *Cathodic Protection*, Leonard Hill, Londres, 1959.
- Peabody A.W., *Control of Pipeline Corrosion*, NACE, Houston, 1967.
- Roche M., *Protection Contre la Corrosion Des Ouvrages Maritimes Petroliers*, Technip, París, 1979.
- Shreir L.L., *Corrosion*, vol. II, Newnes-Butterworth, Londres, 1976.
- Von Beckmann W. y Sohwenk, *Handbook of Cathodic Protection*, Portcullis Press, Redhill Surrey, 1975.
- National Association of Corrosion Engineers. *Control of Corrosion on Steel, Fixed Offshore Platforms Associated with Petroleum Production*, USA 1976.