



48
2 ej.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**Cálculo de la Protección Catódica del
Combustoleoducto Refinería 18 de
Marzo - Termoeléctrica Nonoalco.**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A
JESUS HERNANDEZ CASTILLO**

MEXICO, D. F.

1985



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 está 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.

I N D I C E

	<u>PAG.</u>
I . INTRODUCCION	1
II . TEORIA DE LA CORROSION	
2.1 Electroquímica de la corrosión	3
2.1.1 Corrosión a altas temperaturas	8
2.1.2 Potenciales de óxido-reducción	9
2.1.3 Criterio para corrosión	11
2.2 Formas de la corrosión	13
2.3 Corrosión en tuberías enterradas	20
2.4 Métodos de control	22
2.4.1 Recubrimientos	22
2.4.2 Inhibidores	26
2.4.3 Protección catódica	28
III . DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA DEL COMBUSTOLEODUCTO	
3.1 Antecedentes	66
3.2 Bases de diseño	68
3.3 Pruebas de campo	69
3.4 Memoria de cálculo	69
3.4.1 Cálculo del área por proteger	69
3.4.2 Determinación de la demanda de corriente de protección	70
3.4.3 Determinación del número de ánodos	71
3.4.4 Número de capas	74
3.4.5 Separación entre ánodos	74

	<u>PAG.</u>
3.5 Especificaciones de materiales	74
3.6 Especificaciones de construcción	75
3.7 Consideraciones económicas	76
IV . CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
Anexo No. 1	79
Anexo No. 2	80
V . BIBLIOGRAFIA	81

CAPITULO I

INTRODUCCION

La corrosión se ha definido como la destrucción de un metal por reacción química o electroquímica entre este y el medio ambiente que lo rodea. En la industria petrolera los fenómenos de la corrosión - suceden con frecuencia extraordinaria, esto se debe a que los ductos metálicos enterrados que se encuentran alojados en casi todos - los rumbos del país y que PEMEX construye y opera, están expuestos a ser afectados en su construcción por muy variados factores, uno de ellos es el fenómeno de la corrosión. En la zona productora, los hidrocarburos tienen que ser recolectados y transportados a las refinerías y zonas de consumo; toda esta recolección, transporte y distribución se hace mediante ductos metálicos enterrados que en sus diferentes diámetros y longitudes alcanzan un desarrollo de miles de kilómetros, lo cual significa una inmensa área metálica expuesta a la corrosión.

Los problemas que la corrosión causa, se pueden considerar como técnicos y económicos. Los técnicos significan trastornos que ocasionan un mal funcionamiento y dificultad en la operación de los ductos.

Los económicos, son las pérdidas por falta de abastecimiento a los consumidores y por las cantidades de fluidos que son derramados y no es posible recuperar.

El sistema de transporte de hidrocarburos que Petroleos Mexicanos opera en el Valle de México está desarrollado por una gran red de ductos metálicos enterrados para la distribución de sus productos. Esta red invade zonas urbanas y sub-urbanas pues una de las principales funciones de ella es la de abastecer la gran cantidad de industrias localizadas dentro y en la periferia de la ciudad de México.

La Red del Valle de México tiene un desarrollo aproximado de 860 kilómetros y está constituida por ductos de diferentes diámetros que varían desde 5.08 cm (2") hasta 59.96 cm (24").

Existen varios métodos para controlar el fenómeno de la corrosión y por lo que se refiere a tuberías los más usados son : aplicación de recubrimientos anticorrosivos, inhibidores de corrosión y protección catódica.

En la Red del Valle de México se utilizan combinados, los recubrimientos anticorrosivos y la protección catódica, para proteger los ductos antes citados y se estima que en la actualidad están protegidos catódicamente con una eficiencia del 98%.

Por lo anterior el objetivo de este trabajo es el de diseñar un sistema de protección catódica para el ducto de combustóleo de 25.4 cm de diámetro, Refinería 18 de Marzo-Termoeléctrica de Nonoalco, el cual presenta como característica distintiva el hecho de que se va a operar a temperatura de $\pm 100^{\circ}\text{C}$

CAPITULO II

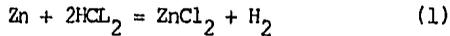
TEORIA DE LA CORROSION

2.1 ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION

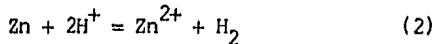
Como la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, es muy importante comprender la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas.

Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es decir, es una reacción química que comprende el fenómeno de oxidación y reducción.

La naturaleza electroquímica de la corrosión puede ser ilustrada por el ataque del zinc por ácido clorhídrico para formar cloruro de zinc.

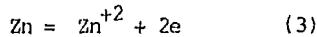


Esta reacción se puede escribir únicamente con los iones involucrados :

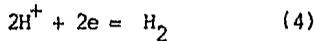


Observando la anterior ecuación, puede verse que durante la reacción el zinc es oxidado a iones zinc y los iones hidrógeno son reducidos a gas hidrógeno.

Entonces la ecuación (2) puede dividirse en dos reacciones, la oxidación del zinc y la reducción de los iones hidrógeno.



OXIDACION (Reacción anódica)



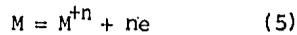
REDUCCION (Reacción catódica)

Una oxidación o reacción anódica es indicada por un incremento en la valencia o una producción de electrones. Un decremento en la valencia o el consumo de electrones significa una reducción o reacción catódica. Las ecuaciones (3) y (4) son reacciones parciales, pero ambas deben ocurrir simultáneamente y a la misma velocidad sobre la superficie del metal. Esto nos lleva a uno de los principios básicos más importantes de la corrosión: "Durante la corrosión metálica, la velocidad de oxidación es igual a la velocidad de reducción (en términos de electrones producidos y consumidos)".

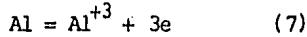
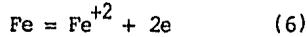
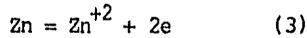
Todo proceso de corrosión necesita por lo menos una reacción de oxidación y una reacción de reducción, por lo que podemos resumir que las reacciones de la corrosión son electroquímicas en naturaleza y debido a esto es posible dividir el proceso de la corrosión en reacciones anódicas y reacciones catódicas que permiten simplificar la presentación de la mayoría de los procesos.

REACCIONES ANODICAS.

Durante el ataque corrosivo la reacción anódica siempre es la oxidación de un metal a un estado superior de valencia, por tanto la reacción anódica se puede representar en forma general como :



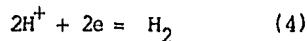
en donde M representa al metal y n al número de electrones transferidos o al número de oxidación adquirido y depende de la naturaleza de cada material. Por ejemplo :



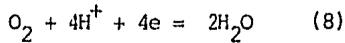
REACCIONES CATODICAS

Se entiende por reacción catódica la parte del proceso electroquímico correspondiente a la reacción de reducción. Las reacciones más comunes durante la corrosión de los metales son :

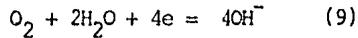
a) Desprendimiento de hidrógeno



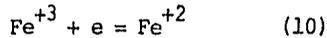
b) Reducción de oxígeno en soluciones ácidas.



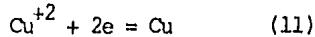
c) Reducción de oxígeno en soluciones neutras o alcalinas



d) Reducción de iones metálicos



e) Depósito de metal

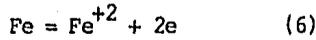


La reducción del oxígeno es una reacción catódica muy común ya -- que el oxígeno está presente en la atmósfera y las soluciones están -- expuestas a la misma. La reducción de iones metálicos y el depósito de metales aunque es menos frecuente, causa problemas de corrosión.

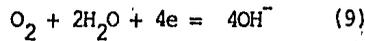
Todas estas reacciones tienen en común el consumo de electrones y la reducción del número de oxidación de algún elemento.

Por medio de estas reacciones se puede analizar cualquier problema de corrosión, así por ejemplo, considerando el caso del hierro cuando se expone a un medio acuoso, la corrosión ocurre de la siguiente manera :

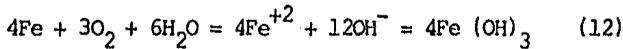
Reacción anódica



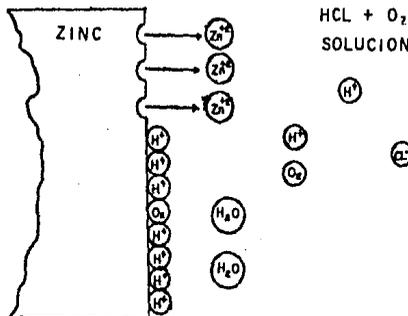
Reacción catódica



Reacción general



Durante la corrosión pueden ocurrir más de una reacción de oxidación y de reducción, así en la corrosión del zinc en ácido clorhídrico se presenta no solo la oxidación del metal y la reducción del hidrógeno, sino también la reducción del oxígeno como se muestra en la sig. figura.



REACCIONES ELECTROQUIMICAS QUE OCURREN DURANTE LA
CORROSION DEL ZINC EN HCL AEREADO

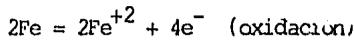
2.1.1 Corrosión a Altas Temperaturas.

K.P. Fisher, P.S. Solhem y A.H. Hansen, encontraron que la corrosión del acero aumenta con la temperatura de su superficie. Ver fig. 1. Ellos consideraron que el gran incremento de la velocidad de corrosión a temperaturas mayores de 50°C se debe a que la reacción catódica deja de ser la reducción del oxígeno para convertirse en la reducción del agua con formación de H₂.

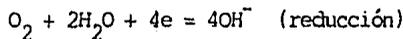
Observaron que a temperaturas mayores de 50°C el acero fue cubierto por magnetita (Fe₂O₃) y que la corrosión mostró una tendencia hacia un ataque fuertemente localizado.

Las reacciones son las siguientes :

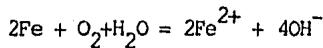
Reacción Anódica



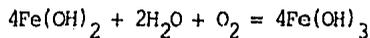
Reacción Catódica



Reacción Total



Si hay presente oxígeno en exceso :



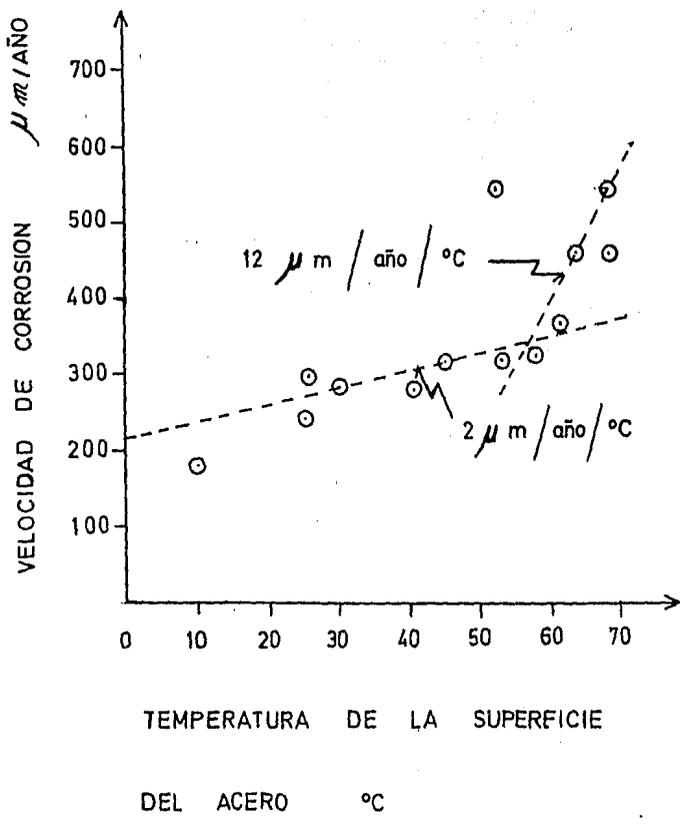


FIG. 1

2.1.2 Potenciales de Oxido-Reducción

El cambio de energía libre que resulta en una reacción química mide la fuerza impulsora de la misma y la cuantía en la cual puede proseguir hasta agotarse, sin dar una indicación de la velocidad de reacción. Si el cambio de energía libre que acompaña la transición del sistema de un estado a otro es negativo, indica una pérdida en energía libre y la dirección de la reacción espontánea del sistema, esto es, el sistema tiende a transformarse a su menor estado de energía. Si el cambio de energía libre es positivo, indica que la transición representa un incremento en energía y requiere energía adicional el sistema.

El cambio de energía libre es una función de estado y es independiente del camino de la reacción.

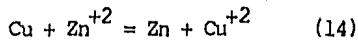
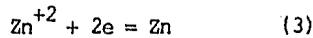
Debe recalcar que no es posible predecir la velocidad de una reacción a partir del cambio de energía libre, este parámetro refleja solamente la dirección de la reacción por su signo, y alguna predicción de velocidad basada en la magnitud del cambio de energía libre será errónea.

El cambio de energía que acompaña a una reacción electroquímica se puede calcular mediante la ecuación :

$$\Delta G = -nFE$$

donde ΔG es el cambio de energía libre, n el número de electrones transferidos, F la constante de Faraday y E el potencial de la celda de reacción. Para determinar el potencial se utilizan los principios de celdas electroquímicas, medias celdas y electrodos de referencia; pudiendo

calcular el potencial por medio de una celda de reacción (Fig. 2), ya que toda reacción es la suma de la reacción de oxidación y de reducción como en el caso del zinc y cobre.



Para estudiar el cambio de energía libre asociado con esta reacción se puede construir una celda de reacción con electrodos de cobre y zinc en equilibrio con sus iones, separados por una membrana porosa para retardar la mezcla de dichos iones, por simplicidad se mantienen las concentraciones de iones metálicos a una actividad unitaria. Si el sistema está en equilibrio, cada electrodo está en equilibrio con su solución; la disolución y la depositación de ambos metales según las reacciones anteriores será a la misma velocidad y no habrá cambio neto en el sistema.

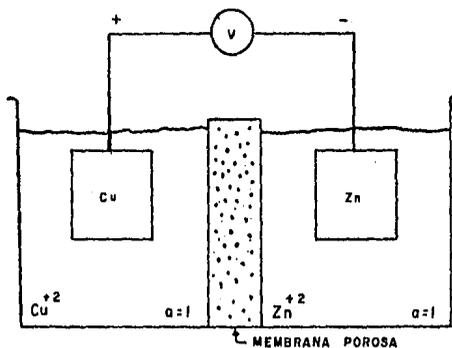


FIG. 2 CELDA REVERSIBLE CONTENIENDO COBRE Y ZINC EN EQUILIBRIO CON SUS IONES

Esto es, las condiciones de equilibrio determinan que las velocidades de reacción r_1 y r_2 , serán iguales y se oxida la misma cantidad de iones que la que se reduce en cada lado de la celda. Estos electrodos en equilibrio se denominan medias celdas y cuando la concentración de los reactantes se conserva a una unidad unitaria, se denominan medias celdas standard. Si se conecta un voltmetro de alta resistencia entre electrodos de cobre y zinc, se observará una diferencia de potencial de aproximadamente 1.1 voltios. Este es el potencial de la celda que se utiliza para determinar la energía libre de la reacción electroquímica.

Para medir los potenciales, se utiliza una media celda como referencia, esta es arbitraria y se le asigna un potencial de cero, así cualquier otro potencial de otra media celda se puede calcular con respecto a este. Cualquier reacción de media celda puede ser tomada como referencia pero la que es universalmente aceptada es la de la reacción hidrógeno-ión hidrógeno ($2H^+ + 2e = H_2$). Con este electrodo de referencia mediante el establecimiento de una celda galvánica se puede determinar los potenciales de media celda de cualquier material. Estos se encuentran tabulados a continuación y se les conoce como potenciales de óxido-reducción.

2.1.3 Criterio Para Corrosión.

Los potenciales de Oxido-Reducción son muy útiles ya que pueden ser utilizados para predecir si un metal es o no corroido en un medio ambiente dado. De cualquier modo, una regla simple es usada para predecir la dirección espontánea de cualquier reacción electroquímica.

Potenciales Standard de Oxido - Reducción

$K = K^+ + e$	- 2.925	Activo
$Na = Na^+ + e$	- 2.714	
$Mg = Mg^{+2} + 2e$	- 2.363	
$Al = Al^{+3} + 3e$	- 1.662	
$Zn = Zn^{+2} + 2e$	- 0.763	
$Cr = Cr^{+3} + 3e$	- 0.744	
$Fe = Fe^{+2} + 2e$	- 0.440	
$Cd = Cd^{+2} + 2e$	- 0.403	
$Co = Co^{+2} + 2e$	- 0.277	
$Ni = Ni^{+2} + 2e$	- 0.250	
$Sn = Sn^{+2} + 2e$	- 0.136	
$Pb = Pb^{+2} + 2e$	- 0.126	
$2H^+ + 2e = H_2$	0.000	Referencia
$Sn^{+4} + 2e = Sn^{+2}$	+ 0.15	
$Cu = Cu^{+2} + 2e$	+ 0.337	
$O_2 + 2H_2O + 4e = 4OH$	+ 0.401	
$Fe^{+3} + e = Fe^{+2}$	+ 0.771	
$2Hg = Hg_2^{+2} + 2e$	+ 0.778	
$Ag = Ag^+ + e$	+ 0.799	
$Pd = Pd^{+2} + 2e$	+ 0.987	
$Pt = Pt^{+2} + 2e$	+ 1.2	
$Au = Au^{+3} + 3e$	+ 1.42	Noble

Esta regla puede expresarse de la siguiente forma : " En una reacción electroquímica, la media celda más activa o la más negativa tiende a oxidarse, y la más positiva o la celda más noble tiende a reducirse "

Aplicando esta regla, la dirección de la reacción Zn - Cu es hacia la oxidación del Zn y la depositación del Cu.

Se puede ver que todos los metales que tienen potencial Redox más negativos que la media celda iones hidrógenos-gas hidrógeno, serán corroídos por soluciones ácidas lo cual incluye a metales como fierro, níquel, aluminio y magnesio junto con los otros metales con potenciales negativos.

2.2 FORMAS DE LA CORROSION

Es conveniente clasificar la corrosión por la forma en que esta se manifiesta, siendo la base para la clasificación la apariencia del metal corroído. Las formas de la corrosión son únicas, pero todas ellas están interrelacionadas entre si. Las formas son :

- Corrosión Uniforme o Ataque General
- Corrosión Galvánica o Electroquímica
- Corrosión por Cavidades
- Corrosión por Picadura
- Corrosión Intergranular
- Corrosión por Ataque Selectivo
- Corrosión por Erosión
- Fractura por Corrosión Bajo Tensión

A continuación se describen brevemente en términos de sus características.

Ataque Uniforme

Esta es la forma de corrosión más común. Se caracteriza normalmente por una reacción química o electroquímica que procede uniformemente sobre la superficie expuesta o sobre una gran área. El metal se adelgaza y eventualmente falla. Ver Fig. Anexo 1

Corrosión Galvánica ó Electroquímica

La corrosión galvánica generalmente existe, cuando dos metales distintos están en contacto físico o eléctrico y en presencia de un electrolito. En este caso existe una diferencia de potencial eléctrico entre los metales o aleaciones diferentes que sirve como fuerza direccional para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, en tal forma que el flujo de la corriente corroe a uno de los metales del par formado. Ver Fig. Anexo 1

El metal que se corroe recibe el nombre del metal activo, mientras el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La serie electromotriz puede ser utilizada para predecir las tendencias de corrosión de dos metales en contacto, sin embargo, esta serie tiene el inconveniente de que los potenciales normales de electrodo son medidos entre un metal que está en contacto con una solución de sus iones de actividad unitaria y un electrodo de referencia de hidrógeno, y esta situación raramente se presenta en la realidad. Normalmente la mayoría de los materiales de ingeniería son aleaciones, y un par galvánico usualmente incluye una o dos aleaciones. Bajo estas condiciones la serie galvánica listada en la siguiente tabla sirve para hacer una predicción más precisa de las relaciones galvánicas que la serie electromotriz.

Tamaño Relativo de Areas Anódicas y Catódicas

El efecto de las diferencias entre las relaciones de áreas anódicas y catódicas es importante, ya que una combinación de dos metales diferentes puede causar corrosiones rápidas bajo estas condiciones.

SERIE GALVANICA EN AGUA DE MAR, DE ALGUNOS MATERIALES
METALICOS COMERCIALES.

Activo o Anódico

Magnesio
Aleaciones de Magnesio
Zinc
Acero Galvanizado
Aluminio 1100
Aluminio 2024
Acero
Hierro Dulce
Hierro Colado
Acero Inoxidable 13% Cr. tipo 410 (activo)
Acero Inoxidable 18-8, tipo 304 (activo)
Soldaduras Pb - Sn
Plomo
Estaño
Metal Muntz
Bronce al Manganeso
Latón Naval
Níquel (activo)
Aleación 76 Ni - 16 Cr-7 Fe (activo)
Aleación 60 Ni - 30 Mo - Fe - 1 Mn
Latón Amarillo
Latón Admiralty
Latón Rojo
Cobre
Bronce de Silicio
Cuproníquel 70 - 30
Bronce G.
Soldadura de Plata
Níquel (pasivo)
Aleación 76 Ni - 16 Cr - 7 Fe (pasivo)
Acero Inoxidable 13 Cr, tipo 410 (pasivo)
Acero Inoxidable 18-8, tipo 304 (pasivo)
Plata
Grafito
Oro
Platino

Noble o Catódico

La Fig. 3 (a) y (b) muestran el efecto de tener un ánodo pequeño con un cátodo grande y lo contrario. Si el área anódica es pequeña - con respecto al área catódica la corrosión tenderá a ser intensa, si por otro lado el área anódica es grande la corrosión será pequeña.

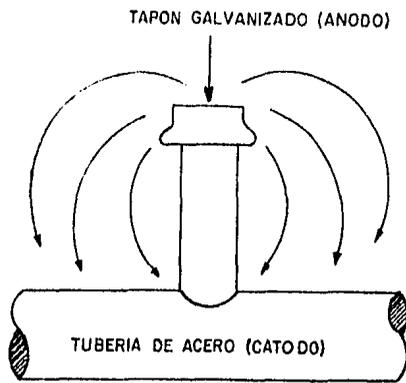
Corrosión Por Cavidades

Una intensa corrosión localizada frecuentemente ocurre dentro de hendiduras y cavidades expuestas a un medio corrosivo. Las condiciones del medio ambiente en una cavidad con el tiempo pueden llegar a ser muy diferentes a las condiciones de la superficie exterior a la hendidura, por lo que un medio ambiente más agresivo puede desarrollarse y causar corrosión local. Esto se puede encontrar comunmente en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc. También se producen por depósitos de suciedad, productos de corrosión, raspaduras en películas de pinturas.

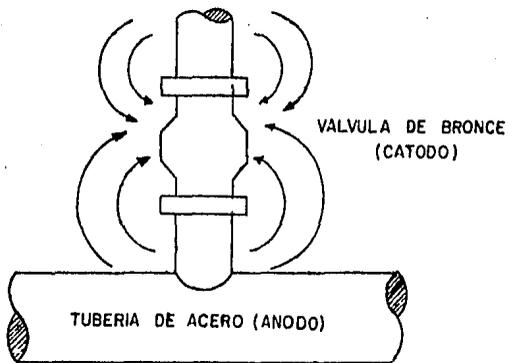
La corrosión por cavidades no ocurre con la misma intensidad en todas las combinaciones metal-corrosivo, algunos materiales son más susceptibles que otros, especialmente aquellos que dependen de la formación de una película de óxido para desarrollar su resistencia a la corrosión como los aceros inoxidable. Ver Fig. Anexo 1

Corrosión Por Picadura

La corrosión por picadura es una forma de ataque extremadamente localizado que da como resultado orificios en el metal y puede tener varias formas.



(a)



(b)

Fig. 3

La picadura es una de las más destructivas e incidiosas formas de corrosión, ocasionando fallas en las estructuras debido a la perforación de los mismos, no obstante que solo se tiene un pequeño porcentaje de pérdida de peso.

Frecuentemente es difícil descubrir las picaduras debido a su pequeñez y también a que estas están cubiertas por productos de la corrosión. Algunas veces las picaduras necesitan mucho tiempo para mostrarse. Ver Fig. Anexo 1

Corrosión Intergranular

El límite de grano en un metal puro, es más propenso al ataque que el propio grano. En los límites del grano los átomos se encuentran debilmente empaquetados, a diferencia de los que ocupan posiciones regulares en el interior de la red cristalina. La energía superficial de los límites del grano pueden explicar su mayor velocidad de disolución con la segregación de elementos específicos o la formación de un compuesto en el límite del grano. La corrosión generalmente ocurre debido al ataque corrosivo preferencial de la zona del límite de grano o zona adyacente debido a la pérdida de un elemento necesario para una adecuada resistencia a la corrosión. Un ejemplo de esto lo tenemos en el caso de los aceros inoxidable, en donde el cromo imparte resistencia contra la corrosión, precipita como carburos de cromo en la zona del límite del grano.

En caso de una severa corrosión del límite de grano, el grano entero es desalojado debido a un deterioro completo de sus límites, en tal caso la superficie aparecerá rugosa a simple vista y se sentirá áspera por los granos perdidos. Ver Fig. Anexo 1

Corrosión Por Ataque Selectivo

La disolución selectiva es la remoción de un elemento de una aleación sólida por proceso de corrosión, siendo el ejemplo más común la eliminación del Zn en aleaciones cobre-zinc conocido como la dezincificación. La corrosión es muy perjudicial debido a que se encuentra un metal poroso con propiedades mecánicas pobres Ver Fig. Anexo 1

Corrosión Por Erosión

La corrosión por erosión es la aceleración o incremento en la velocidad de ataque sobre un metal debido al movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie metálica. Generalmente este movimiento es muy rápido y los efectos mecánicos o de abrasión están involucrados. El metal es removido de la superficie como iones disueltos o en forma de productos sólidos de corrosión, los cuales son mecánicamente limpiados de la superficie del metal. En algunas ocasiones - el movimiento del medio ambiente reduce la corrosión, particularmente cuando el ataque localizado ocurre bajo condiciones de estancamiento, pero esto no es corrosión por erosión debido a que el deterioro no es incrementado.

La corrosión por erosión generalmente tiene la apariencia de picas duras poco profundas de fondo terso, y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal.

La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque y frecuentemente se observa en codos, tes, - válvulas, etc. Ver. Fig. Anexo 1

Fractura Por Corrosión Bajo Tensión

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo, dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque, pero afortunadamente el número de combinaciones aleación-corrosivo que causan este problema, son relativamente pocas sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldaduras, tratamientos térmicos, o bien, pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Algunas de las características del agrietamiento por corrosión bajo tensión, son las siguientes :

1. Para que esta corrosión exista, se requiere un esfuerzo de tensión.
2. Las fracturas se presentan quebradizas en forma macroscópica mientras que las fallas mecánicas de la misma aleación en ausencia de un agente corrosivo específico generalmente presenta ductilidad.
3. La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
4. Algunos medios ambientes específicos, generalmente causan fracturas en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.

5. La corrosión por esfuerzo puede ocurrir en medios ambientes considerados no agresivos para una aleación dada, por ejemplo la velocidad de corrosión uniforme es baja hasta que se presenta una fractura.
6. Largos períodos de tiempo, a menudo años, pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles, pero entonces al presentarse, se propagan rápidamente con el resultado de una falla inesperada.

2.3 CORROSION EN TUBERIAS ENTERRADAS

A continuación se describen algunas de las condiciones que pueden establecer ánodos y cátodos en una tubería.

a) Celdas de corrosión por metales diferentes.

Esta celda puede establecerse cuando dos metales diferentes de una tubería están en contacto físico y en presencia de un electrolito. Es un ejemplo típico de celdas galvánicas. En estas condiciones se genera una diferencia de potencial y cuya magnitud dependerá de la posición de los metales en la serie galvánica. En la Fig. 4 se muestra un ejemplo constituido por una tubería de acero con un ramal de cobre.

b) Celdas de corrosión por suelos diferentes.

Una tubería de acero que pasa a través de suelos diferentes puede establecer celdas de corrosión. Este es el caso en que una tubería cruce por debajo del lecho de un río, un arroyo o por un lugar pantanoso, ya que en esta forma la diferencia de humedad crea un área anódica y una catódica. La Fig. 5 es un ejemplo.

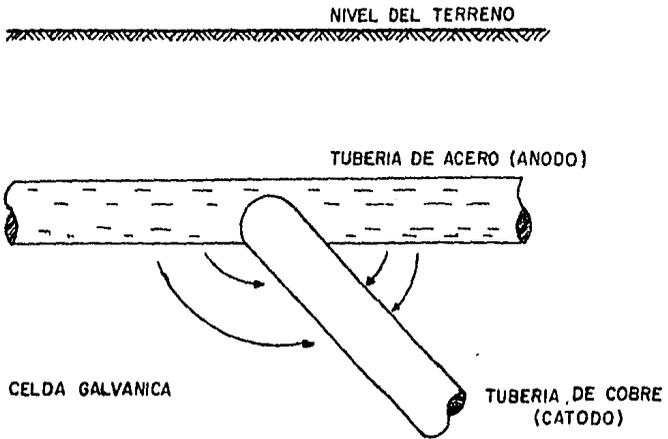


Fig. 4

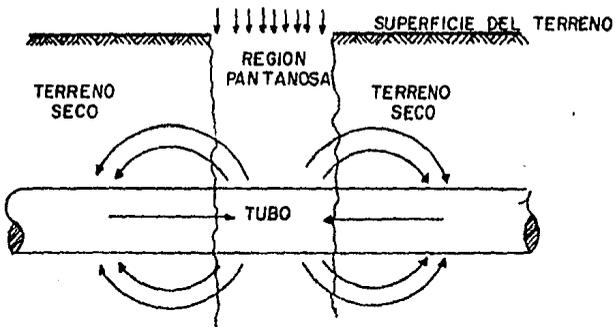


Fig. 5

c) Celdas de corrosión de aereación diferencial.

Esta celda se establece cuando una tubería cruza por un camino pavimentado donde la tierra tiene un suministro de oxígeno restringido. Bajo estas condiciones la tubería en una tierra bien aireada será catódica y la tubería pobremente aireada será anódica, esto se ilustra en la Fig. 6

d) Celdas de corrosión por diferencia de homogeneidad en los materiales.

Una condición muy cercana y relativa a la corrosión de metales diferentes viene a ser cuando una nueva tubería es puesta en medio de dos metales viejos. La nueva pieza de tubería expuesta a las mismas condiciones de corrosión favorece la ionización, creando así un área anódica y una catódica. Ver Fig. 7

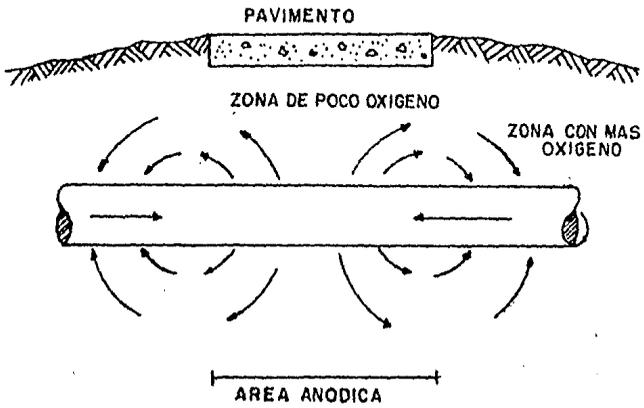


Fig. 6

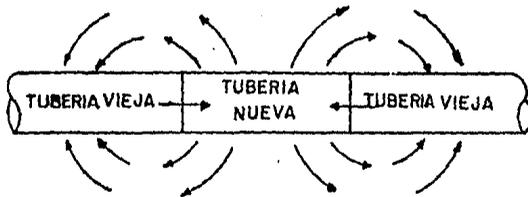


Fig. 7

2.4 METODOS DE CONTROL

Para el control de la corrosión interior y exterior de tuberías de conducción, los métodos que más se utilizan en la actualidad son:

Recubrimientos anticorrosivos

Inhibidores de corrosión

Protección catódica

2.4.1 Recubrimientos

El uso de recubrimientos para el control de la corrosión de las estructuras metálicas se basa en que, si dichas estructuras son aisladas del medio ambiente que las rodea, la corrosión no podrá ocurrir. Por tal motivo, los recubrimientos deben tener las siguientes características :

- a) Buenas propiedades de aislamiento eléctrico
- b) Buena adherencia sobre las superficies metálicas
- c) Buena resistencia a los agentes corrosivos

En los últimos años, los trabajos de control de corrosión de tuberías y de todo tipo de estructura metálica enterradas o sumergidas, han comprendido el uso de buenos recubrimientos y de protección catódica.

Tipos de Recubrimientos.

Existen en la actualidad una inmensa variedad de recubrimientos anticorrosivos, sin embargo en este trabajo nos ocuparemos de aquellos sistemas de recubrimientos que se han desarrollado para tuberías y otras estructuras susceptibles de ser protegidas catódicamente y que han encontrado aplicación en las instalaciones de Petroleos Mexicanos. Los sistemas más comunes son los siguientes :

a) Sistema Primario - Esmalte - Enrollado. (Simple o doble)

Este sistema se usa ampliamente para recubrir tuberías enterradas. Consiste en la aplicación previa a la limpieza de la tubería, de una pintura base o de imprimación, la cual se aplica en forma de película. El objetivo de este primario es favorecer la adhesión del esmalte caliente que se aplica una vez que el primario se encuentre completamente seco.

La temperatura del esmalte debe ser tal que permita su aplicación en forma de película continua a un espesor mínimo de 0.236 cm. (0.098"), una vez que haya sido reforzado con una capa de fibra de vidrio.

Simultáneamente con la aplicación del esmalte, la tubería se forra en forma espiral con tela de fibra de vidrio (vidrio flex u otro semejante). Este forro se hace con un traslape mínimo de 0.635 cm y máximo de 2.90 cm de modo que dicha tela quede embebida y centrada en el esmalte sin mostrar arrugas ni torcimientos.

Finalmente la tubería se envuelve con fieltro o revestimiento exterior (vidrio mate), la envoltura puede ser simple o doble dependiendo de las especificaciones particulares del caso.

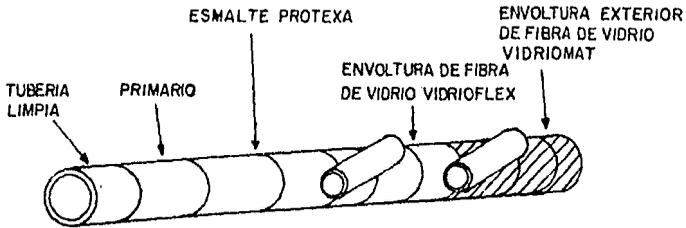
Las figuras 8 y 9 muestran un sistema de recubrimiento estandar y un sistema de doble recubrimiento.

b) Sistema epoxi - modificado con alquitrán de hulla.

Este sistema se usa en Petroleos Mexicanos en casi todos los tanques de almacenamiento y de deshidratación de crudo.

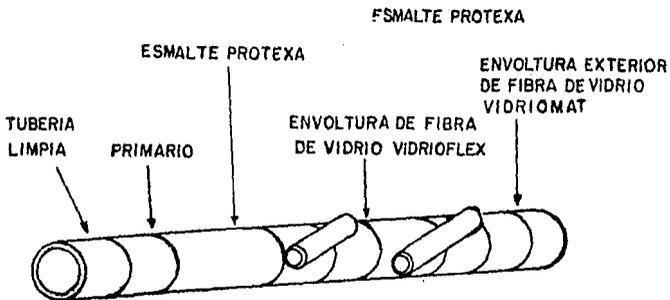
Estos recubrimientos combinan las propiedades de impermeabilidad de la hulla con la buena resistencia a los agentes químicos de la resina epoxi.

El sistema consiste en la aplicación de dos capas de recubrimiento epóxico modificado con alquitrán de hulla a un espesor final de película seca de 0.081 cm mínimo, previa limpieza de las superficies metálicas.



SISTEMA ESTANDAR DE RECUBRIMIENTO

Fig. 8



SISTEMA DOBLE DE RECUBRIMIENTO

Fig. 9

c) Otros sistemas especiales.

Aquí se agrupan todos aquellos sistemas de recubrimientos que encuentran aplicación en casos particulares como los que se señalan a continuación :

En los muelles, pilotes y en ciertas partes de la subestructura de las plataformas marinas, se utilizan recubrimientos de altos sólidos.

En tuberías de diámetro pequeño, especialmente en redes de distribución de gas u otros servicios, suele emplearse cintas aislantes de polietileno de policloruro de vinilo (PVC), las cuales se enrollan a la tubería previamente limpia, en forma traslapada.

En tuberías que transportan hidrocarburos calientes se están utilizando sistemas de protección a base de epóxico alquitran de hulla superior que resisten temperaturas hasta de 140 °C. El sistema consiste en : limpiar la superficie metálica con chorro de arena a metal blanco y aplicar 3 capas de recubrimiento de 0.193 cm de espesor de película seca por capa con un tiempo de secado mínimo de 4 horas entre capas, logrando con ello un espesor final de 0.579 cm.

Fallas en los Recubrimientos.

Las fallas en los recubrimientos se pueden originar, por mala preparación de la superficie, selección inadecuada del material, mala calidad del mismo, incorrecta aplicación o por condiciones atmosféricas inapropiadas durante su aplicación. Las fallas más comunes son :

Discontinuidad de la película, falta de adhesión, ampolla---
miento, agrietamiento, corrugado.

2.4.2 Inhibidores.

Podemos reducir la corrosión por la acción de un inhibidor, es decir, de una sustancia química que, adicionada en pequeña concentración al medio corrosivo reduce eficazmente la velocidad de corrosión.

No obstante, la importancia que los inhibidores de corrosión --
hán adquirido en el control de la corrosión interior de tuberías, en este trabajo se describen brevemente por no ser el objetivo.

Existen varias clases de inhibidores que se pueden agrupar como sigue :

- a) Inhibidores inorgánicos.
- b) Inhibidores orgánicos.
- c) Inhibidores en fase de vapor.

- a) Inhibidores Inorgánicos.

Son por lo general sustancias oxidantes inorgánicas, por ejemplo cromatos o molibdatos, que pasivan al metal y desplazan el potencial de corrosión varias décimas de volts hacia valores más nobles.

b) Inhibidores orgánicos.

Estos compuestos se emplean para proteger las superficies de -
acero temporalmente contra la formación de herrumbre durante el trans-
porte y almacenamiento, así como para el control de la corrosión in-
terior. Consisten en aceites, grasas o ceras, derivados de aminas y
sales cuaternarias de amonio que constituyen los llamados inhibidores
tipo fílmico.

c) Inhibidores en fase de vapor.

Estos inhibidores son de apreciable tensión de vapor, cuyo va--
por tiene propiedades inhibitorias de la corrosión. Se emplean para pro-
teger temporalmente piezas importantes de máquinas, por ejemplo, roda-
mientos y otros artículos acabados de acero, contra la formación de -
herrumbre.

2.4.3 Protección Catódica

La protección catódica se define como una técnica que detiene - o reduce la corrosión de un metal en contacto con un electrolito, haciendo al metal un cátodo de una celda electroquímica por medio de una corriente impresa o por la unión de un material más activo, usualmente aluminio, magnesio o zinc. Es decir la protección catódica es posible por la naturaleza electroquímica de la corrosión. Esto es, las estructuras metálicas enterradas se corroen por la formación de áreas anódicas y catódicas. Fig. 10

Por lo anterior, decimos que si toda la superficie de una estructura metálica se hace cátodo, la estructura no se corroerá mientras se mantenga esta condición.

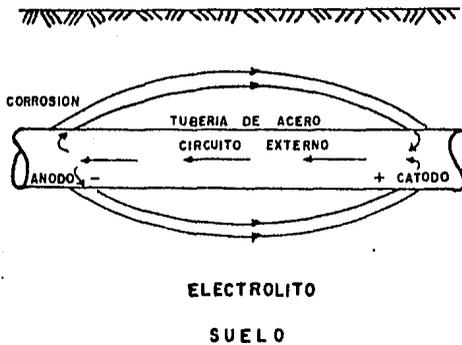


FIG. 10

La explicación de su mecanismo fue dada por Mears y Brown desde -- 1938. Estos investigadores establecieron que para obtener una protección catódica completa de una estructura metálica, su potencial debe ser igual o menor que el potencial en circuito abierto del punto más -- anódico.

Kuhn en 1933 estableció en forma empírica que si una tubería se -- mantenía a un potencial de -0.85 volts respecto a un electrodo de ---- Cu/CuSO_4 saturado, el fenómeno de corrosión se frenaría totalmente. Ya más recientemente Schwerdtfeger y McDorman del laboratorio del Nacional Bureau of Standards publicaron (1951) los resultados experimentales del criterio que se debe adoptar para la protección catódica de estructuras ferrosas enterradas.

Este estudio comprendió el comportamiento de probetas de acero ente rradas en distintos tipos de suelo, cuyo pH variaba entre 2.9 y 9.6. Los ensayos comprobaron que la intensidad de la corrosión determinada -- por la pérdida de peso de las probetas disminuía regularmente desde el pH ácido al pH alcalino y que a partir del punto donde la curva tenía -- valores de $\text{pH} = 9$ y $E = 0.529$ volts respecto a un electrodo de hidróge no, la pérdida de peso de las probetas era prácticamente nula.

Lo anterior permitió concluir que si cualquier estructura enterrada se mantenía a un potencial de -0.529 volts respecto al electrodo de hi-- drógeno estará en las mismas condiciones que las probetas que no sufre ron corrosión.

Criterio de Protección Catódica

El parámetro más importante a determinar es el potencial mínimo del metal que nos garantizará que la estructura que se pretende proteger tra

bajará permanentemente como cátodo.

No existe un solo criterio para la evaluación de la efectividad de la protección catódica que haya probado ser satisfactoria para todas las condiciones. De ahí que existen varios criterios cada uno con ventajas y limitaciones.

El criterio más aceptado es el que establece que el potencial de la estructura-electrolito, deberá tener un valor de -0.85 volts medido a través de un electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 saturado. La corriente de ese potencial debe hacerse con la corriente de protección aplicada.

Otro criterio se basa en un cambio de voltaje negativo catódico de por lo menos 300 mv medido entre la estructura y un electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 saturado. Este criterio está basado en el potencial de óxido-reducción para el fierro que es de -0.440 volts referido al electrodo de hidrógeno. La medición de dicho cambio debe hacerse con la corriente de protección aplicada. El electrodo Cu/CuSO_4 saturado se utiliza porque tiene bajo costo, exactitud y soporta el uso en el campo.

Campo de Aplicación

La aplicación de la protección catódica está sometida a que se pueda establecer un circuito de electrólisis en el cual, la estructura -- por proteger sea el cátodo, es decir, el electrodo del circuito sobre el cual se depositarán los electrones. Para que esto suceda, se requiere que toda la estructura esté en contacto permanente con el electrolito, de esta manera la protección catódica se emplea generalmente por la protección de :

Plataformas marinas
Cascos de barcos
Exterior de buquestanque
Interior de tanques
Tuberías enterradas
Soportes de muelles
Tuberías sumergidas

Hay dos maneras de proteger catódicamente :

- a) Protección catódica por ánodos galvánicos
- b) Protección catódica por corriente impresa

La protección catódica con ánodos galvánicos se logra mediante la conexión de la estructura a metales más activos, para el caso del fierro su conexión a ánodos de zinc, aluminio o magnesio proporciona la protección adecuada. Fig. 11

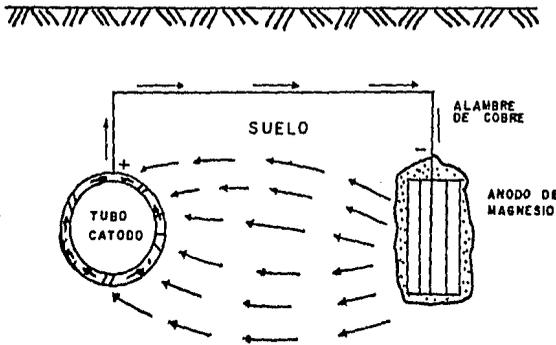


FIG. 11

En este tipo de protección catódica el ánodo metálico es el que sufre la corrosión al proporcionar los electrones requeridos para la protección por lo que también se conocen como ánodos de sacrificio.

La protección catódica por corriente impresa consiste en conectar una fuente de poder de corriente directa o un rectificador de corriente alterna a la estructura a proteger ; el polo negativo de la fuente de corriente se conecta a la estructura y el polo positivo a un ánodo inerte tal como grafito o duriron.

Los métodos para la protección catódica presentan ventajas y desventajas como a continuación se muestra :

ANODOS GALVANICOS

CORRIENTE IMPRESA

- | | |
|--|--|
| - No requieren potencia externa | Requieren potencia externa |
| - Voltaje de aplicación fijo | Voltaje de aplicación variable |
| - Intensidad de corriente limitada | Intensidad de corriente variable |
| - Se aplican para pequeños requerimientos de corriente | Util para cualquier requerimiento de corriente |
| - Util en medios de baja resistividad | Aplicable a cualquier resistividad del medio |
| - La interferencia con estructuras vecinas es prácticamente despreciable | Es necesario considerar las estructuras vecinas para evitar las interferencias |

a) Protección Catódica Con Anodos Galvánicos.

El uso de ánodos galvánicos en protección catódica es una aplicación de la celda de corrosión por metales diferentes.

Sabemos que si una estructura de acero está conectada eléctricamente a un metal más electronegativo y ambos están en contacto con un electrolito, el metal más activo se corroerá y descargará corriente durante el proceso. Si la cantidad de corriente para protección es conocida, se puede diseñar grupos de ánodos (camas) para proporcionar la corriente deseada durante un período de tiempo determinado.

Un ánodo galvánico también llamado ánodo de sacrificio, puede describirse como un metal con un potencial más electronegativo que la estructura que se pretende proteger. Por tal motivo, si se conecta eléctricamente a una estructura enterrada o sumergida, descargará una corriente que fluirá a través del electrolito hasta la estructura en cuestión.

Un buen ánodo de sacrificio deberá tener las siguientes características :

- Potencial suficientemente electronegativo, para asegurar un flujo de corriente adecuado.
- Corriente de salida elevada, por unidad de peso de material consumido.

- Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo.
- Bajo costo.

Tipo de Anodos Galvánicos

Los ánodos galvánicos que más se utilizan en protección catódica son : de magnesio, de zinc, y de aluminio. A continuación se indican sus propiedades electroquímicas :

Material Anódico	Pot. en circuito abierto (ref. Cu/CuSO ₄) en volts	Drenaje de corriente teórico en AMP-hr/Kg	Drenaje de corriente práctico en AMP-hr/Kg	Eficiencia %
Magnesio	-1.75	2200	1100	50
Zinc	-1.10	820	737	90
Aluminio	-1.10	2977	2816	95

Para determinar el drenaje de corriente teórico puede explicarse recurriendo a la ley de Faraday, que consiste en "Un Faraday disuelve o deposita un equivalente de cualquier elemento y es igual a 96500 coulombs".

Un equivalente químico es igual al peso molecular de un elemento entre su valencia.

$$E_q = \frac{\text{Peso molecular}}{\text{Valencia}}$$

Entonces el equivalente químico para el magnesio se determina de la siguiente manera :

$$P. M. = 24.213$$

$$\text{Valencia} = 2$$

$$E_q = \frac{24.312 \text{ g/mol}}{2 e_q/\text{mol}} = 12.156 \text{ g/e}_q$$

Cálculo de amp-hr por unidad de masa para el magnesio, zinc y aluminio.

$$1F = 96500 \text{ cb} = 96500 \text{ amp-seg} = 26.8 \text{ amp-hr}$$

Para magnesio

$$\frac{26.8 \text{ amp-hr/e}_q \times 1000 \text{ g/Kg}}{12.156 \text{ g/e}_q} = 2200 \frac{\text{amp-hr}}{\text{Kg}}$$

Para zinc

$$= 820 \text{ amp-hr/Kg}$$

Para aluminio

$$= 2977 \text{ amp-hr/Kg}$$

Los ánodos de magnesio han encontrado mucha aplicación en la protección de estructuras enterradas y los ánodos de zinc y aluminio se utilizan preferentemente para proteger estructuras sumergidas.

La protección catódica con ánodos de sacrificio, tiene ventajas y --desventajas con respecto al sistema de protección por corriente impresa. Las principales son :

VENTAJAS

- a) Bajo costo de instalación.
- b) Protección ideal para puntos calientes (hot spots).
- c) Bajo costo de mantenimiento.
- d) Menos problemas de interferencia.

DESVENTAJAS

- a) Grandes cantidades de material anódico.
- b) Reposición periódica.
- c) No adaptable al control automático.
- d) Limitados a aplicaciones de baja corriente.

Relleno (Backfill)

El propósito de rellenar las excavaciones donde se colocan los ánodos es el siguiente :

- a) Se reduce el efecto de polarización.
- b) Se distribuye el ataque o corrosión a lo largo de todo el ánodo.
- c) Se reduce la resistencia de contacto ánodo-suelo.

Los rellenos típicos para ánodos galvánicos están constituidos como sigue :

	CaSO ₄ (Hidratado) %	Bentonita %	Na ₂ SO ₄ %	Resistividad aprox. ohms-cm
(A)	25	75	-	250
(B)	50	50	-	250
(C)	75	20	5	50

El relleno (A) se utiliza en zonas húmedas y de baja resistividad.

El relleno (B) se usa frecuentemente con ánodos de zinc.

El relleno (C) que tiene baja resistividad, es útil en suelos de alta resistividad.

Consideraciones de Diseño

Por un diseño de un sistema de protección catódica debemos entender dos cosas :

1. Dimensionar equipo
2. Elaborar las especificaciones de cada instalación

Si recordamos que, protección catódica es protección electroquímica contra corrosión de estructuras metálicas enterradas, las dimensiones del equipo necesario para el proceso electroquímico que pretendemos controlar son :

- a) Cantidad de corriente que requiere la estructura o cátodo
- b) Número de puntos para la distribución más adecuada de la corriente requerida (puntos de drenaje de corriente)
- c) Distribución de los puntos de drenaje
- d) Potencial requerido en cada punto de drenaje

El primer problema de dimensionamiento, o sea la determinación del requerimiento de corriente de protección catódica depende de dos factores fundamentales :

- a) La cantidad de la estructura que participa en el proceso
- b) La actividad del electrolito

Cuando se trata de estructuras desnudas, es decir, cuando la superficie de acero está directamente en contacto con el electrolito, el primer factor tiene una sola variable y es de orden geométrico : AREA GEOMETRICA TOTAL EN CONTACTO CON EL ELECTROLITO. La demanda unitaria de corriente de protección catódica depende en este caso exclusivamente de la actividad del electrolito.

Cuando se trata de estructuras con un recubrimiento dieléctrico de alta calidad, aplicado sobre todas las áreas que han de estar en contacto con el electrolito. la demanda de corriente por unidad de área es difícil de establecer teóricamente y por lo general se tiene que recurrir a pruebas eléctricas directas en el campo para estimar el requerimiento de corriente necesario para obtener una protección catódica completa.

A continuación se describe brevemente una prueba de requerimiento de corriente de una estructura con recubrimiento.

Debido a que las tuberías con recubrimiento demandan muy poca corriente de protección, es posible hacer esta aplicación con una fuente de capacidad moderada tal como un grupo de pilas secas de bajo voltaje, un acumulador de automóvil o una máquina de soldar etc. El polo negativo del generador se conecta a la estructura en estudio y el positivo a tierra a través de algún dispositivo de baja resistencia. El circuito se cierra a través del terreno. Fig. 12

En la figura (A) es un generador de corriente continua que cierra su circuito a través del ducto, el terreno y un dispositivo anódico o de conexión a tierra; quedando intercalado en dicho circuito un derivador o shunt y dos volímetros de corriente continua que generalmente son de alta resistencia.

El punto (C) o de conexión al ducto es el que sirve de base para iniciar el estudio ya que en él se puede verificar inmediatamente la modificación que se obtiene del potencial natural. Con medios de regulación de las características del generador se fija un valor determinado del nuevo potencial que ahora será el de protección, fijando este valor, a continuación se hace la investigación de la longitud del ducto en donde es posible mantener un potencial de protección en ambos lados del punto (C) o de aplicación; lo anterior se logra haciendo mediciones de potencial entre el ducto y el terreno hasta encontrar la zona en que se obtiene el potencial mínimo de protección, estos puntos o zonas quedan indicados por C' y C'', en dichos puntos -- así como en C se toma como resistencia una longitud (L_2 , L'_2) del ducto y en ella se determina la cantidad de corriente que circula en esas zonas, teniéndose I, I' e I'' respectivamente.

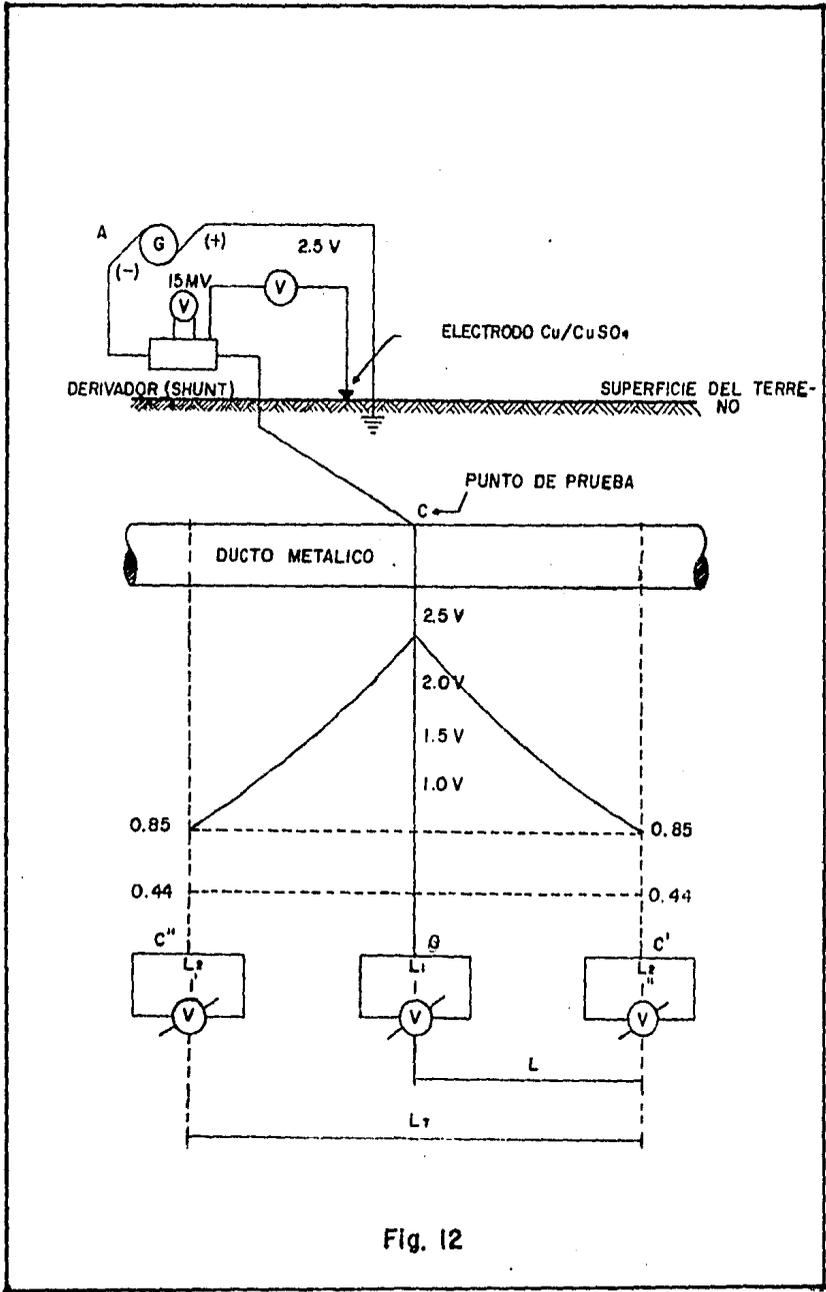


Fig. 12

Estas corrientes se determinan para calcular el valor de (A) o % de área metálica del ducto en contacto directo con el suelo lo cual se logra mediante la aplicación de la siguiente expresión :

$$A = \frac{I - I'}{\pi D L d}$$

Donde :

A = % de área metálica en contacto con el terreno

I = Corriente que circula por L_1 (amperes)

I' = Corriente que circula por L_2 (amperes)

$\pi D L$ = Area total exterior del ducto

d = Densidad de corriente (ma)

Con el valor de A se procede a calcular la cantidad de corriente de protección (I_p) necesaria para proteger dicha área metálica, lo cual se logra de la siguiente forma :

$$I_p = (\pi) (D) (L) (A) (d)$$

Se deberá tomar en cuenta lo siguiente :

- Distancia máxima del tubo al dispositivo de tierra 20 m
- Potencial mínimo de protección -0.85 volts
- Potencial máximo aplicable del tubo al suelo p/s = 2.5 volts
- Tiempo de polarización mínimo 3 hrs. con potencial p/s máximo

b) Actividad del Electrolito.

En el caso de estructuras enterradas, el factor que más contribuye a la disolución sobre el metal, es el agua y su contenido de sales.

Dichas sales determinan el grado de corrosividad del suelo debido a que actúan directamente sobre ciertas propiedades eléctricas del mismo como son su conductividad y/o resistividad, de tal manera que a mayor con ductividad, se tendrá menor resistividad lo que significa un suelo con mayor corrosividad.

Esto ocasiona que en suelos húmedos los valores de resistividad sean bajos por lo que se establece con cierta facilidad un circuito electrolí tico entre áreas anódicas y catódicas, favoreciéndose con ello el proce so corrosivo.

La clasificación de los suelos de acuerdo con su resistividad es la siguiente :

RESISTIVIDAD	CLASIFICACION
900 ohms-cm o menos	Altamente corrosivos
900-3000 ohms-cm	Moderadamente corrosivos
mayores de 3000 ohms-cm	Poco corrosivos

Existen varios métodos para medir la resistividad de un electrolito, uno de los principales es el método de Wenner o método de los "cuatro - electrodos", para lo que se utiliza un ohmetro conocido comercialmente - como Vibrograund.

La conexión de los cuatro electrodos se efectúa de acuerdo a la Fig. 13. Este método se aplica para la determinación del valor de la resis tividad de un hemisferio de suelo en el que el radio es igual a la sepa ración que existe entre los electrodos.

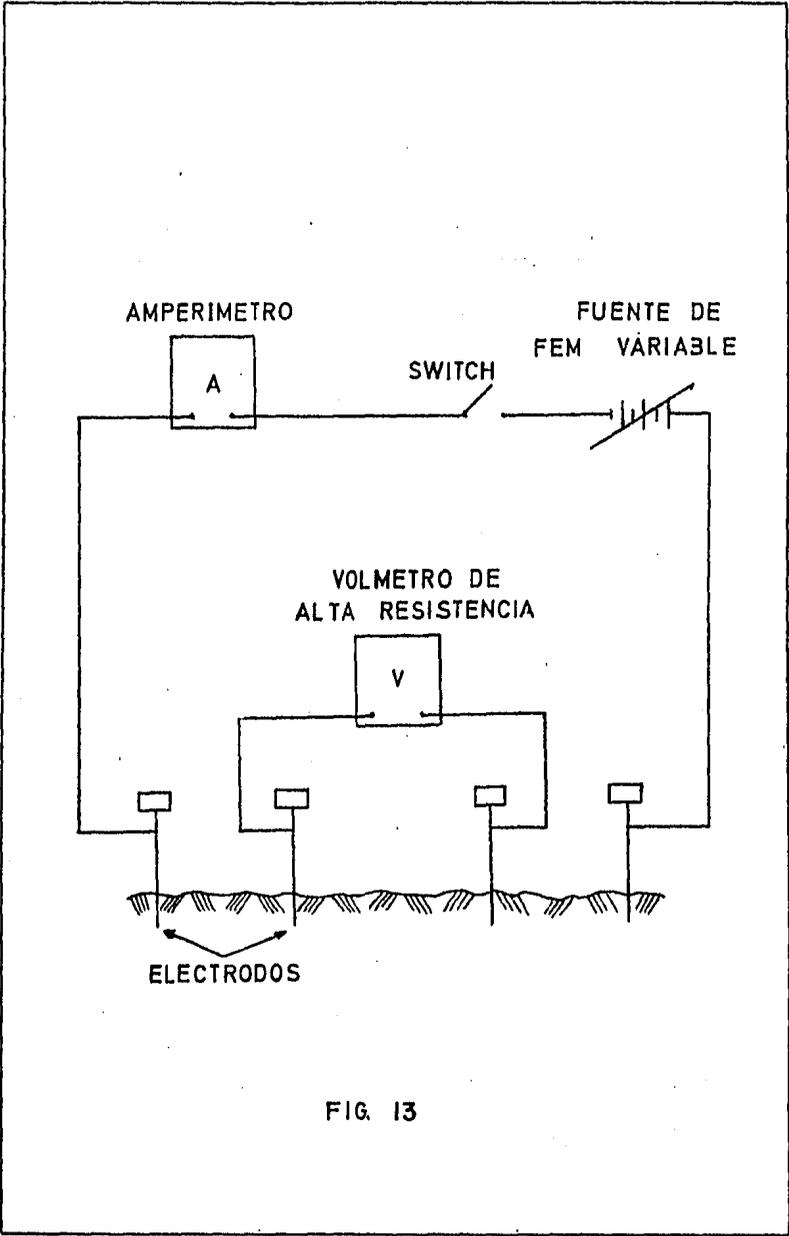


FIG. 13

Así se tiene que :

$$R = \int \frac{L}{A}$$

$$\rho = \frac{A}{L} R$$

Si $L = r$ y la superficie de que se trata es la mitad de un hemisferio, se tiene que la superficie de una esfera es :

$$A = 4\pi r^2 \therefore A = 2\pi r$$

Sustituyendo tenemos :

$$\rho = 2\pi rR$$

Esta expresión nos dice que la resistividad de un suelo es igual a 2π veces la separación entre electrodos multiplicada por la propia resistencia del terreno comprendida entre electrodos, cuando r (cm).

A este resultado se le ha dado un aspecto más práctico al fijar separaciones entre electrodos para determinar el valor de la resistividad, lo anterior se basa en que siendo 191.5 el factor de conversión cuando r se toma en pies, se tiene :

Si $r =$ un pie entonces

$$= (191.5) (r) (R)$$

Si $r = 5$ pies entonces

$$= (191.5) (5) (R)$$

$$= (957.5) (R)$$

Este resultado permite ver la conveniencia de redondear el valor de 957.5 a 1000. Lo cual se logra si r se hace igual a 1.60 m (5' - 3").

Por lo anterior se establece que la separación entre electrodos más conveniente es la de 1.60 m (5' - 3") y 3.20 m (10' - 6").

Conocida la corriente de protección y la resistividad del electrolito el diseño se reduce a determinar el número de ánodos que suministran dicha corriente.

A continuación se da la fórmula que puede utilizarse para determinar la vida útil esperada de un ánodo de peso conocido, o bien el peso necesario para una vida útil determinada, conociendo la corriente de salida del ánodo.

$$V = \frac{A \times P \times E \times Fu}{I}$$

Donde :

V = Vida útil del ánodo en años

A = Factor del material

P = Peso del ánodo en Kg

E = Eficiencia de corriente

Fu = Factor de utilización

I = Corriente en amperes

En las fórmulas anteriores se consideró una eficiencia de corriente de 50% para magnesio, 90% para el zinc y 95% para el aluminio. También se consideró que los ánodos no se consumen totalmente por lo que se tomó un factor de utilización de 75%.

Las fórmulas que siguen y los datos de la tabla 1 pueden utilizarse para estimar de una manera aproximada, la salida de corriente de ánodos de magnesio y de zinc, suponiendo una distancia entre los ánodos y la estructura de 3m (10 pies), una resistividad arriba de 500 ohms-cm y donde la estructura que será protegida, está desnuda o tiene un recubrimiento muy pobre. Los factores de corrección "Y" de la tabla No. 2, corrigen la salida de corriente anticipada para otros valores de potencial tubo-suelo diferentes a -0.85 volts ref. Cu/CuSO₄ en la estructura que va a ser protegida.

$$I_m = \frac{150000 f Y}{\rho} \quad I_z = \frac{50000 f Y}{\rho}$$

Donde :

I_m = Salida de corriente de un ánodo de magnesio, ma.

I_z = Salida de corriente de un ánodo de zinc, ma.

ρ = Resistividad del suelo ohms-cm

Y = Factor que se utiliza para hacer la corrección de la corriente suministrada por un ánodo cuando el potencial de la estructura polarizada es diferente de -0.85 volts ref. Cu/CuSO₄ sat. esta consideración presupone constantes aquellos otros factores que también afectan la salida de corriente de un ánodo, como son : potencial del ánodo, y/o dimensiones del mismo, resistividad del suelo y distancia entre ánodo y la estructura polarizada (cátodo).

f = Factor que se utiliza para corregir la salida de corriente de un ánodo cuando las dimensiones del ánodo son diferentes a las que tiene uno de 7.72 Kg (17 lbs). Esta consideración también presupone que se mantienen constantes aquellos otros factores

que afectan la salida de corriente de un ánodo.

Cálculo de los factores "Y" y "F" y demostración de la fórmula de corriente de salida para un ánodo de magnesio.

Según la ley de ohm, tenemos que :

$$I = \frac{E_a - E_c}{R_t}$$

Donde :

- I = Corriente de salida del ánodo amperes
- E_a = Potencial del ánodo volts
- E_c = Potencial del cátodo volts
- R_t = Resistencia total ohms

Luego :

$$R_t = R_a + R_c + R_e$$

- R_a = Resistencia del ánodo ohms
- R_c = Resistencia del cable ohms
- R_e = Resistencia de la estructura ohms

R_c y R_e Se consideran despreciables.

Para obtener la resistencia de un ánodo vertical nos basamos en la ecuación Dwight.

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

Donde :

R_v = Resistencia del ánodo vertical ohms

ρ = Resistividad del suelo ohm

l = Longitud del ánodo cm

d = Diámetro del ánodo cm

Dimensiones de un ánodo de magnesio de 7.72 Kg (17 lb)

$d = 16.51$ cm (6.5 pulg)

$L = 61$ cm (24 Pulg)

Entonces :

$$R_v = \frac{500}{2(31416)61} \left(\ln \frac{8(61)}{16.51} - 1 \right)$$

$$R_v = 1.3052 \times 2.3863$$

$$R_v = 3.114 \text{ ohms}$$

$$I = \frac{(-0.85) - (-1.75)}{3.114} = 0.289 \text{ amperes}$$

Como :

$$I \propto \frac{1}{\rho}$$

haciendo la igualdad de la ecuación anterior

$$I = \frac{K}{\rho}$$

donde K es una constante

$$K = I \rho$$

$$\begin{aligned} K &= 0.289 \text{ amp} \times 500 \text{ ohms-cm} = 144.5 \text{ amp} \times \text{ohm-cm} \\ &= 144500 \text{ ma} - \text{ohm-cm} \end{aligned}$$

Variando la resistividad tenemos que :

$$\rho = 1000 \text{ ohm-cm}$$

$$R_v = 5.95 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{0.9}{5.95} = 0.151 \text{ amperes}$$

$$\begin{aligned} K &= 0.151 \times 1000 = 151 \\ &= 151000 \text{ ma} - \text{ohm-cm} \end{aligned}$$

Si

$$\rho = 1500 \text{ ohm-cm}$$

$$R_v = 8.92 \text{ ohm}$$

$$I_a = 0.100 \text{ amperes}$$

$$K = 150000 \text{ ma} \times \text{ohm-cm}$$

Cálculo de f

Como se dijo anteriormente que f está en función de las dimensiones del ánodo, para este ejemplo utilizaremos un ánodo 14.5 Kg --- (32 lb), con una resistividad de 500 ohm-cm.

Dimensiones

$$d = 20.32 \text{ cm (8 pulg)}$$

$$L = 66.04 \text{ cm (26 pulg)}$$

Entonces

$$R_v = \frac{500}{2(3.1416) \times 66.04} \left(\ln \frac{8(66.04)}{20.32} - 1 \right)$$

$$R_v = 2.70 \text{ ohm}$$

$$I = \frac{0.9}{2.70} = 0.333 \text{ amperes}$$

Luego :

$$0.289 \text{ --- } 1$$

$$0.333 \text{ --- } X$$

$$X = 1.15 = f \text{ que se tabula en la tabla No. 1}$$

Cálculo para "Y"

Como "Y" es un factor de corrección que depende del potencial, en esta demostración utilizamos un valor diferente de -0.85 volts, ref. Cu/CuSO₄. Siendo de -0.70 volts.

$$I = \frac{(-0.70) - (-1.75)}{5.95} = 1.76$$

$$0.151 \text{ --- } 1$$

$$0.176 \text{ --- } X$$

$$X = 1.16 = Y \text{ que se tabula en la tabla No. 2}$$

Cuando la estructura tiene un buen recubrimiento la salida de corriente de los ánodos será menor que la salida anticipada sobre una tubería desnuda. La resistencia a tierra de una estructura recubierta es más grande y debe considerarse en la resistencia total del circuito. Para esta, multiplique las constantes 150000 y 50000 por 0.80. Esto supone un promedio de 20% menos corriente de salida de los ánodos que la corriente anticipada.

TABLA No. 1

Peso del ánodo Kg	Factor "f"
1.36	0.59
2.27	0.66
4.09	0.81
7.73 (empacado)	1.00
14.55 (empacado)	1.16
22.73 (empacado)	1.22

TABLA No. 2

Factores de corrección "Y"

P/S	MAGNESIO	ZINC
- 0.70	1.14	1.60
- 0.80	1.07	1.20
- 0.85	1.00	1.00
- 0.90	0.93	0.80
- 1.00	0.79	0.40
- 1.10	0.64	0.00
- 1.20	0.50	0.00

Para el caso de instalaciones de grupos de ánodos la corriente total de salida puede determinarse calculando la corriente de salida de un solo ánodo y multiplicando su valor por el factor apropiado que se da en la tabla No. 3. Esta tabla está basada en la fórmula de E. D.-Sunde, para la resistencia a tierra de ánodos múltiples utilizando ánodos verticales de 7.72 Kg empacados en paralelo. Para cálculos aproximados, la tabla puede aplicarse a cualquier otro tamaño de ánodo.

TABLA No. 3

Número de ánodos de paralelo	FACTORES DE AJUSTE Espaciamiento de los ánodos, M.			
	1.52	3.04	4.47	6.09
2	1.893	1.920	1.946	1.964
3	2.455	2.705	2.795	2.848
4	3.036	3.455	3.625	3.714
5	3.589	4.188	4.429	4.563
6	4.125	4.902	5.223	5.411
7	4.652	5.598	6.000	6.232
8	5.152	6.277	6.768	7.036
9	5.670	6.964	7.536	7.875
10	6.161	7.643	8.304	8.679

Las fórmulas anteriores y las tablas deberán usarse únicamente como una guía para estimar las corrientes de salida de los ánodos --galvánicos. Debido a que muchas variables están involucradas, las verdaderas corrientes de salida, solo pueden obtenerse por medición directa en el campo, una vez que han sido hechas las instalaciones.

La selección del tipo de ánodos galvánicos que deben utilizarse en un caso particular de protección catódica, es un problema económico.

Se deberá procurar que el diseño de un sistema de protección catódica sea simple, eficiente y económico.

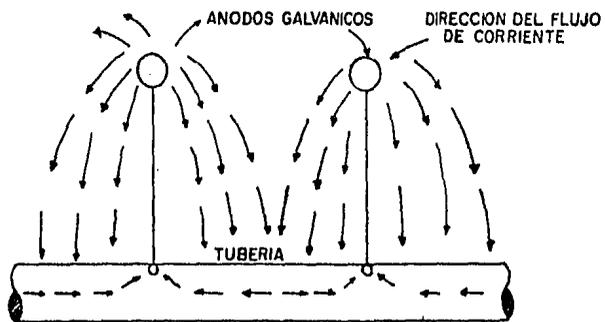
Para obtener un diseño simplificado, se deberán reducir al mínimo los puntos de drenaje de corriente de protección, es decir, espaciar dichos puntos entre sí lo máximo posible. Naturalmente esto estará en función del tipo de estructura de que se trate y de la calidad del recubrimiento.

Los sistemas de protección catódica deberán limitar el potencial de protección (P/S) a un máximo de 2.5 volts (Ref a Cu/CuSO_4 Sat) - para evitar daños al recubrimiento anticorrosivo de la tubería u otro tipo de daños a la estructura. El potencial mínimo de protección deberá ser de 0.85 volts (Ref Cu/CuSO_4 Sat). En ambos casos la estructura debe ser negativa.

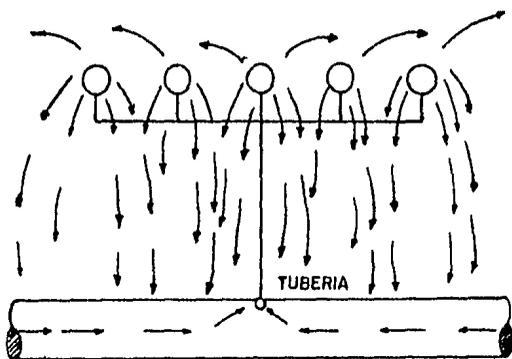
Instalación

La instalación de un sistema de protección catódica a base de ánodos de sacrificio implica una serie de trabajos que dependerán de la geometría de la estructura que se pretende proteger y del medio en el cual se está alojando, en la Fig 14 se muestra la instalación.

En todos los casos los detalles de instalación estarán contenidos en las especificaciones y particulares del trabajo. Petroleos Mexicanos cuenta con especificaciones generales en lo que se refiere a protección catódica de tuberías. En el plano JH-001 se muestra la instalación de un ánodo vertical.

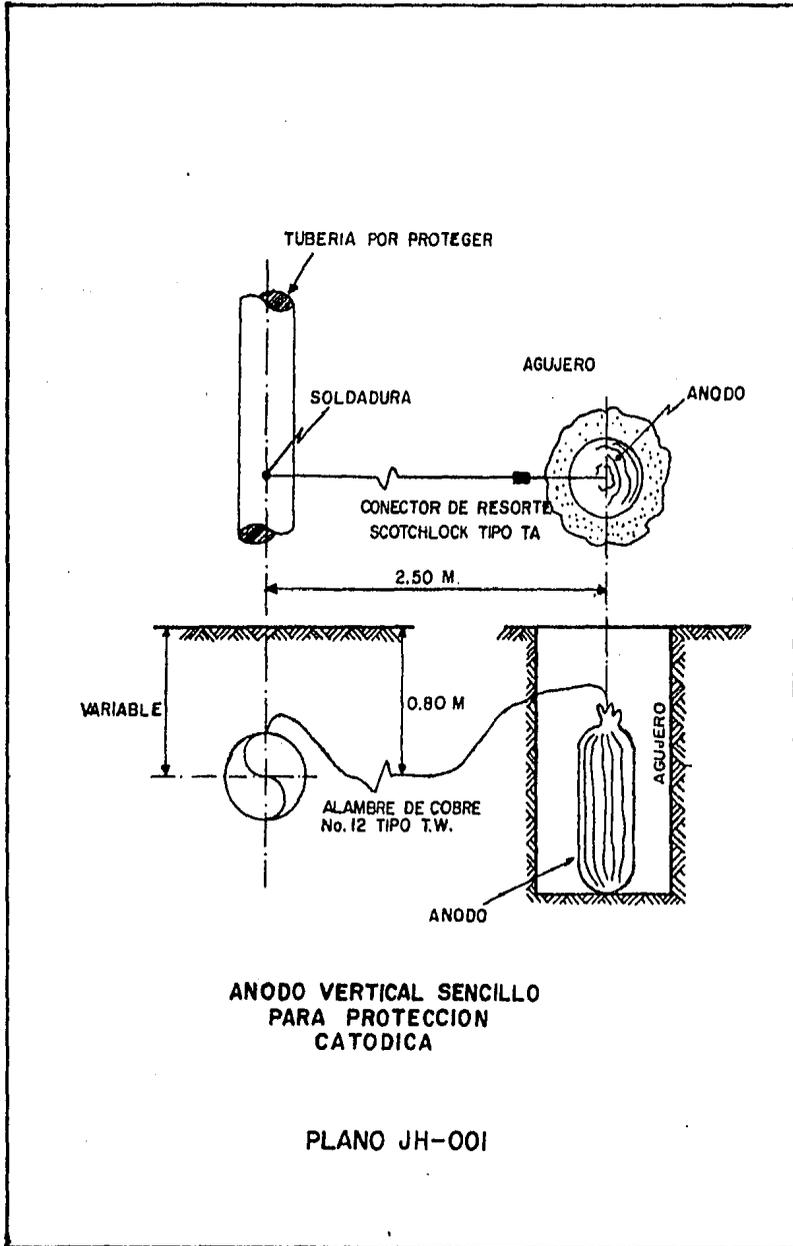


PROTECCION CATODICA DE UNA TUBERIA CON ANODOS INDIVIDUALES



PROTECCION CATODICA DE UNA TUBERIA CON UNA CAMA DE ANODOS

Fig. 14



b) Protección Catódica Por Corriente Impresa

Se llaman sistemas de corriente impresa porque utilizan energía primaria del exterior, para imprimir corriente directa de la estructura por proteger, a diferencia de los sistemas de protección catódica a base de ánodos galvánicos, los cuales no imprimen corriente, -- sino que la generan en el seno del electrolito donde está alojada la estructura por proteger, formando en ese electrolito, una pila galvánica.

La protección catódica por corriente impresa tiene ventajas y -- desventajas con respecto al sistema de protección con ánodos galvánicos. Las principales son :

VENTAJAS

- Voltajes grandes y variables.
- Corrientes de salida elevadas y variables.
- Aplicable a medios ambientes de cualquier resistividad.

DESVENTAJAS

- Elevados costos de instalación y de mantenimiento.
- Gastos mensuales por concepto de energía eléctrica.
- Problemas de interferencias con estructuras vecinas.

Los sistemas de corriente impresa están constituidos por las siguientes partes fundamentales :

- a) Dispositivo para impresión de corriente.
- b) Conductor catódico.
- c) Conductor anódico.
- d) Dispositivo anódico para descargar la corriente.

La Fig. 15 muestra una instalación típica de protección catódica por corriente impresa para una tubería.

DISPOSITIVO PARA IMPRESION DE CORRIENTE

Existen varios tipos de dispositivos para impresión de corriente directa, los más comunes son : generadores de viento, generadores mecánicos, generadores solares, rectificadores de corriente alterna, etc., en este trabajo solo nos ocuparemos de los rectificadores de C.A.

RECTIFICADORES DE CORRIENTE ALTERNA

Es el tipo clásico por excelencia de fuente de C.D. para protección catódica. Posee capacidad prácticamente ilimitada de potencia, tensión y corriente.

Por lo general se alimentan de corriente alterna de baja tensión (110/220/440 V.C.A.) monofásica o trifásica. Se pueden emplear desde los circuitos más simples, consistentes prácticamente en una celda rectificadora, para la obtención de corriente directa pulsante de media onda, hasta los circuitos más sofisticados, trifásicos de onda plana completa, con enfriamiento forzado, automáticamente controlados, con circuitos economizadores, señales piloto y todo tipo de protección eléctrica, de intemperie, etc.

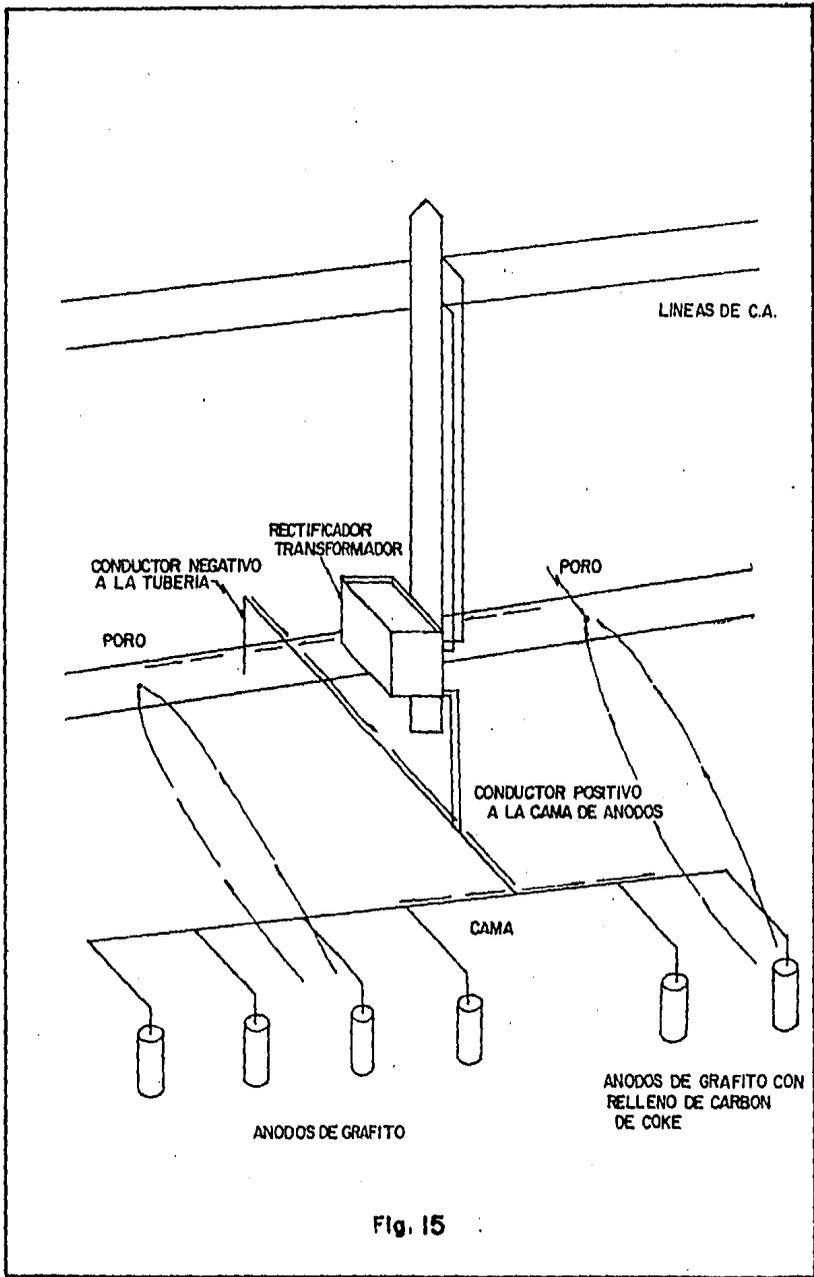


Fig. 15

Es común que un rectificador de C.A. para protección catódica --
cuenta con una serie de accesorios, de acuerdo con las necesidades -
particulares o con el criterio del diseñador.

A continuación señalaremos los principales :

Instrumentos de medición :- Un voltmetro C.D. y un ampermetro
C.D., tipo tablero, para medir en cualquier momento, la tensión de sa-
lida de la fuente y la corriente de protección catódica.

Gabinete .- Se usa un gabinete para intemperie, por lo general -
de lámina galvanizada o tropicalizada. Debe contar con candado en la
puerta y facilidades para su inspección, limpieza, cambio de partes y
mantenimiento en general, así como rejillas para su ventilación con -
protección contra insectos.

Dispositivos de protección .- Se complementan en su alimentación
con interruptores termomagnéticos, fusibles y apartarrayos.

Dispositivo anódico o de conexión a tierra.

El otro elemento fundamental en todo sistema de protección cató-
dica por corriente impresa, es el dispositivo de conexión a tierra o
dispositivo anódico. Este dispositivo comúnmente llamado cama anódi-
ca, generalmente está constituido por varios elementos llamados áno-
dos inertes.

Se les llama ánodos inertes, a diferencia de los ánodos de sa-
crificio porque están contruidos de materiales resistentes al des--

gaste electrolítico, pueden descargar al electrolito grandes cantidades de corriente, mostrando consumos de material despreciables o muy bajos. Los más comunes son :

ANODOS DE FIERRO-SILICIO

El hierro con alto contenido de silicio es un material ampliamente usado como ánodo inerte, en vista de su alta resistencia al ataque electrolítico.

Tiene la siguiente composición química :

Silicio	14.35%
Carbón	0.85%
Manganeso	0.65%
Fierro	Balance

Se usa en forma de barras cilíndricas de 2.54, 3.81, 5.08 y 7.62 cm de diámetro y longitudes de 22.82, 76.20 y 152.4 cm.

Los más empleados en trabajos de campo son de 5.08 y 7.62 cm de diámetro por 152.4 cm de longitud. Se pueden aplicar densidades de corriente hasta de 1.076 amp/dm^2 (10 amp/ft^2), aún cuando lo usual es trabajar a densidades de corriente del orden de 0.10 y 0.215 amp/dm^2 .

Los consumos de material, pueden ser de 0.227 a 0.68 kg/amp año cuando se hace un diseño adecuado.

Los ánodos de hierro-silicio, de los diámetros mencionados anteriormente, se pueden instalar en agujeros de mayor diámetro (por ejemplo 30.48 cm diam.), rellenando el espacio anular con un material conductor, como coque o grafito triturado. En esta forma el diámetro --

real del elemento anódico, viene a ser el diámetro del material triturado.

ANODOS DE GRAFITO

El grafito es el material más empleado para la instalación de dispositivos anódicos en tierra, por su magnífica conductividad y su bajo consumo en la mayor parte de los suelos. Su consumo es del orden de 0.09 a 0.22 Kg/amp año, a densidades de corriente de 0.05 a 0.1 amp/dm² de superficie anódica.

Sin embargo, este consumo se incrementa considerablemente a mayores densidades de corriente, debido a la formación de oxígeno en la superficie anódica, que reacciona con el grafito destruyéndolo. Esto se evita manteniendo densidades de corriente anódica moderadas e instalando los ánodos en agujeros de mayor diámetro y rellenando el espacio anular de coque o grafito triturado.

Los ánodos de grafito también vienen en forma cilíndrica de las dimensiones siguientes : 7.62 cm de diám. por 152.4 cm de longitud y 10.16 cm diám. por 203.2 cm long.

ANODOS DE PLATINO

El platino siendo un metal noble, se emplea como ánodo inerte para impresión de corriente de protección catódica. Su consumo es prácticamente nulo a cualquier densidad de corriente. Puesto que es muy buen conductor, puede manejar sin problema grandes cantidades de corriente.

Presenta el problema de su alto costo, lo cual hace su uso extraordinariamente restringido. Por lo general se emplea en forma de recubrimiento sobre otro metal base, como la plata o el titanio.

ANODOS DE PLOMO

El plomo se usa como material para ánodos inertes debido a que - presenta ventajas en este servicio, especialmente en agua de mar.

El plomo comercialmente puro, sufre fuerte desgaste por corriente anódica, pero aleado con 1% de plata y 6% de antimonio, presenta - una magnífica resistencia al desgaste, tolerando densidades de corriente alta.

Su consumo una vez polarizado es del orden de 0.045 a 0.09 ----- kg/amp año, en agua de mar.

Grupo de ánodos

Los ánodos antes descritos se utilizan generalmente en grupos. - Los problemas prácticos de protección catódica a base de corriente impresa, suelen requerir cantidades fuertes o cuando menos medianas de - corriente, por lo que se tienen que agrupar varios elementos en lo que se llama dispositivo de contacto a tierra o cama anódica, con el objeto de reducir la resistencia del circuito y consecuentemente la potencia consumida.

Para la instalación de ánodos de corriente impresa o ánodos inertes, es necesario tener especial cuidado en las conexiones del cable anódico a los ánodos. Todas las conexiones que finalmente quedarán enterradas o sumergidas al formar una cama anódica, representan la parte crítica del sistema, pues su potencial es fuertemente positivo con respecto al suelo y una mínima exposición del cable, dará lugar a un problema muy violento de electrólisis, en el que rápidamente el cable se corta y el ánodo queda fuera de servicio.

Las camas de ánodos se instalan procurando ubicarlas donde la resistividad sea baja y se tenga la seguridad de humedad permanente. Casi siempre son instalados en posición vertical.

Cable anódico

El cable que conecta la cama anódica con el borne positivo de la fuente de C.D., es decir, el cable anódico, debe ser de forro especial completamente impermeable.

Es muy usado en este servicio, el cable de cobre con doble forro a base de polietileno A.D. y P.V.C., para enterrado directo.

Cable catódico

El cable que conecta el polo negativo de la fuente de C.D. con la estructura por proteger, es decir, el cable catódico, no presenta problemas de electrólisis cuando está en contacto con el electrolito. De todas formas, se recomienda utilizar el mismo tipo de cable de doble forro, empleado en la conexión anódica.

Consideraciones sobre el diseño.

En un sistema de protección catódica con corriente impresa, los parámetros a determinar son los siguientes :

Intensidad de corriente de salida C.D. y voltaje de salida C.D. del rectificador de C.A.

La intensidad de corriente C.D. es un dato conocido, pues se refiere a la corriente de protección que se ha determinado por lo general mediante pruebas de requerimiento de corriente.

El voltaje C.D. de salida en el rectificador se calcula con la siguiente fórmula :

$$V = R_t I$$

Donde :

V = Voltaje C.D. de salida del rectificador, volts.

R_t = Resistencia total del circuito, ohms.

I = Intensidad de corriente requerida, amperios.

Como se puede observar, una vez determinada la corriente requerida conviene diseñar el sistema de protección catódica con una resistencia de circuito tan baja como sea posible. Esto reducirá el voltaje de salida C.D. del rectificador, disminuyendo su costo inicial y su consumo subsecuente de potencia.

La resistencia total del circuito, R_t es igual a :

$$R_t = R_c + R_e + R_g$$

Donde :

R_c = es la resistencia de los cables del circuito, la cual es muy baja y fácil de calcular conociendo el calibre y longitud de los cables.

R_e = es la resistencia de contacto a tierra de la estructura por proteger. Su valor puede obtenerse directamente en el campo.

R_g = es la resistencia del dispositivo de tierra o cama anódica y es la que contribuye más al valor de R_t .

Hay fórmulas que permiten calcular R_g cuando se conoce el número de ánodos, sus dimensiones y su espaciamiento, así como la resistividad del suelo donde serán alojados. Estas fórmulas proporcionan sólo una aproximación por lo que deberán usarse únicamente como una guía.

Las fórmulas de H.B. Dwight permiten calcular la resistencia a un sólo ánodo cilíndrico vertical u horizontal.

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

$$R_h = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L^2 + 4L \frac{S^2 + L^2}{dS} + \frac{S}{L} - \frac{S^2 + L^2}{L} - 1 \right)$$

Donde :

R_v = Resistencia de un ánodo vertical, ohms.

R_h = Resistencia de un ánodo horizontal, ohms.

ρ = Resistividad del electrolito, ohms-cm.

L = Longitud del ánodo incluyendo el backfill, cm.

d = Diámetro del ánodo con backfill, cm.

S = El doble de la profundidad del ánodo, cm.

Para un solo ánodo vertical puede utilizarse la siguiente fórmula simplificada :

$$R_v = \frac{\rho}{L} K$$

Donde :

R_v = Resistencia de un ánodo vertical, ohms.

ρ = Resistividad del electrolito, ohms-cm.

L = Longitud del ánodo, cm.

K = Función de forma, representada por longitud del ánodo/diámetro del ánodo.

K = Puede obtenerse de la tabla No. 4

TABLA No. 4

L/d	K
5	0.0140
6	0.0150
7	0.0158
8	0.0165

L/d	K
9	0.0171
10	0.0177
12	0.0186
14	0.0194
16	0.0201
18	0.0207
20	0.0213
25	0.0224
30	0.0234
35	0.0242
40	0.0249
45	0.0255
50	0.0261
55	0.0266
60	0.0270

La resistencia de un grupo de ánodos verticales, conectados en paralelo, con el mismo espaciamiento entre ellos y colocados en una misma fila, se expresa como sigue :

$$R_n = \frac{1}{n} R_v + \rho \frac{P}{S}$$

Donde :

R_n = Resistencia del grupo de ánodos verticales, con la misma separación entre ellos y colocados en línea, ohms.

n = Número de ánodos.

R_v = Resistencia de un solo ánodo vertical, ohms.

ρ = Resistividad del suelo medida con un espaciamiento entre electrodos en cm, igual a S, ohms-cm.

P = Factor de paralelismo, se obtiene de la tabla No. 5

S = Espaciamiento entre ánodos adyacentes, cm.

TABLA No. 5

n	P
2	0.00261
3	0.00289
4	0.00283
5	0.00268
6	0.00252
7	0.00237
8	0.00224
9	0.00212
10	0.00201
12	0.00182
14	0.00168
16	0.00155
18	0.00145
20	0.00135
22	0.00128
24	0.00121
26	0.00114
28	0.00109
30	0.00104

Si suponemos que las dimensiones de un ánodo vertical son de 19.32 a 30.48 cm de diámetro por 3.04 m de longitud y que las dimensiones de un ánodo horizontal son de 0.09 m² de sección transversal, 3.04 m de longitud y 1.82 m de profundidad en el electro-lito, pueden utilizarse las fórmulas siguientes :

$$R_v = \frac{\rho F}{537} ; R_h = \frac{\rho F}{483}$$

Donde :

R_v = Resistencia de un ánodo vertical o de cualquier número de ánodos verticales, ohms.

R_n = Resistencia de un ánodo horizontal o de cualquier número de ánodos horizontales ohms.

ρ = Resistividad del electrolito, ohms-cm.

F = Factor de ajuste para grupos de ánodos.

F = Se puede obtener de la tabla No. 6

NOTA : Cuando solo se utiliza un ánodo F = 1

TABLA No. 6

No. de ánodos en paralelo	Factores de ajuste-Espaciamiento de los ánodos en M				
	1.52	3.04	4.47	6.09	7.62
6	0.652	0.576	0.551	0.538	0.530
3	0.586	0.460	0.418	0.397	0.384
4	0.520	0.385	0.340	0.318	0.304
5	0.466	0.333	0.289	0.267	0.253
6	0.423	0.295	0.252	0.231	0.218
7	0.387	0.265	0.224	0.204	0.192
8	0.361	0.243	0.204	0.184	0.172
9	0.332	0.222	0.185	0.166	0.155
10	0.311	0.205	0.170	0.153	0.142
11	0.292	0.192	0.158	0.141	0.131
12	0.276	0.180	0.243	0.132	0.122
13	0.262	0.169	0.239	0.123	0.114
14	0.249	0.160	0.131	0.116	0.107
15	0.238	0.152	0.124	0.109	0.101
16	0.226	0.144	0.117	0.103	0.095
17	0.218	0.138	0.112	0.099	0.091
18	0.209	0.132	0.107	0.094	0.086
19	0.202	0.127	0.102	0.090	0.082
20	0.194	0.122	0.098	0.086	0.079
22	0.182	0.114	0.091	0.079	0.073
24	0.171	0.106	0.085	0.074	0.067
26	0.161	0.100	0.079	0.069	0.063
28	0.152	0.094	0.075	0.065	0.059
30	0.145	0.090	0.070	0.061	0.056

Fórmulas aún más simplificadas pueden utilizarse para obtener valores aproximados de la resistencia de un sólo ánodo vertical, en los siguientes casos :

$R_V = 0.002 \rho$, para ánodos de 2.12 m (6") de longitud instalados verticalmente una columna de backfill de 3.04 m de profundidad y un m de diámetro.

$R_V = 0.005 \rho$, para ánodos de 0.05 x 2.12 m instalados verticalmente, sin backfill.

$R_V = 0.006 \rho$, para ánodos de 0.04 x 2.12 m instalados verticalmente, sin backfill.

Donde :

R_V = Resistencia de un sólo ánodo vertical, ohms.

ρ = Resistividad del electrolito, ohms-cm.

Con las consideraciones sobre el diseño que han sido expuestas, el ingeniero de corrosión puede hacer un balance entre el voltaje, - C.D. del rectificador y el tamaño del dispositivo de tierra, de manera que su decisión resulte la mejor desde el punto de vista técnico y económico.

Instalación

Como en el caso de la protección catódica con ánodos galvánicos, los detalles de instalación en cada caso particular, serán desarrollados a criterio del diseñador y deberán estar contenidos en las especificaciones generales y particulares del proyecto.

CAPITULO III

DISEÑO DE LA PROTECCION CATODICA DEL COMBUSTOLEODUCTO.

3.1 ANTECEDENTES

En 1966 se puso en operación un ducto de 25.4 cm de diámetro -- y 6.5 km de longitud de la empresa Petroleos Mexicanos para transportar combustoleo entre la Refinería 18 de Marzo y la Termoeléctrica de Nonoalco.

Desde su instalación ésta tubería fue protegida con un sistema de recubrimiento a base de primario, fibra de vidrio embebido en esmalte y un simple enrollado de vidrio mate con un espesor promedio de 0.236 cm y con un sistema de protección catódica a base de ánodos galvánicos.

En este caso el recubrimiento que se ha utilizado tradicionalmente para tuberías de conducción que no manejan productos a temperaturas elevadas no soportó la temperatura de 100°C a la cual se transporta el combustoleo, por lo que su utilidad fue nula. Esto hizo que la protección catódica resultara deficiente, en cuanto había sido proyectado para un porcentaje de área desnuda mínima y no para toda la tubería como resultado de la degradación del recubrimiento, lo cual ha provocado un serio ataque de corrosión exterior a la tubería que es causa de frecuentes fugas.

Por lo anterior y como resultado del reciente análisis físico - que tiene el ducto mencionado, se decidió la construcción de un nuevo ducto con las especificaciones siguientes :

Ubicación

El trazo de la línea se muestra en el plano JH-002.

Especificaciones de la tubería

Diámetro y longitud : 25.4 cm de diámetro por 5 km de longitud

Tubería : API - STD - 5LX x - 42

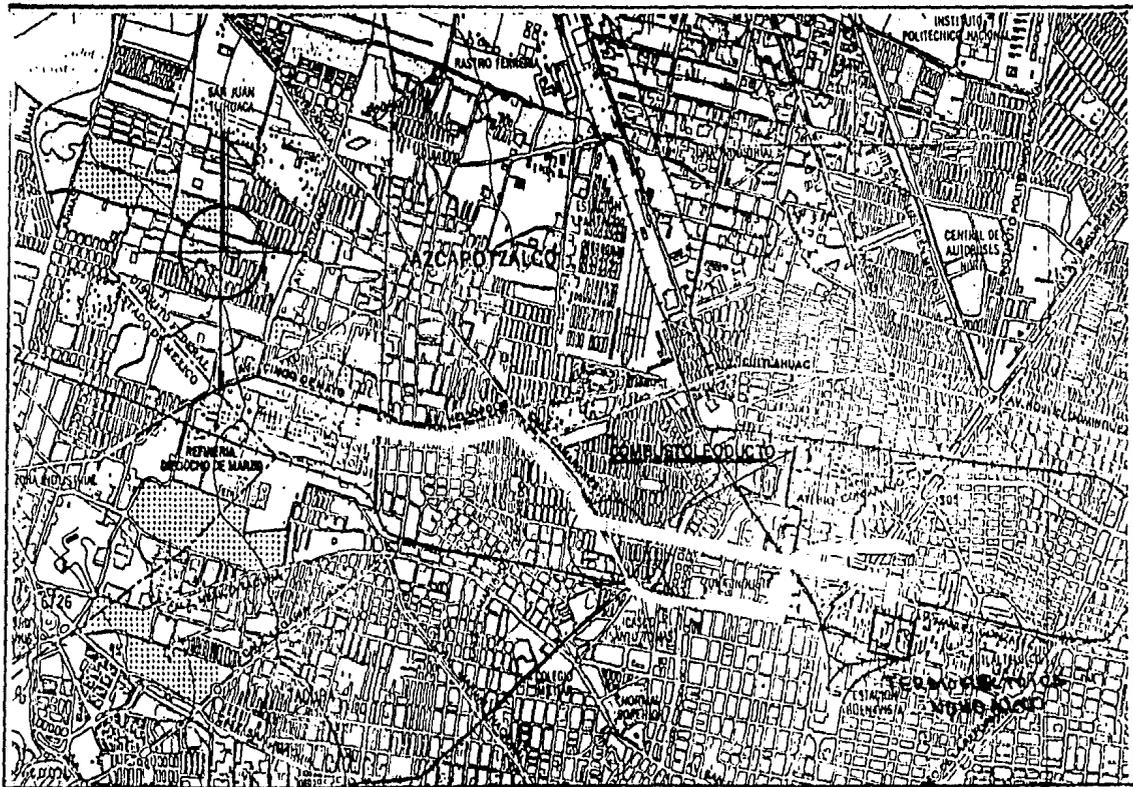
Espesor de la pared : Para una localización en clase 4, espesor de 0.556 cm.

Presión máxima de operación : 35 Kg/cm²

Capacidad de transporte : 30,000 barriles por día

Características del fluido : Combustóleo a una temperatura de 100°C

Recubrimiento anticorrosivo : Epóxico alquitrán de hulla superior a 0.193 cm de espesor de película, aplicado según se describió en el inciso 2.4.1 (c)



PLANO JH - 002

3.2 BASES DE DISEÑO

a) Para conocer la agresividad del suelo donde se aloja el combustoleoducto, deben hacerse mediciones de su resistividad cada 100m por el método de 4 electrodos con espaciamiento de 1.60 m entre electrodos.

b) Como la longitud total del combustoleoducto es de solo 5 Km y el recubrimiento que se le aplicó es el adecuado para soportar la temperatura de operación, se estima que la demanda de corriente para su protección catódica debe ser baja.

c) La vida útil del sistema de protección catódica debe ser de 10 años.

d) El potencial mínimo de protección en cualquier punto del combustoleoducto debe ser de -0.85 volts referido a una celda Cu/CuSO_4 saturado.

Por lo anterior se juzga más conveniente diseñar un sistema de protección catódica a base de ánodos de magnesio, con el cual se tendrían las ventajas adicionales que a continuación se indican :

- Mantenimiento mínimo (1 vez/año)
- Facilidad de instalación en área urbana
- Mínimos problemas de interferencia

3.3 PRUEBAS DE CAMPO

3.3.1 Medición de la resistividad del suelo. Como se expuso anteriormente para conocer la corrosividad del suelo donde se aloja el ducto, se determinó un perfil de resistividades, utilizando el aparato de nominado Vibroground. Como el ducto es enterrado a una profundidad de 1.5 m aproximadamente, el espaciamiento de las varillas fue de 1.6 m, efectuándose las mediciones cada 100 m. El perfil se muestra en la gráfica No. 2 Anexo No. 2

3.4 MEMORIA DE CALCULO

3.4.1 Cálculo del área por proteger. Obtenida la resistividad del suelo, el siguiente paso será, el cálculo del área y como la estructura por proteger es un cilindro, el área externa se calcula con la siguiente fórmula.

$$A = \pi \times D \times L$$

Donde :

A = Area de la estructura en cm^2

π = Constante = 3.1416

D = Diámetro del tubo en m

L = Longitud del tubo en m

Si :

D = 25.4 cm = 0.254 m

L = 5000 m

$$\begin{aligned} A &= 3.1416 \times 0.254 \text{ m} \times 5000 \text{ m} \\ &= 3989.83 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

3.4.2 Determinación de la demanda de corriente de protección. Para determinar la demanda de corriente de protección se tiene que recurrir a pruebas directas sobre la estructura, en virtud de que no se realizaron, se optó por establecer teóricamente la demanda de corriente por unidad de área.

Para calcular el porcentaje de área desnuda se realizaron pruebas de continuidad del recubrimiento con un aparato denominado Holliday -- Thinker lo cual nos llevó a considerar un 10%. Haciendo uso de la siguiente tabla calculamos la corriente

TABLA No. 7

ESTRUCTURA	MEDIO	CONDICIONES	ma/dm ²
Tanque	H ₂ SO ₄ caliente	Estático	5382
Tubería y tanques de almacenamiento	Suelo	Estático	0.11 - 0.32
Tuberías	Agua fresca	Fluyendo	0.54 - 1.07
Plataforma	Agua de mar	Mareas	0.64 - 0.86

Referencia : Corrosion Engineering Fontana - Greene, Ed. McGraw Hill 1967.

Entonces :

$$I_p = i \times A \times a$$

Donde :

I_p = Corriente de protección amperes

i = Densidad de corriente amperes/dm² (se obtiene de la tabla -
No. 7)

A = Area total

a = 10% del área total

Como la estructura está enterrada, de la tabla anterior decimos que por cada dm² de estructura necesitamos una densidad de corriente de 0.21 ma.

$$\begin{aligned} I_p &= 398983 \text{ dm}^2 \times 0.21 \times 0.1 \\ &= 8378.643 \text{ ma} = 8.378 \text{ amperes} \end{aligned}$$

Para el diseño se consideró una corriente adicional del 20% por degradación natural del recubrimiento durante los 10 años de vida útil del sistema de protección catódica.

$$I_p = 10.05 \text{ amperes}$$

3.4.3 Determinación del número de ánodos. Habiendo elegido la alternativa de ánodos galvánicos de magnesio, se selecciona el peso del ánodo en base a la corriente drenada, al tiempo de vida del dispositivo anódico, a la resistividad del suelo y tomando las especificaciones de los ánodos que se fabrican en nuestro país.

En la tabla No. 8 se da una distribución de ánodos de diferentes pesos en función de la resistividad del suelo para obtener una durac---ción aproximada de 10 años.

Hay dos puntos fundamentales a determinar :

- 1) El número total de puntos de drenaje de corriente.
- 2) La intensidad de corriente por aplicar en cada punto de drenaje.

El número de ánodos por punto de drenaje se obtiene dividiendo la corriente requerida entre la corriente drenada por ánodo en función de la resistividad en el punto donde se van a instalar los ánodos.

$$\text{Número de ánodos} = \frac{\text{corriente requerida}}{\text{corriente drenada por c/ánodo}}$$

TABLA No. 8

Rango de resistividades del suelo en ohms-cm	Peso de ánodo aconsejable en Kg. para una duración aproximada de 10 años. (1b)
0 - 800	22.7 (50)
800 - 1800	14.56 (32)
1800 - 3000	7.72 (17)
3000 - mayor	4.09 (9)

Referencia : Corrosión y Control de Corrosión, Herbert H. Uhlig.

De acuerdo con la tabla No. 8 y el perfil de resistividades se -- instalaron ánodos de 7.72 Kg (17 lb), los puntos más corrosivos están localizados en el siguiente kilometraje :

Km 2 + 900	2100
Km 3 + 100	2100
Km 3 + 700	2100

a) Corriente drenada por ánodo (I)

$$I = \frac{150000}{\rho}$$

Donde :

$$\rho = 2100 \text{ ohm-cm}$$

$$I = \frac{150000}{2100} (0.8) = 57.14 \text{ ma}$$

Esta corriente tambien se puede obtener de la gráfica No. 1 Anexo No. 2 conociendo el peso y la resistividad del suelo.

b) Número de ánodos

$$\text{Número de ánodos} = \frac{10.05}{0.0571} = 176$$

c) Vida útil

$$V = \frac{A \times P \times E \times Fu}{I}$$

Donde :

$$A = 0.251 \text{ amp-año/kg}$$

$$P = 7.72 \text{ Kg}$$

$$F = 0.50$$

$$Fu = 0.75$$

$$I = 0.0571 \text{ Amp}$$

$$V = \frac{0.251 \text{ amp-año/Kg} \times 7.72 \text{ Kg} \times 0.50 \times 0.75}{0.0571 \text{ Amp}} = 12.74 \text{ años}$$

3.4.4 Número de Camas. Se observó que el arreglo más adecuado para obtener el potencial más uniforme es el de un ánodo por cama.

3.4.5 Separación entre ánodos. Esta consiste en dividir la longitud total entre el número de ánodos.

$$\text{Separación entre ánodos} = \frac{\text{longitud total (m)}}{\text{No. de ánodos}}$$

$$= \frac{5000}{176} = 28.40 \text{ m}$$

3.5 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

3.5.1 Relación de materiales.

UNIDAD	CANTIDAD	DESCRIPCION
Litro	4146	<ul style="list-style-type: none"> - Pintura de alquitrán de hulla epóxico, Amercoat No. 78. - Proporción de mezcla : una -- parte de solución curadora - por 19 partes de resina en <u>vo</u> lumen. - Resistencia a la temperatura: 149°C - Punto de inflamación : 350°C - Resistencia dieléctrica : -- 9600 - 16800 volts - Color : negro
Litro	4560	Adelgaz ador Amercoat No. 10
Pieza	81	Anodos de magnesio de 7.72 Kg. Incluyendo el backfill.
Pieza	10	Postes de registro según plano JH-003 para medición de potenciales

3.6 ESPECIFICACIONES DE CONSTRUCCION

3.6.1 Instalación del ánodo. La colocación y conexión del ánodo - se muestra en el plano JH-001

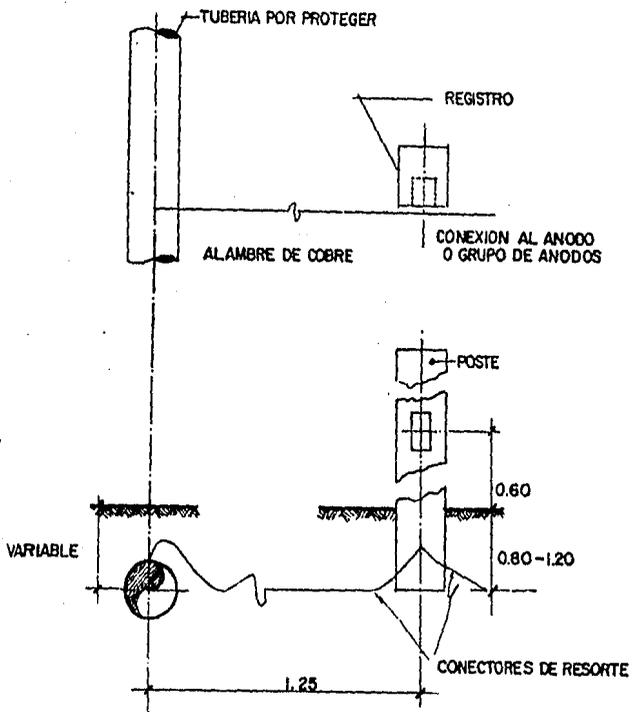
3.6.2 Postes de registro. Para poder efectuar las mediciones del potencial tubo-suelo y los flujos de corriente, se instala un poste

de registro y anojonamiento, estos postes deben instalarse antes de efectuar el estudio de protección de la estructura, ya que se tendría mayor seguridad en el levantamiento del potencial al efectuar la prueba de corriente.

Los postes serán de concreto reforzado con varillas. La instalación se muestra en el plano JH-003

3.7 CONDICIONES ECONOMICAS :

No.	Cantidad	Unidad	Descripción	P. Unitario	P. Total
1	5	Km	Suministro y aplicación de pintura de alquitrán de hulla; incluye: preparación de la mezcla, herramienta, material y mano de obra.	853,780.00	4'268,900.00
2	176	Pieza	Suministro e instalación de ánodos de magnesio de 7.72 Kgr. incluye backfill herramienta, material y mano de obra.	8,234.40	1'449.254.40
3	10	Pieza	Suministro e instalación de postes tipo "R" según plano JH-003 para medición de potencial, incluye: herramienta, material y mano de obra.	9,445.12	94,451.20
				Total	\$ 5'812.605.60



INSTALACION DE POSTE DE AMOJAMIENTO
Y REGISTRO PARA PROTECCION CATORICA

PLANO JH-003

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se expuso en los capítulos anteriores, la corrosión de los metales, se debe principalmente a fenómenos electroquímicos, siendo este tipo de corrosión el más generalizado en estructuras enterradas. El proceso consiste en la disolución del metal en el medio que lo rodea.

En este trabajo se encontró que la corrosión aumenta con la temperatura de superficie de la estructura y se puede minimizar mediante el uso de recubrimientos que actúan como aislantes, creando una barrera entre la estructura y el medio que la rodea, por lo que para prevenir totalmente la corrosión, se utiliza el sistema de protección catódica, la cual se basa en el hecho de convertir la estructura por proteger en el cátodo de una celda.

Es importante la elección adecuada del recubrimiento que se va a utilizar en el diseño, puesto que si no soporta la temperatura de operación del ducto, tendremos un porcentaje de área desnuda mayor del que se tomó para el diseño y como consecuencia un sistema de protección catódica ineficiente.

La corrosión trae como consecuencia pérdida directa del metal, debilitamiento de estructuras y mecanismos que ocasionan inutilidad temporal o definitiva del equipo, pérdidas de productos en el caso de conducción y almacenamiento de hidrocarburos, suspensiones temporales en los ingresos de las industrias al suspender el servicio, asimismo ocasiona otros factores como : accidentes, zonas insalubres, incomodidades a usuarios y trabajadores con la consiguiente reducción de eficiencia en las labores.

Desde el punto de vista económico, reporta grandes beneficios, yá que el costo es bajo comparado con el de la estructura que protege.

Por todo lo aquí expuesto es conveniente y recomendable instalar este tipo de protección a estructuras enterradas que estén expuestas a sufrir los efectos de la corrosión.

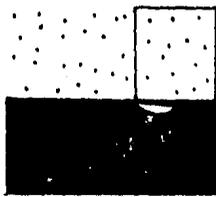
Anexo No. 1



CORROSION UNIFORME



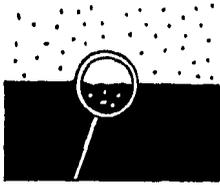
CORROSION GALVANICA



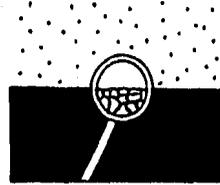
CORROSION POR CAVIDAD



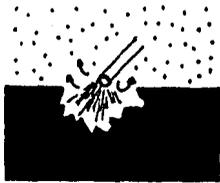
CORROSION POR PICADURA



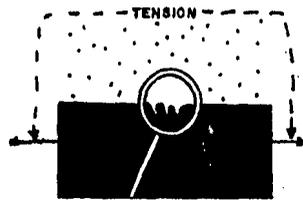
CORROSION INTERGRANULAR



CORROSION POR ATAQUE
SELECTIVO

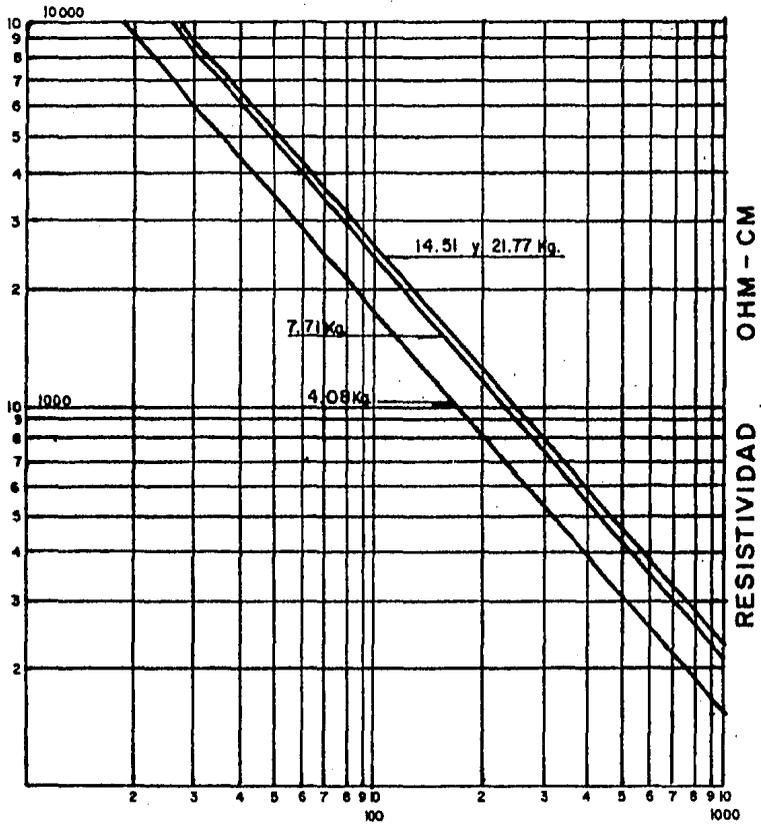


CORROSION POR EROSION



CORROSION BAJA-TENSION

Anexo No. 2



CORRIENTE DRENADA POR AÑO (m.a.)

GRAFICA No. 1

RESISTIVIDAD OHMS-CM.

K

I

L

O

M

E

T

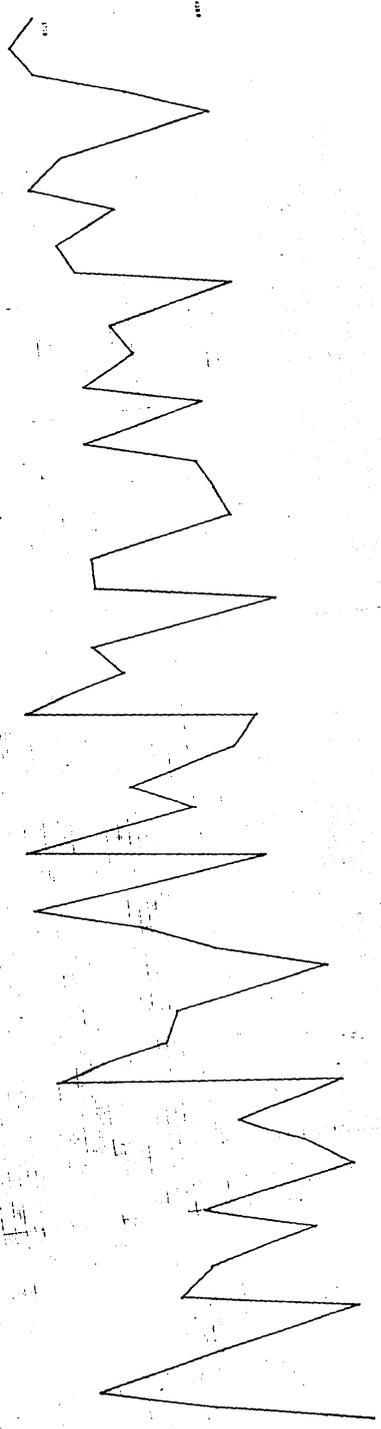
R

A

J

E

GRAFICA Nº 2



CAPITULO V

Bibliografía

- M. G. Fontana, N.D. Greene. Corrosion Engineering. McGraw-Hill Book Company, 1967

- Ings. H. Bañuelos C., Manuel F. Guerrero. Protección Catódica Subdirección de Tecnología de la Explotación División de Corrosión, 1977

- Norman Hackerman. Nace Basic Corrosion Course. Houston, 1970

- K. P. Fisher, P.S. Soherm and A. H. Hansen. Hot Risers in the North Sea. Characteristics of the steel in cold sea water OTC - 4566 May 1983

- A. W. Peabody. Control of Pipeline Corrosion. Nace 1967

- Corrosion and Corrosion Control Second Edition John Wiley and Sons. U.S.A. 1971

- Norma B 1 - 1 Aplicación y uso de protección catódica en tuberías enterradas y sumergidas . Petroleos Mexicanos abril 1974.