

98

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“ANÁLISIS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA DEL
CIRCUITO METROPOLITANO DE LA CIUDAD DE
MÉXICO, DIÁMETRO VARIABLE, EN EL RAMAL
DE GASODUCTO DE 6” D.N. PERIFÉRICO – AV.
CANAL DE MIRAMONTES.”**

293351

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
MARIO ALBERTO UGALDE SALAS**

**ASESOR:
M. en I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ**



CUAUTITLAN IZCALLI. EDO. DE MEX. FEBRERO 2001



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi madre, María Elena Salas Domínguez :

Como un pequeño homenaje al gran apoyo, paciencia y sobre todo al gran amor que me has brindado. No hay palabras suficientes para expresar la admiración y el cariño que te tengo y agradecerte el esfuerzo, entusiasmo y la vida misma que has dado por tus hijos. Dios te bendiga.

**A mi padre, José Ugalde Angeles
y mis hermanos, Norma Elena y Arturo :**

Por formar una gran familia.

A mi Sandy :

Por esa ternura con la que día a día adornas y embelleces mis sentidos.

Por esa amorosa y graciosa compañía que trae consigo interminables actos de apoyo, cariño y comprensión.

Gracias por caminar conmigo.

¡Ojalá la vida me alcance para compensarlo!.

A mis Asesores:

M en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

Ing. Julio César Sánchez.

Por ser grandes Ingenieros y sobre todo grandes amigos.

A mis amigos:

Sara Ordóñez.

Verónica Bautista.

Margarita Rangel.

Xavier Palomas Molina.

Juan Andrade.

Juan Domínguez.

Francisco Ávalos.

Luis Domínguez.

Eduardo Carballido.

Javier Soto.

Fernando Castillo.

Carlos León.

CONTENIDO

Introducción.	1
Objetivos.	4

CAPITULO I GENERALIDADES.

1.1.- Antecedentes.	5
1.2.- Diseño de líneas enterradas.	7
1.3.- Planteamiento del problema.	14
1.3.1.- Características y especificaciones del ducto.	18

CAPITULO II TIPOS DE CORROSIÓN MÁS COMUNES.

2.1.- Principios de corrosión.	21
2.2.- Polarización.	25
2.3.- Serie electroquímica.	28
2.4.- Tipos de corrosión.	32
2.4.1.-Corrosión galvánica.	33
2.4.2.-Corrosión por picadura.	33
2.4.3.-Corrosión en grietas o hendiduras.	34
2.4.4.-Otros tipos de corrosión.	35

CAPITULO III MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN.

3.1.- Recubrimientos anticorrosivos.	37
3.1.1.- Tipos de recubrimientos.	39
3.2.- Protección mecánica.	40

3.3.- Control de la corrosión usando ánodos de magnesio. -----	44
3.4.- Consideraciones durante la instalación de ánodos. -----	51

CAPITULO IV

MÉTODOS DE PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN.

4.1.- Toma de resistividades por el método Wenner (4 electrodos).-----	56
4.2.- Análisis del suelo (Ph). -----	60
4.3.- Toma de potenciales naturales. -----	64
4.4.- Toma de potenciales tubo - suelo. -----	68

CAPITULO V

DISEÑO DE LAS TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS.

5.1.- Protección catódica con ánodos de magnesio. -----	77
---	----

CAPITULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS.

6.1.- Comparación de costos. -----	86
6.2.- La economía de un buen mantenimiento. -----	90
Conclusiones. -----	93
Bibliografía. -----	96
Anexo I. -----	97

INTRODUCCIÓN.

En nuestro país la exploración y explotación de hidrocarburos, así como la producción, almacenamiento, distribución y comercialización de productos petrolíferos y petroleros constituye la empresa más grande de México. Con base en el nivel de reservas y su capacidad de extracción se encuentra entre las cinco compañías más importantes a nivel mundial.

La distribución de actividades se dividen en cuatro grandes organismos:

Exploración y producción.- Tiene a su cargo la exploración y explotación de petróleo y gas natural.

Refinación.- Produce, distribuye y comercializa combustibles y demás productos petrolíferos.

Gas y Petroquímica Básica.- Procesa el gas natural y los líquidos del gas natural, distribuye y comercializa gas natural y gas LP, produce y comercializa productos petroquímicos básicos.

Petroquímica.- Elabora, distribuye y comercializa una amplia gama de productos petroquímicos secundarios.

La infraestructura requerida para realizar estas actividades comprende plataformas marinas de perforación y extracción ubicadas en los litorales del Golfo, plantas de refinación como las ubicadas en Cadereyta, Madero, Tula y Salamanca, pozos de desarrollo y exploración, terminales de distribución, complejos procesadores de gas ubicados en gran parte del territorio nacional siendo los más importantes los ubicados en Rosarito,

Cd. Juárez, Topolobampo, Cd. Madero, Zapopan, Tepeji del Rio, Tula, San Juan Ixhuantepec, Puebla, Venta de Carpio, Salina Cruz, Cd. Pemex, Area Coatzacoalcos, Poza Rica, Veracruz, Reynosa, Madero, etc.

Toda esta infraestructura se encuentra interconectada a través de una extensa red de tuberías o ductos instalados en todo lo largo del territorio nacional que sirven como líneas de intercomunicación entre los diferentes centros. Esta red de tuberías forma parte esencial dentro de los diferentes sistemas de producción y transporte, y está comprendido por miles de kilómetros de longitud de tuberías principalmente de acero de diferentes diámetros que se encuentran instaladas en una gran variedad de suelos y atmósferas como son suelos secos y húmedos, pantanos, cruces con ríos, zonas desérticas, ciudades, etc. Los productos que se transportan a través de ductos son principalmente diesel, gasolina, turbosina, combustóleo, gas licuado, gas natural seco, etano, propano, butano, azufre, etc.

Después de muchos años, la experiencia adquirida como sector petrolero confirma que los ductos son y seguirán siendo el medio más confiable, eficiente y económico para el envío masivo de hidrocarburos. De lo anterior se desprende la importancia de operar y mantener eficientes los sistemas de ductos; su uso y conservación demandan el mayor esfuerzo y obligación.

Dentro de los problemas que se presentan en los derechos de vía de los ductos y que afectan de alguna manera su operación y mantenimiento se encuentran las invasiones de asentamientos humanos irregulares y la construcción cercana de otras estructuras, principalmente en ciudades.

Aunado a los problemas anteriores, la corrosión es otro problema que se encuentra en este tipo de estructuras que se encuentran expuestas a diferentes medios corrosivos y que se ven afectadas por éste fenómeno acortando su vida de operación. Es por lo tanto primordial el estudio de este fenómeno y la implementación de técnicas y métodos que permitan proteger las estructuras del medio alargando la vida útil de las mismas y redundando en beneficios económicos que resultan del cambio parcial o total de estructuras.

Durante el desarrollo de este trabajo se estudiará el fenómeno de corrosión, las causas que lo provocan y la manera en que se manifiesta en los ductos de distribución. Se mencionan los métodos que actualmente se utilizan para determinar la agresividad del medio corrosivo y las alternativas a utilizar para proteger la estructura del medio a través de una protección mecánica reforzada por un sistema de protección catódica a base de ánodos de magnesio.

El estudio de este sistema se ejemplifica por medio de una reubicación de un ramal de tubería de distribución de gas natural de 6" de diámetro nominal (D.N)., el cual forma parte del Circuito Metropolitano de la Ciudad de México, el cual tuvo que ser desviado por motivo de la construcción de un puente vehicular conocido como Distribuidor Glorieta de Vaqueritos al sur de la Ciudad de México.

OBJETIVOS.

- Definir el fenómeno de corrosión.
- Conocer los tipos de corrosión más comunes que se presentan en ductos de transporte de productos de Petróleos Mexicanos.
- Conocer los métodos de control de corrosión más usuales en tuberías de transporte de hidrocarburos.
- Describir los diferentes recubrimientos que se utilizan para la protección de tuberías y el reforzamiento del sistema a través de la instalación de ánodos de magnesio.
- Describir y analizar la protección catódica a base de ánodos de magnesio en un ramal de tubería de 6" D.N., desviado de su trayectoria original en 262.00 metros debido a la construcción de un Distribuidor vial.

CAPITULO I GENERALIDADES.

1.1.- Antecedentes.

En el transporte de productos hidrocarburos, al igual que en muchas otras industrias, cuyas instalaciones están principalmente constituidas por estructuras metálicas se presenta el fenómeno de corrosión. En estas líneas de transporte de Petróleos Mexicanos se utilizan principalmente tuberías de acero enterradas las cuales se encuentran sometidas a diferentes medios corrosivos que atacan directamente la integridad de las mismas. El acero es el principal material que se utiliza para la fabricación de ductos, aunque algunos de ellos se fabrican utilizando materiales poliméricos. Como sabemos, el acero es una aleación de hierro – carbono con un contenido de 0.02 a 2.11%. Las aleaciones a base de hierro se dividen en tres grupos principales como acero al carbono y de baja aleación, aceros de alta aleación y fundición de hierro gris o blanco, hierro dúctil, hierro maleable.

Al hierro se le agrega carbono y otros elementos para obtener los diferentes tipos de acero que conocemos. En todos los aceros al carbono se encuentran pequeñas cantidades de ciertos elementos residuales contenidos inevitablemente en la materia prima que no se especifican como cobre, níquel, molibdeno, cromo, etc. Estos elementos se consideran imprevistos y normalmente no se reportan. Se considera que el acero es aleado cuando excede el límite del porcentaje de contenido de uno ó más de los elementos de aleación siguiente, manganeso 1.65%, silicio 0.60%, cobre 0.60%, o cuando se especifique o requiera una

amplitud definida o una cantidad mínima de cualquiera de los elementos siguientes pero dentro de las limitaciones reconocidas del campo de fabricación de los aceros aleados, aluminio, boro, cromo (más de 3.99%), cobalto, molibdeno, níquel, titanio, tungsteno, vanadio, zirconio, o cualquiera otro de los elementos agregados para obtener los efectos de aleación deseados, como el acero inoxidable el cual se obtiene agregando cromo, de igual manera se agregan otros elementos para obtener ciertas propiedades específicas como ductilidad y maleabilidad.

Cuando un elemento de acero se encuentra en la intemperie, se aprecia la formación de una capa o película de óxido o herrumbre, indicio de que el material está sufriendo los efectos de la corrosión producida por la combinación del oxígeno de la humedad del aire que tiende a producir óxidos de hierro que es el estado natural de donde se obtuvo. El hierro por lo tanto tiende a volver a su estado en que se encuentra en la naturaleza, para lo cual se disuelve en el medio que lo rodea, este es el fenómeno denominado corrosión.

La corrosión es un fenómeno que se presenta en los materiales metálicos, cerámicos y plásticos y es producido por el ataque de diferentes atmósferas y soluciones produciendo fallas prematuras durante el servicio de elementos o componentes de mecanismos y estructuras, lo cual ocasiona considerables pérdidas económicas ocasionadas por la restitución de las mismas.

El problema de la corrosión es objeto de constante estudio y desarrollo de nuevas técnicas que ayudan a disminuir los efectos causados sobre los

materiales expuestos lográndose de ésta manera una mayor confiabilidad y duración además de disminuir costos de reparaciones y mantenimiento.

Debido a que el fenómeno de corrosión es de naturaleza electroquímica ligado a corrientes eléctricas, conviene estudiar métodos que controlan directamente las corrientes involucradas controlándose de esta manera la corrosión del metal. Uno de los métodos más efectivos y económicos para controlar la corrosión de los metales enterrados o sumergidos en agua consiste en obligar a dichos metales a actuar como cátodo, razón por la cual se conoce a este sistema como protección catódica.

1.2.- Diseño de líneas enterradas.

Se entiende por línea o ducto a una tubería que conduce productos, principalmente líquidos y gaseosos, mezclas de gases combustibles apropiados para uso industrial o doméstico mediante la aplicación de un gradiente de presión entre sus extremos.

El diseño de tuberías representa gran importancia dentro de un sistema de explotación, transporte y distribución de gas, dando inicio en los pozos ó trampas de extracción y finalizando en la entrega y consumo ya sea industrial ó doméstico. El proceso comprende la interconexión de sistemas diversos como son las plantas de tratamiento, estaciones de compresión, estaciones de regulación de presión ubicadas en las entradas de las ciudades, dispositivos de protección de sobrepresiones, estaciones reguladoras y de distribución, etc.

Estos sistemas son divididos de acuerdo a las características de su funcionamiento como sistemas de baja presión en la cual la presión de

las líneas troncales y las de servicio es substancialmente la misma que la de entrega a los dispositivos de los consumidores, no requiriéndose reguladores de presión individuales como el caso de los sistemas de distribución de alta presión.

En la fabricación de líneas para conducir hidrocarburos se emplea principalmente el acero bajo las especificaciones ASTM A53 (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales), API 5L y API 5LX y, en su desarrollo se protegen del ambiente alojándolas en cepas que posteriormente son cubiertas dando origen a la denominación de líneas enterradas.

El terreno es un electrólito, ya que la humedad del mismo contiene agua y sales disueltas que forman una solución capaz de conducir un flujo de electrones que permite y favorece el proceso de corrosión, por lo que las líneas enterradas tienden a disolverse en el medio que las rodea, la corrosión se manifiesta en el punto donde el flujo de electrones fluye de la tubería al suelo. En caso contrario, en el punto donde la tubería acepta electrones la tubería funciona como cátodo y no se corroe.

En algunos casos las estructuras de acero pueden permanecer en buenas condiciones expuestas a suelos o agua por algunos años. Sin embargo, en otros casos, las fallas que se presentan por corrosión han ocurrido en tan solo tres años. Actualmente se conoce que la cantidad de metal que se pierde por efectos de corrosión es directamente proporcional a la cantidad de flujo de corriente. Un ampere de corriente directa producido en el medio electrolítico puede remover aproximadamente 20 libras de acero en un año. Esta cantidad de material removido depende del material que se encuentra inmerso y del potencial

que se genera, ya que este determinará la densidad de corrosión. Afortunadamente es difícil encontrar suelos con estas características de corriente, en la mayoría de los casos se trabaja con corrientes del orden de miliamperes, corriente que a pesar de ser de un valor relativamente bajo, no debe ser menospreciada ya que el flujo constante de electrones provoca la continuidad del proceso corrosivo.

Para reducir los efectos de la agresión del medio ambiente, las tuberías reciben un tratamiento previo a ser enterradas que permiten aislar a la estructura del medio corrosivo. Sin embargo aún el mejor recubrimiento presenta pequeñas discontinuidades que provocan puntos de corrosión, una forma de controlar la corrosión en estos puntos es el empleo de un sistema complementario basado en los principios de protección catódica, entre los que se pueden mencionar:

- a) Anodos de sacrificio.
- b) Corriente impresa.
- c) Combinación de los dos anteriores.

Los ánodos de sacrificio, también llamados ánodos galvánicos, se oxidan descargando corriente hacia la tubería por proteger. La corriente disponible por los ánodos de sacrificio está limitada a pequeñas cantidades, por lo que su uso es el adecuado cuando los requerimientos de corriente son pequeños. En la figura 1.1. se muestran los componentes básicos del sistema de protección catódica a base de ánodos de sacrificio.

La corriente impresa utiliza una fuente de corriente externa para imprimir la corriente de protección, entre la tubería y una cama de ánodos. La fuente de corriente más común es un rectificador, que convierte la corriente alterna de los sistemas de distribución en corriente directa de bajo voltaje. El terminal positivo de la fuente de corriente directa se conecta al ánodo y el terminal negativo a la estructura a proteger, de éste modo la corriente fluye del ánodo a través del electrólito a la estructura. Figura 1.2.

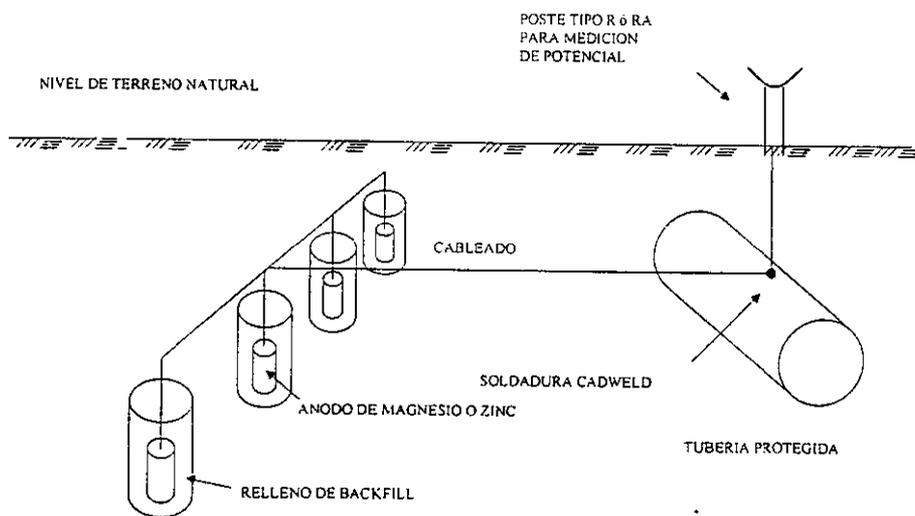


Figura 1.1 Protección catódica de un ducto a través de ánodos de sacrificio.

En suelos y aguas de resistividad elevada, el voltaje aplicado debe ser más alto que en medios de baja resistividad. Los ánodos para corriente

impresa pueden ser de grafito, hierro fundido con alto contenido de silicio, plomo – plata, platino, aceros, etc.

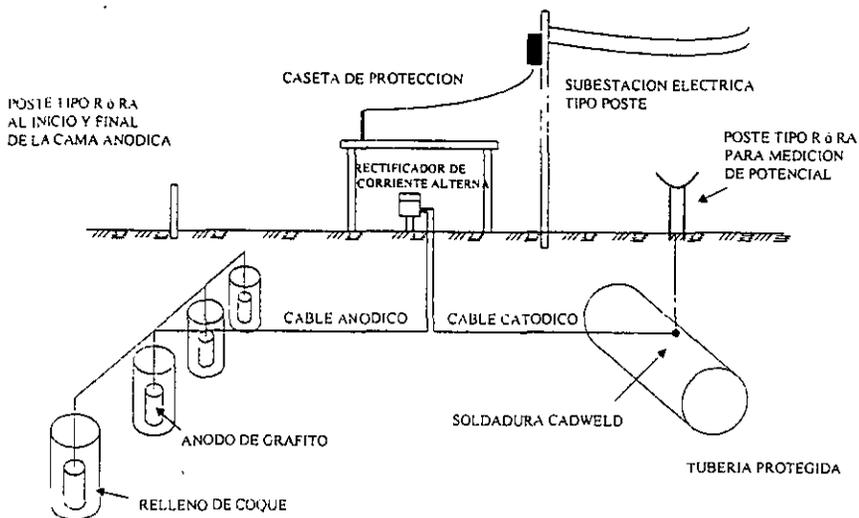


Figura 1.2 Protección catódica por aplicación de corriente impresa.

La protección catódica no necesariamente elimina la corrosión. Sin embargo, la corrosión se remueve de la estructura y se concentra en los puntos conocidos y localizados como son los ánodos, por lo que resulta en un monitoreo y un reemplazo mas fácil. La forma de determinar si el sistema de protección catódica opera en forma adecuada es mediante la toma del potencial de protección a lo largo de la tubería. Si los valores de protección medido cumplen con los criterios establecidos por la norma, la tubería se encuentra protegida.

Estos sistemas se analizan de acuerdo a la permisibilidad de diferentes factores como es la disponibilidad de corriente eléctrica para la instalación de rectificadores, el estado del recubrimiento, accesibilidad para mantenimiento y la longitud a proteger. De igual manera se deberán de realizar pruebas de campo que se orientan a determinar las zonas de los ductos con mayor actividad del fenómeno de corrosión. Para determinar estas zonas, se hacen levantamientos de perfil de potenciales y de resistividad, siendo los puntos más activos, los que corresponden a valores más negativos de potencial y de menor resistividad.

En el diseño de un sistema de protección catódica para estructuras metálicas enterradas además debe de considerarse:

- Un diseño económico en su instalación, operación y mantenimiento.
- La selección y especificación de materiales y procedimientos de instalación que aseguren una buena operación del sistema durante el tiempo para el cual es diseñado.
- Un diseño que evite excesiva corriente de protección, la cual puede causar efectos nocivos en la estructura metálica por proteger, en el recubrimiento ó en estructuras metálicas enterradas vecinas.

Conviene mencionar que la existencia de estructuras de acero aldañas representa un factor adverso que debe ser considerado en la elección del sistema de protección. El sistema de protección catódica a base de corriente impresa utiliza valores relativamente altos de voltaje y corriente

que permiten proteger grandes longitudes de tubería. Sin embargo su instalación requiere un área libre de estructuras vecinas que puedan resultar afectadas por la cantidad de electrones existentes en la zona de influencia generada por la cama anódica del sistema de protección. Los potenciales positivos generados en el suelo forzarán a la estructura alemana a absorber electrones.

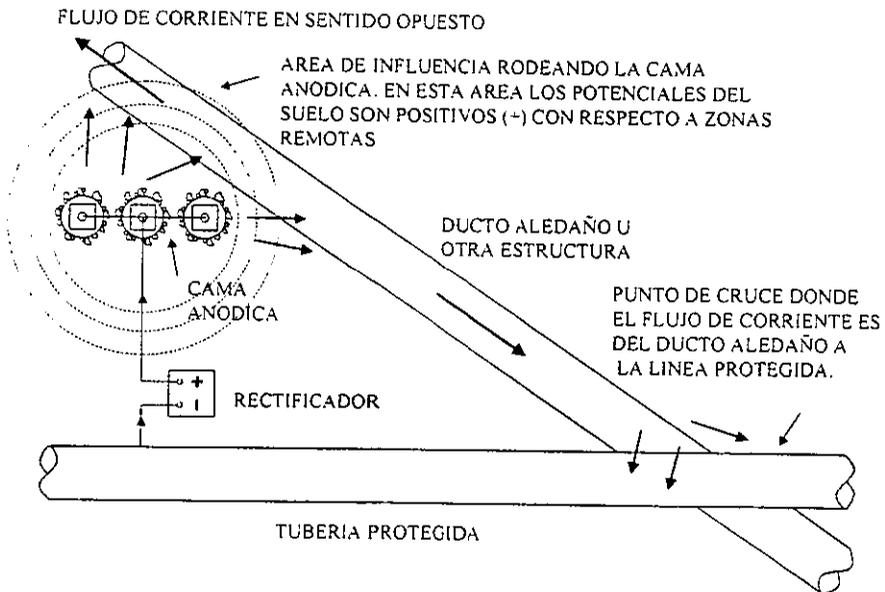


Figura 1.3 Daño a estructuras aledañas por aplicación de corriente impresa.

Estos electrones posteriormente necesitan regresar de alguna forma para completar el circuito en el polo negativo del rectificador. En la figura 1.3.

se observa la trayectoria que tienen que seguir los electrones en la tubería aledaña en el punto donde se cruzan los dos ductos. En este punto los electrones dejan la tubería aledaña y se presenta el fenómeno de corrosión, mientras tanto, los electrones son absorbidos por la tubería protegida y regresan al rectificador.

Generalmente una pequeña cantidad de corriente fluye en dirección opuesta en la tubería aledaña. Esta corriente dejará el ducto en alguna zona donde la resistividad del suelo sea baja provocando a su vez daño en la estructura en ese punto. La agresividad del proceso corrosivo en este ducto aledaño será función del potencial suministrado por el sistema.

1.3.- Planteamiento del problema.

En el desarrollo de este trabajo se describe una aplicación del sistema de protección catódica para la protección del ramal de 6" D.N. de un gasoducto, el cual fué reubicado en una trayectoria aproximada de 262 metros, debido a la construcción de un Distribuidor vial conocido como Puente vehicular Periférico - Miramontes - Avenida Prolongación División del Norte, al sur de la Ciudad de México.

Este ramal es una derivación del circuito metropolitano de la Ciudad de México, el cual abastece zonas industriales y habitacionales, entre ellas la Unidad Habitacional Narciso Mendoza al sur de la ciudad. El diámetro es variable en diferentes longitudes, siendo de 10 pulgadas el existente en Avenida Periférico Sur y 6 pulgadas en Av. Canal de Miramontes. Lo anterior se puede observar en el plano número 1:001 "Estado original de la zona y ducto de gas" Anexo I. En éste plano se observa la trayectoria existente del gasoducto de 10" D.N., y el ramal de tubería de 6" D.N.

Es importante mencionar que las condiciones de crecimiento poblacional desmedido, demanda el crecimiento de servicios básicos de vialidades, servicios de agua, luz, teléfono, drenaje, ductos de hidrocarburos tanto líquidos como gaseosos, etc. Debido a lo anterior y la creación de una solución referente a vialidad se crea o da origen a la afectación de las instalaciones mencionadas.

Durante el desarrollo del proyecto del distribuidor vial se ha tratado de adecuar la infraestructura existente de la zona con la construcción del puente, por lo que se han realizado modificaciones substanciales en geometría de cimentaciones, trabes prefabricadas, así como reubicación de pilotes para evitar una afectación mayor a instalaciones principales (colectores, acueductos, líneas de agua potable y tuberías de Petróleos Mexicanos), de diámetros variables cuyos costos y tiempos de desvío repercuten seriamente en el costo global del proyecto.

En el plano número 1:002 "Proyecto del distribuidor y sus interferencias." Anexo I. Se observa el proyecto general de trazo del distribuidor y las afectaciones más importantes, principalmente colectores de diámetros considerables, así como otras líneas de agua potable y agua tratada principalmente de 12" D.N.

En el plano número 1:003 "Proyecto de reubicación de gasoducto 6" D.N.". Anexo I. Se observa la trayectoria de proyecto del gasoducto de 6 pulgadas de diámetro nominal. En el plano se observa el desarrollo de la trayectoria que debe tener el gasoducto a fin de adaptarse a las condiciones establecidas por el proyecto integral, respetando el derecho

de vía de otras instalaciones, así como contando con la accesibilidad necesaria para la realización de cualquier mantenimiento.

Sin embargo, y a pesar de las modificaciones al proyecto, se encuentran las siguientes limitantes:

- Algunas cimentaciones se ubican sobre la trayectoria existente del gasoducto, lo que implica una afectación al derecho de vía, dejando la tubería en zonas de difícil acceso para la realización del mantenimiento requerido.
- La trayectoria existente en Av. Canal de Miramontes ubicada en el camellón, se convierte en vialidad exponiendo al ducto a cargas y esfuerzos que actuarían directamente sobre la línea.
- La existencia de una caja deflectora correspondiente a los colectores de alivio de 2.10 y 1.52 mts. de diámetro condiciona la nueva trayectoria.
- Deberá incluirse dentro del cálculo de la protección catódica el tramo existente restante del ducto de 6" a fin de proteger el tramo completo y no únicamente el tramo nuevo evitando la formación de celdas galvánicas por unión de tubos de diferentes edades.
- Deberá aislarse el ramal completo de tubería de 6" D.N., mediante la instalación de dos juntas aislantes tipo monoblock colocadas en la caja de válvulas ubicada en Av. Periférico Sur y la estación reductora de presión y distribuidora de la Unidad Narciso Mendoza. Lo anterior a fin de delimitar la zona de influencia del sistema de protección catódica.

Se considera que la nueva trayectoria está en función de la ubicación de cimentaciones y ductos de otras instalaciones existentes cuyo derecho de vía deberá ser respetado, además la protección de la tubería en los cruces vehiculares debe ser la apropiada a través de galerías de concreto armado con losas removibles para tener un fácil acceso a la tubería. La resistencia del concreto a la compresión será de 250 kg/cm^2 y deberá ser rellena con arena, este tipo de protección garantiza que la tubería no sufrirá la transmisión de esfuerzos por cargas aplicadas directamente sobre la misma y debidas al tránsito vehicular. Figura 1.4.

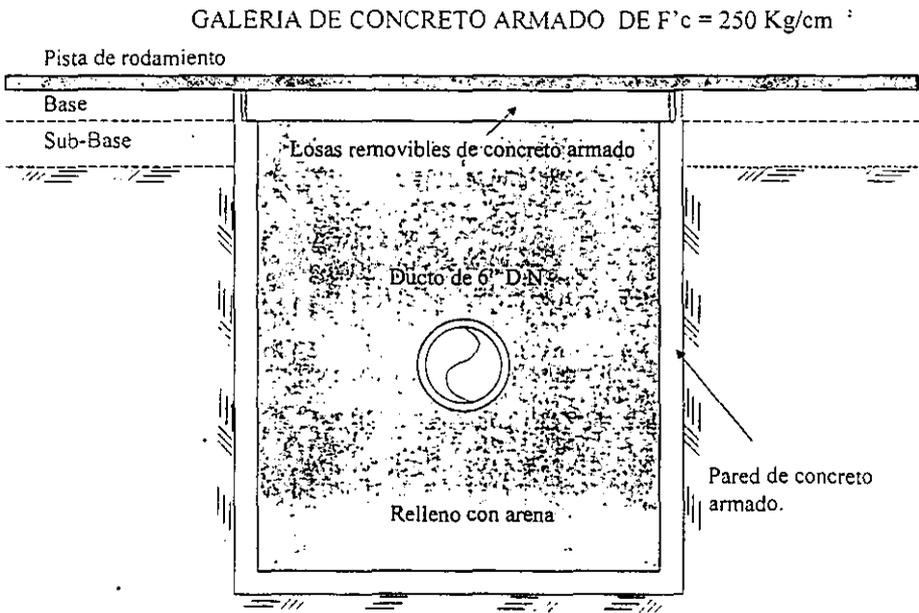


Figura 1.4 Galería de concreto para protección de ducto en cruces vehiculares.

El tiempo de ejecución de los trabajos está en función del programa general de la obra, ya que se considera esta actividad como crítica y fundamental para la realización del proyecto.

Considerando las condiciones prevalecientes en la zona donde se realiza la reubicación del gasoducto, infraestructura vial y de servicios así como zonas habitacionales, no es necesario la utilización de un sistema a base de corriente impresa debido a que el tramo en estudio es relativamente corto y el requerimiento de corriente se satisface con la corriente proporcionada con ánodos de sacrificio. De igual manera no es conveniente la utilización de sistemas de corriente impresa en zonas urbanas debido a que las corrientes que genera pueden afectar a las estructuras aledañas. Debido a lo anterior se opta por la utilización de un sistema de protección catódica a base de ánodos de sacrificio. Este sistema tiene la característica de generar bajos potenciales de protección que no representan daño mayor a las estructuras aledañas.

1.3.1.- Características y especificaciones del ducto.

Debido al tipo de servicio y las condiciones de operación que normalmente se encuentran en ductos de transporte de hidrocarburos, estos deben cumplir ciertas especificaciones las cuales son ordenadas por la American Petroleum Institute.

En la tabla 1.1 se muestran las características generales de la tubería a utilizar.

Tabla 1.1 Características generales de la tubería.

Tipo de tubo	API 5L
Especificación	ASTM A 106
Producto a manejar	Gas natural
Longitud del tramo afectado	261 .00 m.
Diámetro nominal del ducto	6"
Espesor de la pared	.280"
Grado de acero	B
Longitud de cada tramo	11.00 - 13.50 m.
Acabado de la superficie	Barnizado
Presión de operación	15 kg/cm ²
Presión de prueba en fábrica en 5 segundos.	111 kg/cm ²
Presión de prueba en campo en 24 horas.	50 kg/cm ²

De igual manera en la tabla 1.2 se muestran las propiedades mecánicas del ducto y en la tabla 1.3 el análisis químico con los rangos permitidos y el muestreado en la tubería de acero a utilizar.

Tabla 1.2 Propiedades mecánicas del ducto.

	mínimo	Muestreado
Tensión a la fluencia (kg/cm ²)	24.60	34.70
Resistencia longitudinal (kg/cm ²)	42.40	51.80
% de alargamiento en 2"	24%	36%

Tabla 1.3. Análisis químico de la tubería.

Elemento	% mínimo	% máximo	% muestreado
C		0.300	0.188
Mn	0.29	1.06	0.70
Si	0.10		0.29
P		0.035	0.006
S		0.035	0.002
Mo		0.150	0.044
Cr		0.40	0.11
V		0.80	0.00
Ni		0.40	0.07
Cu		0.40	0.159
Sn			0.009
Al			0.20

CAPITULO II

TIPOS DE CORROSION MAS COMUNES.

2.1.- Principios de corrosión.

Los materiales metálicos, son susceptibles de ser degradados por el medio que los rodea, a este fenómeno lo conocemos como corrosión. La corrosión en metales es un fenómeno de naturaleza electroquímica que se manifiesta como el deterioro del material que está en contacto con un medio agresivo, el cual puede ser agua marina, atmósferas y suelos húmedos principalmente. La intensidad de corrosión depende principalmente de la temperatura y de la composición química del medio corrosivo que determina la tendencia de los materiales de alcanzar un estado de equilibrio electroquímico con el medio corrosivo ó electrólito que actúa como un conductor de corriente directa.

La corrosión en ductos es el mecanismo más común que provoca la degradación de tuberías enterradas. El oxígeno que se encuentra en el límite del suelo y la tubería absorbe los electrones exteriores de las átomos del acero para formar óxido.

El principio de corrosión se basa en el flujo de electrones a través de un conductor que une dos materiales, los cuáles actúan como ánodo y cátodo respectivamente de acuerdo a su potencial. El fenómeno de corrosión electroquímica se desarrolla bajo los principios de una pila seca, como la que se muestra en la figura 2.1.

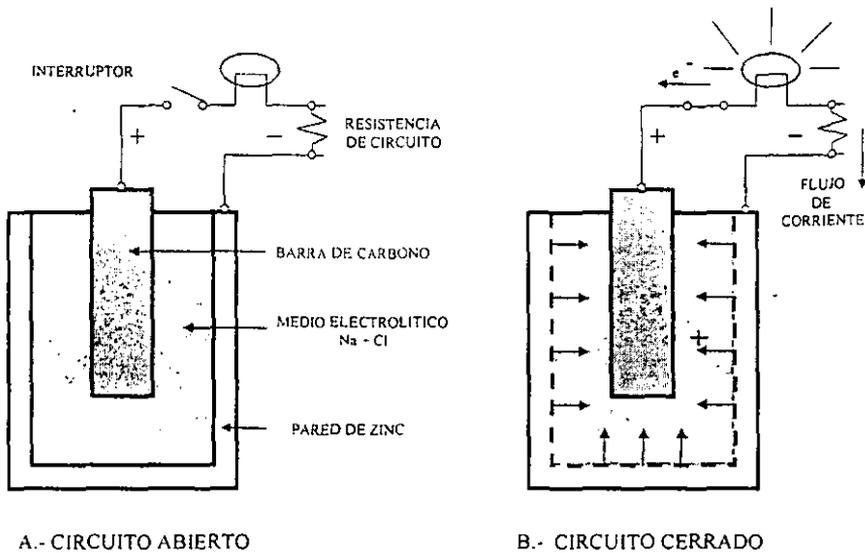


Figura 2.1 Pila seca.

Cuando el interruptor del circuito se encuentra abierto no existe flujo de corriente y las paredes de zinc se mantienen intactas, cuando el interruptor se cierra, se produce un flujo de corriente desde la terminal positiva hacia la negativa y un flujo de electrones en sentido contrario, los electrones al llegar a la superficie de la barra de carbono se unen con los iones positivos presentes en el electrolito (un ión es un átomo con carga eléctrica, ya sea positiva ó negativa), completándose así el circuito eléctrico. Al ceder electrones se genera corriente en las paredes de zinc, produciéndose pérdidas de metal u oxidación disolviéndose el material, mientras que la barra de carbono se mantiene íntegra y ocurre el fenómeno conocido como reducción que es una reacción catódica donde

los electrones son absorbidos. A la pila seca también se le denomina celda galvánica, en la cual la barra de carbono es el cátodo y el zinc es el ánodo. El proceso anterior se debe a que cada material presenta diferente resistencia u oposición a la corrosión y al ponerlos en contacto el material que tiende a ceder mas electrones se corroerá con mayor rapidez actuando como ánodo proporcionando a su vez protección al otro material que actuará como cátodo.

Este fenómeno se presenta en ductos de transporte bajo las siguientes condiciones que deben conocerse cuando se realiza un estudio de corrosión:

1. Debe existir un ánodo y un cátodo.
2. Se establece un flujo de corriente y un potencial eléctrico entre ánodo y cátodo. (Este potencial varía de acuerdo a las condiciones existentes donde se encuentra inmerso el ducto).
3. Debe existir una conexión eléctrica entre ánodo y cátodo. (La conexión puede ser el mismo ducto).
4. El ánodo y cátodo deben estar inmersos en un electrólito el cual es un conductor de corriente. El suelo humedo ó agua que rodea una estructura de acero cumple con ésta condición, debido a que las moléculas de agua se combinan formando iones hidrógeno positivos así como iones hidrógeno cargados negativamente.

Cuando se presentan éstas condiciones, el material que actúe como ánodo se consumirá. Esto se observa en la figura 2.2 donde se presentan los procesos de oxidación y reducción en dos elementos unidos eléctricamente inmersos en un electrólito.

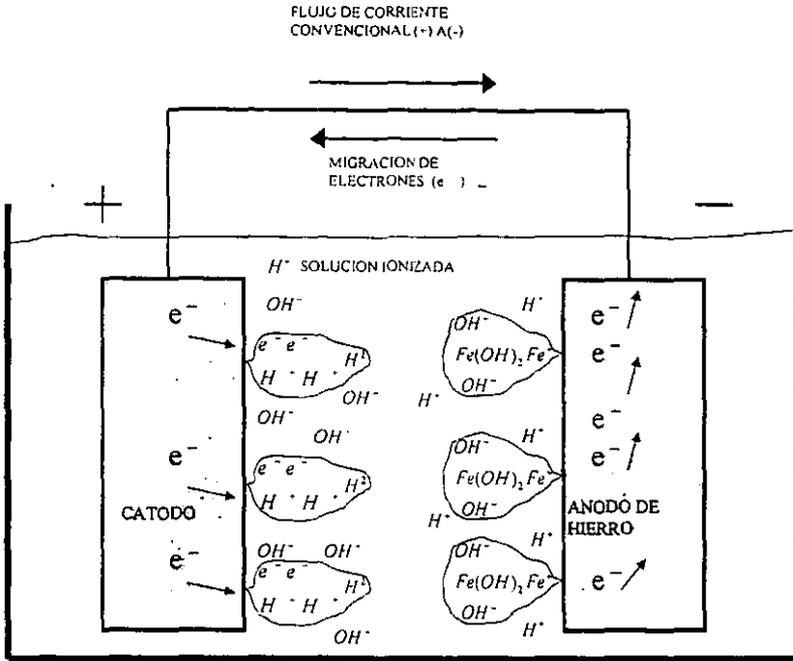


Figura 2.2 Proceso de corrosión del hierro actuando como ánodo en una celda galvánica.

La presión ejercida por la diferencia de potencial entre los dos materiales, resulta en la migración de electrones del ánodo hacia el cátodo a través del conductor.

En el ánodo es donde se pierden los electrones, los átomos cargados positivamente se combinan con iones cargados negativamente (OH^-) del electrolito formando normalmente hidróxido ferroso ($\text{Fe}(\text{OH})_2$) reaccionando posteriormente para formar hidróxido férrico ($\text{Fe}_2(\text{OH})_3$), el cual es conocido como herrumbre.

Mientras tanto en el cátodo la reacción que ocurre es la siguiente, el excedente de electrones que provienen del ánodo y que poseen carga negativa se combinan con los iones hidrógeno positivos que se encuentran en el electrolito formando hidrógeno (H_2). Este hidrógeno se forma como capa protectora y se conoce como fenómeno de polarización, el cual será explicado posteriormente.

Cuando los iones de hidrógeno se convierten a átomos de gas hidrógeno en el cátodo, el excedente de iones de hidróxido (OH^-) incrementa la alcalinidad del electrolito que rodea al cátodo.

2.2.- Polarización.

Dentro de un proceso corrosivo se observa que éste se desarrolla a una velocidad determinada, cuando esta velocidad varía se dice que se está presentando el fenómeno de polarización, el cual consiste en la disminución de la densidad de corriente de la celda y el retardo del proceso.

En la polarización se pueden definir principalmente dos efectos conocidos como polarización por concentración y polarización por activación, los cuales se describen a continuación.

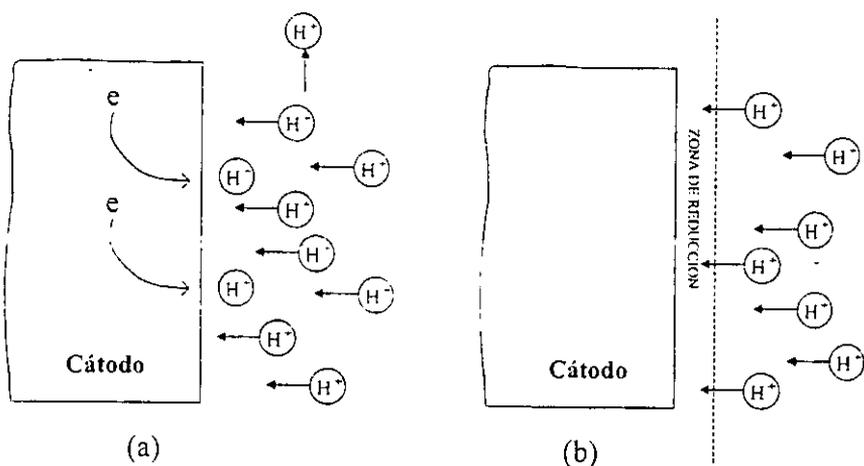


Figura 2.3 Polarización por concentración, a) la distribución normal de iones positivos que se presenta con proporciones bajas de reducción, b) disminución de iones positivos con proporciones altas de reducción.

Polarización por concentración.- Se conoce como una barrera de tipo química y consiste en la migración de electrones cedidos por el material anódico que pasan al cátodo en donde son absorbidos por los iones positivos de la solución. Debido a que la difusión de los iones en la solución es realizada en un tiempo determinado, se sufre una escasez de iones positivos que ocasiona la formación de una capa agotada de iones en el cátodo observándose el cambio de potencial y la disminución de la velocidad del proceso que provoca el retraso del mismo. Este proceso depende de igual manera de la temperatura así como el estado de la

solución, ya que cualquier remoción de la misma provoca un cambio de concentración y por lo tanto la variación en la velocidad de corrosión. Figura 2.3.

Polarización por activación.- Este tipo de polarización se conoce también como una barrera de tipo físico o eléctrico que consiste en el desprendimiento de hidrógeno del cátodo en forma de gas a través de una secuencia bien definida. Figura 2.4.

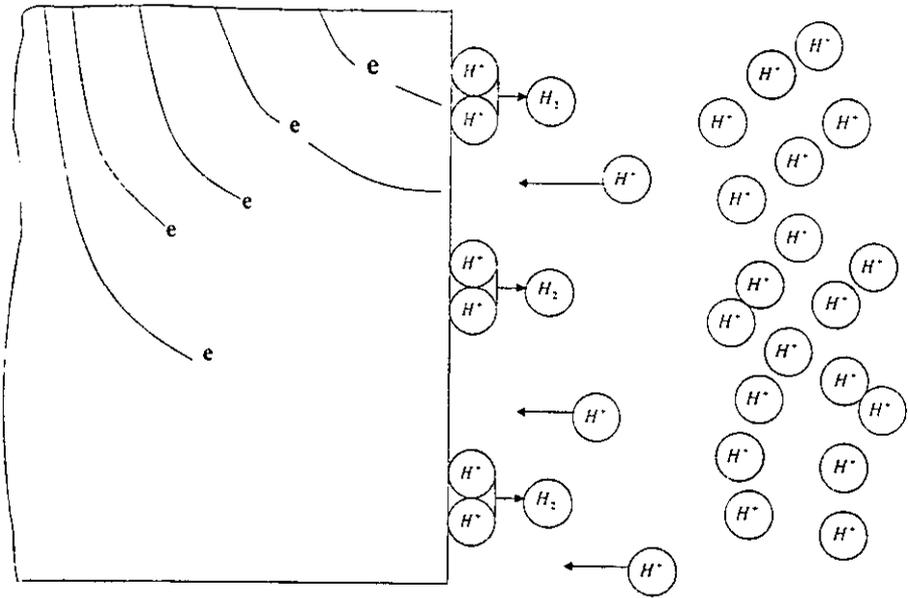


Figura 2.4 Polarización por activación.

Al inicio de esta secuencia se observa un ión hidrógeno que migra del electrolito hacia la superficie del cátodo en donde se realiza el movimiento de electrones. En la interfase cátodo y electrolito se forma

una molécula de hidrógeno por la conjunción de dos átomos de hidrógeno, esta molécula formada finalmente se desprende de la superficie del cátodo en forma de burbuja de gas. Al retrasar cualquiera de estos pasos, se retardará consecuentemente el proceso.

Las capas de polarización es un factor muy importante en el control de la cantidad de corriente que fluye dentro de una tubería, la película de hidrógeno formada en la superficie del cátodo puede considerarse como un aislamiento que produce cierto aumento de resistencia en el circuito que reduce el flujo de corrosión y por lo tanto al disminuir la corriente del sistema se reducirá también la cantidad de material perdido. Por otro lado es necesario considerar también la existencia de factores que pueden remover el hidrógeno y la película formada sobre el material acelerando el proceso de corrosión.

2.3.- Serie electroquímica.

Cuando se tiene una tubería de acero interactuando en un medio corrosivo como el suelo, se crea una celda simple de corrosión que afecta la vida útil de la estructura. Debido a lo anterior es necesario contar con un sistema que proporcione la cantidad de corriente requerida para mantener la estructura en equilibrio con el medio que la rodea. Este equilibrio se logra a través de la protección brindada por otro elemento que cede la cantidad de electrones requeridos actuando como ánodo de sacrificio en el sistema.

Para determinar la tendencia de un metal a ceder electrones, se mide la diferencia de potencial entre el metal y un patrón de referencia o electrodo tipo, ordenándose posteriormente en una serie conocida como

“serie electromotriz o electroquímica”. Podemos decir que esta serie establece un potencial natural característico entre un material dado con respecto a un electrólito que es una solución de sus propias sales. Por convención, este potencial se mide con respecto a un patrón de referencia estandar que es el hidrógeno.

Tabla 2.1 Potenciales de media celda en solución de sus propias sales medidos con respecto a un electrodo de referencia de hidrógeno.

Material	Potencial (Volts)
Magnesio	-2.37
Aluminio	-1.66
Zinc	-0.76
Hierro	-0.44 a -0.86
Estaño	-0.14
Plomo	-0.13
Hidrógeno	0.00
Cobre	+0.34 a +0.52
Plata	+0.80
Platino	+1.20
Oro	+1.50 a +1.68

En electrólitos de diferente composición como suelos y agua éste potencial natural varia de alguna manera, pero la posición de los metales en la serie relativamente se mantiene. En la tabla 2.1 y la tabla 2.2 se comparan los valores de potencial obtenidos referidos a un electrodo patrón de hidrógeno y una serie obtenida para los materiales mas utilizados cuando se trabaja en estructuras de Petróleos Mexicanos en

donde los potenciales se refieren a un electrodo patrón de cobre - sulfato de cobre saturado (Cu/CuSO_4).

Tabla 2.2 Potenciales típicos, en suelos neutros y agua, medidos con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre.

Material	Potencial (V)
Magnesio puro (comercial)	-1.75
Magnesio aleado (6% Al, 3% Zn, 0.15% Mn)	-1.60
Zinc	-1.10
Aluminio aleado (5% Zn)	-1.05
Aluminio puro (comercial)	-0.80
Acero al carbono (limpio y brillante)	-0.5 a -0.8
Acero al carbono (oxidado)	-0.2 a -0.5
Hierro fundido (gris)	-0.5
Plomo	-0.5
Acero al carbono en concreto	-0.2
Cobre, Latón, Bronce	-0.2
Hierro fundido alto silicio	-0.2
Costra de laminación en acero	-0.2
Carbón, Grafito, Coke	+0.3

El uso de un electrodo de referencia se utiliza comúnmente cuando se realizan estudios de corrosión en tuberías. El electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4) es el más común, sus partes esenciales se presentan en la figura 2.5.

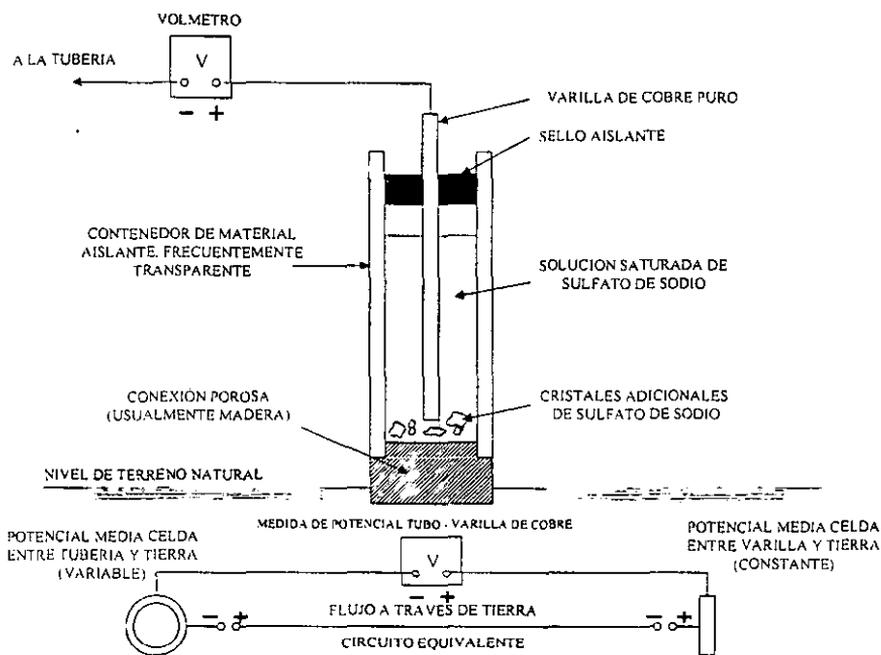


Figura 2.5 Electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4).

Cuando un volómetro es conectado entre el electrodo de referencia y la tubería, la lectura que se observa es realmente una combinación de dos valores, el potencial entre el electrodo de referencia y el suelo, así como el potencial existente entre la tubería y el suelo. Cada uno de estos valores representa una porción del total del potencial existente entre el electrodo y la tubería. El valor que a nosotros nos interesa es el potencial que existe entre la tubería y el suelo, por lo tanto para propósitos prácticos el potencial entre el electrodo y el suelo se considera como un valor constante.

De lo expuesto anteriormente podemos considerar que para disminuir el fenómeno de corrosión de un material, es necesario entonces controlar las corrientes involucradas en el proceso, esto se logra al conectar eléctricamente dos materiales con diferente potencial, el que actúe como ánodo tenderá a volverse más catódico y el material catódico tenderá a ser más anódico, la corriente producida determinará la densidad de corrosión que es la pérdida de peso por unidad de tiempo lográndose con esto la protección de un material por sacrificio de otro.

2.4- Tipos de corrosión

Una vez definido el fenómeno de corrosión conviene mencionar los tipos más comunes que se presentan en estructuras metálicas y que se clasifican de acuerdo con la apariencia del metal corroído. Existe una amplia clasificación de tipos de corrosión, sin embargo para el estudio de la protección catódica, objeto de este trabajo, me limito a comentar los tipos más comunes que se presentan en las tuberías de transporte de Petróleos Mexicanos.

La agresividad del medio corrosivo se puede determinar también de acuerdo al material perdido o espesor perdido en un lapso determinado, generalmente un año, siendo las medidas usuales:

mm/año: Milímetros de penetración por año.

MPA: milésimas de penetración por año (1 milésima = 0.001 pulg).

En atención a este criterio, los agentes corrosivos se clasifican en;

Corrosión en MPA

Altamente corrosivos	> 6
Moderadamente corrosivos	3-6
Poco corrosivos	< 3

Esta clasificación se basa en la suposición de que el ataque corrosivo se presenta uniforme, lo que difícilmente ocurre, por lo que debe considerarse que exista corrosión localizada por picadura.

2.4.1.- Corrosión galvánica.

Se establece entre dos metales distintos, en donde el metal más bajo en la serie electroquímica actúa como ánodo. Por ejemplo tenemos el acero galvanizado, acero recubierto de zinc, que es más anódico y por tanto se sacrifica para proteger al acero. Una consideración importante en la corrosión de dos metales es la relación de área entre los mismos, lo que se conoce como efecto de área, en donde una relación de área desfavorable es la constituida por un área catódica grande y un área anódica pequeña, por lo tanto la densidad de corriente será mayor para el electrodo más pequeño, el cuál se corroerá más rápido.

2.4.2.- Corrosión por picadura.

Este tipo de corrosión es muy destructivo si provoca perforación del metal; el número y la profundidad de los agujeros es variable y por eso la picadura puede ser difícil de evaluar, pudiendo ocasionar fallos inesperados, ya que una vez iniciados, los agujeros crecen a gran velocidad. Figura 2.6.

2.4.3.- Corrosión en grietas o hendiduras.

Es una forma de corrosión que puede presentarse en hendiduras y bajo superficies protegidas, donde pueden existir soluciones estancadas, es frecuente bajo juntas, remaches, pernos y tornillos, entre válvulas y sus asientos, etc. Para que este tipo de corrosión ocurra la grieta debe ser lo suficientemente ancha para permitir que se introduzca el líquido y a la vez lo bastante estrecha (pocos micrómetros) para mantener estancado el líquido. Figura 2.6.

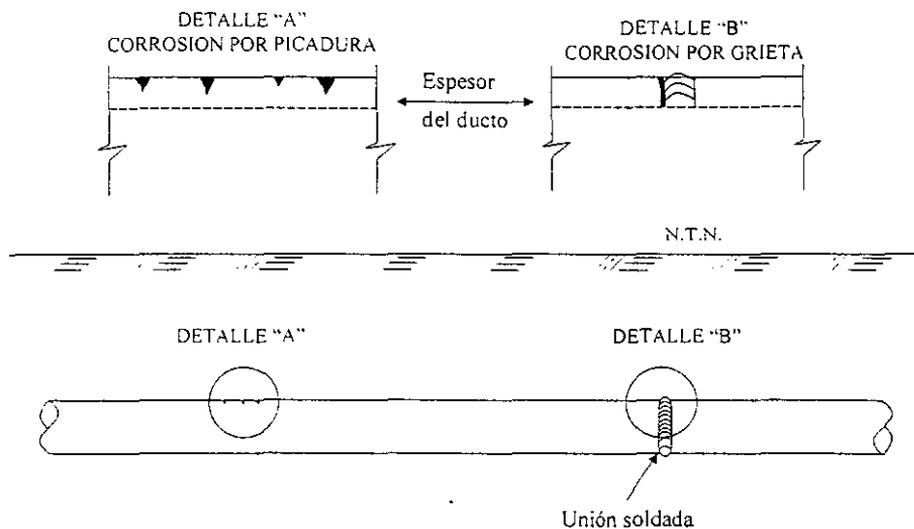


Figura 2.6 Corrosión por picadura y corrosión por grieta.

2.4.4.- Otros tipos de corrosión.

Corrosión por variación de suelos.- Este tipo de corrosión se puede presentar en las tuberías enterradas y consiste en la creación de celdas de corrosión que se presentan cuando una tubería pasa de un tipo de suelo a otro obteniéndose cambios de potenciales naturales y obligando a la línea a actuar en una zona como ánodo y en otras zonas como cátodo. Esto puede llegar a observarse cuando realizándose una excavación se encuentra una tubería en buenas condiciones y metros adelante la misma tubería en un estado de corrosión severa. Figura 2.7.

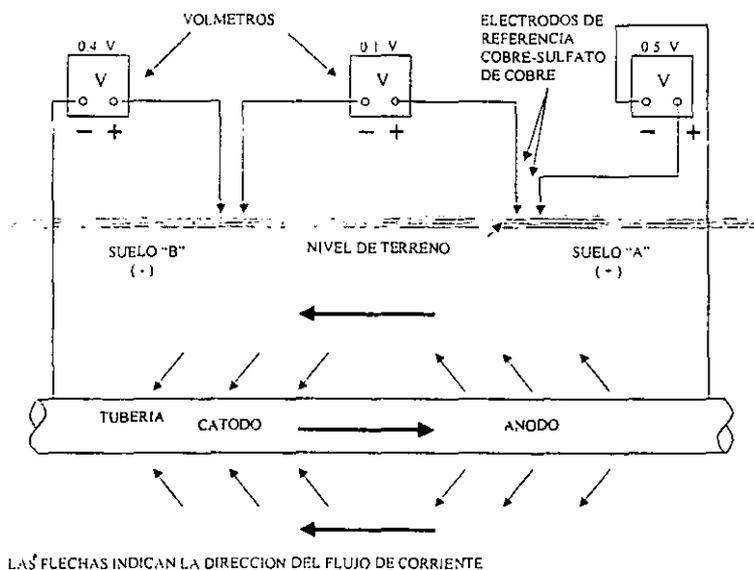


Figura 2.7 Corrosión por diferencia de suelos.

Corrosión por diferencia de oxigenación.- Se presenta en las tuberías en zonas donde por ejemplo existen cruces de carreteras, y se debe a que el material propio de base, sub-base y carpeta de rodamiento impide la libre migración del oxígeno en el suelo, provocando con ello diferencias de potencial y la creación de una zona anódica de la tubería en el tramo cubierto. Figura 2.8.

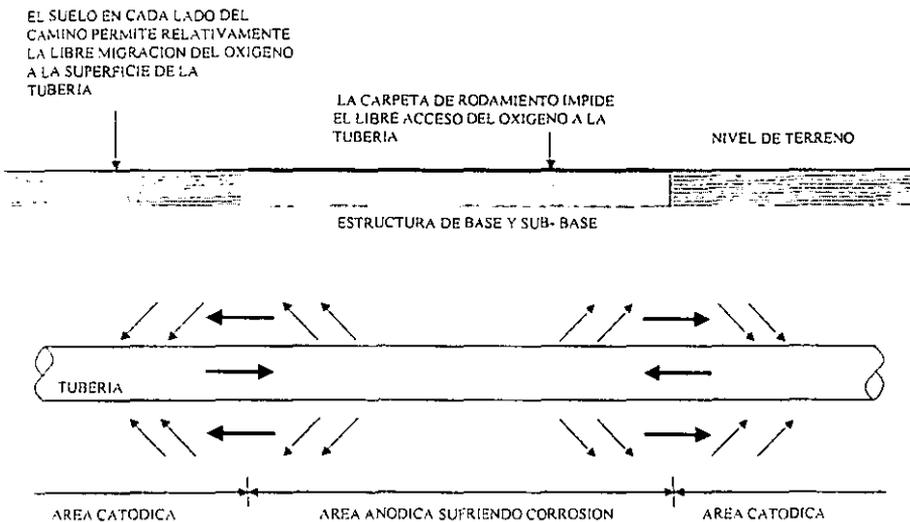


Figura 2.8 Corrosión por diferencia de oxigenación.

CAPITULO III

MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN.

Una vez conocidos los tipos de corrosión y el efecto destructivo que provoca en las estructuras es necesario entonces, el estudio e implementación de procedimientos que ayuden al control de este fenómeno. En tuberías de transporte de gas, así como de otros productos se utilizan procedimientos para prevenir y controlar la corrosión, entre los cuales podemos citar la protección a base de recubrimientos anticorrosivos, protección mecánica, protección a base de ánodos de sacrificio y protección a base de corriente impresa. Estos métodos se describen a continuación.

3.1.- Recubrimientos anticorrosivos.

Los recubrimientos anticorrosivos son barreras físicas entre el ambiente corrosivo y la estructura a proteger. Existen procedimientos para prevenir y controlar la corrosión, entre los que se pueden citar las barreras físicas que eliminan la interacción metal - medio, modificadores del medio agresivo como inhibidores de corrosión y protección catódica y el diseño de aleaciones y materiales resistentes.

Las barreras físicas o recubrimientos anticorrosivos han tenido un gran desarrollo. Debido a lo sencillo de su formulación logran fácilmente el recubrimiento idóneo para cada uso o agente agresivo. Sin embargo, ningún recubrimiento es capaz de garantizar una película totalmente libre de poros o discontinuidades que no son significativas cuando la estructura está expuesta a un ambiente poco corrosivo pero dentro de un medio agresivo de suelos o agua, generan una corrosión localizada que

provoca daños a la estructura. La protección de estas áreas, se realiza mediante un sistema de protección catódica, método electroquímico que se puede clasificar como modificador del ambiente agresivo, o bien, de la estructura con respecto al medio.

Es importante considerar que seleccionar el recubrimiento adecuado protegerá en un alto porcentaje la tubería aislándola del medio electrolítico, no obstante una mala selección puede ocasionar pérdidas económicas debidas a la poca protección, utilidad y beneficios que tendrá un material inadecuado.

Las características que debe de reunir el revestimiento anticorrosivo para tuberías enterradas son las siguientes:

- Aislamiento eléctrico.
- Adherencia sobre las superficies metálicas en las que son aplicados.
- Resistencia a los agentes corrosivos (agua, iones y gases).
- Estabilidad en sus propiedades a través del tiempo.
- Compatibilidad con sistemas de protección catódica.
- Aplicación sin roturas.
- Resistencia a los microorganismos.

Debido a la protección que brindan los recubrimientos anticorrosivos, la corriente y la pérdida de material en el medio electrolítico disminuirá considerablemente en comparación con una tubería desnuda. Sin embargo deberá complementarse la protección por medio de algún

sistema de protección catódica que proporcione la cantidad de corriente necesaria que pierde la tubería a través de pequeños orificios o fallas en el recubrimiento.

3.1.1.- Tipos de recubrimientos.

Con el fin de brindar la protección adecuada a las líneas de distribución se desarrollan continuamente materiales que brindan mayor protección y resistencia mecánica a las instalaciones. Estos recubrimientos básicamente son los siguientes:

1. **Esmaltes.-** Se utiliza principalmente el esmalte de alquitrán de hulla aplicado en caliente, reforzado posteriormente mediante la colocación de cintas o recubrimientos.
2. **Grasas.-** Se utilizan actualmente grasas inhibidoras como protección en algunas aplicaciones, principalmente en líneas de distribución. Estas se aplican de manera manual mediante la ayuda de guantes y son untadas sobre la tubería.
3. **Recubrimientos líquidos aplicados en frío.-** Este tipo de recubrimientos se aplican en frío y solidifican posteriormente ya sea por evaporación o por proceso químico.
4. **Cintas.-** En los últimos años el uso de cintas se ha incrementado, estas cintas se fabrican principalmente de polietileno y cloruro de polyvinil, los cuales se aplican posteriormente a un primario para obtener mejores resultados.

5. **Recubrimientos plásticos.**- A pesar que las cintas mencionadas anteriormente se fabrican a base de polímeros, en esta categoría se menciona una aplicación reciente que consiste en una capa continua que se aplica a la tubería por medio del proceso de extrusión. Esta capa proporciona una protección continua pero su uso se limita a tuberías de diámetro pequeño, presentando además la característica de soportar altas temperaturas sin suavizarse o deformarse.

3.2.- Protección mecánica.

La protección mecánica es una barrera física entre el medio corrosivo y la superficie exterior de la tubería por proteger. Tradicionalmente se ha llamado a este recubrimiento protección mecánica, aunque se ha comprobado que no brinda tal protección, limitándose a proporcionar un refuerzo al recubrimiento anticorrosivo, propiamente dicho. Se utilizan diversos sistemas de revestimientos anticorrosivos que, además, brindan ese refuerzo mecánico para prevenir daños tales como rasgaduras, poros, agrietamientos y otras fallas que son inevitables en las maniobras de trabajo en la línea de la zanja.

Se han mencionado ya los sistemas más usados como revestimiento anticorrosivo en líneas de Petróleos Mexicanos. Para determinar el tipo de recubrimiento más adecuado, debe de considerarse, el medio donde se encuentra inmersa la estructura, el tipo de suelo (si es rocoso o tiene hundimientos diferenciales que puede transmitir esfuerzos a la tubería), temperatura de operación (deben evitarse las temperaturas extremas), condiciones de aplicación (clima húmedo o seco), costo, etc. Además debe considerarse la accesibilidad a la tubería para futuras reparaciones.

Considerando las características antes mencionadas, a la vez de realizado un análisis de costos de materiales y la confiabilidad de protección que se obtiene; para la realización de los trabajos de reubicación del gasoducto de 6" D.N., se selecciona el sistema tradicional de recubrimiento mecánico a base de esmalte de alquitrán de hulla reforzado con diferentes capas, las cuales se describen a continuación.

- Pintura primaria a base de alquitrán de hulla.
- Esmalte de alquitrán de hulla, (esmalte protexa con espesor mínimo de 3/32").
- Malla de fibra de vidrio para refuerzo del recubrimiento, (envoltura de refuerzo de fibra de vidrio, Vidrioflex).
- Filtro de fibra de vidrio saturado para la protección mecánica del esmalte, (envoltura exterior de acabado de fibra de vidrio, Vidriomat).

Las cubiertas protectoras a base de alquitrán de hulla son las más usuales en tuberías enterradas, este recubrimiento a base de alquitrán tiene la característica de mitigar la corrosión a través de la adhesión a la superficie del metal resistiendo con efectividad la migración de humedad bajo la cubierta, además cuentan con la ductilidad suficiente para resistir agrietamientos.

El recubrimiento a base de alquitrán de hulla se realiza a base del calentamiento y aplicación del esmalte de alquitrán de hulla y la colocación de forros de tela de fieltro y fibra de vidrio a manera de

envoltura impregnados de la misma substancia, previa aplicación de pintura primaria también a base de alquitrán de hulla y aceites de alquitrán de hulla refinada adecuadamente mezclada para producir un líquido que puede ser aplicado en frío, presentando la adherencia adecuada con la tubería.

Antes de aplicar el recubrimiento se debe contar con una tubería limpia para asegurar que los materiales de revestimiento se adhieran al tubo. Esta limpieza puede realizarse por medios mecánicos utilizando talladores rotatorios o cepillos, arena a presión, solventes, etc.

La calidad de un esmalte de alquitrán de hulla se afecta con la clase de hulla carbonizada, la temperatura de carbonización, el valor calorífico que debe ser de 13 000 BTU por libra y que haya sido carbonizada a una temperatura que no sea menor de 900°C, además el esmalte no debe contener asfalto u otro derivado del petróleo. El esmalte se derrite en calderas con la capacidad para derretirlo y contenerlo a una temperatura adecuada en el rango de 220-240° F.

El esmalte se refuerza a base de una banda de fieltro de fibra de vidrio, de ancho, espesor y constitución uniforme, de porosidad intercomunicada, apropiada para que sus fibras encajen y queden ahogadas en la capa de esmalte caliente sin que se disgregue su estructura pegándose a un grado tal que pueda causar desgarraduras, de otra manera, en caso de tener una baja porosidad este producirá gasificaciones, formación de cráteres o vacíos en la capa de esmalte debajo del fieltro, por lo que se deberá de cuidar un terminado con una

aparición lisa libre de defectos visibles. Los defectos más comunes que deben evitarse son los siguientes:

- Bordes ó arrugas en el recubrimiento por mala aplicación.
- Agujeros en el recubrimiento durante su aplicación.
- Rasgaduras por una excesiva fuerza al aplicar.
- Penetración o incrustación de elementos extraños.
- Ataque de solventes que pudieran encontrarse en el suelo.
- Daños por construcción de otras instalaciones.

Una vez que se ha colocado el recubrimiento, se debe realizar una prueba de continuidad mediante un aparato eléctrico detector de fallas en el recubrimiento anticorrosivo. El aparato utilizado es portátil, de baja corriente, tensión ajustable, tipo impulso, el cual suministra un impulso de alto voltaje de muy corta duración y debe ser ajustado por lo menos tres veces al día obligado por la humedad relativa y la temperatura. Este aparato dispone de dos electrodos, uno de los cuales se conecta a tierra, arrastrándolo a lo largo de la superficie del tubo o conectado a cualquier parte descubierta de la superficie metálica, y el otro es el electrodo de inspección en forma de resorte espiral, el cual al pasar por una falla o recubrimiento defectuoso en la superficie metálica, cierra el circuito eléctrico a través de la estructura metálica, accionando un mecanismo o dispositivo de señal audible y luminosa que indica la existencia de la falla, que es el lugar de la falta de continuidad de la capa protectora que expone la superficie de la tubería al medio corrosivo y se localiza a simple vista en el lugar en que se forma un arco eléctrico o chispa entre el electrodo de inspección y la estructura metálica; la falla se marca sobre la

superficie del revestimiento y debe repararse con los mismos materiales del recubrimiento y ya reparada se prueba nuevamente la continuidad de la película en el área reparada. Figura 3.1.



Figura 3.1 Prueba de continuidad del recubrimiento anticorrosivo.

3.3.- Control de la corrosión usando ánodos de magnesio.

Este tipo de control de la corrosión aprovecha las características electroquímicas de los materiales metálicos, que provocan un par galvánico al ponerse en contacto dos metales con diferente electronegatividad, corroyéndose el más electronegativo o anódico. Este electrodo en donde ocurre el fenómeno de oxidación se conoce como ánodo de sacrificio y se consume al emitir una corriente de protección.

Para protección catódica de gasoductos se utilizan por lo general ánodos galvánicos en aquellos casos en donde se requieren pequeñas cantidades de corriente de protección instalados en suelos de baja resistividad que permiten la obtención de las corrientes deseadas a través de ánodos. Figura 3.2.

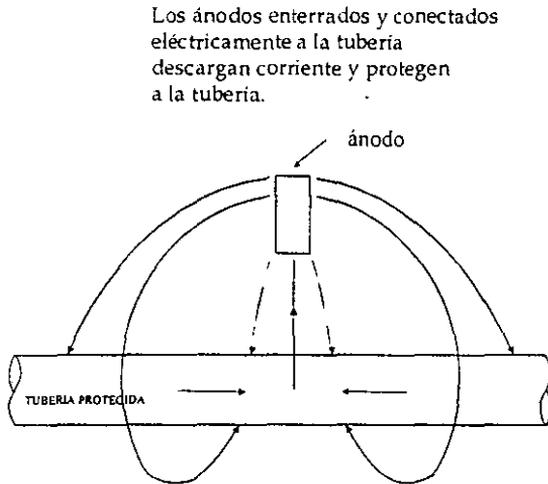


Figura 3.2 Protección catódica con ánodos.

Los materiales de uso más común para ánodos de sacrificio son el zinc y el magnesio para la protección de tuberías enterradas y tanques de almacenamiento, y el aluminio que se utiliza para la protección de estructuras que se alojan en el mar, como son las plataformas marinas de perforación, el casco de los barcos, etc. Actualmente los ánodos se fabrican en diferentes pesos y medidas de acuerdo al tipo de utilización, todos ellos muestran una suficiente área expuesta a fin de producir la corriente de protección requerida durante la vida del sistema anódico. De acuerdo a las propiedades que presenta el magnesio, éste se utiliza para

la protección del gasoducto objeto de este estudio. Las dimensiones, pesos y características de los ánodos de magnesio disponibles se muestran en la tabla 3.1 y tabla 3.2.

Tabla 3.1 Datos aproximados para ánodos de magnesio en tierra.

Gravedad específica	1.94
Libras / pie cúbico	121
Amperaje / hora por libra (teórico)	1000
Libras / amperaje por año (teórico)	8.7
Porcentaje de eficiencia de corriente	50
Amperaje / libras reales	500
Libras / amperaje por año (reales)	17.4
Potencial referido a electrodo (Cu/CuSO ₄) aleación 6% Al, 3% Zn, 0.2% Mn.	-1.55
Potencial natural	-1.80

Los ánodos se instalan con un relleno llamado backfill, el cual está constituido de un 75% sulfato de calcio (yeso hidratado), 20% de bentonita y 5% de sulfato de sodio para suelos con resistividades bajas y hasta 1,200 ohm-cm, variando esta proporción de acuerdo al tipo de terreno. Para suelos con resistividades mayores normalmente se utiliza una proporción de 20% sulfato de calcio, 75% de bentonita y 5% de sulfato de sodio. La bentonita es un compuesto que contiene entre otros componentes óxido de magnesio, el yeso está constituido de sulfato de calcio, que tiene la característica de absorber gran cantidad de agua, al igual que el sulfato de sodio.

Tabla 3.2 Tamaños y pesos disponibles de ánodos de magnesio.

Dimensiones del ánodo (plg)	Peso del ánodo (lb)	Peso del paquete Ánodo-backfill (lb)
3 x 3 x 8	5	13
3 1/2 x 3 1/2 x 14	9	25
3 x 3 x 14	9	27
4 x 4 x 12	12	32
4 x 4 x 17	17	45
3 1/2 x 3 1/2 x 18	17	44
2 1/2 x 2 1/2 x 59	20	60
5 x 5 x 20 1/2	32	68
5 1/2 x 5 1/2 x 22	32	65
5 1/2 x 5 1/2 x 32 1/2	48	100
7 x 7 x 16	50	100
4 1/2 x 4 1/2 x 60	60	125
1 1/2 x 1 1/2 x 70	10	Normalmente desnudo
2 x 2 x 60	16	Normalmente desnudo
3 x 3 x 60	40	Normalmente desnudo
4 x 4 x 60	60	Normalmente desnudo

El relleno (backfill), funciona básicamente como una esponja absorbiendo la humedad del medio, los óxidos de magnesio de la bentonita se disuelven en el agua formando una solución que funciona como un electrólito, capaz de conducir la corriente eléctrica. Al sumergir el ánodo de magnesio en el relleno se establece una pila o celda, en donde el ánodo de magnesio tiende a pasar a la solución, es decir a corroerse, consumiéndose por sacrificio. El magnesio de la bentonita que está en la solución tiende a depositarse en el ánodo de magnesio, este movimiento origina un potencial eléctrico, es decir un flujo de electrones que pasa a la tubería a través del conductor de cobre y a través del suelo, esta corriente es la que protege a la tubería de la corrosión, elevando su potencial hasta el valor catódico que es de 0.85 Volts., mínimo para el hierro.

El arreglo de un dispositivo de protección catódica se muestra en la figura 3.3, y comprende los siguientes elementos:

1. **Estructura a proteger.-** Puede ser el ducto ó alguna estructura metálica como tanques de almacenamiento, plataformas marinas, etc. La cual se encuentra en el medio electrolítico que puede ser el suelo, agua de mar, pantanos, etc.
2. **Lecho anódico.-** En este caso, el agrupamiento de ánodos al estar en contacto directamente con la estructura a proteger, aprovecha las características electroquímicas de los materiales metálicos. Comúnmente se utilizan los ánodos de magnesio, aluminio y zinc como material anódico para proteger las estructuras de acero.

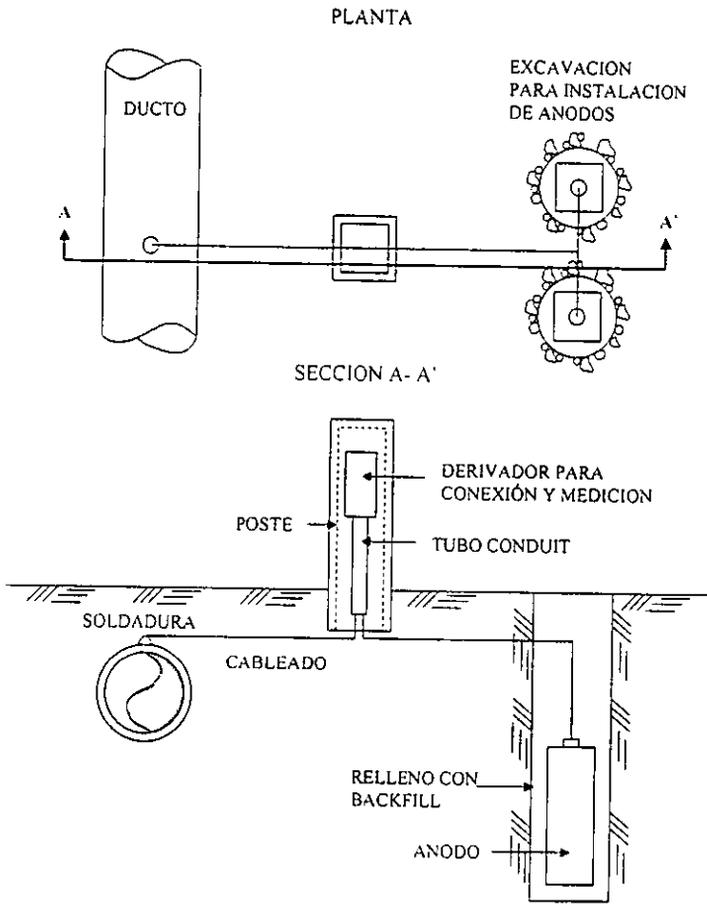


Figura 3.3 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

3. **Cableado.**- El cableado es necesario para llevar a cabo la protección catódica por creación de un par galvánico entre la estructura y el ánodo.

La conexión del ánodo a la tubería a proteger se realiza mediante soldadura de aluminotermia (Cadwell). Los principales componentes de este tipo de soldadura son el cobre, aluminio y pólvora o fundente, se basa en el principio de que el aluminio tiene la propiedad de combinarse con el oxígeno que está unido a otros metales desprendiendo gran cantidad de calor y dejando libre al metal que estaba combinado con el oxígeno por efecto de la temperatura obtenida en el proceso, el metal se funde depositándose sobre la superficie descubierta y limpia de la tubería, soldando el alambre de cobre que se coloca entre el crisol de grafito y la tubería.

En este tipo de soldadura se colocan en el fondo del crisol unas plaquitas de cobre ó latón las cuales se funden fácilmente con el calor desprendido. El calor requerido al principio del proceso de soldadura se proporciona por una pequeña cantidad de pólvora que contienen los cartuchos de soldadura (número 15).

Los casquillos de cobre o latón se colocan en los extremos descubiertos del alambre de cobre que se van a soldar con el fin de ajustar el crisol de grafito y que el alambre de cobre no reciba directamente la soldadura a alta temperatura.

La superficie de la tubería debe de estar perfectamente limpia y libre de óxidos, es decir, el metal debe presentar una superficie blanca para garantizar una buena adherencia. Después de la aplicación de soldadura se permite el enfriamiento de la misma golpeándola después con un martillo para comprobar la efectividad de la adherencia. Una vez realizada

la soldadura, ésta debe ser aislada con el mismo material de recubrimiento.

La principal ventaja de este sistema es que, adecuadamente instalado, no requiere mantenimiento ni ajustes de operación, además de no requerir instalaciones especiales de suministro de energía como es el caso de protección catódica a base de corriente impresa.

3.4.- Consideraciones durante la instalación de ánodos.

Los ánodos de sacrificio deben ser instalados de manera adecuada a fin de obtener los valores adecuados de protección con rendimiento y vida útil de 10 años aproximadamente. Es importante saber que los ánodos tendrán un comportamiento el cual será determinado por las condiciones de instalación tales como distancia del ducto al lugar donde se siembra el ánodo, la cantidad de ánodos que se instalan en un punto (ánodo individual o en grupo formando una cama anódica, etc.) Por lo anterior deberá de considerarse lo siguiente. Figura 3.4.

- Cuando se instala un ánodo de sacrificio de manera individual, éste deberá estar a 2.5 metros de distancia transversal ó incluso por abajo en sentido vertical del ducto, a fin de proporcionar la corriente de protección adecuada cubriendo el mayor área posible. De igual manera la corriente de protección y la vida útil del ánodo se encuentran asociadas a la distancia de instalación, ya que a menor distancia el flujo de corriente es mayor y la vida útil menor.

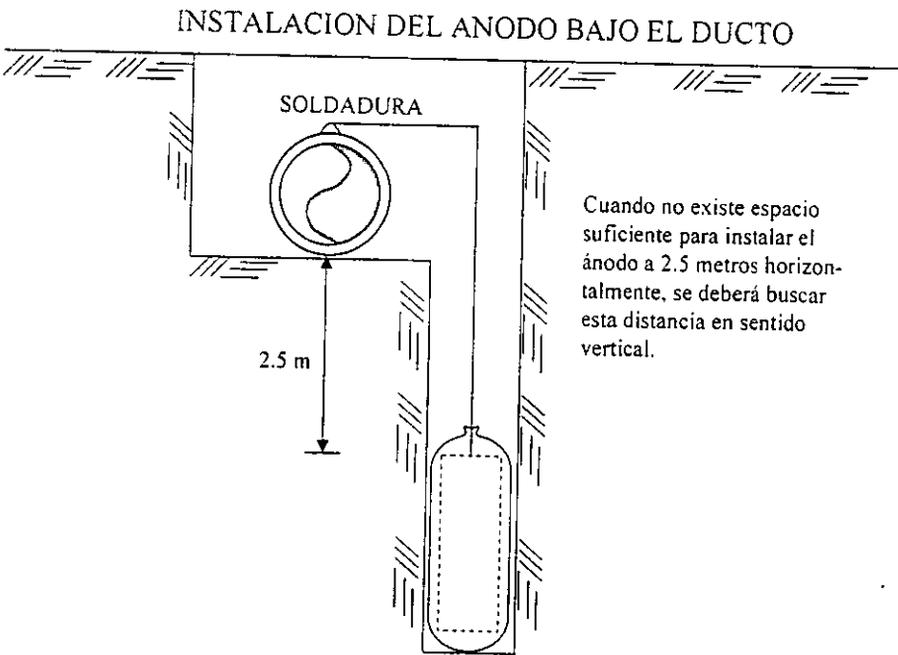
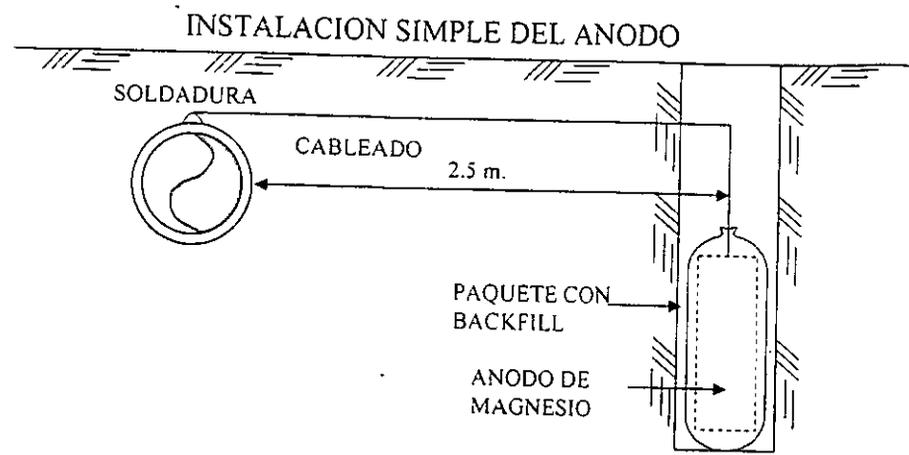


Figura 3.4 Instalación básica de un ánodo de magnesio.

- Cuando se instalan dos ó más ánodos de sacrificio para protección de tuberías enterradas, estos deberán colocarse a una distancia de tres metros de la tubería con una separación de 2.5 metros entre ellos, esta distancia es básica para una mejor distribución de la protección de la corriente permitiendo cubrir un área mayor de la tubería. Deberán considerarse además diferentes factores aplicables cuando se instalan ánodos en grupo debidos a las interferencias entre ánodos que se producen y que deben considerarse dentro del calculo, como es el factor de agrupamiento. Figura 3.5.

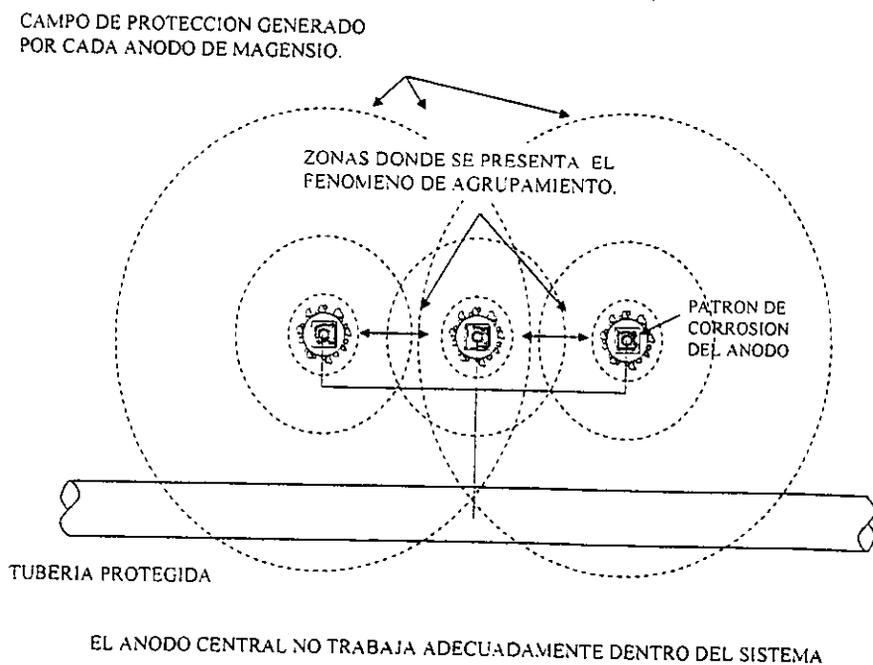


Figura 3.5 Fenómeno de agrupamiento.

- Entre las interferencias que se pueden provocar entre ánodos se encuentra el fenómeno de agrupamiento el cual se presenta cuando se han instalado un grupo de ánodos en forma de cama, consiste en un consumo desproporcionado o desigual de algunos ánodos que presentan una ó más caras cercanas a otros ánodos. El resultado obtenido al paso del tiempo es el consumo total de los ánodos que brindaron una protección de manera adecuada a la estructura, permaneciendo casi intactos los ánodos restantes que tuvieron un bajo rendimiento y que prácticamente no trabajaron dentro del sistema de protección catódica.

La vida del ánodo depende tanto de su material, como de su peso y debe calcularse el tiempo de vida del ánodo durante el cual deberá proporcionar la corriente de protección necesaria al sistema. El tiempo de vida de un ánodo se determina mediante la expresión;

$$V = \frac{Pu}{CI}$$

en donde:

V = Vida útil de los ánodos (años).

P = Peso neto de los ánodos (lb).

u = Factor de utilización determinado por la cantidad de material anódico consumido cuando los residuos del material anódico no puede liberar la corriente requerida. La forma del ánodo puede afectar el factor de utilización. La selección apropiada de longitud,

diámetro y diámetro del núcleo nos da un factor de utilización dentro del rango de 0.9 – 1.0.

C = Rango de consumo del ánodo, (lb/año).

I = Entrega de corriente del ánodo, (A).

Consideremos por ejemplo un ánodo de magnesio de 17 libras con un factor de utilización de 1.0. De acuerdo a la tabla 3.1, un ánodo de magnesio en tierra se consume a razón de 17.4 libras/A x año. De igual manera de acuerdo a la tabla 5.2, este tipo de ánodo proporciona 97 mA aproximadamente. Por lo anterior, sustituyendo los valores en la fórmula tenemos:

$$V = \frac{17lb(1.0)}{17.4 \frac{lb}{Año} \times 0.097} = 10.07 \text{ años}$$

Esta vida útil es la esperada por los ánodos de sacrificio, aunque es necesario considerar que esta dependerá de factores como el tipo de suelo, humedad, colocación del ánodo, cantidad de ánodos, etc.

Los ánodos se pueden conectar a las estructuras metálicas individualmente o en grupos. Su corriente de salida está limitada por la diferencia de potencial entre el ánodo y el tubo y por la resistividad del electrolito.

CAPITULO IV

METODOS DE PREVENCION DE LA CORROSIÓN.

4.1.- Toma de resistividades por el método Wenner (4 electrodos).

La resistividad se define como la resistencia que opone un volumen unitario de un material dado al paso de la corriente eléctrica, sus unidades de medición son ohm-cm., sirve para determinar las condiciones locales del terreno donde quedará enterrada la tubería. Las características del terreno que influyen en su valor de resistividad son temperatura, composición mineral del suelo, concentración de sólidos disueltos, humedad y profundidad a la que se hace la medición.

La resistividad del terreno se determina circulando una cantidad de corriente eléctrica por la tierra y midiendo el cambio de potencial resultante. El valor de este indica que tan agresivo puede resultar el terreno, pues a mayor valor de resistividad menor grado de agresividad. Conociendo el valor de resistividad se obtiene el valor de protección con que debe contar la tubería. Las lecturas se espacian de acuerdo a las características del terreno y el tipo de protección que deseamos emplear.

Es importante conocer la resistividad del suelo en el sitio donde se van a colocar los ánodos de sacrificio, este valor de resistividad nos indica la resistencia que va a oponer el terreno al paso de la corriente en ese punto. La corriente al llegar a la tubería tiende a regresar al ánodo de magnesio a través del terreno para cerrar el circuito, pero debido a que la tubería tiene un recubrimiento que opone cierta resistencia a la salida de la corriente, la corriente viajará por el tubo hasta que encuentre una salida, por ejemplo; poros, rasgaduras, etc. Por estos sitios la corriente

sale de la tubería y circula a través del suelo hacia el ánodo más cercano, por tal motivo es importante que el recubrimiento sea colocado cuidadosamente evitando que quede flojo, rasgaduras, poros, etc., para que la corriente de protección proporcionada por el ánodo de sacrificio no encuentre un punto de fuga y recorra por consiguiente la mayor longitud posible de tubería.

En la tabla 4.1 y la tabla 4.2 se indican valores típicos de resistividad para diferentes suelos y su grado de agresión.

Tabla 4.1 Clasificación de los suelos de acuerdo a su resistividad.

Ohms - cm.	Propiedad.
0-1,000	Altamente corrosivos.
1,000-5,000	Moderadamente corrosivos.
5,000-10,000	Poco corrosivos.
10,000 en adelante	Muy poco corrosivos.

Tabla 4.2 Valores de resistividad promedio de acuerdo al tipo de suelo.

Tipo de Suelo	Resistividad (Ohm-cm).
Tierra orgánica húmeda	1,000
Tierra húmeda	10,000
Tierra seca	100,000
Roca	1,000,000

El método más usado para la medición de la resistividad es el Wenner (arreglo de cuatro electrodos), el cual es una combinación del uso de un voltmetro y un amperímetro, conectados a una fuente de corriente directa y cuatro ánodos enterrados en el terreno como se muestra en la figura 4.1.

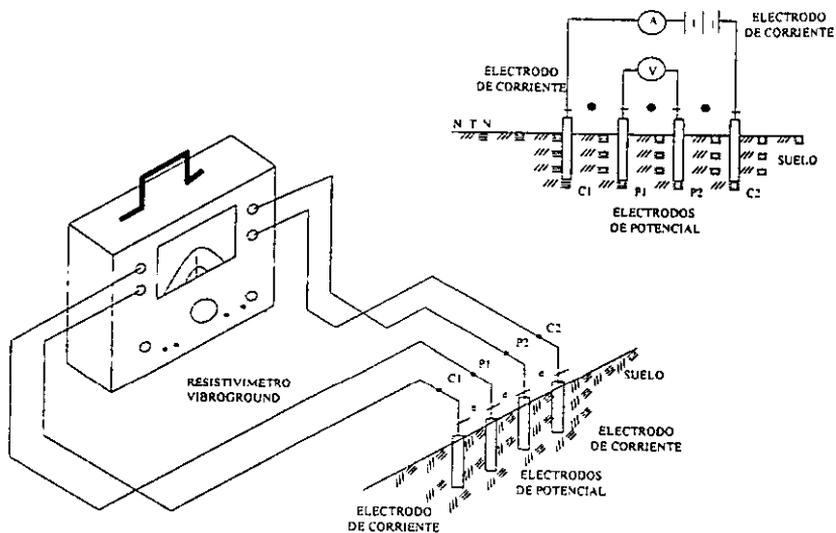


Figura 4.1 Método Wenner para toma de resistividades.

Procedimiento de operación.

1. Clavar los cuatro electrodos en línea recta dentro del suelo al espaciamiento deseado. La distancia entre electrodos determina la resistividad a la profundidad donde se desea obtener el valor,

por lo anterior consideramos 1.50 metros de separación, ya que el ducto instalado se instalará a esa profundidad.

2. Conectar los bornes C a los electrodos de los extremos y los bornes P a los electrodos del centro, de acuerdo a la figura 4.1.
3. Se coloca el interruptor en el rango "X100 K", la carátula en 10 y se jala la perilla de sensibilidad a la posición "low", si el indicador del medidor se mueve hacia la derecha, se bajan los rangos hasta que el indicador se equilibre con la carátula.
4. Se empuja la perilla de posición hasta la posición "high" y se afina el balance.
5. Se obtiene la resistencia en ohms multiplicando la lectura indicada en la carátula por el ajuste del interruptor de rango.
6. Se calcula la resistividad ρ en ohms-cm según:

$$\rho = 6.28 \times (S) \times (R); \text{ s en cm.}$$

$$\rho = 191.5 \times (S) \times (R); \text{ s en pies.}$$

Donde:

ρ : Resistividad promedio del suelo a una profundidad igual al espaciamiento de los electrodos (ohms-cm).

S : Separación o espaciamiento de los electrodos (cm) o (pie) = 1.5 mt.

R : Medición de la resistencia del suelo. (ohms). Para conocer el valor de la resistividad del terreno se deberá multiplicar el valor de la perilla por la escala correspondiente.

$$R = \text{Valor leído (1.2) x escala (1)} = 1.2$$

Sustituyendo los valores en la fórmula se obtiene la resistividad del terreno.

$$\rho = 6.28 \times (150 \text{ cm}) \times (1.2) = 1,130.40 \Omega - \text{cm.}$$

De acuerdo a la clasificación de los suelos mostrada en la tabla 4.1, el tipo de terreno que se encuentra en esta zona es moderadamente corrosivo, tendiendo a ser altamente corrosivo y se debe a que ésta zona de trabajos ésta comprendida en los límites de Xochimilco, al sur de la Ciudad de México, donde se encuentran todavía canales y demás zonas lacustres ecológicas y de cultivo. El nivel freático encontrado en la zona se encuentra en promedio a 2.00 metros de profundidad por lo que se explica la humedad existente en el terreno lo que favorece enormemente al proceso corrosivo.

4.2.- Análisis del suelo (Ph).

Un factor importante en la determinación del sistema de protección consiste en determinar el tipo de suelo en el que se encuentra inmerso. Para ello es de gran utilidad conocer el potencial de hidrógeno de la zona. Conviene recordar que el pH es el logaritmo negativo de la concentración de iones hidrógeno.

En muchas zonas el tipo de suelo que se encuentra en donde se instalará una tubería contiene un potencial de hidrógeno neutral (pH 7), puede encontrarse sin embargo, lugares con inusuales condiciones ambientales donde se encuentren suelos alcalinos con un potencial de hidrógeno mayor que 7 o suelos ácidos con potenciales de hidrógeno menores de 7.

Los suelos alcalinos no representan en realidad dificultades para la instalación de líneas de transporte de hidrocarburos debido a que este medio no es agresivo al acero. Se conoce que el acero en suelos con potenciales de hidrógeno altos provocan una cantidad de corriente sin una apreciable pérdida de material. Sin embargo bajo condiciones severas de alcalinidad, se presenta ataque principalmente en el aluminio que resulta desfavorable.

Por otro lado los suelos ácidos tienen el efecto de retrasar la polarización de la tubería bajo los potenciales de protección, (el ácido es un agente que actúa en contra de la polarización), lo que representa un incremento de corriente requerida por el sistema de protección y por lo tanto la selección de un sistema a base de rectificadores que proporcionen la cantidad de corriente requerida.

El método más común para determinar el pH de un lugar consiste en la obtención de una muestra que al ser tratada mediante una solución y comparada con cartas determinará el potencial de hidrógeno de la zona en cuestión.

De igual manera se ha estudiado y graficado el comportamiento del hierro dentro de suelos con diferentes potenciales de hidrógeno. El diagrama de Pourbaix es de gran utilidad para determinar el comportamiento del ducto de acero inmerso en suelos con diferentes pH.

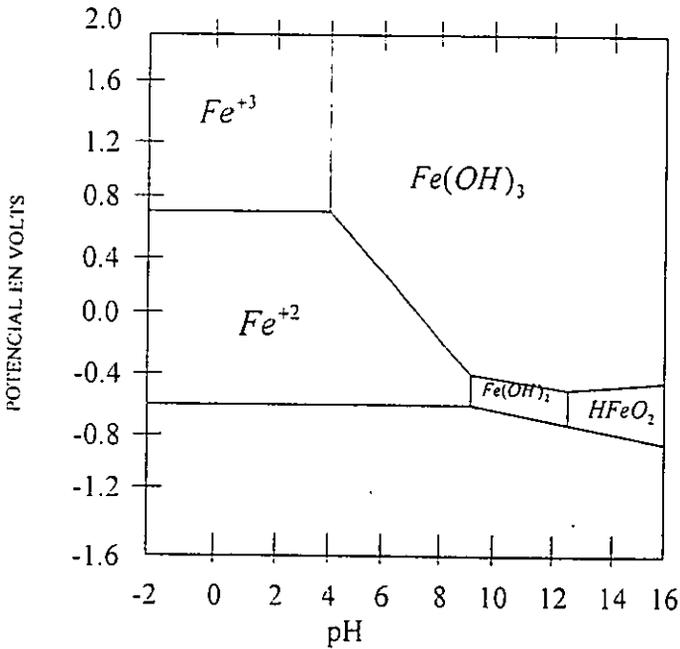


Figura 4.2 Diagrama de Pourbaix para el comportamiento del hierro en suelos de pH diferente.

En el diagrama 4.2 podemos observar que a potenciales más positivos de -0.60 Volts y pH menor que nueve los iones ferrosos son la sustancia estable por lo que el hierro deberá corroerse en estas condiciones suministrando iones Fe^3 . En otras regiones del diagrama se puede ver

que la corrosión del hierro produce iones férricos, hidróxido ferroso y en condiciones muy alcalinas iones complejos de hierro.

El principal uso de los diagramas de Pourbaix, los cuales pueden ser constituidos para todos los metales es:

- Predecir si habrá o no corrosión.
- Estimar la composición de los productos de la corrosión.
- Predecir cambios del medio ambiente que ayuden a prevenir o reducir el ataque corrosivo.

En el diagrama de Pourbaix en el sistema hierro agua, la región oscura indica que el hierro no se corroe bajo estas condiciones de potencial y pH, es decir, si el potencial de corrosión del hierro se hace suficientemente negativo, por ejemplo -1.2 Volts, el hierro no se corroerá en ningún sistema que varíe desde pH muy ácido hasta pH muy básico. Esta observación es el fundamento de la protección catódica del hierro.

De acuerdo a los sondeos y estudios de mecánica de suelos realizados para la definición del tipo de pilotes y cimentación requerida para la construcción del distribuidor vial, se reportó que el tipo de suelo predominante en la zona está constituido por arcillas poco limosas con poca arena media y fina con un pH neutro a los dos primeros metros de profundidad. Lo anterior dentro de nuestro estudio representa que no se deberán tener consideraciones adicionales motivados por el tipo de suelo, siendo necesario únicamente obtener un valor de protección mínimo de

(-0.85) Volts de acuerdo a la normatividad de Petróleos Mexicanos y de acuerdo a los valores mostrados en el diagrama de Pourbaix.

4.3.- Toma de potenciales naturales.

Como se ha mencionado en el desarrollo de este trabajo, existe un flujo de corriente en una estructura que se encuentra dentro de un medio corrosivo, ésta corriente ocasiona cambios de potencial que dependen de la resistencia del elemento, el estado del recubrimiento y del suelo en donde se encuentra. Para poder determinar la cantidad de corriente que se necesita para mantener un estado de equilibrio en el sistema, es necesario conocer la naturaleza propia del elemento que se pretende proteger, es decir debe conocerse el potencial que existe entre la estructura metálica en su estado natural y un electrodo de referencia en contacto con el medio corrosivo ó electrólito. Figura 4.3.

El potencial es un concepto eléctrico que nos indica la capacidad de un elemento metálico de ceder electrones (oxidación) al combinarse o reaccionar con otro elemento, por ejemplo, el hierro al disolverse en el medio que lo rodea está efectuando una reacción química, cediendo el metal electrones y produciendo una corriente eléctrica.

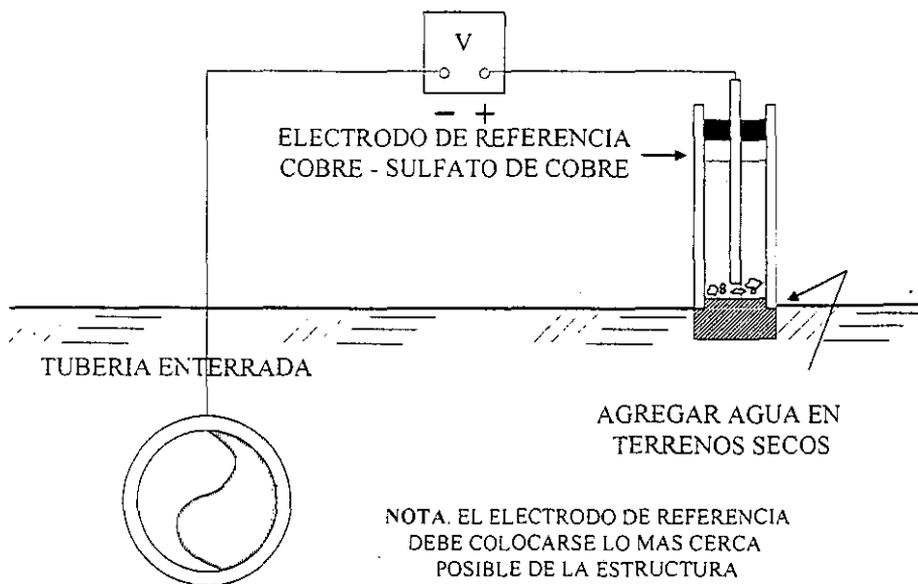


Figura 4.3 Medición de potenciales naturales.

Por el contrario hay elementos que no ceden electrones y no producen una corriente eléctrica, estos elementos aceptan electrones produciéndose en ellos el fenómeno de reducción. Para que un metal se oxide, tiene que existir otro elemento que acepte los electrones cedidos por el material en oxidación, en nuestro caso la tubería enterrada cede electrones, el agua y las sales disueltas en la tierra los acepta y establece una corriente eléctrica que va de la tubería al suelo que es el electrólito formado por agua y sales disueltas.

El potencial de oxidación que tienen los metales de producir una corriente eléctrica se explicaron y clasificaron anteriormente en la serie electroquímica.

Los valores mostrados en la serie electroquímica (tabla 2.2), nos indican el potencial teórico que se pueden obtener de estos materiales. Todos los metales que están en la tabla antes del hierro, ceden electrones más fácilmente que el hierro y por eso el valor de su potencial es más alto y en consecuencia se obtiene más electricidad de ellos, por ésta razón cualquiera de estos materiales se puede utilizar como ánodos de sacrificio para proteger al acero. Para que una corriente eléctrica pueda establecerse debe existir una diferencia de potencial, es decir un potencial alto y uno bajo para que la corriente eléctrica fluya del potencial alto al potencial bajo.

¿Hasta que valor o cual es el valor al que debe llegar el potencial de la tubería para que esté protegida?

De acuerdo al diagrama de Pourbaix mostrado anteriormente, el comportamiento del hierro en suelos con diferente potencial de hidrógeno se mantiene favorable cuando se presentan voltajes negativos mayores de -0.60 Volts. La zona oscura del diagrama, figura 4.2., muestra la zona en dónde teóricamente el hierro no se corroe, por lo tanto es necesario que el sistema alcance un potencial que se encuentre dentro del rango mostrado. Las normas de Petróleos Mexicanos consideran un voltaje mínimo de protección de -0.85 Volts, para considerar protegida la tubería, de igual manera nos indica que la tubería está funcionando como cátodo y por lo tanto no se corroerá. Se considera el valor de -1.1 Volts

como valor óptimo de protección y más de -2.5 Volts debe evitarse ya que se daña la protección mecánica.

De acuerdo a lo explicado anteriormente el ducto de acero desnudo enterrado en suelos neutros proporciona potenciales con respecto al electrodo de referencia entre -0.5 a -0.8 Volts promedio. Para ductos con recubrimiento o protección mecánica los valores obtenidos serán función del recubrimiento y sus fallas, así como del tipo de terreno. Por lo anterior una vez realizada la conexión del tramo nuevo con el existente fue preciso tomar potenciales reales a fin de considerarlos en el cálculo de la protección catódica a base de ánodos de sacrificio.

En el tramo nuevo se tomó el potencial de -0.89 Volts referido al electrodo de cobre/sulfato de cobre saturado (Cu/CuSo_4). Sin embargo, se obtuvo un valor de -0.74 Volts en el tramo existente, esto significa que una vez realizada la conexión del ducto nuevo con el anterior el ducto se comporta como un solo elemento y presenta esta diferencia de potenciales debido a corrientes que se fugan al terreno en alguna parte del recubrimiento del ducto que no fue reubicado. Por lo anterior y a fin de proteger el tramo completo del ducto de 6" a partir de la caja de válvulas y hasta la estación de regulación se deberá de considerar la longitud total de 519 metros. Se considera además la instalación de juntas aislantes tipo mono-block, al inicio y termino del tramo a fin de aislarlo con respecto al ducto de 10" y a las instalaciones de la estación de regulación.

De no realizarse éstas consideraciones se presentarán pérdidas de corriente y caída de potencial así como la posible formación de pares

galvánicos entre el ducto nuevo y el viejo. De igual manera la protección catódica instalada al ducto nuevo no proporcionará la corriente adecuada para mantener en buenas condiciones el ducto y los gastos realizados serán inútiles. Todas estas consideraciones se incluyen y son parte esencial del cálculo de la corriente necesaria para la protección del ducto.

4.4.- Toma de potenciales tubo - suelo. (Prueba de requerimiento de corriente).

Las pruebas de campo para la toma de potenciales entre tubo - suelo forman la parte esencial de las bases de diseño del sistema de protección catódica de una estructura metálica. Las pruebas consisten en aplicar corriente directa a la estructura metálica a proteger y en medir la diferencia de potencial del ducto con respecto al suelo referido a una celda de cobre - sulfato de cobre (Cu/CuSo_4), obteniendo datos suficientes para determinar la cantidad necesaria de corriente de protección. Sirve además, para determinar los puntos calientes o de drenaje de la estructura, o sea las zonas del ducto con mayor actividad del fenómeno de corrosión, se detectarán también las áreas anódicas así como la presencia de corriente que fluye por caminos distintos al circuito previsto y que produce corrosión en el punto donde la corriente abandona el metal para volver al terreno. Estas corrientes son conocidas como corrientes parásitas que se presentan en los puntos más activos de valores más negativos de potencial y de menor resistividad.

En una prueba de corriente, los potenciales deben tomarse en todos los puntos que sea posible y así determinar el punto donde se desarrollará la prueba utilizando el siguiente equipo:

- T Tubería metálica por proteger.
- G Fuente de corriente directa.
- DA Dispositivo anódico.
- I Interruptor.
- P Punto de conexión negativo de fuente de energía.
- M Multicombinado o dos multímetros.
- D Resistencia derivadora (Shunt).
- EL Dos celdas de Cu/CuSO_4 .
- V Voltímetros.
- C Punto de drenaje en el que se logra obtener el valor máximo permisible del potencial tubo-suelo.
-1.1 V. Valor óptimo de protección.
-0.85 V. Valor mínimo de protección.
- C" Punto de drenaje en el que se logra obtener el valor mínimo de protección.
- L' Longitud de la estructura metálica que se utiliza como derivador para determinar el valor de la corriente que circula por la sección C'.
- L" Longitud de la estructura metálica que se utiliza como derivador para determinar el valor de la corriente que circula por la sección C".
- L Longitud de la estructura metálica que abarca la prueba.

Cable AWG No. 10.

Cable AWG No. 6.

Este equipo se conecta como lo indica la figura 4.4.

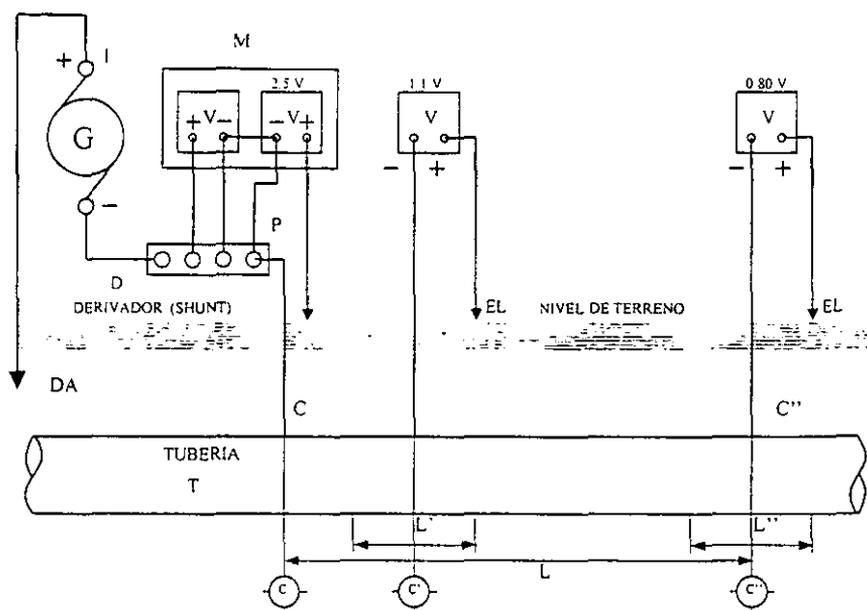


Figura 4.4 Prueba de requerimiento de corriente.

El polo negativo de la fuente de corriente se conecta en serie a la estructura metálica, intercalando un derivador que sirve para conectar el instrumento de medición de potenciales y corriente.

El polo positivo de la fuente se conecta directamente al lecho anódico que puede ser tubos de desecho o chatarra, lámina de hierro o rollo de lámina de aluminio. El lecho anódico deberá tener un área suficiente para lograr un contacto que facilite la disipación de corriente hacia el terreno, éste lecho anódico constituye el dispositivo provisional de tierra y debe de estar a una distancia mínima de 25 metros. Se debe de humedecer el terreno para que la pieza metálica haga mejor contacto con el suelo. Para

determinar la tensión aplicada en la prueba, se conecta el medidor izquierdo del multicombinado al polo positivo de la fuente y el otro polo del multicombinado se conecta sacando una derivación de la salida del reóstato.

En el punto de drenaje, el polo positivo del voltímetro se conecta en la celda de referencia y el negativo a la tubería.

Aplicación de corriente: Esta prueba consiste en suministrar corriente directa con el dispositivo auxiliar a la línea en estudio para observar su comportamiento catódico real con fines de diseño. Con la fuente se introduce gradualmente una corriente a la tubería, tomando como límite un potencial tubo - suelo de -2.5 Volts en ese punto, a fin de no provocar daños en el recubrimiento, este valor es el recomendado para suelos con resistividades mayores de 1000 ohm-cm. Para suelos con resistividades menores, el valor de potencial tubo - suelo será de -1.2 volts como es el caso de pantanos y suelos con alto contenido de cloruros.

Cuando el valor de potencial alcanza un valor de -2.5 Volts se presentan problemas en el recubrimiento que consisten en desprendimientos provocados por la formación de burbujas de hidrógeno de acuerdo al fenómeno de polarización descrito en la sección 2.2. Bajo condiciones normales de potencial de protección, la capa de polarización formada no representa problema en la frontera de la tubería y el recubrimiento mecánico. Sin embargo, existe un límite de potencial de polarización llamado sobrevoltaje de hidrógeno en donde el hidrógeno libre se desarrolla en forma de burbujas de gas las cuales rompen en la frontera

del ducto y el recubrimiento en donde se encuentra alguna falla. El crecimiento de las burbujas de hidrógeno ejercen una considerable presión que provoca el deterioro del recubrimiento exponiendo la tubería al medio corrosivo.

Por lo regular cuando se realiza este tipo de prueba se llegan a cubrir longitudes considerables de ducto, 15,000 a 20,000 metros aproximadamente con requerimientos de corriente variables con un rango de 10 a 15 Amperes, obviamente lo anterior como ejemplo ya que los requerimientos de corriente reales son los que se obtienen en campo y son resultado de todas las variables que se han mencionado en el desarrollo de este trabajo. Figura 4.5.

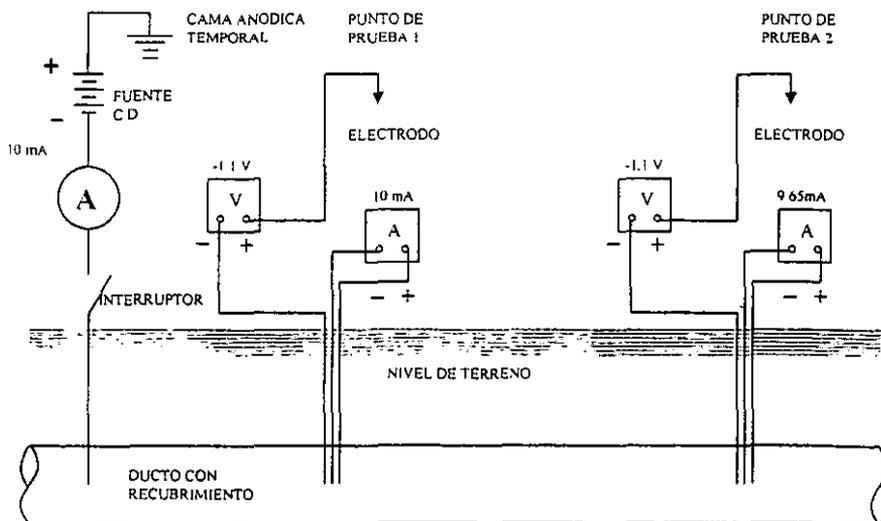


Figura 4.5 Prueba de requerimiento de corriente.

Por lo anterior es comprensible que en la obtención de la corriente necesaria para la protección del tramo de 519.00 metros fue necesaria una sola prueba de requerimiento de corriente. La prueba cubrió todo el tramo sin problema y con un requerimiento de corriente mínimo, obteniéndose los datos mostrados en la tabla 4.3.

Los datos muestran que el potencial estructura electrólito tiende a subir a un valor máximo constante, mientras que con la tensión y la corriente sucede lo contrario. Esto se debe a la polarización de la estructura metálica y el tiempo en que esto se logra es muy variable, dependiendo del estado del recubrimiento y de la resistividad del electrólito.

Tabla 4.3 Valores obtenidos en prueba de campo.

Longitud del tramo cubierto (m).	519
Voltaje en el punto de prueba (V).	- 1.75
Corriente suministrada al ducto (mA)	10
Voltaje en el punto P_1 (V).	- 1.10
Corriente en P_1 (mA).	10
Voltaje leído en el punto P_2	- 1.10
Corriente en P_2 (mA).	9.65

Los valores mostrados indican que el potencial estructura – electrólito obtenido de -1.1 Volts, se logra con una valor de corriente mínimo de 10

mA suministrado. Con los valores de corriente obtenidos en P_1 y P_2 se determina el por ciento de área desnuda y la corriente de protección.

De acuerdo a la Norma 2.374.08 de Petróleos Mexicanos el porcentaje de área desnuda se calcula de la siguiente manera.

$$\%A_{DESNUDA} = \frac{10^5(I_1 - I_2)}{A(Dc)}$$

en donde:

$\%A_{DESNUDA}$ = Porcentaje de área desnuda.

I_1 = Intensidad de corriente que pasa por el punto P_1 .

I_2 = Intensidad de corriente que pasa por el punto P_2 .

A = Area total por proteger.

Dc = Densidad de corriente estimada por unidad de superficie en los lugares en que el recubrimiento ha sido afectado. Aproximadamente se toman los siguientes valores para tuberías enterradas. 1 a 3 mA / pie². (Norma 2.413.01 PEMEX).

Normalmente para tuberías con recubrimiento nuevo se considera un 5 % de área desnuda para efectos de cálculo de requerimiento de corriente. En nuestro caso se realiza el cálculo por no conocer el estado del recubrimiento del tramo de ducto que no se ha reubicado.

Debido a lo anterior tenemos:

- $\%A_{DESNUDA}$ = Porcentaje de área desnuda.
- I_1 = 10 mA.
- I_2 = 9.65 mA.
- A = 2,799.501 pie²
- Dc = Consideramos un valor de 2 mA / pie².

Sustituyendo en la fórmula;

$$\%A_{DESNUDA} = \frac{10^5(10mA - 9.65mA)}{(2,799.501 \text{ pie}^2)(2 \frac{mA}{\text{pie}^2})} = 6.25\%$$

El porcentaje de área desnuda nos sirve para conocer la corriente necesaria para mantener el sistema de protección catódica con potenciales mínimos de -0.85 Volts. De acuerdo a los valores obtenidos y conforme a la Norma 2.413.01 de PEMEX, la corriente de diseño será:

$$I_{DISEÑO} = A_{TOTAL} \times A_{DESNUDA} \times Dc \times fs$$

en donde

- $I_{DISEÑO}$ = Corriente de diseño.
- A_{TOTAL} = Area Total por proteger.
- $A_{DESNUDA}$ = Area desnuda.
- Dc = Densidad de corriente.

fs = Factor de seguridad = 1.5

De los datos obtenidos tenemos;

$I_{DISEÑO}$ = Corriente de diseño.

A_{TOTAL} = 2,799.501 pie².

$A_{DESNUDA}$ = 6.25 %.

Dc = 2 mA/pie².

fs = 1.5

Sustituyendo los valores obtenidos en la fórmula;

$$I_{DISEÑO} = 2,799.501 \text{ pie}^2 \times 0.0625 \times 2 \frac{\text{mA}}{\text{pie}^2} \times 1.5 = 524.906 \text{ mA}$$

Este es el valor de corriente necesaria en el sistema, misma que debe ser proporcionada por los ánodos de sacrificio. La cantidad de ánodos, material y peso se explica con detalle en el capítulo siguiente.

CAPITULO V

DISEÑO DE LAS TECNICAS ELECTROQUIMICAS.

5.1.- Protección catódica con ánodos de magnesio.

La protección catódica es una técnica que controla la corrosión externa de un metal enterrado ó sumergido en contacto con un electrólito, consiste en obligar a la estructura a funcionar como cátodo en una celda de corrosión mediante la manipulación de factores electroquímicos que provocan que en la estructura ocurra el fenómeno de reducción y por consiguiente controla el ataque por efectos de la corrosión mediante el paso de la corriente que proviene de ánodos que se consumen para proteger al otro material y son llamados ánodos de sacrificio.

Esta técnica consiste en la instalación de ánodos de un material que posea un potencial negativo mayor que el del ducto, pueden ser de zinc, aluminio ó el magnesio, los cuales se instalan dentro del medio electrolítico cerca de la estructura a proteger. La selección del material se realiza de acuerdo al medio donde se encuentra la estructura a proteger debido a que cada material presenta determinado rendimiento de acuerdo al medio electrolítico en que se encuentre y al material que proteja. Para ductos de acero enterrados se utilizan por lo regular ánodos de magnesio, éstos ánodos conectados eléctricamente a la tubería proporcionan una corriente directa dentro de la estructura y neutraliza la corriente natural propia del ducto de acero, causante de la corrosión.

La protección catódica ha sido y continuará siendo una herramienta muy útil y efectiva para mitigar la corrosión. La protección catódica ha sido motivo de ahorros de millones de dólares en el campo de los ductos

previniendo fallas indeseadas. Sin embargo numerosos factores pueden causar un mal funcionamiento en el sistema de protección catódica como pueden ser:

- Un diseño pobre.
- Uso de un material inadecuado.
- Una mala instalación.
- Daño por terceras personas.
- Degradación del recubrimiento del ducto.

Considerando las fallas anteriores, es importante detectar problemas y corregirlos antes que la corrosión llegue a dañar el ducto.

Para considerar protegida una tubería de acero, deberán cumplirse los siguientes criterios estructura - electrólito.

1. Un voltaje negativo (catódico) de 0.85 volts como mínimo, medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia de (Cu/CuSo₄) saturado en contacto con el electrólito. La determinación de este voltaje se realiza con la corriente de protección aplicada.
2. Un cambio de voltaje negativo (catódico) mínimo de 300 milivolts producido por la aplicación de la corriente de protección. El cambio de voltaje se mide entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrólito.

3. Un cambio de voltaje de polarización negativo (catódico) mínimo de 100 milivolts medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia estable en contacto con el electrólito. Este cambio de voltaje de polarización se determina interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el abatimiento de la polarización.

El potencial de -0.85 Volts, referido al electrodo de cobre - sulfato de cobre, es el criterio que empleamos para estructuras nuevas, ya que existen otros criterios que deben de considerarse en casos específicos como estructuras desnudas, pobremente recubiertas o en sitios de muy alta resistividad.

Como se explicó anteriormente el potencial máximo de protección para líneas cubiertas con esmalte de alquitrán de hulla es de -2.5 Volts, referidos al electrodo de referencia. Este valor es función del recubrimiento y el electrólito en que está inmerso y se considera limite para no dañar el recubrimiento.

La selección del material del ánodo se define por la agresividad del medio en donde se encuentra la estructura, de acuerdo al establecido en la tabla 5.1. Hemos definido que el terreno en donde se realiza este estudio presenta una resistividad de $1,130.40 \Omega - \text{cm.}$, lo que determina que el magnesio es el material adecuado. El peso de un ánodo se selecciona procurando que su duración sea de 10 años aproximadamente. Se toma como base que por cada 50 miliamperes de corriente proporcionada, se consumen aproximadamente 4.5 Kg. (10 libras) de magnesio en 10 años.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Tabla 5.1 Aplicación de ánodos de diferente material de acuerdo al tipo de suelo.

Material del ánodo	Resistividad del medio ohm-cm.	Descripción del medio.
Magnesio.	800-3000	Suelos agresivos
Zinc.	20-1000	Pantanos y marismas
Aluminio.	20-400	Pantanos, marismas y lecho marino

En la tabla 5.2 se presenta una distribución de ánodos de magnesio de diferentes pesos en función del valor de la resistividad del terreno.

Tabla 5.2 Corriente proporcionada por un ánodo de magnesio instalado en suelos de diferente resistividad.

Peso del ánodo de mg	Resistividad del suelo Ohm-cm	Rango de uso Ohm-cm	Corriente en mA	Duración en años
22 kg. (48 lbs)	720	0-1,000	285	10
14.5 kg. (32 lbs)	1,050	1,000-2,000	183	10
7.72 kg. (17 lbs)	1,900	2000-3000	97	10
4.1 kg. (9 lbs)	3,200 en adelante	3000 en adelante	51	10

Considerando los datos de la tabla 5.2, así como la resistividad del terreno obtenida, seleccionamos los ánodos de 32 libras que

proporcionan una corriente de 183 mA. Además de lo anterior debemos considerar.

1. De acuerdo a la tabla anterior y la figura 5.1 éste ánodo presenta una vida útil del dispositivo anódico aproximada de 10 años para un terreno con resistividad de 1,050 Ω - cm.
2. Este tipo de ánodo proporcionará suficiente corriente a la estructura metálica para su protección.

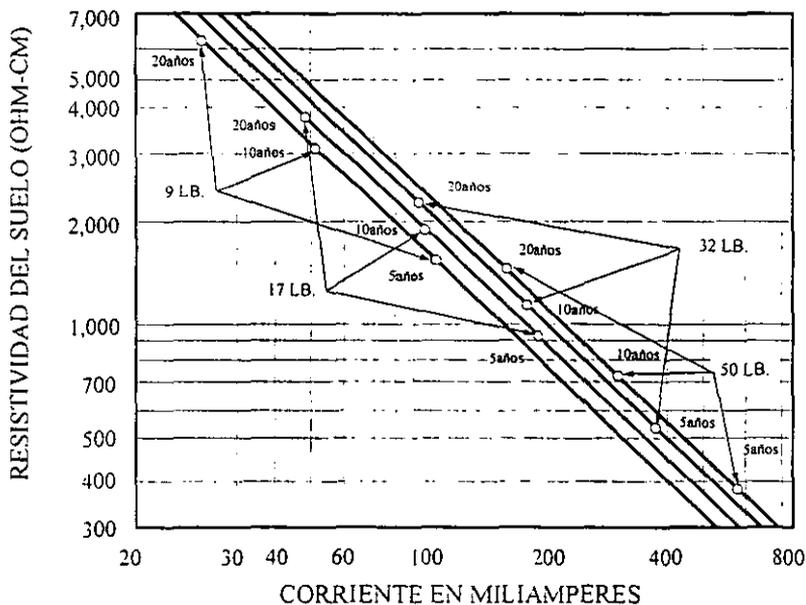


Figura 5.1 Vida útil de ánodos de sacrificio a diferentes resistividades de suelo.

En la figura 5.1 se presenta gráficamente la vida útil de los diferentes tipos de ánodos de magnesio de acuerdo a la resistividad del terreno y a

la cantidad de corriente que proporciona el ánodo. Podemos observar por ejemplo, que el ánodo de 32 libras tendrá una duración de 10 años en un suelo con resistividad de $1,050 \Omega - \text{cm}$, tendrá una vida útil de 5 años en un suelo con resistividad de $550 \Omega - \text{cm}$., aproximadamente y una vida útil de 20 años en un suelo con resistividad de $2,200 \Omega - \text{cm}$. En nuestro caso se tiene una resistividad de $1,130.40 \Omega - \text{cm}$., lo que representa una vida útil un poco mayor a los 10 años.

Es importante que una vez instalado el sistema de protección catódica se lleven a cabo mediciones eléctricas periódicamente para verificar el correcto funcionamiento del sistema. Estas mediciones se realizan en postes instalados para tal efecto a lo largo del ducto.

Una vez que se conoce la corriente necesaria de protección y de que se ha seleccionado el tipo de ánodo adecuado que cumple con los requerimientos de corriente y vida útil se determina el número de ánodos a utilizar.

$$N_{\text{ANODOS}} = \frac{I_{\text{PROTECCIÓN}}}{I_{\text{ANODO}}}$$

donde

N_{ANODOS} = Número de ánodos.

$I_{\text{PROTECCIÓN}}$ = Corriente de protección.

I_{ANODO} = Corriente entregada por un ánodo.

De los datos tenemos.

N_{ANODOS} = Número de ánodos.

$I_{PROTECCIÓN}$ = 524.906 mA.

I_{ANODO} = 183 mA.

Sustituyendo los valores obtenidos en la fórmula;

$$N_{ANODOS} = \frac{524.906mA}{183mA} = 2.83 \text{ Anodos.}$$

Por lo tanto consideramos **3 ánodos** de 32 libras de peso, los cuales es recomendable instalarlos individualmente y espaciados a 130 metros a lo largo del ducto. La instalación individual es recomendable para obtener un mejor rendimiento y duración de acuerdo a lo descrito en el capítulo anterior.

De igual manera es posible conocer la cantidad de ánodos de sacrificio necesarios para la protección de un ducto cuando es nueva la instalación y cuando no se cuenta con el equipo necesario para realizar la prueba de requerimiento de corriente descrita anteriormente. Este cálculo se realiza de manera sencilla de acuerdo a la fórmula mencionada en el capítulo anterior:

$$I_{DISEÑO} = A_{TOTAL} \times A_{DESIGNADA} \times Dc \times fs$$

en donde

$I_{DISEÑO}$ = Corriente de diseño.

A_{TOTAL} = Area Total por proteger = 2,799.501 pie².

$A_{DESNUDA}$ = Area desnuda = 5%

Dc = Densidad de corriente = 2 mA/pie².

fs = Factor de seguridad = 1.5

Como se ha mencionado para ductos nuevos se considera un área desnuda entre 2 – 5%, consideramos 5% para considerar el tramo existente que no fue reubicado y que se pretende proteger, por lo tanto:

$$I_{DISEÑO} = 2,799.501 \text{ pie}^2 \times 0.05 \times 2 \frac{\text{mA}}{\text{pie}^2} \times 1.5 = 419.92 \text{ mA} = 0.420 \text{ A}$$

Para conocer la cantidad de material a utilizar, procedemos de la siguiente manera. Conociendo el valor electroquímico del ánodo de magnesio que es de 17.4 libras/A x año;

$$0.420 \text{ A} \times 17.4 \frac{\text{lb}}{\text{A} \times \text{año}} = 7.308 \frac{\text{lb}}{\text{año}}$$

Si deseamos una protección por 10 años, entonces la cantidad requerida será;

$$7.308 \frac{\text{lb}}{\text{año}} \times 10 \text{ años} = 73.08 \text{ lb.}$$

De acuerdo a la resistividad de terreno seleccionamos ánodos de 32 lb. de peso y obtenemos lo siguiente:

$$N_{\text{ánodos}} = \frac{73.08 \text{ lb}}{32 \frac{\text{lb}}{\text{ánodo}}} = 2.28 \text{ ánodos}$$

Como puede observarse, la cantidad de ánodos de magnesio necesario para la protección del ducto es muy parecido al obtenido anteriormente, por lo que podemos considerar 3 ánodos de 32 libras de peso instalados individualmente y espaciados a 130 metros a lo largo del ducto.

CAPITULO VI

ANALISIS DE COSTOS.

La selección adecuada del sistema de protección catódica en un ducto de transporte de hidrocarburos, redundará en una serie de beneficios tanto económicos como sociales. En primer lugar se contará con una instalación protegida contra los efectos de la corrosión, lo cual permitirá una vida útil mayor en condiciones aceptables de servicio, disminuyendo considerablemente los costos de reparación y sobretodo los riesgos que representa la existencia de fuga de producto. Para ductos que transportan productos peligrosos como gas natural, turbosina o algún otro tipo de producto existe siempre la posibilidad de fuego, explosión ó pérdida de vidas humanas si se desarrolla una falla y no es detectada a tiempo y reparada adecuadamente. A pesar que lo anterior son solo posibilidades, (aunque posibilidades reales), el costo que significa la implementación de un sistema de protección catódica es siempre conveniente y no debe escatimarse ya que redundará posteriormente en la prevención de daños considerables.

En trabajos de control de corrosión, el principal objetivo es mantener al sistema libre de corrosión al mas bajo costo. En este capítulo se establecen las bases económicas que hacen de un sistema de protección catódica una alternativa confiable y económica.

6.1.- Comparación de costos.

Anteriormente cuando se instalaba un ducto nuevo se consideraba un sobre-espesor de la pared del ducto de acero de 1/16" adicional para asi

obtener una "corrosión permitida". Sin embargo, el proceso de corrosión una vez iniciado deteriora el material constantemente hasta llegar al punto donde será necesario, a pesar del excedente de espesor, el cambio de la estructura. En adición a lo anterior el costo del acero adicional repercute seriamente en el costo del proyecto.

Podemos establecer la diferencia básicamente en la comparación de costos invertidos en un periodo de tiempo determinado en una tubería que ha sido instalada sin ningún tipo de protección y un ducto catódicamente protegido. Es decir, se debe monitorear el ducto sin protección, se establece el número de fallas que se presentan en ese tiempo y se determinan los costos necesarios para la reparación de los mismos, comparándose posteriormente con los costos realizados en la protección del ducto.

Una vez que una sección de ducto inicia el desarrollo de fallas por causa de la corrosión, la experiencia ha mostrado que más adelante las fallas se desarrollan de manera constante si el daño en el ducto no se repara o se aplica algún tipo de protección. Si la acumulación de fallas se grafica contra la edad de la tubería en años, el resultado aproximado será una línea recta donde se observa la cantidad de fallas. Figura 6.1

La figura 6.1 es una buena indicación de la forma en que tales agujeros pueden incrementarse sin contar con un control de corrosión. En este caso la primera falla aparece hasta el cuarto año, y un total de siete fallas se han desarrollado cuando la línea tiene doce años. Una tendencia definitiva se ha establecido, como se observa en la figura 6.1, en los siguientes diez años existirán aproximadamente setenta nuevas fallas si

la corrosión no es controlada. Como se observa el número de fallas desarrolladas cada año aumentará de manera constante hasta que la línea sea inoperable si la corrosión no es controlada.

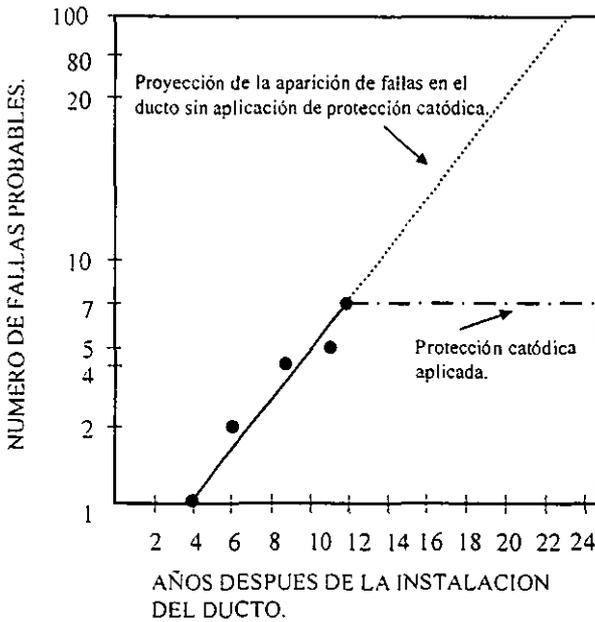


Figura 6.1 Proyección de aparición de fallas en un ducto de acuerdo a su protección.

Si el desarrollo de nuevas fallas se detiene por la aplicación de un sistema de protección catódica, como se observa en la figura 6.1, entonces es posible también comparar los costos del sistema de protección catódica contra los costos de reparación de fallas. De acuerdo a la gráfica la aplicación del sistema de protección catódica en el doceavo año salvará el costo de reparación de aproximadamente setenta fallas.

Para determinar el costo que involucra la reparación de fallas en un ducto sin protección deberá de incluirse lo siguiente:

Costo promedio de reparación por falla.- Debe incluir el estudio de fallas que consiste básicamente en la utilización de un aparato llamado "diablo instrumentado", el cual recorre el ducto internamente y detecta a través de ultrasonido las fallas más comunes como son pérdida de espesor por oxidación, abollamiento, laminación o aplastamiento, entre otras. Debe incluir también el costo de materiales, maquinaria y equipo. Costos de transportación, tiempos de reparación, sueldos de personal, costo por paro de suministro del producto ocasionado por la reparación, etc.

Costo promedio por daños en propiedades aledañas.- Es decir el costo de las afectaciones a otras estructuras cercanas a las zonas donde se presenta la falla, (vialidades, puentes, etc.).

Costo del producto derramado.- Depende del producto que sea transportado, la presión de trabajo de la línea el tamaño de la falla y el tiempo de reparación.

Costos por mantenimiento.- Deberá considerarse que la tubería presentará una vida útil menor y la aparición constante de fallas desarrolladas por el proceso corrosivo.

Costos adicionales.- Tales como seguros, fianzas, permisos, así como los costos asociados por la situación que presenta cada ducto en particular.

Ahora consideremos los gastos realizados durante la construcción del ducto cuando se instala un sistema de protección catódica.

Costo de instalación.- Será el costo de la tubería más el estudio del sistema de protección catódica, selección y aplicación del mismo, maquinaria, equipo, mano de obra, personal, etc.

Costo por mantenimiento.- Corridas de diablo instrumentado cada 5 años, cambio de ánodos de sacrificio cada diez años aproximadamente ó en su caso el pago de energía eléctrica cuando se ha optado por un sistema de corriente impresa. Gastos de reparación de fallas, las cuales serán menor en cantidad al contar con el ducto protegido.

En resumen podemos considerar que la inversión realizada en la instalación de un sistema de protección catódica siempre tendrá beneficios económicos y de servicio en un plazo determinado. El gasto realizado siempre se absorbe en el trascurso de la vida de la instalación y podrá observarse que en realidad el costo de estos sistemas resulta bajo en comparación con los demás gastos de instalación y de los beneficios obtenidos.

6.2.- La economía de un buen mantenimiento.

La mejor contribución a una buena economía es el mantenimiento adecuado del sistema manteniéndolo en óptimas condiciones de trabajo,

verificando periódicamente que los potenciales existentes se encuentren dentro de los rangos indicados en capítulos anteriores. El constante y eficiente mantenimiento no siempre se practica, y por esta causa el sistema se deteriora y no brinda la corriente necesaria de control del proceso corrosivo, por lo que el gasto invertido se pierde y fallas que pudieran prevenirse aparecen.

Por lo anterior es fundamental el monitoreo de las corrientes, mismas que deben encontrarse dentro de los rangos de protección, realizando las mediciones frecuentes en los postes de medición que para tal efecto se instalan a lo largo de la red. De igual manera se debe programar adecuadamente la reparación de fallas en un tiempo determinado a fin de evitar paros de suministro constante por reparaciones.

Durante el proceso de instalación del sistema deberá tenerse el mayor cuidado en la aplicación de las diferentes capas de recubrimientos y la instalación de ánodos, a fin de evitar sobrecostos por trabajos mal ejecutados.

Por otro lado es importante concluir que, afortunadamente a la fecha se ha tomado una mayor atención a los beneficios que proporciona la inversión de recursos en estudios e implementación de sistemas de protección catódica en las instalaciones expuestas a medios corrosivos. En el pasado no se contaba con esta conciencia, debido a que estos sistemas quedan enterrados y no son tangibles en comparación con la construcción de otro tipo de instalaciones como pozos de extracción ó centros de distribución, lo que provocaba la atención de recursos económicos a este tipo de proyectos más tangibles, con el subsecuente

descuido de instalaciones enterradas que quedaban expuestas al fenómeno corrosivo.

CONCLUSIONES.

Durante el desarrollo de este trabajo, hemos estudiado el fenómeno de corrosión y la forma en que se presenta y desarrolla en los ductos de acero que constituyen el medio más confiable y económico de transporte de hidrocarburos. De igual manera se ha mencionado una alternativa confiable y económica a base de ánodos de sacrificio que sirve para controlar el fenómeno de corrosión que se presenta en las estructuras de acero enterradas y expuestas al fenómeno de corrosión.

El trabajo se ha ejemplificado mediante la realización de un estudio de protección catódica en un tramo de ducto reubicado debido a la construcción de un distribuidor vial. Una vez realizado este trabajo podemos concluir lo siguiente:

- La corrosión es un fenómeno que provoca pérdidas económicas considerables por el cambio parcial ó total de estructuras.
- La corrosión es un fenómeno de tipo electroquímico que puede ser controlado al controlar las corrientes involucradas dentro del proceso.
- Todos los materiales tienen un potencial natural que determina su comportamiento al exponerlo dentro de un proceso corrosivo.

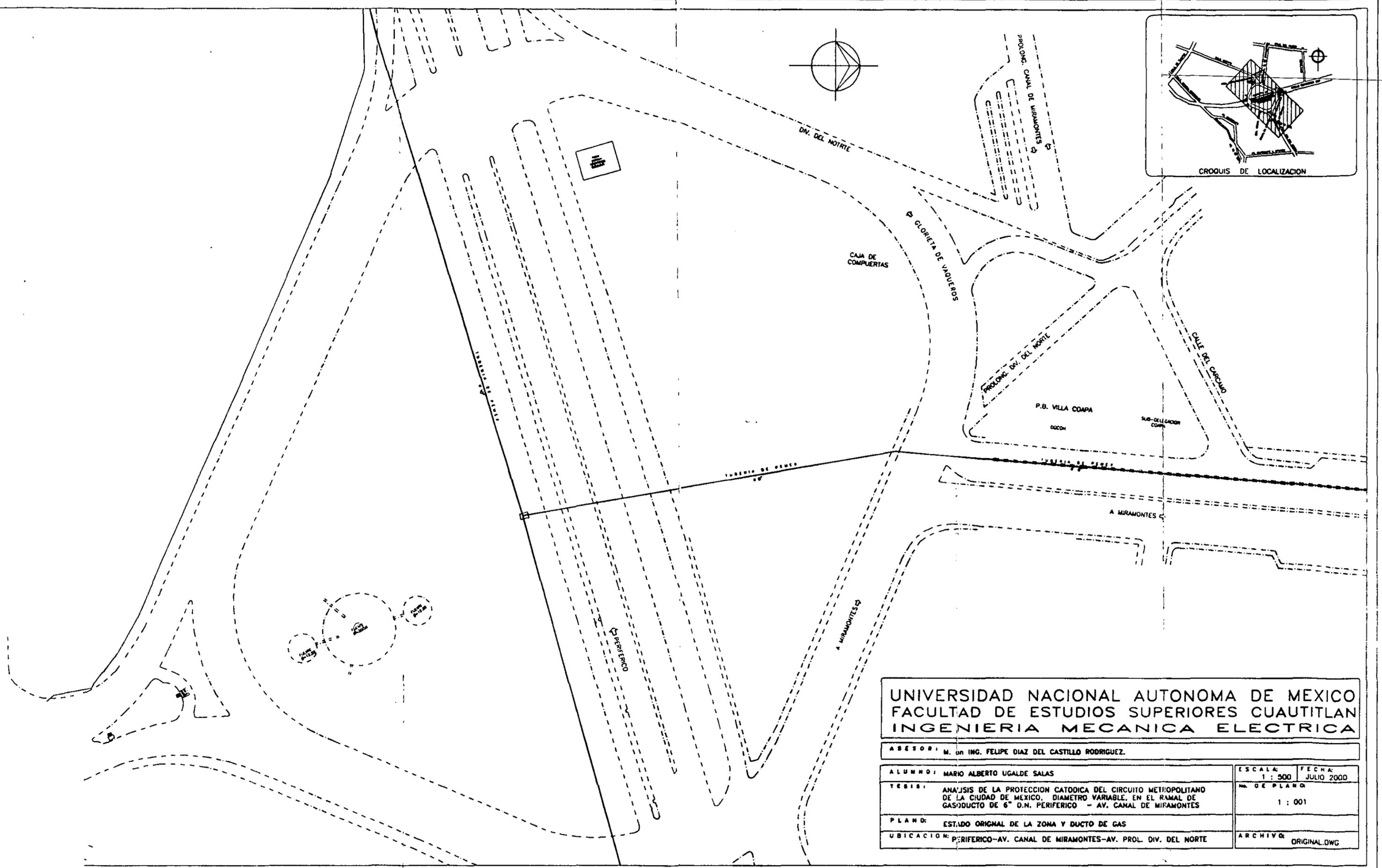
- Al conectar eléctricamente dos materiales con diferente potencial, el más electronegativo se corroerá protegiendo al otro material.
- En ductos de transporte de hidrocarburos se utiliza el magnesio como material de sacrificio, el cual protege al acero.
- La protección mecánica es un tipo de recubrimiento anticorrosivo que proporciona una adecuada protección a los ductos de acero, pero este debe ser reforzados por un sistema de protección catódica a fin de alcanzar una máxima protección.
- La experiencia es un factor determinante en el estudio y selección de los materiales y el sistema de protección catódica a utilizar, ya que existen muchas variables que modifican el comportamiento de los sistemas, (tipo de suelo, humedad del terreno, lugar donde se realizan las mediciones, la existencia de instalaciones metálicas aledañas, forma en que se realizan las mediciones, etc.).
- Debe tenerse especial cuidado en la toma de potenciales, ya que una mala medición puede provocar la toma de decisiones erróneas.
- El principal problema presentado en la zona fue la existencia de una gran infraestructura de instalaciones generadas debido al crecimiento desmedido de la población. Esto ha motivado la afectación de derechos de vía que debieran por seguridad ser respetados.

- Afortunadamente se ha tomado más conciencia de la importancia que representa contar con instalaciones protegidas contra el fenómeno de corrosión, implementando recursos para el estudio e instalación de sistemas de protección catódica.
- Los sistemas de protección catódica son prácticos, simples, económicos y son una eficiente alternativa para controlar el fenómeno de corrosión.
- Los sistemas de protección catódica brindan una protección adecuada a un costo relativamente bajo en comparación con el ahorro generado por la disminución de reparación de fallas.

Bibliografía.

- Fontana and Greene. Corrosion Engineering. United States of America, McGraw-Hill, Inc, Second Edition, 1978, 465 p.
- A.W. Peabody. Control of pipeline corrosion. Editorial NACE, 1967, 184 p.
- Herbert H Ihlín. M.I.T. Corrosión y control de Corrosión. Edit. Urmo, S.A. 394 p.
- F.A. Champion. Ensayos de Corrosión. Edit. Urmo, S.A. 470 p.
- A.J. Maurin. Manual de Anticorrosión. Edit. Urmo, S.A. 648 p. (Corrosión Ind. Química Petrolífera.
- Flinn y Trojan. Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones. Edit. McGraw-Hill, 741 p.
- Jafee Bernard. Química. Edit. Publicaciones Cultural, 594 p.
- Depardón Sotelo Felipe. Corrosión y Oxidación en materiales Metálicos. 51 p.
- PEMEX. Recubrimientos para protección Anticorrosiva. Normas 2.132.01, 3.132.01, 4.132.01.
- PEMEX. Sistemas de tuberías de transporte y distribución de gas. Norma 2.374.08.
- PEMEX. Sistemas de protección catódica. Norma 2.413.01.
- Marshall E. Parker. Corrosion and its control. 1982.
- PEMEX. Manual de Procedimientos de Ingeniería de Diseño. Subdirección de Proyecto y Construcción de Obras Gerencia de Ingeniería de proyecto. 215 p

ANEXO I



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
 FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 INGENIERIA MECANICA ELECTRICA

ASESOR: M. en ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ.

ALUMNO: MARIO ALBERTO UGALDE SALAS

TESIS: ANALISIS DE LA PROTECCION CATODICA DEL CIRCUITO METROPOLITANO DE LA CIUDAD DE MEXICO, DIAMETRO VARIABLE, EN EL RAMAL DE GASODUCTO DE 6" D.N. PERIFERICO - AV. CANAL DE MIRAMONTES

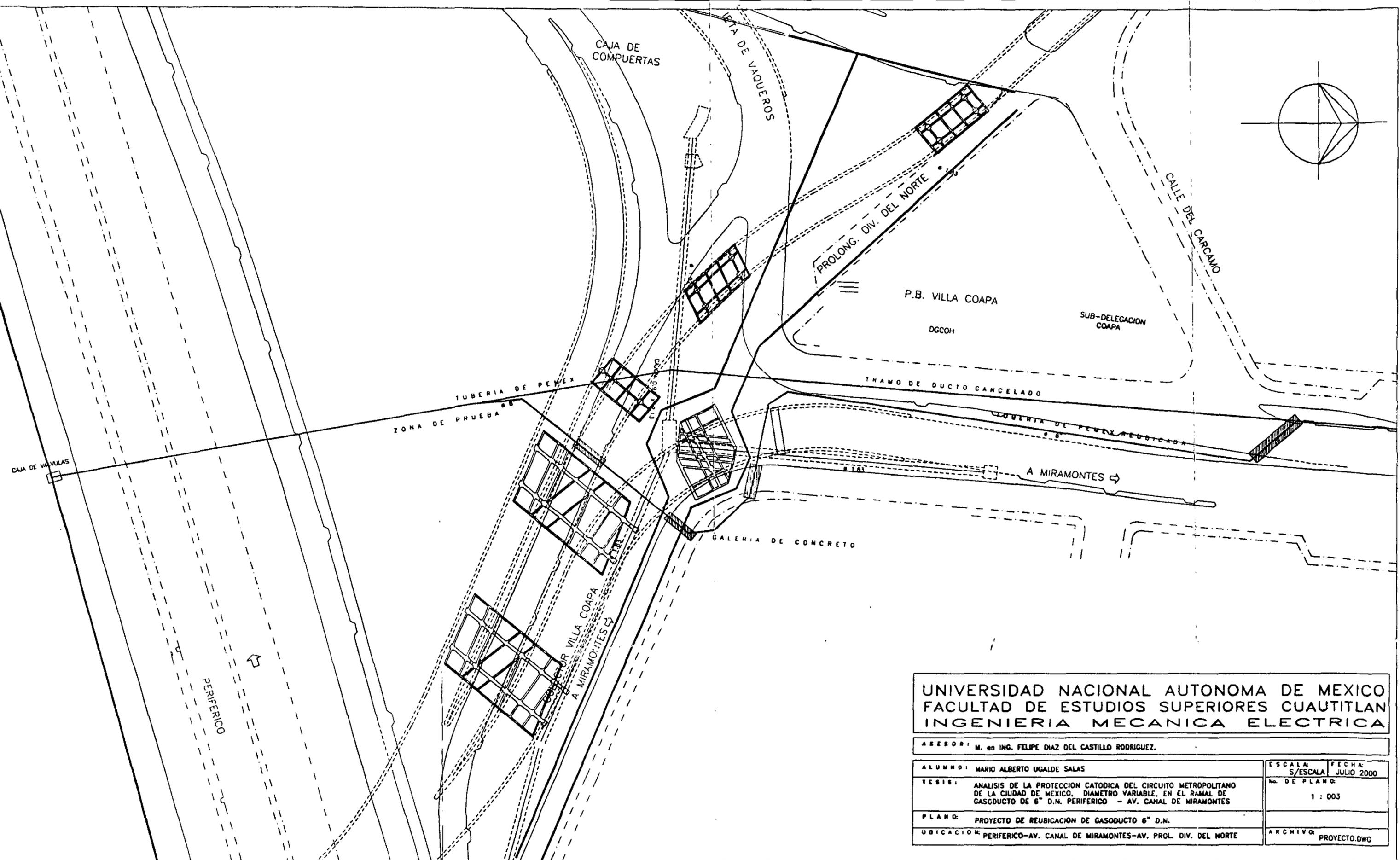
PLANO: ESTADO ORIGINAL DE LA ZONA Y DUCTO DE GAS

UBICACION: PERIFERICO-AV. CANAL DE MIRAMONTES-AV. PROL. DIV. DEL NORTE

ESCALA: 1 : 500
 FECHA: JULIO 2000

NO. DE PLANO: 1 : 001

ARCHIVO: ORIGINAL.DWG



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN INGENIERIA MECANICA ELECTRICA			
ASESOR: M. en ING. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ.			
ALUMNO: MARIO ALBERTO UGALDE SALAS		ESCALA: S/ESCALA	FECHA: JULIO 2000
TESIS: ANALISIS DE LA PROTECCION CATODICA DEL CIRCUITO METROPOLITANO DE LA CIUDAD DE MEXICO, DIAMETRO VARIABLE, EN EL RAMAL DE GASODUCTO DE 6" D.N. PERIFERICO - AV. CANAL DE MIRAMONTES		No. DE PLANO: 1 : 003	
PLANO: PROYECTO DE REUBICACION DE GASODUCTO 6" D.N.			
UBICACION: PERIFERICO-AV. CANAL DE MIRAMONTES-AV. PROL. DIV. DEL NORTE		ARCHIVO: PROYECTO.DWG	