

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
Y MANUFACTURERA



“Diseño de un Sistema de Protección Catódica
por Corriente Impresa en los Fondos de los
Tanques en Operaciones Selva”

Tesis para obtener el Título Profesional de
INGENIERO QUIMICO

HILDEBRANDO MARCIAL HARO PARRA

Promoción 88-II

LIMA . PERU

1990

A mis padres Hildebrando y Leonor
mi eterno agradecimiento por su
apoyo y constante aliento por ver
realizado mis aspiraciones.

A mi novia Zully

A mis hermanos : Patricia y
Rafael.

Mi sincero agradecimiento al
Ing. Renan Rojas Fuentes por su
asesoramiento en el desarrollo
del presente trabajo.

AGRADECIMIENTO

Mi sincero afecto y gratitud a mi alma mater Universidad Nacional de Ingeniería. A mis profesores de la Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera, por haberme brindado los conocimientos necesarios para mi formación profesional.

Mi agradecimiento a la empresa PETROLEOS DEL PERU, por haberme brindado su apoyo incondicional para la realización del presente proyecto.

De la misma manera, expreso mi gratitud a los señores ingenieros del Centro de Investigación y Desarrollo IDES de la empresa PETROLEOS DEL PERU, por haber contribuido en forma eficaz y eficiente en el desarrollo del mismo:

Ing. Héctor Chávarry Rojas

Ing. Luis Carranza Vitteri

INDICE

Introducción.

Resumen.

CAPITULO I

GENERALIDADES

| | <u>Pág.</u> |
|---------------------------------|-------------|
| 1.1 Objetivos. | 2 |
| 1.2 Justificación del Proyecto. | |
| 1.2.1. Técnico. | 2 |
| 1.2.2. Económico. | 3 |
| 1.3 Antecedentes. | 3 |

CAPITULO II

TEORIA DE LA PROTECCION CATODICA

| | |
|---|----|
| 2.1. Corrosión Electroquímica y Fundamentos de la Protección Catódica. | 6 |
| 2.2. Corrosión por suelos. | 12 |
| 2.2.1 Mecanismos de la corrosión por suelos. | 19 |
| 2.3. Método para determinar la resistividad del suelo | 25 |

| | |
|--|----|
| 2.4 Criterio para la determinación de la densidad de corriente | 30 |
| 2.5 Corrientes Erráticas. | 43 |

CAPITULO III

DESCRIPCION DEL ESTADO ACTUAL DE LA ESTACION DE TANQUES.

| | |
|---|----|
| 3.1 Descripción general. | 47 |
| 3.2 Instalaciones Electromecánicas. | 48 |
| 3.2.1.Sistema de Almacenaje y Bombeo. | 48 |
| 3.2.2.Sistema de Bombas Contra-incendio. | 49 |
| 3.3.Sectores de incidencia de la Corrosión. | 51 |
| 3.4.Materiales de Fabricación. | 51 |

CAPITULO IV

SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA Y PRUEBAS DE CAMPO NECESARIOS PARA EL DISEÑO.

| | |
|--|-----|
| 4.1 Sistemas de protección catódica. | 54 |
| 4.1.1 Protección catódica por ánodo de sacrificio. | 54 |
| 4.1.2 Protección catódica por corriente impresa. | 76 |
| 4.1.3.Instrumentos necesarios para pruebas de protección catódica. | 101 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.2 | Parámetros principales en la evaluación y detección de la corrosión. | 103 |
| 4.2.1. | Polarización y velocidad de corrosión | 103 |
| 4.2.2. | Polarización lineal | 117 |
| 4.2.3. | Extrapolación de Tafel | 121 |
| 4.2.4. | Resistividad del medio corrosivo. | 123 |
| 4.3 | Pruebas de campo para el diseño de protección catódica. | 124 |
| 4.3.1. | Medición de la resistividad del suelo. | 124 |
| 4.3.2. | Medición de potencial Tanque-Suelo. | 131 |
| 4.3.3. | Medición sobre los requerimientos de corriente. | 132 |
| 4.3.4. | Determinación de la densidad de corriente requerida. | 137 |
| 4.3.5. | Características del medio corrosivo. | 139 |

CAPITULO V

EVALUACION TECNICA.

| | | |
|-----|---|-----|
| 5.1 | Diseño del sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio. | 142 |
| 5.2 | Diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa. | 149 |
| 5.3 | Selección técnica del diseño propuesto. | 170 |
| 5.4 | Programa de mantenimiento para el sistema propuesto. | 172 |

CAPITULO VI
EVALUACION ECONOMICA.

| | |
|---|-----|
| 6.1 Inversión del proyecto. | 175 |
| 6.1.1. Costos de equipos y Materiales. | 175 |
| 6.1.2. Costos de Operación e Instalación. | 178 |
| 6.2 Rentabilidad del proyecto. | 180 |

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

| | |
|---------------------|-----|
| 7.1 Conclusiones. | 185 |
| 7.2 Recomendaciones | 187 |

APENDICE.

BIBLIOGRAFIA.

INTRODUCCION

El presente proyecto está orientado a diseñar un sistema de protección catódica que permita reducir los problemas de corrosión por suelos en los fondos externos de tanques de almacenamiento de crudo en el área Corrientes-Trompeteros. Como principal premisa se considera que el sistema que se elija sea factible desde el punto de vista técnico y económicamente rentable.

Es importante mencionar que para la selección del sistema adecuado tenemos que tener en cuenta lo siguiente:

Partir de las premisas teóricas acerca de los tipos de corrosión existentes en el medio, que afectan el comportamiento normal de la estructura metálica en estudio. Luego realizar pruebas de campo "Insitu", para determinar las condiciones en que se encuentra tanto el tanque como el medio corrosivo.

El estudio fué realizado bajo el asesoramiento del Centro de Investigación y Desarrollo IDES, y el apoyo técnico del Area de Ingeniería- Departamento de Diseños, PETROPERU S.A.

Finalmente los resultados que se desean obtener, se manifiestan principalmente en prolongar la vida útil de los tanques del Area-Corrientes Operaciones Selva; y de esta manera reducir los costos de operación y mantenimiento, y por consiguiente evitar las pérdidas diferidas de crudo que se almacenan en ésta área.

RESUMEN

El presente proyecto tiene la finalidad de resolver los problemas de corrosión existentes en los fondos de tanques del Area Corrientes de Operaciones Selva. Lote N 8.

En el Area Corriente-Trompeteros la producción de crudo es de 25000 BPD. volumen que se almacena en un patio de tanques, que está constituido de la siguiente manera:

- 1.Un tanque de 30000 barriles (TK30M9S)
- 2.Un tanque de 50000 barriles (TK50M12S)
- 3.Un tanque de 125000 barriles (TK125M17S)

De estos tres tanques, hay dos instalados desde el inicio de las Operaciones Selva (1974), y fueron montados directamente sobre el suelo, mientras el tercer tanque de 50000 barriles de capacidad que fue instalado en 1988, se montó sobre una base de Sand-Oil.

Al no existir ninguna protección contra la corrosión por suelos (a pesar que la base de Sand-Oil del tanque TK50M9S, ha

cumplido con relativo éxito en la protección): se ha elaborado el presente proyecto, que abarca la protección de los tres tanques y así prolongar la vida útil de éstos.

El presente trabajo abarca las evaluaciones técnicas y económicas para la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa en dichos tanques del Area-Corrientes.

Sin embargo, como resultado de las evaluaciones se recomienda lo siguiente:

- Instalar el sistema de protección a corto plazo, ya que se cuenta con los materiales que se especifican en el proyecto.

- Luego de instalado el sistema, debe considerarse una evaluación periódica de los potenciales y de la corriente del banco de ánodos, para asegurar una óptima protección de los tanques, y hacer las correcciones de ser necesarias.

C A P I T U L O I

G E N E R A L I D A D E S

1.1.OBJETIVOS.

Los objetivos principales del presente estudio se presentan a continuación:

- Prolongar la vida útil de los tanques.
- Que las unidades se encuentren en un buen estado físico para el almacenamiento del crudo.
- Permitir una mejor operación de mantenimiento en los tanques.
- Se pretende utilizar en el diseño las nuevas técnicas en la posición de los ánodos y distribución de corriente de los mismos, con el fin de obtener mejores resultados en la eficiencia del sistema a aplicar.
- Realizar una evaluación económica de los sistemas de protección catódica a fin de seleccionar el más ventajoso y rentable, para los tanques en estudio del Area Corrientes de Operaciones Selva - PETROPERU S.A.

1.2.JUSTIFICACION DEL PROYECTO.

1.2.1.TECNICA.

Técnicamente el estudio se justifica por lo siguiente:

- Debido a la poca eficiencia que presenta el Sand-Oil, en zonas selváticas.

-La protección catódica por corriente impresa es la más viable. frente a otros sistemas de protección como son

-Protección catódica por ánodo de sacrificio.

-Protección del fondo del tanque. utilizando pinturas anticorrosivas.

1.2.2. ECONOMICA.

La justificación económica del presente estudio es debido a los altos costos de operación y mantenimiento que ocasionan los fenómenos de corrosión. y esto se debe por:

-Pérdidas del producto por fugas debida a la corrosión.

-Pérdidas económicas por lucro cesante.

-Frecuencia de cambio del fondo de tanques. cada 5 años.

1.3. ANTECEDENTES.

El Area Corrientes-Trompeteros. inició sus actividades en 1974, contando con dos tanques de almacenamiento de 30 y 125 mil barriles de fabricación Soviética. los mismos que fueron construidos sobre una base de anillo de concreto y relleno de 30 mm. de piedra y grava.

En 1988. entra en operación un tanque adicional de 50 mil barriles de capacidad, el que se construyó sobre una base de

Sand Oil (Arena-Aceite) de 50 mm. aplicada a una sub-base de tierra del lugar debidamente compactada.

Actualmente estos tanques no presentan ningún tipo de protección externa contra la corrosión por suelos; con excepción del tanque nuevo, pero dicha base de Sand-Oil, no es un método eficaz y duradero, y depende de las condiciones del terreno.

En zona de Selva la eficiencia del Sand-Oil se contrasta con su comportamiento en la Costa, en donde si dá buenos resultados.

Por lo expuesto, existe la necesidad de prevenir y detener el deterioro externo del fondo del tanque; y así optimizar y mejorar los niveles de operación; para esto se requiere de métodos eficaces y eficientes, capaces de superar el problema en el más breve plazo.

C A P I T U L O I I

T E O R I A D E L A P R O T E C C I O N C A T O D I C A

2.1. CORROSION ELECTROQUIMICA Y FUNDAMENTOS DE LA PROTECCION CATODICA.

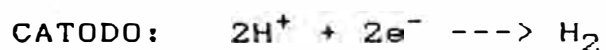
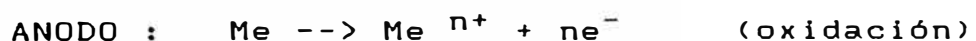
-CORROSION ELECTROQUIMICA.

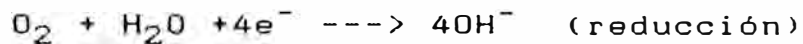
Es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, siendo imprescindible la existencia de estos tres elementos para que este tipo de corrosión pueda existir.

La corrosión más frecuente es todo de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico en el que la ininidad de burbujas de hidrógeno que aparecen sobre la superficie metálica, ponen de manifiesto la existencia de infinitos cátodos y en los ánodos se va disolviendo el metal. Al cambiar continuamente de posición estas zonas anódicas y catódicas, llega un momento que el metal se disuelve totalmente.

Las reacciones que tiene lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:





Este tipo de corrosión se caracteriza porque, casi siempre es más pronunciada en una zonas que en otras, siendo su forma más característica de ponerse de manifiesto con la aparición de picaduras, que ocasionan graves problemas.

Para combatir la corrosión electroquímica, se tiene pues que proceder contra uno ó varios de los tres elementos fundamentales del proceso, es decir, hay que actuar sobre el ánodo, cátodo ó electrolito.

Si se elimina todos los cátodos, solamente con ánodos y electrolito no habrá corrosión, este procedimiento constituye la llamada protección anódica. Si suprimimos todos los anodos, solamente con cátodo y electrolito tampoco habrá corrosión, este procedimiento constituye la protección catódica. Finalmente si establecemos una barrera de separación entre los posibles ánodos y cátodos y el electrolito, también disminuimos ó eliminamos la corrosión; y esto se consigue por ejemplo con una capa de pintura.

La aplicación de una capa de pintura, es el medio más antiguo que se conoce en la lucha contra la corrosión. Hay que indicar que existen sustancias que añadidas en pequeñas cantidades al electrolito actúan también sobre los procesos anódicos y catódicos, é incluso forman barreras de separación, que se conocen con el nombre de inhibidores de corrosión.

-FUNDAMENTOS DE LA PROTECCION CATODICA.

La protección catódica se basa en la existencia de un potencial de inmunidad, al cual es suficiente llevar el metal a proteger para detener la corrosión.

El diagrama de Pourbaix (fig. 2.1.1) sitúa este potencial en -0.62 voltios, con relación al electrodo de hidrógeno normal, para un PH del medio comprendido entre 0 y 9.

Para que exista un pila galvánica tiene que existir un ánodo, un cátodo y un electrolito, y en caso que uno de estos elementos este ausente, la corrosión se detiene.

Para la realización de la protección catódica se recurre a las técnicas siguientes:

-Protección por ánodo de sacrificio.

La estructura a proteger se pone en contacto eléctrico con un metal ó aleación que tiene un potencial más negativo que el de la estructura, quedando toda la superficie de ésta convertida en cátodo. La reacción anódica se verifica solamente en el metal que actúa como ánodo de sacrificio. Fig.2.1.2.

Teniendo en cuenta el diagrama de Pourbaix, representado en la fig.2.1.1, podrán actuar como ánodos de sacrificio todos aquellos metales y aleaciones que tengan una tensión de

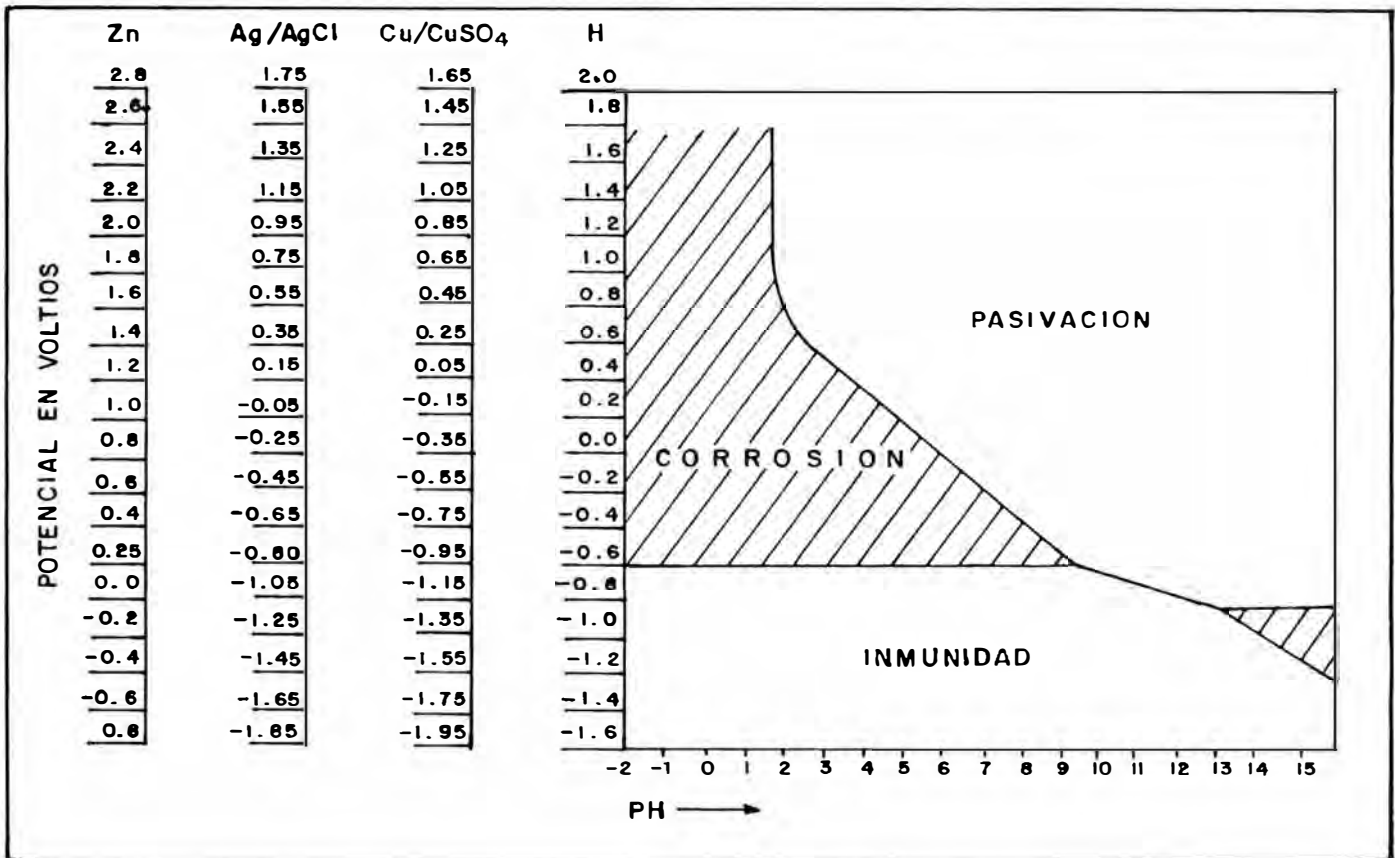


FIG. 2.1.1 DIAGRAMA DE POURBAIX

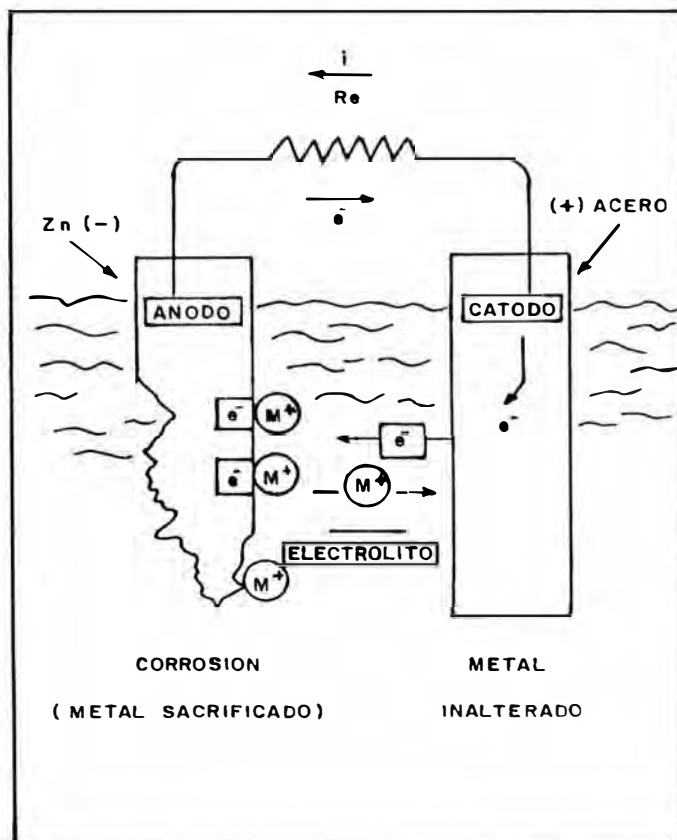


FIG. 2.1.2 MECANISMO DE PROTECCION CATODICA CON ANODO DE SACRIFICIO

-FUNDAMENTOS DE LA PROTECCION CATODICA.

La protección catódica se basa en la existencia de un potencial de inmunidad, al cual es suficiente llevar el metal a proteger para detener la corrosión.

El diagrama de Pourbaix (fig. 2.1.1) sitúa este potencial en -0.62 voltios, con relación al electrodo de hidrógeno normal, para un PH del medio comprendido entre 0 y 9.

Para que exista un pila galvánica tiene que existir un ánodo, un cátodo y un electrolito, y en caso que uno de estos elementos este ausente, la corrosión se detiene.

Para la realización de la protección catódica se recurre a las técnicas siguientes:

-Protección por ánodo de sacrificio.

La estructura a proteger se pone en contacto eléctrico con un metal ó aleación que tiene un potencial más negativo que el de la estructura, quedando toda la superficie de ésta convertida en cátodo. La reacción anódica se verifica solamente en el metal que actúa como ánodo de sacrificio. Fig.2.1.2.

Teniendo en cuenta el diagrama de Pourbaix, representado en la fig.2.1.1, podrán actuar como ánodos de sacrificio todos aquellos metales y aleaciones que tengan una tensión de

electrodo sensiblemente más negativo que el potencial de protección del hierro, es decir, situados en el dominio de inmunidad de este metal.

Si se tiene en cuenta en esta serie electroquímica de los metales (tabla 2.1.1), el hierro estará protegido por metales que estén situados por encima de él en esta serie, entonces habrá que elegir aquellos que tengan una fuerte sobretensión de hidrógeno y tendencia muy débil a la pasividad.

Los metales más utilizados son el cinc, aluminio magnesio y sus respectivas aleaciones.

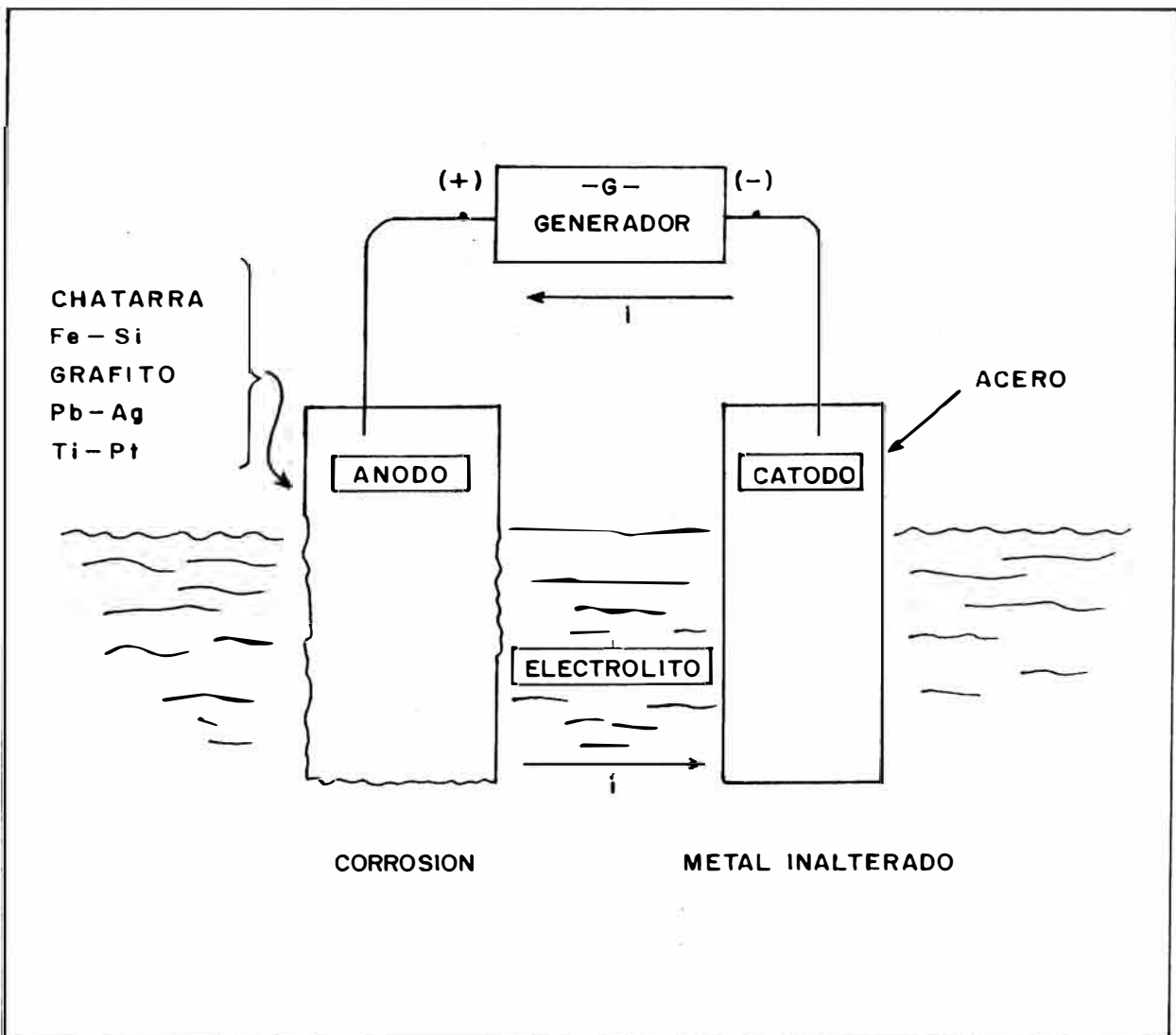
Con el desarrollo de la protección catódica se ha conseguido una demanda cada vez mayor de los materiales ánodos en estos últimos 25 años

-Protección por corriente impresa.

La estructura a proteger se pone en contacto eléctrico con el borne negativo de una fuente exterior de corriente continua, que pueda provenir de una corriente alterna rectificadas ó de una corriente continua pura. Fig.2.1.3.

Los ánodos inertes que son utilizados con mayor frecuencia son la chatarra de hierro, grafito, ferrosilicio-cromo, aleaciones de plomo y el titanio, tántalo o niobio platinado.

FIG. 2.1.3 MECANISMO DE PROTECCION CATODICA
CON CORRIENTE IMPRESA



Si consideramos el diagrama de Pourbaix (fig.2.1.1), que delimita las zonas de corrosión, inmunidad y pasivación del hierro, en función del pH, se observa que para pasar el hierro a la zona de inmunidad, hay que rebajar su potencial a un valor de -0.62 V. con respecto a un electrodo de referencia de hidrógeno que equivale a -0.35 V. con relación al electrodo de Ag/AgCl y de -0.85 V. respecto al Cu/CuSO₄; esta será pues, otra definición de la protección catódica.

La densidad de corriente que habrá de aplicar para conseguir rebajar el potencial de la estructura a proteger al valor descrito, será un dato de gran valor, ya que incide directamente en la economía del sistema.

Cuando se alcance el valor de -0.85 V. con relación al electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, se habrá encontrado el potencial de protección que queda indicado en el diagrama de Pourbaix (fig.2.1.1). Cabe señalar que se tendrá que supervisar periódicamente dicho potencial, y así mantener el nivel de protección de la estructura a proteger.

2.2 CORROSION POR SUELOS.

El comportamiento frente a la corrosión del hierro y del acero enterrado se asemeja en algunos aspectos, al comportamiento frente a la inmersión total en agua. Las pequeñas variaciones de la estructura del acero no afectan la resistencia del

TABLA 2.1.1

SERIE ELECTROQUIMICA DE LOS METALES

(Electrodo de referencia: El Hidrógeno normal)

| I O N E S | Potencial (Volt.) |
|-----------|-------------------|
| Li + | - 3.02 |
| Rb + | - 2.92 |
| Ca ++ | - 2.87 |
| Na + | - 2.71 |
| Mg ++ | - 1.86 |
| Al +++ | - 1.67 |
| Zn ++ | - 0.76 |
| Cr ++ | - 0.71 |
| Fe ++ | - 0.44 |
| Cd ++ | - 0.39 |
| H + | + 0.00 |
| Cu ++ | + 0.34 |
| Ag ++ | + 0.80 |
| Au +++ | + 1.42 |

terreno. tal es así que las velocidades de corrosión para el acero de alta aleación, son iguales las velocidades de corrosión para el acero de baja aleación ,acero suave y acero maleable.

Por lo mismo se supone que el trabajo en frío ó el tratamiento térmico no afectan la velocidad de corrosión. En general dicha velocidad varía en cantidades importantes con el tipo de suelo, debido a diferencias específicas como composición del suelo, pH, contenido de humedad, etc.

-Factores que afectan la corrosividad de los suelos.

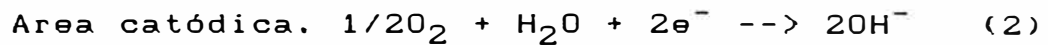
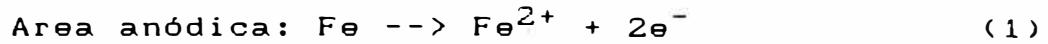
Entre los principales tenemos:

- Propiedades de Despolarización del suelo.
- Porosidad (aireación)
- Resistividad específica del suelo (conductividad eléctrica)
- Componentes disueltos en el suelo.
- Acidez y pH.
- Humedad.

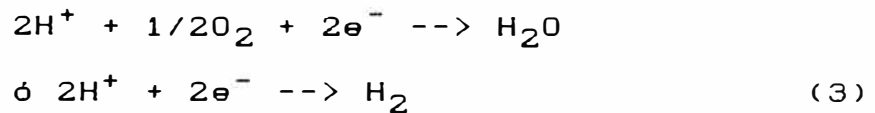
-Propiedades de Despolarización de los Suelos.

La reacción de corrosión es atribuible a mecanismos electroquímicos; esto se debe por la formación de una parte de la zona anódica y otra de la zona catódica en la superficie del acero, lo que origina microceldas y el área anódica

empieza a corroerse de acuerdo a la siguiente reacción química:



Especialmente en caso donde la acidez es alta, la siguiente reacción catódica es llevada a cabo:



Como se observa, la presencia de oxígeno es indispensable para el progreso de la corrosión y la falta de oxígeno sobre las superficies conductoras, para el crecimiento de la polarización catódica, elimino la reacción (2) y la corrosión es inhibida.

Es conocido que la corrosividad en suelos perturbados ó en suelos permeables, es naturalmente intensivo y depende en gran parte de las condiciones atmosféricas en que se encuentran dicho medio.

-Porosidad

El suelo poroso puede retener la humedad durante mayores periodos de tiempo ó permitir una aireación óptima, factores que incrementan la velocidad de corrosión.

En suelos bien aireados, la velocidad de formación de picaduras, aunque inicialmente elevada, disminuye con rapidez debido a que en presencia de un abundante suministro de oxígeno, la oxidación y precipitación de fierro como hidróxido férrico ocurre próxima a la superficie del metal, y la membrana protectora formada de esta manera tiende a disminuir con el tiempo la velocidad de formación de picadura.

En suelos de aireación pobre, la velocidad inicial de formación de picadura disminuye con lentitud.

Bajo estas condiciones los productos de corrosión permanecen en estado no oxidado y tienden a difundirse en el suelo ofreciendo poca ó ninguna protección al metal que está corroyéndose.

También influye el efecto de aireación en suelos que albergan bacterias sulfatos reductoras que son inactivas en presencia del oxígeno disuelto.

-Resistividad Eléctrica del suelo.

Desde que la corrosión en aceros es proporcional a la cantidad de corriente fluída a través de las micro celdas sobre dicha superficie, es sustancialmente influenciada por la resistencia específica del suelo.

También la resistencia específica del suelo está influenciada no solamente por la humedad y las sales disueltas, sino también por el tamaño de los granos del suelo.

La siguiente tabla 2.2.1, muestra la resistencia específica de los suelos impregnados con agua normal subterránea (salinidad de 150-500 ppm.)

TABLA 2.2.1

RESISTENCIA ESPECIFICA DE SUELOS IMPREGNADOS CON AGUA DEL TERRENO

| Clase de Suelo | Resistencia Específica (ohm-cm.) |
|----------------------|----------------------------------|
| Arcilla Coloidal | 300 - 1000 |
| Arcilla Fina o Arena | 1000 - 10000 |
| Arena de grano medio | 10000 - 40000 |
| Grava menuda | 40000 - 70000 |

-Componentes disueltos en el suelo.

El contenido de sales afecta la resistencia específica del suelo haciéndolo más corrosivo. Las concentraciones elevadas de NaCl y Na₂SO₄ en los suelos son los más importantes.

Los suelos que contienen ácidos orgánicos derivados del humus son relativamente corrosivos para el acero.

La actividad de los despolarizadores orgánicos naturalmente presentes en el suelo (disminuyendo su concentración) disminuyen su actividad si el suelo está bien aireado, evitando la estimulación de las pilas de acción local.

-Acidez y PH.

Un suelo con humedad de alta acidez y bajo valor de pH, la reacción catódica con evolución de hidrógeno tiene lugar y luego la velocidad de corrosión es remarcablemente alta.

La corrosión con evolución de hidrógeno tiene lugar en aceros a valores de $\text{pH}=4$, ó en suelos con contenido de ácidos inorgánicos, ó en el rango de $\text{pH}= 5-7$, tal es el caso de suelos con contenido de ácidos orgánicos. A menudo el efecto de pH prevalece sobre la resistencia específica en suelo ácido.

Parece ser que la medida de acidez total, en el caso de suelos que contiene ácidos orgánicos derivados del humus, es mejor índice de su corrosividad que el pH.

-Humedad.

Como se observó cuando se trató la resistividad específica, la humedad tiene un rol importante en el aumento de la conductividad del suelo, debido a la facilidad para conducir

corriente, a través de los iones disueltos, que son conductores de electricidad.

2.2.1 MECANISMOS DE LOS TIPOS DE CORROSION PRESENTADOS.

Los mecanismos de la corrosión por suelos se deben a la acción de celdas, donde las partes de estas celdas son: el ánodo, cátodo, y el electrolito, si falta alguno de estos componentes en la celda no se producirá corrosión.

Como la corrosión es un proceso electroquímico, éste se encuentra relacionado con la cantidad de corriente que pasa a través de la celda.

El valor de la corriente se puede obtener de la ley de Ohm $I = E/R$; entonces la corriente de corrosión va a ser mayor cuando mayor sea la variación de potencial entre el ánodo y cátodo, ó cuando la resistencia del electrolito del circuito sea menor.

El agua de lluvia ocasiona humedad en casi todo tipo de suelos y es la responsable de la humedad y del electrolito formado en muchos suelos.

Los problemas de corrosión presentados en fondos de tanques de crudo corresponden a los tipos de corrosión Localizada y de corrosión por Aireación Diferencial.

-CORROSION LOCALIZADA.

Con la diferencia en la magnitud de las celdas de acción local, la corrosión por estancamiento y la corrosión por picadura presentan mecanismos de corrosión muy parecidos, estas formas de corrosión por lo general se presentan juntas.

Algunos autores consideran que la corrosión localizada debe ser estudiado mediante métodos electroquímicos, tales como métodos potencioestáticos, ó galvanostáticos; y métodos químicos, estos últimos se aplican perfectamente desde que la corrosión se reduce en última instancia a una reacción de óxido-reducción.

Para explicar el mecanismo de la corrosión localizada se deben distinguir dos etapas (1) iniciación del "pit" sobre la superficie pasivada del metal, (2) desarrollo del "pit".

La teoría de Hoar, asume que la iniciación de los "pits" se debe a la adhesión de aniones agresivos en la superficie de la película de óxido, seguida de la penetración de estos iones a través de la película. El ingreso de aniones sin intercambio dentro de la película es capaz de inducir una gran conducción de iones en la película de óxido contaminado la cual puede provocar altas densidades de corriente (en ciertos puntos), capaz de remover selectivamente los cationes cuando el campo a través de interfase película-óxido alcanza un valor crítico,

tal como pasando de la fase pasiva a la transpasiva de acuerdo al diagrama de Pourbaix.

En otro trabajo, Hoar asume que durante la absorción de aniones en el agua las moléculas son reemplazadas, y esto causa una disminución en la tensión superficial de la interfase óxido-solución debido a las fuerzas de repulsión mútua entre las partículas cargadas.

Kolotyrkin, asume que durante la disolución del metal pasivado existe una distribución irregular de corriente en la superficie metálica, debido a que la red no siempre es suficientemente homogénea. De acuerdo con esta teoría el potencial de ruptura representa el mínimo valor del potencial de electrodo al cual los aniones agresivos son capaces de producir un desplazamiento reversible del oxígeno de la superficie pasivada.

Rozenfeld, asume de que el intercambio del oxígeno por iones cloruro reproduce en los puntos en los que el enlace metal oxígeno, es más débil. Los aniones agresivos que desplazan al oxígeno de la superficie penetran a través de la película pasivadora y se aglomeran en el interior de los "pits".

Los "pits" son grietas cerradas cubiertas por una película superficial porosa.

Por último la teoría de Frank, de la resistencia por polarización asume de que la película de solución presente en

la superficie del "pit", así como la concentración del metal disuelto aumenta considerablemente como consecuencia del elevado flujo de corriente anódica. Como resultado de la concentración de la polarización en el interior de los "pits", se fijan condiciones similares al electro-pulido en el interior de los "pits". La película formada sobre la superficie pulida tiene la consistencia de una solución sobresaturada la cual es viscosa y tiene una alta resistencia ohmica. Bajo estas condiciones la difusión de los iones metálicos de la superficie electro-pulida hacia la solución está determinada por la velocidad de disolución del metal. La densidad de corriente en el "pit", será independiente del potencial ó el cambio en la caída ohmica del voltaje en la superficie pulida como resultado de un cambio de la resistencia de la película.

-AIREACION DIFERENCIAL.

Cuando dos electrodos unidos entre sí de un mismo material, pueden construir una pila, con tal de que estén en contacto con concentraciones diferentes de un mismo ión, ésta funcionará en el sentido de igualar las concentraciones.

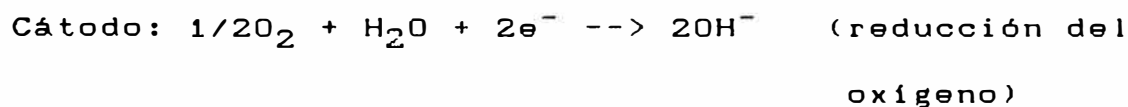
Los procesos de corrosión electroquímica de los metales sufren el funcionamiento de pilas con zonas anódicas y catódicas perfectamente determinadas.

Estas pilas pueden ser celdas galvánicas (siempre que se ponen en contacto dos metales de distinto potencial), pilas de concentración ó una combinación de ambos tipos de pilas.

Entre las posibles pilas de concentracion, la más importante es la pila de aireación diferencial, esta pila tiene lugar cuando un metal en contacto con un electrolito posee zonas superficiales de más difícil acceso al oxígeno que otras.

La corrosión se produce en las partes menos aireadas, permaneciendo intactas las más aireadas.

Las reacciones que tiene lugar en las pilas de corrosión por aireación diferencial son:



A Evans se le debe en gran parte la aplicación de la teoría electroquímica como explicación de la mayoría de los fenómenos de corrosión.

Se coloca gotas de solución de NaCl al 3% sobre una superficie de fierro, observándose los fenómenos que allí ocurren.

A la gota se le añadía Ferrocianuro y fenoltaleína, y al cabo de un tiempo se veían zonas en la gota de color azul y otras de color rosa, se supone que las zonas azul eran Fe^{++} , que se disolvía y reaccionaba con el ferricianuro y que las zonas

rosadas son zonas de reducción de oxígeno y producción de OH^- , que reaccionaba con la fenoltaleína. Explicando así la existencia de una zona anódica y una catódica. Al cabo de cierto tiempo, la distribución inicial pasaba a ser una distribución anular.

Esto se debe a que el oxígeno contenido en la gota se había consumido y desaparece la posibilidad de reacción catódica, pero puede llegar oxígeno del aire y entrar por la zona externa que será más oxigenada, actuando entonces esta zona como catódica.

En la parte central donde no llega el oxígeno tiene lugar el proceso anódico de disolución del hierro, verificándose en la zona intermedia, la reacción entre los iones Fe^{++} y los OH^- para precipitar el $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (orín). Esto nos indica que en los procesos de corrosión electroquímica, los productos de corrosión precipitan algo alejados de la zona anódica de disolución del metal y no impiden el desarrollo del proceso de disolución metálica.

Después de algunas horas, el oxígeno del aire llega a penetrar en el agua en la zona superior (superficie) la difusión de oxígeno a las zonas bajas es difícil y lenta.

En estas condiciones se forma una pila de aireación diferencial, donde la zona del metal más próxima a la superficie (zona oxigenada) hace de cátodo y la zona más

alejada de la superficie hace de ánodo y se corroe, localizándose los productos de corrosión en la zona intermedia.

2.3 METODO PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

La importancia de este método nos sirve para conocer la agresividad corrosiva del electrolito que rodea a la estructura metálica en estudio. Para el caso de suelos las mediciones de potencial estructura/electrolito, deben ser efectuadas varias mediciones, debido a que el suelo en estudio puede presentar homogeneidad en algunas casos, como diferencias en los estratos del suelo en otros casos. Esto último hace que las mediciones de potencial estructura/suelo se incrementen, y por lo tanto se deberá tomar un valor promedio de las resistividades obtenidas, el cual represente la resistividad del medio en estudio.

La intensidad de corriente de corrosión será mayor cuanto menor sea la resistencia total del sistema; lo cual es práctico desarrollar un perfil de resistividades en caso de tuberías y base del fondo de tanques enterrados, y hacer mediciones a la misma profundidad que serán enterrados los posibles ánodos de sacrificio ó corriente impresa respectivamente.

Para la medición de resistividad en campo, son de mayor uso los siguientes métodos que se muestran a continuación:

-Método de los dos electrodos. (Método Sheperd)

-Método de los cuatro electrodos. (Método Wenner)

-METODO DE LOS DOS ELECTRODOS. (METODO SHEPERD)

Este método consiste en dos electrodos metálicos de forma cónica, que son enterrados a una profundidad de 10 veces su diámetro, y a una distancia conocida. La resistividad se calcula simplemente midiendo la resistencia entre los dos electrodos.

Es importante mencionar, que dicho método es muy rápido en la lectura, dando resistividades del terreno existentes entre los dos pines, obteniéndose valores muy localizados y superficiales.

-METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS. (METODO WENNER)

Consiste en instalar cuatro electrodos metálicos alineados sobre la superficie y separados a una distancia "a".

Por los electrodos externos se hace circular una corriente proveniente de una fuente de corriente continua y se mide la diferencia de potencial en los dos electrodos internos, para lo cual se recomienda usar electrodos de referencia Cu-CuSO₄ ó

Ag-AgCl₂.; y generalmente se utiliza con mayor frecuencia el electrodo de referencia de Cu-CuSO₄.

La densidad de corriente de acuerdo al esquema (fig.2.3.1), el suelo adopta una simetría semiesférica, a una distancia "r" de C1 y C2, entonces tenemos:

$$dE/dr = (i/2 * 3.1416 * r^2) * p \dots \dots \dots ec.2.3.1$$

Donde:

i: La corriente del circuito (Amp.)

r: Radio de la semi-esfera (cm.)

p: Resistividad del medio. (ohm-cm)

Luego integrando la ec.2.3.1, tenemos:

$$E = (i * p / 2 * 3.1416 * r^2) * dr$$

$$E = -(i * p / 2 * 3.1416) * (1/r_2 - 1/r_1) \dots \dots \dots ec.2.3.2$$

Luego de la ec.2.3.2, se puede calcular la diferencia de potencial entre C1 y C2, debido a que la corriente que sale de C1, está dado por:

$$E_1 = (i * p / 2 * 3.1416) * (1/2 * a - 1/a) = (i * p / 4 * 3.1416 * a)$$

Y en forma similar se tiene que la diferencia de potencial entre los mismos puntos (P1 y P2), debido a la corriente que entra al electrodo C2 esta dado por:

$$E_2 = (i \cdot p / 2 \cdot 3.1416) \cdot (1/a - 1/2 \cdot a) = -(i \cdot p / 4 \cdot 3.1416 \cdot a)$$

Luego la diferencia entre E_1 y E_2 de los electrodos P1 y P2, tenemos lo siguiente:

$$E = (i \cdot p / 2 \cdot 3.1416 \cdot a)$$

Luego se despeja "p", y se pasa a calcular la resistividad del suelo, y se tiene lo siguiente:

$$p = 2 \cdot 3.1416 \cdot a \cdot E / i$$

Como: $E/i = R_x$

Entonces:

$$p = 2 \cdot 3.1416 \cdot a \cdot R_x \dots \text{ec. 2.3.3}$$

Donde:

p: Resistividad del medio. (ohm-cm)

a: Distancia entre pines (cm.)

R_x: La resistencia del medio (ohm.)

Cuando se tenga que el suelo es de 2 estratos (con diferentes resistividades), el método de los cuatro pines puede ayudarse

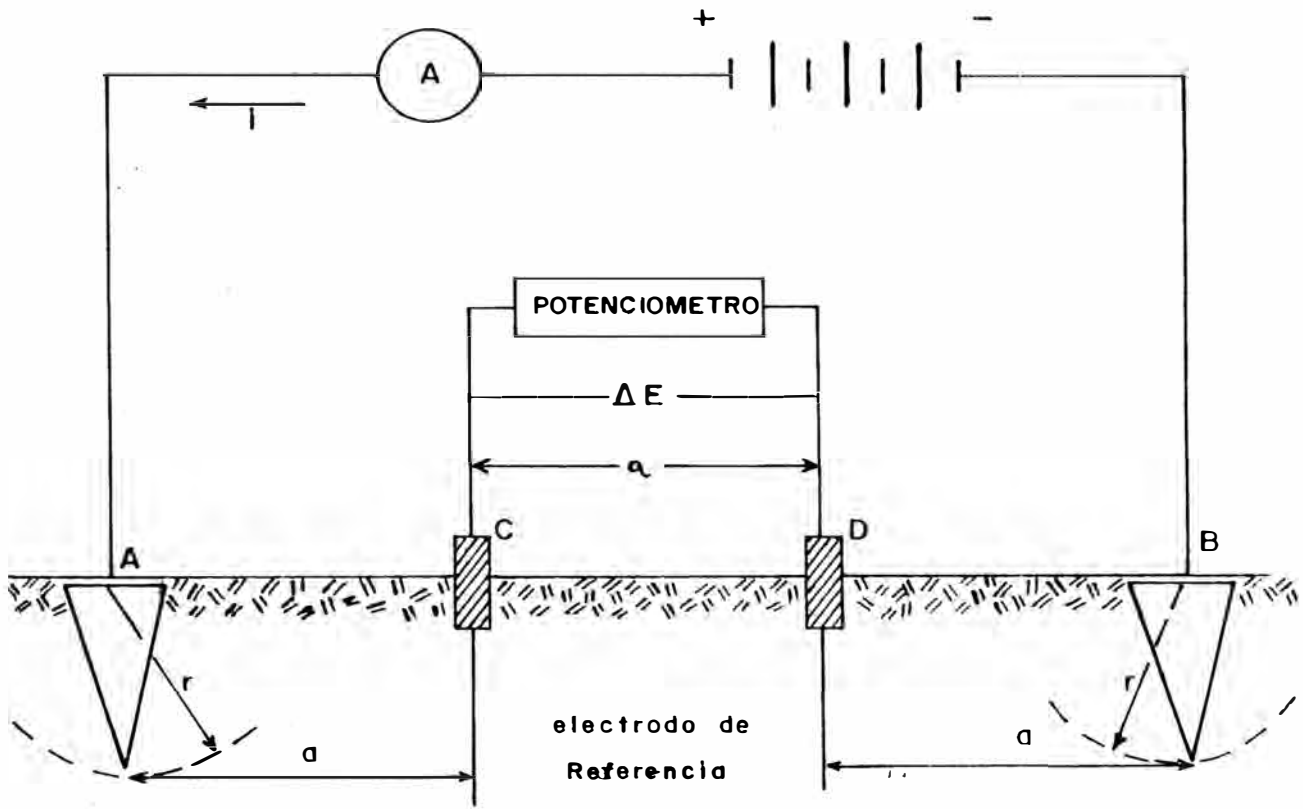


FIG. 2.3.1. MEDICION DE RESISTIVIDAD POR METODO DE WENNER

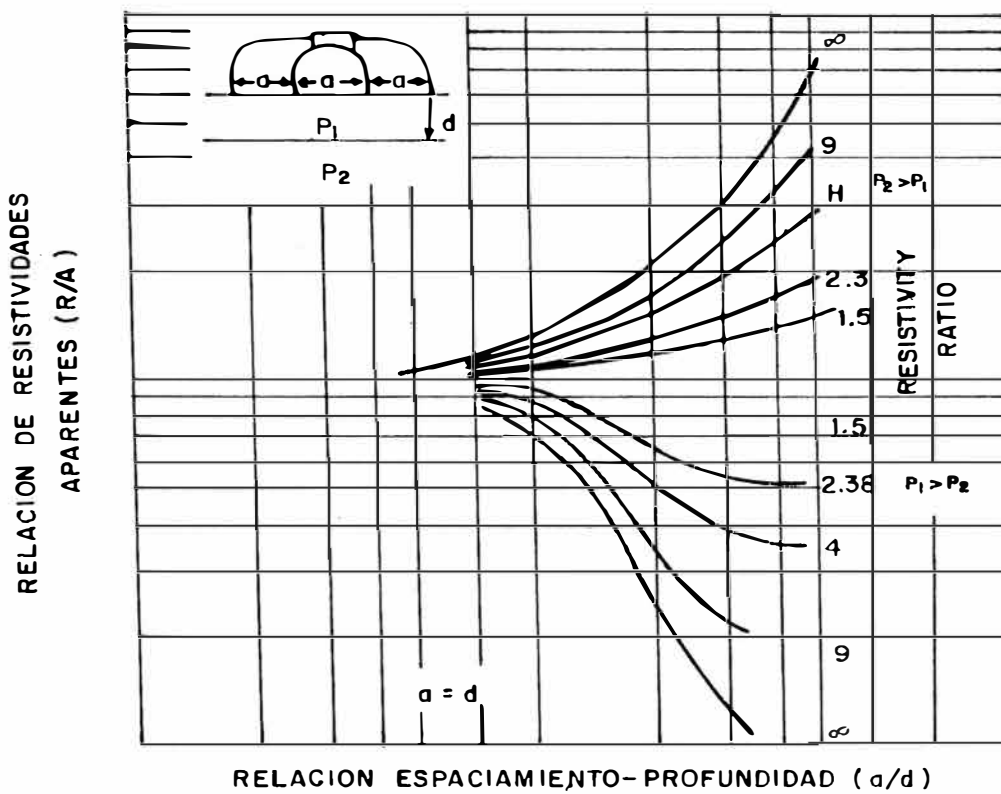


FIG. 2.3.2. DETERMINACION GRAFICA DE LOS PARAMETROS GEOELECTRICOS DEL SUELO.

usando la fig.2.3.2; los datos de entrada son p_1, a y d , y seguir paralelamente a la curva cercana para diferentes radios de resistividades.

2.4.CRITERIO PARA LA DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE.

la densidad de corriente necesaria para lograr la protección catódica de una estructura, es un dato de gran interés técnico como económico.

Hay muchos factores que afectan el flujo de corrosión y por lo tanto la corriente requerida para la protección catódica.

Los factores que afectan los requerimientos de corriente para lograr la protección catódica son:

- Area del metal.
- PH.
- Temperatura.
- Grado de aireación del medio ambiente.(oxígeno)
- Movimiento entre la estructura y electrolito.

Todos estos factores afectan el comportamiento de la polarización de la celda de corrosión y por tanto la corriente requerida para la protección catódica; las dos pendientes de polarización representa dos diferentes situaciones encontradas para la corriente requerida y lograr la completa protección.

FIG. 2.4.1. EFECTO DEL AREA SOBRE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION CATODICA.

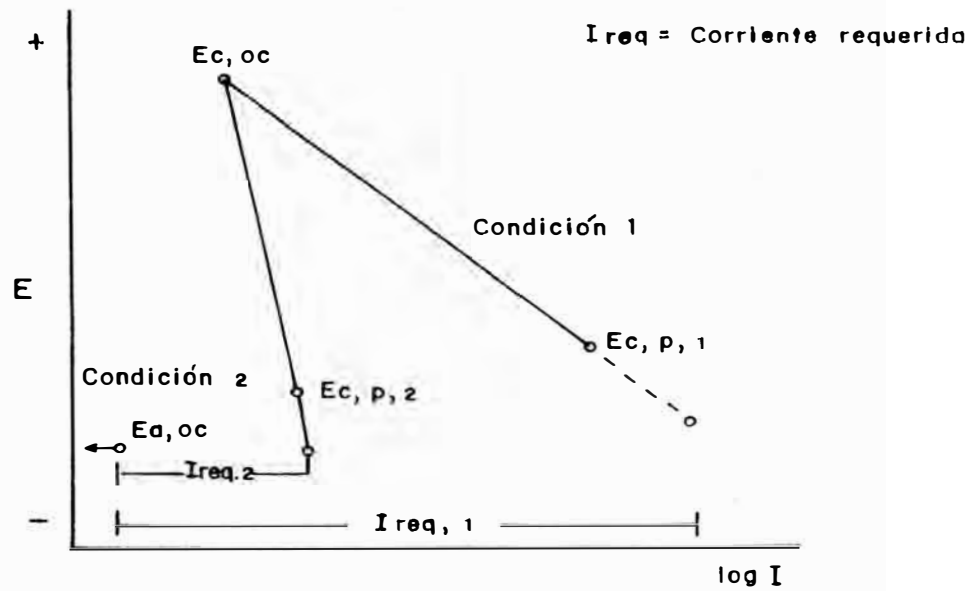
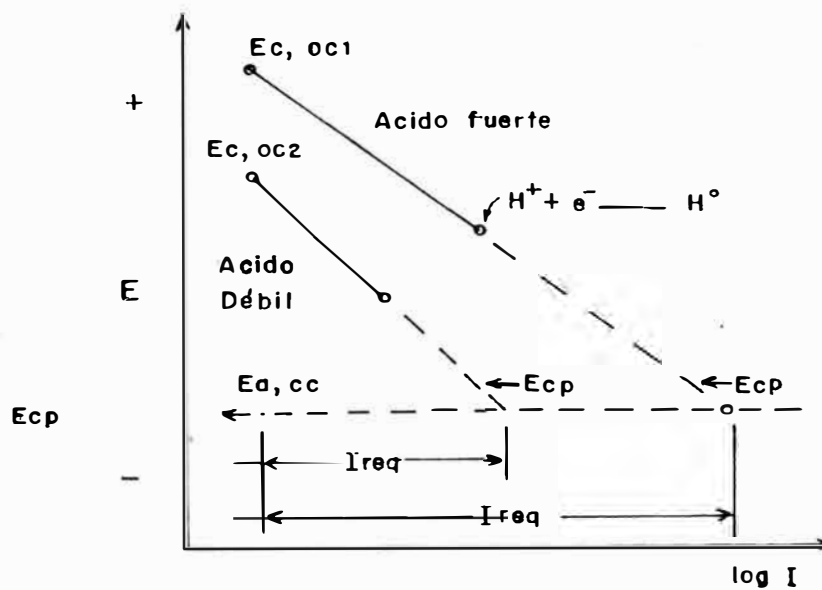


FIG. 2.4.2. EFECTO DEL PH SOBRE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION CATODICA.



Esto esta ilustrado en la fig.2.4.1, donde la condición 1, es mayor que la condición 2.

-Efecto Area sobre los requerimientos de corriente para la protección catódica.

La densidad de corriente requerida para la protección catódica es directamente proporcional con la superficie de la estructura a proteger. Por ejemplo, las tuberías cubiertas requieren menos corriente de protección catódica, que una tubería desnuda enterrada en condiciones similares.

El efecto neto del deterioro del recubrimiento se muestra con el decrecimiento de la pendiente de la curva de polarización catódica de la estructura que se está protegiendo. El efecto de de deterioro del recubrimiento está ilustrado por la condición 1, comparando con la condición 2, como se muestra en la fig.2.4.1.

-Efecto del PH sobre los requerimientos de corriente.

La corriente requerida para la protección catódica es generalmente grande en ambiente ácido, comparado con los básicos y neutros, ver fig.2.4.2. Los dos fenomenos que se tiene en cuenta para este incremento son:

-Un cambio en la estructura del circuito abierto del potencial catódico en la dirección positiva.

-Nivelando la curva de polarización catódica para la estructura.

La pendiente de polarización catódica de la estructura está igualado con el crecimiento ácido, debido al incremento de la concentración del ión hidrógeno reducible (H^+), de acuerdo a la siguiente reacción:



La relativa acidez del medio ambiente es generalmente discutido en terminos de PH, y se utiliza la siguiente formula para ver la acidez a partir del ión (H^+):

$$PH = -\text{Log} (C_{H^+})$$

Donde C_{H^+} , es la concentración de H^+ en (mol/lt.), y el medio ambiente esta relacionado con la dilución de ión hidrógeno.

El PH de un electrolito (suelo ó agua) es raramente neutro (PH=7), esto resulta debido a la presencia de varias especies iónicas en el electrolito, como resultado de hidrólisis de sales; dependiendo de la naturaleza de la sal, el PH puede ser cambiado de dirección, es decir tanto de ácido ó básico respectivamente..

FIG. 2.4.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION CATODICA.

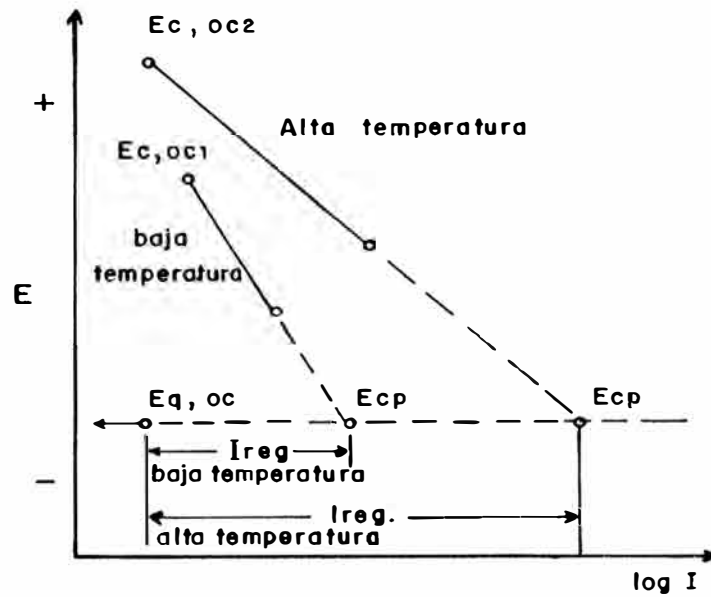


FIG. 2.4.4. EFECTO DEL OXIGENO SOBRE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION CATODICA.

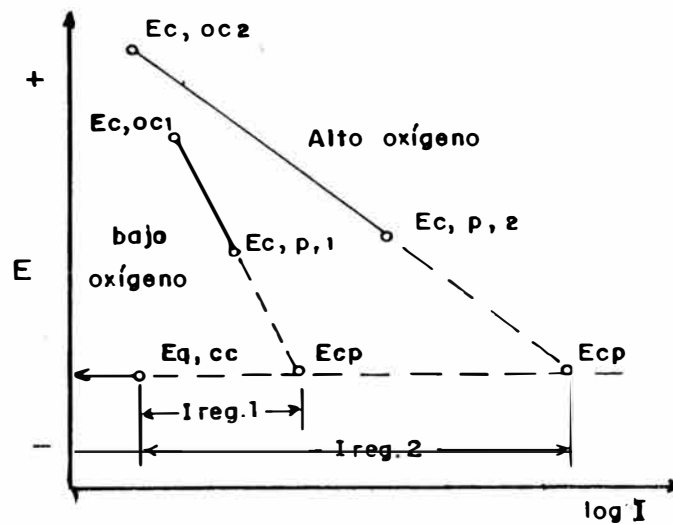
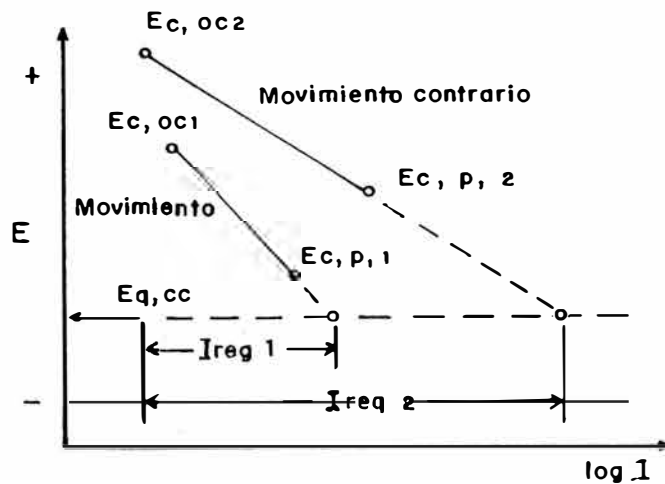


FIG. 2.4.5. EFECTO DEL MOVIMIENTO RELATIVO ESTRUCTURAL ELECTROLITO SOBRE LA CORRIENTE REQUERIDA PARA LA PROTECCION CATODICA.



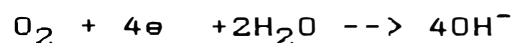
Por ejemplo el sulfato de amonio (sal ácida), puede ser usado como fertilizante, el cual llevaría a decrecer el PH del suelo.

-Efecto de la Temperatura sobre los requerimientos de corriente.

Cuando se aumenta la temperatura se tiene un efecto de despolarización debido a un aumento de la difusión de especies reducibles hacia las zonas catódicas; consecuentemente la velocidad de la reacción de reducción se incrementa decreciendo el nivel de polarización, como se ilustra en la fig.2.4.3.

-Efecto del oxígeno sobre los requerimientos de corriente.

El oxígeno aumenta los requerimientos de corriente de protección, dando como resultado el cambio de la pendiente de la curva catódica, como se observa en la fig.2.4.4. Por ejemplo el oxígeno participa en la siguiente reacción de reducción:



De acuerdo a la estructura que se encuentra en suelos bien aireados tales como arena y grava; requieren grandes corrientes de protección catódica en las estructuras cercanas relativamente a la desaireación de los suelos tales como los arcillosos.

-Efecto del Movimiento relativo entre la estructura y electrolito sobre los requerimientos de corriente.

Un incremento en el movimiento relativo entre la estructura y el electrolito resulta en un incremento de la corriente requerida debido, en principio, al incremento de la disponibilidad de las especies reducibles en la estructura, y dando así como resultado el incremento de la reacción de reducción. Este efecto se muestra de una manera detallada en la fig.2.4.5.

Los requerimientos de corriente están en relación directa con la velocidad de flujo del electrolito, siendo menor para el caso de flujo laminar y mayor para el flujo turbulento, como se muestra en la fig.2.4.6.

Existen métodos empíricos para determinar la corriente de protección requerida para los tanques. Entre ellos, los más importantes son:

- Polarización de la estructura a un valor Constante.
- Criterio del menor incremento de potencial (Método Analítico)
- Método $V(\text{voltios}) \quad \text{Log } I_r(\text{Amp.})$ (Método de curva corriente potencial)

Los resultados obtenidos con estos métodos dan valores de densidad de corriente que son cercanos a la práctica, como se muestra en la tabla 2.4.1.

-Polarización de la estructura a un valor constante.

Este método es muy usado en el diseño de sistemas de protección catódica; y consiste en polarizar la estructura metálica en la dirección anódica hasta un valor que pueda garantizar una protección segura, el mismo que depende del material como a continuación se indica:

| MATERIAL | POTENCIAL (V) |
|----------|----------------|
| Acero | -0.85 a -0.90 |
| Aluminio | -0.80 a -0.85 |
| Cobre | -0.10 a -0.25 |
| Plomo | -0.55 a -0.675 |

Este método está basado en los cálculos teóricos de potencial a partir de la ecuación de NERST; así por ejemplo para el caso del acero, en donde el producto final de corrosión es el $\text{Fe}(\text{OH})_2$, se obtiene el siguiente resultado:

$$E_{\text{Fe}} = 0.44 + (0.059/2) * \text{Log}(\text{Fe}^{2+}/1) \quad \text{ó}$$

$$E_{\text{Fe}} = 0.44 + (0.059/2) * \text{Log} (\text{Prod. solub. Fe}(\text{OH})_2 / (\text{OH}^-)^2)$$

Como la concentración de los iones (OH^-) es dos veces la concentración de Fe^{2+} , y producto de solubilidad es 1.8×10^{-15} , resulta:

$$E_{\text{Fe}} = 0.44 + (0.059/2) * \text{Log}(1.8 \times 10^{-15} / (2)^2)$$

$$E_{Fe} = 0.91 \text{ voltios.}$$

Algunos autores consideran que este método, es eficaz, pero es muy empírico, ya que sus valores de densidad de corriente con respecto a la práctica difieren con los que se muestra en la tabla 2.4.1.

-Criterio del menor incremento de potencial (Método Analítico)

Este método consiste en que la resistencia del circuito eléctrico se mantiene constante para un determinado punto del tanque, cuyas variaciones de potencial y corriente, estén referidos con respecto al potencial de protección mínima.

Para la aplicación de este método, escogemos aquel punto del tanque que tenga la menor variación de potencial con respecto a los demás puntos del tanque, para una determinada corriente.

Además para cada toma de potencial se calcula la resistencia del circuito para todos los puntos, y el cual teóricamente deben tener la misma resistencia.

luego:

$$D_{Vi} = V_{pc} - V_i$$

$$I_{pc} = I_i + D_{Vi}/R_c$$

Donde:

D_{Vi} Variación de potencial para cada toma de un determinado punto del tanque (V_i), con respecto al potencial de protección mínima ($V_{pc} = -0.850$ voltios).

I_i Es la corriente para cada toma de un determinado punto del tanque. (Amp.)

I_{pc} :Es la corriente mínima de protección que se requiere para cada tanque. (Amp.)

La aplicación de este método se muestra en el apendice 1, utilizando los datos obtenidos de las pruebas de campo para los tres tanques en estudio.

Este método nos indica de una manera práctica y segura que los valores obtenidos de densidad de corriente para una estructura metálica están de acuerdo a los valores obtenidos en la práctica.

-Método V(voltios) Log I_r (Amp.). (Método de curva corriente potencial)

Consiste esencialmente en aplicar incrementos de corriente de protección y medir el potencial de polarización, de la estructura que se encuentra en estudio.

El potencial medido respecto a una celda de referencia remota se plotea en función del logaritmo de la corriente total aplicada. Este método contempla graficar todos aquellos puntos que permitan apreciar una tendencia definida y donde la pendiente se hace constante.

La intersección entre la proyección de la región a pendiente constante y la tangente de la región a baja densidad de corriente, dicho punto nos indicará el valor de la corriente de protección.

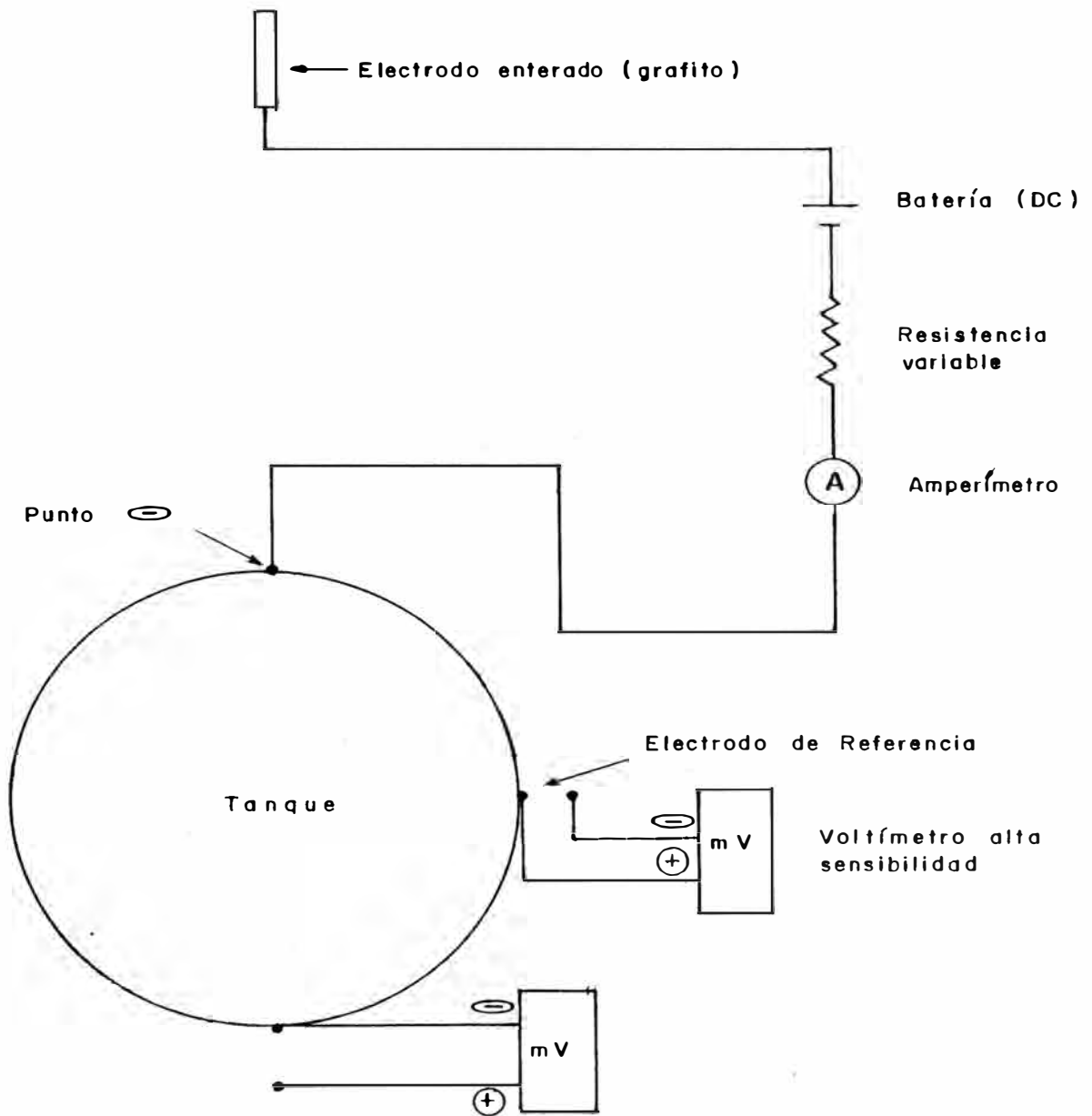
La forma de la curva es semejante para las estructuras de acero, dependiendo de los siguientes factores:

- Homogeneidad del medio.
- Tamaño de la estructura en estudio.
- El área anódica y catódica.
- Humedad y PH del medio.

Siendo este un método práctico para la obtención de la corriente de protección, esta curva varía, tal es así que muchos autores consideran un factor de seguridad sobre el valor obtenido por la intersección de las tendencias a alta y baja corriente.

Para aplicar este método se selecciona un tanque, cuya superficie expuesta al suelo se le aisló eléctricamente, del resto de las instalaciones metálicas que se encuentre a los

FIG. 2.4.7 MEDICION DE LA CORRIENTE DE PROTECCION



alrededores del tanque; con la finalidad de tener buenas mediciones de corriente, y así evitar la interferencia en la corriente que se está aplicando a dicha estructura.

Para efectuar la polarización catódica gradual y obtener datos para la extrapolación $V-\log I_r$; se instaló un fuente de corriente continua. En nuestro caso se utilizó una máquina de soldar (50V. y 100 Amp.), cuyo terminal negativo se conectó a un reostato variable (resistencia variable), con el objeto de regular la corriente entregada, la misma que se mide con el amperímetro(A) conectado en la misma red. Como ánodo auxiliar se utilizó ánodos de grafito con backfill, enterrado a 7 m. del borde del tanque y a una profundidad de 1.2 m.

Las mediciones de potencial se realizan en tres puntos alrededor del tanque, como se muestra en la fig.2.4.7, mediante celdas de referencia, $Cu-CuSO_4(\text{sat.})$, y a una distancia variable entre 0.2 a 0.7 m.

2.5.CORRIENTES ERRATICAS.

Las corrientes erráticas fluyen a través del medio en el cual se realiza las mediciones de potencial, formando de esta manera zonas anódicas y donde entran zonas catódicas.

Los tipos más comunes de interferencia de corriente se muestra a continuación:

1. Interferencia Anódica: Cuando el ánodo produce la corriente errática. Por ejemplo, en un lecho de ánodos que protege una tubería induce corriente a otra tubería cercana a ella, ocasionando de esta manera que el potencial del ánodo sea mayor que el del cátodo, produciéndose la corrosión de dicha tubería debido a la corriente errática inducida.

2. Interferencia Catódica: cuando el cátodo produce la corriente errática. Por ejemplo, en un tanque que se encuentra protegido catódicamente, cercano a él se encuentra una tubería sin protección, originando de esta forma que el potencial del tanque sea mayor que el de la tubería, y en consecuencia la corrosión de la misma, debido a la corriente errática inducida por el tanque.

Otras formas de bajar el efecto de corrientes erráticas es mediante pinturas ó con recubrimientos en la interfase estructura/electrolito 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.

A continuación hay dos métodos más comunes que se utiliza para la detección de las corrientes erráticas, y son:

-Un método consiste en medir los potenciales estructura/suelo, por periodos, si los valores registrados varían de una medición a otra, entonces existen corrientes erráticas.

-Otro método para detectar dicha corriente, 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; caso contrario existiría dicha corriente.

TABLA 2.4.1

| ESTADO SUPERFICIAL | MEDIO AGRESIVO | DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/m ²) |
|---------------------------------------|------------------------------|---|
| Acero desnudo | Agua de Mar (V=0.5 m/seg) | 86-130 |
| Acero desnudo | Agua de Mar (V=1-15m/seg) | 150-600 |
| Acero pintado (epoxy,vinilico) | Agua de Mar | 25-35 |
| Acero pintado (alumino-bituminoso) | Agua de Mar | 35-50 |
| Tanques carga lastre petroleo | Agua de Mar | 100 |
| Tanques carga lastre ligero | Agua de Mar | 170 |
| Tanques lastre limpio. | Agua de Mar | 190 |
| Acero desnudo | Agua dulce Estancada | 56 |
| Acero desnudo | Agua dulce turbulenta | 56-170 |
| Acero desnudo | Suelo Neutro | 5-17 |
| Acero desnudo | Suelo aireado y Seco | 5-17 |
| Acero desnudo | Suelo Humedo | 28-66 |
| Acero desnudo | Suelos muy Acidos | 56-170 |
| Acero bién revestido. | Suelo Normal | 0.1-0.2 |
| Acero muy bién revestido | Suelo Normal | 0.01 |

C A P I T U L O I I I

D E S C R I P C I O N D E L E S T A D O A C T U A L D E
L A E S T A C I O N D E T A N Q U E S

3.1. DESCRIPCION GENERAL.

la estación de tanques en estudio, esta ubicado a 200 m. de Bateria 1-Area Corrientes, Operaciones Selva; dicha estación es propiedad de PETROPERU S.A, conformando una área total (considerando solo el patio de tanques), de 2500 m².

En este patio se almacena el crudo procedente de los pozos de Bateria N°1, cuya producción es de 25000 BPD, que luego se bombea a la estación Saramuro del oleoducto Nor-Peruano.

La capacidad de almacenamiento de los tanques se presenta a continuación:

1. Un tanque de 30000 Barriles. (TK30M9S)
2. Un tanque de 50000 Barriles. (TK50M12S)
3. Un tanque de 125000 Barriles. (TK125M17S)

La distribución de los tanques se observa en el plano que se adjunta en el apendice 3.

La importancia de este patio de tanques, reside en que es uno de los principales terminales de almacenamiento de crudo, que se cuenta en Operaciones-Selva, ubicada en el Area-Corrientes-Trompeteros.

3.2 INSTALACIONES ELECTROMECHANICAS.

3.2.1. SISTEMA DE ALMACENAJE Y BOMBEO DEL CRUDO.

En el Area Corrientes-Trompeteros; el crudo proveniente de los pozos pasa por un sistema de tratamiento químico, que consiste en la adición de un Desemulsificante (rompedor de emulsión agua-petroleo), obteniéndose crudo desalado que contiene entre 0.2-0.3 BSW (Botton Sediment and Water).

Los tanques en estudio son de techo fijo, y sus dimensiones se muestran en el siguiente cuadro:

| | Capacidad (MB) | Diámetro(m.) | ALTURA (m.) |
|-----------|----------------|--------------|-------------|
| TK30M9S | 30000 | 24.4 | 10.1 |
| TK50M12S | 50000 | 30.6 | 10.8 |
| TK125M17S | 125000 | 45.6 | 12.1 |

El crudo de Corrientes, se bombea a la Estación N°1-Saramuro del Oleoducto Nor-Peruano, y a través de éste Oleoducto llega a Bayovar-Piura. de donde se transporta a la Refineria la Pampilla.

Es importante mencionar que los tres tanques se encuentran interconectados con tuberías enterradas (entrada), y tuberías aéreas y superficiales (salida), las cuales se muestran a continuación en el siguiente cuadro:

| | Tubería Entrada | Tubería salida |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| TK30M9S | 24" | 10" |
| TK50M12S | 16" | 10" |
| TK125M17S | 24" | 10" |

3.2.2. SISTEMAS DE BOMBAS CONTRA-INCENDIO.

El patio de tanques del Area-Corrientes, cuenta con un adecuado sistema de bombas contra-incendio, que se conecta a los tanques a través de un sistema de tuberías enterradas y aéreas de 8", de diámetro, con dos ramales para cada tanque

-Una tubería de drenaje de agua la que está enterrada y conectada en la parte inferior del tanque

-Una tubería aérea que se conecta en la parte superior y se transporta la espuma.

Es importante señalar que también se cuenta con un adecuado sistema contra-incendio para la parte exterior del tanque y para las demás estructuras metálicas se encuentren alrededor de los tanques; como se muestra en el plano que se adjunta en el presente proyecto.

3.3. SECTORES DE INCIDENCIA DE LA CORROSION.

Por la ubicación geográfica del Area Corrientes, en general se tiene un ambiente moderadamente corrosivo, tanto atmosferico, como por suelo que es húmedo, (típico de zona selvática).

En cuanto a las estructuras aéreas, como son las tuberías conectadas al techo y casco de los tanques, y las estructuras superficiales como son las válvulas, bridas y accesorios, ambos están expuestas a la corrosión debido a la atmósfera, por lo que se encuentran protegidas con pintura anticorrosiva.

Sin embargo, las estructuras metálicas enterradas (fondo externo de tanque y tramos de tuberías), están expuestos al ataque corrosivo del suelo.

Según lo mencionado anteriormente, con la finalidad de obtener la información sobre las condiciones de la estructura metálica en estudio y del medio corrosivo, es necesario realizar las mediciones de campo; y así poder seleccionar un adecuado sistema de protección contra la corrosión..

3.4. MATERIALES DE FABRICACION.

Las principales estructuras sobre las que se trata de aplicar protección catódica (tanques, tuberías y accesorios), son de

acero al carbono del tipo estructural (de bajo carbono), fabricado mediante laminado en caliente.

Las características técnicas del material de los tanques se detalla en la siguiente tabla:

TABLA 3.4.1.

| DESCRIPCION | PROPIEDADES |
|----------------------------|--|
| 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 | 55000 psi |
| Punto de fluencia superior | 20000 psi |
| Modulo de Young | 20×10^6 |
| Dureza promedio | 160 HB |
| Microestructura | Ferrita + Perlita. |

En general, todos los tanques construidos por PETROPERU S.A., se fabrican de acuerdo con los requerimientos del "API Specification for Welded Oil Storage Tanks", API Std.650.

El espesor de las planchas de fondo para las capacidades de almacenamiento que se manejan en el Area-Corrientes, es de 1/4 pulg., mientras para el casco el espesor es variable. Los anillos inferiores son de mayor espesor y los superiores van decreciendo

En el Area-Corrientes, los tanques de 30 y 125 mil barriles fueron instalados directamente sobre el terreno; posteriormente se instaló un tanque de 50 mil barrile sobre una base de Sand-Oil; con la finalidad de mejorar en parte las deficiencias que presentaban en los fondos externos de los dos primeros tanques.

Los partes estructurales de estos tanques cumplen con las especificaciones de la ASTM A36, para aceros fabricados solamente por proceso de horno abierto ú horno eléctrico.

Las tuberías y uniones cumplen con la especificaion API Std.5L, y las bridas de acero, del tipo de cuello y soldables, cumplen con la especificación de la ANSI B 16.5, que es para bridas de acero al carbón forjado.

C A P I T U L O I V

S I S T E M A S D E P R O T E C C I O N C A T O D I C A Y
P R U E B A S D E C A M P O N E C E S A R I O S P A R A
E L D I S E Ñ O .

4.1 SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA

4.1.1 PROTECCION CATODICA POR ANODO DE SACRIFICIO.

La protección catódica con ánodos de sacrificio se lleva a efecto normalmente con tres metales característicos, que son: el cinc, Magnesio y el Aluminio.

El cinc ha sido siempre el material anódico clásico y su uso se ha incrementado a causa de un mejor conocimiento y control de los factores que pueden ser el origen de su pasivación.

El magnesio es más utilizado en instalaciones donde se requieren un potencial elevado, para conseguir una polarización rápida de estructuras enterradas ó en presencia de electrolitos de resistividad elevada.

El aluminio por sus características electroquímicas es también un material anódico de gran interés. Sin embargo el desarrollo de aleaciones de aluminio adecuadas para ánodos de sacrificio ha sido más lento que para los otros dos metales mencionados anteriormente

Propiedades que debe reunir un material anódico.

Si tenemos en cuenta la serie electroquímica de los metales (tabla 2.1.1), un metal tendrá carácter anódico con relación a otro, si se encuentra por encima de él en esta serie. Así por

ejemplo, el fierro será anódico con relación al cobre y catódico con relación al cinc. El metal que actúa de ánodo se sacrifica a favor del que actúa de cátodo, por eso este sistema se le conoce como protección catódica por ánodos de sacrificio.

Según lo expuesto, el fierro podría en principio protegerse con cualquiera de los metales que tiene por encima en la serie electroquímica (tabla 2.1.1), sin embargo en la práctica no es así ya que un metal para que pueda utilizarse como ánodo de sacrificio, tanto que desde un punto de vista técnico, como económico, tiene que reunir una serie de propiedades esenciales que son las siguientes:

1. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo para polarizar la estructura de acero a -0.85 voltios;

Sin embargo el potencial no debe de ser excesivamente negativo ya que motivaría un gasto superfluo con un innecesario paso de corriente. La variación práctica de potenciales debe de estar comprendida entre -0.95 a -1.6 voltios.

2. El ánodo debe presentar una tendencia pequeña a la polarización, es decir, no debe desarrollar películas pasivantes u obstructoras con los productos de la corrosión, y tener una fuerte sobretensión de hidrógeno.

3. El material debe de tener un elevado rendimiento eléctrico en Amperios-Hora/Kg.

4. El ánodo debe corroerse uniformemente.

5. El metal será fácil adquisición y deberá poder fundirse en diferentes formas y tamaños.

6. El metal deberá tener un costo razonable de modo que en conjunción con unas correctas características electroquímicas pueda conseguirse la protección a un costo bajo por Amp./año.

Si se tiene en cuenta la serie electroquímica de los metales representada en la tabla 2.1.1, del capítulo II; podrán proteger el fierro todos los metales que estén situados en esta serie, por encima de él, ahora bien, habrá que elegir aquellos que tengan una fuerte sobretensión de hidrógeno y tendencia muy débil a la pasividad.

Características electroquímicas del cinc, magnesio y aluminio.

Teniendo en cuenta que los materiales seleccionados son el cinc, magnesio y aluminio; y quedando eliminados los restantes o por demasiados activos (sobretensión de hidrógeno muy pequeña y muy elevado potencial de disolución), como es el caso de los metales alcalinos ó alcalinos térreos, ó por fácilmente pasivables como, por ejemplo, el cromo: es pues de gran interés comparar las constantes electroquímicas de estos tres metales, que han de orientarnos sobre sus posibilidades de utilización.

En una reacción electroquímica un metal se disuelve de acuerdo con la ley de Faraday, que nos dice que el peso de: 96500 Co. (Número de Faraday) descarga un equivalente /gramo de un

elemento, por tanto si pasa una cantidad de electricidad "Q" el peso del elemento liberado será "P", así, pues tendremos que:

$$P = (Q / 96500) * (P_{atm.} / n)$$

Pero: $Q = I * t$

Por lo tanto:

$$P = I * t * (P_{atm} / n * 96500)$$

Donde:

P= Pérdida ó ganancia de peso en gramos

I= Intensidad de corriente en Amperios.

t= Tiempo en segundos

P atm= Peso atómico en elementos expresados en gramos.

n= Valencia del elemento

El cociente:

$$(P_{atm} / n * 96500) = e$$

Donde:

e = Equivalente electroquímico

A partir de esta ley se puede calcular la cantidad de metal consumido para suministrar una cantidad de terminada de corriente, datos que facilitan en la tabla 4.1.1, expresados de tres formas diferentes pero equivalentes.

Estos Valores consideran que el metal no sufre autocorrosión, es decir, que se utiliza íntegramente en producción de corriente. Para un rendimiento en corriente del 100%, es el aluminio el que tendría la pérdida de peso más pequeña, al suministrar una misma intensidad de corriente; esta pérdida sería un 27.5% de la del cinc y un 73.8% de la del magnesio.

TABLA 4.1.1
EQUIVALENTES ELECTROQUÍMICOS DEL CINCO, MAGNESIO Y
ALUMINIO

| Metales | gr/Amp-Hr. | Kg/Amp-año | Amp-Hr/Kg. |
|----------|------------|------------|------------|
| Cinc | 1.200 | 10.70 | 820 |
| Magnesio | 0.454 | 3.980 | 2204 |
| Aluminio | 0.335 | 2.940 | 2981 |

Ahora bien, los rendimientos no alcanzan prácticamente nunca el 100%. En la tabla 4.1.2, se dan los valores de rendimientos de corriente más normales que pueden obtenerse con ánodos de sacrificio de cinc, magnesio y aluminio.

Estos bajos rendimientos obtenidos con el aluminio, se han modificado, como se verá más adelante con el desarrollo de nuevas aleaciones, llegándose a porcentajes del 96%, igualmente se han mejorado los rendimientos del cinc, pero no ha sido así con el magnesio que sigue todavía en valores bajos.

TABLA 4.1.2

RENDIMIENTOS DE CORRIENTE TEORICOS Y PRACTICOS DE ANODOS DE SACRIFICIO DE CINCO, MAGNESIO Y ALUMINIO.

| Descripción | Cinc | Magnesio | Aluminio |
|--------------------------|-------|----------|----------|
| Peso Atómico | 65.38 | 24.32 | 27.00 |
| Equivalente gramo | 32.69 | 12.16 | 9.0 |
| Amp.*Hr./Kg (teórico) | 820 | 2210 | 2980 |
| Amp.*Hr./Kg (práctico) | 740 | 1330 | 1490 |
| Rendimiento Corriente(%) | 90 | 60 | 50 |

Intensidad de corriente anódica.

Con la ayuda de la ley de Faraday, se puede fácilmente calcular la intensidad de corriente que es capaz de suministrar 1 Kg. de metal en su actuación anódica. Ahora bien, este valor está muy lejos de ser significativo ya que esta fórmula no tiene en cuenta que:

La intensidad que es capaz de dar un metal en su actuación anódica es función de su forma geométrica, es decir, 1 Kg. de metal en forma cilíndrica suministrará una intensidad de corriente menor que si tiene forma de estrella

Por otro lado, hay que tener en cuenta, que cualquiera que sea su superficie, a medida que el ánodo se desgasta la intensidad disminuye, factor que habrá que tener en cuenta en el cálculo real de la misma.

.

El valor obtenido con la ley de Faraday, equivaldría a un rendimiento electroquímico del 100%, que como ya se ha indicado nunca se puede alcanzar. La pila formada, dará un valor máximo de corriente en el instante de iniciar su funcionamiento, decreciendo después por los procesos de polarización que tienen lugar en los electrodos.

Por otra parte, la autocorrosión que en mayor ó menor grado, presentan los tres metales, hará siempre que el rendimiento sea inferior al 100%

Cada tipo de ánodo, bien sumergido ó enterrado, tendrá una resistencia determinada, que dependerá de la resistividad del medio, longitud y de su radio equivalente, y que viene dado por la fórmula:

$$R_{a/b} = (0.00521 * p / L) * (2.3 \log(4 * L / r) - 1)$$

Donde:

R a/b : Resistencia del ánodo en ohm.

p : Resistividad del medio en ohm-cm.

L : longitud del ánodo en pies

r : Radio equivalente en pies

El radio equivalente, es el radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo, cuando éste se haya consumido un 40%; por consiguiente queda:

Sección del ánodo: $ST = 3.1416 * r^2$

$$r = (ST(\text{pies}^2) / 3.1416)^{0.5} * 0.6$$

Cada ánodo podrá suministrar una intensidad de corriente que nos vendrá dada por la ley de ohm.

$$i = V / R$$

Donde:

V: Diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección (-0.80 V. -0.85 V. con respecto al electrodo de referencia de Ag/AgCl ó Cu/CuSO₄).

R: Resistencia del ánodo calculado según fórmula anterior.

En la tabla 4.1.3, agrupa algunas características electroquímicas de aleaciones de cinc, aluminio y magnesio, utilizados en la actualidad para la realización de la protección catódica.

TABLA 4.1.3

CARACTERÍSTICAS ELECTROQUÍMICAS DE ALGUNAS ALEACIONES DE CINCO, ALUMINIO Y MAGNESIO UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD

| Aleación | Potencial (Ag/AgCl) (Voltios) | Potencial respecto al acero protegido (-0.80 Volt.) | Amp. *Hr./Kg |
|------------|-------------------------------|---|--------------|
| Zn U.S.Mil | - 1.05 | - 0.250 | 780 |
| Al-Zn-Sn | - 1.07 | - 0.270 | 2420 |
| Al-In | - 1.15 | - 0.350 | 2740 |
| Al-Hg | - 1.05 | - 0.250 | 2830 |
| Mg | -1.5 a -1.7 | - 0.7 a - 0.9 | 1050 a 1830 |

Comparando las tablas 4.1.2 y 4.1.3, se puede apreciar la mejora en el desarrollo experimentado por las aleaciones de aluminio para su utilización como ánodos de sacrificio.

Con las fórmulas anteriores y los datos facilitados en esta tabla 4.1.3, fácilmente se podrá calcular la intensidad de corriente que es capaz de dar un ánodo de sacrificio.

Vida de los ánodos.

Un factor importante a tener en cuenta es la duración o vida de los ánodos. La vida para cada valor de "i" será función del peso del ánodo y no del número que pudieran colocarse. Si conocemos la intensidad que es capaz de suministrar un ánodo (i) y su peso (Kg.) y tenemos en cuenta su capacidad de corriente calculada teóricamente (tabla 4.1.2).

Así como su rendimiento y su factor de utilización puede ser de 85% ya que cuando un ánodo se ha consumido es ese porcentaje que debe sustituirse, pues el material que queda es insuficiente para mantener un porcentaje razonable de la intensidad de corriente que inicialmente era capaz de suministrar.

La vida puede calcularse así:

$$VIDA = (Cc(\text{Amp-año/Kg.}) * Wa(\text{kg}) * Rd * FT) / i(\text{Amp.})$$

Donde:

Cc: capacidad de corriente.

Wa: Peso del ánodo

Rd: Rendimiento (%)

FT: Factor de utilización

i: Corriente del ánodo

TABLA 4.1.4
VALORES ELECTROQUIMICOS PARA EL CALCULO DE
LA VIDA DE LOS ANODOS.

| Descripción | Cinc | Magnesio | Aluminio |
|------------------------------------|-------|----------|----------|
| Capacidad de Corriente Amp.*año | 0.093 | 0.251 | 0.340 |
| Rendimiento (%) | 90 | 50 | 90 |
| Factor Utilización | 85 | 85 | 85 |

A continuación en las siguientes tablas, se muestra los datos aproximados de los ánodos de cinc y magnesio en tierra y sus tamaños típicos que se consiguen en el comercio.

TABLA 4.1.5
DATOS APROXIMADOS DE LOS ANODOS DE ZINC EN TIERRA (1)

| | |
|--|--------|
| Gravedad específica | 7 |
| Libras-pies cúbico | 440 |
| Amp.-hora/ lb.-Teórico | 372(2) |
| lb/ Amp.-año - Teórico | 23.5 |
| Eficiencia-corriente | 90 (3) |
| Amp.-Hora/lb. - Real | 335 |
| lb/ Amp.-año - real | 26 |
| Potencial de solución-volt. a CuSO_4 | -1.1 |
| Potencial impulsor a la tubería polarizado a -0.90 volt. a CuSO_4 | 0.2(4) |

(1) Anodos instalados en relleno químico conveniente.

- (2) Variedad de eficiencia de corriente con densidad de corriente: la eficiencia dada es aprox. 30 mAmp/pie² de la superficie del ánodo. Eficiencia alta para altas densidades de corriente y baja para bajas densidades de corriente.
- (3) Una aleación con composición nominal de 6% Al, 3% Zn, 0.2%Mn y el resto magnesio.
- (4) Propiedades de la aleación Manganese, principal elemento de la aleación.
- (5) El potencial impulsor de la aleación para la polarización del ánodo en servicio es de aprox. 0.10 volt.: el cual reduce el potencial de solución para esta cantidad.

TABLA 4.1.7

TAMANOS DE LOS ANODOS DE CINC QUE SE CONSIGUEN EN EL COMERCIO

| TAMANO NOMINAL (pulg) | PESO NOMINAL (pulg) | DESIGNACION AZI |
|-----------------------|---------------------|-----------------|
| 1.4*1.4*9 | 5 | 2-5 |
| 1.4*1.4*60 | 30 | 2-30 |
| 2*2*45 | 50 | 4-50 |
| 2*2*60 | 60 | 4-60 |
| 4*4*36 | 150 | 16-150 |

TABLA 4.1.8

**TAMANOS DE LOS ANODOS DE MAGNESIO QUE SE CONSIGUEN
EN EL COMERCIO**

| ANODO DESNUDO (pulg) | ANODO DESNUDO (lbs) | ANODO EMPAQUETADO (lbs) | DIMENSIONES ANODOS EMPAQUETADOS | |
|----------------------------|---------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------|
| | | | DIAM (pulg) | LONG (pulg) |
| 3*3*8 | 5 | 13 | 5 1/4 | 11 1/4 |
| 3*3*14 | 9 | 27 | 5 1/4 | 20 |
| 4*4*12 | 12 | 32 | 7 1/2 | 18 |
| 4*4*17 | 17 | 45 | 7 1/2 | 24 |
| 5*5*21 | 32 | 68 | 8 1/2 | 28 |
| 7*7*16 | 50 | 100 | 10 | 24 |
| 5*5*31 | 100 | 180 | 12 | 34 |
| 2*2*60 | 65 | 120 | 12 | 42 |

Relleno de ánodos.

Para una operación confiable en las instalaciones terrestres, se utilizan ánodos tanto de zinc como de magnesio, con un relleno químico que rodea el ánodo completamente. Existen varias razones para utilizar relleno químico.

Con el ánodo rodeado de un material uniforme de composición conocida, se mejora la eficiencia de la corriente del ánodo. Si el suelo nativo contacta directamente el ánodo, las variaciones en la composición del suelo pueden causar la corrosión local.

Aislando el material del ánodo del suelo nativo, el material de relleno reduce la posibilidad de efectos adversos en el

comportamiento del ánodo. Los fosfatos, carbonatos y bicarbonatos, por ejemplo pueden tener el efecto de formar películas de elevada resistencia en el Cinc que tiende a hacerlos "pasivos"; dejar de producir cantidades útiles de corriente. Los carbonatos y bicarbonatos harán lo mismo con el magnesio. Los cloruros tienden a aumentar la auto-corrosión del magnesio y a reducir su eficiencia corriente.

Los rellenos químicos pueden ser útiles en absorber la humedad del suelo para conservar el medio ambiente inmediato al ánodo continuamente húmedo.

Finalmente, los rellenos del ánodo en uso corriente son de baja resistividad; cuando se instalan ánodos cuya resistividad es más elevada que el relleno, la columna tiene el efecto de aumentar el tamaño del ánodo. Esto causa una menor resistencia a la tierra remota de la que causaría si se enterrara el ánodo desnudo en el suelo directamente.

TABLA 4.1.9

RELLENO QUIMICO PARA LOS ANODOS DE SACRIFICIO

| YESO (CaSO ₄) % | | Bentonita % Arcilla | % Sulfato de Sodio | Resistividad en ohm-cm. | |
|-----------------------------|------|------------------------|-----------------------|----------------------------|-----|
| Hidratado | Yeso | | | | |
| (A) | 25 | - | 75 | - | 250 |
| (B) | 50 | - | 50 | - | 250 |
| (C) | - | 50 | 50 | - | 250 |
| (D) | 75 | - | 20 | 5 | 50 |

1. La mezcla de relleno (A), es útil en áreas de suelo de poca humedad y utiliza las características de mantenimiento de la humedad de la arcilla de bentonita.
2. La mezcla de relleno (B), se usa generalmente con ánodos de cinc.
3. La mezcla de relleno (C), se utiliza con cinc o magnesio en suelos pantanosos ó muy húmedos para evitar la rápida migración del relleno a la superficie del ánodo.
4. La mezcla de relleno (D), con baja resistividad, es útil en áreas de suelo de alta resistividad para reducir la resistencia del ánodo a tierra.

Detalles de instalación de los ánodos de sacrificio.

Las instalaciones de los ánodos de sacrificio son bastante simples, si se comparan con la instalación de corriente impresa.

La instalación más simple es la que implica enterrar un sólo ánodo empacado en el lugar de una reparación de escape o las instalaciones de ánodos distribuídos a lo largo de la tubería, como se muestra en la fig. 4.1.1

Los ánodos empacados de 17 lbs. son los de uso más común para este tipo de aplicación, aunque se pueden usar ánodos de cinc

FIG. 4.1.1 DETALLE DE INSTALACION DE UN ANODO DE SACRIFICIO

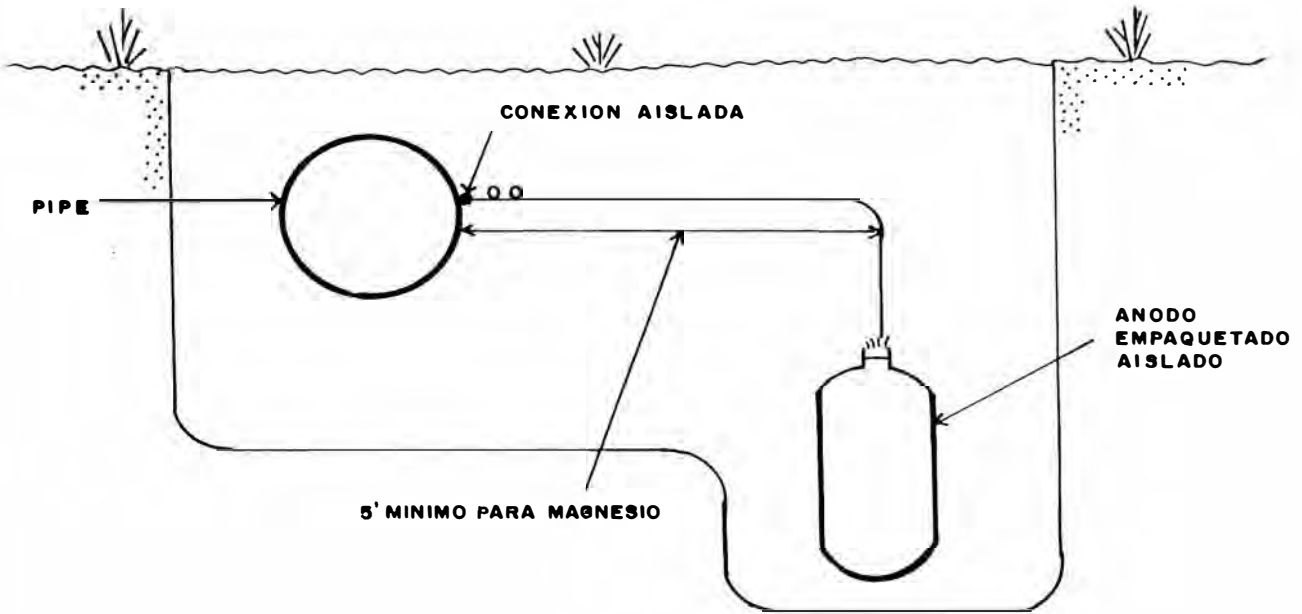
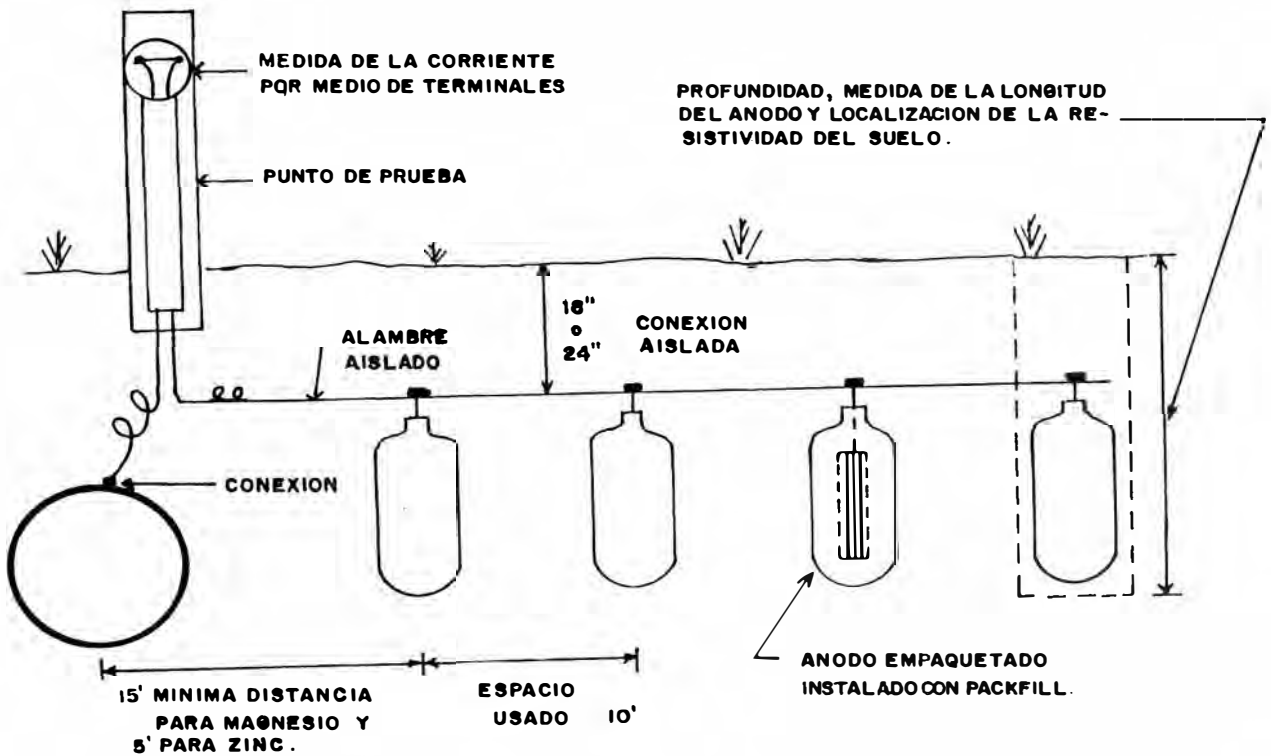


FIG. 4.1.2 DETALLE DE INSTALACION MULTIPLE PARA ANODOS DE SACRIFICICIO .



empacados en suelos de baja resistividad y ánodos de magnesio más pesados, donde las condiciones lo requieran, para mayor duración.

Donde se hayan de instalar varios ánodos de magnesio ó de cinc en un sólo punto, generalmente en tuberías revestidas, se pueden conectar los ánodos con un cable cabecero. El cable cabecero se puede conectar directamente a la tubería o de preferencia, se pasa a través de un punto de prueba que permita la medición periódica de la corriente de salida y el cálculo de vida probable; como se ilustra en la fig. 4.1.2

Aleaciones de ánodos

La composición de los ánodos tiene una gran importancia en el comportamiento general. En particular actúa de forma muy directa sobre las cuatro propiedades que de una forma especial permiten apreciar el valor de un metal ó aleación para poder ser utilizado como ánodo de sacrificio: el potencial de disolución, el rendimiento de corriente, la polaridad y la homogeneidad de la corrosión anódica.

A continuación se muestra en las siguientes tablas, las aleaciones más utilizadas en la actualidad, para efecto de mejorar el comportamiento general de los ánodos de sacrificio tanto para el cinc, magnesio y Aluminio respectivamente.

TABLA 4.1.10

COMPOSICION QUIMICA DE LAS ALEACIONES DE CINC UTILIZADOS COMO ANODOS DE SACRIFICIO

| Denominación | Contenido máximo en impurezas (%) | | | | |
|-------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | Pb | Fe | Cd | Total | Zn |
| Superior especial | 0.006 | 0.005 | 0.004 | 0.10 | 99.99 |
| Superior | 0.07 | 0.02 | 0.07 | 0.10 | 99.9 |
| Intermedio | 0.20 | 0.03 | 0.50 | 0.50 | 99.5 |
| "Brass special" | 0.60 | 0.05 | 0.50 | 1.00 | 99.0 |
| "Selected" | 0.80 | 0.04 | 0.75 | 1.25 | 98.75 |
| "Prime Western" | 1.60 | 0.08 | - | 1.68 | 98.32 |

*Entre las impurezas más perjudicales son el fierro y el plomo; para el caso del cinc es extraordinariamente malo para su actividad anódica, encontrándose que porcentajes de hierro superiores al 0.01% causan la pérdida de actividad del ánodo.

TABLA 4.1.11

COMPOSICION QUIMICA DE LAS ALEACIONES DE MAGNESIO UTILIZADOS COMO ANODOS DE SACRIFICIO

| Denominación | Contenido máximo en impurezas (%) | | | | | |
|---------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
| | Al | Cu | Fe | Ni | Mn | Zn |
| Magnesio Cell | 0.01 | 0.01 | 0.027 | 0.001 | 0.10 | 0.01 |
| Dowmetal Fs-1 | 2.6 | 0.003 | 0.005 | 0.001 | 0.40 | 1.1 |
| Dowmetal H | 6.0 | 0.01 | 0.009 | 0.001 | 0.26 | 2.5 |
| Dowmetal H-1 | 6.5 | 0.01 | 0.001 | 0.001 | 0.24 | 3.4 |
| Dowmetal J-1 | 6.5 | 0.005 | 0.001 | 0.001 | 0.23 | 0.78 |

- El fierro es particularmente perjudicial. su influencia es pequeña hasta contenidos que no exceden el 0.014%.
- El Niquel ocasiona efectos desastrosos sobre los ánodos de magnesio; para contenidos de niquel superiores al 0.001% dan lugar a la disipación del ánodo por corrosión espontánea.
- El Cobre es también perjudicial para el magnesio, y su contenido debe ser inferior a 0.5%.

TABLA 4.1.12

**COMPOSICION QUIMICA DE LAS ALEACIONES DE ALUMINIO UTILIZADOS
COMO ANODOS DE SACRIFICIO**

| Denominación | Contenido máximo en impurezas (%) | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|------|-----|-------|-----|-------|
| | Zn | Hg | Sn | In | Mg | Al |
| Alcoa | 3-6 | - | - | - | - | Resto |
| Bac | 2-10 | - | - | 0.02 | - | Resto |
| Gardam | - | - | 0.5 | - | - | Resto |
| Reynolds | - | 0.10 | - | 0.001 | | Resto |
| Nitsubishi | 1-10 | - | 0.2 | 2.5 | - | Resto |
| Gral Magnes | 1-6 | 0.05 | - | - | 0.5 | Resto |

- El Cu y Mn hacen más catódicos el potencial del aluminio. El Zn, Cd, Mg y Ba hacen de -0.1 a -0.3 voltios, más anódico dicho potencial y finalmente el Ga, Hg, Sn y In lo hacen también más anódico entre -0.3 a -0.9 voltios.

Ventajas de la protección catódica por ánodo de sacrificio.

Entre sus ventajas principales tenemos las siguientes:

- No se requiere un suministro externo de corriente.
- Utilización efectiva de la corriente protectora.
- No hay problemas de interferencias con otras estructuras adyacentes.
- El costo de instalación y mantenimiento es bajo.

Desventajas de la protección catódica por ánodo de sacrificio.

Entre sus desventajas mencionamos las siguientes:

- Corrientes de salida bajas y limitadas.
- La eficiencia a obtener es función de los requerimientos de corriente.
- Los potenciales de protección disponible son fijos.
- Pueden presentarse limitaciones debido a la resistividad del suelo.

Campos de utilización de estos metales como ánodos de sacrificio.

La utilización del cinc como ánodo de sacrificio está justificado porque fue el primer metal que se empleó para este fin y puede considerarse como el ánodo "clásico" el que todos conocen, pero además sus propiedades electroquímicas le hacen

muy estimable. El valor relativamente elevado de su potencial de disolución, le implica un alto rendimiento de corriente, una disminución muy controlada del potencial de la estructura a proteger y una alcalinización muy pequeña del medio en contacto con esa estructura.

Uno de los factores que más puede limitar la utilización del cinc es la resistividad del medio agresivo; su empleo queda limitado para resistividades menores de 5000 ohm-cm.

Como ánodo de sacrificio se utiliza masivamente, sobre todo para la realización de la protección catódica en agua de mar; buques, pantalanés, andenes marítimos, refuerzos metálicos, diques flotantes, plataformas de perforación de petróleo, condensadores, oleoductos, etc.

El aluminio es el metal más idóneo para la realización de la protección catódica; debido a que el desarrollo de las aleaciones es todavía reciente, y ha llegado a tener mayor demanda en el uso de protección catódica en buques, tanques de lastre y carga-lastre de petroleros donde se ha puesto en prueba dichos ánodos dando así buenos resultados; y esto se debe a su elevada capacidad de corriente, que hace que un solo ánodo de aluminio pueda ejercer la acción de tres iguales características de cinc, para una misma duración del ánodo.

Aunque el precio del aluminio es elevado a comparación que el de cinc, este se compensa por la utilización de menor número

de ánodos y menor costo de mano de obra que requiere dicho ánodo.

El magnesio y sus aleaciones, presentan un potencial de disolución bajo, el cual implica un menor rendimiento de corriente, grandes potenciales de la estructura a proteger y una alcalinización relativamente fuerte del medio que esta en contacto con la estructura. Generalmente se utiliza en medios cuyas resistividades se encuentre comprendidas entre 5,000 y 20,000 ohm-cm.

4.1.2 PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA.

El principio se basa en la alimentación de electrones a la estructura a proteger; 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, el cual introduce la corriente al electrolito mediante ánodos.

En la selección de lo rectificadores se tiene en cuenta el voltaje y amperaje de salida, para tener dichos valores se evalúa el área a proteger y la densidad de corriente requerida en cada tipo de electrolito (suelo y agua de mar) y el voltaje se calcula mediante las caídas respectivas en conductores, ánodos, electrolito y cátodo, dependiendo principalmente de la resistividad del electrolito.

Los ánodos por corriente impresa son diversos, dependiendo su selección del costo por unidad de energía emitida y su duración electroquímica y mecánica; se presenta en formas de barras cilíndrica; los más utilizados son la chatarra de Hierro, Ferrosilicio-cromo, grafito, magnetita, aleaciones de plomo-plata y el titanio, tantaló o niobio platinado

Protección catódica en fondo externo de tanques.

En estos últimos años ha habido un considerable interés en la integridad de los tanques enterrados, así también como el de los tanques de almacenamiento reposando sobre el suelo. La protección catódica es un método que previene y controla la corrosión de partículas y estructuras metálicas enterradas.

La aplicación de protección catódica en tanques ha sido realizado con el fin de aprovechar al máximo la eficiencia del sistema.

El uso del ánodo de sacrificio es típico y limitado solo para los tanques de pequeño diámetro y los requerimientos de corriente para llevar a cabo la protección son mínimas.

El sistema de corriente impresa ha sido utilizado donde los requerimientos de corriente son más substanciales.

Existen diferentes sistemas de instalación de ánodos por corriente impresa para la distribución de la corriente de

protección. Algunos de estos sistemas usados se muestra a continuación :

1. Anodo Horizontal ó vertical instalados alrededor del perímetro del tanque. Fig.4.1.3

2. Anodo horizontal ó vertical instalados debajo del fondo de tanque. Fig.4.1.4

3. Anodo instalado en los alrededores de la profundidad del pozo. Fig.4.1.5

Cada uno de estos sistemas tienen sus ventajas y desventajas; y la selección de cada sistema es dependiente sobre el diseño y el factor económico; y también de los requerimientos operacionales.

Experiencias pasadas indican que el método de monitoreo aplicado para determinar las necesidades requeridas de protección, no siempre coincide con la realidad. A continuación se indican algunas de estas particularidades:

1. La medida de potencial estructura-suelo sobre el perímetro del tanque, son necesarias para obtener buenos resultados de la protección catódica.

FIG. 4.1.3 INSTALACION CLASICA DE ANODOS VERTICALES POR CORRIENTE IMPRESA .

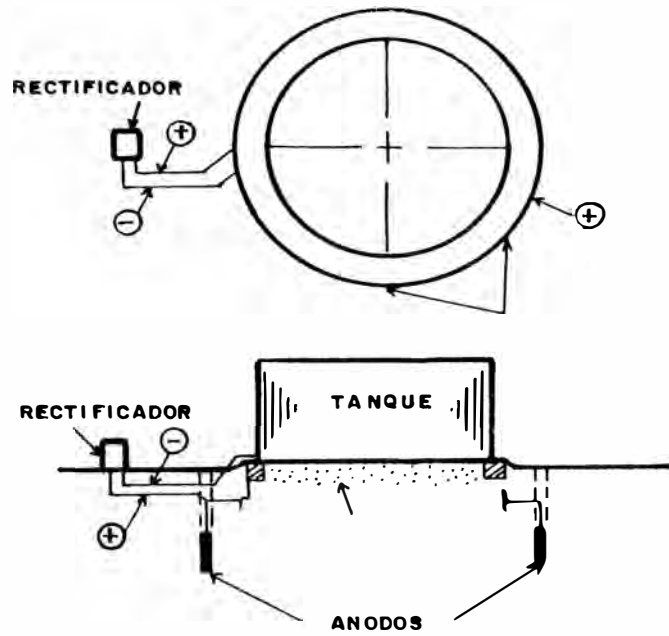
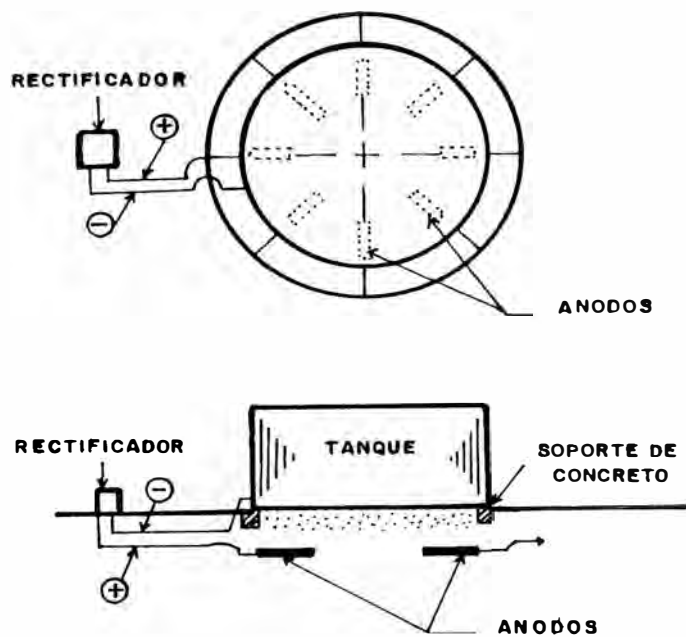


FIG. 4.1.4 INSTALACION DE ANODOS DEBAJO DEL FONDO DE TANQUE .



2. La medida del potencial en el centro del tanque es necesario para obtener una medición más completa para los resultados del sistema de protección catódica.

3. Que el nivel del líquido en el interior de los tanques es un factor significativo en la determinación de la protección catódica en el fondo de tanques, sobre todo en el centro del mismo.

4. El tipo seguro de protección catódica planeado puede no ser efectivo en ciertas áreas de fondo de tanques.

5. Un plan mejorado para distribuir el lecho de ánodos enterrados es usando una inclinación ó técnica de taladrar en ángulo para localizar los ánodos debajo del fondo de tanques, y así dirigir la distribución de corriente hacia el centro del tanque y reducir de esta manera el consumo de corriente de protección.

El método standard para determinar la eficiencia de la protección catódica sobre una estructura, son las medidas de potencial eléctrico de dichas estructuras en estudio.

Estas mediciones son realizadas con un voltímetro de alta impedancia y estable.

Una estructura se considera protegida, cuando se obtiene una medida de potencial de -0.85 voltios, referido al Cu-CuSO_4 ;

FIG. 4.1.5 INSTALACION CLASICA DE ANODOS POR CORRIENTE IMPRESA EN POZOS CERCANOS AL TANQUE.

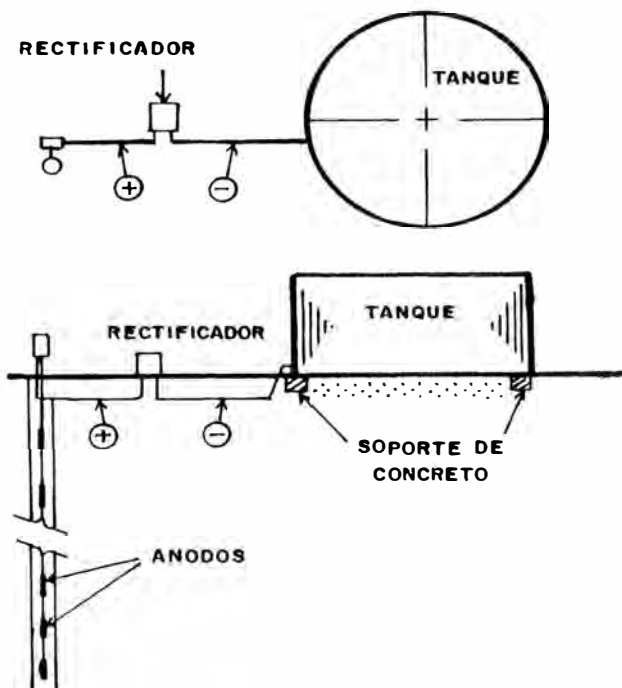
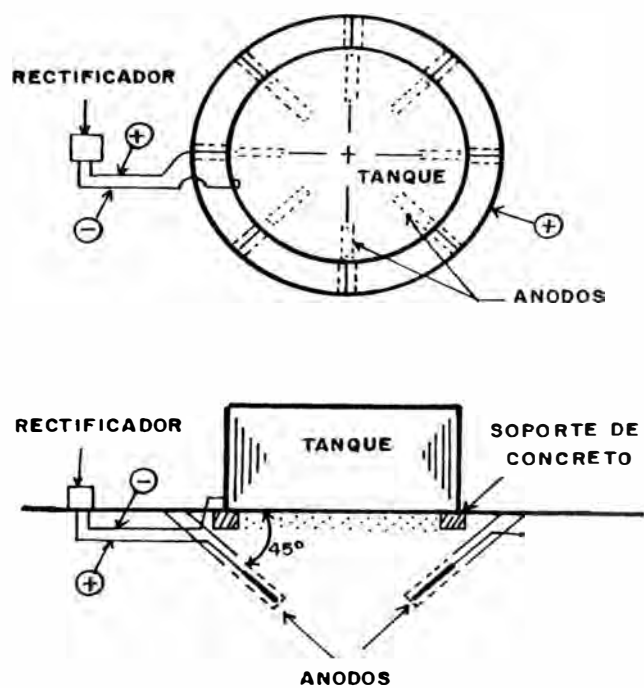


FIG. 4.1.6 NUEVO SISTEMA DE INSTALACION DE ANODOS POR CORRIENTE IMPRESA.



para una verdadera representación de la medida de potencial eléctrico, el electrodo de referencia debe estar en un lugar tan cerca a la estructura bajo tierra que está en estudio.

En ciertos casos se ha determinado que la medida de diferencia de potencial en el perímetro del tanque, satisface varios criterios de eficiencia del sistema y que a través de una especial evaluación. En el centro del tanque las caídas de potencial disminuyen, lo que indica que dicho potencial es variable y no es tan efectivo.

La tabla 4.1.13, indica las medidas actuales obtenidas a través de esta técnica de evaluación. Una variación de los potenciales observados en el perímetro y centro del tanque con cierta corriente aplicada. La diferencia de potencial entre el perímetro y centro del tanque debe estar en el rango de los 300 mv., para que el sistema se considere efectivo.

Se concluye que una adecuada medición para determinar los niveles satisfactorios de protección catódica en los fondos de tanque, debe incluir al menos una medida de potencial de la estructura-suelo tomado en el centro del tanque. Para tanques nuevos, el problema de evaluar el diferencial de voltaje en el centro del tanque, puede ser medido por:

1. La instalación de un electrodo de referencia permanente (Cu-CuSO₄), en el centro del tanque, donde se pueda determinar con exactitud el potencial en el centro del tanque. Fig.4.1.7

FIG. 4.1.7. INSTALACION DE UNA CELDA DE REFERENCIA PERMANENTE.

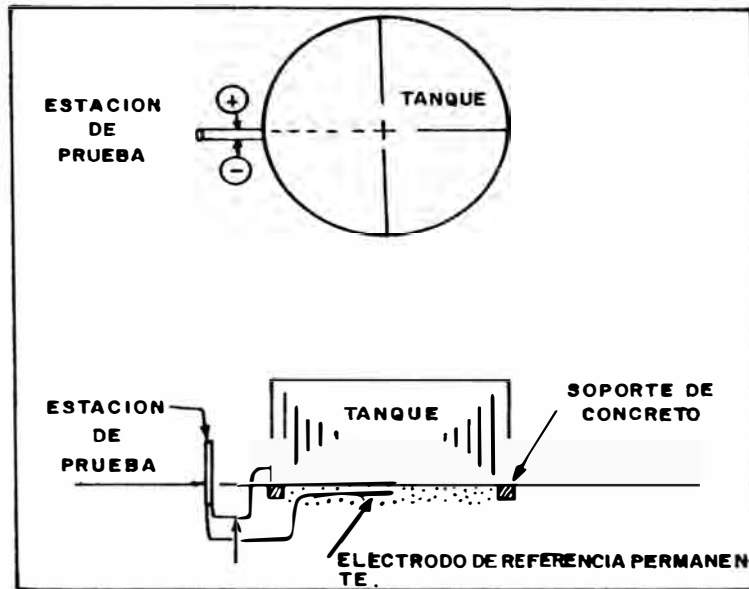
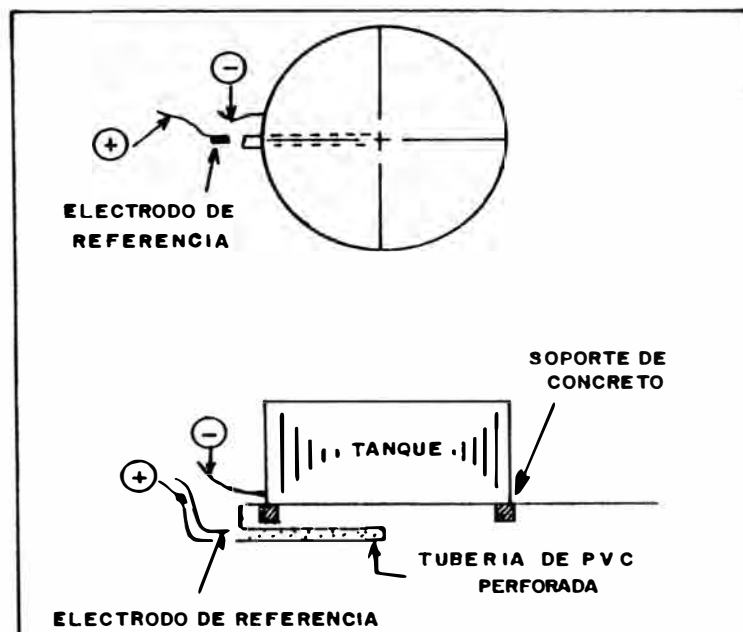


FIG. 4.1.8. INSTALACION DE UNA CELDA DE REFERENCIA USANDO UNA TUBERIA DE P. V. C.



2. La instalación de un tubo de policloruro de vinilo (PVC), ó de fibra plástica reforzado (FRP), para la medición respectiva del potencial del centro del tanque. Fig.4.1.8

Para tanques existentes, el problema es algo más difícil; produciéndose la salida a través de un orificio, pudiendo perforarse desde el perímetro del tanque al centro del tanque, instalando una tubería de PVC ó FRP adherido al tanque existente (fig.4.1.8). Luego es acoplado un electrodo de referencia pudiendo pasar desde el perímetro al centro del tanque con un perfil variable de potenciales.

Nuevo sistema de protección catódica aprovechable.

Recientes avances en sistema de instalación de protección catódica, usando ánodos distribuidos de tal forma que se determine en ángulo de 35-45 grados respecto al perímetro del tanque, y para una profundidad de 7.6-10.7 m. (fig.4.1.6).

Este ángulo brinda una distribución más uniforme de la corriente y un nivel elevado de protección en el centro del tanque.

Así se tiene que para el caso de un tanque con una distribución convencional del lecho de ánodos, las medidas de potencial es de -0.85 voltios, en el perímetro del tanque y de

-0.65 voltios, en el centro del tanque.(Cu-CuSO₄), con la distribución en ángulo.

Operando a la misma corriente de salida, se tendrá potenciales de -1.0 voltios, en el perímetro del tanque y -0.86 voltios, en el centro del tanque, después de un día de operación.

Datos obtenidos de una prueba en dos instalaciones similares, muestra que los resultados de perforaciones angulares, son más favorables que aquellos de distribución convencional de lechos instalados alrededor del perímetro.

Instalaciones de esta naturaleza pueden ser conocidos fácilmente en forma directa, mediante el uso de ánodos empaquetados que permitan que el ánodo sea centrado apropiadamente en el agujero inclinado; y dicho espacio anular puede ser llenado posteriormente por coque, mientras el resto del agujero sería llenado con backfill y arena.

Para el cálculo de la resistencia del lecho de ánodos perforados en forma angular, se aplica el mismo procedimiento matemático, usado para lecho de ánodos del tipo convencional.

A continuación en la tabla 4.1.13, se muestra las mediciones de potencial para un tanque nuevo de 36.6 m. de diámetro y además se incluye la medida de potencial en el centro del tanque.

TABLA 4.1.13**MEDICION DE POTENCIAL EN FONDOS DE TANQUE. DIAMETRO D=36.6 m.**

| Locación electrodo de referencia (m.) | Potencial tanque-CuSO ₄ (Voltios) |
|---------------------------------------|--|
| Perímetro 1.5 | - 1.379 |
| 3.0 | - 1.291 |
| 4.5 | - 1.242 |
| 6.0 | - 1.183 |
| 7.5 | - 1.151 |
| 10.5 | - 1.109 |
| 12.0 | - 1.097 |
| 13.5 | - 1.109 |
| 15.0 | - 1.109 |
| 16.5 | - 1.109 |
| 18.0 (centro) | - 1.112 |

Fuente de Corriente.

El sistema de corriente impresa requiere una fuente de corriente continua que no importa de donde provenga, siempre y cuando se mantenga con el tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos 10 años; con la finalidad que dicho sistema de protección catódica sea eficiente y rentable.

Rectificadores.

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos son alimentados con corriente alterna a 220 V., corriente que en la actualidad se encuentra con facilidad en nuestro país.

En la fig.4.1.9, se ilustra un rectificador monofásico, cuya tensión de salida puede ser ajustada según las necesidades.

Un voltímetro permite controlar la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total.

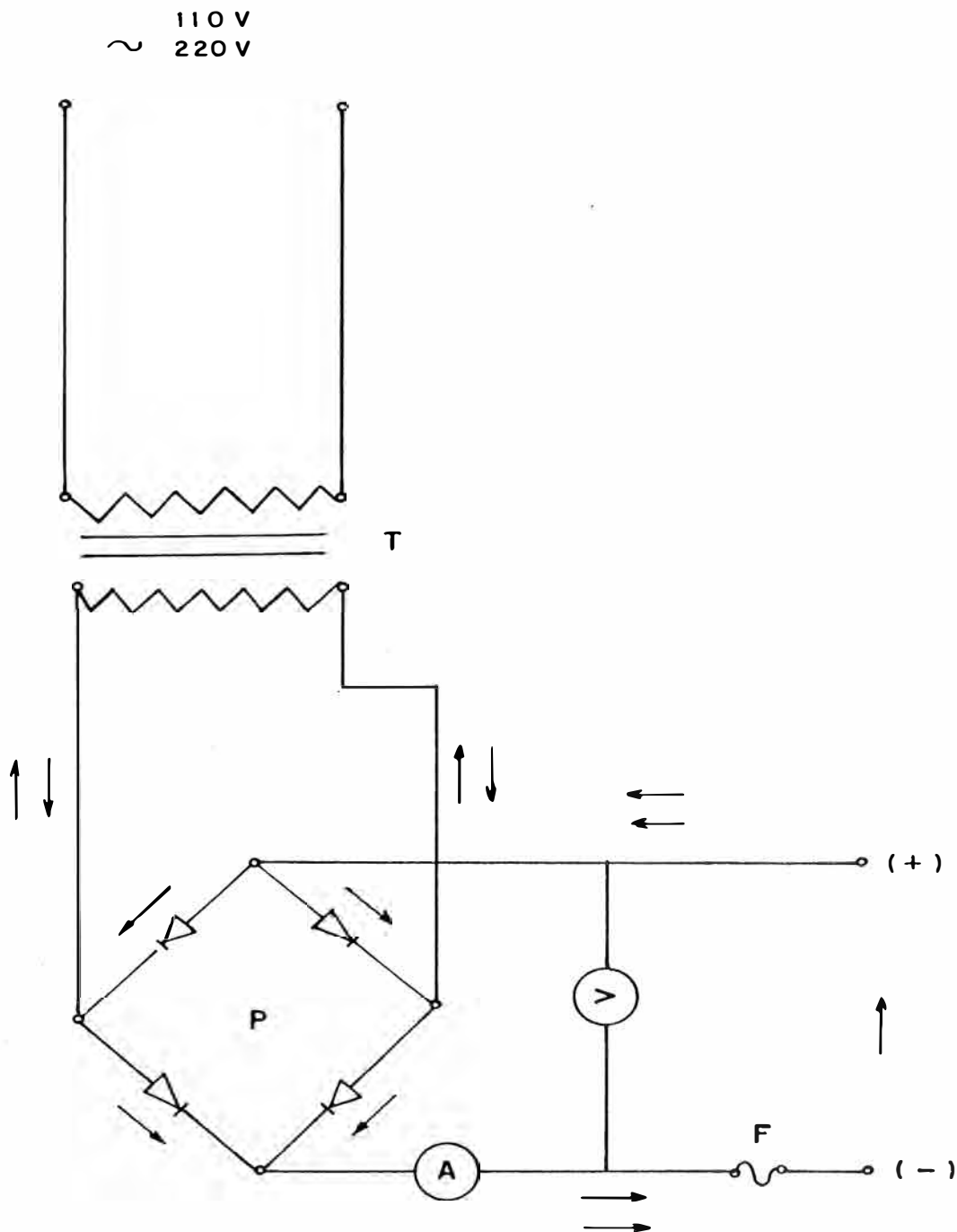
La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas ó por medio de un "variac", que permite una regulación continua desde 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente, es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica a 380 V.

Dinamo con motor Térmico.

Permite la protección catódica donde no existe posibilidad de suministro de energía eléctrica. El motor térmico puede estar

FIG. 4.1.9 ESQUEMA DE UN RECTIFICADOR MONOFASICO



alimentado bien directamente a partir de la conducción a proteger, bien por un depósito que se llena periódicamente.

Electrodos dispersores de Corriente.

Estos electrodos con el paso de corriente van consumiéndose a una velocidad que depende del tipo de material. Así, por ejemplo; la chatarra de hierro se consume a razón de 10 Kg/Amp.-año, mientras que el titanio platinado es prácticamente despreciable.

Vamos a pasar a continuación a describir cada uno de los electrodos mencionados anteriormente que se utilizan en la protección catódica por corriente impresa.

-Chatarra de Hierro.

Por su economía es a veces utilizado la chatarra de hierro como electrodo dispersor de corriente. Este tipo de ánodo puede ser aconsejable su utilización en terrenos de resistividad elevada y que se le rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque.

El consumo medio de estos lechos de dispersión de corriente es: 9 Kg/ Amp.-año.

-Ferrosilicio-cromo.

Este ánodo es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca en el suelo hincado o tumbado, rodeado normalmente de un relleno de carbón de coque.

A intensidades de corrientes bajas (1 Amp.), su vida es prácticamente ilimitada, siendo su capacidad máxima de salida de corriente de unos 12 a 15 Amp./ánodo. Su consumo oscila a intensidades de corriente altas entre 0.5 a 0.9 Kg/Amp-año.

Su dimensión más normal es la correspondientes a 3" de diametro y 60" de longitud, que es la más comercial y que se encuentra con mayor facilidad en el mercado.

Con respecto a su resistencia mecánica, es demasiado frágil debido a su estructura cristalina, por lo que se ha de tener gran cuidado en su embalaje y transporte.

-Grafito

Puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media y se utiliza con relleno de grafito ó carbón de coque. Es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe de ser cuidadoso.

Sus dimensiones son variables, oscilando su diametro entre 2" a 3", y la longitud de 60 " a 84 "; son más ligeros de peso que los de ferrosilicio-cromo.

La salida máxima de corriente es de 3 a 4 Amp. por ánodo y su desgaste oscila entre 0.5 y 1 Kg/Amp-año.

-Magnetita

Es 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 0.40 m. de diámetro y 0.92 m. de longitud, pesando alrededor de 8 kg., su rate de consumo es 1 gramo por Amp-año, con salida de 10 Amp/ánodo (30 Amp. máximo).

-Titanio-Platinado

Este material está especialmente indicado para instalaciones de agua de mar, aunque sea perfectamente utilizable en aguas dulces é incluso en suelos.

Su característica más relevante es que a pequeños voltajes (12 Voltios), se pueden sacar intensidades de corriente elevadas, siendo su desgaste apenas perceptible.

En agua de mar tiene limitaciones en la tensión a aplicar, que nunca puede pasar de 12 Voltios, ya que tensiones más elevadas podrían ocasionar el despegue de la capa de óxido de titanio y por tanto la deterioración del ánodo. En aguas dulces que no

tengan cloruros, pueden actuar estos ánodos a tensiones de 40-50 V.

La salida máxima de corriente puede ser de 300 Amp/m², siendo su desgaste en las condiciones más adversas de 0.01 gr/Amp-año.

-Tántalo-Platinado

Es semejante al anterior, presentando como ventaja que en el agua de mar puede trabajar a tensiones altas 50-60 Voltios, sin embargo, su adquisición es menos fácil y su precio más elevado.

-Plomo-plata.

Esta aleación está constituida 1-2% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que forma al actuar anódicamente (del color de cacao), tiene unas propiedades muchas más elevadas debido a los elementos de aleación que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo.

Su utilización más frecuente es en agua de mar, donde la corriente máxima de salida no debe exceder a los 270 Amp/m². Su desgaste está comprendido entre los 50-200 gr/Amp-año.

Estos ánodos deben de presentar una superficie plana, evitándose lo más posible las aristas. En estas zonas, la capa

de peróxido de plomo se forma mal, ó no se forma, y pueden presentar en esos puntos una fuerte corrosión.

Diseño de lechos terrestres de corriente impresa.

Las tablas de diseño para los lechos terrestres de corriente impresa se deben basar en el tipo de construcción de ánodos que adopte el ingeniero de de corrosión para su sistema a proteger.

En la fig. 4.1.10, se ilustra una forma de instalación de ánodos verticales. En la figura se ven solamente las características esenciales. El relleno carbonáceo alrededor del ánodo, cuando se aprisiona bien, cumple dos funciones:

1. Puesto que es de muy baja resistividad, tiene el efecto de incrementar el tamaño del ánodo con la consiguiente reducción en resistencia a tierra.
2. La mayoría de la corriente se transmite al relleno del ánodo por contacto directo de manera que la mayor parte del consumo de material es en los bordes exteriores de la columna de relleno.

Debido a que se imprime un potencial positivo en todo el conjunto del lecho terrestre, es absolutamente esencial que toda la instalación del cable cabecero, la del alambre de la coleta del ánodo (función del fabricante) y que los

FIG. 4.1.10 INSTALACION TIPICA DE UN ANODO VERTICAL

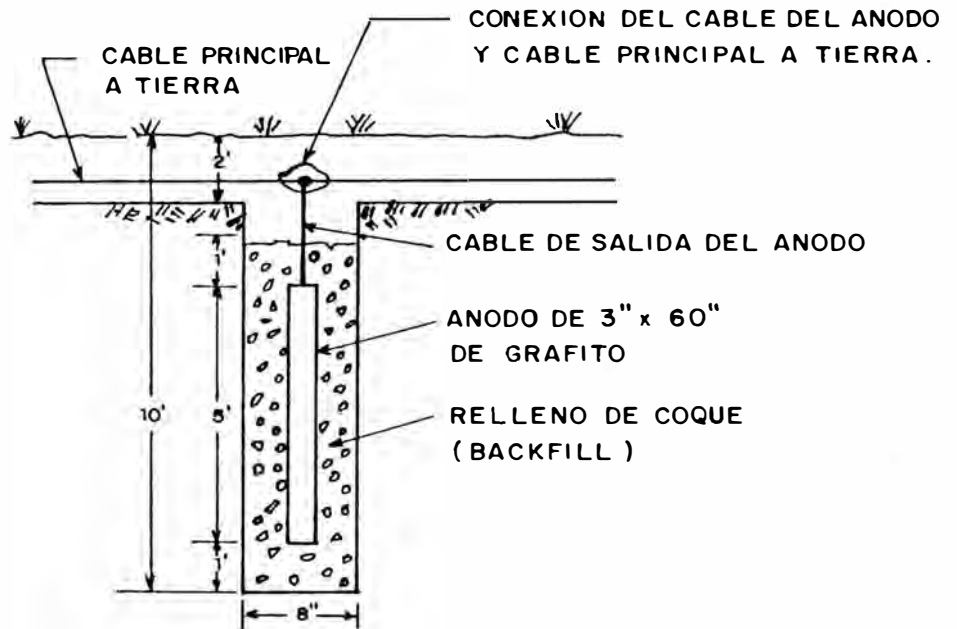
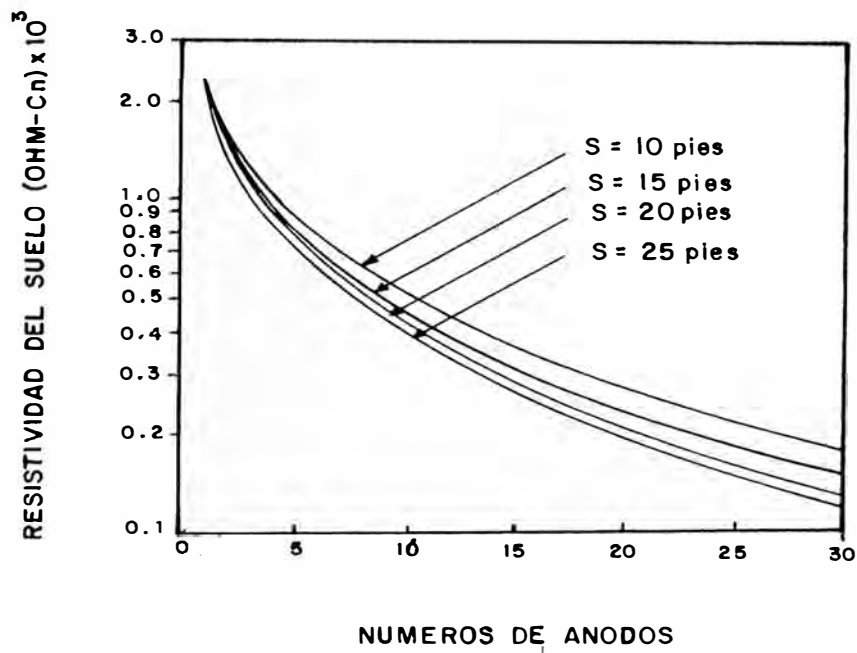


FIG. 4.1.11 CARTA TIPICA PARA EL DISEÑO DE ANODOS VERTICALES



aislamientos de las conexiones entre las coletas y los cables cabeceros estén intactos y a prueba de agua. Las conexiones entre el cable cabecero y la coleta del ánodo deben de ser de baja resistencia permanente.

El número de ánodos verticales requeridos para lograr la resistencia del lecho terrestre deseado se puede determinar utilizando la fig.4.1.11, la figura se basa en que todos los ánodos estén a lo largo de una línea recta, la configuración del lecho terrestre más favorable en la mayoría de los casos.

Esta tabla se utiliza con el tipo de instalación de ánodos que se ilustra en la fig.4.1.10. Se pueden preparar tablas similares para combinaciones de rellenos de ánodos de otras dimensiones.

La resistencia total de cada ánodo a la tierra consta de la resistencia del ánodo al relleno carbonáceo más la resistencia a tierra de la columna de relleno en sí. La resistencia del ánodo al relleno se obtiene utilizando la fórmula:

$$R_v = (0.00521 * p / L) * (2.3 * \log (8 * L / d) - 1)$$

Donde:

R_v : Resistencia del ánodo vertical a la tierra en ohmios

p : Resistividad del suelo (ohm-cm.)

L: Longitud del ánodo en pies.

d: Diámetro del ánodo en pies.

La resistencia de varios ánodos en paralelo se puede calcular mediante la formula :

$$R = (0.00521 * p / L) * (2.3 * \log(8 * L / d) - 1 + (2 * L / S) * 2.3 * \log 0.656 * N)$$

Donde:

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

p: Resistividad del suelo (ohm-cm)

L: Longitud de los ánodos en pies.

d: Diámetro del ánodo en pies.

S: Espaciamiento de los ánodos en pies.

Las dimensiones de la columna de relleno (en este caso 7'x8") se utilizan al aplicar la fórmula. En la figura se incluyen curvas de 10 a 25 pies de espaciamiento. Las curvas no incluyen la resistencia interna del ánodo. A la resistencia de cualquier número de ánodos en paralelo de las curvas se debe agregar la resistencia de un ánodo dividido por el número de ánodos en paralelo. El efecto de esta resistencia interna es menor a medida que aumenta el número de ánodos.

Las curvas de la fig.4.1.11, son para ánodos en suelo de 1000 ohm-cm., para suelos de cualquier otra resistividad, la

resistencia del número seleccionado de ánodos de la curva varía en proporción directa.

Antes de utilizar la tabla, se debe determinar la resistencia máxima permisible de los ánodos, esto es necesario porque, además de la resistencia a tierra de los ánodos, entran otras consideraciones al verificar la resistencia total del circuito, entre las cuales están:

1. El voltaje de retorno entre el lecho terrestre y la tubería.
2. Resistencia a tierra de la tubería en el punto del lecho terrestre.
3. Resistencia del cable de la tubería a la fuente de energía y de la fuente de energía a lo largo de los ánodos que componen el lecho terrestre.

El voltaje de retorno es el que existe entre los ánodos y la tubería en oposición al voltaje aplicado. Para los ánodos del lecho terrestre con relleno carbonáceo este será, generalmente del orden de 2 voltios; algunas áreas de suelo de rara composición pueden producir voltajes más altos pero la cifra de 2 voltios se utiliza por lo general para fines de diseño a menos que la experiencia en algunas áreas específicas aconseje lo contrario.

En la práctica el voltaje de retorno entre el lecho terrestre normal se determina midiendo el voltaje entre el lecho terrestre y la tubería inmediatamente después de abrir el swith de la fuente de energía

La resistencia del cable es la de la tubería via fuente de energía al primer ánodo del lecho terrestre, más la resistencia efectiva del cable cabecero a lo largo de la línea de ánodos.

Aunque por regla general son preferibles los lechos terrestres de ánodos verticales a los horizontales, puede ser necesario utilizar una construcción horizontal debido a las condiciones desfavorables del terreno a las profundidades a que llegan los ánodos verticales. En la fig.4.1.12, se ve un método normal de instalar los ánodos horizontales.

En la fig.4.1.13, se incluyen tablas de diseño que se pueden utilizar para determinar la resistencia de los ánodos horizontales en paralelo. Estas tablas se basan en el tipo de construcción que aparece en la fig.4.1.12, con todos los ánodos colocados en línea recta.

El mismo procedimiento general se sigue para determinar la resistencia del ánodo a los bordes exteriores del relleno según se utilizó en la fig.4.1.11, con la excepción de que la fórmula aplicable (también derivada de las ecuaciones H.B.Dwight) es:

FIG. 4.1.12 INSTALACION TIPICA DE UN ANODO HORIZONTAL

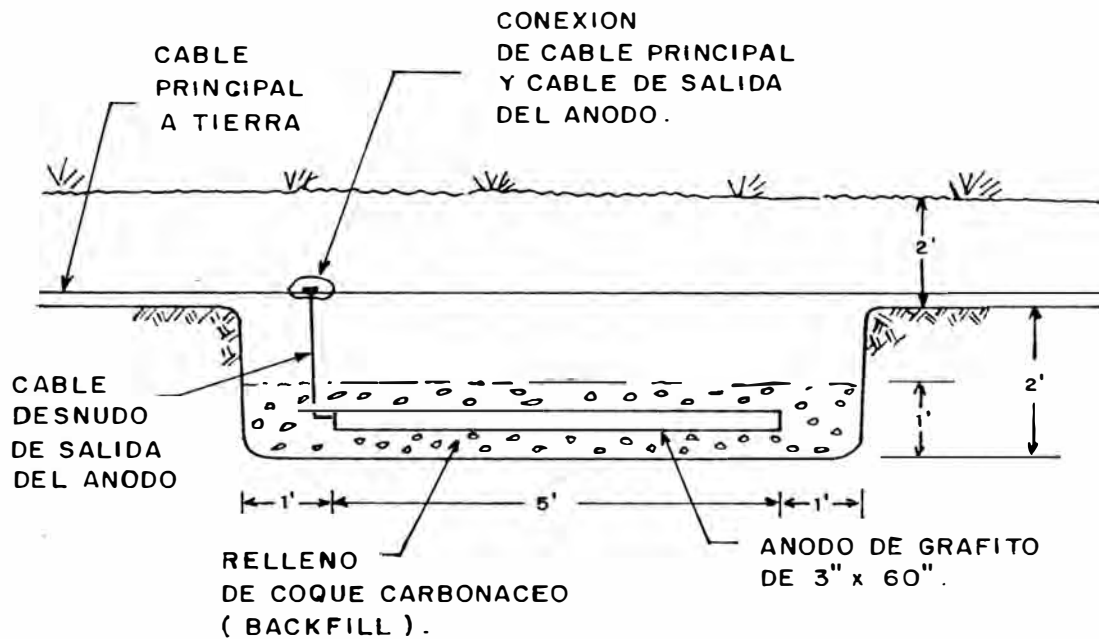
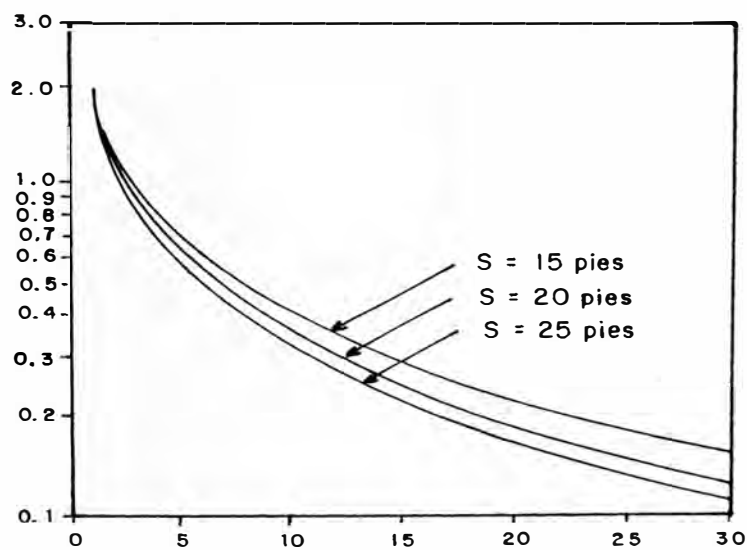


FIG. 4.1.13 CARTA TIPICA PARA EL DISEÑO DE ANODOS HORIZONTALES



$$R_1 = (S^2 + L^2)^{0.5} / L - 1$$

$$R_H = (0.00521 * p / L) * (\ln(4 * L^2 + 4 * L * (S^2 + L^2)^{0.5}) / (d * S) + S / L + R_1)$$

Donde:

R_H: Resistencia en ohm. del ánodo horizontal a tierra.

p: Resistividad del suelo (ohm-cm)

L: Longitud del ánodo en pies.

d: Diámetro del ánodo en pies.

S: Doble longitud del ánodo en pies.

Ventajas de la protección catódica por corriente impresa.

Entre sus ventajas principales tenemos las siguientes:

- Los requerimientos de corriente son altos.
- Se aplica este sistema de protección, cuando se dispone de la respectiva fuente de corriente eléctrica.
- Se aplica a estructuras de áreas grandes, y que están desnudas o pobremente cubiertas.
- Se utiliza dicho sistema de protección, cuando se requiere voltajes altos (que no pueden ofrecer los ánodos galvánicos), esto se debe a la resistividad del suelo que es grande.
- Finalmente se aplica dicho sistema cuando se requiere obtener una mayor vida útil de la estructura a proteger, y

asi buscar una mejor eficiencia y rentabilidad de dicho sistema de proteccion catódica.

Desventajas de la proteccion catódica por corriente impresa.

Entre sus desventajas mencionamos las siguientes:

- Altos costos de instalacion y mantenimiento.
- El sistema debe ser aislado de estructuras metálicas cercanas a la estructura a proteger, debido a que puede producir corrientes erráticas.
- Finalmente requiere de un suministro de corriente.

4.1.3 INSTRUMENTOS NECESARIOS PARA PRUEBAS DE PROTECCION CATODICA.

A continuacion se muestra los instrumentos de mayor importancia que se utilizó para efectuar las respectivas pruebas de campo de proteccion catódica:

-Electrodo de referencia.

Está constituido por un metal introducido en una solucion saturada del mismo metal, de actividad conocida, cuyo conjunto tiene un potencial fijo y conocido respecto al hidrogeno.

Para este caso el electrodo más usado es el de Cu-CuSO_4 , que se aplica mayormente en suelos.

-Medidor de Resistencia.

Por lo general se aplica para mediciones de la resistencia del suelo en estudio, y así determinar la resistividad real en que se encuentra dicho medio.

El tipo más usado es: Nilson modelo 800, de alta sensibilidad, este aparato se basa en el método de los 4 electrodos.

-Fuente de corriente continua.

Se utiliza para las mediciones de requerimientos de corriente, y por lo general se usa una batería de 12 voltios ó una maquina de soldar de 50 voltios y 200 Amp., que se utilizó para este estudio.

-Amperímetro.

Este aparato sirve para hacer ensayos de corriente sobre una estructura a proteger, también será de corriente continua; el cual como parte complementaria requiere de una fuente de corriente mencionado anteriormente.

-Voltímetro.

Estos instrumentos sirven para medir los potenciales Tanque-Suelo, este instrumento es de cuadro movi para corriente

continua, a su vez requiere en forma complementaria de una fuente de corriente continua.

4.2 PARAMETROS PRINCIPALES EN LA EVALUACION Y DETECCION DE LA CORROSION

4.2.1. POLARIZACION Y VELOCIDAD DE CORROSION.

La polarización es la magnitud de la variación del potencial causado por la corriente neta aplicada ó extraída de un electrodo medido en voltios.

La dirección del cambio de potencial es siempre tal que se opone a la alteración del equilibrio y por lo tanto se opone al flujo de corriente, tanto si la corriente se aplica desde una fuente exterior ó si es de origen galvánico. Por ejemplo cuando en una pila galvánica fluye corriente, el potencial del ánodo se hace siempre más catódico y el del cátodo siempre más anódico y así la diferencia de potencial disminuye.

El flujo de una reacción electroquímica es limitado por varios factores físicos y químicos; aunque una reacción electroquímica se ha dicho que puede ser polarizada o retardada por estos factores ambientales.

La polarización puede ser dividida en 3 diferentes tipos:

-Polarización por activación.

-Polarización por concentración.

-Polarización combinada.

-Polarización por activación.

Se refiere a un proceso electroquímico que es controlado por una secuencia de reacciones metal-interfase del electrodo. Esto es fácilmente ilustrado considerando la evolución de la reacción del hidrógeno sobre el zinc durante la corrosión debido a una solución ácida,

En la fig.4.2.1, se muestra en forma esquemática, alguno de los posible saltos de hidrógeno sobre la superficie del zinc; este paso puede también ser aplicado para la reducción de algunas especies sobre la superficie del metal.

Numerosos mecanismos han sido propuesto, el mayor de los cuales son muchos más complejos que los que se muestran en la fig 4.2.1, mencionado anteriormente.

El ejemplo más importante es el de la reducción del ion hidrógeno en un cátodo, este fenómeno de polarización es conocido como sobretensión de hidrógeno.

Por ejemplo se supone que en un electrodo de platino tiene lugar en sucesión, las siguientes reacciones:

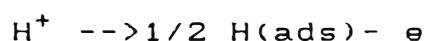


FIG. 4.2.1 GRADIENTE DE POLARIZACION POR ACTIVACION.

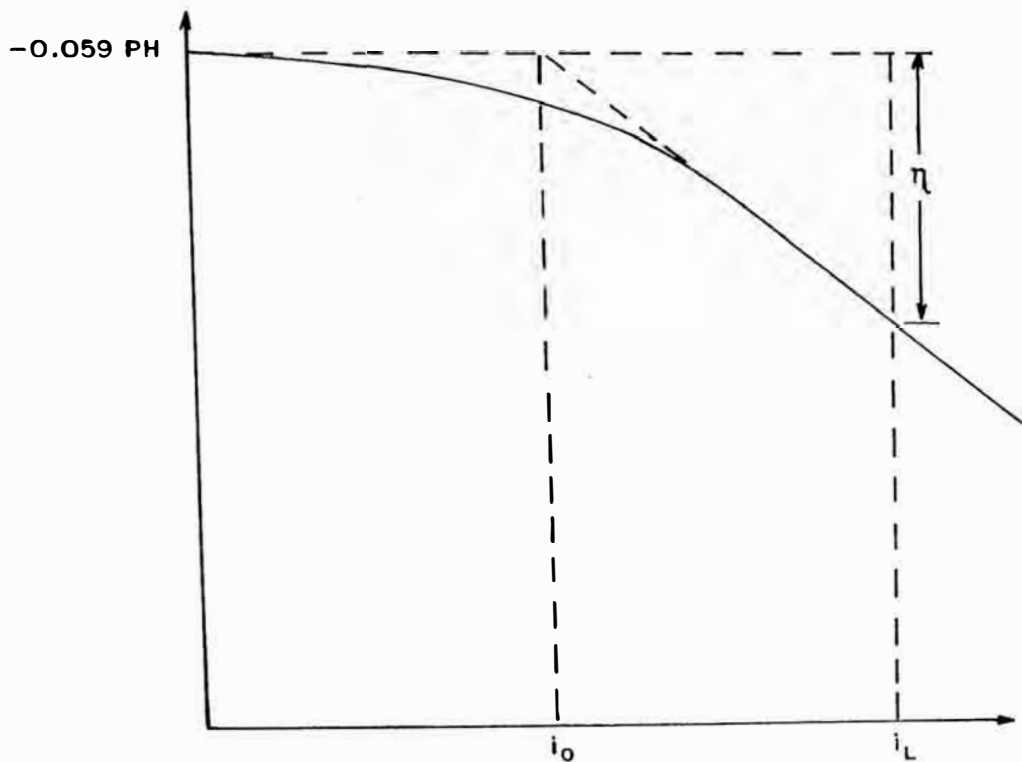
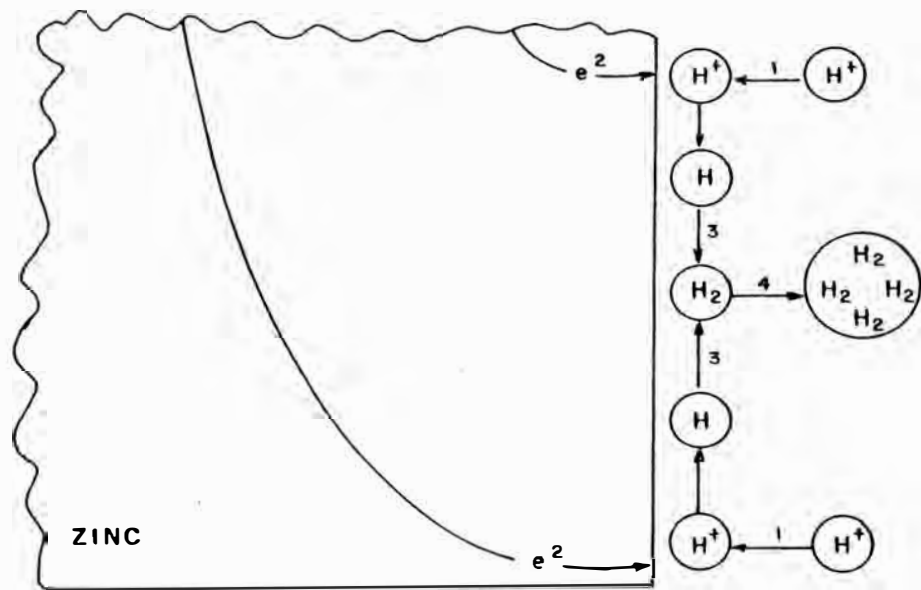
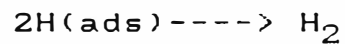


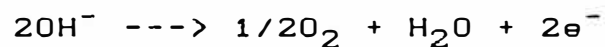
FIG. 4.2.2 SOBRETENSION DE HIDROGENO EN FUNCION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE

Donde H (ads) representa los átomos de hidrógeno adsorbidos por la superficie del metal. Esta reacción que tiene lugar a velocidad relativa rápida y va seguida de una combinación de los átomos de hidrógeno adsorbidos para formar moléculas de hidrógeno y burbujas de hidrógeno gaseoso.



Esta reacción es relativamente lenta y su velocidad determina el valor de la sobretensión del hidrógeno en el platino. El desarrollo lento que regula la descarga de H^+ no es siempre el mismo, sino que varía según el metal de la densidad de corriente y el medio.

También tiene lugar una pronunciada polarización por activación con descarga de OH^- en el ánodo, acompañado de desprendimiento de oxígeno.



Esta polarización se conoce como sobretensión del oxígeno; también puede haber sobretensión en la descarga de Cl^- o Br^- , pero sus valores para una determinada densidad de corriente son mucho más pequeños que para el desprendimiento de O_2 o H_2 .

La polarización por activación es también característica de la deposición ó la disolución de iones metálicos.

La polarización por activación (η_a), de cualquier clase aumenta con la densidad de corriente (i), de acuerdo con la ecuación de Tafel:

$$\eta_a = B \cdot \log(i/i_0) \dots \dots \text{ec.4.2.1}$$

Donde B e i_0 son constantes para un metal y un medio dados y ambas dependen de la temperatura. La corriente de intercambio (i_0), representa la densidad de corriente equivalente a las reacciones iguales directa é inversa que tiene lugar en el electrodo en equilibrio. Cuanto mayor es el valor de i_0 , y más pequeño el valor de " B ", más pequeño es la sobretensión correspondiente.

En la fig.4.2.2 se muestra una gráfica típica de polarización por activación o sobretensión por descarga de H^+ .

El valor de B , para una reacción electroquímica tiene rangos entre 0.05 y 0.15 voltios. Por lo general el valor de B es usualmente de 0.1 voltios, el significado de este parámetro puede ser visto en forma detallada en la fig.4.2.3.

-Polarización por concentración

Dicha polarización está referida a una reacción electroquímica que son controlada por la difusión en el electrolito; esto se ilustra en la fig.4.2.4. Para el caso de la evolución del hidrógeno el número de iones hidrógeno en solución es

FIG. 4.2.3. CURVA DE ACTIVACION POR POLARIZACION.

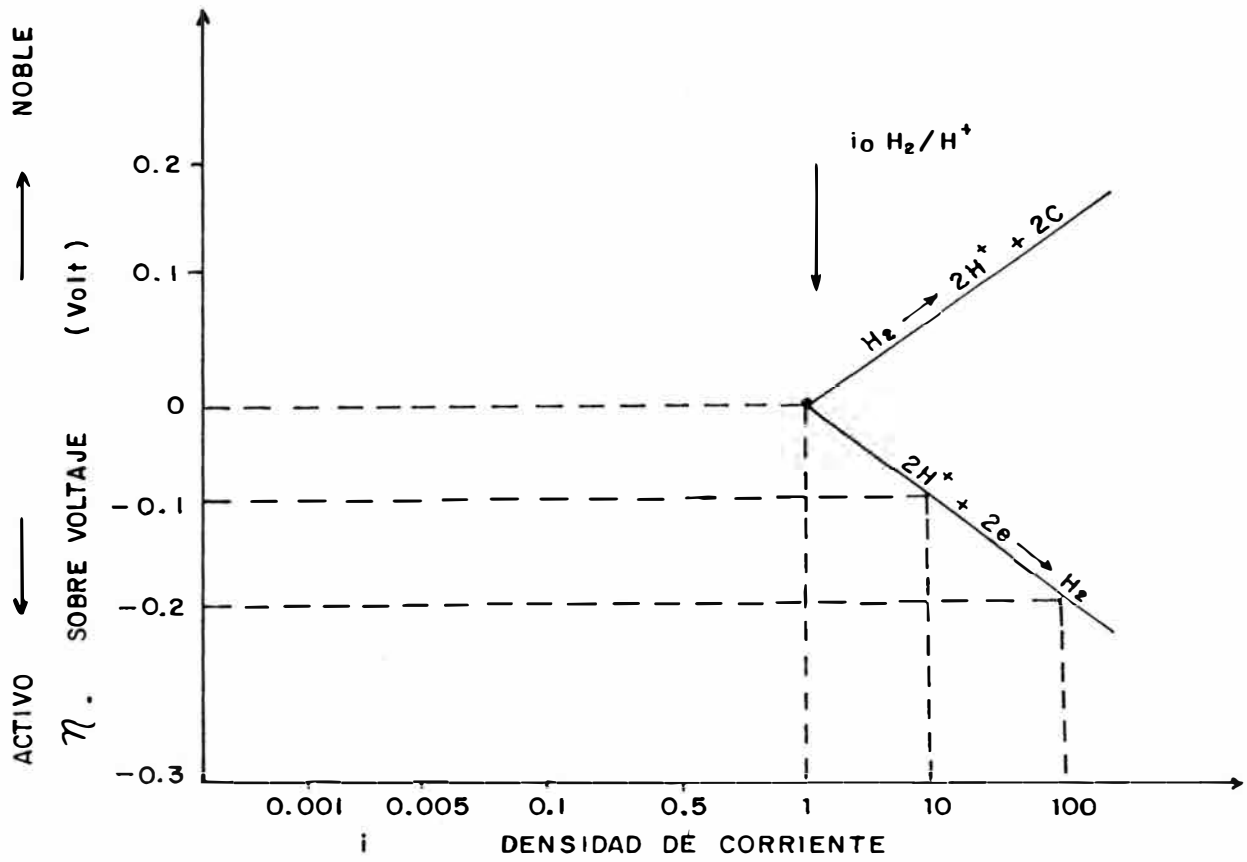
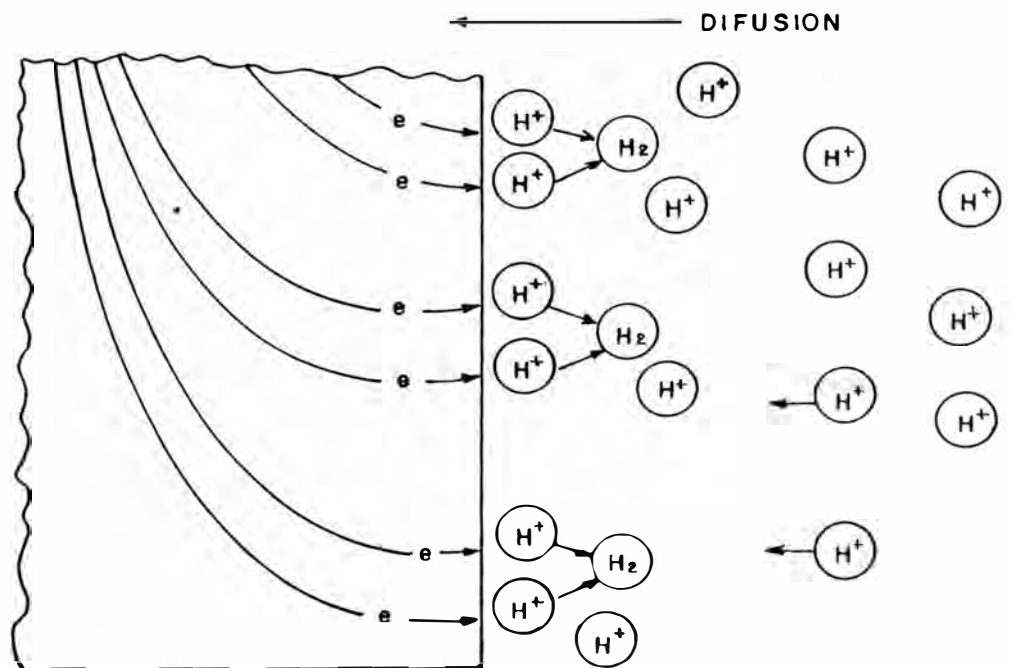


FIG. 4.2.4. GRADIENTE DE POLARIZACION POR CONCENTRACION



completamente pequeño y el flujo de reducción es controlado por la disolución de iones hidrógeno en la superficie del metal.

Hay que señalar que en este caso la reducción del flujo esta controlado por un proceso ocurrido dentro de una solución viscosa en la superficie metálica. Usualmente en la polarización activada su factor controlante durante la corrosión es un medio inducido a concentraciones altas de las especies activas. Mientras en la polarización por concentración, durante la disolución del metal es usualmente pequeño y puede ser solo importante durante las reacciones de reducción.

La importancia de distinguir entre activación y concentración, depende de la clase de polarización que controla la reacción de reducción y los efectos que produce el medio ambiente. Por ejemplo cualquier cambio en el sistema aumenta el flujo de la reacción de reducción y de esta forma decrecería el efecto de polarización concentrada.

El flujo límite para la concentración por polarización esta determinado por el límite de difusión de densidad de corriente (i_1), y esta expresado según la ecuación :

$$i_1 = (Dn \cdot F \cdot C_b) / x \dots \dots \dots \text{ec.4.2.2}$$

Donde:

i_1 : Densidad de corriente.

D_n : Coeficiente de difusión de la reacción de iones.

C_b : Concentración de la reacción de iones en la solución viscosa.

x : Es el mínimo espesor de la capa de difusión próxima a la superficie del electrodo.

Si se considera un electrodo en el cual no hay polarización por activación, entonces la ecuación está dada por:

$$\eta_c = 2.3 (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \log (1 - i / i_l) \dots \text{ec.4.2.3}$$

Donde :

i : Densidad de corriente aplicada.

T : Temperatura aplicada en °C

n : Número de transferencia de electrones.

i_l : Densidad de corriente límite.

La gráfica correspondiente a la ec.4.2.3, se muestra en forma detallada en la fig.4.2.5

En la fig.4.2.6, se ilustra los efectos de cambio del límite de difusión de corriente sobre la configuración de la curva de polarización encontrado durante la polarización por concentración.

En estos casos de polarización el ejemplo más frecuente que podemos citar es, si se coloca cobre como cátodo en una solución diluida de SO_4Cu , cuya actividad del ion cúprico se

FIG. 4. 2.5 CURVA DE POLARIZACION POR CONCENTRACION

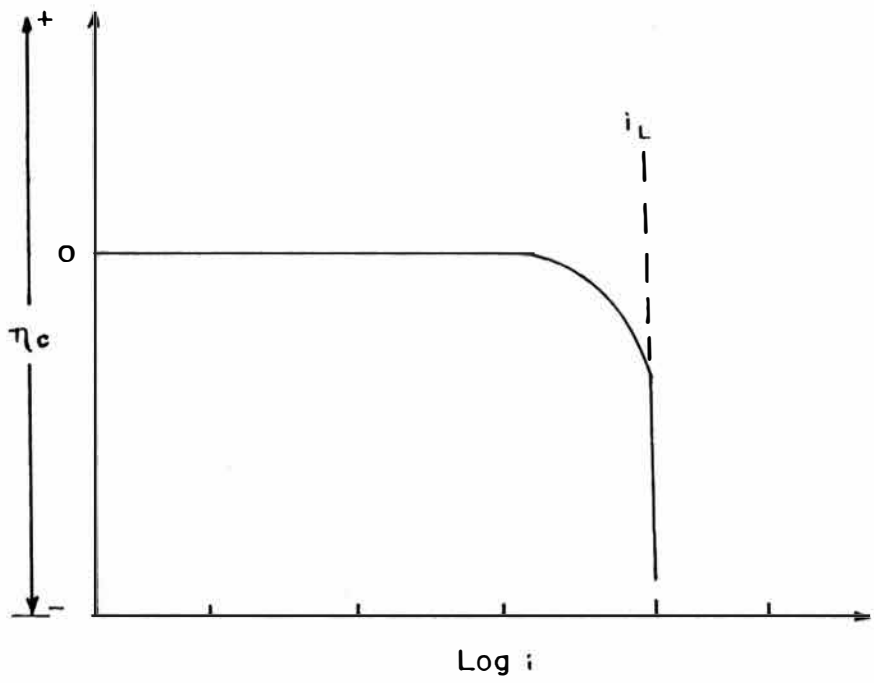
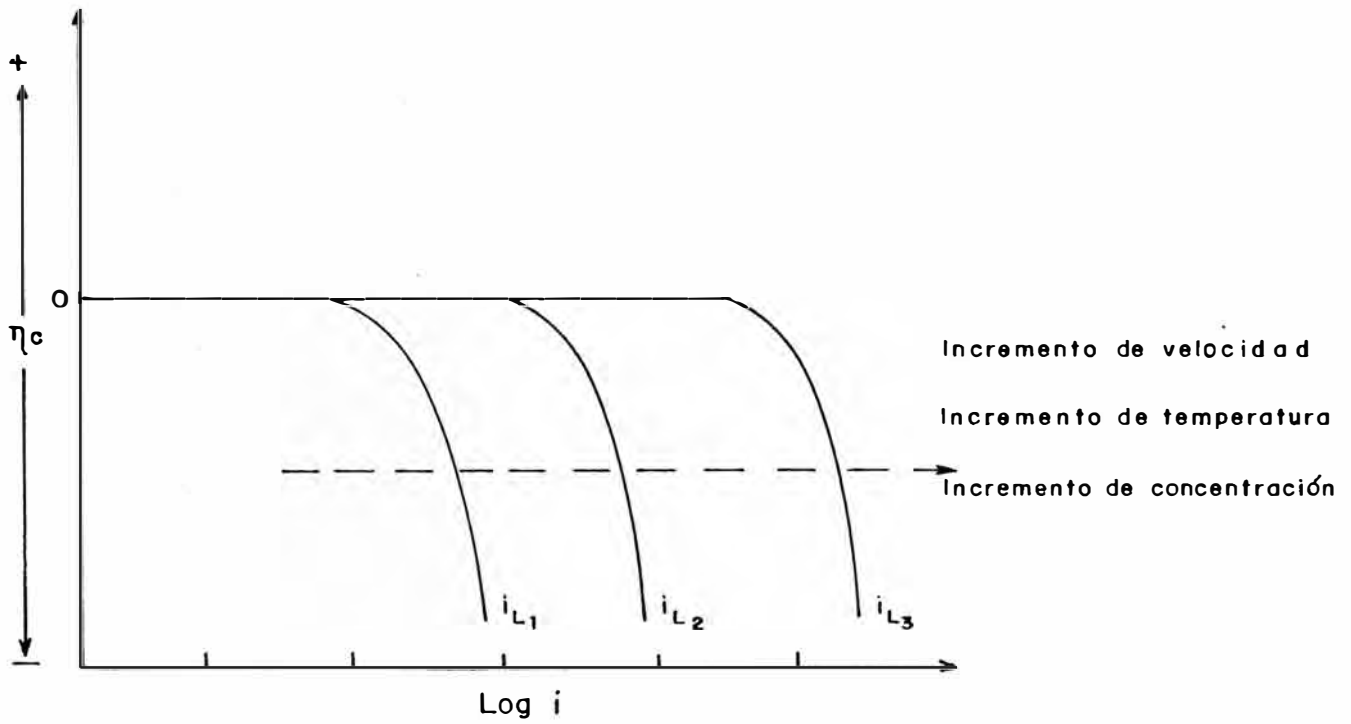


FIG. 4. 2.6 EFECTO DE LAS VARIABLES DEL MEDIO AMBIENTE SOBRE LA CURVA DE POLARIZACION POR CONCENTRACION.



representa por (Cu^{++}) , tenemos que el potencial de oxidación E_1 , en ausencia de corriente externa, está dado por la ecuación de Nerst:

$$E_1 = -0.337 - (0.0592/2) * \log(\text{Cu}^{++})$$

Cuando fluye corriente, se deposita cobre sobre el electrodo, por lo que la concentración de iones cobre en la superficie del electrodo disminuye a una actividad $(\text{Cu}^{++})_s$, ahora el potencial de oxidación, E_2 , del electrodo se convierte en

$$E_2 = -0.337 - (0.0592/2) * \log(\text{Cu}^{++})_s$$

Puesto que $(\text{Cu}^{++})_s$, es menor que (Cu^{++}) , el potencial del cátodo polarizado es menos doble ó más activo que en ausencia de corriente externa. La diferencia de potencial $E_2 - E_1$, se conoce como polarización por concentración y es igual:

$$E_2 - E_1 = (0.0592/2) * \log(\text{Cu}^{++}) / (\text{Cu}^{++})_s$$

Cuanto mayor es la intensidad de la corriente, más pequeña es la concentración de ión cobre en la superficie del electrodo, ó más pequeña es $(\text{Cu}^{++})_s$, en la superficie del electrodo se acerca a cero. La polarización por concentración infinita está próxima y la densidad de corriente que produce este límite más bajo del valor de $(\text{Cu}^{++})_s$, se denomina densidad de corriente límite. Es obvio que en la práctica, la polarización nunca alcanza valor infinito, en lugar de esto se establece otra

reacción del electrodo a un potencial algo más alto que el correspondiente a la primera reacción. Por ejemplo, en el caso de la deposición del cobre, el potencial se desplaza hasta el valor necesario para el desprendimiento de hidrógeno esta dado por: $H^+ \rightarrow 1/2 H_2 - e^-$, liberándose hidrógeno gaseoso junto con la simultánea deposición de cobre.

Si i_1 es la densidad de corriente límite de un proceso catódico e i , la densidad de corriente aplicada, se puede demostrar que:

$$E_2 - E_1 = (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \ln(i_1 / (i_1 - i))$$

A medida que "i", se aproxima a "i₁", $E_2 - E_1$ se aproxima a infinito. Esto se demuestra en la fig.4.2.7, construida registrando los valores $E_2 - E_1$ contra i.

Si el electrodo de cobre se polariza anódicamente, la concentración del ion cobre en la proximidad de la superficie del electrodo es mayor que en el seno de la solución. Entonces la relación $(Cu^{++}) / (Cu^{++})_s$, pasa a ser menor de la unidad y $E_2 - E_1$ es negativo.

En otras palabras, la polarización por concentración en el ánodo polariza el electrodo en dirección catódica o noble, opuesta a la dirección del cambio de potencial cuando el electrodo se polariza como cátodo.

En el caso de un ánodo de cobre el valor límite superior de la polarización por concentración corresponde a la formación de sales de cobre saturadas en la superficie del electrodo. Este valor límite no es tan grande como para la polarización catódica donde la actividad de Cu^{++} se aproxima a cero.

-Polarización Combinada.

La polarización combinada es el resultado de la polarización total de un electrodo tanto por activación como por concentración, y está dado por la siguiente ecuación:

$$n_t = n_a + n_c$$

Donde:

n_t : Sobretensión total

n_a : Sobretensión por activación.

n_c : Sobretensión por polarización.

Durante el proceso de reducción tal como la evolución del hidrógeno o reducción del oxígeno, la concentración-Polarización es importante tomar en cuenta el flujo de reducción que se aprovecha para la difusión límite de la densidad de corriente .

La reacción para este proceso de reducción está dado combinando la ec.4.2.1 y 4.2.3, y tenemos la siguiente ecuación:

FIG. 4.2.7 POLARIZACION DE CONCENTRACION EN UN CATODO EN FUNCION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE .

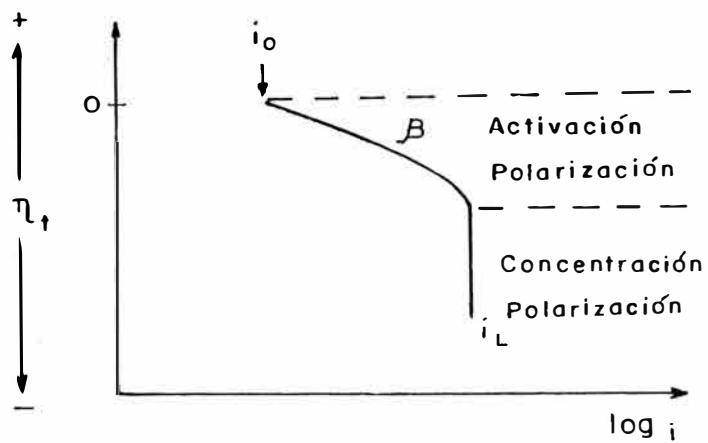
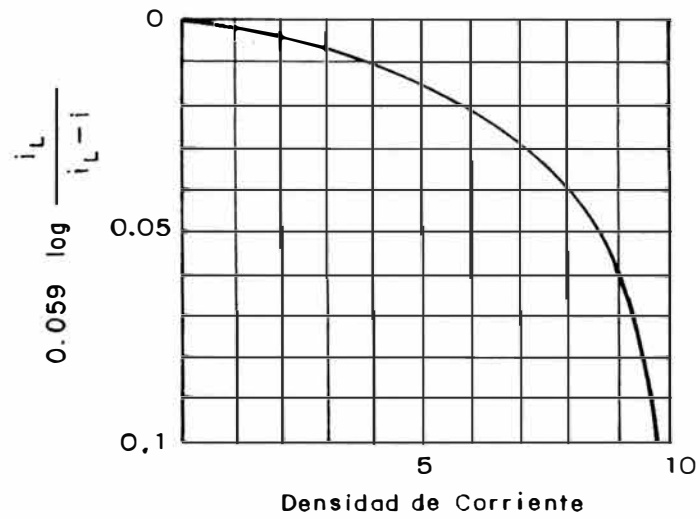


FIG. 4.2.8 CURVA DE POLARIZACION POR CONCENTRACION Y ACTIVACIÓN .

$$n_{red} = -B \cdot \log(i/i_0) + 2.3 (R \cdot T / n \cdot F) \cdot \log(1 - i/i_l) \dots \text{ec.4.2.4}$$

Esta ecuación es importante y básica para la reacción electroquímica de reducción, y se muestra en forma detallada en la fig.4.2.8.

Influencia de la polarización en la velocidad de corrosión.

La resistencia del electrolito y la polarización de los electrodos limitan la cantidad de corriente producida por una pila galvánica. En las pilas de acción local formadas en la superficie de un metal, los electrodos están tan próximos uno de otro, que en consecuencia la resistencia del electrolito es por lo general, un factor secundario en comparación con el factor más importante de la polarización.

Cuando la polarización tiene lugar principalmente en los ánodos, se dice que la reacción de corrosión está controlada anódicamente. Un ejemplo práctico lo tenemos en el comportamiento del plomo impuro sumergido en ácido sulfúrico, donde las áreas anódicas se cubren con una película de sulfato de plomo y las impurezas catódicas.

Cuando la polarización tiene lugar principalmente en el cátodo se dice que la velocidad de corrosión está controlada catódicamente. El potencial de corrosión es entonces próximo al potencial del ánodo en circuito abierto.

El control de la corrosión por la resistencia del medio ocurre cuando la resistencia del electrolito es tan alta que la corriente resultante no es suficiente para polarizar de manera apreciable los ánodos o los cátodos.

Se debe destacar que el grado de polarización depende no sólo de la naturaleza del metal y del electrolito, sino también del área real expuesta del electrodo. Si el área anódica de un metal que se corroe es muy pequeña, por ejemplo, la producida por películas superficiales porosas, pueden haber considerable polarización anódica acompañada por corrosión, aún cuando las medidas muestren que la polarización por unidad de área desnuda del ánodo es sólo muy débil a una densidad de corriente dada. En consecuencia, la relación de área ánodo-cátodo es también un factor importante para determinar la velocidad de corrosión.

4.2.2 POLARIZACION LINEAL.

El método de resistencia de polarización lineal (LPR), debe su nombre al hecho que existe una relación aproximadamente lineal entre la polarización eléctrica de un metal en contacto con un medio corrosivo y la resistencia de interfase entre la superficie metálica y el fluido. La principal limitación que tiene este método es que solo se puede trabajar en un rango de +10 mV y -10 mV.; esto implica que la formulación matemática que se presenta a continuación solo es válida para este rango

de voltaje. La relación básica fué primero expresada por Stern y Geary en 1957:

$$dE/dI = (B_a * B_c) / (2.3 * I_c * (B_a + B_c)) \quad \text{ec.4.2.5}$$

Esta ecuación establece que si un metal en contacto con un medio corrosivo es polarizado desde su potencial de corrosión libre E_c , por una cantidad dE , una corriente dI fluirá entre el metal y el medio corrosivo la cual está relacionada a la corriente de corrosión libre I_c , y la pendiente de las curvas logarítmicas de polarización local anódica y catódica, B_a y B_c .

La corriente de corrosión " I_c ", es la suma de todas las corrientes microscópicas portadas por los iones y electrones en la superficie del metal; " I_c " no puede ser medida directamente.

Es conocido que I_c puede ser relacionado a la velocidad de corrosión C_m (velocidad de corrosión medida) en unidades de pérdidas de espesor por unidades de tiempo (por ejemplo, mils por año), tal que resulta la ecuación:

$$C_m = K_1 * I_c \dots \text{ec.4.2.6}$$

Donde " K_1 ", es un factor de conversión, obviamente, la determinación de " I_c ", sería útil, como ella conduce directamente a evaluar " C_m ".

Por estudios electroquímicos ha sido determinado que los valores de "Ba" y "Bc", son relativamente constantes para un sistema dado metal/medio corrosivo; tal que el factor $Ba \cdot Bc / (2.3 \cdot (Ba + Bc))$, en la ec.4.2.5, es efectivamente constante también. De aquí podemos definir:

$$K2 = (Ba \cdot Bc) / (2.3 \cdot (Ba + Bc)) \dots ec.4.2.7$$

Sustituyendo la ec.4.2.7 y 4.2.6, en la ec.4.2.5, obtenemos:

$$dE/dI = K1 \cdot K2 / C_m \dots ec.4.2.8$$

Según la ley de Ohm., se establece que:

$$E = I \cdot R \dots ec.4.2.9$$

El cual nos conduce a la siguiente definición:

$$dE/dI = R_p \dots ec.4.2.10$$

Donde R_p es la resistencia de polarización. Sustituyendo la ec.4.2.10, en la ec.4.2.8, tendremos:

$$R_p = K1 \cdot K2 / c_m \dots ec.4.2.11$$

Así, podemos determinar " R_p ", y si " $K1$ " y " $K2$ ", son conocidos, podemos establecer un valor para " C_m ", la velocidad de corrosión.

Este método es más exacto que la extrapolación de Tafel en la medición de la velocidad de corrosión, puede medir velocidades pequeñas (0.1 mpy), y en lugares inaccesibles a una inspección convencional.

Una buena estimación de la velocidad de corrosión puede hacerse asumiendo $B_a=B_c=0.1$; luego en la fig.4.2.9, muestra "n" vs I(aplicado), teniendo en cuenta que se utiliza la curva de polarización catódica en los primeros 20 mV.

La velocidad de corrosión aumenta cuando la concentración de oxígeno y agentes contaminantes aumenta, generalmente se aceptan los siguientes rangos que indican el regimen de corrosión, como se muestra a continuación en la siguiente tabla:

TABLA 4.2.1

| | |
|-------------|--------------|
| Hasta 2 mpy | : Bajo |
| 2 - 5 mpy | : Moderado |
| 5 - 10 mpy | : Severo |
| > 10 mpy | : Muy Severo |

Uno de los instrumentos más utilizados por este método es el "Corrater", que mide la resistencia del flujo de corriente en el límite común (interfase) entre la superficie del electrodo y la solución. El valor medido de esta resistencia es mostrado en un graficador calibrado directamente en unidades de velocidad de corrosión. Estas unidades expresan la velocidad de pérdida mils"(.001)" por año.

Las probetas de Corratel se encuentran disponibles de dos electrodos y tres electrodos. Para la mayoría de las aplicaciones las probetas de dos electrodos son la mejor elección. Sin embargo cuando la velocidad de corrosión es alta y la conductividad del líquido es baja, una probeta de tres electrodos nos proporcionará mejores resultados.

4.2.3. EXTRAPOLACION DE TAFEL.

Este es uno de los parámetros principales que es 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 reostato (variable) y empleando un electrodo auxiliar; el cual se procede a variar la resistencia desde cero (potencial de corrosión), y los demás puntos se hallan midiendo el potencial para cada valor de corriente externa aplicada.

En la fig.4.2.10, se observa el comportamiento que tiene la extrapolación, observe que la pendiente es variable para valores bajos de corriente catódica aplicada, pero a valores altos tienden a una recta, se construye la curva de 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 que el inicio de la región de Tafel a un potencial más activo

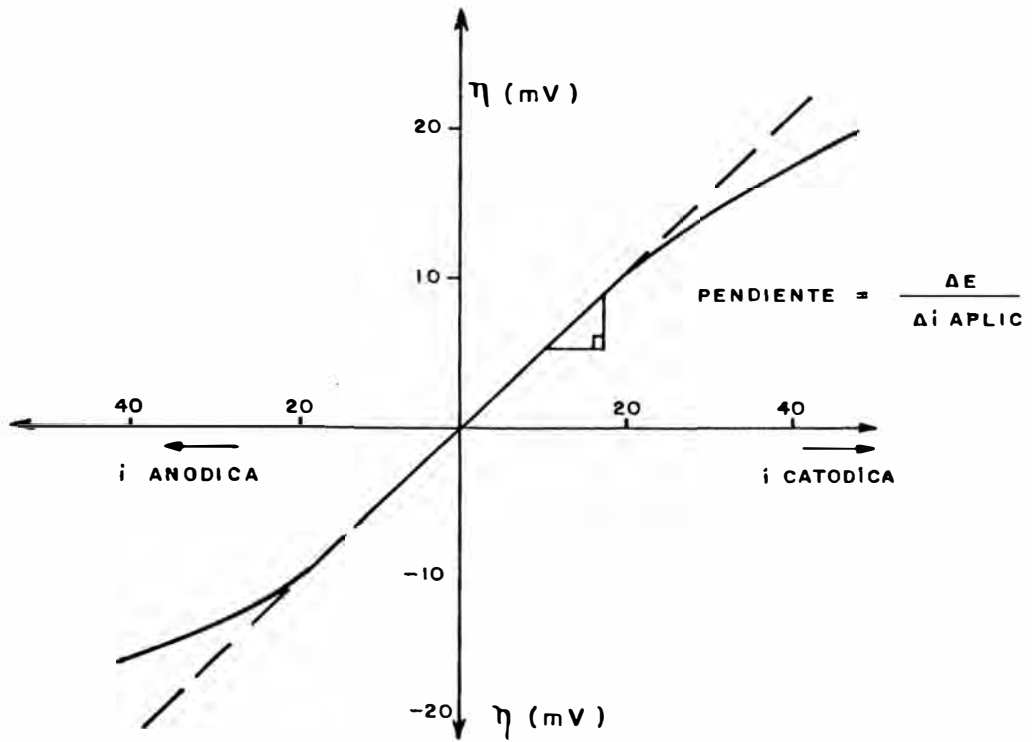


FIG. 4.2.9 POLARIZACION LINEAL PARA CORRIENTE APLICADA

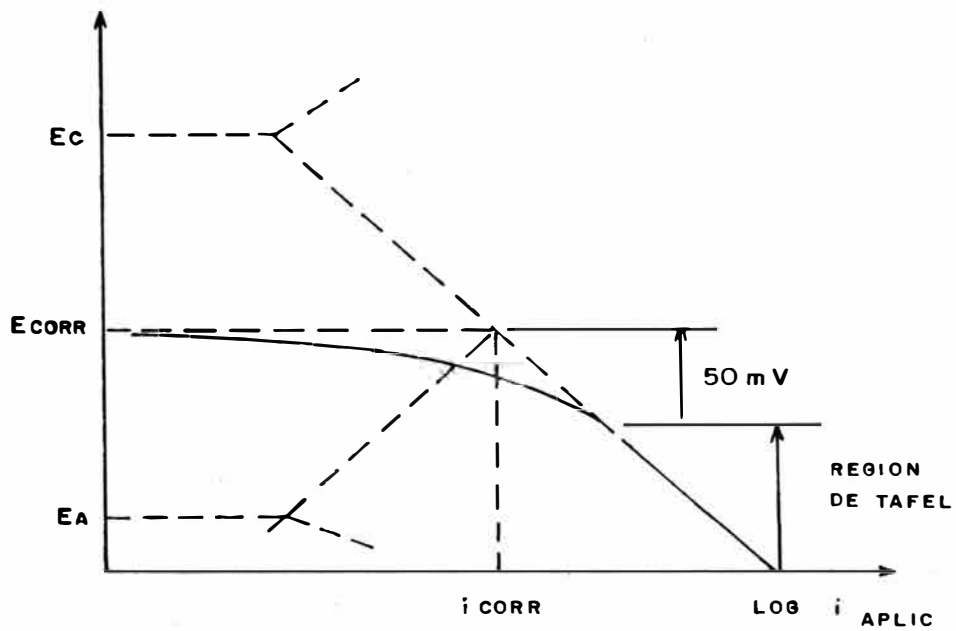


FIG. 4.2.10 CURVA DE EXTRAPOLACION DE TAFEL

que el potencial de corrosión ($E_{corr.}$), es aproximadamente de 50 mVoltios.

4.2.4. RESISTIVIDAD DEL MEDIO CORROSIVO.

Dentro de este parámetro, cabe señalar que el suelo depende de una forma directa del grado de humedad y temperatura en que se encuentre dicho suelo en estudio.

Por lo general cuando se trata de temperatura entre 0 y 25 °C, la resistencia del suelo " R_1 ", observada a una temperatura " T_1 ", se puede corregir aproximadamente al valor de " R_2 ", y a una temperatura standard " T_2 ", mediante la relación:

$$R_2 = R_1 * ((25 + T_1) / (25 + T_2))$$

En la tabla 4.2.2, que se muestra a continuación se clasifica las resistividades para diferentes medios corrosivos.

TABLA 4.2.2

| P (ohm-cm.) | CATEGORIA | CORROSIVIDAD |
|-------------|-----------|-------------------------|
| 0-2000 | Baja | Muy Corrosivo |
| 2000-5000 | Media | Corrosivo |
| 5000-10000 | Moderada | Moderadamente Corrosivo |
| 10000-25000 | Alta | Medianamente Corrosivo |
| > 25000 | Muy alta | Poco Corrosivo |

la unidad usual para expresar la resistividad del suelo es en "ohm-cm."; y para el caso de suelos, depende del electrolito y no del distanciamiento, ya que el suelo presenta una complejidad estructural, porque contiene muchas sustancias que a su vez son influenciadas por la humedad.

Finalmente en suelos cuya formación física es homogénea ó se comportan como tales para las profundidades de exploración; estos suelos son los únicos que permiten una medida directa de su resistividad específica.

4.3 PRUEBAS DE CAMPO PARA EL DISEÑO DE PROTECCIÓN CÁTODICA

4.3.1 MEDICIÓN DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

En el Área-Corrientes -Trompeteros, se efectuó las mediciones de resistividad del terreno, con la finalidad de determinar sus características corrosivas y obtener un valor real de la resistividad del suelo.

Se realizó mediciones de resistividad a profundidades desde 50 cm. y con separaciones variables de los pines hasta 2.5 m.; el cual se utilizó un medidor de resistencia NILSON modelo 800, de alta sensibilidad.

Para el cálculo de la resistividad del suelo a diferentes profundidades, se utiliza la siguiente ecuación:

$$p = 2 \cdot 3.1416 \cdot a \cdot R_x \dots\dots ec.4.3.1$$

Donde:

p : Resistividad del suelo en ohm-cm.

a : Separación entre pines.

R_x : Resistencia del suelo en ohm.

Así por ejemplo para el tanque TK30M9S, en el punto 1, para una separación entre pines de 1.5 m.; la resistencia R_x medido es de 0.9 ohm.

Luego se aplica la ec.4.3.1:

$$p = 2 \cdot 3.1416 \cdot 150 \cdot 0.9$$

| |
|---------------------------|
| $p = 848 \text{ ohm-cm.}$ |
|---------------------------|

A continuación se muestra en las siguientes tablas de resistencia en diferentes puntos alrededor del tanque, para el patio de tanques del Area Corrientes en estudio:

TABLA 4.3.1

| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITENCIA R_x (ohm.) | | | |
|---------|-------------------------------------|---------------------------|-----|------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK30M9S | 50 | 1.2 | 1.4 | 1.6 | 1.8 |
| | 100 | 1 | 1.3 | 1.55 | 1.7 |
| | 150 | 0.9 | 1.1 | 1.5 | 1.6 |
| | 200 | 0.75 | 0.9 | 1.1 | 1.2 |
| | 250 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| | 400 | 0.4 | - | - | 0.6 |

TABLA 4.3.2

| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITENCIA R_x (ohm.) | | | |
|----------|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK50M12S | 50 | 1.6 | 1.9 | 2.8 | 2.4 |
| | 100 | 1.5 | 1.8 | 2.6 | 2.25 |
| | 150 | 1.3 | 1.7 | 2.5 | 1.9 |
| | 200 | 0.9 | 1.2 | 1.8 | 1.4 |
| | 250 | 0.7 | 0.9 | 1.4 | 1.1 |
| | 400 | - | - | 1.3 | 0.95 |

TABLA 4.3.3

| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITENCIA R_x (ohm.) | | | |
|-----------|--------------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK125M17S | 50 | 3.5 | 2.5 | 6.8 | 4.5 |
| | 100 | 2.8 | 1.8 | 6.2 | 3 |
| | 150 | 2.6 | 1.3 | 6 | 3.1 |
| | 200 | 1.8 | 0.9 | 4.8 | 2.3 |
| | 250 | 1.4 | 0.7 | 4 | 1.8 |
| | 400 | - | 0.6 | - | 1.7 |

A continuación con el empleo de la ec.4.3.1, se efectuó el cálculo de las resistividades como se muestra en las siguientes tablas:

TABLA 4.3.4

| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITIVIDAD (ohm-cm.) | | | |
|---------|--------------------------------------|-------------------------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK30M9S | 50 | 377 | 440 | 503 | 566 |
| | 100 | 629 | 817 | 974 | 1068 |
| | 150 | 848 | 1037 | 1413 | 1507 |
| | 200 | 816 | 1006 | 1382 | 1257 |
| | 250 | 785 | 943 | 1099 | 1256 |
| | 400 | 799 | - | - | 1250 |

TABLA 4.3.5

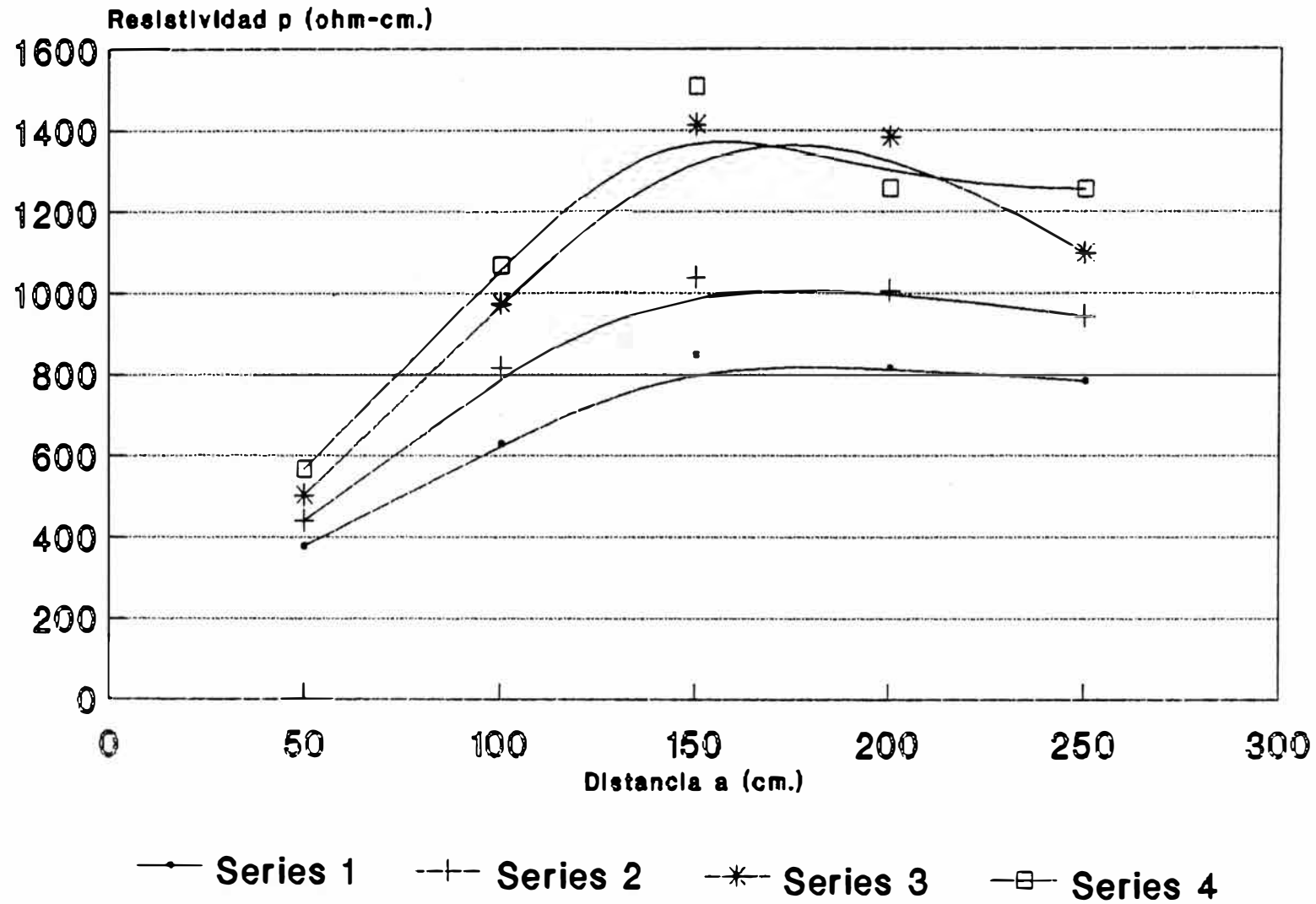
| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITIVIDAD (ohm-cm) | | | |
|----------|--------------------------------------|------------------------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK50M12S | 50 | 503 | 597 | 880 | 754 |
| | 100 | 943 | 1131 | 1634 | 1414 |
| | 150 | 1186 | 1602 | 2308 | 1806 |
| | 200 | 1131 | 1508 | 2262 | 1760 |
| | 250 | 1084 | 1414 | 2192 | 1589 |
| | 400 | - | - | 2200 | 1577 |

TABLA 4.3.6

| TANQUE | Separación entre pines a (cm.) | RESISITIVIDAD (ohm-cm.) | | | |
|-----------|--------------------------------------|-------------------------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| TK125M17S | 50 | 1100 | 786 | 2137 | 1414 |
| | 100 | 1680 | 1131 | 3896 | 1885 |
| | 150 | 2449 | 1224 | 5652 | 2920 |
| | 200 | 2262 | 1131 | 6032 | 2890 |
| | 250 | 2198 | 1099 | 6280 | 2827 |
| | 400 | - | 1119 | - | 3006 |

GRAFICO 4.3.1

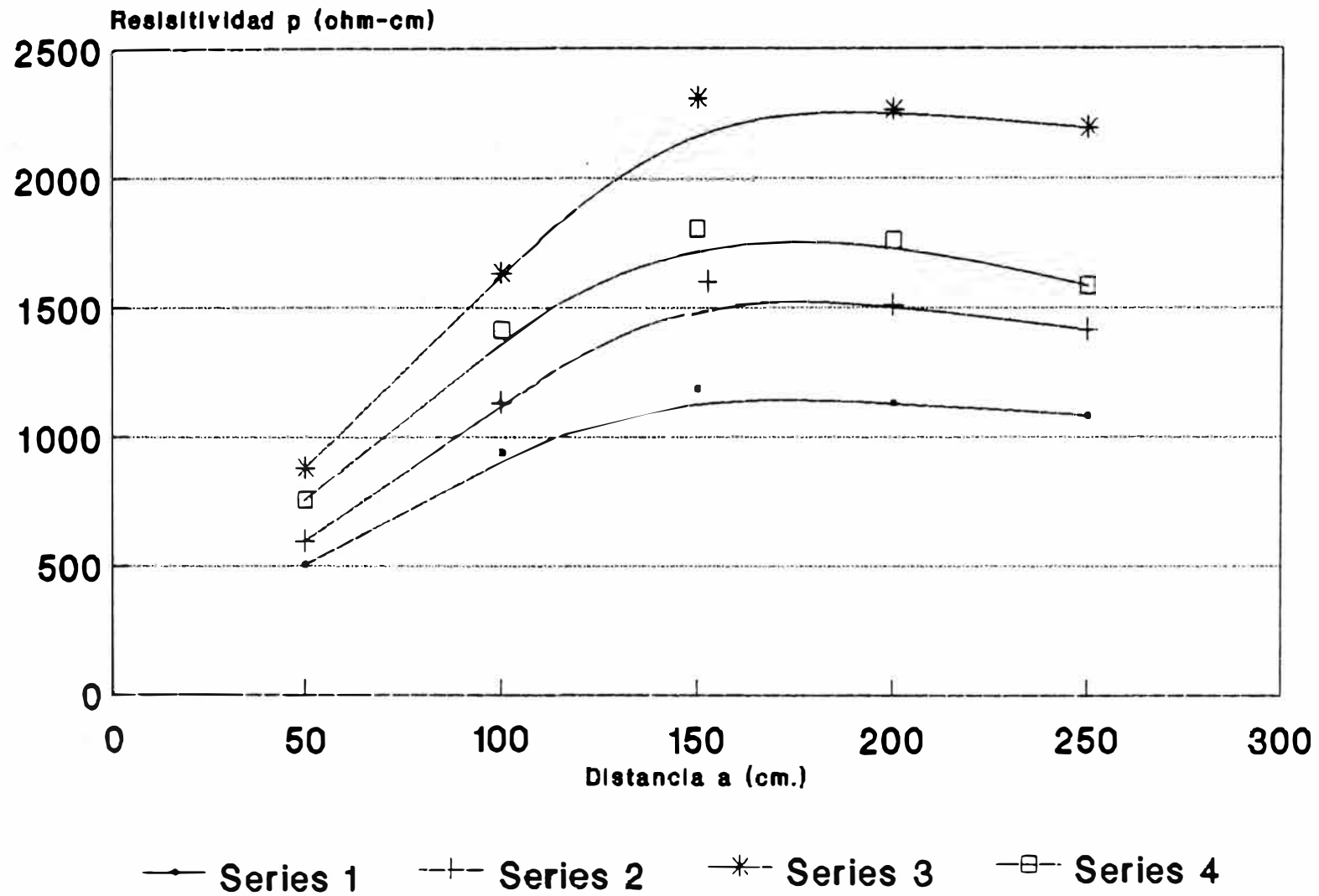
TANQUE TK30M9S



Pruebas de Campo

GRAFICO 4.3.2

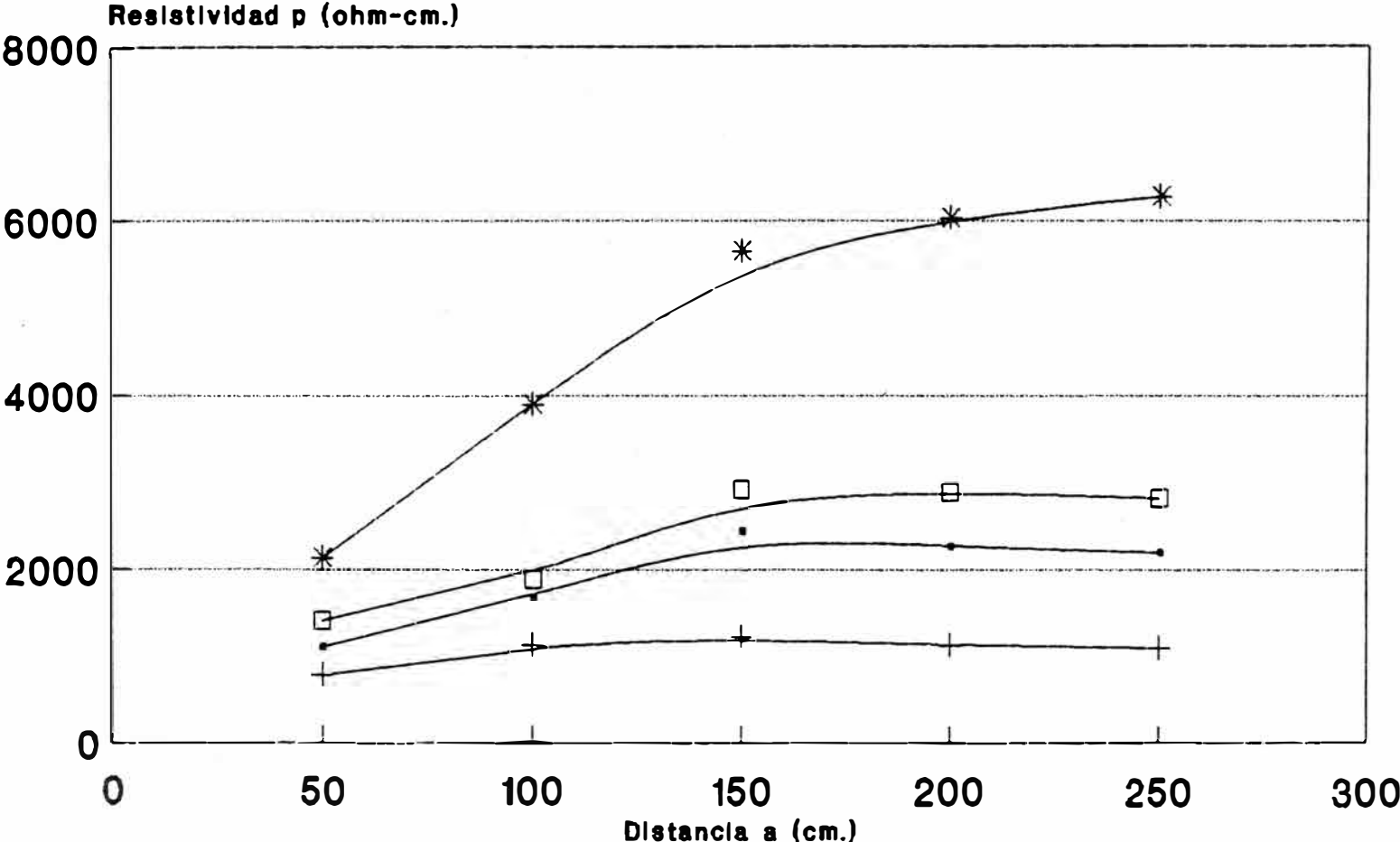
TANQUE TK50M12S



Pruebas de Campo

GRAFICO 4.3.3

TANQUE TK125M17S



Series 1 Series 2 Series 3 Series 4

Pruebas de Campo

4.3.2 MEDICION DE POTENCIAL TANQUE - SUELO.

Para realizar la medición se consideró lo siguiente:

- El tanque fué conectado a través de barra de contacto ó caja de válvula.
- El polo negativo del voltímetro se conectó al contacto y el polo positivo al electrodo de referencia de $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}$
- El electrodo de referencia de $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}$ fué conectado al suelo y principalmente lo más cercano posible al tanque, para tener buenas mediciones de potencial.
- Se registró el potencial Tanque-suelo.
- Las áreas con potencial más negativo, indican áreas anódicas.

A continuación se muestra en la tabla 4.3.7, las tomas de potencial tanque-suelo, en 4 puntos del tanque y la distancia del electrodo es lo más cercano posible (aprox. 20cm.).

TABLA 4.3.7

| TANQUE | POTENCIAL TANQUE-SUELO (volt.) | | | |
|-----------|--------------------------------|--------|--------|--------|
| | A | B | C | D |
| TK30M9S | -0.699 | -0.688 | -0.673 | -0.666 |
| TK50M12S | -0.686 | -0.677 | -0.662 | -0.657 |
| TK125M17S | -0.640 | -0.658 | -0.628 | -0.623 |

4.3.3 MEDICION SOBRE LOS REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE

Para realizar la medición del flujo de corriente se utilizó un milivoltímetro y como se trata de un diseño de protección catódica por corriente impresa, se usó una fuente de corriente continua, en este caso se empleó una maquina de soldar de 12 voltios; las locaciones donde la corriente fluye del tanque hacia el electrolito (suelo), indican áreas de corrosión; el punto donde se alcanza el máximo valor y revierte su dirección es donde esta ocurriendo la corrosión.

A continuación en la siguientes tablas, se muestra las pruebas de requerimientos de corriente para los 3 tanques.

TABLA 4.3.8
TK30M9S

| HORA | POTENCIAL T/S (volt.) | | | Ir. | Descripción |
|----------|-----------------------|--------|--------|--------|---------------|
| | A | B | C | (Amp.) | |
| 8.00 AM | -0.699 | -0.688 | -0.673 | 0 | Antes prueba |
| 8.20 AM | -0.710 | -0.715 | -0.699 | 2.0 | Inicio prueba |
| 8.42 AM | -0.746 | -0.742 | -0.712 | 2.75 | (x) |
| 9.00 AM | -0.754 | -0.744 | -0.714 | 3.0 | |
| 9.30 AM | -0.779 | -0.757 | -0.725 | 3.7 | |
| 9.45 AM | -0.791 | -0.772 | -0.736 | 4.0 | |
| 9.50 AM | -0.790 | -0.772 | -0.737 | 4.0 | (*) |
| 14.15 PM | -1.068 | -1.008 | -0.829 | 11.9 | (**) |
| 14.30 PM | -1.082 | -1.020 | -0.849 | 12.5 | Ref. pto.D |
| 14.40 PM | -1.096 | -1.035 | -0.856 | 13.2 | |
| 15.10 PM | -1.198 | -1.084 | -0.907 | 15.5 | |
| 15.20 PM | -1.279 | -1.180 | -0.954 | 18.5 | |
| 15.30 PM | -1.392 | -1.290 | -1.110 | 22 | |
| 15.30 PM | - | - | -0.945 | 0 | Fin de prueba |

TABLA 4.3.9
TK50M12S

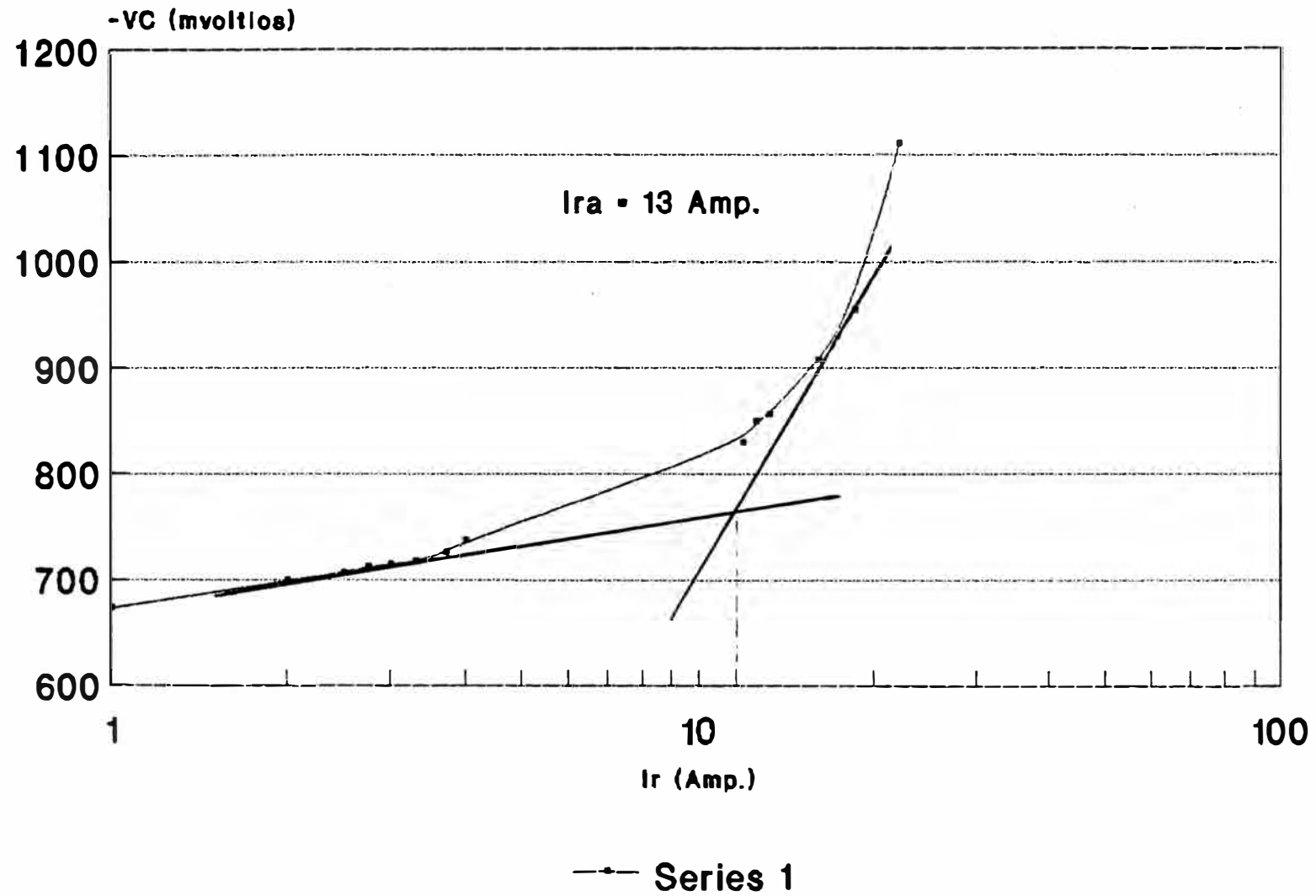
| HORA | POTENCIAL T/S (volt.) | | | Ir. | Descripción |
|----------|-----------------------|--------|--------|--------|---------------|
| | A | B | C | (Amp.) | |
| 8.00 AM | -0.686 | -0.677 | -0.662 | 0 | Antes prueba |
| 8.10 AM | -0.789 | -0.700 | -0.690 | 3.0 | Inicio prueba |
| 8.25 AM | -0.820 | -0.728 | -0.700 | 4.0 | (y) |
| 9.05 AM | -0.830 | -0.742 | -0.711 | 5.5 | |
| 9.22 AM | -0.863 | -0.756 | -0.720 | 6.5 | |
| 9.47 AM | -0.871 | -0.769 | -0.734 | 8.0 | |
| 9.52 AM | -0.872 | -0.768 | -0.734 | 8.0 | (*) |
| 13.10 PM | -1.057 | -0.955 | -0.838 | 17.0 | (**) |
| 13.20 PM | -1.120 | -0.965 | -0.846 | 18.5 | Ref. pto.D |
| 13.35 PM | -1.166 | -0.998 | -0.860 | 21.0 | |
| 13.45 PM | -1.212 | -1.034 | -0.882 | 23.5 | |
| 14.00 PM | -1.255 | -1.067 | -0.956 | 26.0 | |
| 14.13 PM | - | - | -0.923 | 0 | Fin de prueba |

TABLA 4.3.10
TK125M17S

| HORA | POTENCIAL T/S (volt.) | | | Ir. | Descripción |
|----------|-----------------------|--------|--------|--------|---------------|
| | B | C | D | (Amp.) | |
| 7.55 AM | -0.658 | -0.628 | -0.623 | 0 | Antes prueba |
| 8.15 AM | -0.718 | -0.683 | -0.637 | 10.0 | Inicio prueba |
| 9.10 AM | -0.727 | -0.700 | -0.643 | 12.0 | (z) |
| 9.40 AM | -0.736 | -0.711 | -0.658 | 14.0 | |
| 9.55 AM | -0.756 | -0.721 | -0.678 | 16.0 | |
| 10.05 AM | -0.759 | -0.724 | -0.680 | 18.0 | |
| 10.10 AM | -0.759 | -0.725 | -0.680 | 18.0 | (*) |
| 15.00 PM | -0.809 | -0.746 | -0.714 | 22.0 | (**) |
| 15.10 PM | -0.822 | -0.769 | -0.763 | 25.5 | Ref. pto. A |
| 15.20 PM | -0.826 | -0.775 | -0.787 | 30.0 | |
| 15.30 PM | -0.838 | -0.786 | -0.808 | 32.0 | |
| 15.40 PM | -0.840 | -0.802 | -0.820 | 34.5 | |
| 15.50 PM | -0.843 | -0.823 | -0.825 | 37.0 | |
| 16.05 PM | -0.863 | -0.848 | -0.842 | 39.5 | |
| 16.20 PM | -0.888 | -0.866 | -0.848 | 42 | |
| 16.35 PM | -0.926 | -0.895 | -0.864 | 46 | |
| 16.50 PM | -0.989 | -0.962 | -0.888 | 50 | |
| 17.04 PM | - | - | -0.926 | 0 | Fin de prueba |

GRAFICO 4.3.4

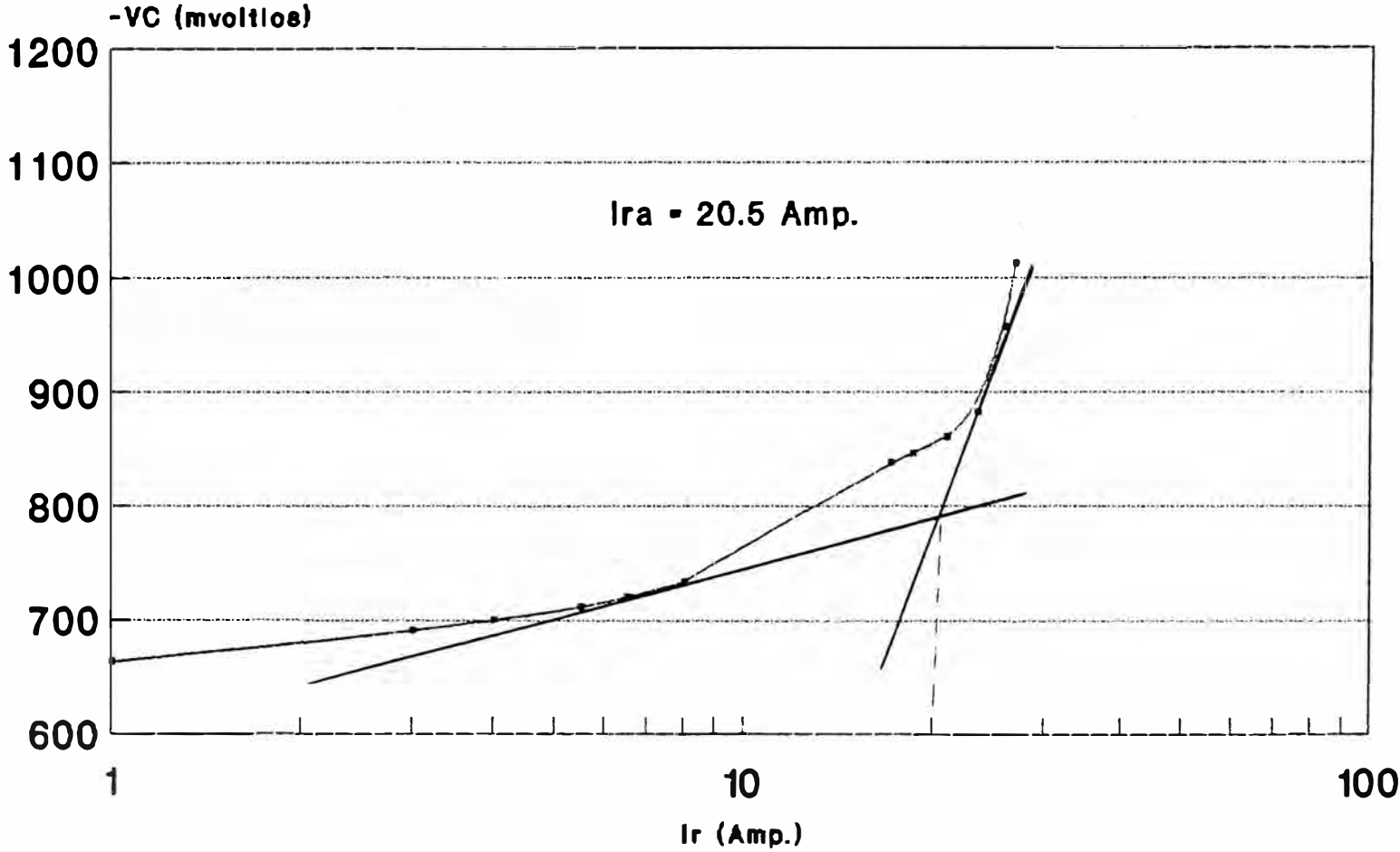
TANQUE TK30M9S



Pruebas de Campo

GRAFICO 4.3.5

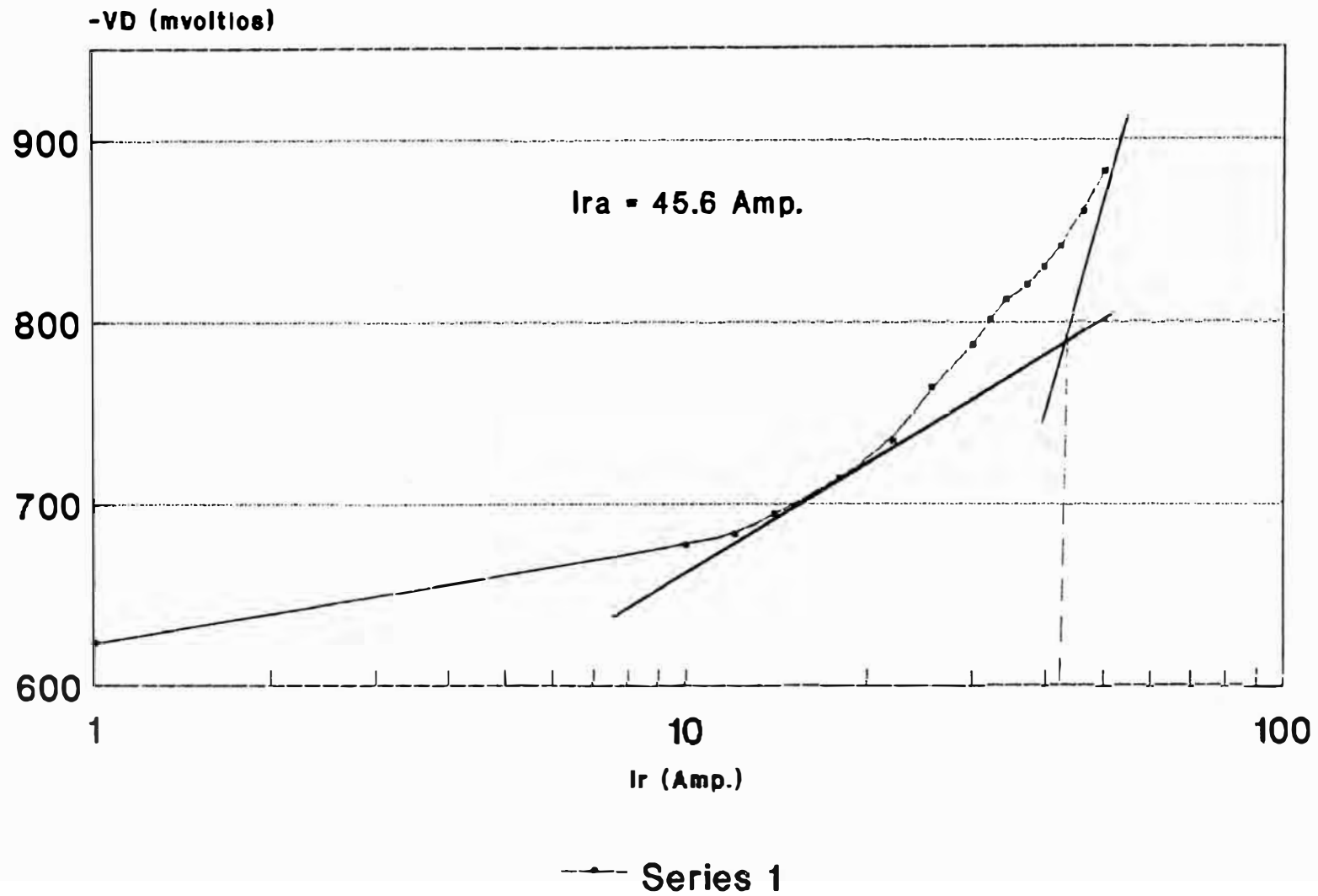
TANQUE TK50M12S



Series 1

GRAFICO 4.3.6

TANQUE TK125M17S



Pruebas de Campo

(x) Cuando se inicia la prueba de corriente, las tomas a partir de 2.5 Amp. hasta 4 Amp. se usa como lecho de ánodos, tuberías de 1"x 40 ", a 7 mt. del punto D.

(y) Cuando se inicia la prueba de corriente, las tomas a partir de 3 Amp. hasta 5 Amp. se usa como lecho de ánodos, tuberías de 1"x 40 ", a 7 mt. del punto D.

(z) Cuando se inicia la prueba de corriente, las tomas a partir de 5 Amp. hasta 8 Amp. se usa como lecho de ánodos, tuberías de 1"x 40 ", a 7 mt. del punto A.

(*) Se apaga la maquina de soldar, y se observa que los potenciales al cabo de 5 min. no varían.

(**) Se vuelve a prender la maquina de soldar, pero esta vez, se usa como lecho de ánodos, electrodo auxiliar (grafito).

4.3.4 DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE REQUERIDA.

En base a las mediciones de requerimiento de corriente para cada tanque, se pasó a calcular la corriente total requerida para cada uno de ellos, utilizando el método de la curva corriente potencial ($V-\log(Ir)$); donde se obtuvieron los siguientes resultados, que se muestran a continuación en la tabla 4.3.11.

TABLA 4.3.11

| DESCRIPCION | TK30M9S | TK50M12S | TK125M17S |
|--|---------|----------|-----------|
| Diam. (m.) | 24.4 | 30.53 | 45.60 |
| Area (m ²) | 467.6 | 732.10 | 1632.73 |
| Ira (Amp.) | 13 | 20.5 | 45.6 |
| Dra (mAmp/m ²) | 27.80 | 27.31 | 27.61 |
| Area Total de Fondos (m ²) : | | 2833 | |

Donde Ira es la corriente total requerida para proteger dicho tanque.

La densidad de corriente requerida que se utilizará para los cálculos de diseño de protección contra la corrosión, será la siguiente:

$$Dra = 28 \text{ mAmp/m}^2$$

Luego para la realización del presente diseño, se trabaja con 2 áreas totales A_1 y A_2

$$A_1 = 1200 \text{ m}^2 \quad (\text{TK30M9S y TK50M12S})$$

$$A_2 = 1633 \text{ m}^2 \quad (\text{TK125M17S})$$

A continuación se muestra en la tabla 4.3.12, la corriente total requerida para cada área:

TABLA 4.3.12

| AREA (m ²) | Ira (Amp.) |
|------------------------|------------|
| A1: 1200 | 34 |
| A2: 1633 | 46 |

El criterio que se toma para trabajar con 2 áreas, se explica posteriormente en el capítulo de Evaluación Técnica, en la parte del diseño del rectificador que se propone para el diseño de protección catódica.

4.3.5. CARACTERISITICAS DEL MEDIO CORROSIVO.

El medio corrosivo es el suelo, y esta constituido esencialmente por arcilla como es característico de los terrenos de la Selva.

El patio de tanques se encuentra ubicado a 200 m. de Batería N°1 Area Corrientes; toda el área tiene protección por muros contraincendio del mismo material del terreno.

De los análisis efectuados sobre el terreno, se ha encontrado los siguientes valores que se muestran en la tabla:

TABLA 4.3.13
ANALISIS DEL SUELO.

-CARACTERISTICAS GENERALES.

| | |
|---------------------------------------|-----|
| Densidad (lb/ft ³) (seco) | 150 |
| Humedad (%) | 80 |
| Humedad relativa (%) | 98 |
| PH | 10 |

-COMPOSICION (% PESO)

| | |
|---|---------|
| Sílice (SiO ₂) | 87 |
| Alúmina (Al ₂ O ₃) | 8.5 |
| Calcio (CaO) | 1.5 |
| Materia Orgánica. | 2.0 |
| Cloruros (Cl ⁻). | 100 ppm |
| Sulfatos (SO ₄ ⁼) | 150 ppm |

Cabe señalar que el contenido de oxígeno y humedad es elevado, debido a que la zona es de clima lluvioso.

También es importante mencionar que en las operaciones de llenado y vaciado del tanque, ocurre un fenómeno de oxigenación intermitente del suelo en contacto con el tanque, esto implica una acumulación de humedad y por lo tanto el aumento respectivo de la concentración de oxígeno en el fondo del tanque. De acuerdo a las condiciones del terreno (moderadamente corrosivo), se infiere que el deterioro de la base se debe a una corrosión localizada.

C A P I T U L O V

E V A L U A C I O N T E C N I C A

5.1 DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA POR ANODO DE SACRIFICIO

Objetivo: Proponer el diseño de un sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio, para el patio de tanques del Area-Corrientes - Trompeteros.

Para efecto de cálculo se desarrolla dicho diseño para el tanque de 30 mil barriles; el mismo procedimiento se hará para el resto de tanques. Posteriormente dicho cálculo se muestra en forma resumida en la tabla 5.1.2.

A continuación se presenta las características principales para el tanque de 30000 barriles:

Tanque 30M9S - Bateria 1 :

Características del Tanque.

| | |
|---------------------------------------|----------------------|
| Capacidad | : 30000 barriles |
| Diámetro del tanque | : 24.4 m. |
| Area fondo del tanque | : 467 m ² |
| Resistividad del suelo | : 5000 ohm-cm. |
| Potencial natural Tanque/suelo | : -0.677 voltios. |
| Interferencias y corrientes erráticas | : Nulas. |

e calcula el sistema de ánodos de sacrificio utilizando **ánodos de Magnesio**, debido a que es apropiado para las

condiciones de terreno en que se encuentra dichos tanques: descartando el uso de otros ánodos como Cinc y aluminio, como se explica en forma detallada en el capítulo IV.

A continuación se presenta las Características del ánodo de Magnesio:

| | | |
|------------------------|---|---------------|
| Anodo de Magnesio | : | 5" x 5" x 31" |
| Factor de utilización | : | 0.85 |
| Eficiencia | : | 0.50 |
| Peso del ánodo (lb.) | : | 100 |
| Consumo (Amp-año / lb) | : | 0.07 |

Cálculo del radio equivalente.

Es el radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo en cuestión, cuando este se haya consumido el 40%.

Entonces:

$$R_{eq} = (ST / 3.1416)^{0.5} * 0.6 \dots \dots \dots ec.5.1.1$$

Donde:

ST : Superficie transversal (pies)

R_{eq} : Radio equivalente (pies)

Reemplazando datos en ecuación (6.1.1):

$$R_{eq} = (0.196 / 3.1416)^{0.5} * 0.6$$

$$R_{eq.} = 0.15 \text{ pies}$$

Cálculo de la Resistencia del ánodo.

Para el cálculo de la resistencia de los ánodos. se desarrolla el de la posición vertical, debido a que presenta una buena distribución de corriente (usualmente en tanques). el cual permitirá una buena protección y rendimiento del sistema contra la corrosión por suelos.

Luego la formula para la resistencia ánodo-suelo de la forma vertical es:

$$R_v = (0.00521 * p/L) * (2.3 * \log (8 * L/D) - 1) \dots \dots \dots \text{ec.5.1.2}$$

Donde:

R_v : Resistencia del ánodo vertical (ohm.)

p : Resistividad del suelo: 5000 ohm.-cm

L : Longitud del ánodo + backfill: 2.6+4.4= 7 pies

D : Diámetro del ánodo + backfill: 0.3+1.7= 2 pies

Reemplazando datos en la ec.5.1.2 :

$$R_v = (0.00521 * 5000/7) * (2.3 * \log (8 * 7/2) - 1)$$

$$R_v = 8.66 \text{ ohm.}$$

Cálculo de la corriente generada por el ánodo.

Se calcula por la ley de ohm. siendo el potencial del ánodo respecto al $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}$ (sat.) de -1.55 voltios, y la polarización a -0.85 voltios.

Luego la corriente por ánodo es:

$$I_a = AE/R_v \dots\dots\dots \text{ec.5.1.3}$$

Donde :

AE : Cambio de potencial (voltios)

I_a : La corriente del ánodo (Amp.)

Reemplazando datos en ec.5.1.3:

$$I_a = (-0.85 - (-1.55)) / 8.66$$

| |
|----------------------------|
| $I_a = 0.081 \text{ Amp.}$ |
|----------------------------|

Cálculo de la vida de cada ánodo.

Se calcula mediante la siguiente relación:

$$T_a \text{ (años)} = (W_a * E_f * FT * C_s) / I_a \dots\dots \text{ec.5.1.4}$$

Donde :

W_a : Peso del ánodo (lb.)

FT - factor de utilización (%)

Ef : Eficiencia (%)

Ia : Corriente del ánodo (Amp.)

Cs : Consumo (lb/(Amp.-año))

Reemplazando datos en ec.5.1.4:

$$T_a = (100 * 0.50 * 0.07 * 0.85) / 0.081$$

| |
|--------------------------|
| T _a = 37 años |
|--------------------------|

Cálculo del número de ánodos.

El número de ánodos requeridos, se calcula en base a la necesidad de corriente total obtenida con datos de las pruebas efectuadas. Esto se presenta en la siguiente tabla:

TABLA 5.1.1

| DESCRIPCION | RESULTADOS |
|--------------------------------|----------------|
| Corriente de protección | 34 Amp. |
| Potencial medido | -1.12 voltios |
| Potencial de polarización | -0.85 voltios |
| Potencial natural tanque/suelo | -0.677 voltios |

Luego la corriente requerida para este tanque (TK30M9S), es:

$$I_{ra} = ((0.85 - 0.677) / (1.12 - 0.677)) * 34$$

$$I_{ra} = 13.3 \text{ Amp.}$$

Luego el número de ánodos para este tanque (TK30M9S) es:

$$N_a = I_{ra} / I_a$$

$$N_a = 13.3 / 0.081$$

$$N_a = 165 \text{ ánodos.}$$

Es importante mencionar que el sistema de protección catódica por ánodo de sacrificio, no es el adecuado por la gran cantidad de ánodos que se requieren para proteger dicha estructura en estudio; a continuación en la tabla 5.1.2, se muestra un resumen de los cálculos efectuados anteriormente para los 3 tanques .

TABLA 5.1.2

| | I_{ra} (Amp.) | I_a (Amp.) | T_a (años) | N_a | W_t (Tn.) |
|---------------------------|-----------------|--------------|--------------|-------|-------------|
| TK30M9S TS:5"x5"x31" | 13.30 | 0.081 | 37 | 165 | 74.843 |
| TK50M12S TS=5"x5"x31" | 20.70 | 0.081 | 37 | 256 | 116.120 |
| TK125M17S TS:5"x5"x31" | 46 | 0.081 | 37 | 568 | 257.640 |

Donde I_{ra} es la corriente requerida en Amp. y TS, son las medidas standar del ánodo de Magnesio del tipo AZ-63.

Sin embargo, en la tabla anterior se muestra para un tamaño standard de ánodo de magnesio, ya que para otros tamaños, el tiempo de vida y el número de ánodos son demasiado grandes, por lo que se busca el que presente una mejor propuesta para dicho sistema, y es el que se muestra en la tabla 5.1.2

Aunque el tiempo de vida sea largo, solo podrá compensar si se instala un menor número de ánodos. En general estos ánodos tienen como parámetros principales su consumo, eficiencia y corriente generada que depende de la resistividad del suelo.

5.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA

Objetivo: Proponer el diseño de un sistema de protección catódica por corriente impresa en los 3 tanques (TK30M9S, TK50M12S, TK125M17S) situados en Corrientes-Operaciones Selva.

Para la selección técnica del diseño óptimo, se considera dos alternativas; las que luego serán comparadas económicamente para decidir la más recomendable:

Diseño 1 Protección catódica por corriente impresa usando ánodos de grafito.

Diseño 2 Protección catódica por corriente impresa usando ánodos de ferro-silicio-cromo.

DISEÑO 1

Para el lecho de ánodos inerte; empleamos de grafito del tipo comercial CENTER TAP, empaquetados con un casing de 8" de diámetro por 64" de longitud, y cuyas características presentamos a continuación:

| | |
|-----------------------|----------|
| Dimensiones (pulg.) | 3" x 60" |
| Consumo (Kg/Amp.-año) | 0.43 |

| | |
|---|-------|
| Factor utilización | 0.85 |
| Peso del ánodo Kg. | 10 |
| Corriente ánodo I _{max.} (Amp) | 5 |
| Vida del ánodo años | 4 |
| Area del grafito (m ²) | 0.363 |

Cálculo del número de ánodos. (considerando siempre I_{máx.} por año de 5 Amp.)

Para A₁ : $N_{a1} = I_{ra1} / I_a = 34 \text{ amp} / 5 \text{ amp-ánodo}$
 $N_{a1} = 7 \text{ ánodos}$

Para A₂ : $N_{a2} = I_{ra2} / I_a = 46 \text{ amp} / 5 \text{ amp-ánodo}$
 $N_{a2} = 10 \text{ ánodos}$

Formula para calcular la vida útil de los ánodos:

$$T(\text{años}) = (N_a * W_a * FT) / (C_s * I_t)$$

N_a : Número de ánodos

FT : Factor de utilización

W_a : Peso del ánodo (Kg.)

C_s : Consumo (Kg / Amp-año)

I_t : Corriente total requerida (Amp.)

A continuación se presenta en la tabla 5.2.1, tanto para las áreas A₁ y A₂ a diferentes corrientes, el tiempo de vida de los ánodos y el número de ánodos que se requieren.

TABLA 5.2.1

| | la ánodo | C (Amp/m ²) | Na ánodo | T años |
|---|----------|-------------------------|----------|--------|
| A_1 1200 m ² 34 Amp. | 5.0 | 13.774 | 7 | 4 |
| | 2.0 | 5.510 | 17 | 10 |
| | 1.5 | 4.132 | 23 | 14 |
| | 1.0 | 2.754 | 34 | 20 |
| A_2 1633 m ² 46 Amp. | 5.0 | 13.774 | 10 | 4 |
| | 2.0 | 5.510 | 23 | 10 |
| | 1.0 | 2.754 | 46 | 20 |

El diseño de este proyecto hemos considerado para más de 15 años; por lo tanto según la tabla 5.2.1, escogeremos ánodos cuya salida es de 1 Amp., es decir 34 y 46 ánodos respectivamente.

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS ANODOS

Se calcula la resistencia del lecho de ánodos de la forma vertical y paralelo, usando la siguiente formula que se muestra a continuación:

$$R_{a/b} = A * B \dots \dots \dots \text{ec.5.2.1}$$

Donde:

$$A = (0.00521 * p) / (N_a * L)$$

$$B = 2.3 * \log(8 * L / D) - 1 + (2 * L / S) * 2.3 * \log(0.656 * N_a)$$

Luego :

$R_{a/b}$: Resistencia del lecho de ánodos. (ohm.)

p: Resistividad del suelo ohm-cm

Na: # de ánodos en paralelo y verticales

L: Longitud del ánodo en pies.

D: Diámetro del ánodo en pies.

S: Espacio entre los ánodos en pies

Luego la resistencia del lecho de ánodos para diferentes espaciamientos se muestra a continuación en la tabla 5.2.2

TABLA 5.2.2

| | R a/b ohm | N _a ánodo | I _a (Amp.) | S(pies) |
|--|-----------|----------------------|-----------------------|---------|
| A ₁ 1200 m ² 34 Amp. | 0.850 | 34 | 1.0 | 10 |
| | 0.714 | 34 | 1.0 | 14 |
| | 0.613 | 34 | 1.0 | 20 |
| | 0.565 | 34 | 1.0 | 25 |
| A ₂ 1633 m ² 46 Amp. | 0.663 | 46 | 1.0 | 10 |
| | 0.552 | 46 | 1.0 | 14 |
| | 0.470 | 46 | 1.0 | 20 |

RECTIFICADOR

En la tabla 5.2.3, se muestra los rectificadores que se propone para diferentes espaciamientos de los ánodos para cada área respectiva (A₁ y A₂) a proteger.

Se necesita conocer el voltaje necesario para vencer la resistencia total del circuito de protección catódica.

Se tiene que hallar las siguientes caídas de voltaje para vencer la resistencia del sistema de protección:

1. El voltaje total del lecho de ánodos. $V_{1a/b}$
(backfill/suelo)

2. El voltaje de los conductores eléctricos, para nuestro caso requerimos cable de 6 AWG, cuya capacidad de corriente es de 55 amp. y su resistividad es de 0.0013 ohm/mt. (V_c)
3. El voltaje de protección; para nuestro caso trabajamos con un voltaje de 0.95 voltios. (V_p)
4. El voltaje adicional que se da para la selección del rectificador es de 3 voltios. (V_{ad})

Luego :

$$V_{1t} = V_{1a/b} + V_c + V_p + V_{ad} \dots \dots \dots \text{ec.5.2.2}$$

Entonces:

De la tabla 5.2.2, para una I_a de 1 Amp del ánodo y un $S = 14$ pies, tenemos que el $R_{a/b}$ es de 0.714 ohm. para el área A_1 con corriente de protección igual a $I_{ra} = 34$ Amp.

Luego :

$$\begin{aligned} V_{1a/b} &= I_{ra} * R_{a/b} \\ V_{1a/b} &= 34 * 0.714 \\ V_{1a/b} &= 24.27 \text{ voltios.} \end{aligned}$$

Para el efecto de cálculo de este diseño, consideramos una caída de voltaje total en los cables a instalar de: 5% ($V_{a/b}$)

Luego en ec.5.2.2:

$$V_{1t} = 24.27 + 1.27 + 0.95 + 3$$

$$V_{1t} = 30.71 \text{ voltios.}$$

Luego el rectificador a seleccionar para este caso será :

Salida : 40 A.D.C. y 36 V.D.C.

Análogamente se calcula para los diferentes espaciamentos, como se muestra a continuación en la tabla 5.2.3:

TABLA 5.2.3

| | S (pies) | V_{1t} (Volt.) | V_{pr} (Volt.) | I_{pr} (Amp) |
|--------------------------------------|----------|------------------|------------------|----------------|
| A1 1200 m ² 34 Amp. | 10 | 34.30 | 40 | 40 |
| | 14 | 30.71 | 36 | 40 |
| | 20 | 25.83 | 30 | 40 |
| | 24 | 24.12 | 28 | 40 |
| A2 1633 m ² 46 Amp. | 10 | 35.97 | 42 | 50 |
| | 14 | 30.62 | 35 | 50 |
| | 20 | 26.65 | 32 | 50 |

V_{pr} y I_{pr} son las salidas del rectificador que se propone para el diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa en los fondos de tanques del área Corrientes-Operaciones Selva

Luego para el sistema de Protección catódica propuesto, se cuenta con rectificadores disponibles cuyas salidas máximas son de 50 Amp. y 50 Voltios; por lo tanto según la tabla 5.2.3, para diferentes espaciamentos (S) entre ánodos, todos cumplen con los requerimientos dados del rectificador.

Entonces se calcula en base a la longitud de la circunferencia del tanque y el número de ánodos, el espaciamento óptimo requerido (S_{op}), considerando que los ánodos para los 3 tanques están a una distancia ($d=7$ m.), y enterrados a 3.2 m., respecto al suelo.

Luego para el área (A_1) su diámetro es :

$$D_{A1} = (A1 * 4 / 3.1416)^{0.5}$$

$$D_{A1} = 39.1 \text{ mt.}$$

Luego el diámetro total del tanque es :

$$D_{t1} = D_{A1} + 2 * d$$

$$D_{t1} = 39.1 + 2 * 7$$

$$D_{t1} = 53.1 \text{ mt.}$$

Luego la longitud de la circunferencia del tanque es:

$$L_{A1} = 3.1416 * D_{t1}$$

$$L_{A1} = 3.1416 * 53.1$$

$$L_{A1} = 166.82 \text{ mt.}$$

Luego el espaciamento requerido es:

$$S_{op} = L_{A1} / N_a$$

$$S_{op} = 166.82 / 34$$

$$S_{op} = 4.91 \text{ mt.}$$

$$S_{op} = 16.10 \text{ pies.}$$

Análogamente se calcula para el área A_2 y tenemos :

$$Sop = 13.45 \text{ pies}$$

A continuación en la tabla 5.2.4. se muestra los espaciamientos requeridos para las respectivas áreas.

TABLA 5.2.4

| AREA (m ²) | Na ánodos | Sop (pies) |
|-------------------------|-----------|------------|
| A ₁ : 1200 | 34 | 16.10 |
| A ₂ : 1633 | 46 | 13.45 |

Entonces se calcula la resistencia del lecho de ánodos según ec.5.2.1, y el voltaje requerido (V_t), según la ec.5.2.2, para el espaciamiento determinado (Sop). Ver tabla 5.2.5:

TABLA 5.2.5

| AREA(mt ²) | Ra/b (ohm) | Sop (pies) | V _{1t} (volt.) | Vpr(volt.) |
|------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|
| A ₁ : 1200 | 0.670 | 16.10 | 27.87 | 33 |
| A ₂ : 1633 | 0.564 | 13.45 | 31.19 | 36 |

El rectificador adecuado que se propone para las 2 áreas se muestra en la tabla 5.2.6

TABLA 5.2.6

| AREA(m ²) | I _{ra} (Amp.) | V _{pr} (volt.) | I _{pr} (Amp.) | Na ánodos |
|-----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|-----------|
| A ₁ : 1200 | 34 | 33 | 40 | 34 |
| A ₂ : 1633 | 46 | 36 | 50 | 46 |

Si se aplica el mismo procedimiento utilizado, para determinar el número de ánodos en proporción a sus áreas de cada tanque que constituye el A1 y el único tanque A2, y se recalcula los valores de I_{ra}, Na y S_{op}, se obtiene los resultados que se muestra en la tabla 5.2.7.

TABLA 5.2.7

| | AREA(m ²) | I _{ra} (Amp.) | Na ánodos | S _{op} (pies) |
|-----------|-----------------------|------------------------|-----------|------------------------|
| TK30M9S | 467.6 | 13.3 | 14 | 28.30 |
| TK50M12S | 732.1 | 20.7 | 21 | 21.85 |
| TK125M17S | 1633 | 46 | 46 | 13.45 |

En forma análoga con la ec.5.2.1, se calcula el R a/b del lecho de ánodos y con la ec.5.2.2, se calcula el voltaje total de línea (V_t), para cada tanque respectivamente.

En la tabla 5.2.8, se muestra finalmente para cada tanque el voltaje y corriente adecuado para el rectificador.

TABLA 5.2.8

| | Sop(pies) | R a/b (ohm) | Vpr(volt.) | Ipr(Amp.) |
|---------------------------|-----------|-------------|------------|-----------|
| TK30M9S Ira=13.3 Amp. | 28.30 | 1.391 | 28 | 40 |
| TK50M12S Ira=20.7 Amp. | 21.85 | 0.905 | 28 | 40 |
| TK125M17S Ira=46 Amp. | 13.45 | 0.564 | 36 | 50 |

Con respecto a los 3 tanques, es importante mencionar que la distribución de los ánodos alrededor de cada tanque debe ser en forma simétrica, de tal manera que se tenga un mejor reparto de la corriente hacia la estructura a proteger.

Es importante mencionar, que el efecto de la resistencia y voltaje que ocurre sobre el sistema, utilizando ánodos de la forma horizontal se muestra en el apéndice 2.

También hay que señalar que en la tabla 5.2.8, se muestra el voltaje que se propone para el rectificador a utilizar con los tanques de 30M9S y 50M12S, este voltaje es el mismo para ambos, por lo tanto en el sistema eléctrico se encuentra conectados a un solo rectificador cuya salida máxima es de 50 A.D.C. y 50 V.D.C.

DISEÑO 2

Para el lecho de ánodos inerte , se emplea el de Fe-Si-Cr. (14% de silicio, 4% cromo y el resto fierro), empaquetados con un casing de 8" de diametro y 84" de longitud y cuyas características presentamos a continuación.

| | |
|-------------------------------------|----------|
| Dimensiones (pulg.) | 2" x 60" |
| Consumo (Kg/Amp.año) a Imáx. | 0.80 |
| Factor utilización | 0.85 |
| Peso del ánodo Kg. | 24 |
| Corriente ánodo Imáx. (Amp.) | 3 |
| Vida del ánodo años | 26 |
| Area del Fe-Si-Cr (m ²) | 0.242 |

Cálculo del número de ánodos. (considerando siempre Imáx. por año de 3 Amp.)

Para A₁ : $N_{a1} = I_{A1} / I_a = 34 \text{ amp} / 3 \text{ amp-ánodo}$
 $N_{a1} = 12 \text{ ánodos}$

Para A₂ : $N_{a2} = I_{A2} / I_a = 46 \text{ amp} / 3 \text{ amp-ánodo}$
 $N_{a2} = 16 \text{ ánodos}$

Formula para calcular la vida útil de los ánodos:

$$T(\text{años}) = (N_a * W_a * FT) / (C_s * I_t)$$

Donde:

N_a : Número de ánodos

FT : Factor de utilización

W_a : Peso del ánodo (Kg)

C_s . Consumo. (Kg/Amp.-año)

I_t : Corriente total requerida (Amp.)

A continuación se presenta en la tabla 5.2.9, tanto para las áreas A_1 y A_2 para diferentes corrientes, el tiempo de vida de los ánodos y el número de ánodos que se requieren.

TABLA 5.2.9

| | I_a ánodo | C (A/m ²) | N_a ánodo | T años |
|---|-------------|-------------------------|-------------|----------|
| A_1 1200 m ² 34 Amp. | 3.0 | 12.4 | 12 | 26 |
| | 2.0 | 8.27 | 17 | 39 |
| | 1.5 | 6.19 | 23 | 51 |
| A_2 1633 m ² 46 Amp. | 3.0 | 12.4 | 16 | 26 |
| | 2.0 | 8.27 | 23 | 39 |
| | 1.5 | 6.19 | 31 | 51 |

El diseño de este proyecto es considerado para más de 30 años: por lo tanto según la tabla 5.2.9, escogemos ánodos cuya salida es de 2 Amp., es decir 17 y 23 ánodos respectivamente.

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LOS ANODOS

Se calcula la resistencia del lecho de ánodos de la forma vertical y paralelo, según la ec.(5.2.1), mencionado en el diseño 1, y que se muestra a continuación en la tabla 5.2.10

TABLA 5.2.10

| | R a/b ohm | N _a ánodo | I _a (Amp.) | S (pies) |
|--|-----------|----------------------|-----------------------|----------|
| A ₁ 1200 m ² 34 Amp. | 1.277 | 17 | 2.0 | 14 |
| | 1.120 | 17 | 2.0 | 20 |
| | 1.045 | 17 | 2.0 | 25 |
| A ₂ 1633 m ² 46 Amp. | 0.993 | 23 | 2.0 | 14 |
| | 0.861 | 23 | 2.0 | 20 |
| | 0.800 | 23 | 2.0 | 25 |

RECTIFICADOR

En la tabla 5.2.11, se muestra los rectificadores que se propone para diferentes espaciamientos de los ánodos para cada área respectiva (A₁ y A₂) a proteger.

Se necesita conocer el voltaje necesario para vencer la resistencia total del circuito de protección catódica.

Se tiene que hallar las siguientes caídas de voltaje para vencer la resistencia del sistema de protección:

1. El voltaje total del lecho de ánodos. $V_{2a/b}$
(backfill/suelo)
2. El voltaje de los conductores eléctricos, para nuestro caso requerimos cable de 6 AWG, cuya capacidad de corriente es de 55 amp. y su resistividad es de 0.0013 ohm/mt. (V_c)
3. El voltaje de protección para nuestro caso trabajaremos con un voltaje de 0.95 voltios. (V_p)
4. El voltaje adicional que se dá para la selección del rectificador es de 3 voltios. (V_{ad})

Luego :

$$V_{2t} = V_{2a/b} + V_c + V_p + V_{ad} \dots \dots \dots \text{ec.5.2.3}$$

De la tabla 5.2.10. para una I_a de 2 Amp del ánodo y un $S = 25$ pies, tenemos que el $R_{a/b}$ es de 1.045 ohm. para el área A_1 con corriente de protección igual a $I_{ra} = 34$ Amp.

Luego :

$$V_{2a/b} = I_{ra} * R_{a/b}$$

Reemplazando datos :

$$V_{2a/b} = 34 * 1.045$$

$$V_{2a/b} = 35.53 \text{ voltios.}$$

Para el efecto de cálculo de este diseño, se considera una caída de voltaje total en los cables a instalar de: 5% ($V_{a/b}$)

Luego en ec.5.2.3:

$$V_{2t} = 35.53 + 1.77 + 0.95 + 3$$

$$V_{2t} = 41.25 \text{ voltios.}$$

Luego el rectificador a seleccionar para este caso es:

Salida : 40 A.D.C. y 48 V.D.C.

Análogamente se calcula para los diferentes espaciamentos, como se muestra a continuación en la tabla 5.2.11

TABLA 5.2.11

| | S(pies) | V_{2t} (volt.) | V_{pr} (volt.) | I_{pr} (Amp) |
|---|---------|------------------|------------------|----------------|
| A_1 1199 m ² 34 Amp. | 14 | 49.43 | 57 | 40 |
| | 20 | 43.93 | 51 | 40 |
| | 25 | 41.25 | 48 | 40 |
| A_2 1633 m ² 46 Anp. | 14 | 51.92 | 60 | 50 |
| | 20 | 45.95 | 53 | 50 |
| | 25 | 42.59 | 49 | 50 |

V_{pr} y I_{pr} son las salidas del rectificador que se propone para el diseño del sistema de protección catódica por corriente impresa en los fondos de tanques del área Corrientes-Operaciones Selva.

Luego para el sistema de Protección catódica propuesto, se tiene rectificadores cuyas salidas máximas son de 50 amp. y 50 voltios de salida; por lo tanto según la tabla 5.2.11, para diferentes espaciamentos (S) entre ánodos, sólo para S=25 pies, cumplen con los requerimientos dados del rectificador.

Entonces se calcula en base a la longitud de la circunferencia del tanque y el número de ánodos el espaciamento óptimo requerido (S_{op}), considerando que los ánodos para los 3 tanques están a una distancia ($d=7$ m.) y enterrados a 3.2 mt. respecto al suelo.

Luego para el área (A_1) según el diseño 1, tenemos que la longitud de la circunferencia del tanques es: 166.82 m.

Luego el espaciamento requerido es:

$$Sop = L_{A1} / Na$$

$$Sop = 166.82 / 17$$

$$Sop = 9.81 \text{ mt.}$$

$$Sop = 32.17 \text{ pies.}$$

Análogamente se calcula para el área A_2 y tenemos :

$$Sop = 26.29 \text{ pies}$$

A continuación en la tabla 5.2.12, se muestra los espaciamentos requeridos para las respectivas áreas.

TABLA 5.2.12

| AREA (m ²) | Na ánodos | Sop (pies) |
|-------------------------|-----------|------------|
| A ₁ : 1200 | 17 | 32.17 |
| A ₂ : 1633 | 23 | 26.69 |

Entonces se calcula la resistencia del lecho de ánodos según (1), para dicho espaciamento requerido (Sop), como se muestra en la tabla 5.2.13; y por lo tanto el voltaje adecuado que se propone para la selección del rectificador se muestra en la tabla 5.2.14

TABLA 5.2.13

| AREA (m ²) | Ra/b (ohm) | Sop (pies) | V _{2t} (volt.) | Vpr(volt.) |
|------------------------|------------|------------|-------------------------|------------|
| A ₁ :1200 | 0.979 | 32.17 | 38.90 | 45 |
| A ₂ :1633 | 0.784 | 26.69 | 41.81 | 48 |

TABLA 5.2.14

| AREA (m ²) | Ira(Amp.) | Vpr(volt.) | Ipr(Amp.) | Na ánodos |
|------------------------|-----------|------------|-----------|-----------|
| A ₁ :1200 | 34 | 45 | 40 | 17 |
| A ₂ :1633 | 46 | 48 | 50 | 23 |

Si se aplica el mismo procedimiento utilizado, para determinar el número de ánodos en proporción a sus áreas de cada tanque que constituye el A₁ y el único tanque A₂, se recalcula los valores de Ira, Na y Sop, que se muestra en la tabla 5.2.15

TABLA 5.2.15

| | AREA (m ²) | Ira(Amp.) | Na ánodos | Sop(pies) |
|-----------|------------------------|-----------|-----------|-----------|
| TK30M9S | 467.6 | 13.30 | 7 | 56.53 |
| TK50M12S | 732.1 | 20.70 | 11 | 41.71 |
| TK125M17S | 1633 | 46 | 23 | 26.69 |

En forma análoga con la ec.5.2.1. se calcula el $R_{a/b}$ del lecho de ánodos y con la ec.5.2.3. se calcula el voltaje total de línea (V_t), para cada tanque respectivamente.

En la tabla 5.2.16. se muestra finalmente para cada tanque el voltaje y corriente adecuado para el rectificador.

TABLA 5.2.16

| | Sop(pies) | $R_{a/b}$ (ohm) | V_{pr} (volt.) | I_{pr} (Amp.) |
|--------------------------------|-----------|-----------------|------------------|-----------------|
| TK30M9S $I_{ra}=13.3$ Amp. | 56.53 | 2.022 | 40 | 40 |
| TK50M12S $I_{ra}=20.7$ Amp. | 41.71 | 1.383 | 40 | 40 |
| TK125M17S $I_{ra}=46$ Amp. | 26.69 | 0.784 | 48 | 50 |

Con respecto a los 3 tanques. es importante mencionar que la distribución de los ánodos alrededor de cada tanque debe ser en forma simétrica, de tal manera que se tenga un mejor reparto de la corriente hacia la estructura a proteger.

También hay que señalar que en la tabla 5.2.16. se muestra el voltaje que se propone para el rectificador a utilizar con los tanques de 30M9S y 50M12S. este voltaje es el mismo para ambos, por lo tanto en el sistema eléctrico se encuentra conectados a un solo rectificador cuya salida máxima es de 50 A.D.C. y 50 V.D.C.

Cálculo de la corriente requerida para las estructuras metálicas cercanas al patio de Tanques del Area-Corrientes.

El objetivo de realizar este cálculo sobre las tuberías enterradas y tanques de Diesel cercanos a los tanques de almacenamiento de crudo, es con la finalidad de conocer la cantidad de corriente que requieren dichas tuberías, y aprovechar el sistema de protección a los tanques de almacenamiento para proteger dichas tuberías.

Es importante mencionar que para los tanques de Diesel, debido al efecto área sobre la corriente requerida, se hará el respectivo puente eléctrico.

Para ambos casos (tuberías enterradas y tanques de Diesel), es necesario protegerlos, con la finalidad de que no se produzcan futuras corrientes erráticas.

A continuación se presenta en la tabla 5.2.17, la descripción de las tuberías:

TABLA 5.2.17

| Tubería | Contenido | D(pulg.) | L(mt.) | A(m ²) |
|---------|-----------|----------|---------|--------------------|
| 1 | Crudo | 24 | 185 | 354.4 |
| 1 | Crudo | 16 | 74 | 94.5 |
| 1 | Crudo | 10 | 166 | 102.5 |
| 1 | Espuma | 8 | 93 | 59.4 |
| 1 | Espuma | 8 | 49 | 31.3 |
| 1 | Espuma | 8 | 59 | 37.7 |
| 1 | Espuma | 8 | 125 | 79.8 |

Luego el área total es:

$$A_3 = 789.62 \text{ mt}^2$$

Considerando que las tuberías de acero están con un revestimiento normal (pintura), de tablas ó de dato del fabricante, para efecto de diseño, consideramos una densidad de corriente igual a 0.1 mAmp./m^2

Pero considerando que dichas tuberías se encuentran en un suelo húmedo y cuya densidad de corriente ha sido calculado anteriormente, y es : 28 mAmp/m^2 ; entonces se pasará a calcular una densidad de corriente promedio, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones :

1. Deterioro de la tubería (pintura) al momento de instalarlo, igual a 2%
2. Deterioro de la pintura después de ser instalado: 5%

Luego en total sería de un 7%, que se considerara para efecto del cálculo de corriente de protección.

Entonces el cálculo de la densidad de corriente promedio para esta tubería es:

$$D_p (\text{mAmp/m}^2) = 0.07*28 + 0.93*0.1$$

$$D_p (\text{mApm/m}^2) = 2.05$$

Luego la corriente requerida para el área total de las tuberías es:

$$I_{A3} = Dp * A_3$$

$$I_{A3} = 2.05 \text{ mAmp/m}^2 * 789.62 \text{ m}^2$$

$$I_{A3} = 1.62 \text{ amp.}$$

A continuación en la tabla 5.2.18, se presenta los requerimientos de corriente para diferentes deterioros de la tubería:

TABLA 5.2.18

| | Dt(3%) | Dt(7%) | Dt(10%) |
|------------------------|--------|--------|---------|
| Dp (A/m ²) | 0.937 | 2.05 | 2.89 |
| I _{A3} (Amp) | 0.740 | 1.62 | 2.28 |
| Na | 1 | 2 | 3 |

Donde Dt(%), es el deterioro total que sufre la tubería.

Luego para las tuberías enterradas se colocan tres ánodos de grafito del tipo CENTER TAP, de esta manera el sistema de protección catódica por corriente impresa no tendrá problemas futuros con las estructuras metálicas cercanas a los tanques a proteger

Luego se muestra en la tabla 5.2.19, el voltaje y amperaje que se propone para el rectificador, para las 2 alternativas de diseño; incluyendo el amperaje generado por los 3 ánodos para las tuberías enterradas.

TABLA 5.2.19

| TIPOS | ANODOS DE GRAFITO | | ANODOS DE Fe-Si-Cr. | |
|---|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | V _{pr} (volt) | I _{pr} (Amp.) | V _{pr} (volt) | I _{pr} (Amp.) |
| -TK30M9S I _{ra} =13.3 Amp. | 30 | 42 | 42 | 42 |
| -TK50M12S I _{ra} =20.7 Amp. | 30 | 42 | 42 | 42 |
| -TK125M17S I _{ra} =46 aMP. | 36 | 50 | 46 | 50 |

Los detalles del diseño de protección catódica, como la distribución é instalación de los ánodos y la instalación de los rectificadores, sobre el patio de tanques del Area Corrientes - Trompeteros, se muestra en la apendice 3

5.3 SELECCION TECNICA DEL DISEÑO PROPUESTO.

En la presente selección, hay que diferenciar 2 casos principales que son :

- Selección técnica del diseño óptimo.
- Selección técnica real del diseño.

Selección técnica del diseño óptimo.

Como se muestra en el capítulo anterior de las 2 alternativas que se propone, según el diseño técnico de ingeniería que se

realiza, la alternativa AT2.. es la que se propone debido a la eficiencia que ofrece sus ánodos y que se refleja en un menor rate de consumo a diferencia de los ánodos que se usa en la alternativa AT1, dando así mayor vida útil a dichos tanques y además se requiere menor número de ánodos, el cual se tiene menor costo de materiales y de instalación, lo que a diferencia de la otra alternativa AT1, se tiene una menor inversión, y esto se refleja en un beneficio para la empresa PETROPERU. S.A.

Selección técnica real del diseño

En esta selección se tiene en cuenta un papel importante que son los recursos materiales con que cuenta la empresa PETROPERU S.A..

Para el presente diseño se tiene en almacen un excedente de ánodos de grafito del tipo CENTER TAP, y que cubren con los requerimientos exigidos por esta alternativa; además se tiene 2 rectificadores con salidas de 50 A.D.C y 50 V.D.C., y que más adelante en el capítulo VII, se ve que la diferencia con respecto a la rentabilidad que ofrece ambos proyectos no difiere en mucho; por lo tanto la alternativa real que se propone es AT1, y cuando se ponga en marcha dicho sistema de protección catódica será un beneficio para la empresa PETROPERU S.A.; el cual alarga de esta forma la vida útil de sus tanques .

5.4 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA EL SISTEMA PROPUESTO

La finalidad de contar con un adecuado programa de mantenimiento, para el sistema de protección catódica propuesto, es para que dicho sistema siga operando a niveles óptimos de protección. De esta forma la inversión hecha para este diseño sea un gasto útil y con el tiempo se convierte a su vez en un beneficio para la empresa PETROPERU S.A.

A continuación se muestra en breve un plan adecuado de mantenimiento é inspección para el sistema de protección catódica propuesto:

Inspecciones de prueba

Circuito abierto

1. Efectuar una medición del potencial en el tanque
2. Efectuar una medición de potencial del lecho de ánodos.

Circuito cerrado

1. Efectuar una medición del potencial en el tanque.
2. Efectuar una medición de potencial del lecho de ánodos.
3. Abrir el circuito y efectuar una medición de la intensidad de corriente
4. Prueba de la rigidez dieléctrica del aceite del rectificador.

Instrucciones para el mantenimiento

Mensualmente.

1. Chequear el potencial entre la estructura y el electrolito, con un electrodo de referencia de CU/SO₄CU
2. Chequear la magnitud de la intensidad de corriente.
3. Chequear todos los contactos eléctricos y aislamientos del sistema .

Anualmente.

1. Chequear todas las conexiones de cables , conexiones y soportes de las conexiones de la caja de control.
2. Limpieza general de la caja de control.
3. Inspección visual del patio de tanques.
4. Inspección general del rectificador.
5. Reemplazar los ánodos, cuando se hayan consumido en un 85%

C A P I T U L O V I

E V A L U A C I O N E C O N O M I C A

6.1 INVERSION DEL PROYECTO.

Para el análisis de costos se agrupa los sistemas de protección catódica para los 3 tanques. en un solo costo y luego se analiza las 3 alternativas de diseño que se propone:

AT1: Diseño de protección catódica por corriente impresa usando ánodos de Grafito

AT2: Diseño de protección catódica por corriente impresa usando ánodos de Ferrosilicio-cromo.

AT3: Cambio de plancha del fondo del tanque.

Es importante mencionar que la evaluación económica por ánodo de sacrificio no se efectúa porque el sistema presenta inconvenientes técnicos como se señala en el capítulo anterior.

6.1.1 Costos de Equipos y Materiales.

A continuación se muestra el costo de los equipos adquiridos adquiridos para las alternativas 1.2 y 3, en las tablas 6.1.1, 6.1.2 y 6.1.3 respectivamente.

TABLA 6.1.1-AT1

| CANTIDAD | EQUIPO/MATERIAL | DESCRIPCION | COSTO(U\$) |
|---------------|--------------------------------------|--|-------------|
| 2 u. | Rectificador de 50 voltios y 50 Amp. | Sumergidos en aceite, a prueba de explosión, entrada A.C.:220 volt. 60 ciclos y 3 fases. . | c/u: 3000 |
| | | TOTAL : | 6000 |
| 84 u. | MATERIALES | Anodos del tipo CENTER TAP de 3"x60" empaquetados con un casing de 8"x 84" de longitud. | c/u: 165.45 |
| | | TOTAL : | 13898 |
| 5 Tn. | MATERIALES | Backfill (relleno) para los ánodos empaquetados de grafito. | c/Tn:200 |
| | | TOTAL : | 1000 |
| 800 m. | MATERIALES | Cable electrico 6 AWG-del tipo NYY . | c/m: 1.5 |
| | | TOTAL : | 1200 |
| 4 u. | MATERIALES | Soldadura Cadwell | c/u: 22 |
| | | TOTAL : | 88 |
| 3 u. | MATERIALES | Electrodo Cu-CuSO4 | c/u: 100 |
| | | TOTAL : | 300 |
| MONTO TOTAL : | | | 22486 |

TABLA 6.1.2. -AT2

| CANTIDAD | EQUIPO/MATERIAL | DESCRIPCION | COSTO(U\$) |
|--------------|--------------------------------------|---|---------------------|
| 2 u. | Rectificador de 50 voltios y 50 Amp. | Sumergidos en aceite, a prueba de explosión con placa de selenio, entrada A.C.:220 volt. 60 ciclos y 3 fases. | c/u: 3000 |
| | | TOTAL : | 6000 |
| 44 u. | MATERIALES | Anodos Comerciales de Fe-Si-Cr. de 2"x60". | c/u:104.43 |
| | | TOTAL : | 4595 |
| 10 Tn. | MATERIALES | Backfill (Relleno) para dichos ánodos con un casing de 8"x84". | c/Tn:200 |
| | | TOTAL : | 2000 |
| 800 m. | MATERIALES | Cable electrico 6 AWG del tipo NYN | c/m: 1.5 |
| | | TOTAL : | 1200 |
| 4 u. 3 u. | MATERIALES MATERIALES | Soldadura Cadwell Electrodo Cu-CuSO4 | c/u: 22 c/u: 100 |
| | | TOTAL : | 388 |
| | | MONTO TOTAL : | 14183 |

TABLA 6.1.3. -AT3

| CANTIDAD | EQUIPO/MATERIAL | DESCRIPCION | COSTO(U\$) |
|----------|-----------------|--|------------|
| 318 u. | MATERIALES. | Planchas 6'x16', espesor 1/4" acero ASTM A-283 | c/u: 367 |
| | | TOTAL: | 116706 |
| 2000 Kg | MATERIALES. | Soldadura 6020 (5/32") | c/u: 6.174 |
| | | TOTAL: | 12348 |
| | | MONTO TOTAL : | 129054 |

6.1.2 Costos de Instalación y Operación.

A continuación se muestra en las siguientes tablas, los costos de instalación y operación para las alternativas AT1, AT2 y AT3, respectivamente.

TABLA 6.1.4.-AT1

| COSTOS DE INSTALACION | COSTO TOTAL(U\$) |
|---------------------------------|------------------|
| Excavación de zanjas | 1508 |
| Instalación de ánodos | 1154 |
| Instalación del rectificador | 685 |
| Tendido de cables y conexiones | 633 |
| Relleno y compactación de zanja | 220 |
| Gastos complementarios | 500 |
| Monto Total: | 4700 |

TABLA 6.1.5.-AT2

| COSTOS DE INSTALACION | COSTO TOTAL(U\$) |
|---------------------------------|------------------|
| Excavación de zanjas | 1398 |
| Instalación de ánodos | 982 |
| Instalación del rectificador | 685 |
| Tendido de cables y conexiones | 633 |
| Relleno y compactación de zanja | 112 |
| Gastos complementarios | 500 |
| Monto Total: | 4310 |

TABLA 6.1.6.-AT3

| COSTOS DE INSTALACION | COSTO TOTAL(U\$) |
|---|------------------|
| Preparación del piso del tanque. | 4200 |
| Corte y acomodación de planchas. | 6950 |
| Apuntalado y Soldadura. | 7500 |
| Control y calidad de Soldadura. | 3000 |
| Pruebas de vacío e hidrostática del tanque. | 2600 |
| Gastos complementarios. | 750 |
| Monto Total (c/5 años): | 25000 |

TABLA 6.1.7.-AT1

| COSTOS DE OPERACION | COSTO TOTAL (U\$ /AÑO) |
|--------------------------|---------------------------|
| Mantenimiento en general | 700 |
| Energía eléctrica | 1955 |
| Monto Total: | 2655 |

TABLA 6.1.9.-AT2

| COSTOS DE OPERACION | COSTO TOTAL (U\$ /AÑO) |
|--------------------------|---------------------------|
| Mantenimiento en general | 700 |
| Energía eléctrica | 2692 |
| Monto Total: | 3392 |

Luego la inversión total para ambos diseños:

Inversión Total: Costos Total Equipo/Material + Costos Instalación

AT1 : Inversión total: \$22496 + \$4700 = \$27186

AT2 : Inversión total: \$14183 + \$4310 = \$18493

AT3 : Inversión total: \$129054 + \$75000 = \$204054

* Es importante mencionar que para la alternativa AT3, los costos de mantenimiento son \$1000.; y que la inversión total que se tiene es para un periodo de 15 años.

6.2 Rentabilidad del Proyecto.

La finalidad de implementar este sistema de protección catódica es el de alargar la vida útil de estos tanques, para un periodo más de 15 años; evitando de esta forma el cambio de la plancha de la base del tanque.

Es importante mencionar que el beneficio que tendrá la empresa PETROPERU S.A., con este sistema de protección catódica a cabo de 15 años se muestra a continuación en la tabla 6.2.1.

TABLA 6.2.1

| | D (m.) | A (m ²) | W _{tk} (Kg) | C _{tk} (\$) |
|-------------|--------|---------------------|----------------------|----------------------|
| TK30M9S | 24.40 | 467.60 | 23493 | 16210.2 |
| TK50M12S | 30.50 | 732.10 | 37000 | 25530.0 |
| TK125M17S | 45.60 | 1633.1 | 84054 | 57997.3 |
| C tot. mat. | | | | 99737.46 |

Donde W_{tk} y C_{tk} es el peso de la base del tanque y su respectivo costo.

Además:

Costo del material (\$ / Kg.) : 0.69

Peso del material (Kg. / m²) : 50.24

Costo de instalación (\$ / Kg.) : 0.75

El Costo de instalación de la base del tanque :

C tot. inst. = 0.75 \$/Kg.* (23493 + 37000 + 84054)

| |
|-----------------------------|
| C tot. inst. = \$ 108410.25 |
|-----------------------------|

El costo total es :

C total = C tot. mat. + C tot. inst.

C total = \$ 99737.46 + 108410.25

| |
|------------------------|
| C total = \$ 208147.71 |
|------------------------|

Luego dicho costo total se convierte en un beneficio para la empresa PETROPERU S.A. si se instala el sistema de protección catódica que se propone. A continuación se muestra en las siguientes tablas la rentabilidad que ofrecería las tres alternativas que se propone:

TABLA 6.2.2.-AT1
(MU\$)

| ANO | INVERSION | INGRESOS | COSTOS OPERATIVOS | DEPRECIACION | INGRESOS DESP. IMP. | FNF |
|-----|-----------|----------|-------------------|--------------|---------------------|----------|
| 0 | (27.186) | | | | | (27.186) |
| 1 | | 62.407 | 2.655 | 5.437 | 24.437 | 29.674 |
| 2 | | 72.817 | 2.798 | 5.437 | 29.062 | 34.499 |
| 3 | | 63.227 | 2.931 | 5.437 | 33.686 | 39.123 |
| 4 | | 93.637 | 3.064 | 5.437 | 36.311 | 43.748 |
| 5 | | 104.047 | 3.197 | 5.437 | 42.935 | 46.372 |
| 6 | | 114.457 | 3.330 | 5.437 | 47.561 | 52.998 |
| 7 | | 124.667 | 3.463 | 5.437 | 52.185 | 57.622 |
| 8 | | 135.277 | 3.596 | 5.437 | 56.809 | 62.246 |
| 9 | | 145.667 | 3.729 | 5.437 | 61.434 | 66.871 |
| 10 | | 156.097 | 3.862 | 5.437 | 66.059 | 71.496 |
| 11 | | 166.507 | 3.995 | 5.437 | 70.684 | 76.120 |
| 12 | | 176.917 | 4.128 | 5.437 | 75.308 | 80.745 |
| 13 | | 187.327 | 4.261 | 5.437 | 79.933 | 85.370 |
| 14 | | 197.737 | 4.394 | 5.437 | 84.557 | 89.995 |
| 15 | | 208.147 | 4.527 | 5.437 | 89.182 | 94.619 |

TIR = 122.35% VAN 20% = 198.085 MU\$ RETORNO DE INVERSION: 11 MESES

TABLA 6.2.3.-AT2
(MU\$)

| ANO | INVERSION | INGRESOS | COSTOS OPERATIVOS | DEPRECIACION | INGRESOS DESP. IMP. | FNF |
|-----|-----------|----------|----------------------|--------------|------------------------|----------|
| 0 | (18.493) | | | | | (18.493) |
| 1 | | 62.407 | 3.392 | 3.698 | 24.893 | 26.591 |
| 2 | | 72.817 | 3.562 | 3.698 | 29.501 | 33.198 |
| 3 | | 83.227 | 3.740 | 3.698 | 34.105 | 37.803 |
| 4 | | 93.637 | 3.927 | 3.698 | 38.705 | 42.403 |
| 5 | | 104.047 | 4.123 | 3.698 | 43.302 | 46.499 |
| 6 | | 114.457 | 4.329 | 3.698 | 47.894 | 51.592 |
| 7 | | 124.867 | 4.545 | 3.698 | 52.481 | 56.178 |
| 8 | | 135.277 | 4.772 | 3.698 | 57.063 | 60.761 |
| 9 | | 145.687 | 5.012 | 3.698 | 61.639 | 65.337 |
| 10 | | 156.097 | 5.263 | 3.698 | 66.211 | 69.909 |
| 11 | | 166.507 | 5.526 | 3.698 | 70.777 | 74.475 |
| 12 | | 176.917 | 5.802 | 3.698 | 75.337 | 79.035 |
| 13 | | 187.327 | 6.092 | 3.698 | 79.892 | 83.589 |
| 14 | | 197.737 | 6.396 | 3.698 | 84.439 | 88.137 |
| 15 | | 208.147 | 6.716 | 3.698 | 88.979 | 92.677 |

TIR = 124.40% VAN 20% = 200.216 MU\$ RETORNO DE INVERSION: 8 MESES

TABLA 6.2.4.-AT3
(MU\$)

| ANO | INVERSION | INGRESOS | COSTOS OPERATIVOS | DEPRECIACION | INGRESOS DESP. IMP. | FNF |
|-----|-----------|----------|----------------------|--------------|------------------------|----------|
| 0 | (204.054) | | | | | (204.05) |
| 1 | | 62.407 | 1.000 | 40.820 | 9.264 | 50.084 |
| 2 | | 72.817 | 1.100 | 40.820 | 13.903 | 54.723 |
| 3 | | 83.227 | 1.200 | 40.820 | 18.543 | 59.363 |
| 4 | | 93.637 | 1.300 | 40.820 | 23.137 | 63.957 |
| 5 | | 104.047 | 1.400 | 40.820 | 27.777 | 68.597 |
| 6 | | 114.457 | 1.500 | 40.820 | 32.462 | 73.282 |
| 7 | | 124.867 | 1.600 | 40.820 | 37.102 | 77.922 |
| 8 | | 135.277 | 1.700 | 40.820 | 41.741 | 82.561 |
| 9 | | 145.687 | 1.800 | 40.820 | 46.380 | 87.200 |
| 10 | | 156.097 | 1.900 | 40.820 | 51.019 | 91.839 |
| 11 | | 166.507 | 2.000 | 40.820 | 55.659 | 96.479 |
| 12 | | 176.917 | 2.100 | 40.820 | 60.298 | 101.118 |
| 13 | | 187.327 | 2.200 | 40.820 | 64.938 | 105.758 |
| 14 | | 197.737 | 2.300 | 40.820 | 69.577 | 110.397 |
| 15 | | 208.147 | 2.400 | 40.820 | 74.217 | 115.037 |

TIR = 30.75% VAN 20% = 115.947 MU\$ RETORNO DE INVERSION: 49 MESES

Lineamientos Económicos:

- Ingresos : Valor de una plancha nueva para la base del tanque, que se evita cambiar cada 5 años.
- Costos Operativos : Gastos por mantenimiento del sistema; se considera un incremento anual del 10%.
- Depreciación : Lineal en 15 años.
- Impuestos : 55 %.

A continuación se muestra en la siguiente tabla comparativa los resultados obtenidos de la evaluación económica para cada alternativa.

TABLA 6.2.5.

| | VAN(MU\$) | TIR(%) | RETORNO DE INVERSION |
|-----|-----------|--------|----------------------|
| AT1 | 198.085 | 122.35 | 11 Meses |
| AT2 | 202.216 | 124.40 | 8 Meses |
| AT3 | 115.947 | 30.75 | 49 Meses |

C A P I T U L O V I I

C O N C L U S I O N E S Y R E C O M E N D A C I O N E S .

Lineamientos Económicos:

- Ingresos : Valor de una plancha nueva para la base del tanque, que se evita cambiar cada 5 años.
- Costos Operativos : Gastos por mantenimiento del sistema; se considera un incremento anual del 10%.
- Depreciación : Lineal en 15 años.
- Impuestos : 55 %.

A continuación se muestra en la siguiente tabla comparativa los resultados obtenidos de la evaluación económica para cada alternativa.

TABLA 6.2.5.

| | VAN(MU\$) | TIR(%) | RETORNO DE INVERSION |
|-----|-----------|--------|----------------------|
| AT1 | 198.085 | 122.35 | 11 Meses |
| AT2 | 202.216 | 124.40 | 8 Meses |
| AT3 | 115.947 | 30.75 | 49 Meses |

7.1. CONCLUSIONES.

1. Al aplicarse la protección catódica con corriente impresa cuyo diseño ha sido elaborado en este proyecto, se conseguirá alargar la vida útil del fondo de los tanques del Area Corrientes - Trompeteros, a un estimado mínimo de diez años, evitando las pérdidas diferidas de producción en esta importante área productiva de la selva y reduciendo los costos operativos.
2. Para la obtención de valores confiables de la densidad de corriente requerida para la protección del fondo externo de los tanques, Se aplica el método gráfico: (V (Volt.) vs I (Amp.)). Sin embargo se ha visto la necesidad de confirmar estos resultados utilizando métodos analíticos como se muestra en el apendice 1. Esta verificación es de vital importancia, debido a que es el parámetro principal en el diseño de protección catódica.
3. Se ha considerado la distribución de los ánodos en la posición vertical y en forma simétrica alrededor del tanque, por presentar una mejor eficiencia y distribución de corriente para la estructura a proteger, a diferencia del uso de la posición horizontal que presentan una alta resistencia eléctrica en el lecho de ánodos, y en consecuencia requiere un alto voltaje, el cual influye en el diseño del rectificador, como se muestra en el apendice 2.

4. De los sistemas de protección catódica estudiados durante el presente trabajo, el más adecuado desde el punto de vista técnico y económico, es el sistema con ánodos de ferrosilicio cromo. Sin embargo para este caso se usa el sistema con ánodo de grafito por disponibilidad de éstos en la empresa PETROLEOS DEL PERU .

5. El proyecto de instalación del sistema de protección catódica por corriente impresa con ánodos de grafito, tiene una alta rentabilidad, expresada en los siguientes indicadores económicos:

TIR : 122 %

VAN 20% : 198 MUS\$

RET. de INV. : 11 Meses

6. De los cálculos efectuados para el dimensionamiento del rectificador a utilizar en el sistema de protección catódica por corriente impresa en tanques de almacenamiento, es conveniente involucrar todas las instalaciones metálicas cercanas a la estructura a proteger, debido al grado de dificultad que presentaría el aislamiento de los mismos.

7.2. RECOMENDACIONES.

1. Se recomienda la pronta instalación del sistema de protección por corriente impresa para los tanques en estudio, por ser la alternativa de solución técnicamente más apropiada y económicamente rentable.
2. Cuando se realiza las mediciones de corriente que requieren dichos tanques, se debe tener el debido cuidado en llegar a polarizar la estructura del tanque a un valor constante, ya que podría traer como consecuencia una sobretensión de hidrógeno, que alteraría el cálculo de la densidad de corriente, incrementando la cantidad real de corriente. Asimismo se recomienda abarcar dicha medición en varios puntos del tanque y tener como valor límite de sobreprotección de 1.5 voltios.
3. Según lo desarrollado en la evaluación técnica del presente proyecto, en las futuras instalaciones de sistemas de protección catódica para tanques, la aplicación de ánodos de ferrosilicio-cromo, debería ser en la posición vertical y simétrica alrededor del mismo.
4. Para el caso de diseño de protección catódica con ánodos cuya posición angular (45° con respecto al suelo), ha dado buenos resultados de protección, principalmente en el centro

del tanque, solo es recomendable en terrenos que presenten estratos uniformes y medios de corrosión constantes. Si bien éste sistema aún no se ha extendido en nuestro medio, es necesario continuar las investigaciones.

5. Se debe utilizar rectificadores de alta capacidad para la protección de áreas extensas, de esta forma reducir los costos de operación y mantenimiento que originan rectificadores de baja capacidad.
6. Una vez instalado el sistema, efectuar mediciones periódicas de los parámetros principales de diseño y de los empalmes y soldaduras, tanto en los tanques como en los lechos de ánodos, y de esta forma evitar problemas en la medición de voltaje y amperaje en el rectificador.

APENDICE 1

CALCULO DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE UTILIZANDO EL METODO ANALITICO

A continuación a partir del criterio de cálculo que se describió en el capítulo 2.4. se toma como referencia los datos proporcionados de las pruebas de campo realizadas para los tres tanques, y se obtiene los siguientes tablas que se muestran a continuación:

TABLA 1
TK30M9S

| Vi (volt.) Ref. C | Rc (ohm) | Ipc (Amp.) |
|------------------------------|-----------------|-------------------|
| -0.699 | 0.013 | 12.80 |
| -0.712 | 0.014 | 12.70 |
| -0.714 | 0.014 | 12.70 |
| -0.725 | 0.014 | 12.70 |
| -0.736 | 0.016 | 12.20 |
| -0.737 | 0.014 | 12.20 |
| -0.829 | 0.013 | 13.40 |
| -0.849 | 0.014 | 12.60 |
| -0.856 | 0.014 | 12.80 |
| -0.907 | 0.0146 | 12.50 |
| -0.954 | 0.015 | 12.10 |

TABLA 2
TK50M12S

| Vi (volt.) Ref. C | Rc (ohm) | Ipc (Amp.) |
|----------------------|----------|------------|
| -0.690 | 0.0093 | 20.40 |
| -0.700 | 0.0093 | 20.40 |
| -0.711 | 0.0090 | 20.60 |
| -0.720 | 0.0090 | 20.60 |
| -0.734 | 0.0090 | 20.65 |
| -0.734 | 0.0090 | 20.65 |
| -0.838 | 0.010 | 20.60 |
| -0.846 | 0.010 | 19.10 |
| -0.860 | 0.0094 | 19.20 |
| -0.882 | 0.0093 | 20.10 |
| -0.956 | 0.011 | 20.10 |

TABLA 3
TK125M17S

| Vi (volt.) Ref. D | Rc (ohm) | Ipc (Amp.) |
|----------------------|----------|------------|
| -0.677 | 0.0054 | 42.64 |
| -0.683 | 0.0052 | 43.51 |
| -0.694 | 0.0052 | 43.43 |
| -0.704 | 0.0052 | 43.55 |
| -0.714 | 0.0052 | 43.66 |
| -0.714 | 0.0052 | 43.66 |
| -0.734 | 0.0050 | 43.88 |
| -0.763 | 0.0055 | 41.91 |
| -0.787 | 0.0056 | 41.88 |
| -0.801 | 0.0057 | 43.24 |
| -0.811 | 0.0056 | 43.54 |
| -0.820 | 0.0053 | 42.66 |
| -0.830 | 0.0053 | 43.30 |
| -0.841 | 0.0052 | 43.70 |
| -0.860 | 0.0052 | 44.13 |
| -0.882 | 0.0052 | 43.96 |

A continuación se muestra en la siguiente tabla, la densidad de corriente requerida para cada tanque:

TABLA 4

| DESCRIPCION | TK30M9S | TK50M12S | TK125M17S |
|----------------------------|---------|----------|-----------|
| Ira (Amp.) | 12.70 | 20.10 | 43.50 |
| Dra (mAmp/m ²) | 27.16 | 27.45 | 27.00 |

APENDICE 2

CALCULO DE LA RESISTENCIA Y VOLTAJE DEL LECHO DE ANODOS DE LA FORMA HORIZONTAL Y PARALELO.

Características del ánodo:

| ANODO | GRAFITO DEL TIPO CENTER TAP |
|--|-----------------------------|
| Dimensiones (pulg) | 3" x 60" |
| Factor de utilización | 0.85 |
| Peso del ánodo (Kg.) | 10 |
| Corriente del ánodo a I _{max} . (Amp.) | 5 |
| Vida del ánodo (años) | 4 |
| Profundidad (pies) | 4 |

Cálculo de la resistencia de los ánodos

Se calcula la resistencia del ánodo de la forma horizontal y paralelo con la siguiente formula:

$$R_{a/b} = A * B * C \dots \dots \dots ec.1$$

Donde:

$$A = 0.00521 * p / L$$

$$B = 2.3 * \log \left(\frac{4 * L^2 + 4 * L * (S^2 + L^2)^{0.5}}{D * S} \right)$$

$$C = \frac{S}{L} - \frac{(S^2 + L^2)^{0.5}}{L} - 1$$

Donde:

p : Resistividad (5000 ohm-cm)

S : doble de la profundidad = 8 pies

L : longitud del ánodo = 7 pies

D : diámetro del ánodo = 0.66 pies

Reemplazando los datos en la ec.1:

$$R_{a/b} = 2.45 \text{ ohm.}$$

Tambin del grafico del Peabody (fig. 8.3).pag.98. se tiene

$$R_{a/b} = 2.50 \text{ ohm.}$$

Luego se toma como ejemplo de cálculo para el tanque 30M9S: una salida de corriente del ánodo de $I_a = 3 \text{ Amp.}$

$$N_a = I_{ra} / I_a \dots \dots \text{ec.2}$$

Renplazando en la ec.2:

$$N_a = 13.3 / 3$$

$$N_a = 5 \text{ ánodos}$$

Luego la resistencia interna del ánodo : $R_i = 0.136 \text{ ohm.}$ (Peabody pag.98) y se calcula la resistencia total del lecho de ánodos para $N_a = 5 \text{ ánodos}$ y $s = 25 \text{ pies}$ (separación entre ánodos)

$$R_t = R_{a/b} + R_i \dots \text{ec.3}$$

Reemplazando los datos en la ec.3:

$$R_t = 2.50 + 0.136/5$$

$$R_t = 2.5272 \text{ ohm.}$$

Luego el cálculo del voltaje requerido para el rectificador para este sistema se efectúa en forma análoga como se muestra en el capítulo V.

Luego el voltaje requerido es:

$$V_{pr} = 62 \text{ voltios.}$$

A continuación se muestra en la tabla 1, los resultados obtenidos por los 2 sistemas de protección catódica, teniendo en cuenta que en ambos casos se utiliza el mismo tipo de ánodo.

TABLA 1

| | ANODOS HORIZONTALES | | | ANODOS VERTICALES | | |
|-----------|---------------------|----|----------|-------------------|----|----------|
| | Ra/b(ohm) | Na | Vpr(vol) | Ra/b(ohm) | Na | Vpr(vol) |
| TK30M9S | 2.527 | 5 | 62 | 1.391 | 14 | 28 |
| TK50M12S | 2.310 | 8 | 62 | 0.905 | 21 | 28 |
| TK125M17S | 0.984 | 16 | 60 | 0.564 | 46 | 36 |

APENDICE 3

A continuación se muestra en el plano que se adjunta a dicho trabajo, el diseño de protección catódica por corriente impresa para los tanques del Area Corrientes Trompeteros, que se propone como la alternativa de solución técnica y económicamente factible para dicho estudio.

Los detalles de cortes que se presenta en dicho plano como son la distribución é instalación de los ánodos y de los rectificadores, se adjunta en dicho apendice.

BIBLIOGRAFIA

- (1) UHLIG, H.H. " Corrosión y Control de Corrosión ", publicado por HOHN WILLEY, versión en español, New York, 1970.
- (2) FONTANA, MARS, " Corrosión Engineering ", 3 edición, New York, Mc Graw-Hill, 1986.
- (3) MORGAN, J. H., " Cathodic Protection ", 2 edición, Mc Graw Hill 1987, USA.
- (4) PEABODY A.W., " Control of Pipeline Corrossion ", 1967. NACE.
- (5) WILSON WALTON INTERNATIONAL, " Curso de corrosión y protección catódica ", 1983, PETROPERU S.A., LIMA-PERU.
- (6) LOPEZ CALLEJA, " Curso teórico-práctico de protección catódica ", 1989, ITINTEC, LIMA-PERU.
- (7) YEBRANLL DIAZ, " Cathodic protection theory and data interpolation ", NACE 1989, SOCIEDAD NACIONAL DE INDUSTRIA, LIMA-PERU.
- (8) KATSUTOMO OKAMOTO, "Corrossion of bottom plate of oil storage tank ", 1980.

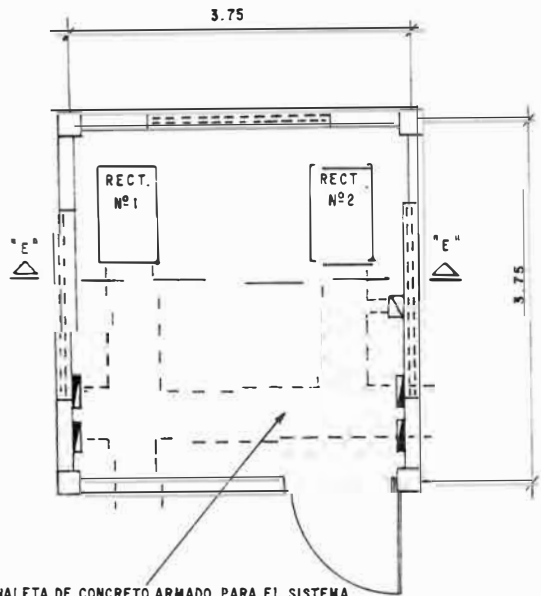
- (9) 2 Congreso Nacional de Corrosión y Técnicas de protección,
1987, PIURA-PERU.
- (10) 3 Congreso Nacional de Corrosión y Técnicas de protección,
1989, LIMA-PERU.
- (11) 1 Seminario Internacional sobre protección contra la
Corrosión, 1981, PETROPERU S.A., LIMA-PERU.
- (12) J.A.JAKOBS, "A comparison of anodes for impressed current
systems ", 1981, NACE.
- (13) DENNIS E. CROSS, " Corrosión por Suelos ", 1981, LIMA-PERU.
- (14) KEVIN C. GARRITY, AND MICHAEL URBAS, " Cathodic protection
of external tank bottom ", 1988, NACE.
- (15) "AREA DE INGENIERIA-DIVISION DE PROYECTOS". PETROPERU S.A.
LIMA-PERU.
- (16) Sección Inspección de Equipos, tanques de Almacenamiento,
archivos de inspección de equipo estático REFINERIA LA
PAMPILLA, LIMA-PERU.
- (17) FRANS PERALTA, " Medición y control de la corrosión
utilizando técnicas de polarización lineal ", 1985, LIMA
PERU.

(18) TOMASHOW, N.D., " Corrositivity of soil ", 1959, URSS.

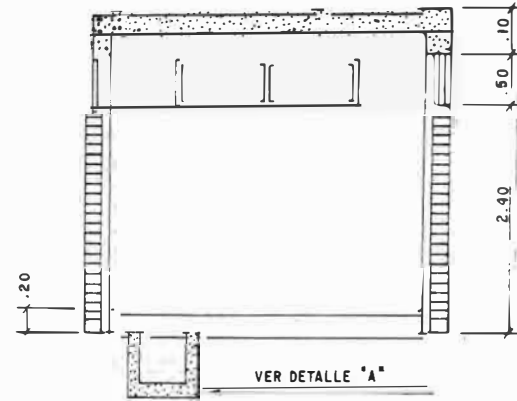
(19) NACE BASIC CORROSSION SOURCE, NACE, publications, 1980.

(20) WAINWRIGHT, R.M., "Economic aspects of cathodic protection",
1953, USA.

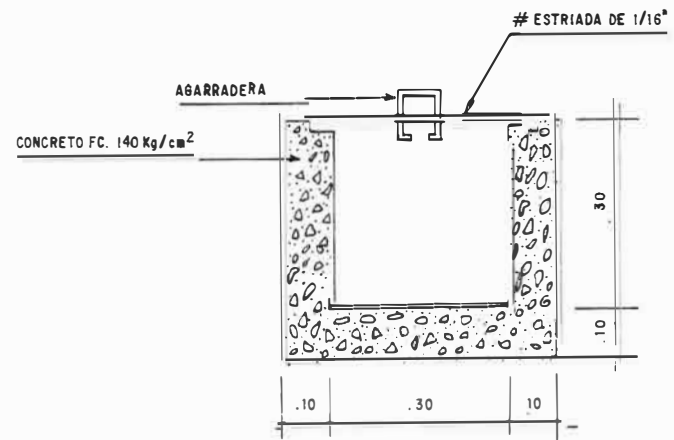
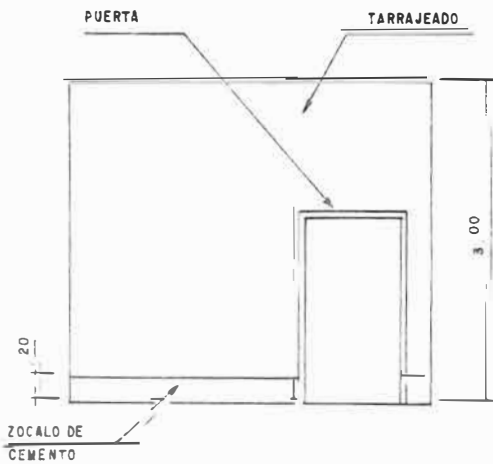
DETALLE "X" DE LA CABINA DE CONTROL DE LOS RECTIFICADORES PARA PROTECCION CATODICA



CANALETA DE CONCRETO ARMADO PARA EL SISTEMA DE DISTRIBUCION DE CABLES ELECTRICOS.

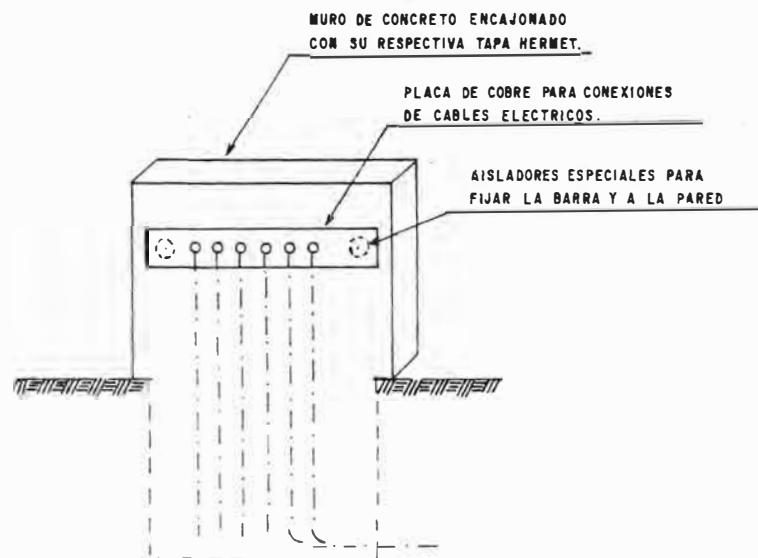


CORTE "E" - "E"

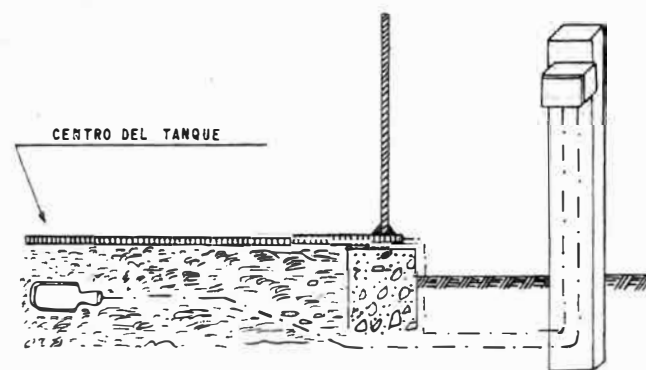


DETALLE "A"

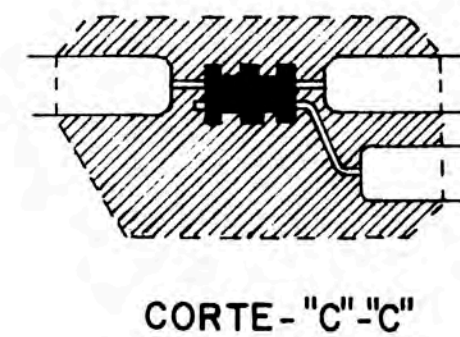
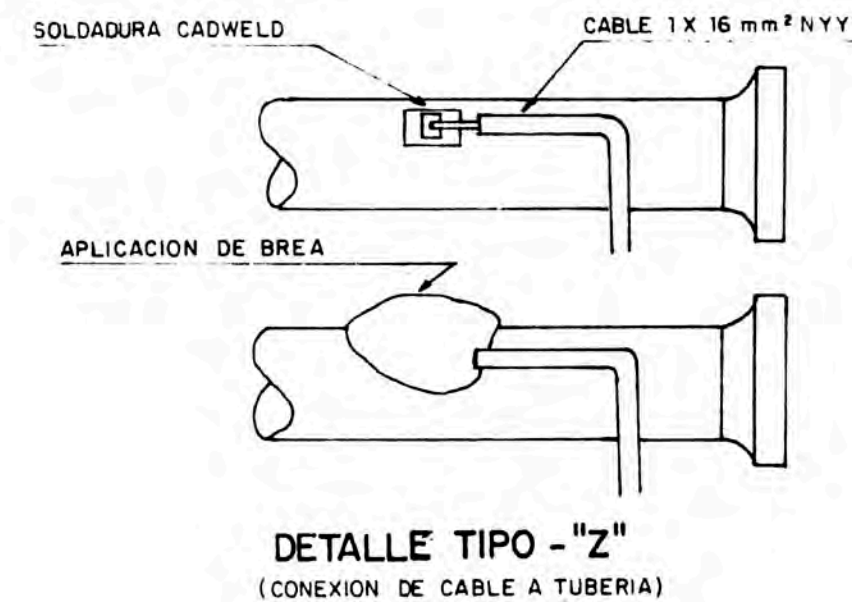
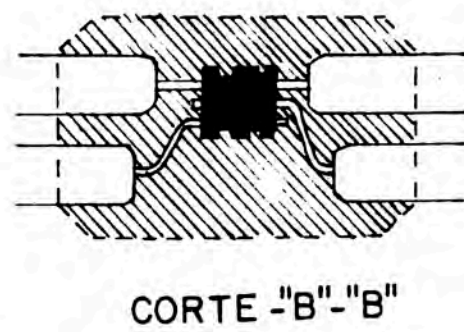
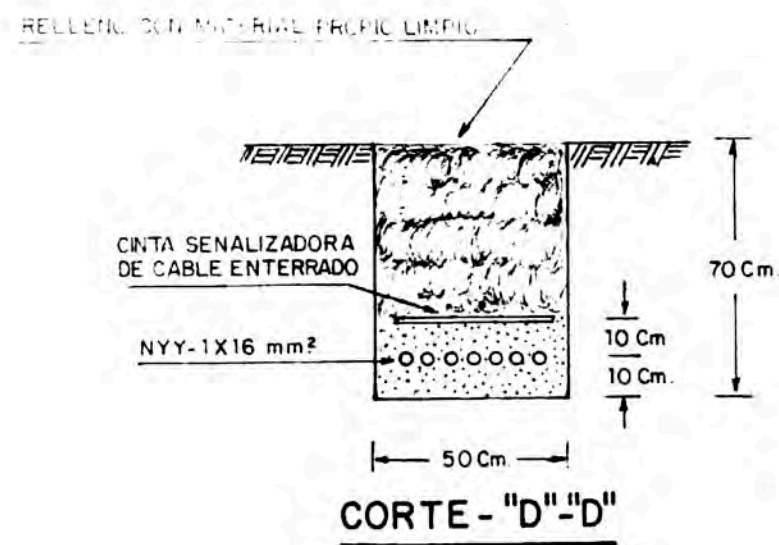
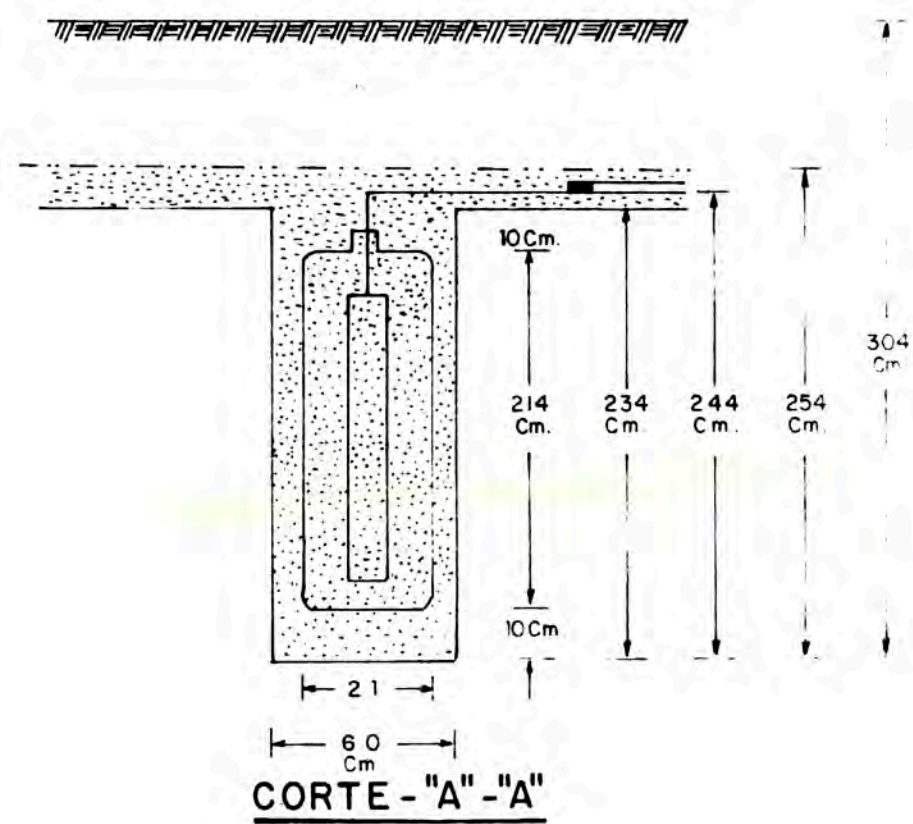
CAJA DE DISTRIBUCION AL BANCO DE ANODOS
DETALLE "Y"



DETALLE TIPICO INSTALACION REFERENCE ELECTRODE
TQ -125MB-50MB Y 30MB



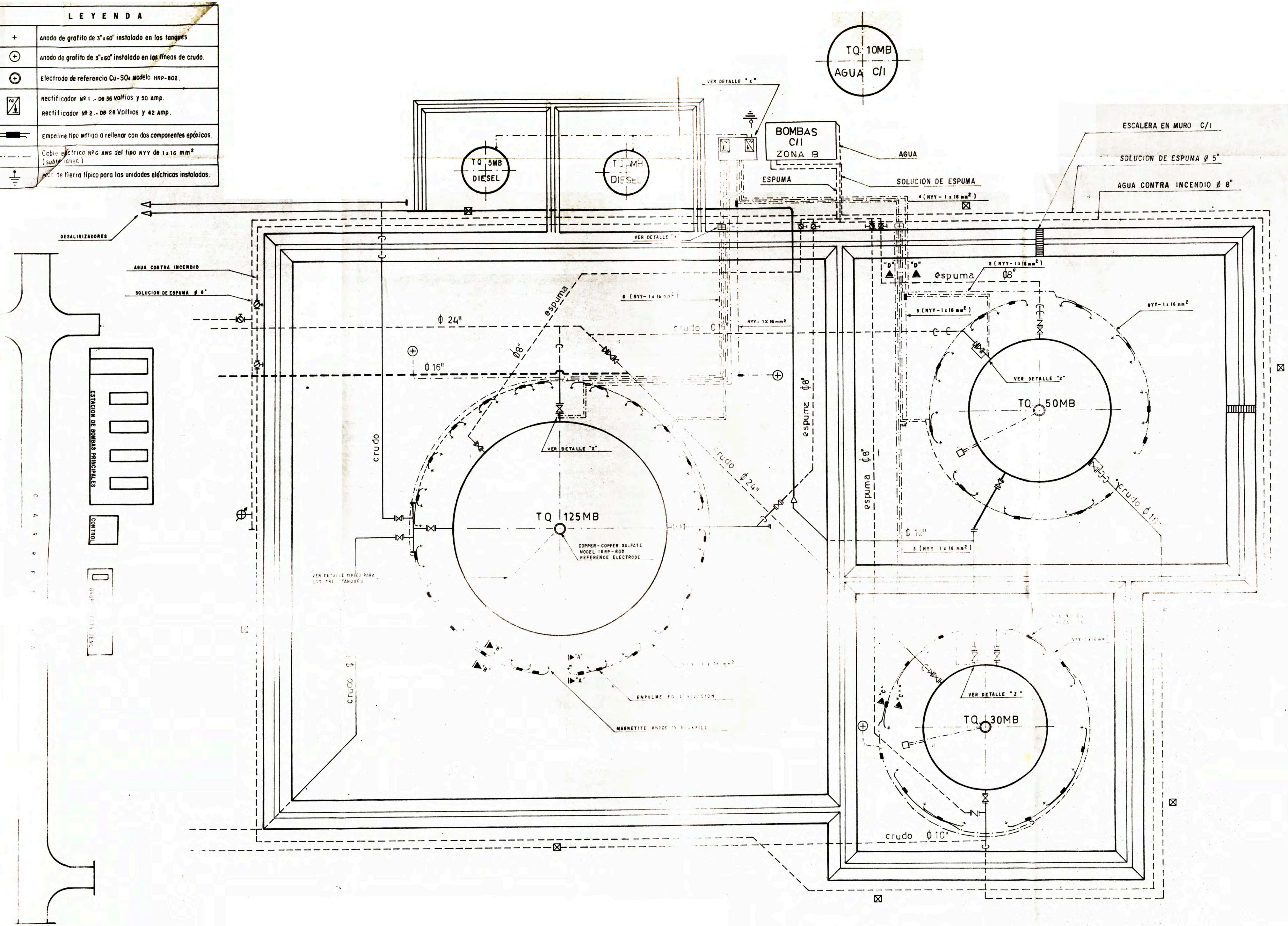
DETALLE DE CORTES DEL PLANO PROPUESTO



| LEYENDA | |
|---------|--|
| + | Anodo de grafito de 3" x 60" instalado en los tanques. |
| ⊕ | anodo de grafito de 3" x 60" instalado en las líneas de crudo. |
| ⊙ | Electrodo de referencia Cu-SO ₄ modelo IHRP-802. |
| | Rectificador N° 1.- de 36 Voltios y 50 amp. Rectificador N° 2.- de 28 Voltios y 42 amp. |
| | Empalme tipo manga a rellenar con dos componentes epóxicos. |
| | Cable eléctrico N° 6 AWG del tipo NYW de 1 x 16 mm ² (subterráneo). |
| | Rede de tierra típico para las unidades eléctricas instaladas. |

LISTA DE MATERIALES

| ITEM | DESCRIPCION | UNIDAD | CANTIDAD |
|------|---|----------------|----------|
| 1 | RECTIFICADOR PARA PROTECCION CATODICA SUMERGIDO EN ACEITE EN TARA: 220 V. A. C. SALIDA: 50 V. D. C. 50 A. D. C. | UNIDADES | 2 |
| 2 | ANODOS TIPO CENTER TAP 6 DE GRAFITO DE 3" x 60" EMPAQUETADOS CON UN CASINO DE 8" x 84" | UNIDADES | 94 |
| 3 | CONECTOR PARALELO DE COBRE PARA CABLES AWG | PIEZAS | 42 |
| 4 | GALONES DE RESINA AISLANTE SCOTCHAST O SIMILAR CON SU CATALIZADOR | UNIDADES | 4 |
| 5 | MOLDES DE PLASTICO PARA EM. PALMES "T" O DERIVACION. | UNIDADES | 53 |
| 6 | MOLDES DE PLASTICO PARA EM. PALMES RECTOS. | UNIDADES | 4 |
| 7 | CABLE ELECTRICO UNIFOLAR 6 AWG DEL TIPO NYW | METROS | 76 |
| 8 | CABLE ELECTRICO TRIFOLAR 6 AWG DEL TIPO NYW | METROS | 50 |
| 9 | CONECTOR PARALELO DE COBRE | PIEZAS | 42 |
| 10 | INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO PARA 150 AMP A 600 V | PIEZA | 1 |
| 11 | INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO PARA 70 AMP A 600 V | PIEZA | 1 |
| 12 | TUBERIA CONDUIT PESADO DE FIERRO GALVANIZADO DE 1 1/2" DE DIAMETRO | METROS | 3 |
| 13 | TUERCAS PARA TUBO DE 1 1/2" | PIEZAS | 4 |
| 14 | BUSHING PARA TUBO DE 1 1/2" | PIEZAS | 4 |
| 15 | UNIONES SIMPLES DE FG PARA TUBO DE 1 1/2" | PIEZAS | 4 |
| 16 | JUEGO DE PRESA-ESTOPA PARA TUBO DE 1 1/2" | UNIDADES | 4 |
| 17 | LADRILLOS DE CONSTRUCCION : 095x0. 12x0. 75m. | UNIDADES | 500 |
| 18 | CONCRETO FC= 140 Kg/cm ² | M ² | 1 |
| 19 | CONEXION TIERRA: ELEMENTOS DE REFERENCIA DE CU-CUSO ₄ MODELO IHRP-802 | UNIDAD | 2 |
| 20 | CABLE DE COBRE 6 AWG | METROS | 60 |
| 21 | CONECTOR DE COBRE ESTANADO PARA CABLE 6 AWG. | PIEZAS | 2 |



PROTECCION CATODICA CON CORRIENTE IMPRESA EN LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE CRUDO-TROMPETEROS PETROLEOS DEL PERU
PLANO DE INSTALACION DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA
 UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
 FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA Y MANUFACTURERA

FECHA: 11-04-90 DIBUJO: Hildebrando Moro Parra
 Esc: 1:400 REVISADO: R. R. F. DISEÑO: H. H. P.