

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



*«Proyecto de Protección contra
Corrosión Submarina y por Suelos
en una Planta Receptora de
Productos Petrolíferos»*

*Tesis para optar el Título profesional de
INGENIERO MECANICO*

Oswaldo Punto Morales

Promoción 85-I

Lima - Perú

1987

"PROYECTO DE PROTECCION CONTRA CORROSION SUBMARINA Y POR SUELOS
EN UNA PLANTA RECEPTORA DE PRODUCTOS PETROLIFEROS"

INDICE

	<u>Pág.</u>
PROLOGO	1
1. INTRODUCCION	3
2. PREMISAS BASICAS DE LA CORROSION POR AGUA DE MAR Y SUELOS	5
2.1 Generalidades de corrosión	5
2.1.1 Mecanismo de corrosión electroquímica	5
2.1.2 Cinética de la corrosión	8
2.2 Corrosión por agua de mar	10
2.2.1 Características corrosivas del agua de mar	10
2.2.2 Efectos de corrosión por agua de mar	13
2.3 Corrosión por suelos	14
2.3.1 Mecanismo de corrosión por suelos	14
2.3.2 Comportamiento conductivo del suelo	15
3. DESCRIPCION DE LA PLANTA	18
3.1 Descripción general	18
3.2 Instalaciones electromecánicas	19
3.2.1 Sistema de recepción de productos a la planta	19
3.2.2 Sistema de almacenaje y despacho	19
3.3 Sectores de incidencia de la corrosión	20
3.4 Operación y mantenimiento de la planta	21
3.5 Materiales de fabricación utilizados	23

	<u>Pág.</u>
4. SISTEMAS DE PROTECCION Y CONTROL EXISTENTES ACTUALMENTE	25
4.1 Recubrimientos y previsión de construcción para tanques	25
4.2 Recubrimiento de tubería submarina y subterránea Protección catódica por corriente impresa	27
5. EVALUACION Y DETECCION DEL FENOMENO DE CORROSION EN ESTUDIO	30
5.1 Parámetros principales en la evaluación y detección de la corrosión	30
5.1.1 Polarización y su incidencia en la corrosión	31
5.1.2 Polarización lineal	35
5.1.3 Extrapolación de Tafel	37
5.1.4 Resistividad del medio corrosivo	39
5.2 Ensayos de corrosión	43
5.2.1 Ensayo para evaluar velocidad de corrosión	46
5.2.1.1 Agentes predominantes en la velocidad de corrosión	49
5.2.1.2 Relaciones matemáticas en velocidad de corrosión	51
5.2.2 Ensayo para medir la resistividad del medio	61
5.2.2.1 Corrientes erráticas	68
5.2.2.2 Mediciones complementarias	69
5.2.3 Descripción del ensayo efectuado con cupones de corrosión	70
5.2.4 Descripción de la prueba de resistividad y corrientes erráticas	75
5.3 Sistemas de protección anticorrosiva aplicables	78

	<u>Pág.</u>
6. SISTEMAS DE PROTECCION QUE SE PROPONE	82
6.1 Sistemas de protección catódica	82
6.1.1 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio	83
6.1.2 Protección catódica mediante corriente impresa	89
6.1.3 Instrumentos necesarios para pruebas de protección catódica	92
6.1.4 Modelos digitales de los sistemas de protección catódica	94
6.1.4.1 Medidas de impedancia y análisis digital mediante microprocesador	94
6.1.4.2 Cálculo de las pendientes de Tafel mediante un programa	99
6.2 Sistema de protección mediante recubrimientos	106
6.2.1 Recubrimientos por pinturas	108
6.3 Sistema mixto de revestimiento y protección catódica	110
6.4 Factores económicos para protección anticorrosiva	111
6.5 Mediciones efectuadas para el diseño del sistema protección catódica y recubrimientos	113
6.5.1 Medición de potencial estructura suelo	114
6.5.2 Medición de corriente requerida para protección	115
6.6 Cálculo del sistema de protección catódica y recubrimientos	117
6.6.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio	118
6.6.2 Protección catódica por corriente impresa	127
6.7 Especificaciones de operación y mantenimiento	137

	<u>Pág.</u>
6.8 Evaluación económica para las alternativas de solución	139
CONCLUSIONES	145
BIBLIOGRAFIA	147
APENDICE	

PROLOGO

La corrosión es uno de los problemas más frecuentes en la industria petrolera en todos los procesos y en diversas formas, afectando las instalaciones en algunos casos con grandes pérdidas económicas. El presente proyecto surge al observarse fallas por corrosión en líneas de tuberías submarinas y planchas de fondo de los tanques de almacenamiento.

El contenido del trabajo comienza con un planteamiento de los tipos de corrosión, tomando más énfasis en lo relacionado con agua de mar y suelos; enseguida se hace una presentación de la planta en estudio, describiendo las instalaciones electromecánicas, señalando las partes críticas en cuanto a problemas de corrosión. Asimismo se describe la protección actualmente existente en la planta.

Se efectúa una evaluación del fenómeno de corrosión con mediciones de campo mediante cupones de corrosión instalados en diferentes zonas, datos históricos de las instalaciones mecánicas y mediciones potenciales dinámicas del sistema estructura-medio corrosivo. Seguidamente se evalúan alternativas de solución desde los puntos de vista técnico y económicas, seleccionando la mejor para finalmente acondicionar un seguimiento y mantenimiento, completando una protección eficiente.

La elaboración de este trabajo surgió gracias al apoyo de PETROPERU S.A. mediante el sistema de Beca de Tesis desarrollado en el Departamento de Productos Químicos, contando con el asesoramiento del Ing. José Struque y la colaboración del Departamento de Ingeniería. Deseo agradecer a la Universidad Nacional de Ingeniería por mi formación profesional, en particular al Ing. Miguel Saenz L., distinguido Maestro Universitario y al Ing. Justo Yanque M. por su apoyo incondicional en las pruebas de campo más la planificación del presente trabajo. Asimismo quedo agradecido a SIMA-CALLAO por la colaboración bibliográfica y laboratorio.

1.

INTRODUCCION

El proyecto desarrolla un sistema de protección contra corrosión para tuberías sumergidas en agua de mar y fondo exterior de tanques de almacenamiento afectado por el suelo. Se espera demostrar la existencia de una protección mixta que trata eficientemente desde el punto de vista técnico-económico para el tipo de planta en estudio.

Al demostrar un sistema efectivo, como las de protección catódica y recubrimientos, tenemos que haber descartado varias soluciones al problema de corrosión, en algunos casos por restricciones de la planta en estudio y otros por su inconveniencia técnica, especialmente considerando el performance de las partes componentes del sistema.

La metodología de trabajo es plantear las premisas teóricas y ensayos en laboratorios desarrollados mediante simulaciones ocurridas in situ, como una referencia a las pruebas de campo basadas en mediciones potenciodinámicas, tratando de llevar el estudio a un nivel más realista, apoyado en la teoría electroquímica para los cálculos de protección anticorrosiva.

El desarrollo del presente proyecto sirve como modelo para la protección de estructuras enterradas y submarinas en general, bastando con

solamente realizar las correspondientes mediciones de campo. Además de contemplar el diseño para estructuras ya instaladas, como parte de mantenimiento en la planta, se muestra la aplicación para sistemas que serán instalados con las precauciones del caso contra la corrosión.

La magnitud del análisis queda limitada por la disponibilidad de elementos estandarizados en lo que respecta a su fabricación para la protección anticorrosiva, como el material de la estructura a proteger, ánodos de sacrificio y recubrimientos, entre otros.

2.

PREMISAS BASICAS DE LA CORROSION POR AGUA DE MAR Y SUELOS

2.1 Generalidades de corrosión

La corrosión es definida como el deterioro de un metal con pérdida de sus propiedades, en el caso de un metal por reacción con el medio ambiente que lo rodea pierde su estado elemental para retornar al estado combinado de origen, es decir la corrosión puede considerarse como un proceso inverso a la metalurgia extractiva.

El proceso de corrosión puede ser química cuando el material reacciona con un medio no iónico, tal es el caso de oxidación en aire a altas temperaturas; mientras que la corrosión electroquímica se produce al entrar los metales en contacto con medios de conductividad electro-lítica, caso del agua, humedad atmosférica y suelos.

2.1.1 Mecanismo de corrosión electroquímica

Las reacciones implican movimiento de electrones desde las regiones anódicas (lugar de oxidación) a las regiones catódicas (lugar de reducción), se completa el circuito eléctrico a través del electrólito y como conductor electrónico el contacto eléctrico entre ánodo y cátodo. A todo el conjunto anterior se le conoce como celda electroquímica, es requisito que todos ellos existan simultáneamente

para que funcione la celda electroquímica, pudiendo ser de los siguientes tipos:

a) Celdas galvánicas

Conocida como celda de metales disímiles (potenciales electroquímicas diferentes), en muchos casos se puede conocer el voltaje de una celda galvánica mediante el uso de la tabla llamada serie electromotriz de los metales, asignándole al hidrógeno el potencial de "0", correspondiendo los valores positivos a los metales más activos y los valores negativos a los metales más nobles, estos valores de potenciales son tomados a 25⁰C con metales puros y en circuito abierto (sin flujo de corriente), ver Tabla 1.

b) Celda de diferente concentración salina

Sucede cuando dos electrólitos con diferentes concentraciones de sales disueltas, están en contacto con la estructura metálica, actuando la zona de mayor concentración salina como ánodo, este caso es muy frecuente en estructuras enterradas como tuberías y fondo de tanques.

c) Celda de concentración de oxígeno

Es similar a la anterior, pero en este caso la zona con mayor concentración de oxígeno actúa como cátodo y la de menor concentración como ánodo; la ecuación de Gibbs nos permite calcular la energía libre de celdas electroquímicas mediante concentración de iones metálicos o presiones parciales de vapor de oxígeno. Este tipo de celda ocurre en estructuras enterradas o en semienterradas frecuentemente.

d) Celdas de bacterias

Fundamentalmente causada por las bacterias sulfatoreductoras (utilizan el hierro en su proceso metabólico), son microorganismos que generan iones sulfuro, emplean los sulfatos del suelo o los disueltos en el agua, la corrosión puede ser localizada e intensa. Estas bacterias pertenecen al grupo de las anaeróbicas y son activas únicamente en ambiente sin aire, esto ocurre frecuentemente debajo de recubrimientos o depósitos.

e) Celda de temperatura

Se forma por variación de temperatura en el metal, originando diferencia de potencial y consecuentemente corrosión, la zona de alta temperatura actúa como ánodo. Este tipo de celda no es tan común, aparecen más como agentes aceleradores de otros tipos de corrosión.

f) Celda de esfuerzos

Formado por esfuerzos residuales del proceso de fabricación o daños causados por el uso, la zona de mayor esfuerzo actúa como ánodo. Se puede ubicar este tipo de celda en tuberías dobladas en frío, eje de bombas mal alineadas y sometidas a un ambiente corrosivo.

g) Celda de corriente vagabunda

Es una celda que tiene un flujo de corriente proveniente de una fuente externa que ocasiona corrosión en el sistema, ingresando por el cátodo y saliendo por el ánodo, en los puntos de descarga se muestran localizadas pudiendo ser muy severas. La fuente de corriente puede ser un generador, línea de corriente, un rectific

cador de protección catódica o ferrocarril eléctrico; en todos los casos son corrientes continuas (D.C.).

h) Celda de película de superficie

Se forman películas de óxido en la superficie del metal, formando zonas anódicas y catódicas en un mismo material (caso del hierro y acero al carbono), mientras que en el aluminio y los aceros inoxidable la película de óxido es uniforme y protegen a la estructura en general. Esta forma de celda se presenta cuando se cambian ciertas partes de tuberías, actuando la tubería nueva como ánodo y la antigua como cátodo.

2.1.2 Cinética de la corrosión

La intensidad del proceso corrosivo depende muy en particular de la facilidad de evolución de los procesos anódicos, catódicos y de la fuerza impulsora y reacción electroquímica. Por ello mediante la ecuación de Faraday se puede relacionar la velocidad del proceso corrosivo con una variable medido por instrumentos, esto es la intensidad de corriente.

La velocidad de corrosión es directamente proporcional a la densidad de corriente que circula por el ánodo y el cátodo, estas pueden ser diferentes cuando las superficies son diferentes, sin embargo, la intensidad de corriente debe ser la misma y se puede plantear la velocidad de corrosión:

$$V_c = K \times I \quad \dots\dots (1.1)$$

En donde K es una constante de proporcionalidad, I la intensidad de corriente y V_c la velocidad de corrosión. Existe otra forma de

TABLA 1 - SERIE ELECTROMOTRIZ

Electrode Reaction Atom to Ion	Potential, in Volts Standard Electrode at 25°C
$K \rightarrow K^+ + e^-$	-2.92
$Ca \rightarrow Ca^{++} + 2e^-$	-2.87
$Na \rightarrow Na^+ + e^-$	-2.71
$Mg \rightarrow Mg^{++} + 2e^-$	-2.34
$Be \rightarrow Be^{++} + 2e^-$	-1.70
$Al \rightarrow Al^{+++} + 3e^-$	-1.67
$Mn \rightarrow Mn^{++} + 2e^-$	-1.05
$Zn \rightarrow Zn^{++} + 2e^-$	-0.76
$Cr \rightarrow Cr^{+++} + 3e^-$	-0.71
$Ga \rightarrow Ga^{+++} + 3e^-$	-0.52
$Fe \rightarrow Fe^{++} + 2e^-$	-0.44
$Cd \rightarrow Cd^{++} + 2e^-$	-0.40
$In \rightarrow In^{+++} + 3e^-$	-0.34
$Tl \rightarrow Tl^+ + e^-$	-0.34
$Co \rightarrow Co^{++} + 2e^-$	-0.28
$Ni \rightarrow Ni^{++} + 2e^-$	-0.25
$Sn \rightarrow Sn^{++} + 2e^-$	-0.14
$Pb \rightarrow Pb^{++} + 2e^-$	-0.13
$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	0.00
$Cu \rightarrow Cu^{++} + 2e^-$	0.34
$Cu \rightarrow Cu^+ + e^-$	0.52
$2Hg \rightarrow Hg_2^{++} + 2e^-$	0.80
$Ag \rightarrow Ag^+ + e^-$	0.80
$Pd \rightarrow Pd^{++} + 2e^-$	0.83
$Hg \rightarrow Hg^{++} + 2e^-$	0.85
$Pt \rightarrow Pt^{++} + 2e^-$	ca 1.2
$Au \rightarrow Au^{+++} + 3e^-$	1.42
$Au \rightarrow Au^+ + e^-$	1.68

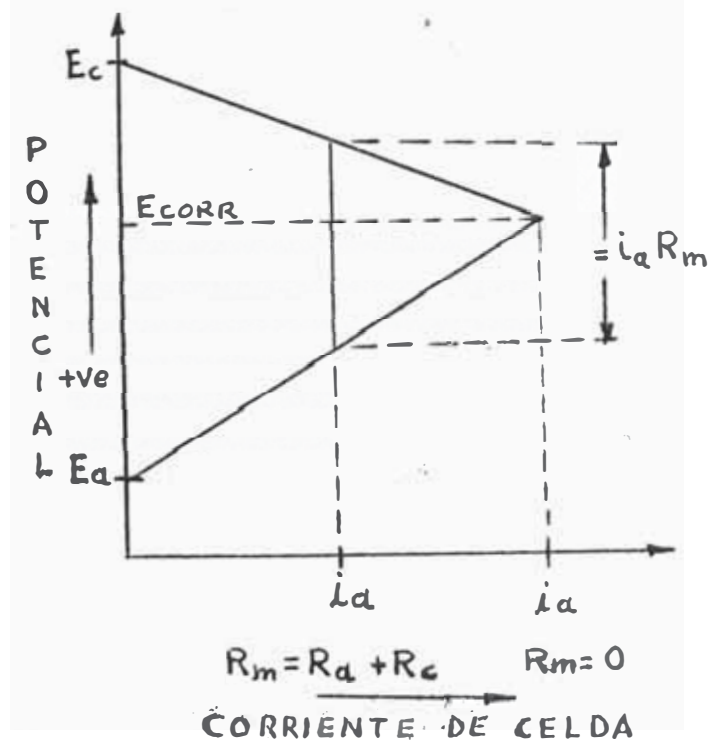


FIGURA 1 - CURVA DE POLARIZACION

hallar la velocidad de corrosión, que será desarrollado en el capítulo 5.

Dentro de la teoría electroquímica es muy importante la polarización que viene a ser la diferencia entre el potencial actual de un electrodo a cierto valor de corriente neta y el potencial normalizado, o bien se dice que la polarización es el retardo de la velocidad de corrosión causado por el cambio de potencial entre electrodos, el control de la polarización puede ser catódico, anódico o mixto en algunos casos debido a la resistencia del electrólito.

La curva de polarización muestra la relación entre la corriente y el voltaje, ver figura 1; en donde I_A se conoce como la corriente de corrosión y nos permite calcular la velocidad de corrosión.

2.2 Corrosión por agua de mar

En general, todos los metales sufren corrosión uniforme al ser sumergidos en agua de mar, lo que nos permite estimar con exactitud el tiempo de vida de un equipo, sin embargo, esto no sucede siempre porque surgen otros factores como la metalurgia de los metales, velocidad del agua y configuración de los equipos que puedan ayudar a generar corrosión localizada.

2.2.1 Características corrosivas del agua de mar

Partiendo de la alta conductividad eléctrica de dicha agua, la actividad de los procesos de corrosión es tal que en poco tiempo pueden originar consecuencias muy graves. El agua de mar se caracteriza por la gran estabilidad de sus propiedades físico-químicas y en par

ticular por su salinidad que varía entre 30 y 37 gramos por litro de agua, siendo el contenido promedio el siguiente:⁽²²⁾

• Tabla 2. COMPOSICION DE SALES EN AGUA DE MAR

Compuesto	<u>Contenido (gr./lt.)</u>
Cloruro de sodio	27.0
Cloruro de magnesio	3.2
Sulfato de magnesio	1.6
Sulfato de calcio	1.3
Sulfato de potasio	0.8
Cloruro de potasio	0.5
Carbonato de calcio	0.1
Otros (bromuros, fosfatos)	0.5
TOTAL	35.0

La agresividad del agua de mar frente a los metales varía en función de su composición y factores tales como el oxígeno molecular disuelto, la temperatura, el pH, las concentraciones de sales disueltas, la agitación y velocidad del medio, entre otros. En general, para agua de mar, suelos, atmósfera, etc. la evaluación del electrólito se contempla mediante su resistividad como sigue:⁽¹⁾

Tabla 3. EVALUACION DEL ELECTROLITO SEGUN SU RESISTIVIDAD

Resistividad (Ohm-cm)	Calificación	<u>Agresividad del Medio</u>
a 2,000	Baja	Muy corrosivo
2,000 a 5,000	Media	Corrosivo
5,000 a 10,000	Moderado	Moderadamente corrosivo
10,000 a 25,000	Alta	Medianamente corrosivo
Más de 25,000	Muy alta	Poco corrosivo

En agua neutra es necesario el oxígeno disuelto para que ocurra

una acción corrosiva, pudiendo ser la velocidad inicial de $100 \text{ mg/dm}^2/\text{día}$ en agua saturada de aire, dicha velocidad disminuye con el tiempo por la formación de la película de óxido actuando como barrera para la difusión del oxígeno, llegando a estabilizarse dicha velocidad entre 10 y $20 \text{ mg/dm}^2/\text{día}$.

Asimismo cuando la temperatura aumenta, incrementa la difusión del oxígeno y la disociación del agua en iones H^+ y OH^- , bajando la resistividad del electrólito. Este aumento de temperatura ocurre hasta los 70°C , a partir del cual la corrosión decrece como consecuencia de la disminución de la solubilidad del oxígeno en el agua a medida que aumenta la temperatura⁽¹³⁾.

El reporte de la Belco Petroleum para plataformas submarinas indican que la acción del pH está determinada por intervalos, para valores menores a 4.0 la velocidad de corrosión depende del desprendimiento del hidrógeno, mientras con pH comprendidos entre 4.0 y 10.0 la velocidad de corrosión es independiente del pH y sólo dependerá de la difusión del oxígeno; para valores mayores que 10.0 la corrosión disminuye, pero si se eleva demasiado la alcalinidad destruye la pasividad y comienza de nuevo la corrosión.

La acción de sales disueltas, como el cloruro de sodio alcanza el valor máximo de corrosión para una concentración del 3% en cloruro de sodio (NaCl) y el mínimo cuando alcanza su saturación a 26%, esto se debe al comportamiento de la solubilidad del oxígeno. Paralelamente al aumento del cloruro de sodio, el cloruro de magnesio tiene una acción inhibidora a la corrosión, gracias a esta sal, el cloruro de sodio no es corrosivo en forma proporcional a su concentración (reporte de Belco Petroleum).

2.2.2 Efectos de la corrosión por agua de mar

Para casos de estructuras sumergidas en agua de mar se puede dividir en 4 zonas para analizar el ataque.

- a) La zona de lodo: Aquella porción de estructura que se encuentra debajo del fondo marino.
- b) La zona sumergida: Debajo del nivel de agua, en la cual el metal es siempre cubierto por agua.
- c) Zona de salpicadura: Arriba del nivel de agua donde la acción de olas y mareas mantienen siempre el metal húmedo.
- d) Zona atmosférica: Donde el metal se encuentra seco la mayor parte del tiempo.

La corrosión se manifiesta en forma de picaduras generalizada en la zona sumergida, mientras que en la zona de salpicadura ocurre erosión y muy severamente en las playas (rompientes o "splash"), la zona denominada línea de agua presenta aereación diferencial, corroyéndose la parte sumergida.

Las formas de corrosión por agua de mar son diversos; así tenemos en la forma galvánica se presenta por zonas estancadas y sumergidas, caso del acero inoxidable mientras que el cobre ofrece mejor resistencia a bajas velocidades; la corrosión por picaduras generada mayormente por factores metalúrgicos como son inclusiones, roturas de película protectora, segregación y defectos de la superficie ayudado por el estancamiento y presencia de materias extrañas. La velocidad del agua disminuye el ensuciamiento y picaduras, pero pueden aparecer los problemas de erosión-corrosión, siendo el acero al carr

bono y el cobre los menos resistentes a este fenómeno, es más grave en los cambios de dirección del flujo, como son: Codos, tuberías adyacentes a las válvulas y la zona límite entre lodo y agua.

La corrosión selectiva se intensifica en agua de mar, así tenemos la grafitización (formación de grafito), dezinificación cuando no pertenecen al grado inhibido, similarmente con el aluminio y algunos bronce. La corrosión intergranular sucede en los aceros inoxidables austeníticos 18-8 y puede ocurrir precipitación de carburo de cromo, que es corroído por agua de mar y produce desgajamiento del metal.

Es muy susceptible la corrosión por esfuerzos en agua de mar, especialmente en los aceros austeníticos tipos 304 y 316, para temperaturas mayores a 150⁰F. En cuanto a cuerpos sumergidos en agua de mar pueden actuar la arena produciendo erosión o ensuciamiento; los organismos marinos actúan ensuciendo, erosionando y generando gases corrosivos, las bacterias producen ensuciamiento y corrosión.

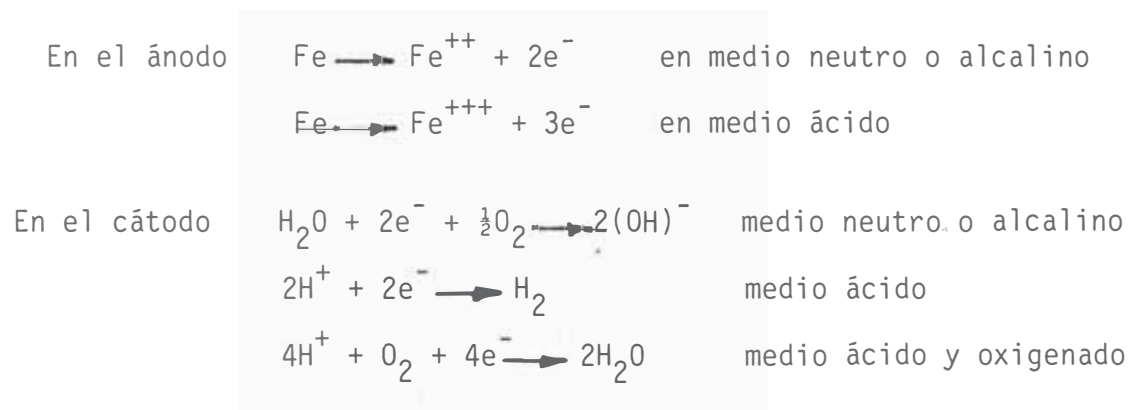
2.3 Corrosión por suelos

2.3.1 Mecanismo de corrosión

El mecanismo de corrosión por suelos también estructura la celda formada por ánodo, cátodo, electrólito y el circuito eléctrico; los parámetros, como diferencia de potencial, resistencia eléctrica e intensidad de corriente deben ser evaluados adecuadamente para conocer la agresividad del medio y dar la protección adecuada a la estructura enterrada, tales como fondos de tanques y tuberías subterráneas

Los principales factores que gobiernan la corrosividad por suelos son la porosidad que facilita la aereación (penetración de oxígeno), la conductividad eléctrica, la acidez o alcalinidad del suelo, las sales disueltas incluyendo la polarización e inhibición, la humedad y los organismos biológicos.

El principio electroquímico fundamental se basa en un equilibrio de masa y carga en las reacciones de corrosión, la Fig. 2.a y Fig. 2.b muestran una celda electroquímica típica y el caso de tubería enterrada respectivamente⁽⁸⁾. Según la celda presentada puede plantearse las siguientes ecuaciones para el hierro y su medio que la contiene.



2.3.2 Comportamiento conductivo del suelo

Se trata de una delgada cobertura de la corteza terrestre generada por procesos residuales o de transporte y que está constituida por conjuntos organizados en partículas de naturaleza orgánica, cuyas propiedades varían más rápidamente en la dirección vertical. Los análisis químicos determinan el predominio de óxidos de silicio y óxidos de aluminio, los cuales eléctricamente son altamente resistivos, por ello que sus propiedades conductivas dependen de procesos electrolíticos facilitados por la presencia de agua intersti-

cial que siempre tiene sales disueltas, éstas se incrementan con la presencia de rocas arcillosas.

La resistividad de cualquier formación puede variar entre amplios límites, inclusive en una misma zona, no existiendo una ley de correlación entre la litología y la resistividad, siendo necesario aplicar métodos de medida e interpretación lateral y vertical para obtener la imagen más aproximada del comportamiento eléctrico del suelo como conductor, teniendo en cuenta los múltiples factores que contribuyen a ello, como son el contenido de sales solubles, el nivel de humidificación, la temperatura, la porosidad del material, la granulometría de la mezcla y la permeabilidad. En la Figura 2 se puede observar la celda electroquímica y la forma de ataque por aereación diferencial a una tubería enterrada.

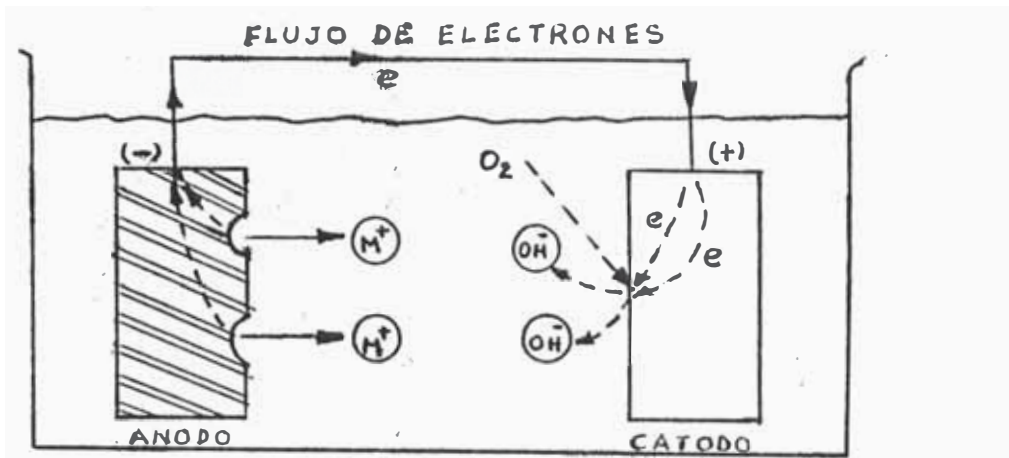


FIGURA 2.a - CELDA DE CORROSION GALVANICA ACUOSA

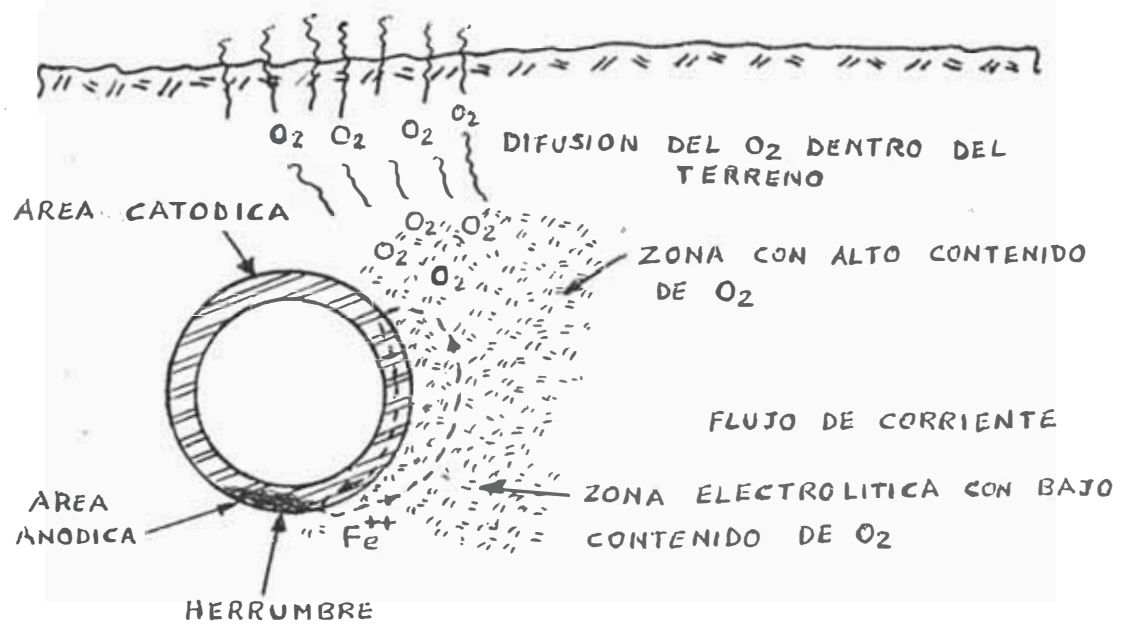


FIGURA 2.b - CORROSION DE TUBERIA ENTERRADA

3.

DESCRIPCION DE LA PLANTA

3.1 Descripción general

La planta de ventas Conchán se encuentra ubicada en el kilómetro 29 de la autopista Panamericana Sur - Distrito de Lurín, dicha Planta es propiedad de PETROPERU S.A., tiene 2 sectores divididos por la autopista en sector playa y sector cerro, conformando un total de 50,000 m²

La función de planta de ventas se ejecuta mediante despacho de combustibles producidos en Refinería Conchán y de productos químicos (volátiles) procedentes de Talara (acetona, hexano y alcohol isopropílico) y los importados como el butanol, xilol, toluol, MIBK y VAM.

La capacidad de almacenamiento de la Planta es de 41,000 barriles totalizados por 16 tanques verticales de almacenaje distribuidos en ambos sectores de la planta como se muestra en el plano del Apéndice A. Respecto a los tanques para combustibles gasolina 84, diesel 2 y kerosene doméstico cuyas capacidades son de 20,000, 20,000 y 10,000 barriles respectivamente, están ubicados en la Refinería y el control de ellos pasará próximamente a la Planta de Ventas. El flujo mensual de ventas es:

Productos químicos	-----	5,840 barriles/mes
Combustibles y productos pesados	-----	125,000 barriles/mes

Esta Planta tiene gran importancia especialmente por ser la única abastecedora de productos químicos mencionados a nivel nacional, de allí la necesidad de proteger sus instalaciones electromecánicas con alto índice de seguridad frente a la agresividad corrosiva del medio ambiente.

3.2 Instalaciones electromecánicas

3.2.1 Sistema de recepción de productos a la Planta

Para los combustibles la recepción y almacenamiento se realiza en los tanques de la Refinería, mientras que para los productos químicos la recepción se lleva a cabo de 2 maneras, la primera es mediante recepción de camiones-tanques empleando bombas centrífugas, mangueras y tramos cortos de tuberías aéreas conectadas a los tanques de almacenamiento; la segunda forma de recepción se realiza desde los buques-tanques mediante la línea submarina de 4 plg. diámetro, mientras que por las otras 2 tuberías submarinas se recibe el petróleo crudo para Refinería; estas tuberías submarinas llevan aditamentos como válvula de macho, carrete de reducción (cuello de ganso), mangueras, boyarín y boyas para amarre de buque.

3.2.2 Sistema de almacenaje y despacho

Cuenta con tanques verticales de techo fijo distribuido en ambos sectores de la planta para almacenar productos químicos

importados y nacionales. La distribución de tanques es como sigue:

SECTOR	CANTIDAD	CAPACIDAD (c/u)	DIAMETRO	ALTURA
Playa	8 tanques	1,000 barriles	15.25 pies	31 pies
Playa	2 tanques	1,600 barriles	20.03 pies	30 pies
Cerro	6 tanques	5,000 barriles	27.50 pies	48 pies

Complementando al sistema de almacenaje se tienen las tuberías de entrada y salida con sus respectivas válvulas, las tuberías del sector Playa son de 4 plg. para entrada y 2 plg. para salida, mientras que en sector Cerro ambas son de 6 plg.

El sistema de despacho cuenta con tuberías desde la salida de tanques hasta los puentes de despacho, los productos químicos se despachan en puentes para camiones-tanques y en zonas para cilindros. Los combustibles requieren el uso de bombas igualmente los productos del sector Playa, mientras que en el sector Cerro se emplea sistema por gravedad, los puentes de despacho cuentan con válvulas de cierre rápido y contómetros para registrar el volumen.

3.3 Sectores de incidencia de la corrosión

Por la ubicación de la planta cerca al mar, en general se tiene un ambiente corrosivo tanto atmosférico, por suelos y agua de mar. Las estructuras aéreas como tanques (casco y techo) y tuberías están expuestas a la niebla salina, se corroen en forma de picaduras (zonas ampolladas) por acumulación de sales contenidas en vapor de agua, en esta misma forma son atacadas las válvulas

y otras superficies metálicas expuestas al medio ambiente.

En cuanto a las estructuras en contacto con el suelo, tenemos los fondos de tanques, el tramo de tubería sector Cerro y al ingreso hacia el mar; las tuberías sometidas al ataque por suelos y agua de mar son líneas de 4 plg. perteneciente a Planta de Ventas, de 10 y 18 plg. pertenecientes a Refinería Conchán. El sistema de protección por pintura es efectiva para el caso de estructuras aéreas, mientras que en el caso de estructuras enterradas se requiere un análisis cualitativo del terreno mediante ensayos de corrosión, análogamente para agua de mar.

Por lo anteriormente explicado el estudio se realizará en zonas subterráneas y submarinas mediante pruebas y análisis cualitativo-cuantitativo, realizándose mediciones de campo y tomando como referencia los experimentos desarrollados en medios similares. La parte interna de tuberías y tanques no tienen ataque de consideración porque los productos químicos son limpios de partículas extrañas e impurezas líquidas como el agua.

3.4 Operación y mantenimiento de la Planta

Las principales operaciones de la Planta son la recepción y despacho de productos químicos y combustibles, el despacho se efectúa en los puentes respectivos, los cuales son metálicos y están protegidos por pinturas "anticorrosivas".

La recepción de camiones-tanques se realizan por tuberías aéreas en tramos cortos y sin mayores problemas, mientras que en los

buques-tanques se efectúan por tubería sumergida en agua de mar (con 600 metros de longitud) y un tramo aéreo (de 200 metros), esta tubería de 4 pulgadas de diámetro es limpiada internamente por nitrógeno y agua dulce bombeado desde el buque-tanque. La operación descarga buque-tanque se lleva a cabo mensualmente con un promedio de 1,600 toneladas de productos volátiles transportados por la compañía Transocéanica.

Posteriormente a la descarga, la tubería internamente queda con agua dulce (estática), prácticamente evitando corrosión interna, mientras que la parte externa está sometida a los movimientos del fango marino, produciéndose erosión-corrosión en ciertos tramos.

La operación de despacho se lleva a cabo diariamente y no tiene problemas la parte interna de la tubería, aún quedando producto luego del despacho, ocurriendo el mismo caso que los tanques internamente, exteriormente las tuberías son aéreas y enterradas en partes.

Las operaciones de mantenimiento relacionadas con la protección anticorrosiva son: pintado exterior de tanques cada 3 años aplicando las técnicas adecuadas a base de anticorrosivos y buena preparación de superficies; en los fondos de tanques se cambian las planchas previa inspección, presentándose como problema principal picaduras desde la parte externa en dichas planchas. En las líneas submarinas las zonas de erosión-corrosión debilitan la tubería y se recurre a reparaciones provisionales con refuerzos (bridas).

La protección catódica existente es controlada en el caso de tanques, mediante cambios de ánodos sacrificables y renovación de parrillas correspondientes al sistema de protección para la línea submarina. Generalmente el mantenimiento de la planta no es programado, realizándose inspecciones esporádicas, siendo frecuente el mantenimiento correctivo a falta de capacitación adecuada del personal en temas referentes a mantenimiento programado y sus aplicaciones para mejorar la operatividad de la Planta.

3.5 Materiales de fabricación utilizados

Entre las principales estructuras tenemos a los tanques, tuberías, accesorios y cimiento de los tanques; estos materiales son a base de acero al carbono de tipo estructural (de bajo carbono) fabricado mediante laminado en caliente, en el caso de tanques tenemos la tabla siguiente:

Tabla 4. PROPIEDADES DEL MATERIAL UTILIZADO EN TANQUES

Material de las planchas	:	Acero estructural tipo ASTM A-283 grado C
Composición química	:	% C = 0.31 % P = 0.048 % S = 0.06 % Mn = 0.83
Resistencia a la tracción	:	55,000 psi
Punto de fluencia superior:	:	29,000 psi
Módulo de Young	:	20×10^6
Dureza promedio	:	160 HB
Microestructura	:	Ferrita + Perlita, proceso horno eléctrico o abierto
Base de concreto	:	$f_c = 140 \text{ Kg/cm}^2$, con arena limpia de río; carga admisible sobre terreno 1 Kg/cm^2 , el anillo de concreto reforzado con varillas de acero y serán aplicados de acuerdo a especificaciones de concreto, ver Apéndice B.

El espesor de las planchas de fondo para la capacidad de los tanques en estudio es de 1/4 plg., mientras que los del casco varían partiendo con un espesor mayor en la base y decreciendo hacia el techo. El contacto plancha de fondo y base de tanque lleva una aplicación mezcla de arena y aceite pesado (tipo cíclico de la unidad FCC) ó 80% de crudo reducido más 20% de diesel, esta mezcla es conocida como "Sand Oil".

Los miembros estructurales del tanque concuerdan con las especificaciones ASTM-A-36 para aceros fabricados solamente por proceso de horno abierto (Siemens-Martin) u horno eléctrico, las tuberías y uniones cumplen el standard API-5L, las bridas de acero forjado según ANSI-B.16.5 y los pernos de acuerdo a la especificación ASTM-A-307.

4.

SISTEMAS DE PROTECCION Y CONTROL EXISTENTES ACTUALMENTE

4.1 Recubrimientos y previsión de construcción para tanques

La construcción de los tanques se efectuaron en distintos años y por bloques, los tanques de 1,000 barriles tienen más de 10 años, 5 años los de 5,000 barriles y los de 1,600 barriles 4 años. Por ello las consideraciones tomadas en la instalación no fueron las mismas, mejorándose con el avance tecnológico el control de corrosión interna y externa del tanque.

Generalmente los terrenos se compactaron con material de relleno granular fino (arena), libre de sal o impurezas orgánicas compactado en capas no mayores de 15 cm., sobre el relleno se preparó una capa de 5 cm. con "Sand Oil" para los tanques de 1,600 barriles de acuerdo a la especificación de la Tabla 5. La base del tanque lleva un anillo de concreto reforzado con varillas de acero, las planchas de fondo están unidas según especificación API standar 650. Ver Apéndice C.

Adicionalmente las planchas de fondo llevan un recubrimiento de pintura anticorrosiva en la parte de contacto con su base, éstas no han sido suficientes para proteger con eficacia especialmente

Tabla 5. ESPECIFICACIONES DE BASE "SAND OIL" PARA FONDO DE TANQUES

MATERIALES:

Arena de granulometría uniforme, con tamaños en el rango de malla 3/8, porcentaje en peso que pase 100 (para malla No. 4 será 95 a 100), libre de impurezas. El aceite será tipo cíclico pesado de la unidad FCC, en caso contrario utilizar una mezcla de 80% crudo y 20% diesel.

PREPARACION DE LA MEZCLA:

El "Sand Oil" se obtiene con mezcla arena-aceite en mezcladora amasadora (Pug Mill), en las mezcladoras de dos ejes, la velocidad de rotación será de 55 a 75 rpm, si fuera diferente deberán regularse hasta obtener esos valores, con una luz entre brazos no mayor de 3/4". Existe período de mezcla seca y húmeda, el primero se efectúa antes de vaciar el aceite y la segunda termina cuando toda la arena esté completamente cubierta por el aceite; la proporción arena-aceite debe ser tal que después de aplicado el contenido de aceite sea 8 litros/metro cuadrado, esta cantidad equivale a 80 litros de aceite por metro cúbico de mezcla, para bases de 10 cm. de espesor y 160 litros en bases de 5 cm.

APLICACION:

La mezcla se extenderá sobre superficie seca y cuando las condiciones de tiempo sean favorables, cuidando la conicidad hacia arriba de 2% de la base del tanque, utilizando reglas para la conformación del espesor.

la corrosión por picaduras observada en las planchas retiradas en cambio de fondos.

Para la protección contra corrientes estáticas llevan conexiones a tierra mediante cables aislados, unas placas de cobre para efectos de corrosión de la serie electromotriz de los metales observamos la protección del cobre en forma galvánica por el fierro, siendo necesario tener presente la implicancia de este fenómeno en los cálculos de protección anticorrosiva para estructuras pequeñas, mientras que para estructuras grandes no tiene mucha repercusión.

Los únicos tanques con sistema de protección catódica son los de 1,000 barriles ubicados en la planta Playa, mediante ánodos de sacrificio fabricados de zinc.

4.2 Recubrimiento de tubería submarina y subterránea - Protección catódica por corriente impresa

La protección es mediante un sistema mixto para las 3 tuberías submarinas, de 4" diámetro (perteneciente a Planta de Ventas), de 10" y 18" (perteneciente a Refinería Conchán). En las partes subterráneas (tuberías enterradas) llevan recubrimiento de tocu-yo impregnado con asfalto, mostrando buena protección por largos años cuando la aplicación del sistema es perfecta, cuando quedan pequeñas partes no bien recubiertas ocurre un ataque severo (corrosión por picadura, conforme se muestra en la foto del Apéndice D).

La tubería submarina lleva un recubrimiento de pintura anticorrou

siva complementado con sistema de protección catódica por corriente impresa, con un rectificador de 30 KW, 40 voltios D.C. y 500 amperios (siendo el requerimiento de protección inicial 180 amperios), utiliza 2 ánodos tipo parrilla construida de tubería tipo Drill-Pipe con 5" diámetro instalado en la Playa a una profundidad no menos de 1.5 metros del suelo y a una distancia mayor de 70 metros distante a las tuberías (para evitar la dispersión y efectos secundarios). Ver Figura 3.

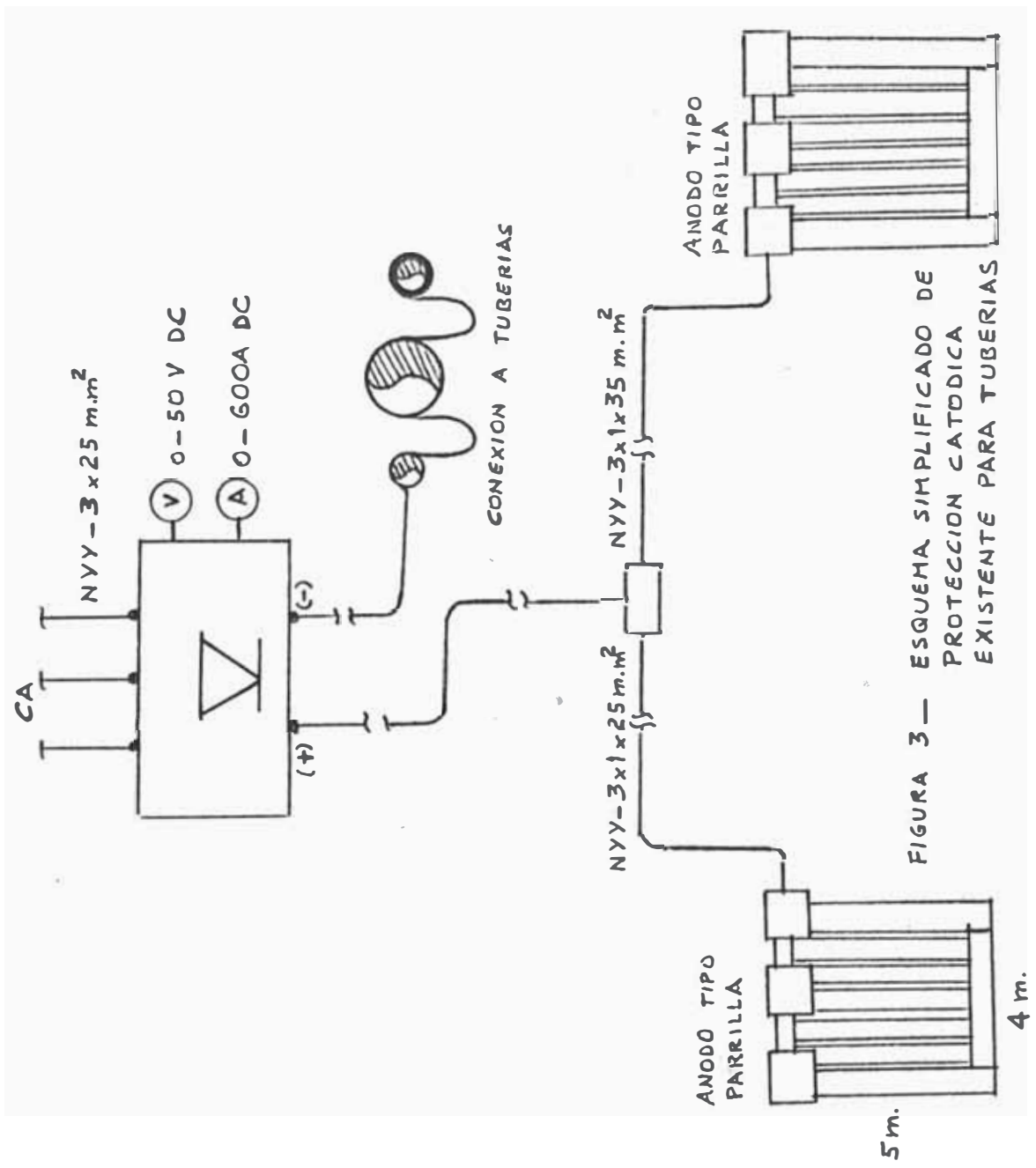


FIGURA 3— ESQUEMA SIMPLIFICADO DE PROTECCION CATORICA EXISTENTE PARA TUBERIAS

5.

EVALUACION Y DETECCION DEL FENOMENO DE CORROSION EN ESTUDIO

5.1 PARAMETROS PRINCIPALES EN LA EVALUACION Y DETECCION DE LA CORROSION

Basados en la teoría electroquímica existen parámetros con los cuales se maneja el desarrollo del fenómeno de corrosión, partiendo de una celda electroquímica que se forma en la superficie del metal sumergido en un electrólito; asociados a las celdas de corrosión se tienen las reacciones anódicas y catódicas que combinadas derivarán un compuesto del metal como producto de la reacción, así tenemos el hierro en medio ácido de Fe en $Fe^{+3} + 3e^-$. La Fig. 4 representa una celda electroquímica y las reacciones mencionadas.⁽³⁾

Otro término que debe conocerse es el potencial de celda indicando el ánodo y cátodo, teniendo en cuenta la variación del potencial de una aleación con el tiempo de exposición a un medio determinado. Para determinar el potencial de reacción, llevándonos a un análisis de carácter micrográfico, cuando lo requerido es un resultado general para la celda.

5.1.1 Polarización y su incidencia en la corrosión

El potencial del metal en contacto con una determinada solución, además de poderse modificar en función del tiempo, cambia asimismo en función de la densidad de corriente que se le aplica. El cambio de potencial a partir del estado reversible o estacionario, como resultado del flujo de corriente, se conoce como polarización, y la expresión gráfica de la función potencial-densidad de corriente como curva de polarización; desde la década del 40-50 muchos investigadores se dieron cuenta de la importancia en los fenómenos de corrosión metálica el empleo de las curvas de polarización para obtener información sobre pasivación y activación (formación y destrucción de las películas protectoras).

Para la obtención experimental de estas curvas puede efectuarse mediante control de corriente y medición del potencial resultante, o bien controlar el potencial (poder oxidante sobre el electrodo) y medir la corriente resultante; en consecuencia existen dos técnicas experimentales, la potenciostática y la galvanostática, teniendo mayor importancia actual la primera (la segunda es de fácil montaje, requiere únicamente una fuente de tensión grande en comparación con los cambios de polarización de los electrodos, aplicada a través de una resistencia elevada).

La ventaja del método potenciostático es su precisión en el cambio de estado pasivo/activo, de gran importancia en metales y aleaciones resistentes a la corrosión. A partir del año 70

se adquiere mayor sofisticación con los trazados potenciodinámicos basado en variación automática del potencial con el tiempo a una velocidad programada de antemano, con registro automático de la respuesta, en otros casos el potencióstato se utiliza en conjunción con fuentes generadoras de funciones (señales tipo escalón, tipo trampa, rectangulares, triangulares, etc.), siendo recomendable estudiar la respuesta durante un corto espacio de tiempo después de haber actuado el impulso recurriendo al registro oscilográfico y de transitorios.

La polarización puede seguir cuatro formas: ⁽²³⁾ Por activación cuando el control es en la etapa más lenta de la reacción y generalmente se presenta a bajas velocidades de reacción, la ecuación de Tafel relaciona el potencial y la densidad de corriente neta (ver 5.1), así en la evolución del hidrógeno el control lo realiza la etapa de transferencia de electrones para formar la molécula, este tipo de polarización puede variar con las características físicas de la celda o con la introducción de depolarizantes químicos, como el oxígeno introducido en forma de agente depolarizante puede disminuir la polarización del hidrógeno.

La segunda forma de polarización es por concentración, ocurre cuando el producto anódico o catódico causa un cambio en el medio electrolito sobre la interfase del metal, el control de la reacción es difusional, así para reducción del hidrógeno H^+ a bajas velocidades de reducción la distribución de iones H^+ será uniforme en la zona adyacente al electrodo, cuando aumenta la velocidad de reducción la concentración de iones disminu

ye limitando finalmente la reacción a la velocidad de difusión de iones hacia el electrodo, determinando así la correspondiente densidad de corriente límite por difusión y representa la máxima velocidad de reducción posible en el electrodo; este tipo de polarización puede ser reconocido por su persistencia luego que la corriente de celda ha sido cerrada.

Los otros dos tipos de polarización son la ohmica y pseudo ohmica ocurren en la interface del electrodo y son puramente resistivos, el componente ohmico es asociado con un cambio resistivo sobre la interface o también por la pérdida de la conducción de iones, por causa de electro-ósmosis o por cambio de temperatura asociado con la energía de disipación del electrodo. El pseudo ohmico está asociado con el óxido u otras películas que se forman sobre el electrodo, dicha película puede no formarse independientemente siendo generalmente dependiente del tiempo, estas películas son de gran importancia en resistencia a la corrosión y protección catódica, la Fig. 5 muestra los cuatro tipos de polarización, la ohmica puede cambiar con el tiempo y la magnitud de los otros tipos varían con cada celda en particular. ⁽⁸⁾

En la reacción de disolución anódica no se da polarización por concentración, solo por activación, en la catódica si es posible la polarización combinada. Según Wagner y Traud la reacción electroquímica puede dividirse en 2 reacciones parciales y durante la misma no existe acumulación de carga neta (principio de conservación de carga) corroborando que durante la corrosión metálica las velocidades de oxidación y reducción son

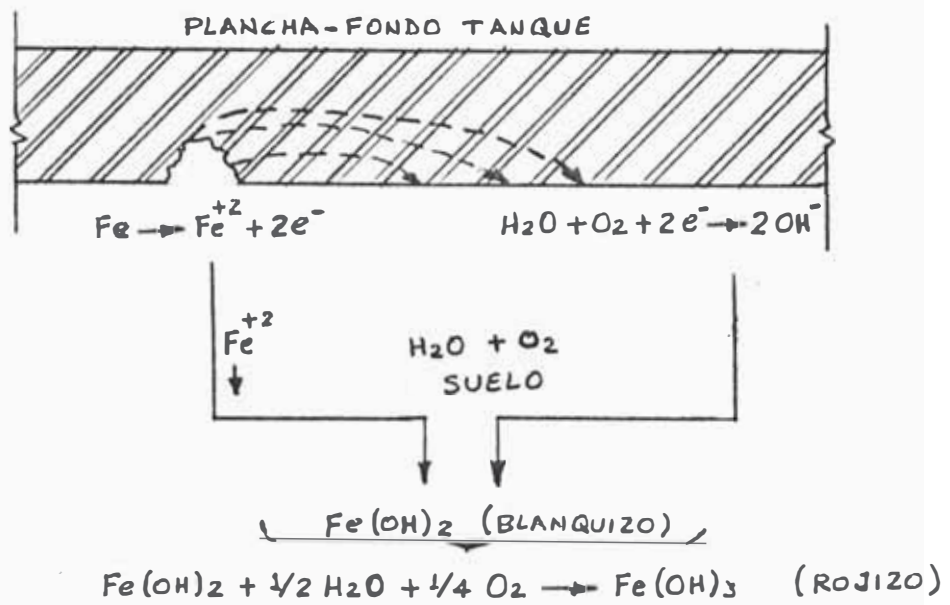


FIGURA 4 - PRODUCTOS DE CORROSION EN PLANCHAS DE ACERO PARA TANQUES

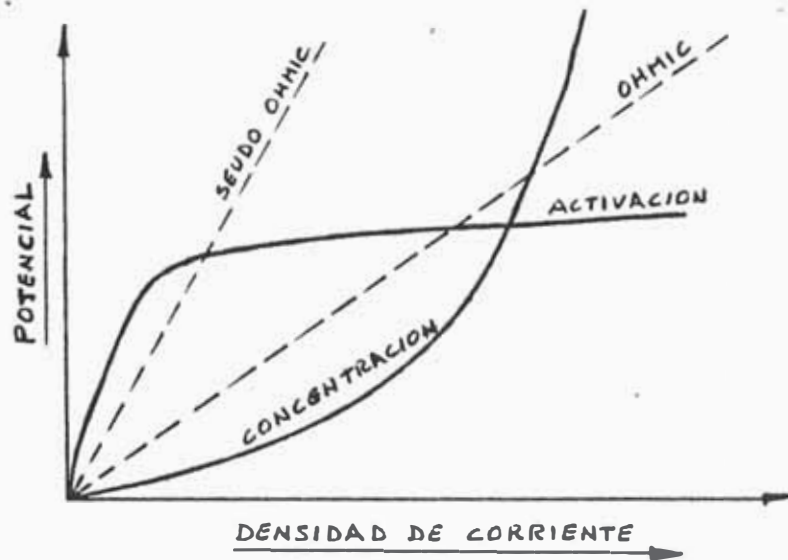


FIGURA 5 - TIPOS DE POLARIZACION TÍPICOS

iguales, esto se cumple en el punto de intersección de las curvas de polarización (I_{corr} , E_{corr}).

5.1.2 Polarización lineal

Entre los investigadores que han contribuido más significativamente a la utilización de medidas eléctricas en los ensayos de corrosión ocupan un lugar destacado Stern y sus colaboradores, que se valieron del concepto de polarización lineal para desarrollar un método de determinación electroquímica de la velocidad de corrosión instantánea.

Bonhoeffer y Jena habían estudiado el comportamiento de once tipos de hierro en ácido sulfúrico y observaron que la pendiente de las líneas rectas que relacionan el potencial con la densidad de corriente podía asimilarse a una "resistencia de polarización". Luego, Stern muestra que la expresión de esta resistencia, que nada tiene que ver con una ohmica, deriva del hecho de que la diferencia entre dos funciones exponenciales equivale a una función lineal dentro de ciertos límites, en estas condiciones la polarización depende linealmente de la corriente de canje y del recíproco de la corriente de corrosión. De aquí la posibilidad de calcular la velocidad de corrosión a partir de simples medidas eléctricas, Skold y Larson habían señalado la verificación de una relación de tipo lineal al representar en papel doble logarítmico la resistencia de polarización ($\Delta E / \Delta I$) frente a la velocidad de corrosión, siempre que E fuera pequeño; un año después Stern mostró que esta relación tiene un fundamento teórico y desarrolló su método

do, al que dio carácter general y posteriormente se ha comprobado para un sinnúmero de circunstancias cuan acertadas eran las predicciones de Stern, con el resultado de que su método de resistencias de polarización sigue siendo uno de los más utilizados para medir la corrosividad de los medios y la corrosividad de los metales.

Especialmente el método que desarrolla Stern en colaboración con Geary, Weisert y otros⁽¹⁾, se basa en la medida de la corriente (ΔI) entre el electrodo de trabajo y el contra electrodo correspondiente a una pequeña modificación del potencial (ΔE) a partir del potencial de corrosión; conviene que E no sea superior a 10 milivoltios, pues de lo contrario la curva que relaciona E/I deja de ser lineal. Si β_A y β_C son las pendientes de Tafel de las curvas logarítmicas anódica y catódica, la intensidad de corriente de corrosión (I_{corr}) en un sistema que esté bajo control de polarización por activación viene dado por (H. Ailor - Test in Corrosion)

$$\frac{\Delta E}{\Delta I} = \frac{\beta_A \beta_C}{2.3 I_{\text{corr}} (\beta_A + \beta_C)} \quad \dots\dots (5.1)$$

Si designamos la resistencia de polarización ($\Delta E/\Delta I$) por R_p y $\beta_A \beta_C / 2.3 (\beta_A + \beta_C)$ por la constante V , resulta:

$$I_{\text{corr}} = \frac{V}{R_p} \quad \dots\dots (5.2)$$

Por tanto la velocidad de corrosión expresada como I_{corr} a través de la Ley de Faraday es inversamente proporcional a la re-

sistencia de polarización.

Este método es más exacto que la extrapolación de Tafel en la medición de la velocidad de corrosión, pueden medir velocidades pequeñas (0.1 mpy) y en lugares inaccesibles a una inspección convencional (ductos enterrados, tanques, entre otros). Una buena estimación de la velocidad de corrosión puede hacerse asumiendo $\beta_A = \beta_C = 0.10$. La Figura 6 muestra η vs. I_{aplicado} (aplicación de la curva de polarización catódica en los primeros 20 milivoltios).

Se debe tener en cuenta la depolarización, considerada como aquella fuerza que tiende a destruir la polarización, en el óxido de fierro o acero tenemos este fenómeno sea en medio alcalino o neutro, caso del agua el hidrógeno acumulado sobre la superficie catódica puede causar polarización suficiente y detener la corrosión, pero hay un aliado de corrosión que es oxígeno formando la molécula de agua y destruyendo consecuentemente la polarización anterior, denominándose al oxígeno agente depolarizante.

5.1.3 Extrapolación de Tafel

Este método usado para verificar la teoría de los potenciales mixtos, obtiene datos experimentales partiendo de la polarización catódica de un electrodo metálico proporcionándole una corriente externa controlada mediante un reóstato (variable) y empleando un electrodo auxiliar. Procediéndose a variar la resistencia desde cero (el potencial respectivo es el de corro_

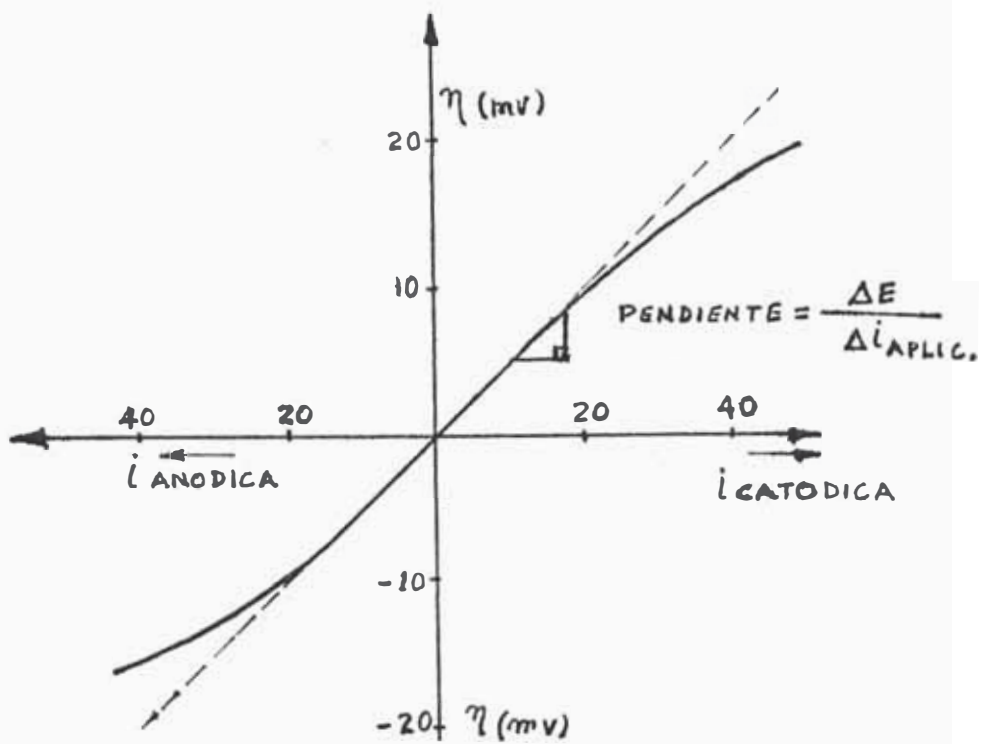


FIGURA 6 - POLARIZACION LINEAL PARA CORRIENTE APLIC.

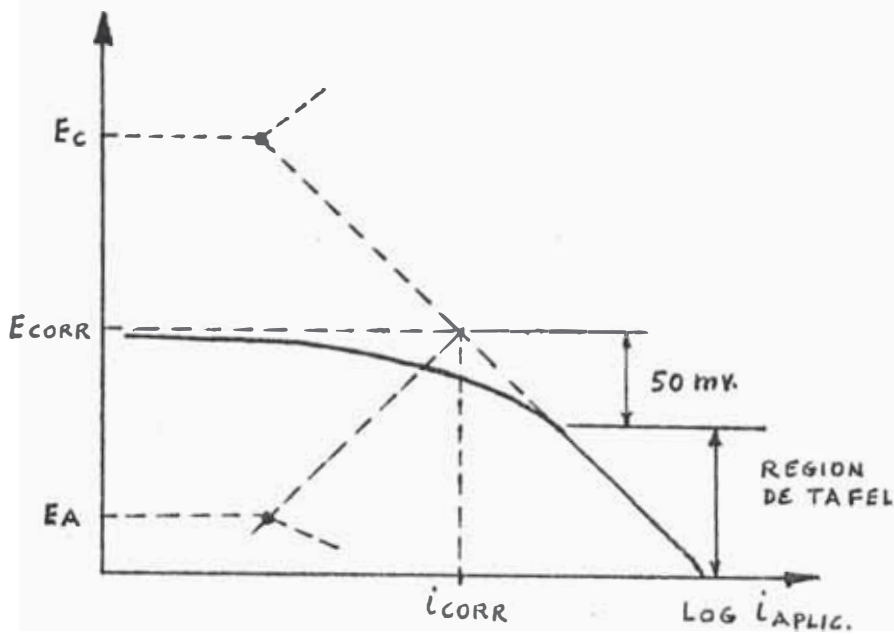


FIGURA 7 - CURVA EXTRAPOLACION DE TAFEL

sión), los puntos siguientes de la curva experimental se hallan midiendo el potencial para cada valor de corriente externa aplicada.

La Figura 7 muestra el comportamiento de la extrapolación,⁽⁹⁾ obsérvese que la pendiente es variable para valores bajos de corriente catódica aplicada, pero a valores altos tiende a una recta, aproximándose a la polarización catódica real con una pendiente constante en la "Región de Tafel"; con esta recta se construye la curva de polarización para el sistema, es usual observar en la práctica el inicio de la Región de Tafel a un potencial más activo que el potencial de corrosión (E_{corr}) en aproximadamente 50 milivoltios.

5.1.4 Resistividad del medio corrosivo

Este parámetro es un factor muy importante que puede influir en las velocidades de corrosión, ya que puede servir como factor de control en la corriente de corrosión que fluye. En caso de suelos depende del grado de humedad y temperatura principalmente, cuando se trata de temperaturas entre 0 y 25°C, la resistencia del suelo R_1 , observada a temperatura T se puede corregir aproximadamente al valor R_2 , a una temperatura standard S mediante la relación:

$$R_2 = R_1 \times \frac{24.5 + T}{24.5 + S} \quad \dots (5.3)$$

Las Figuras 8 y 9 muestran⁽¹⁾ las variaciones de la resistividad en función de los porcentajes de humedad y temperatura del sue

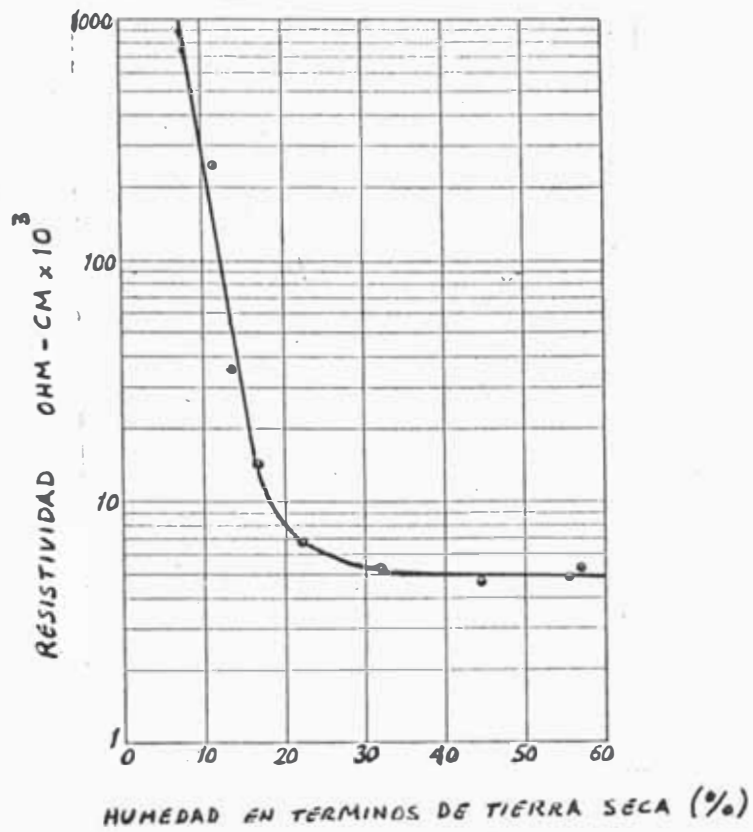


FIGURA 8 - EFECTO DE LA HUMEDAD SOBRE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

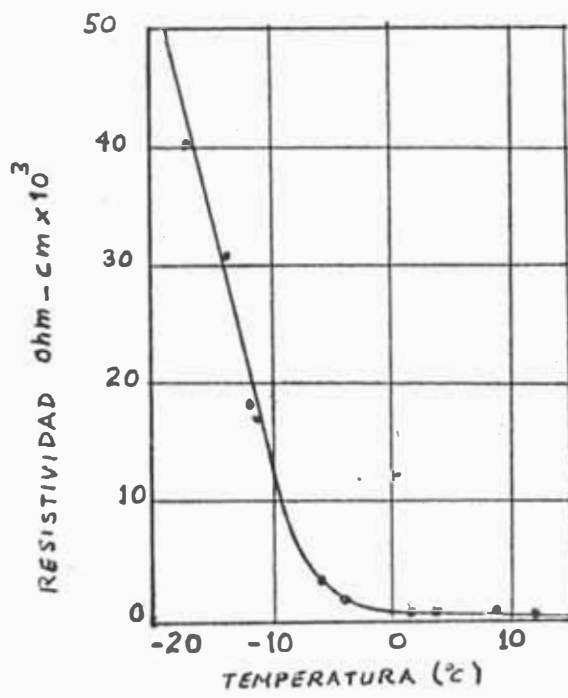


FIGURA 9 - EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

lo, mientras que en la Tabla 3 se presenta una evaluación del ataque corrosivo en función de la resistividad para distintos medios corrosivos.

La medición de las resistividades de un terreno se llevarán a cabo después de un examen de los planos geológicos y topográficos de la ruta y teniendo en cuenta el perfil de potenciales. Los suelos son de constitución estratificada y están caracterizados por capas de diferente resistividad, los suelos cuya formación física es homogénea o se comportan como tales para las profundidades de exploración, estos suelos son los únicos que permiten una medida directa de su resistividad específica, en suelos de dos estratos en las profundidades se asume que la profundidad de la capa subyacente es infinita; según métodos geoelectrónicos se ha comprobado que mayormente los suelos presentan hasta dos estratos y son muy raros de tres o cuatro. La unidad usual para expresar la resistividad es ohmios-centímetros, depende del electrólito y no del distanciamiento; mientras que el agua de mar es un electrólito uniforme, el suelo presenta una complejidad estructural, porque contienen muchas sustancias a su vez influenciadas por la humedad, las Figuras 10 y 11 muestran la variación de la resistividad en función del contenido de cloro (para agua de mar) y porcentaje de sal (para suelos). La variación de la resistividad con la temperatura puede presentarse en el cambio de estaciones, ocurriendo la situación más desfavorable en verano.

El principio de medición de resistividad del electrólito se basa en la evaluación de resistencia entre las caras opuestas pa

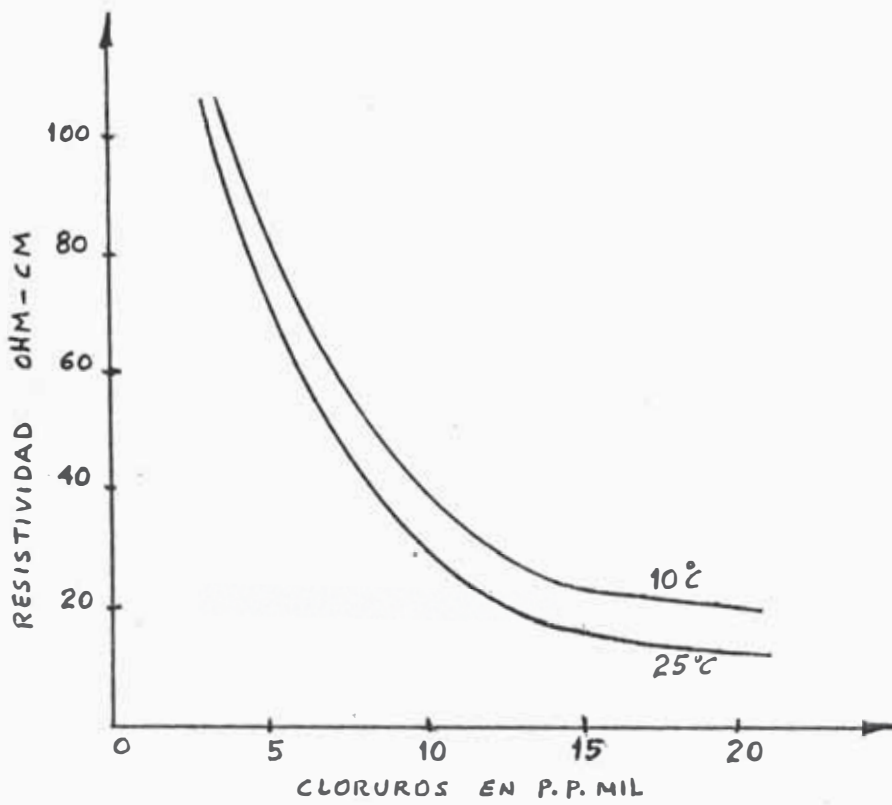


FIGURA 10- RESISTIVIDAD DEL AGUA DE MAR EN FUNCION DE CLORUROS

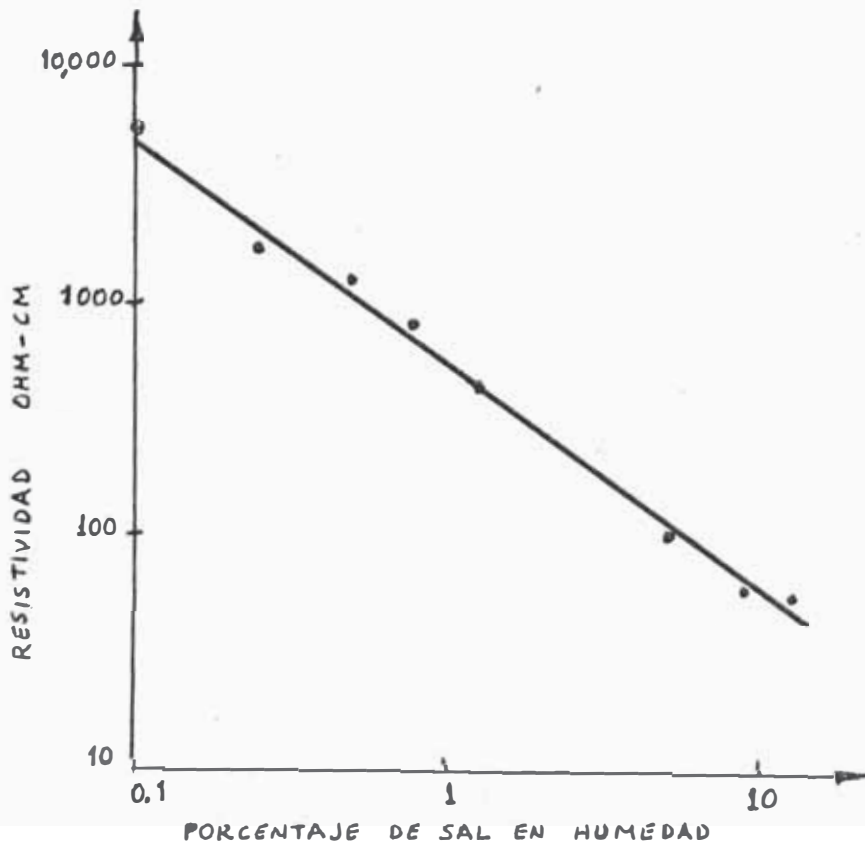


FIGURA 11- RESISTIVIDAD DEL SUELO CON PORCENTAJE DE SAL HUMEDO

ra un material cúbico de 1 centímetro de arista resultando unidades de ohmios-longitud. Los valores para agua de mar están generalmente entre 20 y 30 ohm-cm, dependiendo de la temperatura y turbulencia, la concentración de sales no varía mucho entre un lugar y otro; en caso de suelos los valores varían desde 1,000 a 1'000,000 ohm-cm, dependiendo de muchos factores como humedad, temperatura, contenido de sales, aireación, etc.

5.2 Ensayos de corrosión

Los ensayos de corrosión son proyectados para obtener resultados cualitativos y cuantitativos, puede clasificarse por naturaleza en:

- a) Ensayos de rutina para comprobar el logro de un determinado standard de calidad del metal o del corrosivo; en ambos casos, el nivel de los resultados tiene generalmente más importancia que la simulación exacta de las condiciones en que se produce la corrosión.
- b) Ensayos de comparación de diferentes metales, para seleccionar el más apropiado para un determinado fin, o para valorar un metal nuevo en relación con otro cuyo comportamiento en servicio sea ya conocido.
- c) Estimación de la vida de un metal en condiciones de servicio dadas, para este fin se requiere, generalmente la calibración del ensayo en relación con el comportamiento durante la utilización, o la inclusión de ciertas muestras de control cuyo comportamiento ya se conoce.

- d) Determinación de los diferentes tipos de medio ambiente y condiciones en las cuales pueda usarse satisfactoriamente un determinado metal.
- e) Pruebas para la obtención de aleaciones nuevas, con una resistencia a la corrosión adecuada o máxima, para este fin se requiere especialmente la adaptación del laboratorio a las mismas.
- f) Ensayos para el estudio del mecanismo de la corrosión, en general, o de un metal o aleación determinado, en particular.

En el éxito que pueda obtenerse en la práctica asume un papel muy importante la experiencia adquirida respecto al comportamiento en el uso de estructuras proyectadas a base de esta información limitada, y esta experiencia se resume en el coeficiente de seguridad que utilizan los proyectistas, variando el valor del coeficiente con el tipo de estructura y sus condiciones de servicio.

Las pruebas de laboratorio no pueden predecir la conducta de un metal en cada una de las condiciones de corrosión posibles a las que pueda estar sometido, las pruebas de campo confirmativas deben ser variadas y cuidadosamente proyectadas. Las cifras de laboratorio son valoradas por el grado de aceleración, en comparación con la exposición natural, el conocimiento exacto de las curvas corrosión/tiempo debe ser la base de todas las pruebas.

Al elegir y preparar los metales destinados a las pruebas de corrosión se deben tener siempre presentes todos los factores rela

cionados con el metal por su posible influencia sobre el proceso y valoración de los efectos de la misma. Las formas más apropiadas para la prueba dependen siempre de varios factores, la extrapolación de los datos obtenidos en un campo limitado, es un procedimiento que se debe utilizar con datos obtenidos en un campo limitado, es un procedimiento que se debe utilizar con precaución, pero que puede proporcionar una estimación de más garantía respecto al comportamiento del metal en uso, que la que puede obtenerse por medio de la aceleración excesiva del proceso de corrosión, dichas extrapolaciones han demostrado ser de gran utilidad gracias al descubrimiento del comienzo de corrosión, el uso de métodos muy sensibles de medida y el conocimiento de forma de la curva corrosión-tiempo.

Cuando se dispone de tiempo suficiente para prebas de una mayor duración, debe aprovecharse esta oportunidad para aumentar la garantía de los resultados reduciendo al mínimo la extrapolación de los mismos y la aceleración de la corrosión por métodos artificiales; pero cuando las pruebas deban ser de corta duración, el mejor medio es el uso prudente de extrapolación. Otro método general de ayuda considerable es la estadística en las pruebas de corrosión y en la interpretación y expresión de los resultados. Enseguida se presentará resultados experimentales de ensayos realizados por entidades dedicadas a estudios de corrosión, como la NACE y ASTM como norma de ensayo; esta presentación es una base para efectuar las evaluaciones exclusivas referidas al tema del presente trabajo.

5.2.1 Ensayo para evaluar la velocidad de corrosión

Esta prueba es la primera, realizada con la finalidad de obtener el grado agresivo del terreno o medio corrosivo, la forma de evaluación puede efectuarse en laboratorio mediante simulación de las condiciones reales, este método no es recomendable para el caso de superficie enterrada en suelos o sumergida en agua de mar. El otro método es mediante ensayos de campo "in situ", los que son de alta confiabilidad.

Los ensayos de campo pueden ser de dos tipos para evaluar la velocidad de corrosión, el primero consiste en sumergir o enterrar cupones de corrosión, que es del mismo material de la estructura a proteger; el segundo tipo es mediante probeta de corrosión, consiste en cupón testigo adaptado con sistema de control por instrumentos (como amperímetro e indicadores electromagnéticos), que indican el rateo de corrosión. En ambos casos se espera un tiempo para observar los resultados, los cupones requieren como mínimo 30 días en exposición, las probetas pueden en cambio dar resultados a los dos o tres días⁽¹²⁾. Las probetas de corrosión son más precisas que los cupones, pero es aceptable el ensayo con cupones, siempre que se tenga cuidado con los cálculos, la ventaja de estos últimos es su facilidad de realizar ensayos metalográficos y nos permite observar la forma de ataque del agente corrosivo, complementado por su bajo costo.

La velocidad de corrosión depende de la velocidad de reacción electroquímica en los electrodos, por ello se pueden expresar

en términos de la corriente equivalente necesaria para que ocurra la reacción de corrosión en el metal, pudiendo ser calculada utilizando la Ley de Faraday. Las unidades para expresar la velocidad de corrosión son en función de pérdida de peso durante cierto tiempo determinado, en otros casos es la disminución de espesor para un tiempo determinado; seguidamente la Tabla 6 muestra la relación y factores de conversión para distintas unidades.⁽²²⁾

Tabla 6. UNIDADES Y FACTORES DE CONVERSION PARA VELOCIDAD DE CORROSION

	$\text{mA} \times \text{cm}^{-2}$	$\text{cm} \times \text{año}^{-1}$	IPY	mdd
$\text{mA} \times \text{cm}^{-2}$	1	$0.325 \frac{\text{M}}{\text{nd}}$	$0.129 \frac{\text{M}}{\text{nd}}$	$89.2 \frac{\text{M}}{\text{n}}$
$\text{cm} \times \text{año}^{-1}$	$3.06 \frac{\text{nd}}{\text{M}}$	1	0.394	274d
IPY	$7.75 \frac{\text{nd}}{\text{M}}$	2.54	1	694d
MDD	$0.0112 \frac{\text{n}}{\text{M}}$	$\frac{0.00365}{\text{d}}$	$\frac{0.00144}{\text{d}}$	1
$\text{G} \times \text{m}^{-2} \times \text{día}^{-1}$	$0.112 \frac{\text{n}}{\text{M}}$	$\frac{0.0365}{\text{d}}$	$\frac{0.0144}{\text{d}}$	10

IPY : Pulgadas por año
 n : Valencia del metal considerado
 d : Densidad ($\text{G} \times \text{cm}^{-3}$) del metal considerado
 mdd : $\text{mG} \times \text{dm}^{-2} \times \text{día}^{-1}$
 M : Masa atómica del metal considerado

Generalmente los más usados son IPY o para mejor cuantificación MPY (milésimos de pulgadas por año), y $\text{G} \times \text{m}^{-2} \times \text{día}^{-1}$ en otros casos, la siguiente expresión es empleada para calcular la velocidad en MPY, en la cual WT es el peso perdido por corrosión, en miligramos, el área es pulgadas cuadradas con tiem

po de exposición en horas y la densidad del metal en gramos por centímetro cúbico.

$$\text{MPY} = \frac{\text{WT} \times 534}{(\text{área})(\text{tiempo})(\text{densidad del metal})} \dots\dots (5.4)$$

Esta expresión interpreta el avance de corrosión uniformemente en toda el área expuesta, pero tiene dificultades al presentarse los Pits (picaduras), los que no son de distribución y profundidad uniformes. Este es el gran problema al evaluar la velocidad de corrosión, al presentarse las picaduras en forma desordenada y variada, con diferentes concentraciones; se ha creado una ley empírica para un área con 10% de superficie picada, dando la siguiente velocidad por picadura en MPY

$$\text{P.R.} = \frac{10 \times I_p \times E \times 128,660}{D} \dots\dots (5.5)$$

donde I_p : Corriente de picadura en amp.

E : Peso equivalente del metal en gramos

D : Densidad del metal gramos/cm³

La Tabla 7 muestra el margen recomendable de espesor de planchas en fondos de tanques en función del rate de corrosión.

Tabla 7. ESPESOR DE PLANCHAS EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

<u>MPY</u>	<u>SEVERIDAD</u>	<u>MARGEN DE ESPESOR EN DISEÑO</u>
0 - 3	Sin ataque	1/20" - 1/16"
3 - 10	Poco ataque	1/16" - 1/8"
10 - 50	Mediano	1/8" - 1/4"
50 - 100	Gran ataque	1/4" - 1/2"
Más de 100	Severo	Cambiar aleación

5.2.1.1 Agentes predominantes en la velocidad de corrosión

La actividad de las pilas de corrosión y por tanto la tendencia del metal a corroerse depende fundamentalmente de la diferencia de potencial entre las zonas anódicas y catódicas, pero esta tendencia no nos da la velocidad de corrosión, la cual depende de factores externos de activación de la pila (visto en polarización); los dos agentes más importantes que contribuyen a aumentar la velocidad de corrosión de una estructura metálica enterrada o sumergida son la presencia de bacterias sulfatorreductoras y la circulación de corriente continua a través de tierra. Las primeras actúan como agentes despolarizantes por captación del hidrógeno de evolución catódica, además de un ataque directo por sulfhídrico, el segundo fenómeno acelera la corrosión por aumento de la densidad de corriente anódica, como se verá en el capítulo respectivo.

La Figura 12 muestra⁽⁴⁾ el comportamiento del acero SAE 1018 en experimentos realizados para velocidad de corrosión en un electrólito, se puede ver la estabilización del rate de corrosión pasando los 30 días, por ello la recomendación de exponer los cupones como mínimo un mes. La Figura 13 muestra⁽⁴⁾ una comparación para distintos medios relacionados con agua y ambiente marino, mediante la exposición de una placa 4 x 6 pulg² de acero; esta prueba de la ASTM con chorro de agua natural marina (NSW), agua con composición 3% y 20% de cloruro de sodio, agua de mar sintética, atmósferas a 80 y 800 pies distante del mar y la última prueba sumergida en agua

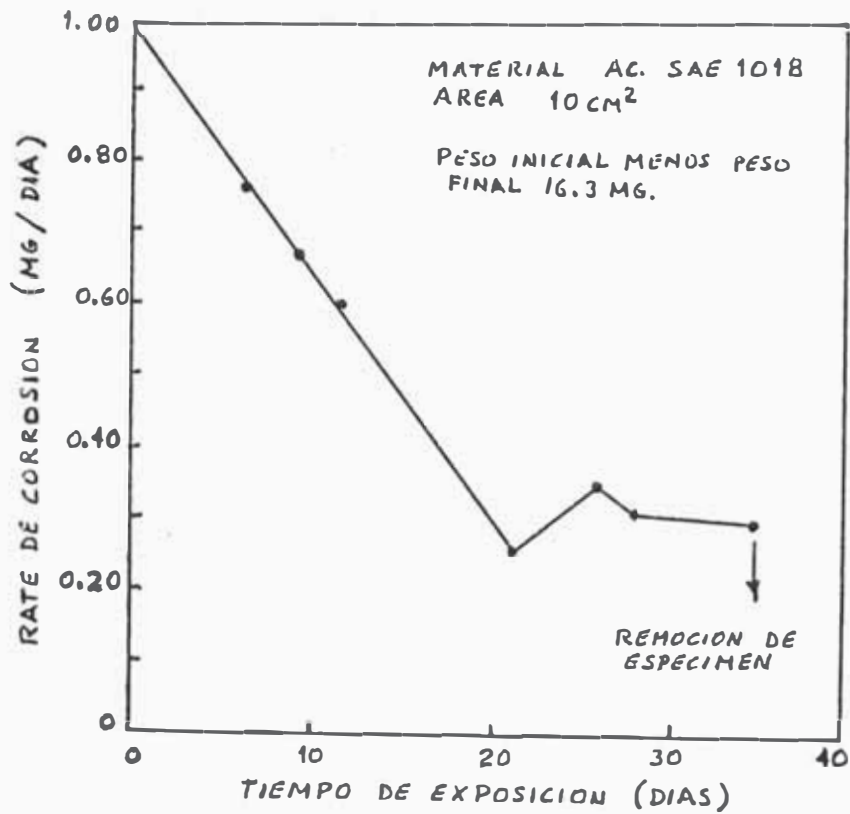


FIGURA 12 - RATE DE CORROSION DEL ACERO EN AGUA DE MAR

NSW : AGUA DE MAR NATURAL
 SSW : " " " SINTETICA CON 3, 20% NaCl

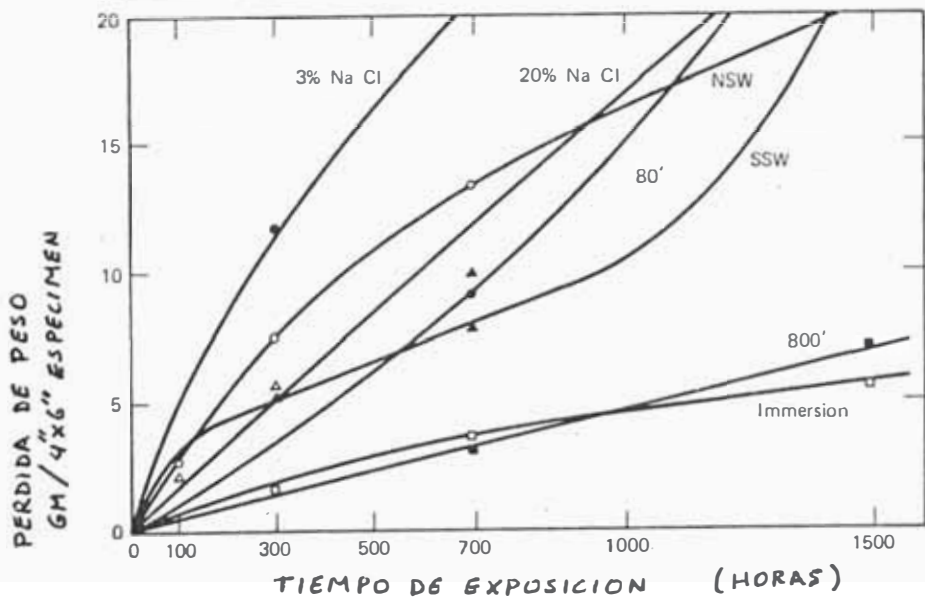


FIGURA 13 - COMPARACION DE VELOCIDADES DE CORROSION PARA MUESTRAS EN AGUAS MARINAS

de mar, obsérvese este último espécimen arroja resultados muy por debajo a las efectuadas en laboratorio, concluyendo que los métodos de este último son ampliamente conservativos en evaluaciones de rate corrosivo, mientras que la Figura 14 nos muestra⁽¹⁰⁾ la experimentación en distintos lugares del mundo referido a agua de mar, para aceros de baja aleación, las que corresponden a tanques y tuberías.

La corrosión por picaduras se cuantifican según estándar⁽³⁾ ASTM, ver Tabla 8 y Figura 15, los varios grados de severidad de corrosión que están numerados del 1 al 7, cada una de las series de la tabla van en progresión geométrica, cuya razón se indica al pie de la tabla, aunque los números descriptivos vayan en progresión aritmética, el resultado medio correcto del examen de dos muestras no es la media aritmética de esos numeros, sino que viene dado por la media geométrica de las cantidades que representan, lográndose el resultado medio con exactitud suficiente si se añade el 75% de la diferencia entre los dos números descriptivos más pequeños, obsérvese que estas cuantificaciones sólo sirven para tener idea de la severidad del agente corrosivo mediante ataque por picadura.

5.2.1.2 Relaciones matemáticas en velocidad de corrosión

Es de especial interés relacionar los resultados de las pruebas de corrosión con el tiempo de exposición, teniendo en cuenta la forma de la curva de corrosión/tiempo para el metal que se está probando, así como las condiciones de expo

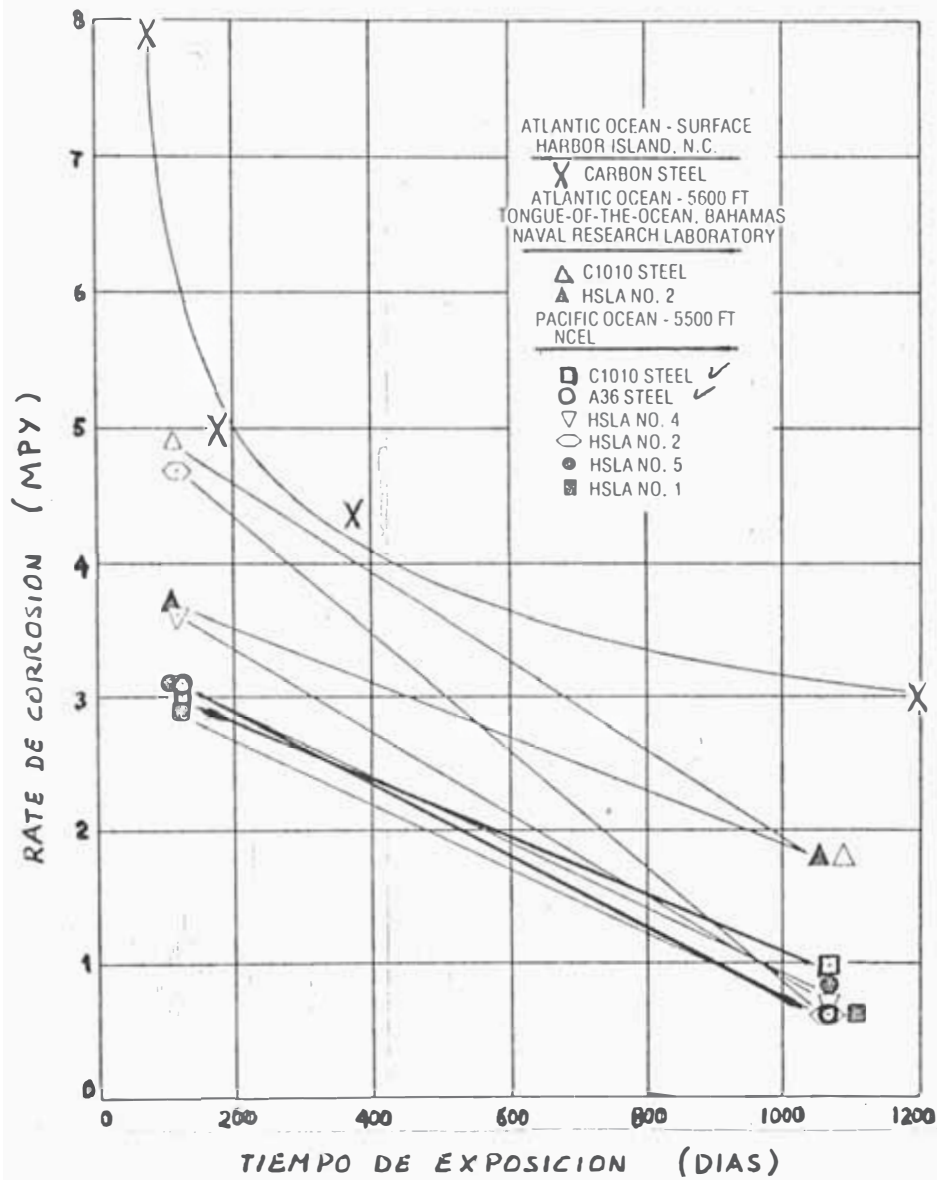


FIGURA 14 - RATE DE CORROSION EN AGUA DE MAR PARA DISTINTOS TIPOS DE ACEROS

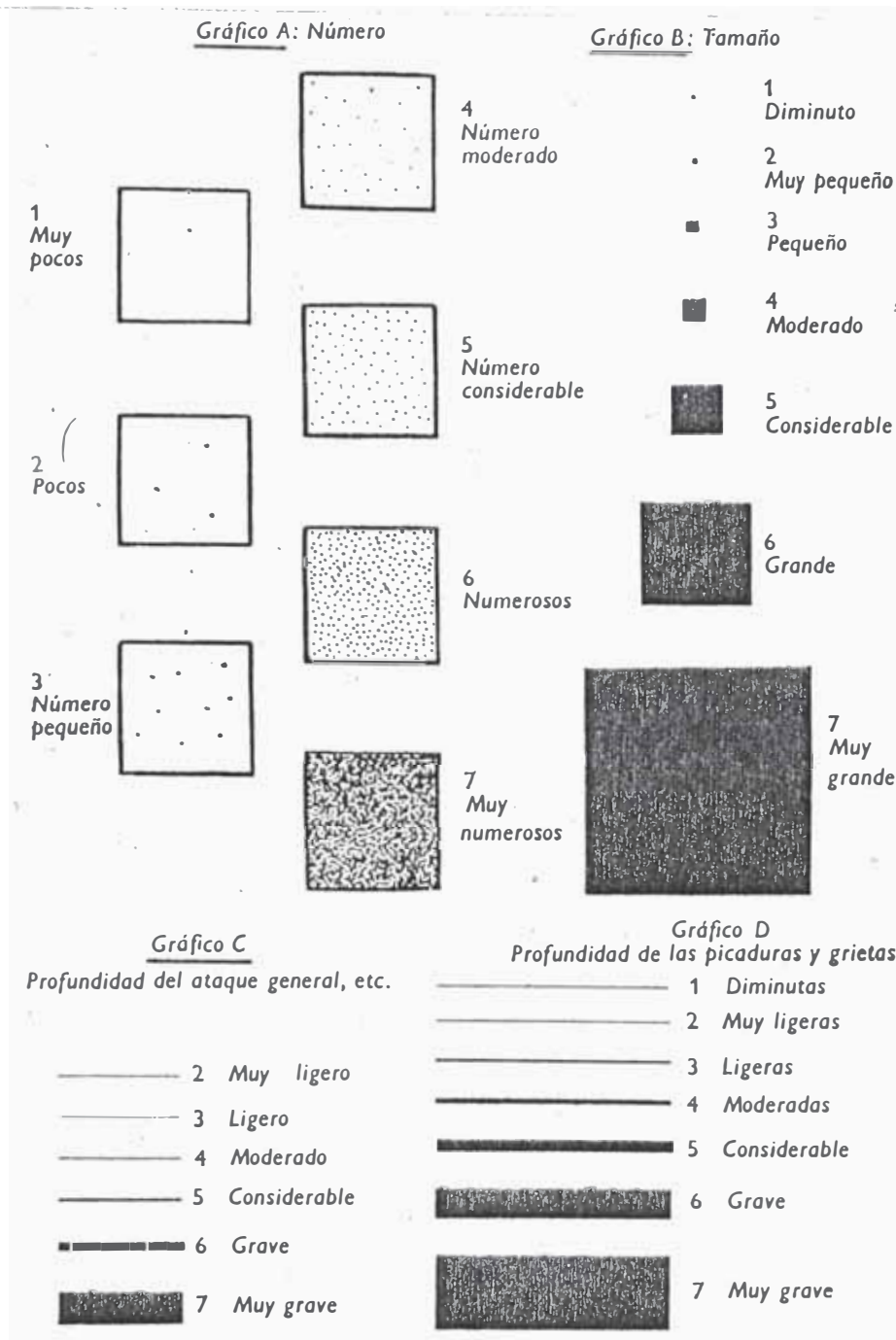


FIGURA 15- GRAFICOS STANDARD PARA EVALUAR CORROSION POR PICADURAS

TABLA 8 - DETALLES PARA LAS GRAFICAS STANDARD DE LA FIG. 15

Número descriptivo	Número		Tamaño		Intensidad			Factores que afectan la corrosión (% influencia)	
	Gráfica A		Gráfica B		Término standard	Gráfica C	Gráfica D		
	Término standard	Número por dm ²	Término standard	Area (cm ²)		Profundi. (cm)	Profundi. (cm)		
1	Muy pocos	33	Diminuto	0,0006	} Diminuto Trazas	0,0001	0,004	9	
2	Pocos	100	Muy pequeño	0,003		Muy ligera	0,0004	0,01	13
3	Número pequeño	330	Pequeño	0,016		Ligera	0,0016	0,025	20
4	Número moderado	1000	Moderado	0,08		Moderada	0,006	0,06	30
5	Número considerable	—3300	Considerable	0,4		Considerable	0,024	0,15	45
6	Numerosos	10 000	Grande	2,0		Grave	0,10	0,4	70
7	Muy numerosos	33 000	Muy grande	10,0		Muy grave	0,40	1,0	100
Razón común de las series		3		5		4	2,5	1,5	

sición. El estudio en forma detallada de las curvas de corrosión/tiempo, en condiciones cuidadosamente controladas y variadas, suplementando con una serie de observaciones cualitativas, sobre el carácter de la corrosión, proporciona información valiosa y fundamental sobre la corrosión de metales.

La mayoría de las pruebas cuantitativas técnicas, frecuentemente requeridas en la industria, deben basarse en las curvas corrosión/tiempo, siendo por lo tanto aconsejable determinar dichas curvas cuando se trata de pruebas cuantitativas, la forma de dichas curvas para un metal o un tipo de corrosión o ambiente corrosivo determinado se define de un modo más garantizado por medio de las mediciones directas de corrosión, es decir por la pérdida de peso del metal a corroer o por corriente total de corrosión, cuando ésta puede medirse, las curvas de corrosión/tiempo deducidas de la observación del efecto de corrosión sobre otras propiedades del metal tales como la reducción de la resistencia a la tracción o la profundidad del picado, pueden ser de interés práctico, una práctica muy frecuente en este proceso es valorar la corrosión que ha tenido lugar durante un período de tiempo arbitrario y tomar la relación entre estos dos como una representación de la velocidad de corrosión, comportándose satisfactoriamente cuando la curva corrosión/tiempo es rectilínea. Estas curvas de corrosión/tiempo corrientemente siguen una de las cinco leyes siguientes (5.6):

$$\text{Ecuación rectilínea } y = K_1 t + K_2 \quad \dots (a)$$

Ecuación parabólica	$y^2 = K_1 t + K_2$ (b)
Ecuación raíz cúbica	$y = K t^{1/3}$ (c)
Ecuación logarítmica	$y = K_1 \log(K_2 t + K_3)$ (d)
Ecuación exponencial	$y = K_1 \left[1 - e^{-K_2(t-t_0)} \right]$ (e)

Donde la y es la corrosión observada después de la exposición para tiempo t , e es base de logaritmos Neperianos y K_1 , K_2 y K_3 son constantes o parámetros, las unidades de estos parámetros no son similares para las cinco ecuaciones, pero los sufijos 1, 2 y 3 se han utilizado para mayor simplicidad. En cada uno de estos casos, el comportamiento a la corrosión se puede expresar, cuantitativa y concisamente por medio de los parámetros (K_1 , K_2 y K_3) de la ecuación apropiada. La ecuación rectilínea requiere valorar la corrosión en dos períodos de exposición ampliamente diferentes, pero si esta ecuación se va sostener desde el principio de la exposición ($K_2 = 0$), bastará valorar la corrosión después de un período de exposición, resultando evidente la ventaja de tener mayor número de observaciones para aumentar la exactitud del resultado final.

Cuando se aplican las ecuaciones parabólicas o de raíz cúbica se requiere por lo menos, dos períodos de exposición, para obtener los parámetros que se pueden determinar dibujando y_2 o y_3 con respecto a t , en este caso los valores K_1 y K_2 se pueden determinar algebraicamente por los tres grupos de valores y y t , tomados preferentemente de una curva uniforme, trazada para un número mayor de puntos experimentales, entonces el logaritmo $(y-K_1)$ se puede dibujar en función del

logaritmo $(t - K_3)$ para determinar la aplicabilidad de la siguiente ley:

$$(y - K_1)^2 = K_2 (t_2 - K_3)^3 \quad \dots (5.7)$$

El trazado de las ecuaciones logarítmicas y exponenciales es algo más complicado, si se sabe que la curva logarítmica pasa a través del origen de modo que $y = 0$ cuando $t = 0$, entonces $K_3 = 1$, consecuentemente es posible determinar el valor de K_2 (y por lo tanto de K_1) por ensayo y error.

El procedimiento para la ecuación logarítmica parece ser más satisfactorio cuando no se puede suponer que K_3 sea unidad, y no se puede ajustar convenientemente a ese valor, planteando por diferenciación de la ecuación tenemos:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K_1 K_2}{K_2 t + K_3} \quad \text{de donde} \quad \frac{dt}{dy} = \frac{t}{K_1} = \frac{K_3}{K_1 K_2}$$

o

$$\frac{1}{dy/dt} = At + B \quad \dots (f)$$

siendo

$$A = 1/K_1 \quad \text{y} \quad B = K_3/K_1 K_2$$

(Ensayos de Corrosión - F.A. Champion)

Las velocidades de corrosión para diversos tiempos de exposición (t), se determinan gráficamente por la curva empírica corrosión/tiempo, observando la pendiente de la tangente a la curva en cada punto, la recíproca $[1/(dy/dt)]$ de la velocidad de corrosión se dibuja con respecto a t , y por medio de este trazado rectilíneo, se valoran las constantes A y B

(ecuación f), entonces $K_1 = 1/A$, $K_2/K_3 = A/B$. De este modo se pueden leer varios pares de valores de y y t por medio de la curva empírica de corrosión/tiempo, y se puede calcular un valor de K_3 para cada par con la ecuación:

$$\text{Log } (K_3) = \frac{yA}{2.3} \text{Log } \left(\frac{A}{B}t + 1 \right) \quad \dots\dots (5.8)$$

y del valor medio de K_3 , así determinado, tenemos $K_2 = \frac{AK_3}{B}$.

La valoración exacta de K_3 , tomada en lugar de la suposición del valor como unidad, se hace más importante a medida que el valor de K_2 se hace más pequeño, es decir cuando se trata de velocidades de oxidación más bajas.

Para la ecuación exponencial el valor t_0 representa el período de inducción cuando la curva no pasa por el origen, pero para simplificar el proceso se toma para representar también $t-t_0$ y entonces la ecuación (e) se puede escribir como:

$$\text{Log } \frac{K_1 - y}{K_1} = \frac{-K_2 t}{2.30} \quad \dots\dots (g)$$

donde $t = \infty$, $y = K_1$ que se denomina la corrosión final; si se toman grupos de valores y_1 e y_2 de la curva empírica corrosión/tiempo tales como $2 t_1 = t_2$, entonces la ecuación (f) queda transformada en:

$$K_1 = \frac{y_1^2}{2 y_1 - y_2} \quad \dots\dots (5.9)$$

Por la media de valores de K_1 , así determinados, se pueden tomar los valores empíricos de y y t para dibujar la ecuación

ción (g) sobre un papel semilogarítmico. A partir de este dibujo lineal, pueden deducirse valores de y y t para dibujar la curva exacta corrosión/tiempo y valorar los restantes parámetros como sigue: Por la ecuación (g)

$$K_2 = \frac{2.30}{t-t'} \text{Log} \left(\frac{K_1 - y}{K_1 - y'} \right) \quad \dots (5.10)$$

y si se eligen los valores de y , de modo que $K_1 - y = 2(K_1 - y')$, entonces:

$$K_2 = \frac{2.30 \log 2}{t - t'} = \frac{0.69}{t-t'} \quad \dots (5.11)$$

La velocidad inicial de la corrosión (cuando $t = 0$) se da por

$$y = K_1 K_2 \quad \dots (5.12)$$

Para ensayos de campo Schneider, en sus experiencias, utilizó una serie de muestras que colocó durante un año, junto a un sistema de tuberías bajo tierra, para obtener con este procedimiento indicaciones sobre la curva corrosión/tiempo y por consiguiente sobre la vida probable de la tubería. Con curvas de pendiente de creciente, la corrosión observada sobre esta serie de muestras fue equivalente únicamente durante el primer año de exposición, con muestras expuestas en años subsiguientes, la corrosión observada se corrigió por medio de un factor deducido (para el año dado) de la forma de la curva corrosión/tiempo, experimentada generalmente con el metal de prueba y en mismas condiciones de exposición.

Esta última se denominó "curva ideal", en este procedimiento, el factor generalmente decrece con el tiempo, de acuerdo con la pendiente decreciente (velocidad de corrosión) de la curva ideal, de este modo el método combina la forma de la curva ideal con los datos cuantitativos aislados de las muestras, proporcionando una curva de más garantía que la que podría deducirse por extrapolación a partir de la exposición durante un solo año. La Tabla 9 nos muestra un ejemplo del método de cálculo para el caso citado.

Tabla 9. PREDICCIÓN DE LA VIDA PROBABLE DE UNA TUBERÍA SACADA DE EXPOSICIONES SUCESIVAS CON UN AÑO CADA UNA

DE LA TUBERÍA (años)	CORROSION DE UNA MUESTRA EN UN AÑO	FACTOR DE CORROSION SACADA DE CURVA IDEAL	CORROSION CORREGIDA	CORROSION CALCULADA DE LA TUBERÍA
1	0.067	1.000	0.067	0.067
2	0.087	0.414	0.036	0.103
3	0.087	0.318	0.028	0.131
4	0.113	0.268	0.030	0.161
5	0.102	0.236	0.024	0.185
6	0.061	0.213	0.013	0.198
7	0.059	0.197	0.012	0.210
8	0.090	0.182	0.016	0.226
9	0.173	0.172	0.030	0.256
10	0.112	0.162	0.018	0.274

Los métodos estadísticos normales se aplican generalmente a las pruebas de corrosión y a sus resultados obtenidos en dichas pruebas, de modo que la exactitud de los mismos se puede expresar por el error standard, mientras que las curvas se pueden adaptar a trazos empíricos por el método de mini-

mos cuadrados, el coeficiente de correlación o de correlación parcial puede ser útil, especialmente en las pruebas de campo y de servicio, para averiguar el efecto de una serie de variables de operación. Según métodos estadísticos por ejemplo se evaluaron y estandarizaron la corrosión por picaduras indicadas anteriormente, esto a manera de ver la agresividad del medio corrosivo en el cual se encuentra el metal afectado.

5.2.2 Ensayo para evaluar la resistividad del medio

Esta medida es importante como previa a la instalación de una estructura, para conocer la agresividad corrosiva del electrólito que lo rodeará, en los líquidos no sufre mayor variación de un lugar a otro (salvo con aumento de temperatura), pero es necesario realizar varias mediciones en el caso de suelos.

Cuando se analiza el circuito de corrosión electroquímica se puede ver que a igualdad de diferencia de potenciales, la intensidad de la corriente de corrosión será tanto mayor cuanto menor sea la resistencia total del sistema; desde que la resistencia del metal es constante, los del cátodo y ánodo dependen de su forma geométrica, estado superficial y resistencia específica del electrólito en contacto influenciado por el estado de polarización de los electrodos; solo queda conocer la resistencia específica del electrólito. Es práctico desarrollar un perfil de resistividades en casos de tubería enterrada a la misma profundidad en que será enterrada.

Para la medición de resistividades en campo son de mayor uso el de dos y cuatro electrodos, el primero es muy rápido de lectura, pero da resistividades del terreno existentes entre los dos pines, obteniéndose valores muy localizados y superficiales (se puede utilizar solamente para hacernos una idea aproximada). Este método utiliza dos pilas en forma de cono, a través de las cuales se hace pasar corriente continua de una pila de 3 V, cuyo polo positivo se une al cono de menor superficie (sexta parte del otro cono), para evitar efectos de polarización, un miliamperímetro graduado directamente en ohm-cm, intercalado en el circuito nos da el valor de la resistividad.

El método de cuatro electrodos es comúnmente utilizado (Wenner), obteniéndose resistividades más exactas de una zona de terreno más amplia y a la profundidad deseada, ver Fig. 16, las cuatro estacas se elevan equidistantemente en el terreno, a una distancia de 2 cm a lo largo de una línea recta y de tal forma que la profundidad hincada sea menor que a . La batería b suministra corriente continua que el vibrador V_1 la convierte en pulsatoria introduciéndola en tierra por los pines extremos C_1 y C_2 , el vibrador V_2 está sincronizado con el V_1 y el cursor S_1 está graduado para poder leer directamente la resistencia R entre P_1 y P_2 cuando la caída de potencial IR a través de la resistencia R_1 se anule, según indicación cero del galvanómetro G ; seguidamente para calcular la resistividad específica se aplicará la ecuación:

$$\rho = 2 \times \pi \times a^2 \times R \quad \dots (5.13)$$

en la que ρ es la resistividad en ohms-cm, cuando a esté expresada en cm, mientras que R se lee en ohms del aparato.

La resistividad del terreno puede dar una idea de su agresividad y la tendencia a la corrosión de la estructura, pero es un dato que no interviene directamente en el cálculo del potencial y corriente requerida para protección catódica, sin embargo, este dato es bastante importante para calcular un lecho de ánodos. Otra forma de calcular la resistividad de un terreno puede plantearse en función de su composición de arcilla y humedad con la ecuación:

$$\rho = \frac{10^7}{(\% \text{ arcilla}) \times (\% \text{ humedad})} \text{ ohm-cm} \quad \dots (5.14)$$

Generalmente los suelos homogéneos tienen humedad entre 2 y 20%, y en muchos casos arcilla entre 50 y 90%. El siguiente cuadro nos muestra los resultados obtenidos por Wenner, por método de cuatro electrodos para terreno húmedo y arcilloso: ⁽³⁾

Tabla 10. RESULTADO DE MEDICION POR METODO DE 4 ESTACAS PARA SUELOS

ESPACIAMIENTO ENTRE PINES (pies)	LECTURA DEL MEGGER (ohms)	RESISTIVIDAD ohm-cm
1	7.45	1,430
2.5	6.10	2,920
5	2.29	2,193
10	0.80	1,530
20	0.26	997
30	0.14	805

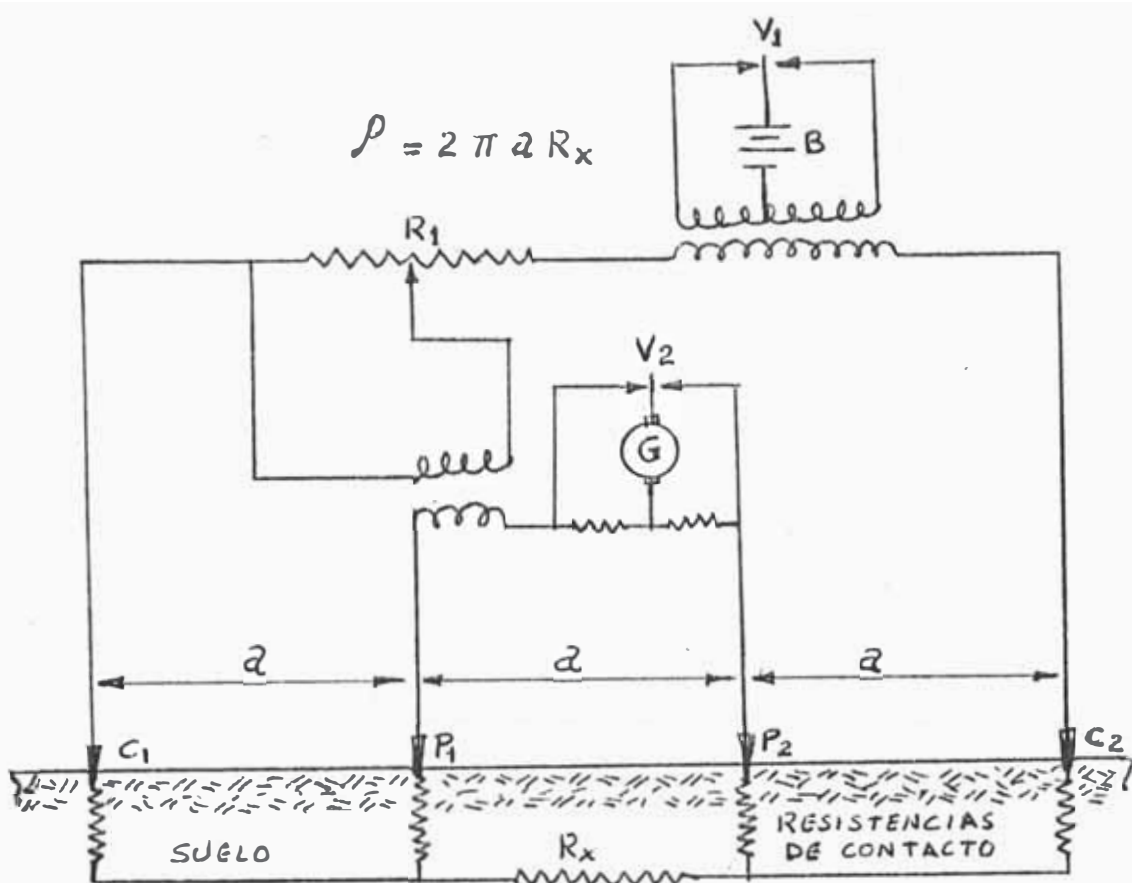


FIGURA 16 - MEDICION DE RESISTIVIDAD POR METODO DE 4 ESTACAS Y PRINCIPIO "CAIDA DE POTENCIAL"

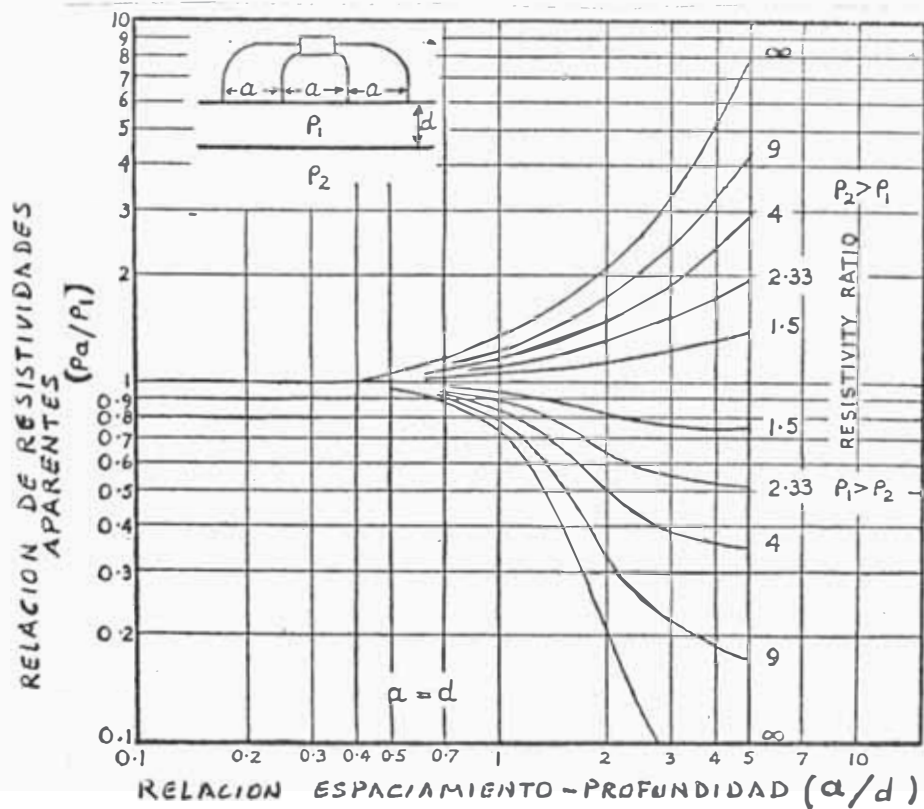


FIGURA 17 - DETERMINACION GRAFICA DE LOS PARAMETROS GEOELECTRICOS DEL SUELO

Cuando se tenga suelo de dos estratos (con diferentes resistividades), el método de cuatro pines puede ayudarse graficando en la Figura 17, los datos de entrada ρ_1 , a y d, y seguir paralelamente a la curva cercana para diferentes radios de resistividades.

Una interesante variación del método de Wenner puede ser usado para medir la resistividad del agua, reemplazando los cuatro pines por cuatro electrodos conectados con cables, ver Fig. 18, introduciendo en el líquido se mide normalmente la resistividad, C_1 y C_2 vienen a ser electrodos de corriente mientras que P_1 y P_2 electrodos de potencial, en este caso la expresión de evaluación cambia a $\rho = 4\pi a R$ porque están cubiertos por un "infinito" electrólito, el electrodo tiene que ser de plata-cloruro de plata (Ag - AgCl).

En la evaluación y decisión para diseños se debe efectuar un muestreo de datos obtenidos directamente en el campo para varias mediciones, ver Fig. 19, posteriormente se selecciona un valor representativo dentro de ellas, una ayuda será la experiencia y criterios de diseños similares. Cuando el acero está en contacto con diferentes zonas de aereación, el flujo de corriente puede ser determinado por la resistencia en el electrólito, la Fig. 20 muestra la obtención experimental de la acción local de celda corrosiva con velocidades por aereación y soluciones agitadas como una función de la resistividad del electrólito. Conjuntamente ⁽¹⁷⁾ se presenta la Fig. 21 mostrando la variación de la resistividad del agua con la temperatura,

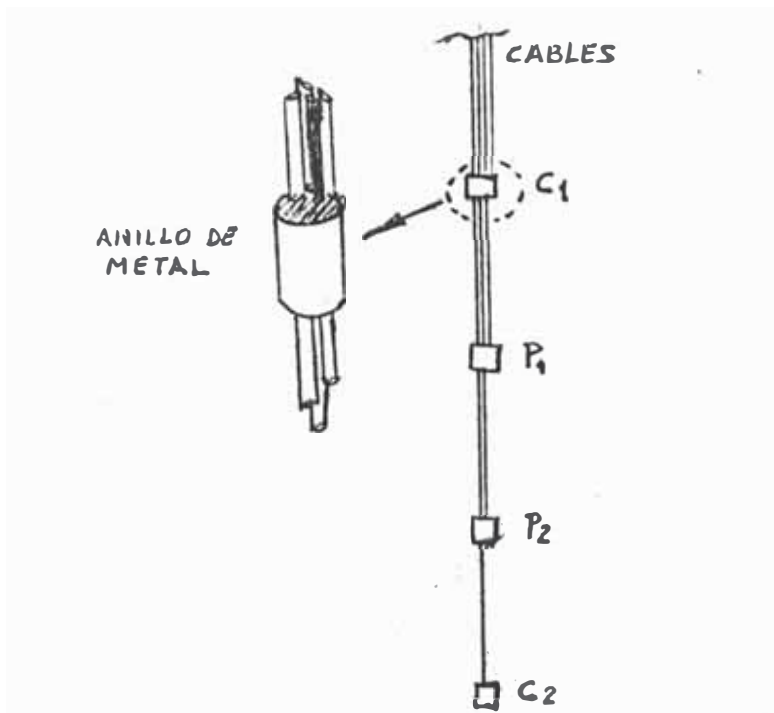


FIGURA 18 - METODO DE 4 PINES PARA USAR EN AGUA DE MAR

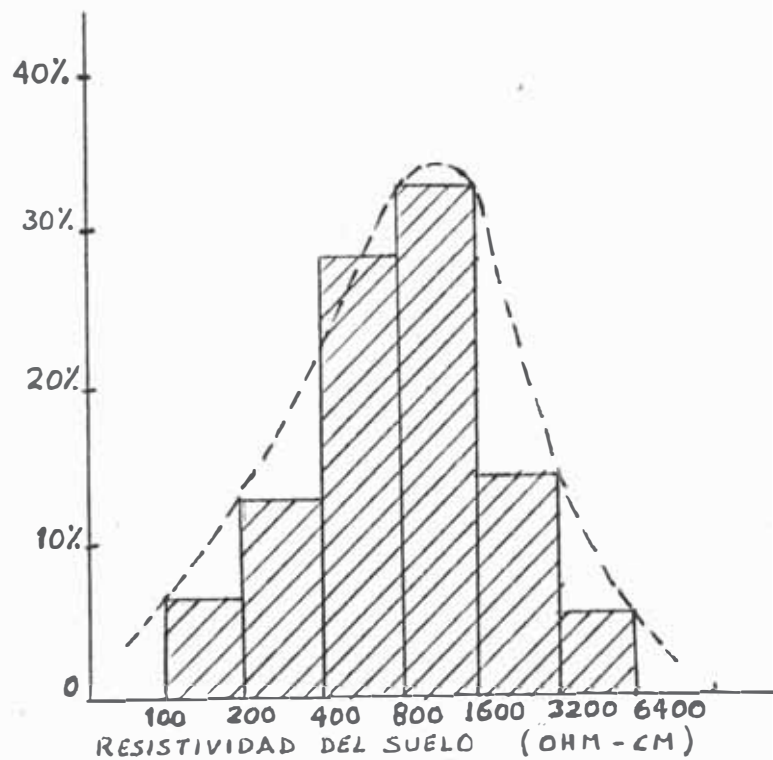


FIGURA 19 - HISTOGRAMA DE RESISTIVIDADES CON DATOS OBTENIDOS EN CAMPO

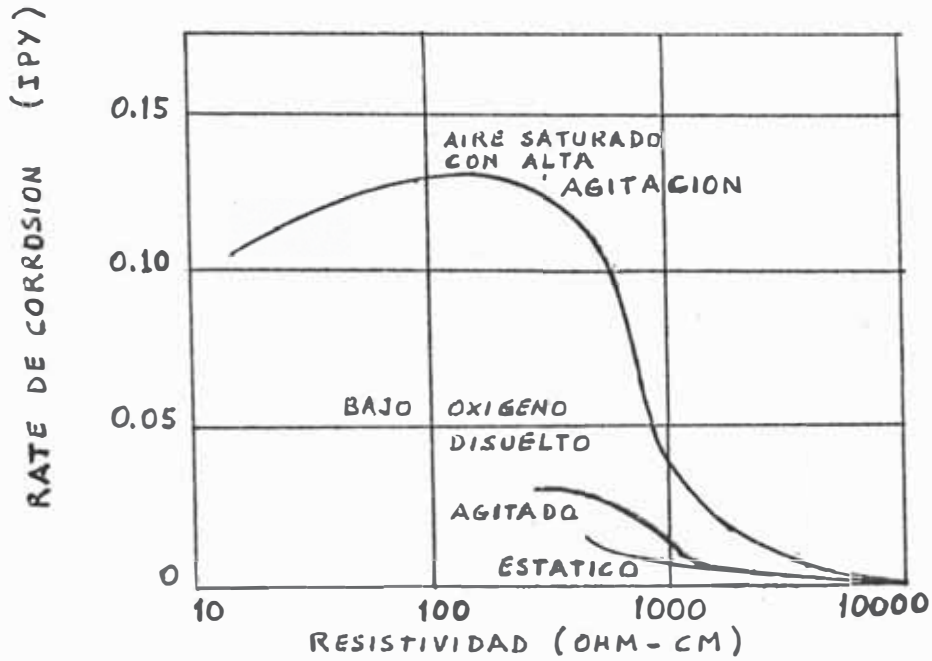


FIGURA 20 - EFECTO DEL OXIGENO TRANSPORTADO POR AIREACION Y SOLUCIONES AGITADAS EN CORROSION DEL ACERO

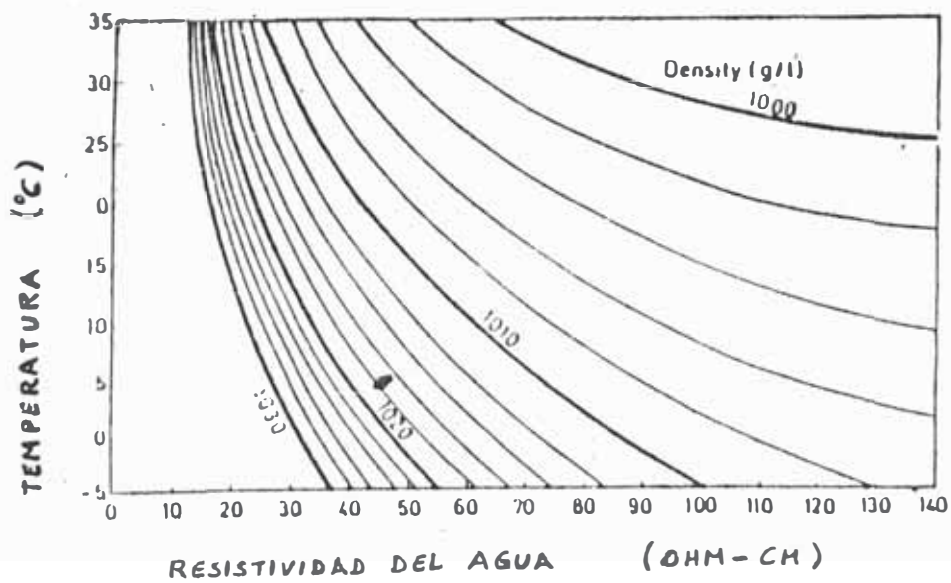


FIGURA 21 - RESISTIVIDAD DEL AGUA DE MAR EN FUNCION DE LA TEMPERATURA Y DENSIDAD

para distintas densidades en gramos/litro.

5.2.2.1 Corrientes erráticas

Las corrientes extrañas fluyen a través del medio en el cual se realiza las mediciones, principalmente por dos causas; el primero se debe a un rectificador de protección catódica conectado a una estructura enterrada, y la segunda por circulación de corriente continua por algún conductor en la vecindad de una estructura afectada, adicionalmente existe un tercer caso para lugares muy cercanos al polo norte y sur de la tierra. En el caso de conductores cerca a tuberías, puede causar gradientes de potencial y consecuentemente producir perforación del recubrimiento y pared de la tubería.

La forma del gradiente puede ser causado por flujo de electrones a través del electrólito o a través de la estructura, casos frecuentes son el retorno de corriente en los rieles. Se puede prevenir o reducir el efecto de corriente extrañas, como por ejemplo incrementar la resistencia del electrólito cuando la corrosión es causada por circulación de corriente extraña a través de la estructura, y aumentando la resistencia de la estructura cuando dicha corriente circula por el electrólito, generalmente al presentarse el segundo caso, a la estructura se le puede incrementar su resistencia aplicando juntas aislantes entre varias partes de la estructura, aún cuando este sistema no soluciona totalmente (porque hay partes no aisladas).

Otras formas de bajar el efecto de corrientes extrañas es mediante pinturas o con recubrimientos en la interface estructura/electrólito con un film resistente; por ello se tiene que inspeccionar y realizar mediciones para detectar las corrientes erráticas de tipo corriente continua, sabiendo que la corriente alterna no causa mayores efectos sobre el sistema. Un método común para detectar las corrientes erráticas es midiendo potenciales estructura/electrólito por períodos, si los valores registrados varían de una medición a otra, entonces existen corrientes erráticas; otro método rápido es invirtiendo la polaridad de la fuente de alimentación al efectuarse una medición normal de potencial, en este caso se comprobará la no existencia de corrientes erráticas mediante el valor absoluto de la lectura, la cual no deberá variar.

5.2.2.2 Mediciones complementarias

En primera instancia tenemos el pH, que en pocos casos se mide, como por ejemplo en cruces de ríos fuertemente contaminados por industrias químicas o terrenos con rangos extremos de pH. La densidad de corriente necesaria para proteger una estructura depende de los valores del pH, especialmente con los valores extremos (ácidos o alcalinos), para casos de suelos con características del medio estudiado el pH tiene valores cercanos a 7, generalmente tomando valores de 8, asimismo en agua de mar el pH fluctúa entre 7.5 y 8.5; en ambos casos mencionados el pH no tiene mucha influencia para cálculo

los de protección. La medición en fluidos se realiza colorimétricamente o con pH-metro electrónico, in situ o sacando muestras para el laboratorio; en el caso de tierras, puede hacerse también in situ por uno de los métodos enunciados, pero es preferible cuadricular la zona y sacar muestras a profundidades distintas y analizarlas en laboratorio, estos ensayos aparte de ser laboriosos son costosos, para nuestro caso no es muy necesario por lo explicado anteriormente.

La temperatura como otro parámetro, puede hacerse su seguimiento con un termógrafo de sonda, obteniéndose gráficamente la variación de las mismas, en nuestro caso la temperatura es uniforme en todo el electrólito, eliminando la posibilidad de gradientes por zonas, las que causarían corrosión. Existen otras pruebas de laboratorio, en su mayoría no muy confiables como las de campo (in situ), ya que son realizados mediante simulaciones únicamente.

5.2.3 Descripción del ensayo efectuado con cupones de corrosión

El ensayo se efectuó con dos tipos de cupones, el primero preparado del mismo material de la estructura y el segundo mediante cupones normalizados; al prepararse los cupones se tomaron muestras de $2\frac{1}{2}$ " x 1" procedentes de planchas retiradas durante el mantenimiento de los tanques y del tramo de tubería submarina cambiada.

El problema de los cupones preparados se presenta al cortar y lijar la muestra, por ser pequeñas placas, estarían en alguna

forma afectando estructuralmente, además al no poder fijar el grado de acabado superficial nos llevaría a resultados erróneos cuando calculemos la velocidad de corrosión. Con las inconveniencias observadas en las muestras (cupones) preparadas en taller, se procedió a adquirir cupones normalizados del mismo material de la estructura a proteger posteriormente y estas muestras fueron fabricadas con bastante cuidado y una precisión de cuatro decimales en gramos.

Los cupones estándar fueron enterrados en las zonas de tanques y sumergidos cerca a la boya para línea submarina, ver Apéndice A, donde se puede observar que se instalaron 2 cupones por zona para tener resultados representativos en la velocidad de corrosión. Estos cupones fueron enterrados durante 56 días, los que estuvieron sumergidos en agua de mar 45 días.

Las características de los cupones estándar ⁽¹⁸⁾ son: Material SAE 1018 Mild Steel, tipo 3" Strip de Roherback Cosasco, las dimensiones de 2.7/8" x 7/8" x 1/8", superficie de exposición de 5.2 pulg², pesos alrededor de 37 gramos (mayor detalle en el Cuadro de Control) ver Tabla 11. El cálculo exige la limpieza del cupón, separando los productos de corrosión primeramente mediante un cepillo de cerdas rígidas, seguido por lijas finas para completar con un ataque químico señalado en ASTM G-1 (preparación, limpieza y evaluación de especímenes de corrosión), siendo lo más usual emplear una solución de hidróxido sódico hirviente al 20% con 30 gramos/litro zinc en polvo, exponiendo durante 5 minutos la muestra.

El proceso de limpieza se inicia con la reducción del hidrógeno procedente de la solución de zinc en el álcali, al producto de la corrosión al estado de hierro ferroso y le hace menos adhesivo, de modo que se puede separar con un cepillado intermitente. Otro método es con ácido clorhídrico concentrado 50 gramos por litro a baja temperatura y aplicar solo antes de limpieza.

La corrosión se puede valorar en dos formas, primero analizando los productos formados sobre la superficie del metal, segundo luego de quitar dichos productos para analizar la superficie de contacto metal/medio corrosivo (evaluar forma de ataque), con estos criterios se fotografiaron las muestras en las dos etapas señaladas, ver Apéndice E. Para describir la corrosión en estos casos se divide en dos clases principales: Corrosión general y corrosión local, con una subdivisión posterior en uniforme y no uniforme, en muchos casos de picadura (amplio, mediano o estrecho) y agrietamiento.

La zona de tanques muestra mayormente corrosión por picaduras, siendo el riesgo de perforación serio en las planchas de fondo, habiéndose observado dichas perforaciones en las planchas cambiadas luego de una inspección por medición de espesores o al detectarse fuga de líquido por la base de los tanques, ver Apéndice F. Por otra parte las tuberías submarinas muestran corrosión uniforme y debido a la braveza del mar, los productos de corrosión son arrastrados y limpiados por el agua, apareciendo el ataque por erosión, acelerando la corrosión.

Analizando las muestras antes de limpieza, se observa la constitución del suelo conformado principalmente por arena y arcilla como es característica en los suelos cercanos al mar, los cupones muestran partes blancas que corresponden a Fe(OH)_2 (hidróxido ferroso) y las partes rojizas Fe(OH)_3 (hidróxido férrico). La celda de corrosión se produce por varios factores, partiendo de la fabricación de planchas mediante rolado, fases presentes en el metal y composición del terreno o suelo.

Enseguida se calculará la velocidad de corrosión en MPY (0.001" de espesor por año), tomando el cupón sumergido en agua de mar, ubicación zona de boya (Tub. 3 - Ver Apéndice A). La exposición fue durante 45 días, con peso inicial del cupón 37.7479 gramos y peso final de 36.5024 gramos, área de exposición 5.2 pulg²/densidad del metal 0.284 lbs/pulg² (7.8776 gramos/cm³).

La pérdida de peso será:

$$W_t = (37.7479 - 36.5024) \times 1,000 = 1,245.5 \text{ miligramos}$$

El tiempo de exposición:

$$T = 45 \times 24 = 1,080 \text{ horas}$$

Reemplazando en la ecuación (5.4) calculamos la velocidad de corrosión:

$$\text{MPY} = \frac{1,245.5 \times 534}{5.2 \times 1,080 \times 7.8776}$$

Resultando $\text{MPY} = 15.033$

Este valor calculado es considerado como mediano (en evaluaciones de severidad de corrosión), ver Tabla 7; un valor práctico para proteger es desde 5 MPY hacia arriba, con esta referencia concluimos que la tubería submarina requiere protección anticorrosiva.

Análogamente al cálculo anterior, se pueden evaluar los cupones enterrados en áreas de tanques y tubería enterrada, los resultados se muestran en la Tabla 11 empleando codificación (ver Apéndice A), los cupones enterrados estuvieron expuestos 56 días.

Tabla 11. CUADRO DE CONTROL PARA LOS CUPONES EXPERIMENTADOS

CUPON (Código)	PESO INICIAL (gramos)	PESO FINAL (gramos)	PERDIDA DE PESO (gramos)	VELOC. DE CORR. MPY
TK1	37.8462	36.6364	1.2098	11.5
TK2	37.6558	36.5888	1.0670	10
TK3	37.4315	36.1717	1.2598	12
TK4	37.8408	37.1153	0.6255	6
TUB1	37.5494	36.7970	9.7524	7.2
TUB3	37.7479	36.5024	1.2455	15

Del cuadro observamos los valores del TK1 y TK2 son aproximados por pertenecer ambos a una misma zona, mientras que los cupones restantes pertenecen a zonas diferentes, el cupón TK3 presenta un rate bajo porque los tanques en esa zona tienen protección catódica por ánodos de sacrificio.

La fórmula empleada considera que el consumo del metal (corro-

sión) es uniforme, cuando realmente hay zonas con picaduras, con lo cual el rate de corrosión sería mucho mayor. Si analizamos visualmente los cupones, podemos cuantificar el área picada entre 20 y 40% respecto al área total del cupón, pero estos valores no pueden crear un factor aplicable a los resultados obtenidos en la Tabla 11, porque faltaría conocer las profundidades de picadura, las cuales no son homogéneas.

5.2.4 Descripción de la prueba de resistividad y corrientes erráticas

Las mediciones de resistividad se realizaron a profundidad de 50 centímetros y con separaciones variables de los pines desde uno hasta 8 metros, se midieron en sentidos norte-sur y este-oeste. Se buscó el terreno de medición cerca a la estructura que será protegida, el instrumento utilizado fue megómetro Nilsson modelo 400 de alta sensibilidad, mostrándose en la Tabla 12 los resultados.

Los resultados presentados en la tabla están calculados según la expresión (5.13), así, por ejemplo para la posición este-oeste, con distancia entre pines de 3 metros, la resistencia R_x (ver Figura 16) medida es de 5 ohmios. Para aplicar la fórmula mencionada tenemos:

$$\begin{aligned} a &= 300 \text{ centímetros} \\ R_x &= 5 \text{ ohmios} \end{aligned}$$

Reemplazando en (5.13)

$$\rho = 2 \times \pi \times 300 \times 5$$

Resultando la resistividad respectiva

$$\rho = 9,420 \text{ ohmios-centímetro}$$

Se puede observar que el terreno tiene resistividades medianas, con valores entre 6,280 y 45,240 considerando el sentido este-oeste, que era el más adecuado para efectuar mediciones, ya que en norte-sur existían zonas de transición en la composición del terreno. La NACE mediante sus publicaciones de "Materials Performance" clasifica el rango de resistividades para terrenos en baja para valores menores que 4,500 ohm-cm, valores medianos desde 5,000 a 50,000 y valores altos de resistividad si pasan los 100,000.

La resistividad del agua de mar no se llevó a cabo por condiciones desfavorables de la zona, pero se tienen los datos obtenidos por mediciones efectuadas en SIMA-CALLAO, con valor promedio de 23 ohm-cm y un pH igual a 8.1 (alcalino); además, su composición es 30.4% de sodio, 55.2% cloruros, 7.7% sulfato, 3.7% magnesio, más otros en menor proporción.

Para detectar las corrientes erráticas, en primera instancia se revisó la existencia de fuentes de corriente continua y estructuras enterradas cercanas, no encontrándose estos y verificando mediante mediciones de potencial en tres períodos semanales, manteniéndose las lecturas constante, aún invirtiendo polaridades los valores absolutos de las mediciones no variaron, confirmando la no existencia de corrientes erráticas.

Tabla 12. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICION DE RESISTIVIDADES

POSICION NORTE-SUR			POSICION ESTE-OESTE		
DISTANCIA ENTRE PINES (mts.)	Rx (ohms)	ρ (ohm-cm)	DISTANCIA ENTRE PINES (mts.)	Rx (ohms)	(ohm-cm)
1	179	112,470	1	10	6,280
2	79	99,270	2	10	12,560
3	66	124,400	3	5	9,420
5	26	81,680	5	9	28,270
8	10	50,260	8	9	45,240

Es preciso indicar que se debe verificar la configuración estratificada del terreno, porque las mediciones efectuadas por el método de cuatro electrodos nos dan resistividades "aparentes" cuando se presentan más de una capa. Dicha verificación se realiza mediante el empleo de la Figura 17, la cual presenta todas las características de resistividades y nos permite hallar la resistividad "específica" utilizada para diseños.

El procedimiento consiste en graficar los datos de campo en un papel doble logarítmico, hacer superponerlo a la familia de características patrón (Figura 17) manteniendo el paralelismo de los ejes, hasta lograr la mayor coincidencia con una de ellas, enseguida marcar en el gráfico medidas de campo el centro "origen" de las características patrón, y desde ese punto se leen en ordenada ρ_1 y en abscisas h_1 (en la figura conocido como "d"), luego calcular ρ_2 con el parámetro ρ_2/ρ_1 de la curva respectiva, asimismo se calcula la profundidad "h" mediante a/h .

La Figura 22 nos muestra los resultados de campo presentados en la Tabla 12, así mismo indica los valores de resistividades "específicas" y profundidades, hallados aplicando la Figura 17 con los siguientes resultados:

Curva I

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{1}{15} \quad ; \quad \rho_1 = 1,000 \text{ ohm-m} \quad ; \quad h_1 = 5.6 \text{ m}$$

$$\rho_2 = 66 \text{ ohm-m}$$

Curva 2

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = 50 \quad ; \quad \rho_1 = 33 \text{ ohm-m} \quad ; \quad h_1 = 0.70 \text{ m}$$

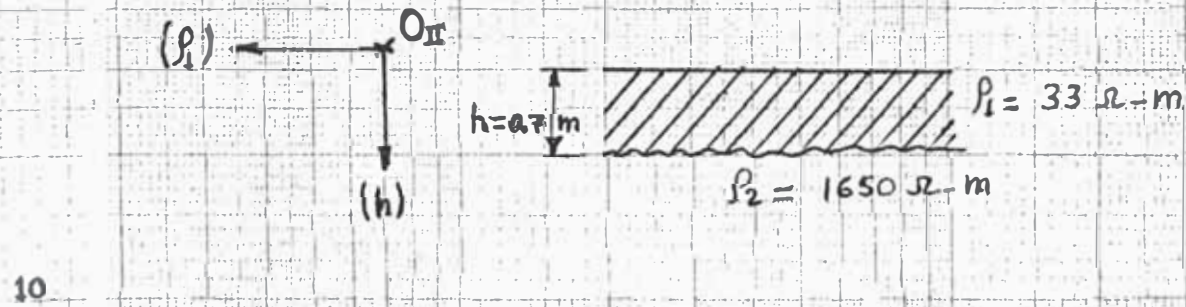
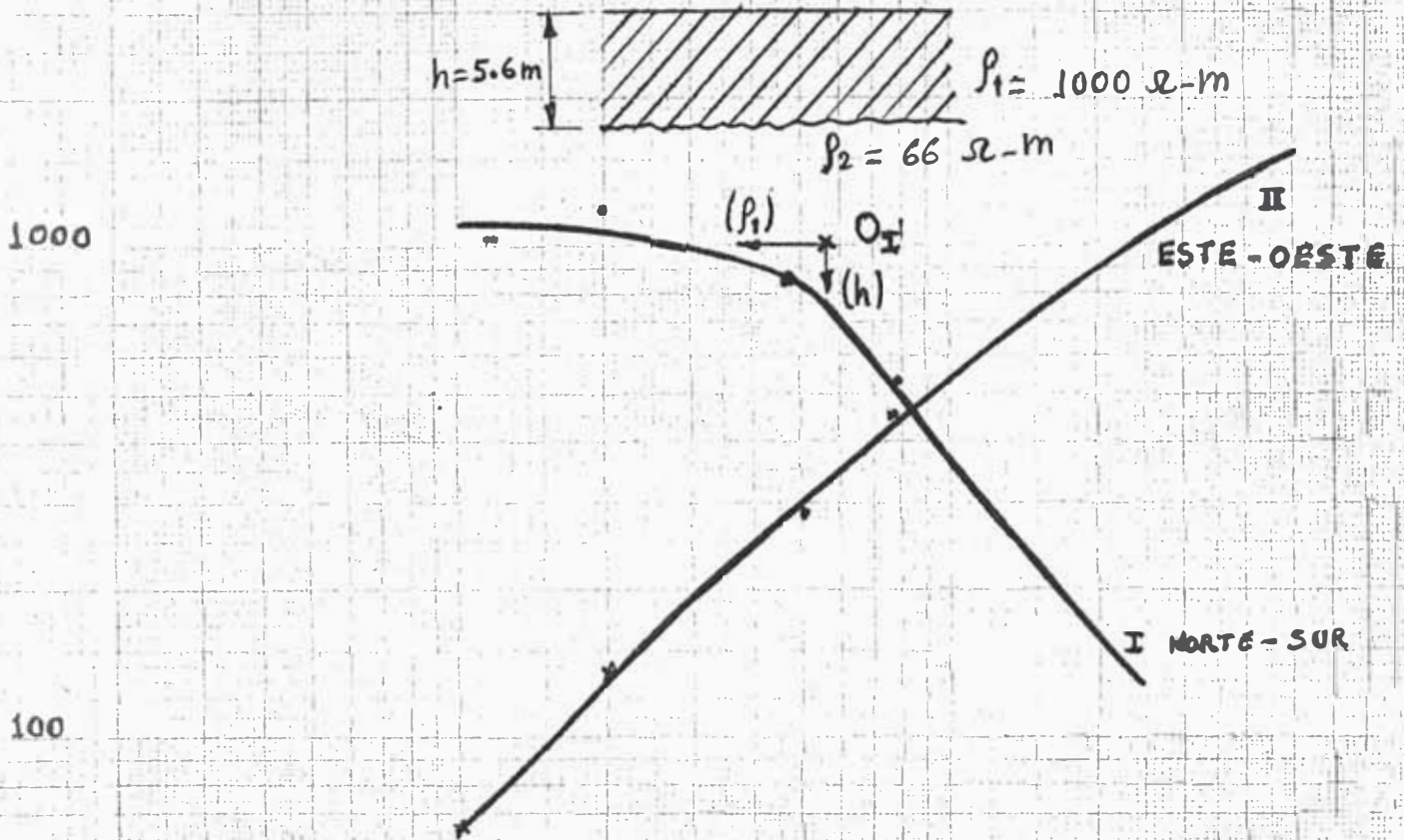
$$\rho_2 = 1,650 \text{ ohm-m}$$

5.3 Sistemas de protección anticorrosiva aplicables

La solución a los problemas planteados puede efectuarse en diversas formas, se puede aplicar uno o varios sistemas de protección simultáneamente, dependiendo de la agresividad del medio y de las características específicas de operación y servicio. La selección de los tipos de protección estará ligada a la confiabilidad y economía del sistema, existiendo diversidad de sistemas aplicables, una preselección se efectuará en base a los criterios anteriores y experiencias realizadas por organismos dedicados a ensayos (caso de la NACE), quedando por definir mediante evaluaciones técnico-económicas el sistema definitivo para nuestro requerimiento.

ρ_a (Ω m)

FIGURA 22 - DETERMINACION GRAFICA DE RESISTIVIDADES ESPECIFICAS



Debemos partir con lo más simple; esto es: El control para disminuir la corrosión tiene que necesariamente estar dirigido a uno de los componentes del circuito electroquímico presentado en el Capítulo 2; principalmente el ánodo, cátodo y electrólito. Los controles anódicos son aplicables en metales con comportamiento activo-pasivo (caso del acero en ácido sulfúrico), tiene el inconveniente de severa corrosión cuando fallan, se basa en la formación de película protectora sobre la superficie de los metales por medio de la aplicación de una corriente anódica externa.

El control sobre el electrólito no se puede efectuar por ser de gran magnitud, lo que se estila es actuar mediante el control catódico, igualando el potencial de la estructura evitando la celda electroquímica, desviando la corrosión hacia un ánodo sacrificable o compensando por un aporte exterior de corriente continua. La selección de materiales está limitada por el costo y la facilidad de manipulación, aparte que la estructura existe como tal cuando se efectúa la protección, quedando limitada a los aceros comerciales; los requerimientos aislantes entre el metal y electrólito, pinturas, cintas, asfaltos, etc., la aplicación de inhibidores es muy limitado en la estructura estudiada, limitándose a aplicación conjunta de pinturas y aditivos.

Dentro de los recubrimientos tenemos los metálicos y no metálicos, los primeros son mayormente aplicados a estructuras pequeñas o casos especiales, son relativamente de alto costo; los segundos son variados, como fosfatación en solución acuosa de un fosfato metálico ácido, la oxidación superficial (mediante calen

tamiento, electrólisis o por ácidos) consiste en formar una película superficial de óxido protector, aplicado en aluminio y magnesio, el esmaltado a base de borosilicatos de calcio, potasio y plomo, son aplicados sobre el metal desengrasado y decapado, finalmente horneados, son frágiles. El recubrimiento más usual es la pintura en sus diversas composiciones y variadas capas, empezando por la base anticorrosiva, con acabados de composición especial para protección.

Con lo expuesto brevemente la preselección de sistemas queda reducido a sistemas de protección catódica y recubrimientos de pinturas y similares, pudiendo aplicarse en forma independiente o simultáneamente en forma complementaria, los que se decidirá con evaluaciones de los experimentos técnicos en el siguiente capítulo, además del análisis económico respectivo. Estos sistemas preseleccionados cubren los requerimientos básicos en la protección de estructuras enterradas y sumergidas, el primero puede cubrir las deficiencias del segundo cuando se aplican conjuntamente, mientras que los recubrimientos complementarios. Protegen de incrustaciones y ayudan a las pinturas en islar la estructura del medio corrosivo. En la evaluación económica se contemplará además el costo de protección y comparando con el costo en cambiar planchas de tanques al no aplicar ninguna protección.

6.

SISTEMAS DE PROTECCION QUE SE PROPONE

6.1 Sistema de protección catódica

Es una manera de proteger una estructura tratando de igualar los potenciales para evitar la formación de celdas corrosivas en dicho metal, es decir reduce la corrosión mediante uso de corriente eléctrica continua aplicada a la superficie metálica, desde una fuente de corriente externa, que se opone a la fuga de electrones desde las áreas anódicas a las catódicas. Actualmente la aplicación de este sistema está muy difundida por sus buenos resultados en fondos de tanques, tuberías enterradas y submarinas, muelles, plataformas de explotación petrolera y estructuras de concreto armado, como puentes pilotes, etc.

La intención de protección catódica es mantener al metal protegido en un estado catódico, mediante la impresión de corriente continua, la que será calculada con sumo cuidado, teniendo en cuenta la inexactitud en los cálculos, dependerá fundamentalmente de una buena medición "in situ" los parámetros principales como resistividad del terreno; potencial estructura-suelo (o agua de mar), corriente requerida al momento de polarizar, las corrien-

tes erráticas o de perturbación y otros factores complementarios, como la velocidad de corrosión. Seguidamente se detallan los dos tipos de protección catódica existentes, mediante ánodos de sacrificio y corriente impresa, ⁽⁷⁾ ver Figura 23.

6.1.1 Protección catódica mediante ánodos de sacrificio

Son mayormente aplicables cuando los requerimientos de corriente necesaria para la protección son bajas, así tenemos en superficies pintadas con buenas cualidades, en partes concentradas de superficies inmensas o cuando los suelos son de baja resistividad. Un par galvánico se forma cuando un ánodo de sacrificio se pone en contacto con la estructura a proteger (puede compararse con un circuito), en este caso el ánodo tiene un potencial más electronegativo que aquel de la estructura a proteger, al conectarse la estructura (cátodo) se polariza catódicamente y el ánodo de sacrificio se polariza anódicamente; y ambos alcanzan el mismo potencial, siempre que la resistencia del electrólito sea lo suficientemente baja.

El ánodo se consume por disolución durante la protección del cátodo y requiere ser remplazado periódicamente, buscando siempre la transferencia de electrones al cátodo para disminuir su potencial, requiriéndose además del ánodo de sacrificio una aleación suficientemente negativa, que no se vuelva pasivante (el ánodo debe polarizar a la estructura protegida, evitando su corrosión o bajando la velocidad de la misma). En un circuito eléctrico el voltaje V_d entre ánodo polarizado y cátodo pro

tegido, se relaciona con la corriente de protección considerando las resistencias del ánodo, cátodo y metal, sin considerar la resistencia del electrólito.⁽⁸⁾

$$I = \frac{V_d}{R_a + R_c + R_m}$$

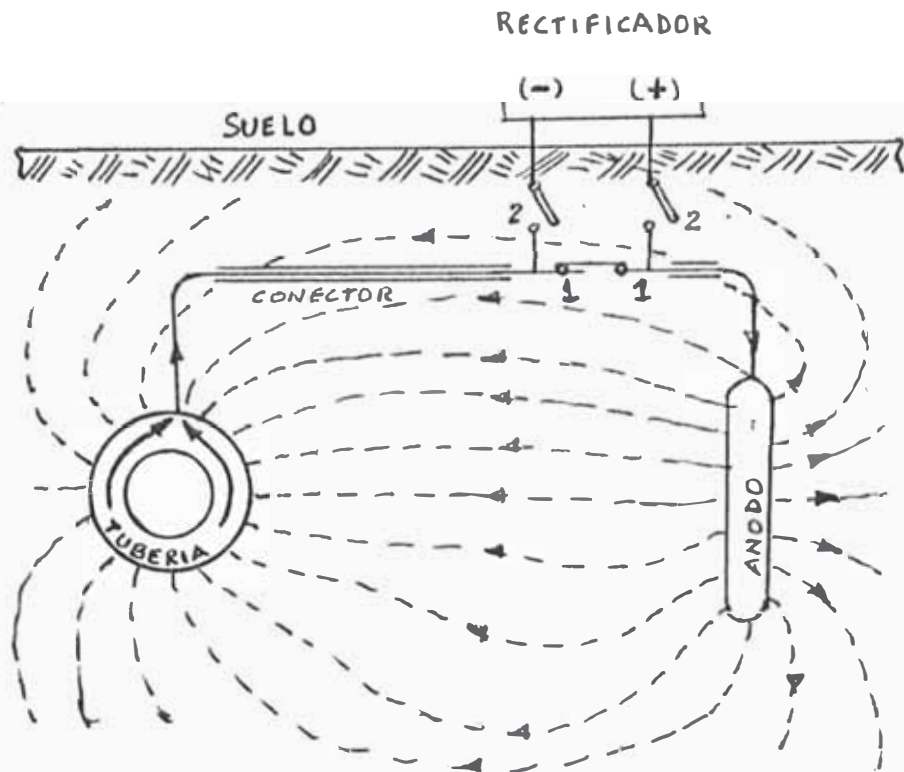
Esta corriente debe ser bien evaluada para dimensionar y seleccionar ánodos sacrificables; la ventaja respecto a corriente impresa es su costo de mantenimiento bajo, no requiere corriente externa, costo de instalación bajo, poca interferencia sobre estructuras adyacentes y utiliza efectivamente la corriente protectora, siendo sus desventajas bajas corrientes de salida, potencial disponible fijo, no es efectiva cuando se tiene tuberías mal recubiertas con gran diámetro y se comportan en forma limitada de acuerdo a la resistividad del suelo, mas no así en aguas marinas.

Existen tres tipos de ánodos bastante empleados en aplicaciones de protección catódica por ánodos de sacrificio, reúnen los requisitos técnico-económicos, ellos son el magnesio, aluminio y zinc. Cada uno reúne ciertas ventajas propias, en cada caso dependen exclusivamente de las características particulares para su selección definitiva, estos metales son lo suficientemente negativos como para actuar en la protección del acero en muchos ambientes; la composición del ánodo es fundamental en su comportamiento, tratando de ser puros (mayor de 99.8%), los aleantes deben hacer volver más negativo el potencial que el metal base no aleado, volverse inofensivo al auto-

corroerse y mantenerse activo en el ambiente utilizado.

Las condiciones de protección exigen del ánodo un potencial de solución suficiente negativo para polarizar la estructura, lo suficientemente rápido hasta un potencial negativo entre -850 mV a -1,400 mV (caso de aceros), el ánodo no debe desarrollar películas pasivas en su superficie, con alta eficiencia galvánica de disolución corroyéndose lenta y uniformemente. Las características de un ánodo son: composición del material, su proceso de fabricación, forma física, rendimiento, capacidad, eficiencia y potencial, como se muestran ⁽¹⁵⁾ en las Tablas 13, 14 y 15, correspondiente a cada tipo de material base, a continuación enunciaremos las ventajas y desventajas de los tres ánodos.

a) Anodo de zinc; tiene alta eficiencia galvánica, son empleados satisfactoriamente para proteger estructuras en contacto con agua salada (buques, pilotes, tuberías submarinas, etc.), también son bastante empleados donde se requiere pequeña cantidad de corriente, su mayor ventaja se atribuye a que no presenta problemas cuando sucede evolución de hidrógeno en las reacciones catódicas, económicamente son de bajo costo y disponibilidad inmediata, la American Zinc Institute estandariza los tamaños y pesos del ánodo, siendo de forma en barras largas (2" x 2" x 60" para 60 lbs. por ejemplo), los pesos son 5, 30, 50, 60 y 150 libras. La desventaja del zinc es baja capacidad de corriente y puede invertir su polaridad a temperaturas mayores que 85°C.



PARA ANODO DE SACRIFICIO (1) CERRADO (2) ABIERTO
 PARA CORRIENTE IMPRESA (1) ABIERTO (2) CERRADO

FIGURA 23 - CIRCUITO ELECTRICO DE PROTECCION CATODICA

TABLA 13 - ALEACIONES TIPICAS PARA ANODOS DE ALUMINIO

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Si	0.11-0.21	0.10 max.	0.10 max.	-
Fe	0.08 max	0.13 max.	-	0.13 max.
Zn	0.35-0.50	0.50-5.0	5.00	4.00-5.00
Sn	-	-	-	0.1
Hg	0.035-0.50	-	-	-
In	-	0.005-0.05	0.02	-
Mg	-	-	0.80	-
Cu	0.006 max.	0.01 max.	0.01 max.	0.01 max.
Al	Resto	Resto	Resto	Resto
Eficiencia	95% av.	90% max.	95% aprox.	50%-80%
Potencial	-1.05 vs. Ag/AgCl	-1.15 vs. Ag/AgCl	-1.15 vs. Ag/AgCl	-1.10 vs Ag/AgCl
Capacidad (Ahkg ⁻¹)	2830 av.	2 700 max	2 700 aprox	Variable

TABLA 14- ALEACIONES TÍPICAS PARA ANODOS DE ZINC

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Cu	0.005 max.	0.005 max.	0.005 max.	0.002 max.
Al	0.30-0.50	0.10-0.50	0.4-0.6	
Si	0.003 max.	0.125 max.	0.125 max.	
Fe	0.002 max.	0.005 max.	0.0014 max.	0.0014 max.
Pb	0.005 max.	0.006 max.	0.3 max.	
Cd	0.025-0.100	0.025-0.15	0.075-0.125	
Hg				0.10-0.15
Zn	Resto	Resto	Resto	Resto
Eficiencia	95%	95%	95%	95%
Potencial (V)	-1.05 vs. Ag/AgCl	-1.05 vs. Ag/AgCl	-1.05 vs. Ag/AgCl	-1.05 vs. Ag/AgCl
Capacidad (Ahkg ⁻¹)	780	780	780	780

TABLA 15- ALEACIONES TÍPICAS PARA ANODOS DE MAGNESIO

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Cu	0.02 max	0.01 max.	0.02	0.05 max.
Al	5.3-6.7	2.7-3.5	0.01 max.	-
Si	0.10 max.	0.03 max.	-	0.05 max.
Fe	0.003 max.	0.002 max.	0.03	-
Mn	0.15 min	0.20 min	0.5-1.3	1.20 min
Ni	0.002 max.	0.001 max	0.001	0.01 max.
Zn	2.5-3.5	0.7-1.3	-	-
Mg	Resto	Resto	Resto	Resto
Otros	-	0.30 max.	-	0.30 max.
Eficiencia	50%	50%	50%	50%
Potencial(V)	-1.50 vs. Ag/AgCl	-1.50 vs. Ag/AgCl	-1.70 vs. Ag/AgCl	-1.70 vs. Ag/AgCl
Capacidad (Ahkg ⁻¹)	1230	1230	1230	1230

- b) Anodo de magnesio; usados cuando los requerimientos de corriente son altos y para resistencias altas del electrólito, requiere una buena cama de relleno, presenta problemas cuando hay evolución del hidrógeno, para altos potenciales son aleados con manganeso, su eficiencia promedio es 50%, son en forma de barras y los pesos son 5, 9, 12, 17, 20, 32, 48, 50 y 60 libras dentro de los estandars.
- c) Anodo de aluminio; tienen alta capacidad de corriente teórica (2,980 amp-hr/Kg.) a 50% de eficiencia, aleado con indio su rendimiento llega al 90%, poco empleado en suelos por tener bajo potencial (-1,150 mV con Cu/CuSO_4) y se pasiva fácilmente, se emplean en aguas marinas, son livianos, tienen una corriente de salida mayor que el zinc y magnesio, su desventaja es alto costo, poco disponibles y son susceptibles a corrosión localizada en agua de mar.

El sistema de ánodos de sacrificio requiere relleno alrededor de los ánodos, para disminuir la resistencia eléctrica en la interface ánodo-suelo, para su instalación depende del tamaño de ánodo. El relleno o backfill consiste en una mezcla de yeso, bentonita y sulfato de sodio, previenen la corrosión localizada del ánodo y evita la formación de películas pasivas superficiales, es decir aumentan el área anódica, atraen la humedad del suelo; para conseguir una resistividad aproximada de 50 ohm-cm cuando se satura la humedad, la mezcla a utilizar será 75% yeso, 20% bentonita y 5% sulfato de sodio.

Los factores externos considerados para selección de ánodos

son: área total de superficie a proteger, vida proyectada del ánodo y las condiciones de temperatura, velocidad de flujo del electrólito, aireación, composición del electrólito y posición del ánodo respecto a la estructura que se piensa proteger.

6.1.2 Protección catódica mediante corriente impresa

Consiste en colocar la estructura a proteger dentro de un circuito eléctrico con una fuente de corriente continua completado por un ánodo (el que se consume), ubicado a una distancia mayor de 80 mt. para evitar efectos de dispersión y enterrar en zonas húmedas tratando de mantener baja resistencia eléctrica. El principio se basa en alimentación de electrones a la estructura, debido a que este último al corroerse pierde electrones cuando el sistema de protección no existe, la fuente de alimentación es un rectificador de corriente continua, introduce la corriente al electrólito mediante ánodos.

Las conexiones son, el terminal positivo del rectificador al ánodo y el terminal negativo a estructura, los elementos de rectificación son de selenio o silicio enfriados por aceite o aire. Estos equipos llevan sistemas de regulación eléctrica de corriente y voltaje, los cables para conexión tanto al ánodo como a estructura, son de cobre aislado con polietileno compacto dependiendo de la corriente a transportar para seleccionar el diámetro.

En la selección de los rectificadores se tiene en cuenta el voltaje y amperaje de salida, para tener dichos valores se eva

lúa el área a proteger y la densidad de corriente requerida en cada tipo de electrólito (suelo y agua de mar), el voltaje se calcula mediante las caídas respectivas en conductores, ánodo, electrólito y cátodo, dependiendo principalmente en la resistividad del electrólito. La densidad de corriente de protección en tuberías submarinas es 1 mA/m^2 con 2% de tubería desnuda, llegando a ser 55 mA/m^2 para áreas totalmente sin ningún recubrimiento, en suelos la densidad fluctúa entre 2 y 60 mA/m^2 generalmente, dependiendo también de la condición del recubrimiento.⁽¹⁵⁾

Los ánodos para corriente impresa son diversos, su selección depende del costo por unidad de energía emitida y su duración electroquímica y mecánica; se pueden clasificar como metales raros (los platinados), materiales ferrosos, de plomo, carbonacios (grafito), metales no ferrosos (zinc y aluminio), otros combinados. Se presentan en forma de barras cilíndricas y discos, lechos (caso de la chatarra), coaxiales (titanio platinado con coraza de cobre), los más usuales son:

- a) Anodos de titanio platinado; de gran aplicación en aguas marinas, soportan elevadas corrientes de salida (500 Amp/m^2), su costo es alto, su rate de consumo está alrededor de 10 miligramos por cada amperio-año, el titanio es un metal muy reactivo con gran tendencia a pasivarse, en soluciones con cloruros forma película anódica, la que se rompe pasados los 12 voltios, empezándose a picar el ánodo.
- b) Anodos con aleación de plomo; son de bajo costo, a base de

antimonio tienen un consumo de 0.8 kilogramos por cada amperio-año resistiendo fuertes densidades de corriente (mayores a 200 Amp/m^2), aleado con plata presenta un grado de utilización de 80% y un consumo 0.1 kilogramo por amperio-año.

- c) Anodos de ferrosilicio; utilizado en lecho dispensador y en terrenos de baja resistividad, tiene un rate de consumo de 0.5 kilogramos por amperio-año, con un tope máximo de 12 a 15 amperios en cada ánodo, su desventaja es la fragilidad mecánica. Podríamos aprovechar para mencionar que las chatarras de fierro son baratas, consumo de 9 kilogramos por amperio-año y presenta problemas de polarización por el óxido superficial del hierro, puede emplearse relleno de carbón.
- d) Anodos de grafito; presentan problemas de porosidad, deben impregnarse con una resina inerte, son muy frágiles con máxima densidad de corriente 3 Amp/m^2 y consumo de 0.5 kilogramos por amperio-año. Son empleados cuando el terreno presenta una fuerte agresividad química y una resistencia de tipo medio, se emplean en forma tubular (usual 0.75 m diámetro x 1.20 m longitud), requiere de un lecho a base carbón de coque o polvo de grafito (backfill).
- e) Anodo de magnetita; empleado en terrenos que presentan una fuerte agresividad química, es un ánodo aligerado relleno interiormente con resina y con una capa de cobre electrolítico, las dimensiones en el mercado son de 0.60 m diámetro

tro x 0.80 y 0.92 m longitud, pesando alrededor de 8 kilogramos, su rate de consumo es 1 gramo por amperio-año con salida 10 amperios por ánodo (30 Amp. máx.).

La instalación de los ánodos se puede efectuar en forma de lechos de ánodos remotos o ánodos dispersos, los primeros se aplican concentrados uniformemente distribuidos, garantizando un suministro adecuado de corriente hacia la estructura, el segundo es aplicado para estructuras complejas como redes de tuberías, sistemas de tanques, muelles, etc. La distribución debe guardar concordancia con la geometría del sistema.

6.1.3 Instrumentos necesarios para pruebas en protección catódica

A continuación señalaremos los de mayor importancia para efectuar mediciones de campo; un electrodo de referencia constituido por un metal introducido en una solución salina del mismo metal, de actividad conocida, cuyo conjunto tiene un potencial fijo y conocido respecto al hidrógeno (de potencial cero), los electrodos más usados son el cobre-sulfato de cobre y plata-cloruro de plata, el primero utilizado en suelos y el segundo en agua de gran concentración de cloruros, en ambos casos las soluciones son saturadas y sus contactos con electrólitos son mediante tapones porosos. Para tener una comparación de valores o hacer transformaciones se presenta ⁽²⁴⁾ la Tabla 16, dependiendo de la resistencia del electrólito (pág. 101).

Voltímetros; instrumento para medir potenciales estructura-electrólito, este instrumento es de cuadro móvil para corrien-

te continua, conectando su polo negativo a la estructura y positivo al electrodo de referencia, la precisión debe ser en milivoltios, para ello son de alta resistencia interna (alta sensibilidad).

Amperímetro; para hacer ensayos de inyección de corriente sobre una estructura a proteger, también será de corriente continua, complementaria a este instrumento se requiere una fuente alimentadora de corriente continua.

El criterio de potencial para protección catódica estipula⁽¹⁹⁾ que el nivel mínimo requerido es conseguir -0.85 voltios en estructuras enterradas (respecto al Cu-CuSO_4) y -0.80 voltios en estructuras submarinas (respecto al Ag-AgCl). Estos valores deben ser más negativos cuando hay presencia de bacterias sulfatoredutoras, llegando a rangos como -0.95 V a -1.0 V respecto al Cu-CuSO_4 y -0.90 V a -0.95 V respecto al Ag-AgCl , mientras que hay otro criterio general consistente en disminuir el potencial natural de la estructura (antes de aplicar corriente) de acero en 0.3 voltios para condiciones normales y 0.4 voltios en presencia de bacterias anaeróbicas.

El potencial de protección disminuye con el aumento de temperatura a razón de 2 milivoltios por cada grado centígrado, de gran influencia en zonas tropicales, los valores de los potenciales de protección nos darán una idea clara del funcionamiento de la instalación de protección catódica, pero la sobreprotección puede afectar el recubrimiento que lleva la estructura protegida, conduciendo a formación de hidrógeno para valores

de potencial menores a -1.12 voltios. Referencia Materials Performance - NACE (Setiembre 1984).

6.1.4 Modelos digitales de los sistemas de protección catódica

En esta parte trataremos de los últimos logros de la protección catódica empezando por la aplicación en gran escala de los equipos de medida del vector impedancia, dentro de un amplio rango de frecuencias con abundancia creciente de trabajos que se publican dentro de los campos electroquímicos y la corrosión.

6.1.4.1 Medidas de impedancia y análisis digital mediante microprocesador

La superficie del electrodo en contacto con un electrólito posee una carga superficial que queda equilibrada por una acumulación de iones en la solución adyacente (que hace neutro al sistema), a causa de este sistema de cargas, la región cercana a la superficie del electrodo se conoce como doble capa y puede considerarse como un condensador en paralelo con la resistencia del circuito faradaico. La aplicación de una señal sinusoidal a la probeta corroyéndose puede suministrar información sobre el estado y comportamiento de su superficie, que actúa como si estuviera constituida por una red de elementos resistivos y capacitivos; la respuesta de la superficie a dicha señal es útil para las predicciones de comportamiento como para explicarlo.

La corriente alterna resultante de la imposición de una

señal sinusoidal de potencial tiene dos componentes, la corriente asociada con la reacción de transferencia de carga, que se llama corriente faradaica y está en fase con el potencial aplicado, y la corriente vinculada a la carga y descarga de la doble capa, que es capacitiva por naturaleza; por ellos la superficie del electrodo puede representarse en primera aproximación, como una simple red de resistencia y condensador en paralelo. También pueden existir otras impedancias, como la de difusión que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia.

En los estudios de impedancia es atractiva la sencillez con que es posible distinguir entre los diversos procesos que se desarrollan en la interface metal/medio corrosivo: reacciones electroquímicas, adsorción de productos, transporte de materia por difusión, etc. al trabajar con señales de baja frecuencia, todos los procesos son solicitados, tanto los más lentos como los más rápidos. Sin embargo, al aumentar la frecuencia desaparece la contribución de los procesos más lentos, que no tienen tiempo para desarrollarse antes de la inversión de la polaridad de la señal de alterna. La obtención del diagrama de impedancia en el más amplio dominio de frecuencia constituye un examen analítico en los diversos procesos que intervienen y se manifiestan global y simultáneamente en una sollicitación por corriente continua del sistema estudiado.

En el límite de bajas frecuencias el diagrama de impedancias corta el eje real puntualmente coincidiendo con el único

dato que es posible determinar en condiciones estacionarias al utilizar los métodos potencioestáticos tradicionales. Una vez medido, extrapolado o calculado a partir de los datos de impedancia, el valor de la resistencia de transferencia de carga, que coincide si el proceso está bajo control de activación, con la resistencia de polarización siempre será posible estimar la velocidad de corrosión por medio de la ecuación de Stern mencionada.

En el dominio de la frecuencia la función de transferencia se determina como la relación entre el voltaje y la corriente alterna, en el dominio del tiempo la función de transferencia viene determinada por la relación entre las transformadas por Fourier o Laplace del voltaje y de la corriente continua en función del tiempo; esto último es lo que hacen Williams y Taylor en un trabajo reciente (1982), en que determinan los diagramas de impedancia a partir de los datos obtenidos con corriente continua, aplican un impulso (escalón) de potencial y utilizan un convertidor digital/analógico, registran la corriente a intervalos de tiempo predeterminados. El impulso puede durar 1,000 segundos para que un solo experimento abarque un amplio espectro de frecuencias. Los datos de corriente/tiempo son tratados con la ayuda de un microordenador para transformarlos en el dominio de la frecuencia por medio de la transformada de Laplace, así se obtienen los diagramas que representan la respuesta en frecuencia y que proporcionan la valiosa información mecanística propia de los diagramas de impedancia.

A altas frecuencias se obtiene la resistencia óhmica, y a bajas frecuencias la resistencia de transferencia de carga o polarización, de esta manera a partir de un solo experimento se puede medir la velocidad de corrosión, siempre que se conozcan los parámetros de Tafel o el valor de la constante B (ver 5.1.2), la función de transferencia (impedancia) por depender de la frecuencia tendrá que determinarse a todas las frecuencias del espectro para conseguir un análisis completo del sistema (Congreso Iberoamericano - 1983).

$$\frac{\text{Voltaje } (\omega)}{\text{Corriente } (\omega)} = Z (\omega) \quad \dots\dots (6.1)$$

Esto se puede lograr haciendo un barrido con la frecuencia, cuyos valores se aplican sucesivamente e introduciendo artificialmente un ruido (perturbación aleatoria) en el sistema y estudiando la función respuesta, se puede emplear un "ruido blanco" en la que la transformada de Fourier de la densidad espectral de potencia tiene un valor constante, el ruido blanco es un caso de aleatoriedad perfecta, no existe dependencia alguna entre el valor que toma la señal en instantes distintos. Smyrl en 1981 presentó un trabajo sobre "ruido blanco" y sus posibilidades para los estudios de corrosión, todo hace suponer que va utilizarse extensamente en el futuro, cuando se desarrolle la instrumentación necesaria; el ruido intrínseco o "de fondo" de un sistema también puede ser usada para estudiar la estructura del anterior.

Hladky y Dawson (1982) muestran que el ruido electroquímico

contiene una valiosa información relativa a la velocidad y tipo de ataque corrosivo; por ejemplo observan que las fluctuaciones del potencial de corrosión libre asociadas con la iniciación de picaduras se caracterizan por una serie de bruscos descensos seguidos por recuperaciones exponenciales, la salida del ruido electroquímico es de amplitud constante a muy bajas frecuencias, y decrece en amplitud a frecuencias superiores. De acuerdo a sus resultados la pendiente de atenuación de la fluctuación a altas frecuencias guarda relación con la naturaleza del ataque corrosivo, así una pendiente de atenuación de la fluctuación de -10 decibeles/década, o menor, es indicativa de corrosión por picaduras; un pico agudo o una simple frecuencia indica ataque de resquicios. Actualmente se sigue investigando para comprobar si existe una correlación entre velocidad de ataque y amplitud del ruido electroquímico, algunos resultados de Dawson parecen relacionar dicha amplitud con la velocidad de penetración independientemente de la magnitud del área bajo ataque.

A manera de recapitulación de lo expuesto se puede nombrar los siguientes ensayos según su aparición y desarrollo:

- a) Examen visual y microscópico (grietas), ensayo gravimétrico, ensayo de niebla salina (examen visual).
- b) Ensayos en cámaras climáticas diversas (examen visual), medidas de potencial electroquímico, curvas de polarización galvanostática.
- c) Cambios en la resistencia eléctrica, curvas de polariza-

ción potenciostática, resistencia de polarización.

- d) Respuesta a impulsos (tipo rampa, triangulares, escalón rectangular, etc.), obtención de curvas potenciodinámicas.
- e) Medidas de impedancia a frecuencia variable, aplicación de técnicas digitales al análisis de las relaciones entre señales de entrada y salida, medidas de impedancia con la aplicación de un "ruido blanco", medidas de ruido electroquímico.

Debe agregarse a éstos el método analítico, que hoy en día están refinados, de los productos de corrosión formados sobre la superficie metálica o disuelto en el medio corrosivo; la multitud de técnicas de laboratorio en cuanto a simulación de las condiciones imperantes en la corrosión, pruebas con cupones; muchos de estos guardan una relación con los ensayos gravimétricos o electroquímicos, además de contener los rasgos específicos y diferenciales que les son propios, con un gran desarrollo en tipos electroquímicos.

6.1.4.2 Cálculo de las Pendientes de Tafel mediante un programa

Se contempla la validez de una solución de cálculo gráfico aproximada para la determinación de la intensidad de corrosión a partir de las curvas de polarización hasta 50 milivoltios (método Roy-Sircar), la base del trabajo en esta parte son las curvas catódicas obtenidas experimentalmente, hasta un máximo de 60 milivoltios, con una serie de curvas teóricas con pendientes de Tafel conocidas. Roy-Sircar fundamen-

tan su trabajo en comparar básicamente mediante nomogramas las curvas experimentales, obtenidas mediante la aplicación de polarizaciones catódicas externas hasta 60 milivoltios con las curvas teóricas; estas curvas se trazaron de acuerdo con la ecuación de Stern-Geary para distintos valores de los parámetros BA y BC y para una intensidad de corrosión (I_{corr}) de 1 mA/cm^2 .

$$B = \frac{BA \times BC}{2.3 \times (BA + BC)} \quad \dots\dots (6.2)$$

a) El presente trabajo pretende agilizar la comparación manual de los gráficos teóricos y experimentales, con el objeto de hallar rápidamente los valores de BC y BA (leídos en la curva teórica). Este trabajo de aplicación de cálculo con ordenador en el estudio electroquímico de la corrosión se realizó sobre una serie de baños de ácido clorhídrico (8 y 12%) con dos contenidos diferentes de hierro (30 y 60 gr/lt) en los que se adicionaron cuatro inhibidores de decapado con tres niveles de concentraciones diferentes.

El primer programa presentado mediante el Diagrama de Flujo de la Figura 24 es para disponer de un abanico de soluciones teóricas, para valores de BA y BC comprendidos respectivamente entre 20 y 100 mV y entre 30 y 200 mV, en todos los casos se hizo variar el potencial de -10 a -60 mV, manteniendo la $I_{\text{corr}} = 1 \text{ mA/cm}^2$.

TABLA 16 - EQUIVALENCIAS ENTRE ELECTRODOS Cu-CuSO4 y Ag-AgCl

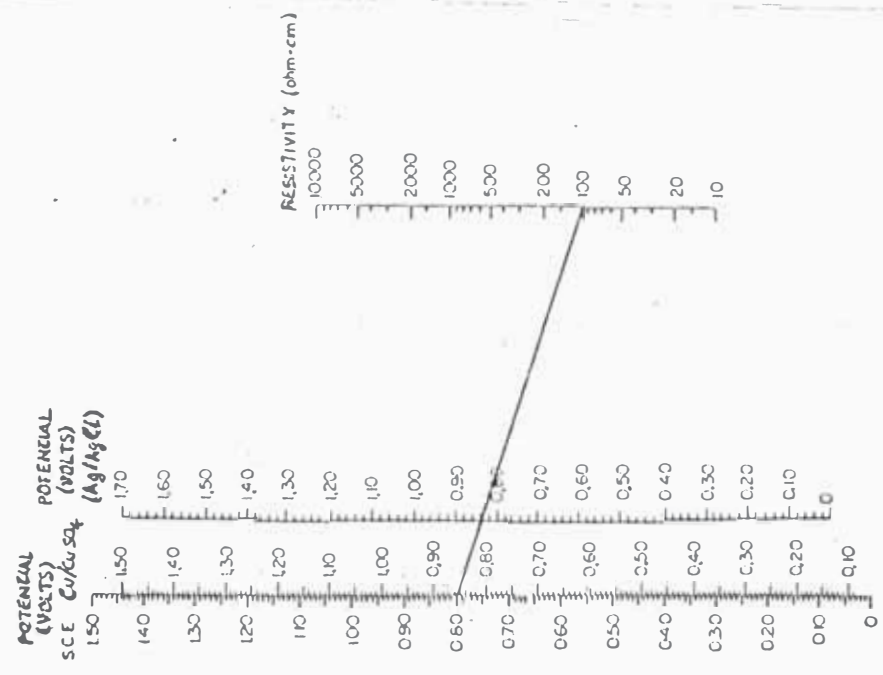
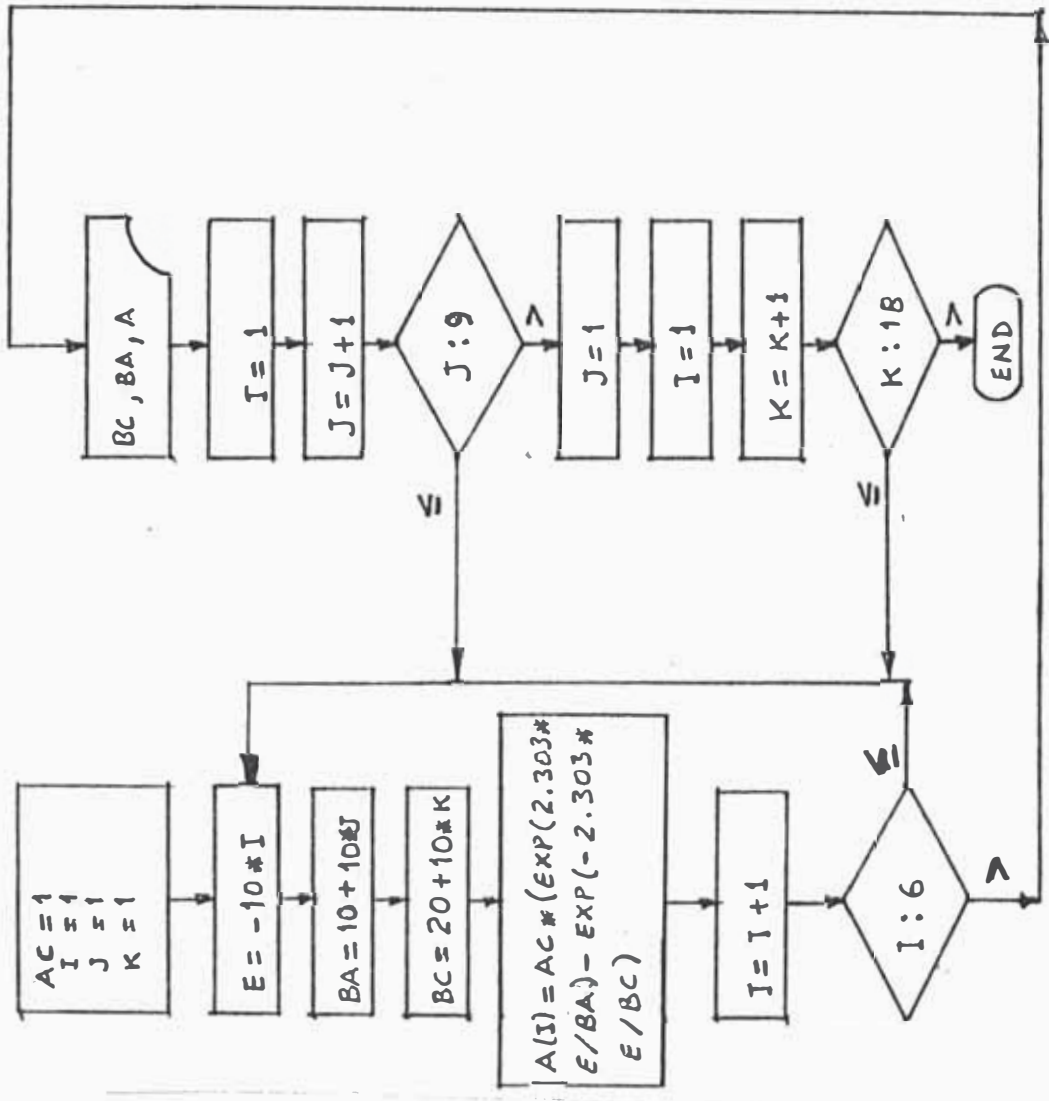


FIGURA 2.4- DIAGRAMA PARA CALCULAR PENDIENTE DE TAFEL



b) Un segundo programa, Figura 25, se preparó con objeto de determinar la curva teórica óptima, ajustada por mínimos cuadrados. A cada conjunto de puntos experimentales, con el fin de obtener la terna de valores de los parámetros BA, BC e IC (intensidad de corrosión), que mejor justifiquen las intensidades leídas para cada uno de los niveles de potencial de la serie experimental. El programa comienza con la lectura de puntos NP, y de las NP pareja de valores de intensidad y potencial, que se guardan en los vectores DI y DE respectivamente, asimismo se leen los valores iniciales de los tres parámetros buscados con los que se va a comenzar el tanteo, se tomo como función de error la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores medidos y calculados de la intensidad, una subrutina de aproximación se encarga de modificar los valores de la terna hasta conseguir el valor mínimo de error.

Este programa conocido como I_{corr} aplicado a los resultados experimentales puso de manifiesto que se obtenía una excelente solución matemática al problema, dependiendo del valor inicial que toman la terna BA, BC e IC, por los que se inicia el proceso de tanteo. Por ejemplo para los seis valores experimentales de I y E se obtuvieron, entre otras, las distintas soluciones que a continuación se reseñan junto con el error cuadrático medio, las que son admisibles teniendo en cuenta el desplazamiento propio de este tipo de medida (Congreso Iberoamericano de 1983 -

J.A. Gonzales).

Tabla 17. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL PROGRAMA DE LA FIGURA 24

VALORES EXPERIMENTALES		SOLUCIONES OBTENIDAS CON PROGRAMA			
I (mA)	E (mV)	I_{corr} (mA/cm ²)	BA (mV)	BC (mV)	ERROR
0.62	-10	1.000	82.2	54.0	0.0966
1.32	-20	1.200	91.4	76.3	0.0636
2.16	-30	1.400	100	100	0.0438
2.99	-40	1.600	107	140	0.0484
4.00	-50	2.000	119	248	0.05879
5.17	-60	3.950	174	299	0.0419

Dada la indeterminación que se presenta para los conjuntos de puntos experimentales, se reducen los parámetros de cálculo simultáneo a dos, resolviéndose el problema de hallar una solución unívoca a partir de la cualquier serie de datos experimentales. La variable eliminada es I_C (intensidad de corrosión), constituyéndose en dato obtenido a partir de medidas gravimétricas que se llevaban en paralelo con las medidas electroquímicas de polarización, el programa modificado se presenta en la Figura 26, en la cual I_C se lee al principio y se mantiene invariable, siendo BA y BC completamente independiente de los valores iniciales de tanteo BAI y BCI, para los mismos valores experimentales de la Tabla 6.1 se tienen los siguientes resultados, $I_{corr} = 1.348 \text{ mA/cm}^2$; BA = 97.3 mV; BC = 98.7 mV; con un error de 0.0564.

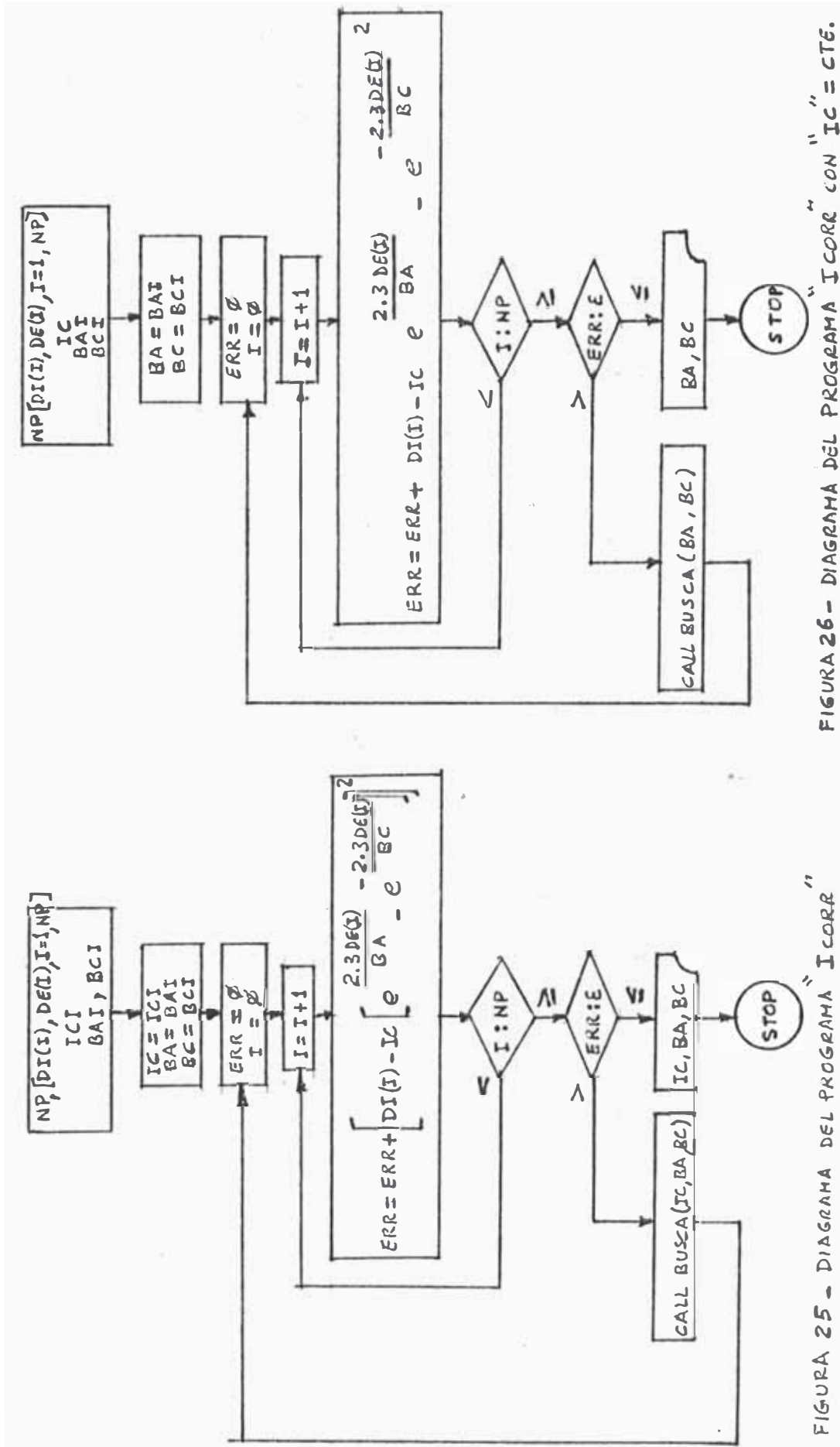


FIGURA 25 - DIAGRAMA DEL PROGRAMA "ICORR"

FIGURA 26 - DIAGRAMA DEL PROGRAMA "ICORR" CON "IC = CTE."

c) Se desarrolló finalmente un programa (I_{corr}), en el que se procedía al cálculo de B, que es una simplificación denominada resistencia de polarización según la ecuación (6.2).

Se partieron con datos experimentales de I_{corr} , obtenida también gravimétricamente y los valores de la intensidad para una polarización externa de 10 mV medidos a lo largo de toda la duración del experimento (96 horas). Se calcula B como promedio de medidas consecutivas en intervalo de tiempo, el programa comienza con lectura del número de medidas NP, o de los NP pares de valores tiempo-intensidad y densidad de corrosión (IC), medida gravimétricamente.

Para cada intensidad DI (I), medida al cabo del tiempo T (I), se obtiene un valor B (I) del parámetro B, teniendo en cuenta que la polarización se mantiene en un valor de 10 mV, con estos NP valores de B se calcula una media ponderada BM considerando los intervalos de medida correspondiente a dos lecturas consecutivas, finalmente se escriben los valores individuales de B y la media encontrada. Ver la siguiente Tabla.

Tabla 18. VALORES DE LA CONSTANTE B CALCULADOS MEDIANTE PROGRAMAS

CONCENTRACIONES. ACIDO Fe ²⁺ (g/l)	8%		12%		VALOR MEDIO
	30	60	30	60	
	5.02	5.43	3.40	3.46	4.33
	4.32	3.77	4.04	4.15	4.07
	3.47	3.92	6.20	5.78	4.84
	4.00	4.33	4.52	4.93	4.44
	3.93	4.01	4.92	4.95	4.45
			VALOR MEDIO ...		4.43

Con el programa I_{corr} se pueden obtener muchas soluciones a la ecuación de Stern, y con la fijación de I_{corr} (constante) se salva la indeterminación existente llevándonos a obtener soluciones seguras para BA y BC.

En forma general se puede plantear un programa para sistema completo de protección catódica, sea por ánodos de sacrificio o por corriente impresa, según el Diagrama de Flujo del Apéndice G. Este diagrama es versátil; porque es aplicable a todo tipo de estructura sumergida o enterrada, nos lleva a ordenarnos mejor en los cálculos y toma de datos (ensayos y pruebas de campo), inclusive nos muestra que debe realizarse decisiones en base a los análisis técnico/económicos.

6.2 Sistema de protección mediante recubrimientos

Una de las posibilidades anticorrosivas son los recubrimientos, presentándose diversidad de éstos, el fundamento protector consiste en aislar el metal del medio agresivo con una barrera en-

tre ambos. Los recubrimientos son aplicados siguiendo procesos especiales y cuidadosos, los cuales limitarán económicamente su empleo en una determinada estructura.

Las características del medio agresivo y las condiciones económicas de los distintos tipos de recubrimientos nos permiten analizar solamente algunos de ellos, estos son las pinturas y otros similares. La película protectora de un metal generalmente se clasifican en 4; recubrimiento de conversión tales como anodizado, cromatado, etc., varían la composición de la superficie del metal; recubrimientos metálicos consistente en recubrir el metal base con otro metal, mediante inmersión o deposiciones (química o electrolítica); recubrimientos inorgánicos, como pinturas de silicato de zinc y recubrimientos de cemento; recubrimientos orgánicos son de mayor aplicación, en caliente o en frío para tuberías y tanques.

Los requisitos para una buena protección por pinturas orgánicas o inorgánicas son: Una adherencia perfecta y duradera, ser compacto y no poroso poder dieléctrico elevado, no absorber humedad, dureza para evitar su rotura, elasticidad para absorber las dilataciones del metal base, resistente a los ataques químicos y de bacterias.

Las pinturas deben tener cierta resistencia a la abrasión, en lo referente a la resistencia eléctrica, en agua de mar las pinturas adquieren una carga eléctrica producida por ciertos grupos pertenecientes a la estructura de aglutinamiento y capaces de separarse en iones, volviéndose la película permeable a los

iones de carga opuesta a la propia. Normalmente la carga eléctrica fijada sobre la película de un recubrimiento es negativa, consecuentemente repelen las cargas negativas y las positivas penetran la capa de pintura, por tanto el espesor mínimo de película (práctica) oscila entre 10 y 15 milésimos de pulgada, las que se obtienen generalmente con 3 o más capas de pintura.

Los pigmentos que incluyen inhibidores en un anticorrosivo suprimen la corrosión mediante cualquiera de los mecanismos siguientes: Pasivación, despolarización, neutralización y adsorción. El simple aumento del pH en una solución en la cual se encuentra el acero (10 ó menos), inhibirá la corrosión con un simple aumento del pH, es decir que las sales alcalinas pueden actuar eficazmente como inhibidores, el inconveniente de este aumento en las pinturas es que afectan negativamente su comportamiento. (1)

6.2.1 Recubrimiento por pinturas

Existen dos grandes grupos según la forma de aplicación, como materiales aplicados en caliente y materiales aplicados en frío; dentro de aplicación en frío tenemos las pinturas epóxicas y recubrimientos poliéster, las bandas de parafina, engrasadas y las plásticas. Las bandas de algodón impregnadas de parafina y grasa proporcionan un recubrimiento de tubería muy pobre, son muy blandas y tienen características eléctricas pobres con gran absorción de la humedad; mientras que las bandas adhesivas son aplicadas con imprimación o pegamento especial; en otros casos se emplean bandas plásticas autoadhesivas sellando perfectamente el solape impidiendo la entrada de la

humedad, las bandas de polietileno son mejores que el PVC tanto eléctrica como químicamente.

En la Tabla 19 se muestra la resistividad de ohms-cm y la absorción de humedad de varios materiales comúnmente empleados en revestimientos, los aplicados en caliente son la brea de hulla y los asfaltos (preferible), los aplicados en frío son los restantes de la tabla. Los costos de revestimientos en caliente son mayores a los de aplicados en frío (ahorrándose equipo y tiempo). La Figura 27 nos muestra la variación de la resistividad del recubrimiento contra el tiempo bajo tierra para alquitrán de hulla y cinta de polietileno, el inconveniente de estos dos sistemas es su espesor no uniforme.

Tabla 19. RESISTIVIDAD Y ABSORCION DE HUMEDAD DE LOS RECUBRIMIENTOS EMPLEADOS EN SUPERFICIES ENTERRADAS

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohms-cm)	ABSORCION DE HUMEDAD (en % de peso de material)
Asfalto alta calidad	10^{16}	0.9
Brea de hulla	10^{12} a 10^{15}	0.2
Resina epóxica	10^{11}	0.05 a 0.1
Polietileno	10^{16}	0.01 a 0.02
P.V.C.	10^{11} a 10^{13}	0.1
Polietileno	10^{15}	0.01

6.3 Sistema mixto de revestimiento y protección catódica

En afán de reducir costos y aprovechando de estos dos recursos fecetivos se aplican sistemas mixtos, mediante los cuales por una parte se trata de aislar la estructura del medio corrosivo y por otra se logra hacer catódica cada uno de los puntos del metal superficialmente, la aplicación de recubrimientos lleva a un ahorro económico en los sistemas de protección catódica.

Es necesario analizar la compatibilidad del sistema mixto, las pinturas en base oleosa se comportan muy mal ante la protección catódica porque en medio alcalino se saponifica, los recubrimientos de alto índice de absorción de humedad como parafinas y asfalto, no se podrá emplear en estructuras sumergidas, ni enterradas en zonas muy húmedas. En el punto de inyección de corriente de la estructura enterrada el valor del voltaje respecto al electrodo $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ (en valor absoluto), no debe sobrepasar los 1.5 V cuando lleva recubrimiento por asfalto y 5 V con resinas epóxicas y bandas de polietileno; estos últimos en agua de mar no debería sobrepasar los -1.2 V, el fenómeno que se produce es electrólisis.

El sistema mixto es muy ventajoso cuando se tiene pequeñas áreas de estructura a proteger, en caso fondo de tanques una buena preparación del plintón de apoyo (anillo de concreto) con arena seca compactada y un riego de asfalto, adicionalmente las planchas metálicas son aplicadas con shop primer epóxica (a base de zinc), estos procesos mencionados dan cierta protección reduciendo la corriente de protección catódica. La Tabla 20 indica la

corriente requerida para el sistema mixto en función del tipo de recubrimiento aplicado; el sistema galvánico normalmente no tiene mayor incidencia en los recubrimientos y puede usarse junto a los sistemas de pintado coaltar epoxy o epóxico y antiincrustantes vinílicos, pero en corriente impresa las densidades de corriente son altas, siendo necesario aplicar recubrimiento epóxico a la zona cercana al ánodo y si el sistema de pintado es coaltar epóxy y epóxico es necesario aplicar masilla epóxica con un espesor no menor de 500 micrones. ⁽¹¹⁾

Tabla 20. DENSIDAD DE CORRIENTE PARA PROTECCION CATODICA DE ESTRUCTURAS ENTERRADAS PREVIO RECUBRIMIENTO

TIPO DE RECUBRIMIENTO	DENSIDAD DE CORRIENTE REQUERIDA	
	(microamp/m ²)	(microamp/pie ²)
Polietileno	9.6	0.2 a 95
Asfalto	16.5	0.5 a 550
Brea de hulla	10.5	0.1 a 260
Bandas engrasadas	11	0.2 a 684
Resinas epóxicas	0.9	0.1 a 10

Nótese que los valores en microamperios/m² tienen un solo valor, debido a que son datos experimentales.

6.4 Factores económicos para protección anticorrosiva

La no protección de una estructura sometida a medio corrosivo puede traer pérdidas económicas reconocidas como indirectas en una planta, de allí la necesidad de aplicar convenientes sistemas de protección buscando reducir dichas pérdidas con costos de instalaciones bajos, efectivos y seguros. La experiencia demues-

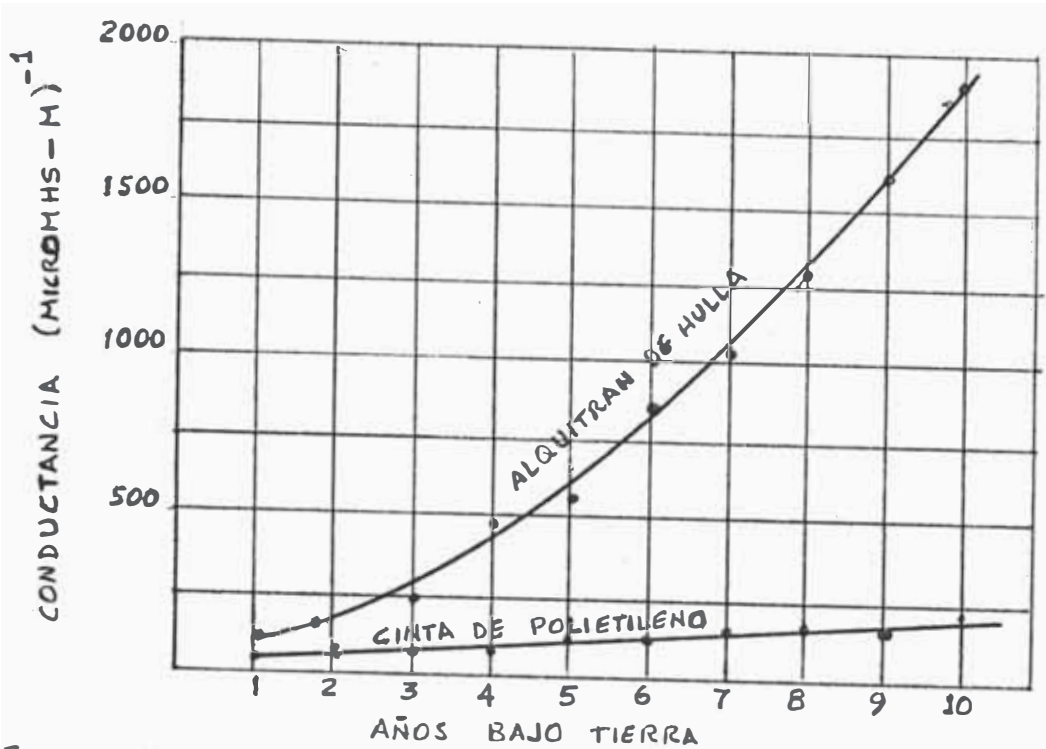


FIGURA 27- CONDUCTANCIA DEL RECUBRIMIENTO CONTRA TIEMPO BAJO TIERRA

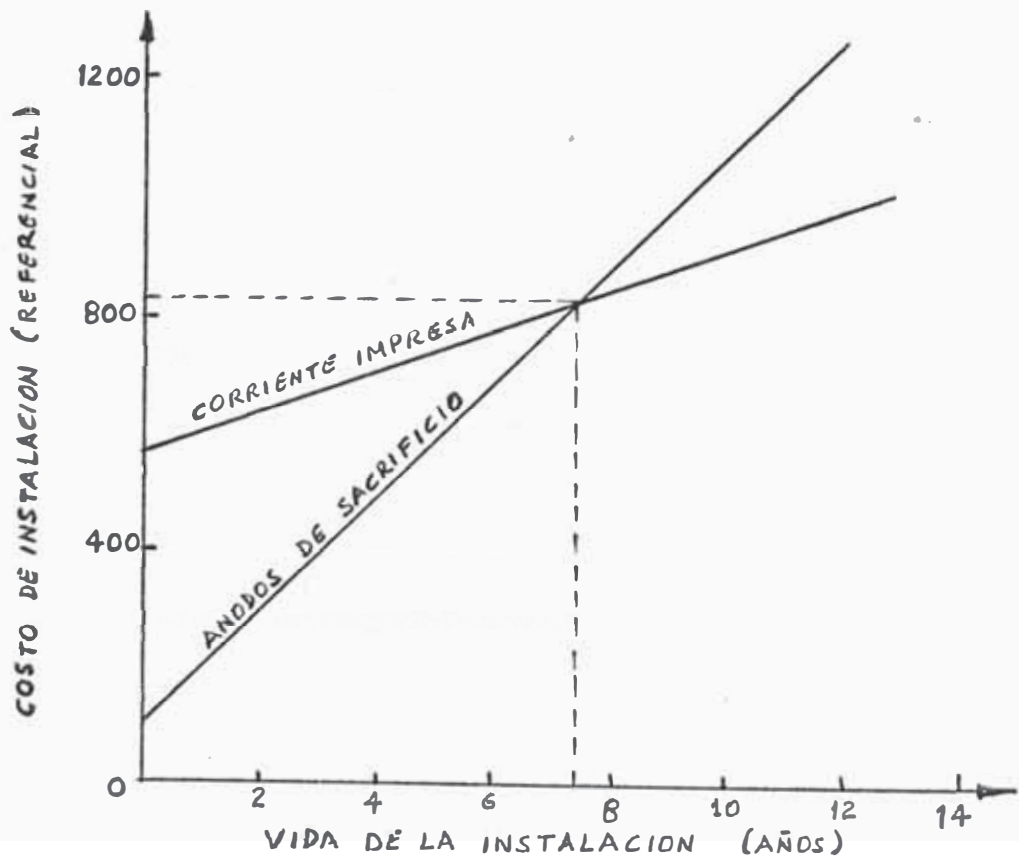


FIGURA 28- COMPARACION DE SISTEMAS EN COSTOS RESPECTO A LA VIDA DE LA INSTALACION

tra resultados satisfactorios y económicos mediante aplicación de protección catódica, siendo esta una técnica más que un producto de consumo.

La protección catódica involucra costos de estudio previo, materiales, instalación y regulación posterior; el costo adicional de una estructura al aplicarle el sistema mencionado representa siempre un pequeño porcentaje del costo total de la instalación, en la parte operativa el costo de energía externa se evaluará con relación al sistema galvánico, ver Figura 28 para comprobar la ventaja de corriente impresa luego de los 7 años, respecto al galvánico.⁽²⁴⁾

En los recubrimientos por pinturas los costos se dividen en 15 a 40% del costo total del pintado en materiales, la preparación de superficie abarca de 35 a 55%, la aplicación de pintura varía entre 20 y 40%, siendo difíciles de cuantificar los costos de inspección y gastos de operación conjuntamente al mantenimiento del sistema. La variación del costo de pintado sobre una estructura de acero respecto al número de capas aplicadas, se debe al costo del material y aplicación, manteniéndose constante el costo de preparación de la superficie.

6.5 Mediciones efectuadas para el diseño del sistema protección catódica y recubrimientos

Las medidas anteriores en campo (resistividades, corrientes erráticas y rate de corrosión) deben ser complementadas con medidas de protección catódica, para tener datos confiables dentro de un diseño; esto consiste en medición de potenciales estructura-sue

lo natural y con el circuito de protección funcionando, completando la medida de corriente requerida.

Con las mediciones que se realizan antes de instalar la estructura, como son la resistividad y el rate de corrosión, puede tenerse un anteproyecto de protección mediante valores aproximados.

6.5.1 Medición de potencial estructura suelo

Sabiendo que el origen de la formación de pilas electroquímicas es la diferencia de potencial establecida entre diferentes zonas del metal, siendo necesario el conocimiento de los potenciales de las diferentes zonas del metal como base en todo diseño de protección catódica. La medición de potencial entre una estructura y el medio electrolítico que la rodea se mide mediante un aelectrodo de referencia y un milivoltímetro de alta sensibilidad, estos instrumentos han sido descritos en (6.1.3), utilizando Cu-CuSO_4 para suelos y Ag-AgCl en agua de mar, tenemos los siguientes resultados de campo; en agua de mar se efectuaron mediciones semanales, mientras que en tierra se variaron la distancia estructura-electrodo, ver Tabla 21.

Tabla 21. POTENCIALES NATURALES ESTRUCTURA-ELECTROLITO

SUELOS		AGUA DE MAR	
DISTANCIA ESTRUCTURA-ELECTROLITO (metros)	POTENCIAL RESPECTO Cu-CuSO ₄ (milivolt.)	PERIODO DE MEDICION (semanas)	POTENCIAL RESPECTO Ag-AgCl (milivolt.)
1	-455	1	-640
2	-463		
3	-445	2	-645
4	-472		
5	-469	3	-645
6	-448		
7	-474	4	-650
8	-422		
10	-416	5	-648
12	-474	6	-646

Se observa que en suelos hay alta corrosión, ver Apéndice D, allí se tiene efectos con rasgos de picadura concentrada; así mismo en agua de mar tenemos valores de corrosión considerable. El criterio de estructura protegida catódicamente nos señala potenciales de -850 y -800 milivoltios respectivamente para suelos y agua de mar, las mediciones se efectuaron en las estructuras actualmente operativas.

6.5.2 Medición de corriente requerida para protección

Con ayuda de dos baterías de 12 voltios en paralelo se inyectó corriente continua a la estructura de los tanques, simulando un rectificador de protección catódica; empleando el cobre de puesta a tierra como ánodo auxiliar, se observó durante la

medición un incremento en corriente requerida con el tiempo, hasta que se polarizó en un valor fijo, preciso instante para medir simultáneamente la corriente de protección y potencial estructura-suelo, siendo los valores 28 amperios en total para los 6 tanques (planta Cerro) con un potencial estructura-suelo de 1,170 milivoltios.

La superficie total de estructura en prueba fue 350 m^2 , para calcular la densidad de corriente necesaria de protección mínima en los tanques debemos llevar el potencial a -850 milivoltios. Presentamos la Tabla 22 para mostrar ⁽⁹⁾ las densidades de corriente requeridas en estructuras de acero para diferentes ambientes, considerando acero sin recubrir, los que llevan recubrimiento pueden bajar el consumo de corriente hasta menores que 2% respecto a los anteriores, dependiendo mucho la eficiencia del recubrimiento.

Tabla 22. DENSIDAD DE CORRIENTE REQUERIDA EN PROTECCION CATODICA PARA ESTRUCTURAS DE ACEROS

MEDIO EXPUESTO	DENSIDAD (miliamp/m ²)	
Suelo neutro	4.3 -	16.1
Suelo neutro aireado	21.5 -	32.3
Suelo aireado seco	5.4 -	16.1
Suelo húmedo moderado	26.9 -	64.6
Suelo altamente ácido	53.8 -	161.4
Suelo con bacterias sulfatoreductoras	450	
Concreto seco	5 -	16
Concreto húmedo	53.8 -	260
Agua fresca estancada	40	
Agua caliente	53.8 -	160
Agua estancada contaminada	500 -	1600
Agua de mar	50 -	270
Acero bien recubierto en suelos	0.01 -	10

Las pruebas de corriente requeridas en el mar no se efectuaron por motivos de condiciones desfavorables para instalar campos de medición, pero se tienen valores característicos en densidades de corriente entre 55 y 65 miliamperios/m² según NACE para el Océano Pacífico Sur.

6.6 Cálculo del sistema de protección catódica y recubrimiento

Con los datos obtenidos en (6.5) procedemos a calcular los parámetros de operación en el sistema protección catódica-recubrimiento, las consideraciones que debemos tener son evaluar técnica y económicamente los dos tipos de protección catódica, descontándose la alternativa del costo incurrido si no se protege la estructura, porque la experiencia demuestra su inconveniencia y la inseguridad para predecir las fallas por corrosión.

La protección a calcularse se dirigía a estructuras ya instaladas (fondo de tanques y tuberías submarinas), por lo que planteamos efectuar:

- a) Protección catódica para tanques de planta Cerro y tanques de almacenamiento ubicadas en planta Playa.
- b) Sistema mixto protección catódica-recubrimiento para tuberías submarinas considerándose el cambio de dichas tuberías por estar afectadas.

La evaluación con ánodos de sacrificio en tuberías submarinas no es recomendable por tener que cambiarlos cada 5 ó 6 años, incurriendo en altos costos (trabajos bajo el agua), si se instala

en forma de brazaletes inicialmente se complicaría el lanzamiento de las tuberías hacia el mar, así mismo la poca confiabilidad de encontrar un buen contacto estructura-ánodo. Este sistema si puede aplicarse en plataforma submarina y muelles, debido a que la estructura está más concentrada y tienen accesos fáciles para operación y mantenimiento del sistema galvánico.

6.6.1 Protección catódica por ánodos de sacrificio

Este sistema se calculará para tanques de almacenamiento solamente, por las razones expuestas anteriormente para tuberías submarinas, dividiremos el cálculo en dos zonas (plantas Cerro y Playa).

a) Tanques planta Cerro.- Son 6 tanques (5,000 barriles de capacidad) conectados entre sí por las tuberías aéreas, siendo los datos:

Diámetro del tanque : 8.4 metros

Resistividad "específica" del terreno : 3,300 ohmios-cm
(ver Fig. 22)

Potencial estructura-suelo
(a 7 metros de la estructura) : -474 milivoltios

Interferencias y corrientes erráticas : Nulas

El cálculo del número de tanques se efectúa en función de la resistividad eléctrica del sistema, conjuntamente con el potencial disponible para vencerlo (depende del material utilizado como ánodo). Las resistividades a considerarse son: Anodo-backfill, backfill-tierra y los cables de

conexión; el más importante es backfill-tierra, empleándose para su cálculo las siguientes fórmulas:

Anodo en posición horizontal

$$R_H = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{4L}{d} \right) - 1 \right] \quad \dots (6.3)$$

Anodo en posición vertical

$$R_V = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right] \quad \dots (6.4)$$

En donde, R_H y R_V son las resistencias de los ánodos (ohms), ρ es la resistividad del terreno (ohm-cm), L longitud del ánodo (cm) y d diámetro del ánodo (cm).

Enseguida evaluaremos las resistencias ánodo-terreno para ánodos comerciales de zinc y magnesio, eliminando el aluminio por alto costo, poca disponibilidad y su pasivación rápida. Los cálculos se efectuarán para el ánodo de magnesio 5" x 5" x 31", cuyo peso es 100 libras, presentando en la Tabla 23 los resultados completos para zinc y magnesio.

Diámetro equivalente del ánodo:

$$\frac{\pi d^2}{4} = 5 \times 5$$

$$d = 5.642" = 14.33 \text{ cm}$$

Empleando ánodos verticales (los horizontales tienen problema de resistencia mecánica) tenemos la resistencia áno

do-terreno:

$$R_V = \frac{3,300 \text{ (ohm-cm)}}{2 \times \pi \times 31 \times 2.54 \text{ (cmts)}} \times \left[\text{Ln} \left(\frac{8 \times 31}{5.642} \right) - 1 \right]$$

$$R_V = 18.56 \text{ ohms}$$

La corriente generada por el ánodo se calcula por la "ley de Ohm", siendo el potencial del ánodo respecto a Cu/CuSO_4 -1.55 voltios (aleación tipo AZ-63), considerando la polarización A -0.85 voltios, la corriente por ánodo será:

$$I_A = \frac{\Delta E}{R} = \frac{-0.85 - (-1.55)}{18.56}$$

$$I_A = 0.0377 \text{ amp } \text{ ó } 37.7 \text{ miliamp.}$$

El tiempo de vida de cada ánodo se calcula mediante: ⁽¹⁾

$$T_A = \frac{W \times E}{I_A \times (\text{Rate consumo})}$$

Donde: T_A (en años), W peso del ánodo (Kg), E eficiencia del ánodo (%); rate de consumo (en Kg/amp x año); I_A (amp).

Remplazando valores de la Tabla 15, tenemos:

$$T_A = \frac{100 \text{ (libras)} \times 0.50}{0.0377 \text{ (amp)} \times 17 \text{ (libras/amp-año)}}$$

$$T_A = 78 \text{ años}$$

El número de ánodos requeridos se calculará conociendo la corriente total requerida, para lo cual debemos calcular con datos de pruebas efectuadas:

Corriente de protección : 28 amperios

Potencial medido : -1.17 voltios

Potencial de polarización requerida : -0.85 voltios

Potencial natural estructura/suelo : -0.474 voltios

La corriente de protección requerida será:

$$I_p = \frac{(0.85 - 0.474)}{1.17 - 0.474} \times 28$$

Resultando:

$$I_p = 15.126 \text{ amperios}$$

La densidad de corriente del sistema se calcula teniendo la superficie total a proteger (S_p) conformada por 6 tanques y parte de tubería enterrada (17.5 m^2).

$$S_p = 6 \times \frac{\pi \times (8.4)^2}{4} + 17.5$$

$$S_p = 350 \text{ m}^2$$

Densidad de corriente:

$$i_p = \frac{I_p}{S_p} = \frac{15.126}{350}$$

$$i_p = 0.0432 \text{ amp/m}^2 \text{ ó } 43.2 \text{ miliamp/m}^2$$

El número de ánodos requeridos (al utilizar el ánodo seleccionado) será:

$$N_a = \frac{I_p}{I_a} = \frac{15.126}{0.0377}$$

$$N_a = 401 \text{ ánodos}$$

Podemos concluir que el sistema de protección catódica por ánodos de sacrificio, no es práctico, porque la gran cantidad de ánodos (ver Tabla 23) ocuparía mucho espacio en las inmediaciones de los tanques, aparentemente el tiempo de vida larga podría compensar si instalamos menor número de ánodos obtenidos en los cálculos anteriores del sistema. En general los ánodos tienen como parámetros principales su rate de consumo, eficiencia y la corriente generada que depende de la resistividad del electrólito.

Siendo la capacidad de corriente generada inversamente proporcional a la resistividad del terreno, y conociendo el valor 3,300 ohm-cm (en nuestro caso) se concluye que es práctico aplicar sistema por ánodos de sacrificio en terrenos con resistividades menores a 1,000 ohm-cm, una forma de verificar es dividiendo la cantidad de ánodos de la Tabla 23 por 3,300/1,000 para cada tipo de ánodo. Con el criterio de buscar un mínimo número de ánodos (según Tabla 23 sería 272). La única alternativa aplicable dentro de este sistema, es con ánodos de magnesio tipo 4" x 4" x 60", esto implica alto consumo de cables y gran número de contactos.

a2) Tanques planta Playa.- Son 2 tanques (1,600 barriles de capacidad), tienen conexión entre ellos mediante tuberías aéreas, con 6.10 mt. de diámetro y resistividad del terreno 3,300 ohm-cm, potencial estructura-suelo -474 mV

Area total a proteger:

$$S_p = \frac{\pi \times (6.1)^2}{4} \times 2$$

$$S_p = 58.5 \text{ m}^2$$

Por tener los datos similares a los tanques de planta Cerro y seleccionando el mismo tipo de ánodo, la corriente de protección requerida será

$$I_p = \frac{58.5}{350} \times 15.126$$

$$I_p = 2.5 \text{ amperios}$$

Asimismo el número de ánodos requeridos será:

$$N_a = \frac{58.5}{350} \times 272$$

$$N_a = 45 \text{ ánodos}$$

La decisión de aplicar ánodos de sacrificio queda en la disponibilidad de espacio en las inmediaciones del tanque, verificamos que tenemos suficiente espacio para la ubicación de ánodos sacrificables. Trataremos de acondicionar

con ánodos en paralelo, agrupando en bloques de 15 ánodos para los cuales se calculará su resistencia mediante⁽¹¹⁾:

$$R_V = \frac{0.0054 \rho}{N L} \left(\text{Ln} \frac{8L}{d} + 2 \frac{L}{S} \times \text{Ln} (0.656N) - 1 \right) \dots\dots (6.5)$$

Siendo "N" el número de ánodos en paralelo, "S" la separación entre ánodos (pies). Reemplazando los valores del cálculo anterior y considerando S = 20" tenemos:

$$R_V = \frac{0.054 \times 3,300}{15 \times (20/12)} \left(\text{Ln} \left(\frac{8 \times 31}{5.642} \right) + 2 \times \frac{31}{20} \times \text{Ln}(0.656 \times 15) - 1 \right)$$

$$R_V = 7 \text{ ohms}$$

La corriente generada por el bloque de ánodos será:

$$I_A = \frac{\Delta E}{R} = \frac{-0.85 - (-1.55)}{7}$$

$$I_A = 0.1 \text{ amp } \text{ ó } 100 \text{ miliamp.}$$

Tiempo de vida del bloque:

$$T_A = \frac{(100 \times 15) \times 0.50}{0.1 \times 17}$$

$$T_A = 441 \text{ años}$$

Número de bloques de ánodos:

$$N_B = \frac{I_P}{I_A} = \frac{2.5}{0.1}$$

$$N_B = 25 \text{ bloques}$$

Número de ánodos totales:

$$N_A = 25 \times 15$$

$$N_A = 375 \text{ ánodos}$$

Si comparamos este último resultado con la disposición de ánodos simples, hay una gran diferencia en el número de ánodos, al utilizar ánodos en paralelo se disminuye el número de conexiones en la estructura, pero se requiere gran cantidad de ánodos y área disponible para su instalación.

Definitivamente los cálculos demuestran que no es conveniente aplicar protección catódica por ánodos de sacrificio, debiendo aplicarse necesariamente corriente impresa; una aplicación efectiva del primer sistema es en los tanques de lastre de los buques petroleros, tanques de almacenamiento de crudo y productos derivados de petróleo, desaladoras y circuitos de agua salada. En estas últimas aplicaciones la vida del ánodo disminuye considerablemente, llegando a 4 ó 5 años como máximo, y si la estructura está proyectada para una duración mayor que 50 años (caso de tubería submarina) los cambios de ánodos se efectuarían más de 10 veces, debiéndose contemplar la facilidad y los costos que implican dichos cambios.

Tabla 23. RENDIMIENTO DE LOS ANODOS DE SACRIFICIO EN LA PROTECCION CATODICA REQUERIDA

MATERIAL DEL ANODO	TAMAÑO ESTANDAR (plg.)	DIAMETRO EQUIVALENTE (plg.)	PESO (libras)	R _V (ohms)	I _A (miliamp.)	T _A (años)	N _A (ánodos)	OBSERVACIONES
ANODOS DE MAGNESIO TIPO Z-63	4" x 4" x 17"	4.5	45	29.3	23.9	55	633	La capacidad de los ánodos no son los adecuados debido a la alta resistividad del electrolito.
	5" x 5" x 20½"	5.64	68	23.9	29.3	123	516	
	7" x 7" x 16"	7.9	100	23.0	30.4	96	497	
	2" x 2" x 60"	2.26	65	15.0	46.7	41	323	
	5" x 5" x 31"	5.64	100	18.56	37.7	78	401	
	4" x 4" x 60"	4.5	110	12.6	55.6	58	272	
ANODOS DE ZINC	(cms.)	(cms.)	(Kgs.)					
	5.8 x 5.8 x 124	6.54	28.3	17.0	14.7	126	1,029	Similar al magnesio tiene baja capacidad de corriente.
	10 x 12.5 x 66	12.6	47.6	21.76	11.5	314	1,315	
	7.6 x 8.5 x 170	9.0	66	12.41	20.1	249	752	
	6.8 x 7.8 x 160	8.2	48.1	13.3	18.8	278	804	
6.6 x 8.6 x 160	8.5	55	13.2	19	316	796		

6.6.2 Protección catódica por corriente impresa

Este sistema será calculado para los tanques de planta Cerro primeramente y como segunda parte los tanque planta Playa, las tuberías submarinas incluirán los recubrimientos por pinturas.

a) Tanques planta Cerro.- Los datos que ya se mencionaron en la evaluación del primer sistema, entre otros datos tenemos:

Superficie total a proteger : 350 m^2

Corriente de protección requerida : 15.126 amp. (D.C.)

Potencial de protección considerada : -850 milivoltios respecto a Cu-CuSO_4 .

El ánodo seleccionado por sus cualidades técnicas es la magnetita ver (6.1.2.), con las siguientes características:

Rate de consumo : 0.080 Kg/amp-año

Factor de utilización : 50%

Capacidad salida de corriente por cada ánodo : 10 amperios (promedio)

Tamaño estandar de cada ánodo: 2.4" \emptyset x 33" y 3" \emptyset x 60"

Peso de ánodos : 4.73 Kg. y 13.45 Kg.

La cantidad de ánodos requeridos será:

$$N_A = \frac{0.080 \text{ (Kg/amp-año)} \times 15.126 \text{ (amp)} \times 30 \text{ (años)}}{4.73 \text{ (Kg/ánodo)} \times 0.50}$$

$N_A = 16$ ánodos para 30 años de duración (tipo 2.4" \emptyset x 33")

Para el segundo modelo (tipo 3" Ø x 60"):

$$N_A = \frac{4.73}{13.45} \times 16$$

$$N_A = 6 \text{ ánodos}$$

Es conveniente aplicar el segundo modelo formando un perímetro de ánodos distribuidos adecuadamente ver Apéndice H.

El cálculo del voltaje necesario para vencer todas las resistencias en el circuito de protección catódica, se efectuará en base al esquema del Apéndice H, para ello plantearemos como sigue.

La resistencia de los conductores eléctricos depende del diámetro y longitud del cable, para nuestro caso requerimos cable 6 AWG cuya capacidad de corriente es 55 amperios, resistencia eléctrica 1.30 ohm/Km ó 0.0013 ohm/mt.

Según Apéndice H tenemos la mayor resistencia en los tramos \overline{OC} y \overline{OL} , el voltaje calculado será:

$$V_{\overline{OC}} = 15.2 \times (40 \times 0.0013) + 7.6 \times (15 \times 0.0013) + 5.06 \times (40 \times 0.0013) + 2.53 \times (20 \times 0.0013)$$

$$V_{\overline{OC}} = 1.2675 \text{ voltios}$$

$$V_{\overline{OL}} = 15.2 \times (55 \times 0.0013) + 10.13 \times (20 \times 0.0013) + 5.06 \times (20 \times 0.0013) + 2.53 \times (10 \times 0.0013)$$

$$V_{\overline{OL}} = 1.51463 \text{ voltios}$$

Total de caída en cables

$$V_C = V_{\overline{OC}} + V_{\overline{OL}}$$

$$V_C = 1.2675 + 1.51463$$

$$V_C = 2.782 \text{ voltios}$$

La resistencia del ánodo calculamos mediante la expresión (6.4)

$$R_V = \frac{3,300}{2 \pi \times 60 \times 2.54} \times (\text{Ln} \left(\frac{8 \times 60}{3} \right) - 1)$$

$$R_V = 14.04 \text{ ohms}$$

Pero debido a que tenemos solo una capa de 70 cm de resistividad 3,300 ohm-cm, recalculamos la resistencia optando la posición horizontal del ánodo, empleamos la expresión (6.3):

$$R_H = \frac{3,300}{2 \pi \times 60 \times 2.54} \times (\text{Ln} \left(\frac{4 \times 60}{3} \right) - 1)$$

$$R_H = 11.655 \text{ ohms}$$

En cada ánodo la caída de voltaje será:

$$V_A = I \times R_H$$

$$V_A = 2.53 \times 11.655$$

$$V_A = 29.487 \text{ voltios}$$

La resistencia del backfill es 60 ohm-cm para una composición de 70% SO_4Cu , 20% bentonita y 10% sulfato de sodio, Considerando dimensiones de backfill 6" \emptyset x 66", el espesor correspondiente para el cálculo será 1½".

$$\text{Entonces } 60 = 2 \pi \times R \times (1.5 \times 2.54)$$

$$R = 2.5 \text{ ohm}$$

El voltaje respectivo será:

$$V_B = 2.53 \times 2.5$$

$$V_B = 6.325 \text{ voltios}$$

Resistencia de dispersión del suelo, cuya resistividad es 3,300 ohm-cm y ubicando el ánodo a una distancia 8 metros distante de centro del tanque, se calcula como sigue:

$$3,300 = 2 \pi \times R_S \times 800$$

$$R_S = 0.656 \text{ ohms}$$

El voltaje correspondiente será:

$$V_S = 2.53 \times 0.656$$

$$V_S = 1.66 \text{ voltios}$$

El voltaje de protección mínima a considerar es $V_P = 0.850$ voltios.

Adicionalmente para selección del rectificador consideramos $V_{AD} = 3$ voltios.

La caída de tensión en el circuito de protección catódica será:

$$V_T = V_C + V_A + V_B + V_S + V_P + V_{AD} \dots\dots (6.6)$$

$$V_T = 2.782 + 29.487 + 6.325 + 1.66 + 0.850 + 3.0$$

$$V_T = 44.104 \text{ voltios}$$

El rectificador a seleccionar será de 48 V D.C., siendo las características:

A prueba de explosión - con placas de silicio

Salida 18 A.D.C. y 48 V.D.C.

Entrada 220 V.A.C. - Monofásica y 60 Hz.

a2) Tanques planta Playa.- En esta planta tenemos 8 tanques de 4.65 mt de diámetro y 2 tanques de 6.1 mt.

Area total a proteger: 194.3 mt^2

Corriente de protección requerida, considerando la densidad de corriente en sector Cerro:

$$D_I = \frac{15.126}{350} = 0.0432 \text{ amp/m}^2 \text{ ó } 43.2 \text{ miliamp/m}^2$$

$$I_p = 0.0432 \times 194.3$$

$$I_p = 8.4 \text{ amp (D.C.)}$$

Potencial de protección considerada: -850 milivoltios respecto a Cu-CuSO_4 .

Anodo de magnetita tipo 2.4" \emptyset x 33", cuyas características se detallan en el cálculo anterior.

La cantidad de ánodos requeridos será:

$$N_A = \frac{0.080 \times 8.4 \times 30}{4.73 \times 0.50}$$

$$N_A = 8 \text{ \u00e1nodos}$$

La disposici\u00f3n de \u00e1nodos se muestra en el Ap\u00e9ndice I.

El voltaje necesario para vencer la resistencia total del circuito de protecci\u00f3n cat\u00f3dica, ser\u00e1 calculado a continuaci\u00f3n.

Utilizando cable 6 AWG la ca\u00edda de voltaje ser\u00e1:

$$\begin{aligned} V_{OC} &= 8.4 \times (20 \times 0.0013) + 4.2 \times (20 \times 0.0013) + \\ &+ 3.15 \times (15 \times 0.0013) + 2.10 \times (20 \times 0.0013) + \\ &+ 1.05 \times (15 \times 0.0013) \end{aligned}$$

$$V_{OC} = 0.464 \text{ voltios}$$

$$\begin{aligned} V_{OL} &= 8.4 \times (20 \times 0.0013) + 4.2 \times (10 \times 0.0013) + 3 \times (20 \times 0.0013) \\ &+ 2.25 \times (10 \times 0.0013) + 1.5 \times (15 \times 0.0013) + \\ &+ 0.75 \times (15 \times 0.0013) \end{aligned}$$

$$V_{OL} = 0.424 \text{ voltios}$$

Total de ca\u00edda en cables:

$$V_C = V_{OC} + V_{OL}$$

$$V_C = 0.888 \text{ voltios}$$

La resistencia del \u00e1nodo, considerando posici\u00f3n vertical sera:

$$R_V = \frac{3,300}{2\pi \times 33 \times 2.54} \times (\text{Ln} \left(\frac{8 \times 33}{2.4} \right) - 1)$$

$$R_V = 23.2 \text{ ohm}$$

En cada ánodo la caída será:

$$V_A = 1.05 \times 23.2$$

$$V_A = 24.36 \text{ voltios}$$

Considerando el backfill similar al caso anterior

$$R = 2.5 \text{ ohm}$$

$$V_B = 1.05 \times 2.5$$

$$V_B = 2.625 \text{ voltios}$$

Resistencia de dispersión del suelo cuya resistividad es 3,300 ohm-cm y con ubicación del ánodo a 7 metros distante al centro del tanque.

$$3,300 = 2\pi \times R_S \times 700$$

$$R_S = 0.75 \text{ ohm}$$

$$V_S = 1.05 \times 0.75$$

$$V_S = 0.788 \text{ voltios}$$

Voltaje de protección mínimo $V_p = 0.850$ voltios

Voltaje adicional del rectificador 2 voltios

Luego, el voltaje total de caída en todo el circuito será

(ver 6.6):

$$V_t = 0.888 + 24.36 + 2.625 + 0.788 + 0.850 + 2$$

$$V_t = 31.5 \text{ voltios}$$

El rectificador a seleccionar será:

A prueba de explosión - con placas de silicio

Salida 9 A.D.C. y 36 V.D.C.

Entrada 220 V.A.C. - Monofásica y 60 Hz.

b) Protección catódica de tubería submarina

Tenemos 3 tuberías, de 4", 10" y 18" diámetro y 600 metros de longitud cada una.

La resistividad específica del terreno es 1,000 ohm-cm.

Potencial estructura-agua de mar: -646 milivoltios respecto a Ag-AgCl.

Corrientes erráticas nulas.

Potencial de protección: -800 milivoltios (medida en zona de boya)

El ánodo seleccionado será de ferrosilicio, cuyas características principales son:

Tamaño 4½" Ø x 60" long. - Rate de consumo 0.5 Kg/amp-año - Peso 100 Kg - Factor de utilización 50% - Capacidad máxima de salida de corriente 10 amp/ánodo, ideal para instalar en zonas de arenas movedizas y húmedas.

La superficie metálica a proteger sería:

$$S_p = 0.0254 \times \pi \times (4 + 10 + 18) \times 600$$

$$S_p = 1,532 \text{ m}^2$$

La densidad de corriente requerida para proteger las tuberías será variable, porque parte de la tubería es subterránea (20%) y la parte restante está en contacto con agua de mar, por ello la densidad de corriente promedio a considerar es 50 miliamperios/m², complementado con aplicación de pintura.

La corriente de protección requerida será:

$$I_p = 1,532 \times 0.050$$

$$I_p = 76.6 \text{ amperios}$$

Cantidad de ánodos requeridos:

$$N_A = \frac{0.5 \text{ (Kg/amp-año)} \times 76.6 \text{ (amp)} \times 20 \text{ (años)}}{100 \text{ (Kg/ánodo)} \times 0.50}$$

$$N_A = 16 \text{ ánodos}$$

La distribución de ánodos se muestra en el Apéndice J, calculamos el voltaje necesario en la protección catódica. Utilizando cable 1/0 AWG tipo NYY, cuya capacidad de corriente es 125 amperios y resistencia interna de 0.00033 ohm/mt. La resistencia de la tubería es 1.9×10^{-5} ohm/m.

$$V_{OC} = 76.6 \times (40 \times 0.00033) + 38.3 \times (70 \times 0.00033)$$

$$V_{OC} = 1.9 \text{ voltios}$$

$$V_{OL} = 76.6 \times (30 \times 0.00033) + 43.1 \times (600 \times 1.9 \times 10^{-5})$$

$$V_{OL} = 1.25 \text{ voltios}$$

$$V_C = 1.9 + 1.25$$

$$V_C = 3.15 \text{ voltios}$$

La resistencia del lecho de ánodos, separados en 2 grupos de 8 ánodos y separados a 2 metros, empleando (6.5):

$$R_V = \frac{0.0054 \times 1000}{8 \times (60/12)} \times \left(\ln \left(\frac{8 \times 60}{4.5} \right) + 2 \times \frac{60}{78.7} \times \ln(0.656 \times 8) - 1 \right)$$

$$R_V = 0.837 \text{ ohmios}$$

La caída de voltaje es:

$$V_A = 38.3 \times 0.837$$

$$V_A = 32 \text{ voltios}$$

La resistencia de backfill será:

$$50 = 2 \pi \times R \times (2 \times 2.54)$$

$$R = 1.56 \text{ ohms}$$

El voltaje respectivo

$$V_B = \frac{38.3}{8} \times 1.56$$

$$V_B = 7.5 \text{ voltios}$$

La resistencia de dispersión del suelo cuya resistividad es

1000 ohm-cm, es:

$$1000 = 2 \pi \times R_S \times (70 \times 100)$$

$$R_S = 0.0227 \text{ ohm}$$

$$V_S = 38.3 \times 0.0227$$

$$V_S = 0.87 \text{ voltios}$$

El voltaje de protección mínimo requerido

$$V_p = 0.850 \text{ V respecto a Cu-CuSO}_4$$

Voltaje adicional

$$V_A = 3 \text{ voltios}$$

La caída de voltaje total será:

$$V_t = 3.15 + 32 + 7.5 + 0.87 + 0.850 + 3$$

$$V_t = 47.37 \text{ voltios}$$

El rectificador seleccionado será:

A prueba de explosión - con placas de silicio

Salida 77 A.D.C. y 48 V.D.C.

Entrada 220 V - trifásica y 60 Hz.

6.7 Especificaciones para operación y mantenimiento del sistema propuesto

Con los datos de las mediciones hechas en campo se tienen el diseño base del sistema de protección catódica, posteriormente du-

rante la instalación y operación se regulará el voltaje de salida relacionada a la corriente requerida por la estructura a ser protegida.

La pintura que se aplicará consta de una base epóxica rica en zinc, tiene un rendimiento de 3 mils por capa con $24 \text{ m}^2/\text{galón}$; como acabado una capa de 8 mils con $14 \text{ m}^2/\text{galón}$ constituido por alquitrán y resina epóxica, totalizando 11 mils por cada tubería. ⁽²³⁾

Los ánodos se instalarán a una distancia de 70 metros de las tuberías, cada bloque de ánodos, llevará una capa de backfill similar a los utilizados en sistemas de protección para tanques.

Toda unión de cables a estructura será con soldadura Cadweld, señalar la posición del cable y ánodo enterrado a una profundidad de 2 metros respecto al centro del ánodo para tuberías. Los ánodos horizontales a instalar a 0.70 m, caso del horizontal y a 1.5 m, caso del vertical para los tanques.

Durante los primeros meses después de instalada la protección catódica, hacer verificaciones del potencial de la estructura y salida del transformador-rectificador, efectuando las regulaciones correspondientes, por ser una etapa de polarización, posteriormente esta verificación se efectuará 2 veces anuales.

Para evitar la continuidad eléctrica de las tuberías e independizar las zonas de protección catódica, se instalarán bridas aisladas, con teflón o neopreno complementando con aislante epóxico para asegurar; el aislamiento mínimo será 1 kiloohmio por voltio.

En la tubería submarina puede instalarse ánodos de zinc, ubicándolos de tal forma que sea de fácil acceso para realizar medición potencial estructura-ánodo. La lectura debe ser menos de 250 milivoltios, sin bajar de -200 milivoltios (problema fragilización de pintura por evolución del hidrógeno) el ánodo de zinc mencionado será instalado directamente a la tubería y ser enterrado similar al ánodo de corriente impresa.

6.8 Evaluación económica para las alternativas de solución

Para el análisis de costos agruparemos los tanques del sector Playa y Cerro, formando un solo costo, la tubería submarina se analizará por separado. El método a emplearse será valor presente (VAN), calculando la tasa interna⁽²⁴⁾.

Las alternativas analizadas para los tanques serán: Protección catódica por corriente impresa y cambio de planchas cada 5 años a consecuencia de no aplicar protección catódica, el sistema mediante ánodos de sacrificio no será analizado debido a inconveniencias técnicas (ver Tabla 23). En las tuberías submarinas se analizará bajo los mismos criterios para tanques, siendo la razón para no aplicar ánodos de sacrificio poca durabilidad, difícil cambio (cada 4 años), dificultad en el lanzamiento de la tubería, costo muy elevado en instalación y cambio de ánodos, inseguridad en el buen contacto una vez cambiado el ánodo y problema de ensuciamiento por algas marinas.

a) Costo de tanques protegidos por corriente impresa

Costo de materiales y equipos

- Rectificadores de 48 V.D.C.-18 amp. y	\$ 4,500
36 V.D.C.-9 amp.	3,200
- Cables eléctricos 6 AWG - 800 metros de long.	1,000
- Backfill para ánodos 3 toneladas	1,200
- 14 ánodos de magnesio	2,400
	\$ 12,300

Costo de instalación

- Instalación de ánodos y rectificadores	2,000
- Movimiento de tierras	1,000
- Gastos complementarios	<u>500</u>
	Sub Total \$ 16,000

Costos de operación y mantenimiento anuales

- Mantenimiento en general	500 \$/año
- Energía eléctrica	<u>900</u>
	1,400 \$/año

Analizando la expresión del costo actual (P) dados valores anuales (A)

$$(P/A) = \frac{(1 + i)^n - 1}{(1 + i)^n \times i} \quad \dots (6.6)$$

n: número de años

i: tasa de interés anual

Si la tasa anual tiende a cero (aplicando H'ospital), la expresión queda reducida a $(P/A) = n$. Considerando este úl-

timo caso para la alternativa (a1), en 20 años y con valor de recuperación del equipo igual a cero; el costo actual que dará (P):

$$P = 16,000 + 1,400 \times 20$$

$$P = 44,000 \text{ Dólares}$$

a2) Costo incurrido mediante cambio de planchas

Costo de materiales

- 65 planchas 6'x16', espesor $\frac{1}{4}$ " acero A-283	\$ 20,600
- Soldadura 6020 (5/32") y 6011 (3/16"), total 750 Kg.	4,000
	\$ 24,000

Mano de obra

- Preparación piso del tanque	\$ 1,200
- Corte y acomodación de planchas	2,000
- Apuntalado y soldadura	5,000
- Control de calidad de soldadura	2,000
- Pruebas de vacío e hidrostática del tanque	1,500
	Sub Total \$ 11,700
- Gastos complementarios	<u>500</u>
	Total cada 5 años \$ 36,200

Durante 20 años se cambiará 3 veces (año 5, 10 y 15), llevando valor presente con $i = 0$, tenemos:

$$P = 36,200 \times 3$$

$$P = 108,600 \text{ Dólares}$$

En conclusión el sistema de corriente impresa es conveniente económicamente para una tasa de interés igual a cero, lo que indica que a mayores valores será mucho más conveniente aún.

b1) Costo de tubería submarina protegida con corriente impresa

Costo de materiales y equipos

- Rectificador de 48 V.D.C.-77 amp.	\$ 9,200
- Cables eléctricos 1/0 AWG-250 metros de longitud	1,200
- Backfill para ánodos 3 toneladas	1,200
- 16 ánodos de ferro silicio	<u>3,000</u>
	\$ 14,600

Costo de instalación

- Instalación de ánodos y rectificador	\$ 3,000
- Movimiento de tierras	800
- Gastos complementarios	<u>800</u>
	\$ 19,200

Costos de operación y mantenimiento anuales

- Mantenimiento en general	600 \$/año
- Energía eléctrica	2,600
	3,200 \$/año

Llevando a costos actuales con tasas de interés igual a 0%, una vida útil de 20 años, tenemos:

$$P = 19,200 + 3,200 \times 20$$

$$P = 83,200 \text{ Dólares}$$

Nótese que no incluye el costo de pintura, debido a que en la alternativa siguiente (b2) se aplicará la misma pintura inicialmente (tubería nueva), pero en cambio de tuberías si debe incluirse dicho costo, ver el procedimiento siguiente.

b2) Costo incurrido mediante cambio de tuberías

Costo de materiales

- 600 metros de tuberías de 4", 10" y 18" Ø standard	\$ 42,000
- Pintura, base epóxica y acabado alquitrán y resina epóxica	4,000
- Soldadura 6020 (5/32") y 6011 (3/16"), total 1,200 Kg.	6,400
	\$ 52,400

Mano de obra y servicios

- Preparación, pintura y soldado de tuberías	\$ 8,000
- Maniobra de lanzamiento	12,000
- Servicios de buzos, barcaza y remolcador	20,000
- Pruebas y control de calidad de soldadura	3,000
- Gastos complementarios	<u>800</u>
Total cada 5 años	\$ 96,200

Durante los 20 años (de preferencia para comparación) se efectuarán 3 cambios, considerando $i = 0$ (ver 6.6) tenemos:

$$P = 96,200 \times 3$$

$$P = 288,600 \text{ Dólares}$$

Podemos concluir, similar al caso de tanques, el sistema de protección catódica por corriente impresa se impone económicamente, para cualquier tasa de interés. En el sistema de ánodos de sacrificio resultará un costo comprendido entre los costos de las alternativas consideradas (caso de tuberías submarinas), esto se deduce del tiempo de duración y altos costos de instalación de los ánodos sacrificables.

CONCLUSIONES

- 1.- El sistema de protección catódica complementado con recubrimientos de pinturas son convenientes para aplicación a estructuras enterradas y sumergidas (en agua de mar), desde el punto de vista técnico-económico, dándole alta eficiencia operativa a plantas e instalaciones.
- 2.- El análisis económico nos indica que el costo de protección catódica se iguala al costo debido a cambio estructural de una instalación, en un tiempo mayor al período de cambio, pero dicho tiempo está comprendido entre el primer y segundo período de cambio estructural de la instalación no protegida.
- 3.- Los ánodos galvánicos no resultan económicos y seguros en tuberías submarinas, mientras que en estructuras enterradas es técnicamente inconveniente, la alta resistividad del terreno o suelo limita el empleo de ánodos galvánicos ya que la corriente generada por los ánodos es baja, requiriéndose gran cantidad de ánodo y espacio en el terreno.
- 4.- Los ensayos y mediciones "in situ" ayudan con datos reales para los cálculos, a la vez que nos dirigen a una mejor selección de equipos y materiales para la protección anticorrosiva. La inter-

pretación adecuada de cada medición es muy importante.

- 5.- La medición de resistividades debe efectuarse varias veces y los valores respectivos procesarlos para obtener el número de estratos del terreno y luego determinar la resistividad "específica" para necesidades del diseño. La mala interpretación de estas mediciones llevan a sobredimensionamientos en los equipos y mala disposición de ánodos en corriente impresa o sistema de ánodos sacrificables.
- 6.- En la disposición de ánodos se debe tener presente el criterio eléctrico, por ello la distribución en áreas complejas, caso de tanques, tratar de buscar simetría, mientras que las tuberías submarinas no tienen mayor problema, por la alta conductividad del agua.

BIBLIOGRAFIA

- (1) AILOR, WM. ED, Hdbbook on Corroison Testing Evaluation ,
New York, 1971.
- (2) BOVANKOVICH, J.C., Corrosion, California, 1973
- (3) CHAMPION, F.A., Ensayos de Corrosión Urho, Barcelona, 1960
- (4) FANCUTT, F., Iron Steel Institute, Londres, 1949.
- (5) GALVALE, Corroison, OEA, 1979
- (6) GONZALES, J.A., Estudio, Medida y Control de Corrosión E-
lectroquímica ITINTEC, Lima, 1985
- (7) MEHJOO, A., Coatings and Cathodic Proteccion, Publication
of, Pipeline Industry, New York, 1969
- (8) MORGAN, J.H., Cathodic Protection, Leonard Hill, London ,
1959.
- (9) NACE BASIC CORROSION COURSE, Nace Publications, Houston ,
1980.
- (10) NACE PUBLICATIONS OF MATERIALS PERFORMANCE, Nace, Houston
1980.
- (11) NEUSSNER, F., Curso: Corrosión de la Univ. Politécnica de
Madrid, 1978.
- (12) PEABODY, A.W., Control of Pipeline Corrosion, NACE, Hous-
ton, 1967.

- (13) PETROPERU, Seminario de Corrosión en Instalaciones de Petróleo, Boletines, Lima, 1985.
- (14) POURBAIX M., Lectures on Electrochemical Corrosion, Plenum Press, London, 1973.
- (15) POWELL, H.M. and MORGAN, J.H., Cathodic Protection for Pipelines, New York, 1957.
- (16) PRIMER CONGRESO NACIONAL DE CORROSION Y PROTECCION, Memorias, Lima, 1985.
- (17) RIORDAN, M.A., Evaluation of Influence of Overhead Transmission Lines, Houston, 1957.
- (18) SAMUEL, F.E., Corrosion y Deterioro, ASTM Material Protection, Philadelphia, 1962.
- (19) SEYMOUR, R.C., Corrosion, NACE, Houston, 1982.
- (20) SPELLER, F.N., Corrosion, Causes and Prevention, Mc Graw-Hill, New York, 1955.
- (21) TOMASHOW, N.D., Corrositivity of Soil, Akad.Hauk, U.R.S.S 1959.
- (22) TUDELA SAENZ, F., Curso de Protección Catódica, Universidad Católica del Perú, Lima, 1985.
- (23) UHLIG, H.H., Corrosion and Control Corrosion, John Wiley, New York, 1983.
- (24) WAINWRIGHT, R.M., Economic Aspect of Cathodic Protection, Houston, 1953.