

Universidad Nacional de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA

QUÍMICA Y MANUFACTURERA



PROYECTO DE INSTALACION DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

TESIS

**PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUIMICO**

**GREGORIO NEGLIA ORTIZ
RENAN ROJAS FUENTES**

Lima • Perú • 1980

PROYECTO DE INSTALACION DE UN
SISTEMA DE PROTECCION CATODICA
EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

PRESENTADO POR:

Renán Rojas Fuentes .

Gregorio Neglia Ortiz .

AGRADECIMIENTO :

A NUESTROS PADRES

A NUESTRA ALMA MATER

A DORIS MARAVI DE MUSCARI

A EDILBERTO MOGOLLON F.

A EUGENIA MEDICO B.

I N D I C E

1.- INTRODUCCION.

2.- RESUMEN.

3.- ASPECTOS TEORICOS DE LA PROTECCION CATODICA.

3.1.- TEORIA ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION

3.1.1. CONCEPTO DE CELDA ELECTROQUIMICA.

3.1.2. TIPOS DE CELDA.

3.1.3. REACCIONES ANODICAS Y REACCIONES CATODICAS.

3.1.4. SERIE DE POTENCIALES Y SERIE GALVANICA.

3.1.5. POTENCIAL DE CELDA-DETERMINACION DEL CATODO Y ANODO.

3.1.6. POLARIZACION Y VELOCIDAD DE CORROSION.

3.1.7. CINETICA DE ELECTRODOS-TIPOS DE POLARIZACION.

3.1.7.1. POLARIZACION POR ACTIVACION.

3.1.7.2. POLARIZACION POR CONCENTRACION.

3.1.7.3. POLARIZACION COMBINADA.

3.1.7.4. POTENCIALES MIXTOS.

3.2.- TEORIA DE LA PROTECCION CATODICA

3.2.1. PASIVIDAD-PROTECCION CATODICA Y PROTECCION ANODICA.

3.2.2. METODOS PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE CORROSION.

1. Extrapolación de Tafel.

2. Polarización Lineal.

3.2.3. CAUSAS DE LA CORROSION POR SUELOS.

1. Factores inherentes al suelo.

3.2.4. METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

1. Método de Sonda.
2. Método de los dos electrodos
3. Método de los cuatro electrodos.

3.2.5. CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DE LA CORRIENTE NECESARIA.

1. Cambio de Potencial
2. Polarización A-850
3. Método gráfico E-ILOG.

3.2.6..SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA.

4.- EVALUACION DEL SISTEMA ACTUAL Y COLECCION DE DATOS.

- 4.1.- DESCRIPCION DE LA PLANTA
- 4.2.- MATERIALES DE FABRICACION
- 4.3.- CARACTERISTICAS DE MEDIO CORROSIVO
- 4.4.- PROBLEMAS DE CORROSION OBSERVADOS.
- 4.5.- MEDICIONES DE POTENCIAL
- 4.6.- MEDICIONES PARA EL CALCULO DE LA RESISTIVIDAD
- 4.7.- DETECCION DE CORRIENTES ERPATRAS
- 4.8.- DENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA.

5.- DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION.

- 5.1.- BASE PARA EL DISEÑO
- 5.2.- ALTERNATIVAS CONSIDERADAS.
- 5.3.- EVALUACION TECNICA
- 5.4.- EVALUACION ECONOMICA.

6.- CONCLUSIONES.

1 .- INTRODUCCION.

En el presente trabajo se ha desarrollado un proyecto integral de protección catódica para un conjunto de tanques de almacenamiento, en un esfuerzo por solucionar el problema de corrosión por suelos observados en dichos tanques.

Con este objeto se ha desarrollado una metodología para el diseño de sistemas de protección catódica haciendo mayor incidencia en equipos sujetos a corrosión por suelos, y se ha realizado la aplicación a éste caso específico.

En la primera parte del estudio (Sección 3.0) se describen los fundamentos básicos de la protección catódica haciendo incidencia en la teoría electroquímica, la cinética de electrodos, la teoría para el cálculo de la corriente necesaria y otros temas relacionados.

En la segunda parte del estudio (Capítulo 4.0), se realiza una evaluación del sistema actual en lo que se refiere a materiales de fabricación, características del medio corrosivo, problemas de corrosión observados y medición de variables asociadas al problema.

En el capítulo 5, se realizó el diseño detallado del sistema de protección y se efectúa la evaluación económica respectiva.

2.- RESUMEN

El estudio que se expone a continuación, fué comenzado en Octubre de 1977 como consecuencia de haberse detectado perforaciones en los fondos de siete tanques de almacenamiento de lubricantes. Previa a la decisión de aplicar el sistema de protección catódica se evaluaron otros métodos utilizados para minimizar la corrosión por suelos como:

- Aplicación de recubrimiento externo de pinturas.
- Aplicación de lecho de mezcla arena=asfalto.
- Aplicación de lecho arena-grava y otras.

De acuerdo a los datos obtenidos del terreno, que han permitido calcular los parámetros de diseño, y del análisis económico ejecutado, se ha encontrado que para este caso, es conveniente la instalación de un sistema de protección catódica por corriente impresa.

3.0. ASPECTOS TEORICOS DE LA PROTECCION CATODICA

La protección catódica es un proceso electroquímico mediante el cual se reduce o elimina la corrosión de una estructura metálica que se encuentra en contacto con un electrolito corrosivo. Se conoce que bajo condiciones de corrosión, en la superficie de la estructura existen zonas de diferente potencial, esto es, celdas de corrosión electroquímica; por la aplicación de la protección catódica se sobreimpone una corriente externa que iguala los potenciales, eliminando de este modo dichas celdas y por tanto la corrosión.

Dado que para la aplicación de la protección catódica es necesario el conocimiento del mecanismo específico por el que se produce la corrosión se mostrará la naturaleza general del fenómeno de corrosión electroquímica,

En instalaciones industriales, la corrosión del acero en equipos directamente instalados sobre el suelo ó en contacto con él, es un problema agudo. La protección catódica como medio de proteger este tipo de corrosión se ha convertido en los últimos años en el método más utilizado (Y cada vez de mayor aplicación). En este capítulo discutiremos en primer lugar los aspectos electroquímicos de la corrosión en forma genérica y luego la teoría de la protección catódica.

3.1. TEORIA ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION.

Los procesos de corrosión son todos de naturaleza electroquímica, por que cuando se pone en contacto un metal

o aleación con un medio corrosivo, inmediatamente se genera una "CELDA" similar a una pila electroquímica, definiéndose en consecuencia áreas de comportamiento catódico y áreas de comportamiento anódico. Simultáneamente se observan en cada una de dichas áreas las reacciones respectivas de oxidación metálica (En el "ANODO") y de reducción química (En el "CATODO"). La parte del metal que se corroerá será la de comportamiento anódico.

3.1.1. CONCEPTO DE CELDA ELECTROQUIMICA.

Específicamente nos referiremos a aquellas celdas asociadas a procesos corrosivos.

Para la existencia de una celda es necesaria la presencia de tres factores o elementos concurrentes:

- I .- CATODO.- Parte de la celda donde ocurre la reducción química o donde la corriente positiva (en el sentido convencional) entra del electrolito hacia él, es el elemento que no se corroe sino que queda protegido.
- II .- ANODO.- Parte de la celda donde se verifica la oxidación química o donde la corriente positiva (en el sentido convencional) migra hacia el electrolito. Es el elemento que se corroe.
- III .- ELECTROLITO.- Es una solución o medio con

ductor (tal como el suelo, agua marina, solución salina) a través del cual fluye la corriente, es un conductor generalmente iónico.

Queda entendido que para que la celda funcione, debe existir un cuarto elemento o componente que permita el contacto eléctrico entre el ánodo y el cátodo. Es el conductor electrónico.

En las reacciones electroquímicas de una celda, los portadores son iones positivos o negativos que se mueven dentro del electrolito, sin embargo la convención de "Corriente Positiva" se dá asumiendo la existencia de "Portadores Positivos" que se mueven del polo positivo hacia el negativo, es decir en sentido inverso al real. En la figura N° 3.1., se muestra esquemáticamente la operación de una celda de corrosión.

3.1.2. TIPOS DE CELDA ELECTROQUIMICA.

En los procesos corrosivos se presentan con mayor frecuencia los siguientes tipos de celdas:

- i .- Celdas netamente galvánicas o bimetálicas.
- ii .- Celdas de diferente concentración salina.
- iii .- Celdas de aereación diferencial.
- iv .- Celdas de temperatura diferencial.

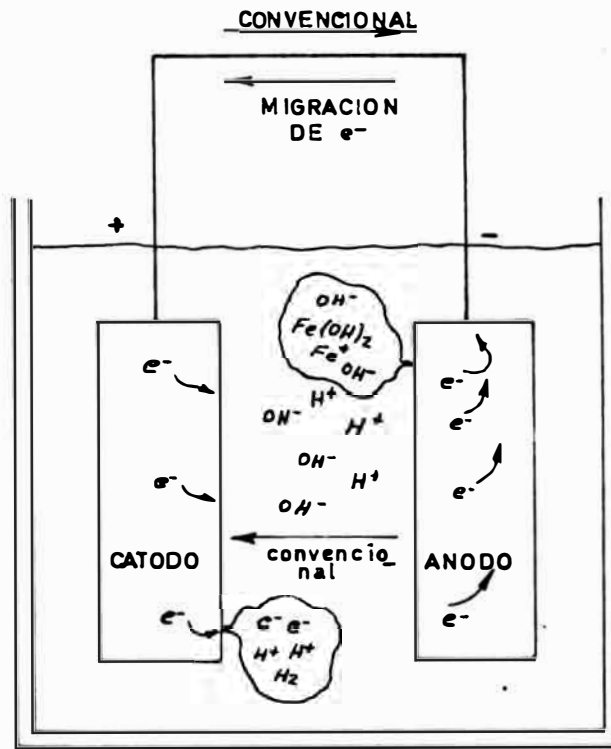


FIGURA 3.1.- REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA CELDA DE CORROSION.

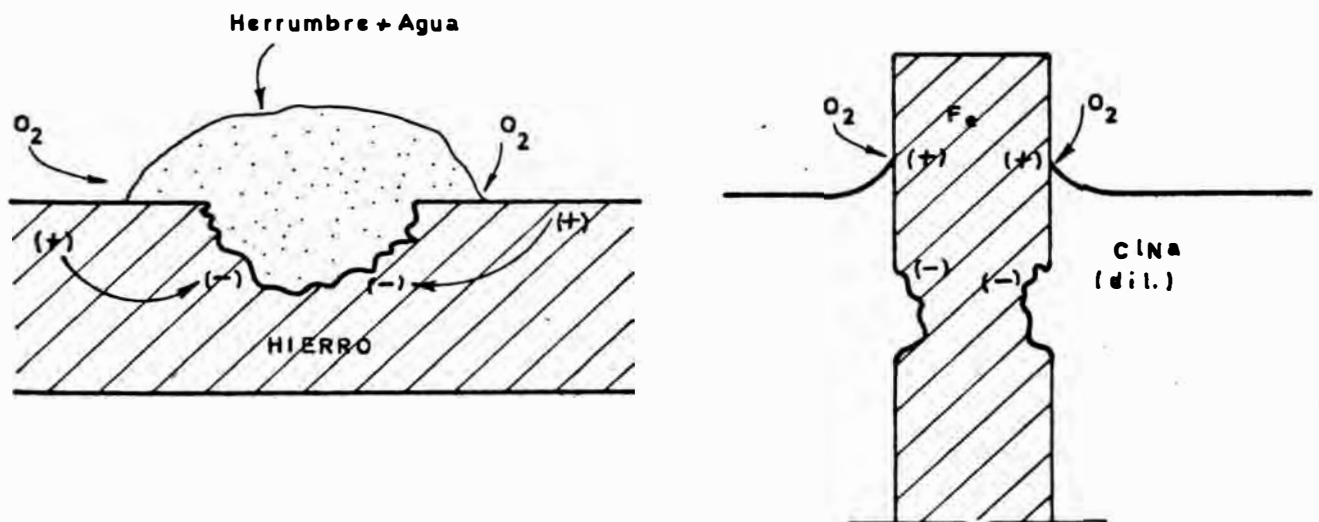


FIGURA 3.2.- CELDAS DE AERACION DIFERENCIAL

.- Celdas de acción local.

i .- CELDAS GALVANICAS.

Se denomina así a las conformadas por dos metales disimiles (Diferente comportamiento electroquímico o diferente potencial - de oxidación) dentro de un electrolito a través del cual fluye la corriente. Esta celda se presenta en problemas prácticos de corrosión cuando se instalan válvulas de bronce en tuberías de acero o se pone revestimiento de monel en recipientes de acero al carbono. Cabe anotar que no solo en metales puros es posible la formación de celdas galvánicas, sino que las aleaciones industriales también poseen diferentes potenciales.

ii .- CELDAS DE DIFERENTE CONCENTRACION SALINA.

También denominadas de concentración diferencial, se producen cuando dos electrodos del mismo metal se encuentran en contacto cada uno de ellos con un electrolito no homogéneo o con el mismo electrolito pero a diferente concentración. Esta situación es típica en tuberías enterradas atravezando suelos de diferente homo

geneidad.

iii .- CELDAS DE AEREACION DIFERENCIAL.-

Estas celdas se presentan con bastante frecuencia. Se componen básicamente de dos electrodos del mismo material en contacto con un electrolito cuya concentración de oxígeno no es uniforme. Los tipos de corrosión por picadura y grieta encuentran explicación por la existencia de este tipo de celdas.

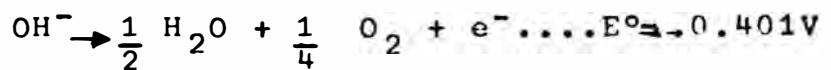
Cuando en la superficie de un metal existe diferente concentración de oxígeno la presión parcial del mismo también será diferente.

Utilizando la ecuación de NERST podemos encontrar los potenciales de cada una de las zonas de corrosión localizada, como sigue:

Sea: P_B = Presión parcial de O_2 en la zona de baja concentración.

P_A = Presión parcial de O_2 en la zona de alta concentración.

El equilibrio para un electrodo de O_2 es tá dado por:



Por lo tanto:

$$E_B = E_O - 0.0592 \log \frac{P_B^{1/4}}{[\text{OH}^-]}$$

$$E_A = E^0 - 0.0542 \log \frac{P_A^{1/4}}{[\text{OH}^-]}$$

El potencial de corrosión si existiera sería:

$$E_B - E_A = 0.592 \log \left(\frac{P_A}{P_B} \right)^{1/4} = AE(+)$$

Como $P_B < P_A$ el potencial de la celda será positivo y el cambio en la energía libre ($\Delta G = -nFE$) será negativo. Por tanto se deduce que la reacción será espontánea y el cátodo será la zona con mayor concentración de oxígeno. En la fig. 3.2. se muestra esquemáticamente la formación de estas celdas.

iv .- CELDAS DE TEMPERATURA DIFERENCIAL.-

Se generan cuando existen dos elementos del mismo material, pero cada uno de ellos se encuentra a una temperatura distinta del otro.

v .- CELDAS DE ACCION LOCAL.-

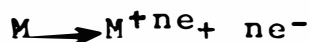
Adicionalmente a las celdas antes mencionadas se ha encontrado que factores metalúrgicos como la presencia de fases

múltiples en aleaciones, los tratamientos térmicos, trabajos mecánicos (como forja- o rolado en fric) son causantes de forma- ción de celdas. Dichas celdas se concen como de acción local.

3.1.3. REACCIONES CATODICAS Y REACCIONES ANODICAS.

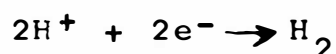
Asociadas a las celdas de corrosión se pueden en contrar las siguientes reacciones:

Reacciones Anódicas.- Se encuentra en general la oxidación metálica, hacia la formación de compues- tos termodinámicamente más estables como son los óxidos correspondientes. Estos reaccionan según:

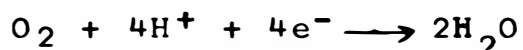


Reacciones Catódicas.- Las más importantes son - las siguientes:

- Evolución de hidrógeno.



- Reducción de oxígeno en solución ácida.



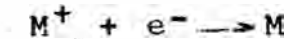
- Reducción de oxígeno en solución neutra o bási- ca.



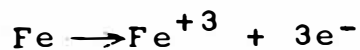
- Reducción de iones metálicos.



- Deposición metálica.



Puede observarse que una combinación de la reacción anódica con una reacción catódica siempre derivará en un compuesto del metal como producto de la reacción, como es el caso de la corrosión del hierro en medio ácido:



Es muy importante tener en cuenta que el principio electroquímico fundamental indica que debe haber equilibrio de masa y carga en las reacciones de corrosión; en otras palabras la cantidad de electrones donados por la reacción anódica debe ser igual a la consumida por la reacción catódica.

3.1.4. SERIE DE POTENCIALES Y SERIE GALVANICA.-

La diferencia de potencial entre metales, bajo condiciones reversibles o de "NO CORROSION" forma la base para la predicción de su tendencia a la corrosión. En una serie de potenciales figurarán los generados por un electrodo que se encuentra en contacto con sus propios iones de actividad unitaria (Aproximadamente un átomo grammo de peso de su ión) a condiciones de temperatura constante.

En la Tabla N° 3.1., se presenta la denominada serie electromotriz referida al electrodo normal de hidrógeno (ENH) cuyo valor arbitrario es cero.

En la práctica las celdas que se presentan están generalmente formadas por aleaciones disímiles antes que por metales puros, por lo que es necesario establecer "SERIES" particulares para cada medio. Estas series nos indican las características desde el punto de actividad de unas aleaciones respecto a otras facilitando la identificación de cual de ellas actuará como ánodo al encontrarse unidas eléctricamente y dentro de un medio electrolítico. En la tabla 3.2., se puede observar una serie galvánica de algunas aleaciones comerciales y que ha sido desarrollada para agua de mar por la International Nickel Co.(USA).

Así mismo las series galvánicas nos indican que cuanto más alejados se encuentren dos metales o aleaciones, mayor será el potencial desarrollado, si con ellos se forma una celda electroquímica. Es importante tener en cuenta que la tabla de potenciales se debe usar en forma referencial y para un ensayo, también tener presente que el potencial de una aleación puede cambiar con el tiempo.

	<i>Metal-metal ion equilibrium (unit activity)</i>	<i>Electrode potential vs. normal hydrogen electrode at 25°C, volts</i>
↑ Noble or cathodic	Au-Au ¹⁺	+1.498
	Pt-Pt ²⁺	+1.2
	Pd-Pd ²⁺	+0.987
	Ag-Ag ⁺	+0.799
	Hg-Hg ₂ ²⁺	+0.788
	Cu-Cu ²⁺	+0.337
	H ₂ -H ⁺	0.000
	Pb-Pb ²⁺	-0.126
	Sn-Sn ²⁺	-0.136
	Ni-Ni ²⁺	-0.250
	Co-Co ²⁺	-0.277
	Cd-Cd ²⁺	-0.403
	Fe-Fe ²⁺	-0.440
	Cr-Cr ³⁺	-0.744
	Zn-Zn ²⁺	-0.763
Active or anodic ↓	Al-Al ³⁺	-1.662
	Mg-Mg ²⁺	-2.363
	Na-Na ⁺	-2.714
	K-K ⁺	-2.925

SOURCE: A. J. de Bethune and N. A. S. Loud, "Standard Aqueous Electrode Potentials and Temperature Coefficients at 25°C," Clifford A. Hampel, Skokie, Ill., 1964. See also Table 9-1.

TABLA N° 2.1. — SERIE ELECTROMOTRIZ

Noble or cathodic	↑	Platinum
		Gold
		Graphite
		Titanium
		Silver
		[Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)
		[Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)
		[18-8 Mo stainless steel (passive)
		[18-8 stainless steel (passive)
		[Chromium stainless steel 11-30% Cr (passive)
		[Inconel (passive) (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe)
		[Nickel (passive)
		Silver solder
		[Monel (70 Ni, 30 Cu)
		[Cupronickels (60-90 Cu, 40-10 Ni)
		[Bronzes (Cu-Sn)
		[Copper
		[Brasses (Cu-Zn)
		[Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)
		[Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)
	[Inconel (active)	
	[Nickel (active)	
	Tin	
	Lead	
	Lead-tin solders	
	[18-8 Mo stainless steel (active)	
	[18-8 stainless steel (active)	
	Ni-Resist (high Ni cast iron)	
	Chromium stainless steel, 13% Cr (active)	
	[Cast iron	
	[Steel or iron	
	2024 aluminum (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)	
Active or anodic	↓	Cadmium
		Commercially pure aluminum (1100)
		Zinc
		Magnesium and magnesium alloys

TABLA N° 3.2.- SERIE ELECTROMOTRIZ ALEACIONES

3.1.5. POTENCIAL DE CELDA- DETERMINACION DEL CATODO Y ANODO.

La espontaneidad de una reacción electroquímica cualquiera puede determinarse si se evalúa el cambio de la energía libre que acompaña a la misma. La expresión utilizada para el cálculo del cambio de la energía libre en una reacción electroquímica es:

$$\Delta G = - nFE \quad (3.1.)$$

Donde:

n = N° de electrones comprometidos en la reacción.

F = Constante de Faraday.

E = Potencial de la celda electroquímica.

Según la ecuación (3.1.), conociendo el potencial es sencillo el cálculo del cambio en la energía libre, en consecuencia se podrá conocer la dirección de la reacción.

El potencial de celda en las condiciones de trabajo de ésta puede calcularse usando la conocida ecuación de Nerst:

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{ox.}}{a_{red.}} \quad (3.2)$$

Donde:

E° = Potencial standar.

R = Constante universal = 8.314 Joul/°C-mol.

T = Temperatura absoluta de la celda ($^{\circ}K$).

a_{ox} , a_{red} = Actividades de las reacciones catódica y anódica.

En esta ecuación las actividades se encuentran dadas por lo siguiente:

<u>Constituyente de Reacción Catódica o Anódica.</u>	<u>Actividad (a)</u>
Solución líquida.	$\frac{(\text{Molalidad})}{\text{de Act.}} \times (\text{Coef.})$
Gas	Fugacidad.
Sólido	1
Soluto en equilibrio.	1

Cuando en una celda electroquímica se quiere determinar la polaridad, lo más usual es aplicar la ecuación de Nerst separadamente a las reacciones de semi-celda asumiendo previamente una dirección de reacción. La suma algebraica de los potenciales de semi-celda calculados dará el potencial de celda que reemplazado en la ecuación (3.1) nos indicará la dirección real de la reacción haciendo posible la identificación del cátodo y el ánodo.

Los cálculos basados en criterios netamente termodinámicos deben ser usados con cuidado ya que solo son indicativos de la espontaneidad o factibilidad de que la reacción electroquímica se

verifique, más no la velocidad a la que esta ocurrirá. Una errónea interpretación sería asumir que un valor alto de AG indicará una velocidad grande de corrosión del ánodo.

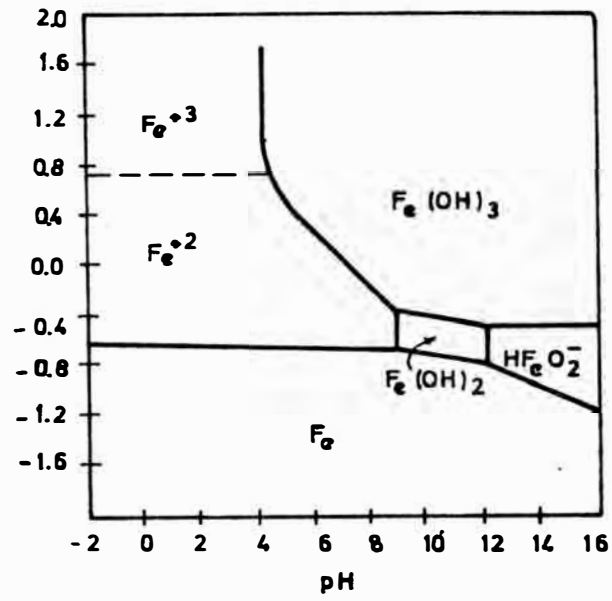
Los diagramas de Pourbaix (1) consisten en la aplicación más importante de los cálculos utilizando la ecuación de Nerst, que ha escogido un sistema potencial en función del PH para indicar zonas de estabilidad de productos de corrosión que se obtendrían al someter un metal o aleación a la acción de un agente corrosivo acuoso. Estos diagramas se utilizan para predecir:

- La dirección espontánea de la reacción.
- Los productos de corrosión esperados.
- Posibles cambios en el medio para prevenir el ataque corrosivo.

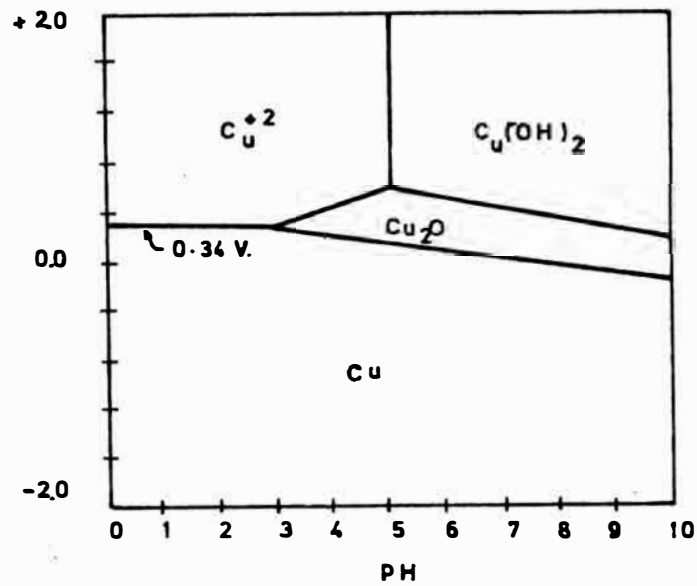
(1) M. POURBAIX, ATLAS OF ELECTROCHEMICAL EQUILIBRIA IN AQUEOUS SOLUTIONS - PERGAMON PRESS - NEW YORK 1966.

Pero no pueden usarse para predecir la velocidad de corrosión.

En la figura N°3.3., se muestran los diagramas de POURBAIX para el hierro y el cobre.



(a)



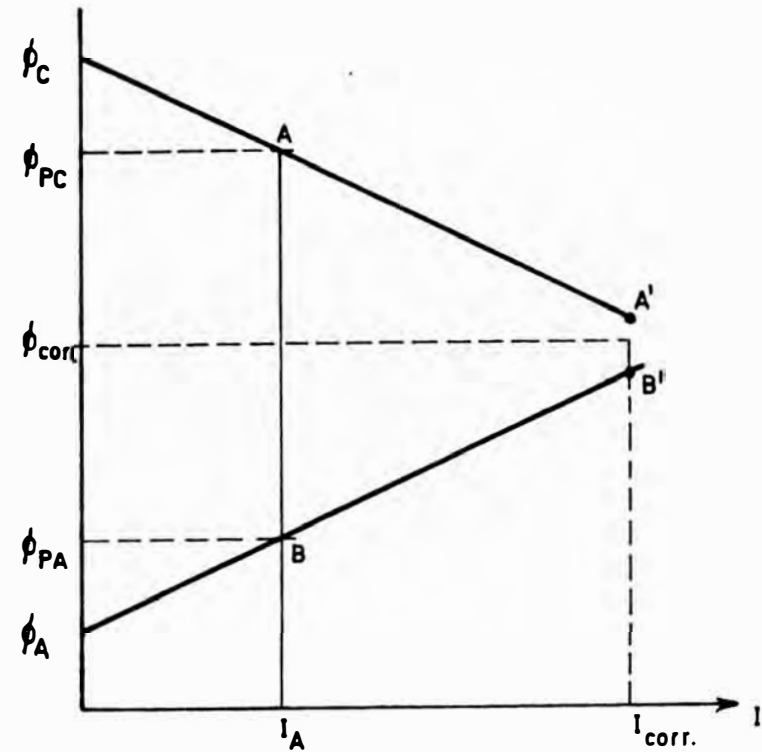
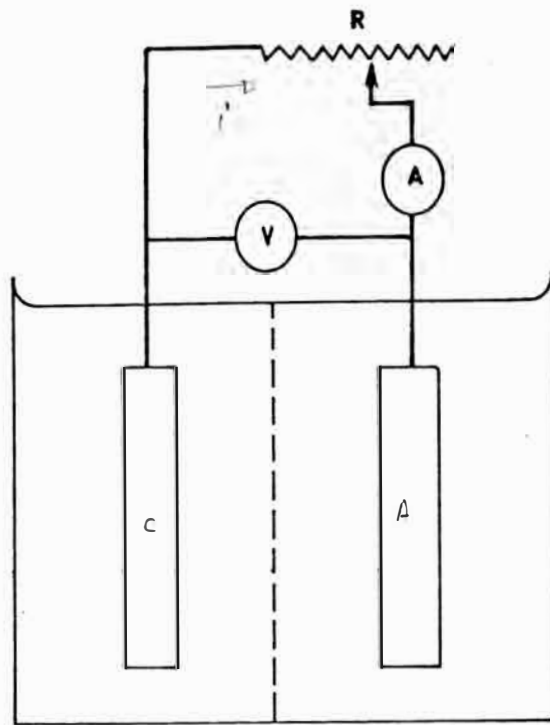
(b)

FIGURA 3.3.- DIAGRAMAS DE POURBAIX (a) HIERRO
(b) COBRE.

3.1.6. POLARIZACION Y VELOCIDAD DE CORROSION.

Desde el punto de vista de Ingeniería de corrosión es importante conocer la velocidad a la que el ánodo de una celda se corroe. En general habrá corrosión cuando exista un flujo neto de corriente, lo que equivale a decir que la reacción no está en equilibrio, variando por lo tanto el potencial del electrodo a un valor diferente al de su potencial estandar; más propia mente, el cátodo se hará más anódico y el ánodo más catódico ya que la dirección del cambio de potencial será siempre opuesto a la alteración del equilibrio. La diferencia entre el potencial actual de un electrodo (a cierto valor de corriente neta) y el potencial standard se llama POLARIZACION.

Se puede ilustrar el fenómeno de polarización u tilizando la celda de la Fig. 3.4. Cuando no existe flujo de corriente neta (valor muy alto de R) los electrodos permanecerán con sus poten ciales de equilibrio o "De circuito Abierto" si se reduce la resistencia del circuito de modo que la corriente neta sea I_a , los electrodos se habrán polarizado hasta los potenciales representados por A y B. Si se eliminara totalmente R los electrodos alcanzarán un valor fi



ϕ_A = POTENCIAL DE EQUILIBRIO DEL ANODO.
 ϕ_C = " " " " CATODO.
 $\phi_C - \phi_{PC}$, $\phi_A - \phi_{PA}$: POLARIZ. DEL CATODO Y ANODO PARA I_A (Amp/cm)
 $A'B'$ = POTENCIAL DEBIDO A RESISTENCIA DEL ELECTROLITO.

FIGURA 3.4.- POLARIZACION

nal de potencial, que asumiendo resistencia despreciable en el electrolito será un valor único, y se denomina como "Potencial de Corrosión" (\emptyset corr.). La corriente asociada se conoce como corriente de corrosión (I corr.) y representa la velocidad de corrosión del ánodo (Electrodo-Activo), que se puede traducir en MPY según la relación:

$$\text{MPY} = 0.13 I_{\text{corr.}} \frac{e}{D} \quad (3.3)$$

Donde:

I_{corr} = Corriente de corrosión (amp/cm²)

e = peso equivalente del metal (gr.)

D = Densidad del metal (gr/cm³).

La polarización y la resistencia del electrolito limitan la cantidad de corriente producida en una celda, pero realmente la resistencia del electrolito es despreciable siendo la polarización el factor primario. Dado que la polarización se da tanto en el cátodo como en el ánodo, es factible observar hasta 4 tipos de control de la corrosión por polarización:

i .-CONTROL CATODICO.- La polarización tiene lugar mayormente en el cátodo.

ii .- CONTROL ANODICO.- La polarización tiene lugar principalmente en el ánodo.

- iii .- CONTROL MIXTO.- El grado de polarización es similar tanto en el cátodo como en el ánodo.
- iv .- CONTROL POR RESISTENCIA.- Solo cuando la Resistencia del electrolito es muy elevada (Alta caída OHMICA ó IR).

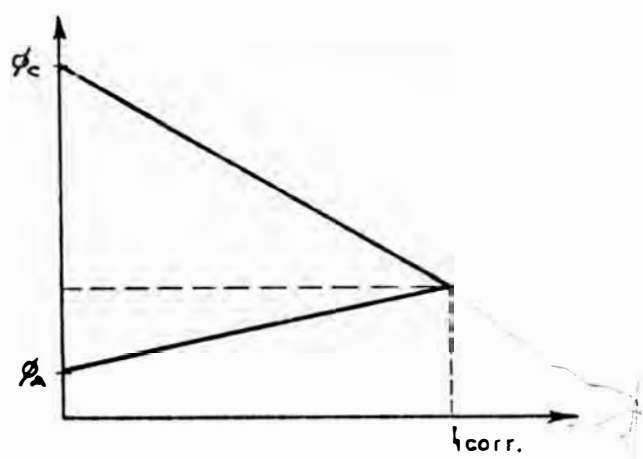
En la Figura 3.5. se muestran los esquemas simplificados de los tipos de polarización.

3.1.7. CINETICA DE ELECTRODOS - TIPOS DE POLARIZACION.

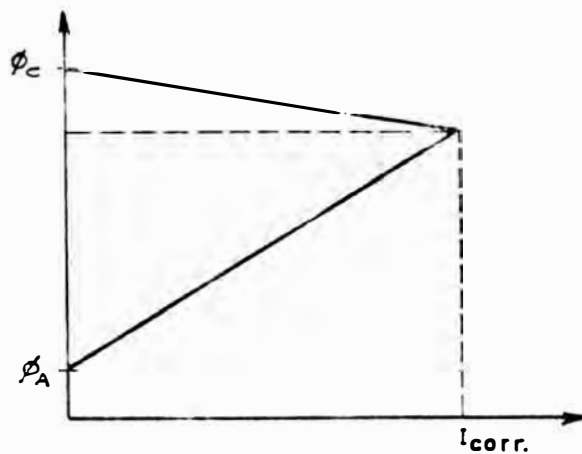
Con los conceptos de cinética de electrodos, podemos explicar facilmente lo que ocurre en una celda cuando ésta no está en equilibrio, o sea que existe una corriente neta.

Las definiciones de "Cátodo" y "Anodo" así como de las respectivas reacciones son las ya descritas anteriormente y el "SOBREVOLTAJE" o "SOBRE-TENSION" viene a ser una medida de la polarización de los electrodos.

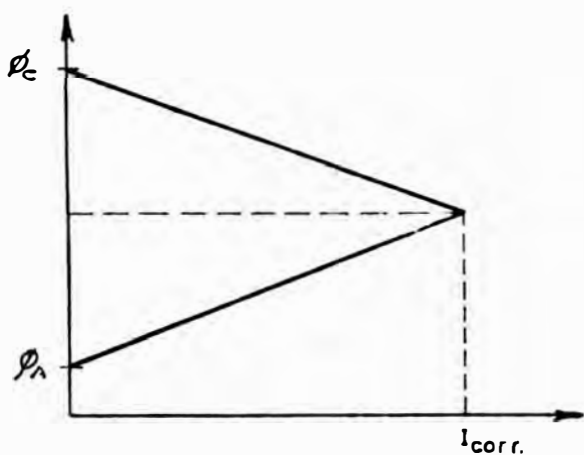
La densidad de corriente de intercambio se define como la corriente asociada a la condición de equilibrio de un electrodo, donde las velocidades de oxidación y reducción sobre él son iguales. Por ejemplo, si se observa el electrodo de platino mostrado en la Fig. 3.6, la oxidación



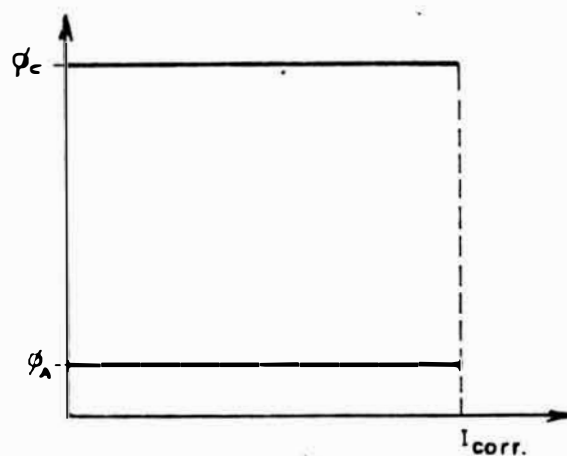
(a)



(b)

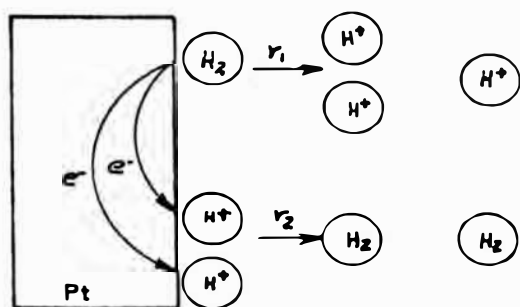


(c)

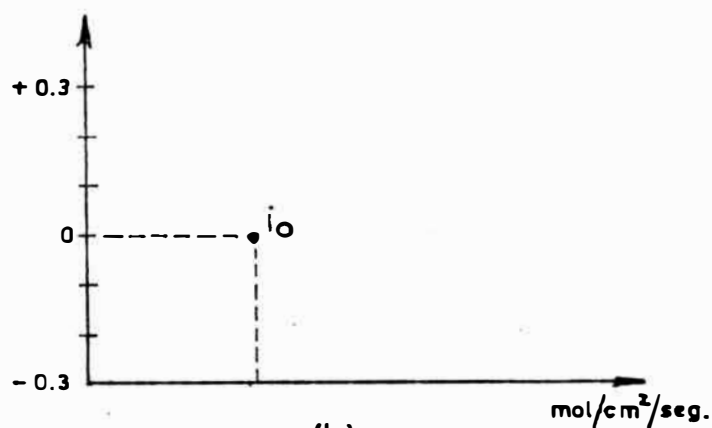


(d)

FIGURA 3.5.- Tipos de control de la Corrosión - (a) Anódico, (b) Catódico, (c) Mixto, (d) Por Resistencia.



(a)



(b)

FIGURA 3.6.- (a) Condición de equilibrio del electrodo de Pt durante la reacc. de semicelda.

(b) Representación de la velocidad de reacción, de intercambio.

del hidrógeno (H_2) es una zona del electrodo des-
 prende 2 electrones y en una área adyacente se
 están consumiendo la misma cantidad de electro-
 nes para la reducción a Hidrógeno Molecular; ba-
 jo estas condiciones no existe corriente neta ya
 que las velocidades r_1 y r_2 (De oxid. y red.) son
 idénticas. La relación entre r_1 y r_2 con la den-
 sidad de corriente de intercambio es:

$$r_{ox} = r_{red.} = \frac{i_o}{nF} \quad (3.4)$$

i_o es la densidad de corriente de intercambio y
 estará representada por un punto de un gráfico i
 vs. Potencial.

La densidad de corriente de intercambio dependerá
 de la naturaleza del electrodo de la superficie -
 real del mismo (considerando la rugosidad) de las
 impurezas existentes y la temperatura entre otros
 factores; su valor debe ser hallado en forma expe-
 rimental. En el gráfico de la Fig. 3.7. y Tabla.
 3.3., se dan algunos valores para i_o .

3.1.7.1. POLARIZACION POR ACTIVACION.

Se dice que una reacción electroquímica
 se polariza por activación cuando es
 controlada por la etapa más lenta en la
 secuencia de la reacción, así en la evo-
 lución de hidrógeno el control lo reali-

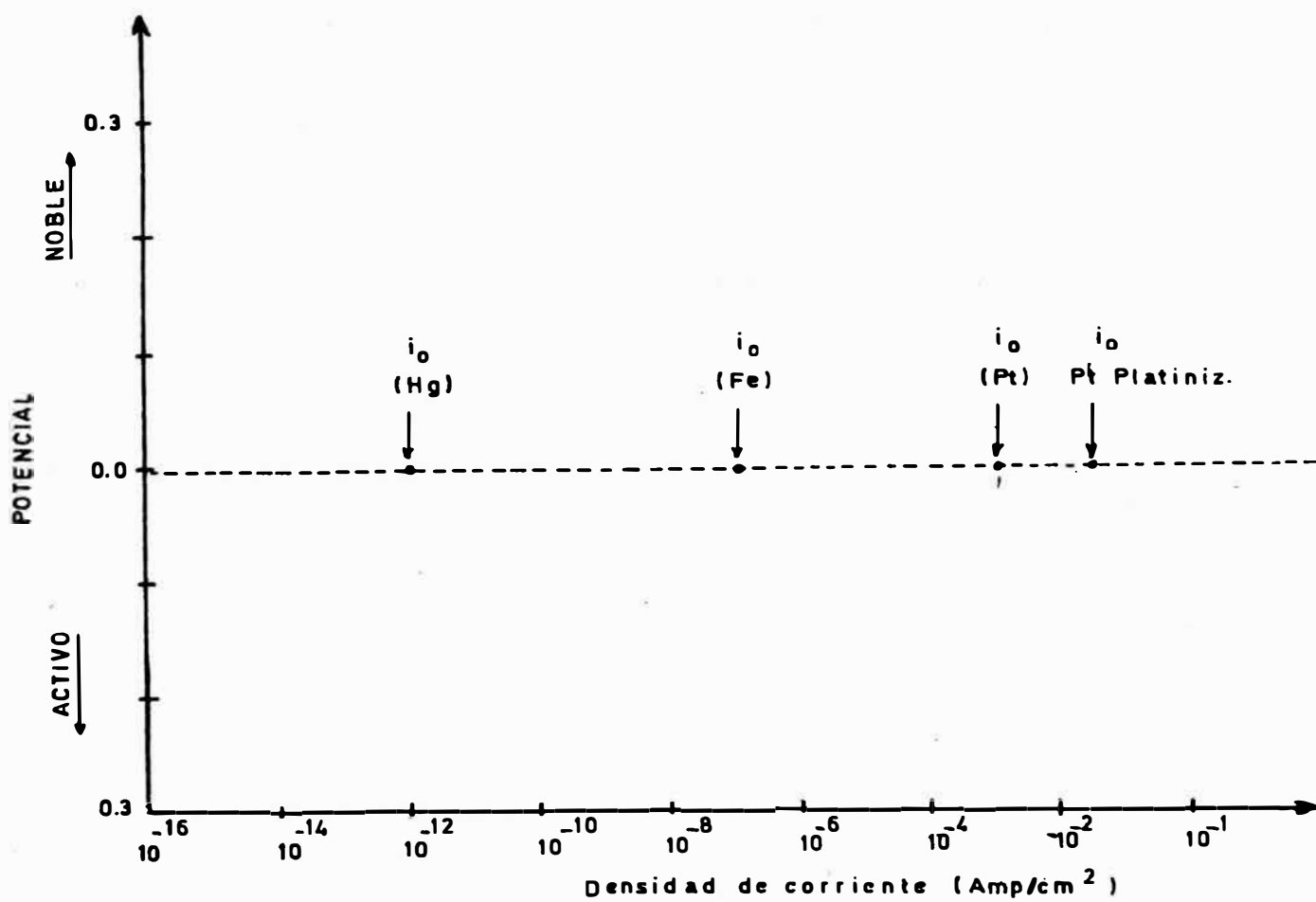


FIGURA 3.7.— DENSIDAD DE CORRIENTE DE INTERCAMBIO.

TABLA 3-3.- ALGUNOS VALORES EXPERIMENTALES DE i_0

REACCION	ELECTRODOS	ELECTROLITO	i_0 (AMP/cm ²)
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Al	2N H ₂ SO ₄	10^{-10}
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Au	1N HCl	10^{-6}
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Cu	0.1N HCl	2×10^{-7}
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Fe	2N H ₂ SO ₄	10^{-6}
$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$	Ni	1N HCl	4×10^{-6}
$2H^+ + 2e^- = H_2$	Pt	1N HCl	10^{-3}
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	Au	0.1N NaOH	5×10^{-13}
$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$	Pt	0.1N NaOH	4×10^{-13}
$Fe^{+3} + e^- \rightarrow Fe^{+2}$	pt		2×10^{-3}

Ref: J.O'M. BOCKRIS, PARAMETERS OF ELECTRODE KINETICS "ELECTRO CHEMICAL CONSTANTS, NBS CIRCULAR 524- WASHINGTON D. C. 1953 PP 243-262.

za la etapa de transferencia de electrones para formar la molécula. La relación entre el sobrepotencial y la densidad de corriente neta (o velocidad de -corrosión está dada por la ecuación de TAFEL:

$$\eta_a = \beta \log \frac{i}{i_0} \quad (3.5)$$

Donde:

η_a = Sobrepotencial (v)

β = Pendiente de TAFEL (v)

i = Densidad de corriente neta.

La constante de TAFEL se puede calcular con:

$$\beta = 2.3 \frac{RT}{nF} \quad (3.6)$$

α representa un coeficiente simétrico - que describe el perfil de la barrera de control de velocidad.

El valor de β para reacciones usuales - está entre 0.05 y 0.15. Una buena estimación si no se le conoce con exactitud es 0.1

De acuerdo a la ecuación (3.5) se puede graficar la polarización por activación para la evolución de hidrógeno sobre un

electrodo de platino inmerso en HCl IN, asumiendo un valor de $\beta = 0.10$. En la Figura N°3.8. se observa que la velocidad de corrosión es muy sensitiva a pequeño cambio de potencial.

3.1.7.2. POLARIZACION POR CONCENTRACION.

En la polarización por concentración el control de la reacción es por difusión. Si se asume que sobre un electrodo se está llevando a cabo la reducción de hidrógeno (H^+), a bajas velocidades de reducción la distribución de iones H^+ será uniforme en la zona adyacente al electrodo. Al incrementarse la velocidad de reducción, la concentración de iones disminuye, limitando finalmente la reacción a la velocidad de difusión de iones hacia el electrodo, esta velocidad de difusión determina la correspondiente densidad de corriente límite por difusión, y representa la máxima velocidad de reducción posible en el electrodo.

El valor de la densidad de corriente límite por difusión se determina con la

expresión:

$$i_L = \frac{DnF C_B}{x} \quad (3.7)$$

Donde:

i_L = Densidad de corriente límite por difusión.

D = Coeficiente de difusión del ión reactante.

C_B = Concentración global de los iones reactantes en el electrolito.

x = Espesor de la Barrera difusional.

Los factores que afectan el valor de i_L además de la concentración del electrolito son aquellos que afectan D y x, como:

- Forma geométrica y superficie del electrodo.
- Agitación.
- Temperatura.

El parámetro x, debe ser medido experimentalmente y a menos que el sistema sea simple, es muy complicado de medir.

El valor de la polarización por concentración se puede calcular, conociendo

i_L según:

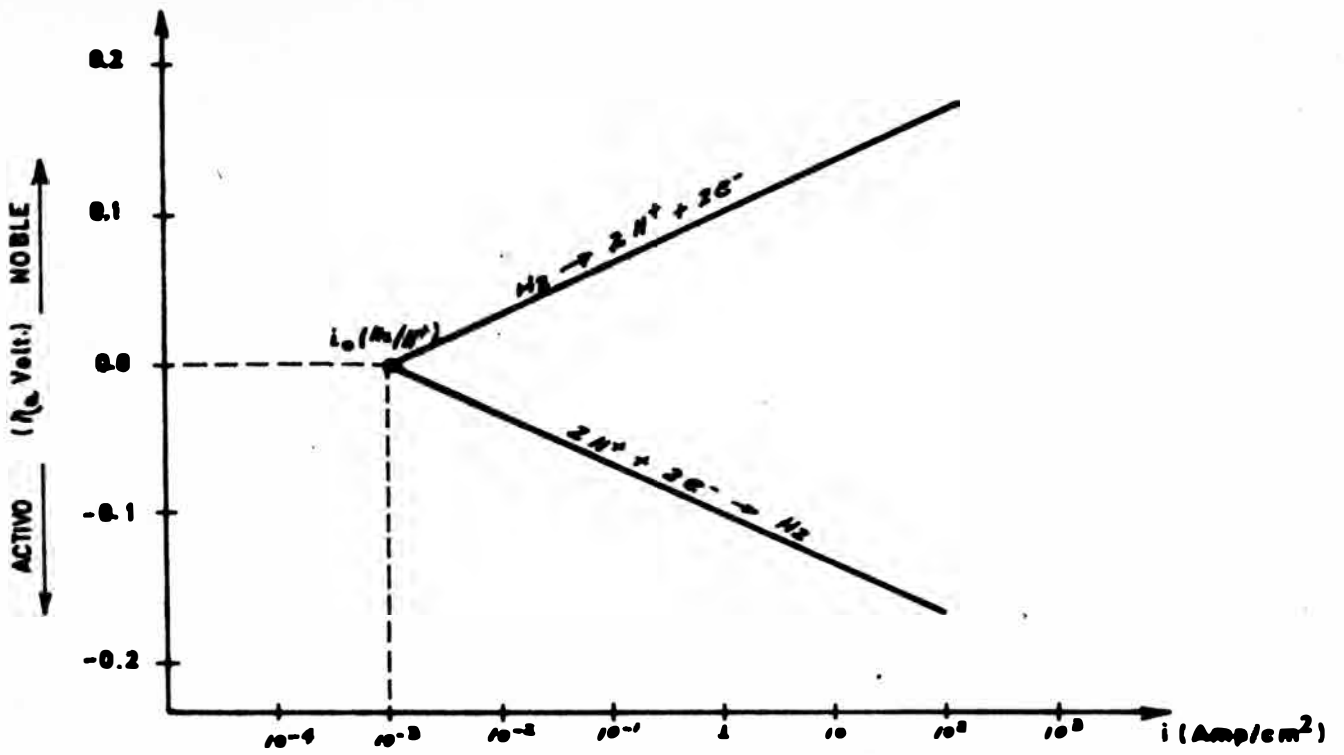


FIGURA 3.8.- POLARIZACION POR ACTIVACION

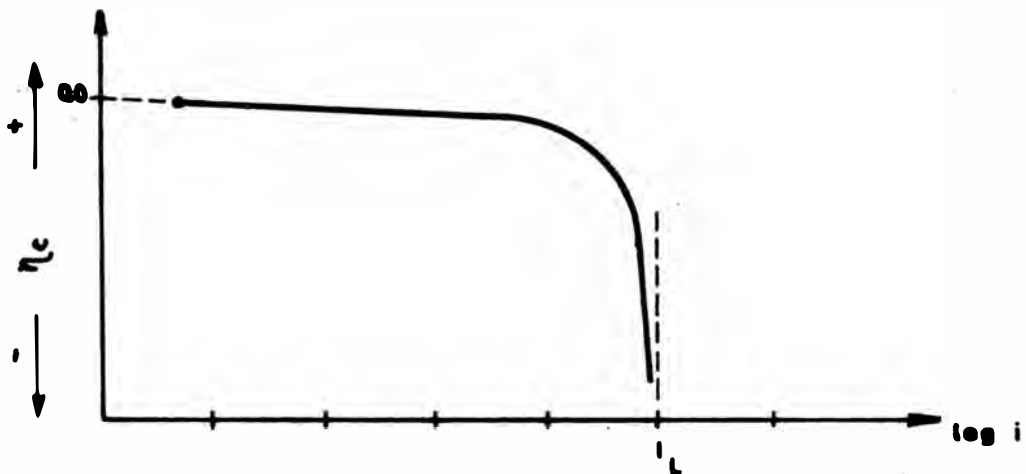


FIGURA 3.9.- POLARIZACION POR CONCENTRACION

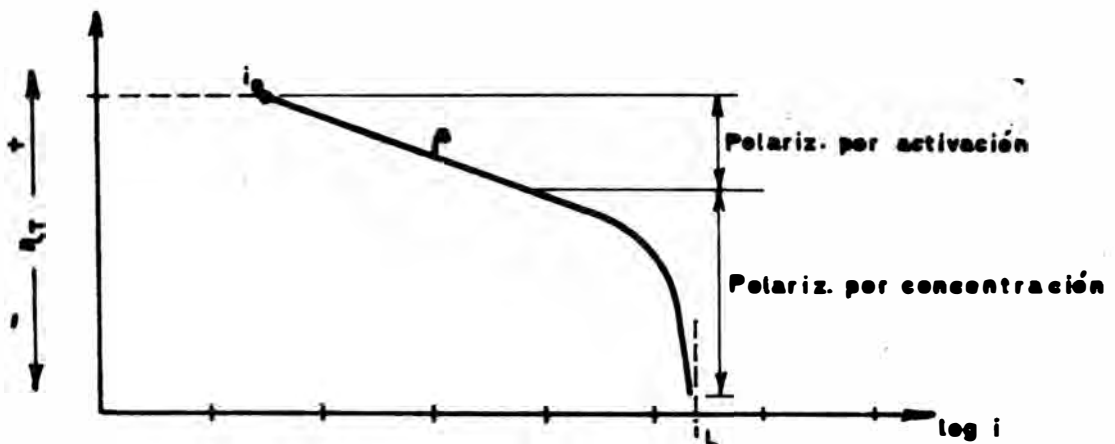


FIGURA 3.10.- POLARIZACION MIXTA

En la Fig. 3.10 se muestra la polarización combinada relacionada con (3.11).

3.1.7.4. POTENCIALES MIXTOS

La teoría de potenciales mixtos atribuida a WAGNER y TRAUD (1938), se basa en los principios que en una reacción electroquímica puede dividirse en 2 reacciones parciales y durante la misma no existe acumulación de carga neta (Principio de conservación de la carga) o que durante la corrosión metálica las velocidades de oxidación y reducción son iguales.

Al introducir un trozo de metal dentro de un agente corrosivo, el ánodo y cátodo se polarizarán observándose que el único punto que cumple con el principio de conservación de carga será aquel donde de las curvas de polarización se intersectan, los valores de densidad de corriente y potencial correspondientes a ese punto serán la corriente de corrosión (i_{corr}) y potencial de corrosión (E_{corr}) respectivamente. En la Fig. 3.11) se ilustra la curva de potencial

mixto para la corrosión del zinc en HCl asumiendo que el cátodo se polariza solo por activación, mientras que en la fig. 3.11b, se muestran las curvas similares pero cuando en la reacción catódica hay polarización mixta.

Los potenciales mixtos se usan también cuando un metal se corroe en presencia de más de un oxidante.

3.2. TEORIA DE LA PROTECCION CATODICA

Se pueden usar las curvas de polarización para explicar como trabaja la protección catódica, uno de los métodos más efectivos para controlar la corrosión metálica.

Si la polarización del cátodo se lleva más allá del potencial de corrosión de modo que se alcance el potencial de equilibrio anódico, tendremos que ambos electrodos se convertirán en equipotenciales, eliminando el flujo de corriente neta, y por tanto la corrosión. La corriente necesaria para polarizar el cátodo debe provenir de una fuente externa.

Si suponemos, por ejemplo, que se tiene una celda donde la polarización en ambos electrodos es por activación y de control mixto, como en la Fig. (3.12a), al polarizar el cátodo hasta un potencial E_{AP} la corriente de corro-

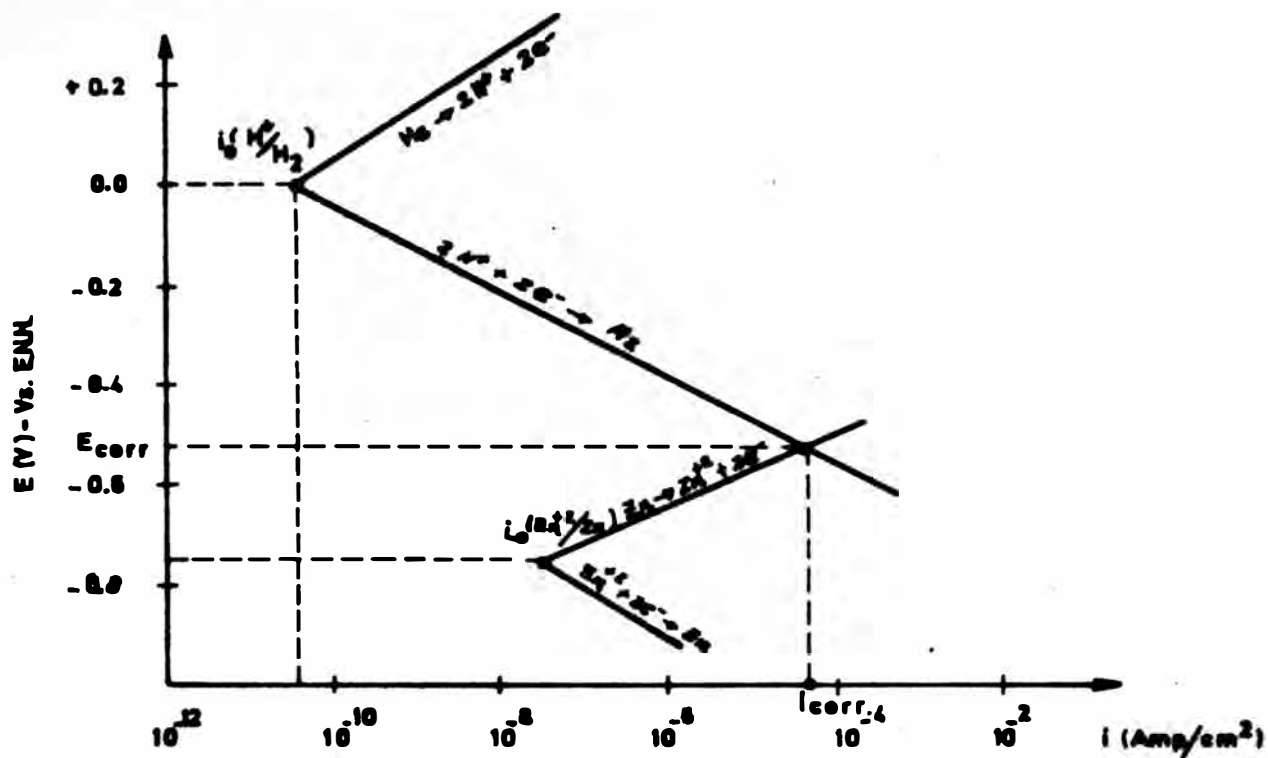


FIGURA N° 3.11a. POTENCIALES MIXTOS PARA EL ZINC EN HCl

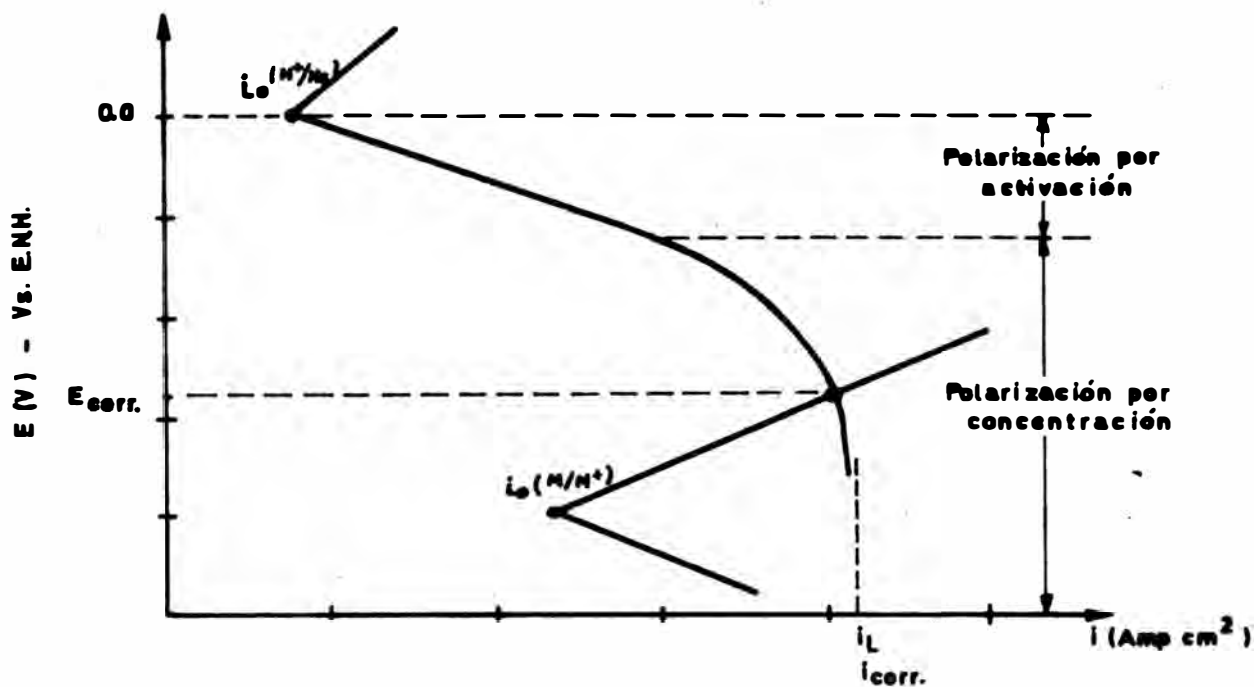


FIGURA N° 3.11b. POTENCIALES MIXTOS CUANDO HAY CONTROL DE FUSIONAL.

sión disminuye de i_{corr} hasta i'_{corr} . La protección será completa si se polariza el cátodo hasta E_A , (Fig 3.12b).

Como se aprecia en las figuras 3.12c y 3.12d, puede aplicarse protección catódica a sistemas donde el control es anódico o catódico, la diferencia residirá en la cantidad de corriente aplicada. En el caso que exista con control anódico la aplicación de la protección catódica podría ser antieconómica ya que se haría necesaria una alta cantidad de corriente.

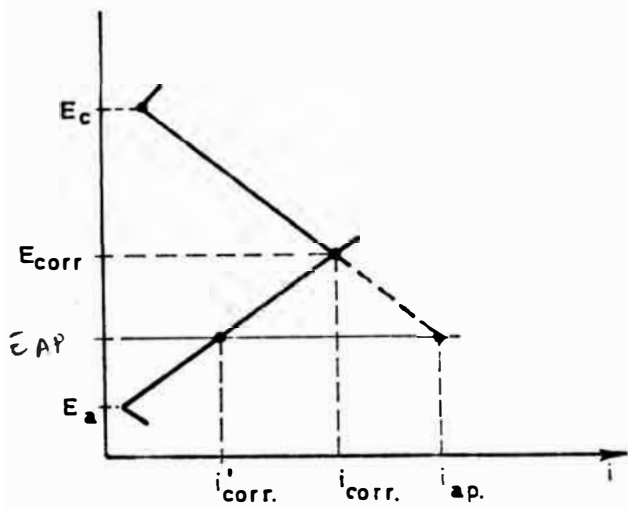
Es importante tener en cuenta el criterio de sobreprotección, puesto que el exceso de corriente que llevaría al potencial del cátodo a un valor más activo que E_A , si bien garantiza la eliminación de la corrosión, podría causar daños en los revestimientos así como en metales anfóteros.

3.2.1. PASIVIDAD-PROTECCION CATODICA vs. PROTECCION ANODICA.

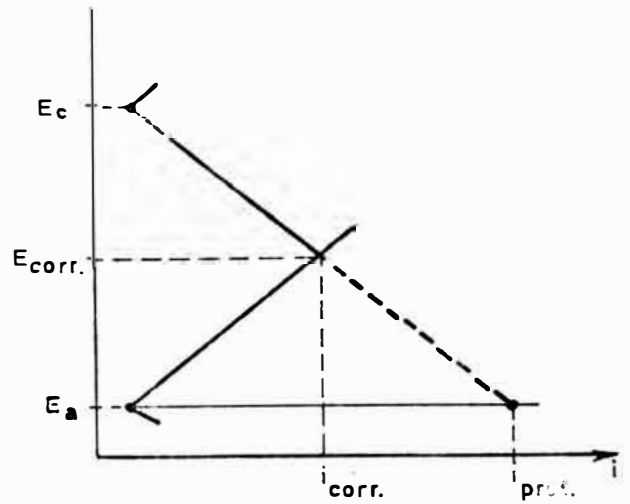
Se define como pasividad a la pérdida de actividad de ciertos metales y aleaciones y es un fenómeno particular que depende de diversas variables involucradas en el proceso de corrosión.

La pasividad es propia de la disolución anódica.

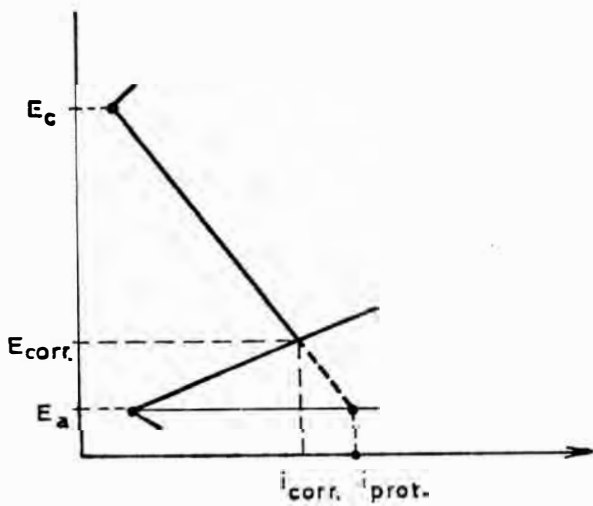
La curva de polarización anódica de un metal o aleación que tiene características de pasividad-



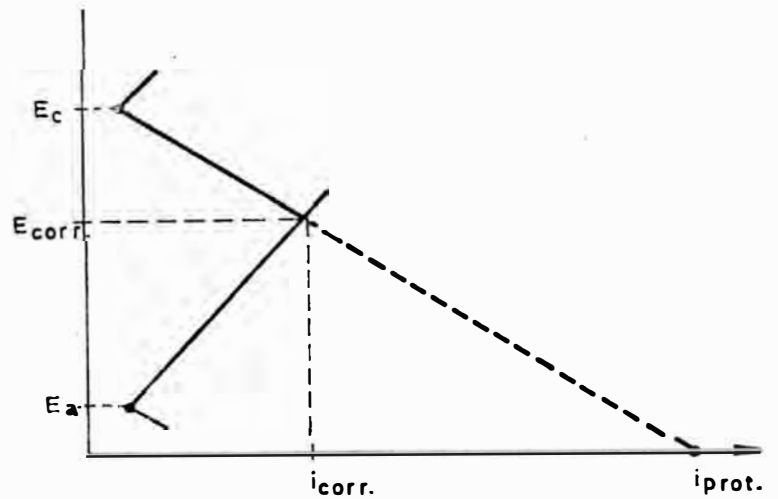
(a) PROTECCION CATODICA PARCIAL



(b) PROTECCION CATODICA TOTAL



(c) PROTECCION CATODICA CUANDO HAY CONTROL CATODICO



(d) PROTECCION CATODICA CUANDO HAY CONTROL ANODICO

FIGURA 3.12. POLARIZACION Y PROTECCION CATODICA

en determinado medio tiene un comportamiento similar al que se muestra en la Fig. (13.13). En la etapa inicial de disolución, la polarización sigue la ecuación de TAFEL (Región activa) hasta que se alcanza un valor de potencial donde súbitamente la densidad de corriente neta se reduce a un valor mínimo, permaneciendo así en un rango de potencial bastante amplio (Región pasiva), al final del mismo la disolución volverá a ocurrir a valores mayores (Región transpasiva).

La protección anódica, surgida a partir de los trabajos de EDLENAU en 1945, se basa totalmente en la cinética de electrodos y puede ser aplicada ventajosamente a metales que tienen comportamiento activo-pasivo y consiste en polarizar, mediante la aplicación de una corriente anódica externa hasta un valor dentro de la región pasiva, al ánodo en disolución. El potencial óptimo de protección es el correspondiente a la mitad de la región pasiva.

En la figura (13.14), se ilustra la aplicación de la protección anódica para un sistema donde el ánodo se comporta en forma activo-pasivo y el cátodo se polariza siguiendo la ecuación de TAFEL. Puede observarse que si se quiere aplicar protección anódica, sería necesario polarizar la curva-

de disolución anódica hasta el potencial óptimo. (Eprot); la cantidad de corriente necesaria para ello será $0.099 \mu\text{amp/cm}^2$; si se aplica protección catódica será necesario polarizar el cátodo hasta el valor de potencial de equilibrio anódico, requiriéndose para ello una cantidad de corriente del orden de $10,000 \mu\text{amp/cm}^2$; de lo expuesto se deduce que cuando el metal o aleación tiene comportamiento activo-pasivo, lo más ventajoso es usar protección anódica.

En el cuadro N°3.4, se muestra la comparación de los sistemas de protección catódica y anódica.

3.2.2. METODOS ACTUALES PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE CORROSION.

La obtención de los parámetros velocidad de corrosión y potencial de corrosión son importantes para el diseño de un sistema de protección. En la actualidad los métodos más efectivos para medir la velocidad de corrosión son dos:

1.- EXTRAPOLACION DE TAFEL.- Este método fué usado por WAGNER y TRAUD para verificar la teoría de potenciales mixtos y consiste en obtener datos experimentales a partir de la polarización catódica. En la fig. 3.15 se ilustra el esquema del equipo utilizado así como

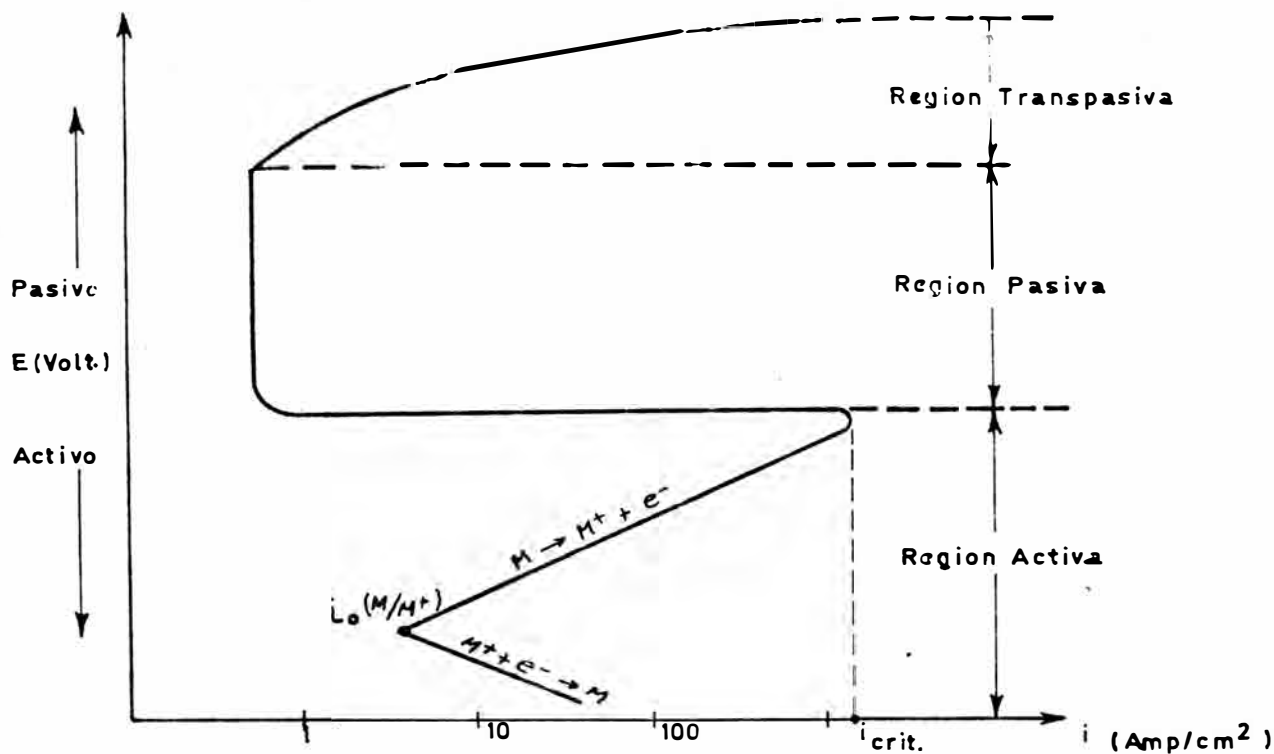


FIGURA 3.13. — CURVA DE DISOLUCION ANODICA DE METAL CON COMPORTAMIENTO ACTIVO-PASIVO.

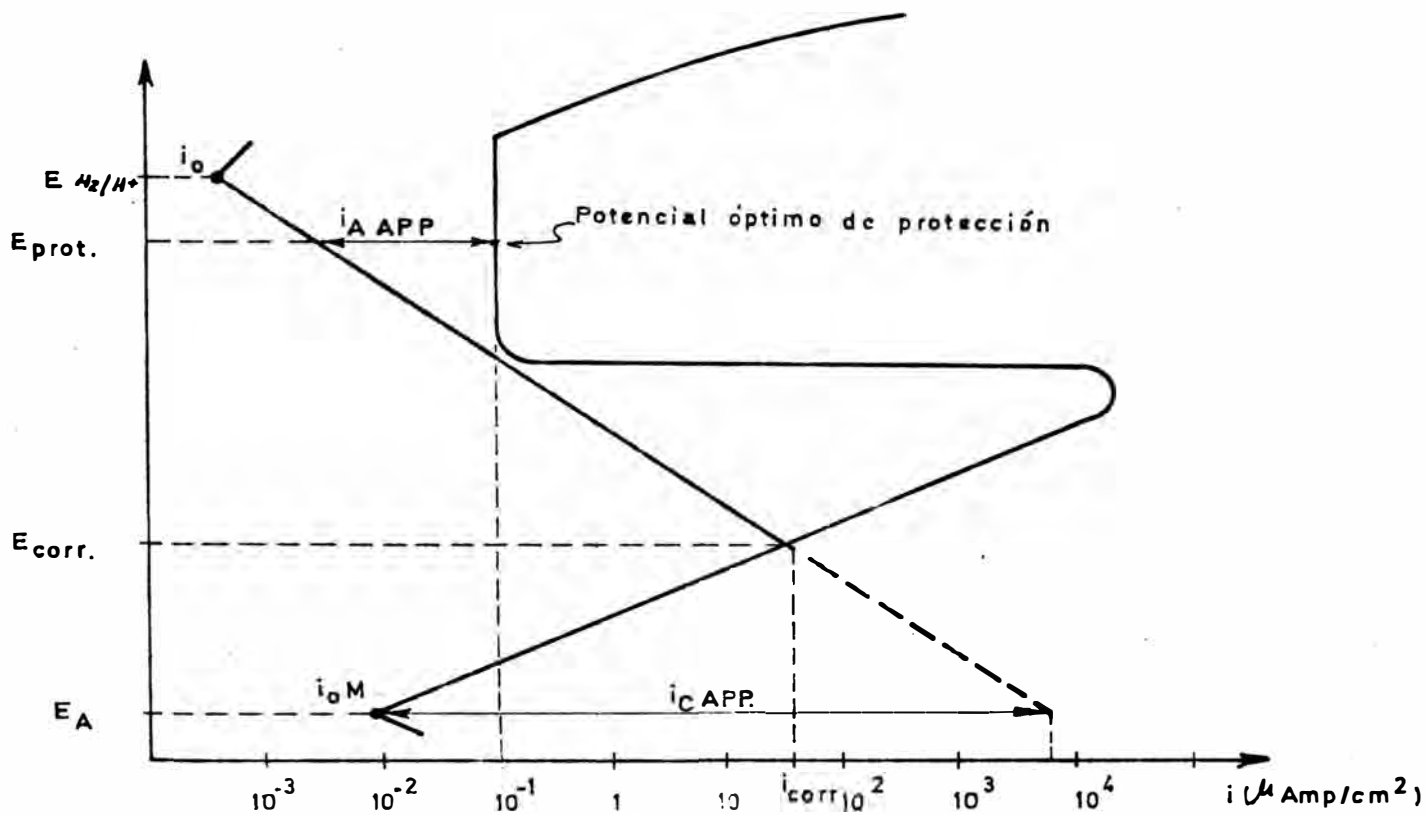


FIGURA 3.14. — PROTECCION CATODICA Y ANODICA — METAL CON COMPORTAMIENTO ACTIVO-PASIVO

	PROTECCION CATODICA	PROTECCION ANODICA
APLICABILIDAD	-Se puede aplicar en todos los metales que se corroen pero es más económico en aquellos con control catódico.	-Solo aplicable a metales con comportamiento activo - pasivo. (Acero en H ₂ SO ₄)
VENTAJAS	-Se puede instalar en lugares donde no hay energía eléctrica, usando ánodos sacrificados -Costos de instalación bajos.	-Uso en corroyentes muy agresivos. -Bajo costo de operación. -Facil diseño y predicción de su factibilidad -Mejor aprovechamiento de energía. -Mejor consumo de electrodos.
DESVENTAJAS	-Costos operativos altos -Alto consumo de ánodos -Frecuente mantenimiento	-Costo de equipo e instalación elevado. -Riesgo de severa corrosión en caso de falla.
OTROS.	-Diseño basado en métodos empíricos.	-Diseño basado parámetros obtenidos por mediciones electroquímicas, rápidas.

la curva generalmente obtenida al polarizar catódicamente el electrodo de trabajo (M) proporcionando una corriente externa controlada con la resistencia externa R y mediante un electrodo auxiliar (Aux.) para un valor de $R=0$, el potencial medido será el de corrosión (E_{corr}) y los puntos que conforman la curva experimental se obtienen de medir el potencial, para cada valor de corriente externa aplicada.

La curva experimental para valores bajos de corriente catódica aplicada tiene pendiente variable, pero a valores altos tenderá a una recta que se aproxima a la de polarización catódica real, es decir con una pendiente igual a β_c . La región recta se denomina "Región de TAFEL", a partir de la cual se puede construir el gráfico de polarización para el sistema. En la práctica se observa que la región de TAFEL se inicia a un potencial más activo que E_{corr} aproximadamente de 50 mv.

2.-POLARIZACION LINEAL.- Más exacto aun que la extrapolación de TAFEL, y basado en el hecho que a potenciales 10mv. Mas nobles o más activos que el de corrosión, la relación entre

la corriente aplicada y el potencial es lineal. En la Figura 3.16, se muestra el gráfico η vs. I_{aplic} , de la curva de polarización catódica en los primeros 20 mv.

La pendiente de la región lineal es:

$$\text{PEND.} = \frac{AE}{A i_{\text{aplic.}}} \quad (3.12)$$

Que relacionando a los parámetros cinéticos del sistema se puede expresar:

$$\frac{AE}{A i_{\text{aplic.}}} = \frac{\beta_a \cdot \beta_c}{2.3 i_{\text{corr}} (\beta_a + \beta_c)} \quad (3.13)$$

Donde β_a y β_c son las pendientes de TAFEL para la reacción catódica y anódica.

Una buena estimación de la velocidad de corrosión en muchos sistemas comunes se puede hacer asumiendo $\beta_a = \beta_c = 0.12$, con lo que la expresión (3.13) se convierte en:

$$\frac{AE}{A i_{\text{aplic}}} = \frac{0.026}{i_{\text{corr}}} \quad (3.14)$$

Los dos métodos de medición de la velocidad de corrosión descritos, tienen las siguientes ventajas:

- Permiten mediciones rápidas y pueden hacer factible el registro de la velocidad de corrosión.

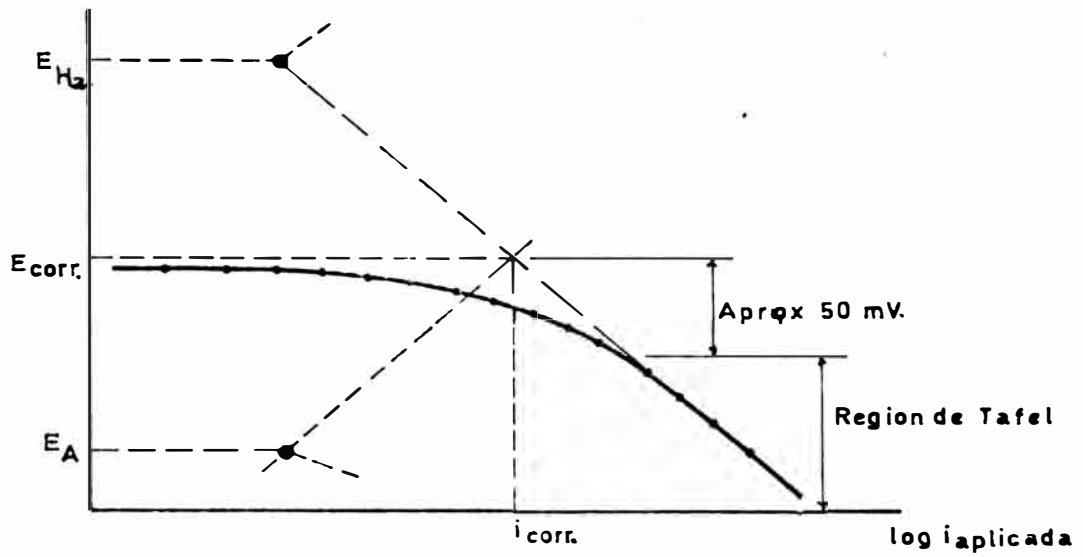
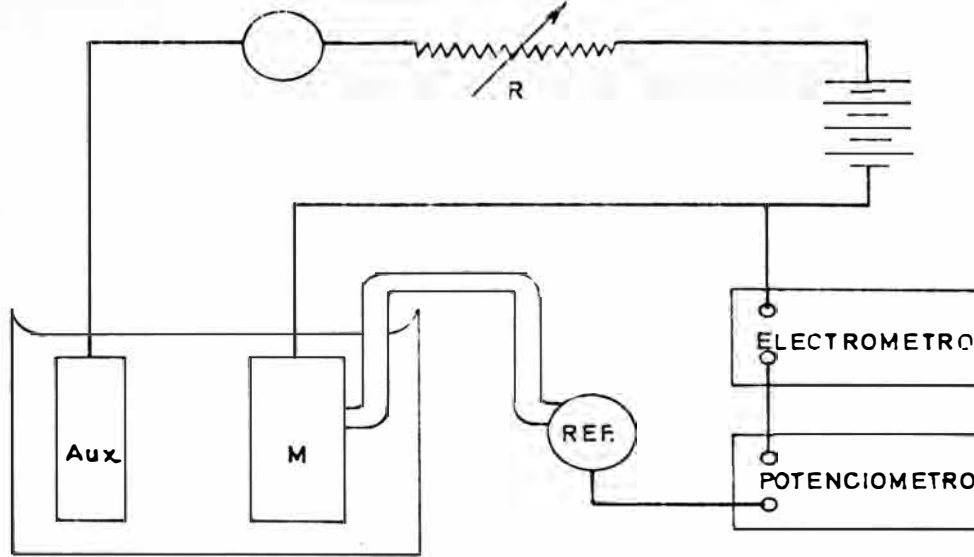


FIGURA 3.15._EXTRAPOLACION DE TAFEL

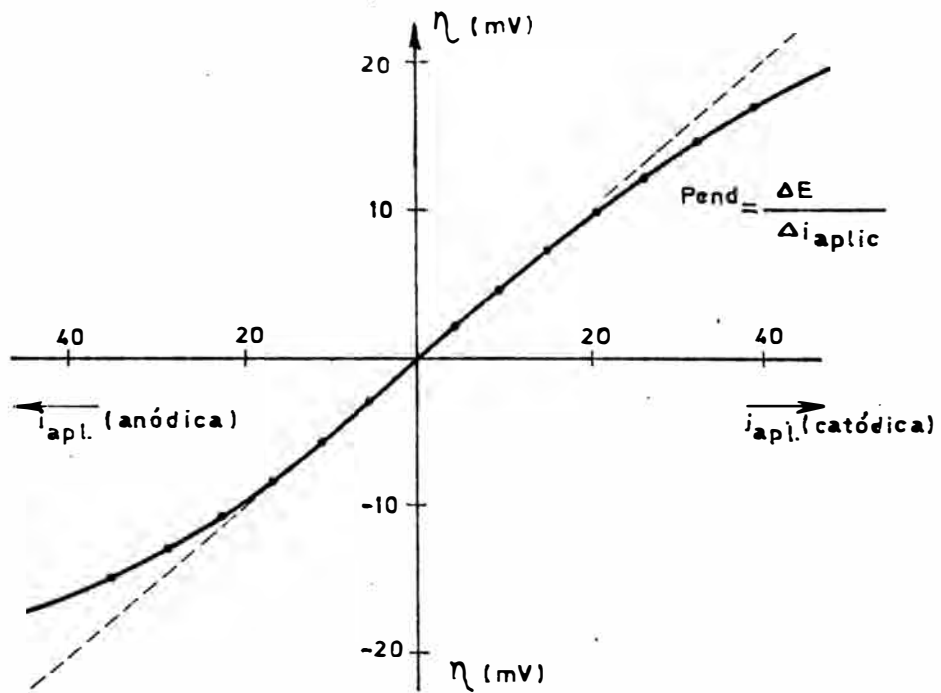


FIGURA 3.15._POLARIZACION LINEAL CON CORRIENTE APLICADA

- Permiten medir velocidades de corrosión muy pequeñas (menores a 0.1 mpy).
- Hacen factible medir la corrosión en lugares inaccesibles a una inspección convencional, como ductos de gran longitud, tanques, líneas enterradas, etc.

3.2.3 CAUSAS DE CORROSION DE LOS ACEROS POR SUELOS.

La corrosividad de los suelos varía bastante debido a que la composición del mismo, no siempre es uniforme. Los aceros en suelos sufren generalmente corrosión por picadura siendo este el mayor problema de las superficies enterradas.

Los factores que incluyen en la corrosión de los aceros por suelos son:

- Factores inherentes al suelo.
- Factores de perturbación externa.
- Factores metalúrgicos.

3.2.3.1. FACTORES INHERENTES AL SUELO.-

Los más importantes son los siguientes:

- i .- ALCALINIDAD Y ACIDEZ,- En los suelos se encuentran ácidos orgánicos derivados del Humus, muy corrosivo a los aceros. La mejor -

medida de la corrosividad en este aspecto lo da el grado de acidez más que el pH.

.-POROSIDAD.- Indica el grado de aireación y compactación. Se encuentra que los productos de corrosión formados en suelos aireados, son más protectores que los formados en suelos no aireados. Romanof, resume el efecto de aireación de la siguiente manera: "En los suelos bien aireados la velocidad de formación de picaduras es inicialmente elevada, disminuyendo con rapidez por la precipitación de hidróxido férrico que se realiza próxima a la superficie metálica, la película así formada retarda la velocidad de formación de picaduras.

Cuando el suelo no está aireado la velocidad de formación de picaduras disminuye en forma muy lenta permaneciendo los productos de corrosión en estado no oxidado, difundiéndose en el suelo, no o

freciendo protección al acero".

Otro efecto de la aireación es que el oxígeno puede actuar sobre ciertos despolarizantes orgánicos favoreciendo la corrosión. Así mismo, en presencia de bacterias anaerobias el oxígeno es desfavorable.

iii.-CONDUCTIVIDAD.- Dependiendo de su composición y condiciones ambientales, los suelos tienen diferente resistividad, un terreno arcilloso puede tener una resistividad de 1,000 ohm-cm, mientras que uno de alta composición de arenisca puede tener 100,000 Ohm-cm. En la Tabla 3.5 se muestran las resistividades de diversos terrenos de acuerdo a la formación geológica.

Los factores que influyen en la resistividad de los suelos son el contenido de sal, humedad y temperatura, como se muestra en la Figura 3.17. Logan ha derivado una ecuación empírica para la variación de la resistividad del suelo en función de la temperatura:

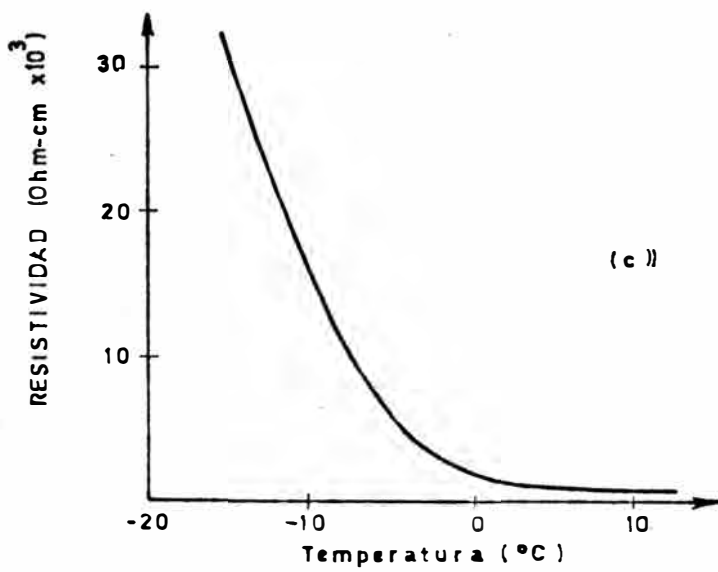
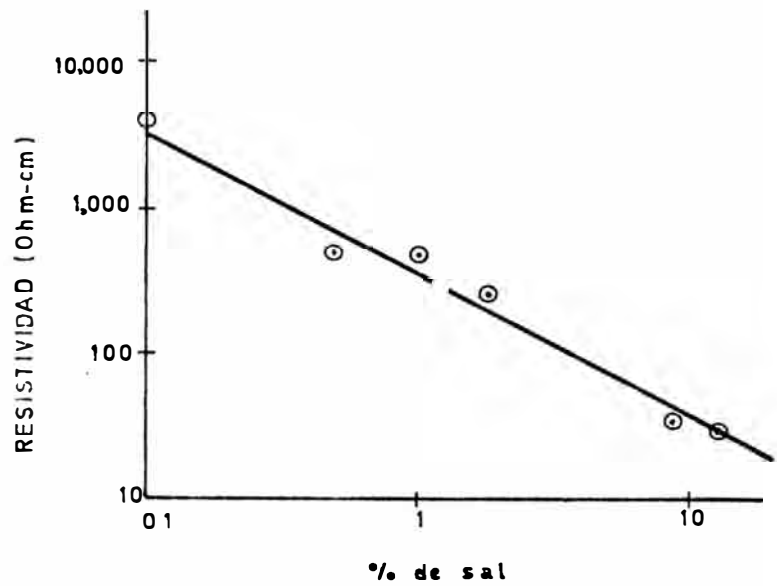
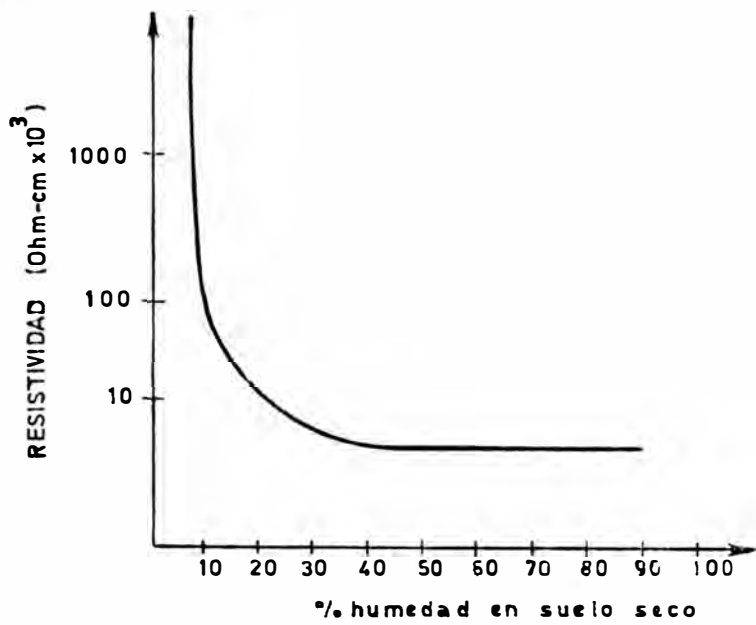


FIGURA N° 3.17.— EFECTO DE ALGUNOS FACTORES. SOBRE LA RESISTIVIDAD DE SUELO.

$$\rho_t = \rho \frac{15.5}{24.5+t} \quad (3.15)$$

En la tabla N° 3.6 se muestra el efecto de la resistividad sobre la corrosión de los aceros.

iv .- HUMEDAD Y SALES DISUELTAS.-Además

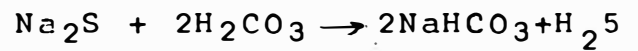
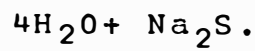
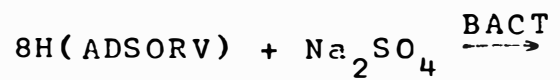
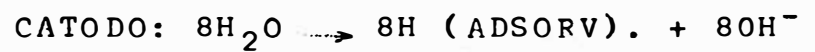
de actuar sobre la resistividad, la presencia simultánea de sales y humedad pueden generar soluciones corrosivas a los aceros.

v .- MICRO-ORGANISMOS.-Las bacterias a

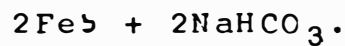
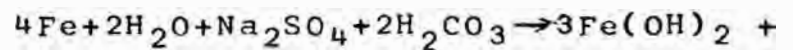
naerobias, especialmente las reductoras de sulfatos (*Sporovibrio desulfuricans*) que pueden encontrarse en terrenos poco oxigenados y de PH entre 5.5 y 8.5 y a temperaturas hasta de 80°C para ciertas variedades, promueven velocidades altas de corrosión ya que en presencia de Hidrógeno (H₂) o materia orgánica reducen los sulfatos que se facilita con la presencia de una superficie de acero. El hidrogeno necesario es suministrado por la reacción de corrosión, y las bacterias al reducir-

los sulfatos actúan como despolarizadores, puesto que por cada equivalente de átomos de H_2 consumidos por las bacterias se disuelven e equivalentes de Fe.

Las reacciones que se llevan a cabo son:



Que en forma global se puede representar por:



FORMACION GEOLOGICA

RESISTIVIDAD DEL SUELO. (OHM-cm)	CUATERNARIA	CRETACEO TERCIA- RIA CUATERNARIA.	CARBONIFERA TRIASICA	CAMBRIARCA ORDOVICIE NICA DEVONIANA	PRECAMBRICA
100	Agua de Mar				
1,000		Arcilla	Cal		
3,000		Cal	Esquistos Calcáreos.		
10,000					
30,000					
100,0000					
300,000	Arena, gruesa				
1'000,000					

TABLA 3.6

EFFECTO DE LA RESISTIVIDAD SOBRE LA VELOCIDAD DE CORROSION

RESISTIVIDAD DEL SUELO (Ohm - cm)	REGIMEN DE CORROSION
< 700	Muy Severa Corrosividad
700 - 2000	Severa Corrosividad
2000 - 5000	Corrosividad mediana
> 5000	Baja corrosividad

3.2.4. METODOS PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO.

Para aplicar protección catódica uno de los parámetros principales de diseño es la resistividad del medio; cuando se trata de suelos pode - mos mencionar 3 métodos para calcular la resistividad, estos son:

- El método de sonda.
- El de los dos electrodos.
- El de los cuatro electrodos.

3.2.4.1.METODO DE SONDA.- Basado en el princi

pio que la resistividad de un electrolito puede calcularse midiendo la resistencia entre los extremos de una determinada forma geométrica. En su versión más simple el aparato de medida consiste en un tubo plástico de diámetro conocido con 4 electrodos circunferenciales x instalados a una distancia determinada, Los mismos que estarán en contacto con el electrolito. La longitud recomendable del tubo es 4 ó 5 veces su diámetro.

El procedimiento de medición consiste - en llenar el tubo con tierra proveniente del suelo y hacer circular una co

rriente conocida a través de los elec
trodos anulares superior e inferior y
 midiendo la caída de potencial entre-
 los dos electrodos. La resistividad-
 se podrá calcular fácilmente según:

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} = \left(\frac{AE}{I} \cdot \frac{A}{L} \right) \quad (3.16)$$

En la figura 3.18, se muestra el es
 quema de una sonda.

3.2.4.2.METODO DE LOS DOS ELECTRODOS.- (Méto-

do de SHEPERD).- Consiste en dos elec
trodos metálicos de forma cónica (co
no-sonda de Sheperd), que se instalan
 enterrados a una profundidad aprox.de
 10 a 12 veces su diámetro y a una dis
tancia conocida, la resistividad se
 calcula simplemente midiendo la resis
tencia entre los electrodos. Este mé
todo no es muy eficaz.

3.2.4.3.METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS.- (Mé

todo de Wenner).- Es el más utilizado
 para medir la resistividad de suelos,
 y consiste en instalar 4 electrodos
 metálicos alineados sobre la superfi
cie y separados una distancia conoci
da.

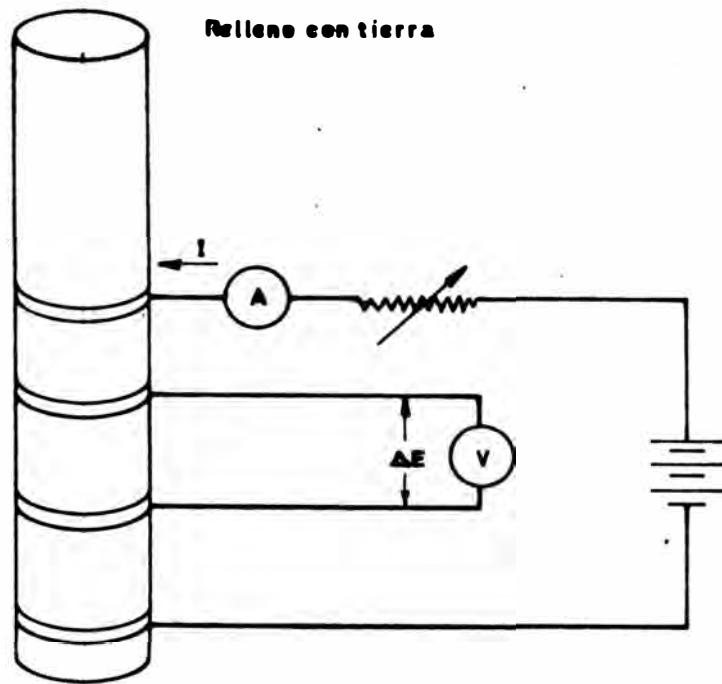


FIGURA N° 3.18.- SONDA PARA MEDICION DE RESISTIVIDAD

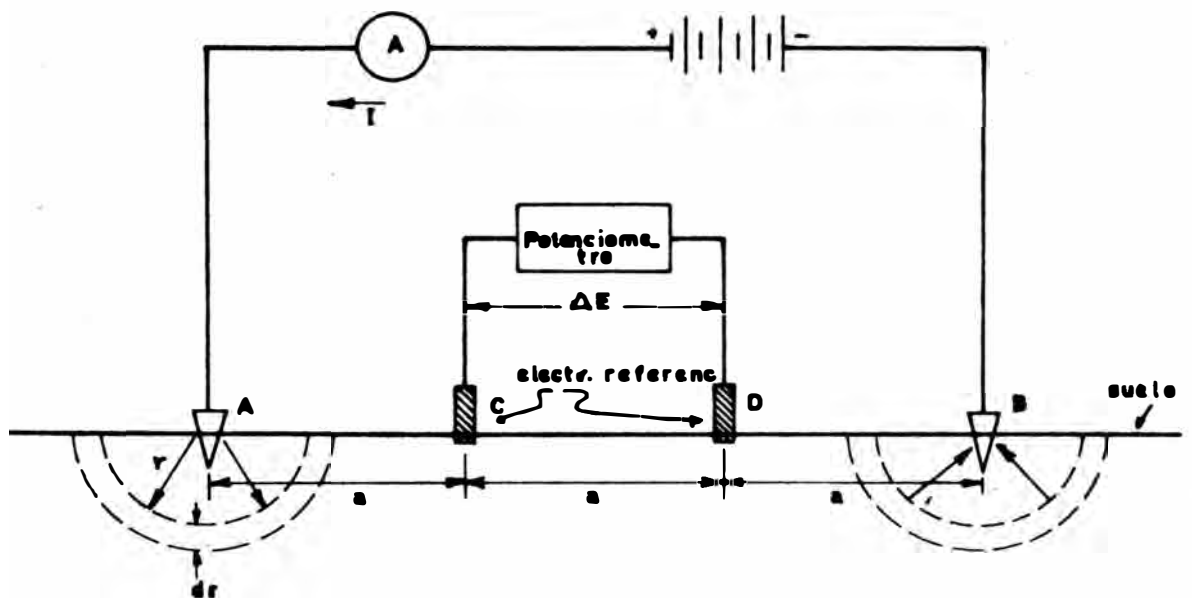


FIGURA N° 3.19.- METODO DE LOS 4 ELECTRODOS

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 los cuales es más recomendable sean electrodos de referencia de $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$ ó Ag/AgCl_2

De acuerdo al esquema mostrado en la Figura 3.19, la densidad de corriente en el suelo adopta una simetría semiesférica, a una distancia r de A ó B tendremos:

$$\frac{dE}{dr} = \frac{I}{2\pi r^2} \cdot \rho \quad (3.17)$$

$$\text{ó } \Delta E = \int_{r_1}^{r_2} \frac{I \rho}{2\pi r^2} dr = -\frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r^1} \right) \quad (3.18)$$

A partir de (3.2.3.) se puede calcular la diferencia de potencial entre C y D debido a que la corriente que sale de A, está dada por:

$$\Delta E_1 = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) = \frac{I\rho}{4\pi a} \quad (3.19)$$

Y en forma similar se tiene que la diferencia de potencial entre los mismos puntos (C y D), debido a la corriente que entra al electrodo B es:

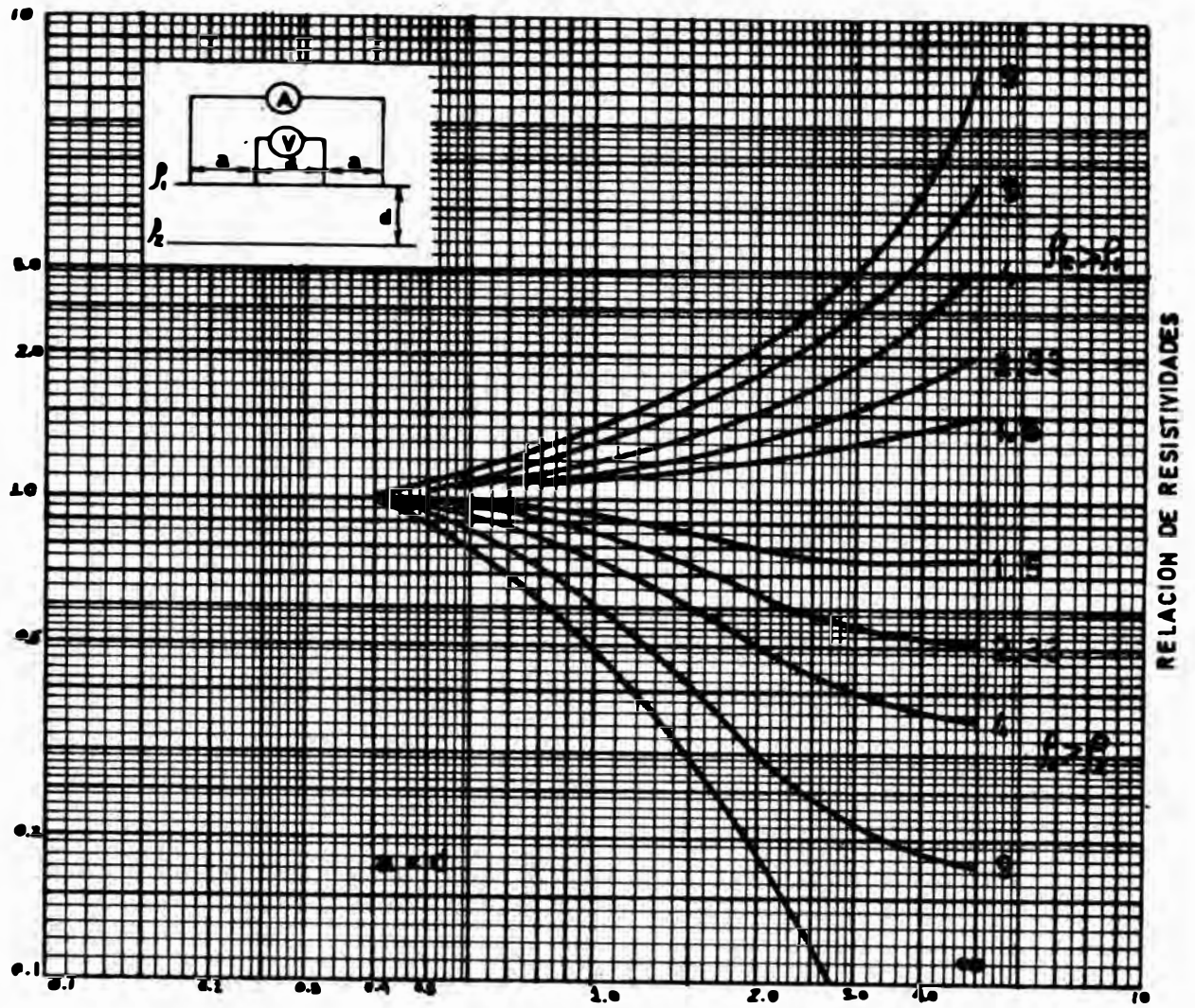


FIGURA 3.20.- Resistividad aparente obtenida por el metodo Wenner para terreno con dos capas de diferente ρ .

$$\Delta E_2 = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) = \frac{I \rho}{4\pi a} \quad (3.20)$$

La diferencia de potencial entre los electrodos C y D en consecuencia será:

$$\Delta E = \frac{I \cdot \rho}{2\pi a} \quad (3.21)$$

De donde:

$$\rho = 2\pi a \frac{\Delta E}{I} \quad (3.22)$$

Este método nos dá la resistividad del suelo a una profundidad igual a "a" . Aunque el método es para electrolitos-homogéneos, podemos medir la resistividad aparente bajo toda circunstancia. Si se tratase de un terreno con dos capas de diferente resistividad, si la capa superior tiene una profundidad (d) y una resistividad ρ_1 . Y la inferior está a una ^{profundidad} ~~resistividad~~ infinita y su resistividad es ρ_2 , podemos obtener el valor de la resistividad aparente (ρ_a) en función de la distancia entre electrodos (Profundidad)

En la figura N°3.20, se aprecian curvas de resistividad aparente en funun -- ción de la distancia entre electrodos- (a) conociendo la resistividad y profundidad de la capa superior así como

la resistividad de la capa inferior.

3.2.5. CRITERIOS PARA LA DETERMINACION DE LA CORRIENTE NECESARIA.

Existen varios criterios para la determinación de la corriente de protección necesaria. Todos ellos están basados en consideraciones empíricas cuyo objetivo es la polarización de la estructura a un valor que permita una protección segura y completa. Describiremos los tres más importantes:

Cambio de Potencial.

- Polarización de ^{la} estructura a un valor constante.
- Método Gráfico E- Log. I

Los resultados obtenidos con estos métodos dan valores de densidad de corriente que en la práctica corresponden a los rangos indicados en la Tabla N°3.7.

CAMBIO DE POTENCIAL:

Esta es una regla empírica que consiste en polarizar la estructura de acero, un valor constante que fluctúa entre 0.25 y 0.30 voltios - más activo que el potencial de corrosión ya que se considera que esto es suficiente para proteger a la estructura.

En la práctica se mide la resistencia del sistema a partir de la caída de potencial que produce una corriente externa conocida e in

roducida en un punto lejano a la estructura. como el potencial que se alcanza y la corriente son conocidos por la ley de OHM puede calcularse directamente la resistencia del sistema.

En el caso del acero este criterio está limitado a aplicaciones de protección de estructuras desnudas o p**o**bremente recubiertas, donde el potencial de corrosión es menor que $-0.5v$. En este caso la caída de tensión (IR) entre los electrodos y la superficie de la tubería es un factor que debe considerarse en el diseño.

Algunos autores consideran éste método como un criterio dudoso de protección debido a que pueden ~~x~~ implicar una protección incompleta o una sobreprotección con el consiguiente consumo excesivo de potencia ó desgaste de ánodos.

POLARIZACION DE LA ESTRUCTURA A UN VALOR CONSTANTE.

Este método es muy popular entre los diseñadores de sistemas de protección catódica. Consiste en polarizar la estructura metálica en la dirección anódica hasta un valor que pueda garantizar una protección segura, el mismo de

pende del material como a continuación se indica:

<u>MATERIAL</u>	<u>POTENCIAL (V) (-1)</u>
Acero	0.85 - 0.90
Aluminio	0.80 - 0.85
Cobre	0.1 - 0.25
Plomo.	0.55 - 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, si se considera que el producto final de corrosión es el $\text{Fe}(\text{OH})_2$, con la ecuación de NERST se obtiene:

$$E_{\text{Fe}} = 0.440 + \frac{0.059}{2} \log \frac{(\text{Fe}^{+2})}{1} \delta$$

$$E_{\text{Fe}} = 0.440 + \frac{0.059}{2} \log \left\{ \frac{\text{Prod.solub. Fe}(\text{OH})_2}{(\text{OH}^-)^2} \right\}$$

Como la concentración de los iones (OH^-) es dos veces la concentración de Fe^{+2} , y el producto de solubilidad del $\text{Fe}(\text{OH})_2$ es 1.8×10^{-15} resulta:

$$E_{\text{Fe}} = 0.440 + \frac{0.059}{2} \log \frac{(1.8 \times 10^{-15})}{(2)^2} = 0.91\text{V}$$

**TABLA 3-7 DENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA PARA LA PROTECCION
DE ACEROS EN CONDICIONES AMBIENTE**

AMBIENTE	ESTRUCTURA	RECUBRIMIENTO	DENSIDAD CORRIENTE (m amp./m ²)
Suelo	Tuberías .	Plástico	0.005 - 0.01
	Tanques	Asfalto y vidrio	0.03 - 0.1
	Cables	Asfalto	0.2 - 10.
		Sin protección	10. - 50.
Agua Dulce	Tuberías	Pintura nueva	0.03 - -0.6
	Tanques	Recubrim. antiguo	0.5 - -5.
	Barcos		
	Compuertas.		
	Pilotes	Protegidos	30. - 120.
	Pozos y tanques	No protegidos	100. - 300.
Agua de Mar	Estructuras	Con buena pintura	0.5 - 15.
	Estáticas	Recubrim. antiguo	10. - 40.
	Estructuras	Con buena pintura	3. - 50.
	Móviles		
	Estructuras en zonas de marea	No protegidas	100. - 200.(inici) 30. - 120.(Est)
	hélices	No protegidas.	No mayor de 500

METODO E-ILOG

También denominado "METODO DE CURVA CORRIENTE-POTENCIAL", se usa para determinar la densidad de corriente necesaria. Consiste esencialmente en aplicar incrementos de corriente de protección y medir el potencial de polarización correspondiente en la estructura bajo investigación. El potencial medido (voltios), respecto a una celda de referencia remota se plotea en función de logaritmo de la corriente total aplicada; el 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 definirá el valor de la corriente de protección.

La forma de la curva es semejante para las estructuras de acero, sin embargo la curvatura depende de muchos factores como la homogeneidad del medio, el tamaño de la estructura, las áreas anódicas y catódicas etc.

A pesar de lo sencillo del método se requiere que las medidas sean cuidadosamente tomadas pa

ra lograr resultados satisfactorios.

Siendo este un método práctico los criterios para la obtención de la corriente de protección a partir de la curva varían. Es así que muchos consideran el punto de ruptura de la curva como representativo mientras que otros consideran un factor de seguridad sobre el valor obtenido por la intersección de las tendencias a alta y baja corriente.

3 2.6 SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA

Se ha mencionado que una de las formas de proteger una estructura metálica contra la corrosión es logrando llevar el potencial de la reacción catódica hacia el potencial anódico. Tal es el caso de una superficie de acero que presenta zonas anódicas y catódicas cuando se encuentra inmersa en un electrolito. Esta forma de protección se conoce con el nombre de PROTECCION CATODICA y se logra bajo dos formas:

.- PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO.-

Donde la fuente externa de corriente es un metal electroquímicamente más activo que el que corresponde a la estructura que se desea proteger.

.- PROTECCION CATODICA POR CORRIENTES IMPRESAS.- En cuyo caso la fuente de corriente de protección proviene de un rectificador.

A continuación se discuten con mayor detalle dichas formas de protección:

3. . PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO.

En el caso de la corrosión del acero, ésta se lleva a cabo debido al flujo de corriente que existe como consecuencia de la diferencia de potencial ánodo-cátodo; la introducción en el sis

tema de un metal más activo provoca que la superficie metálica alcance un solo potencial, al anódico.

En general este tipo de protección es aplicable donde los requerimientos de corriente son bajos, donde las superficies a proteger se encuentran pintadas, donde se requiere una protección localizada o cuando los suelos presentan una resistividad relativamente baja. Entre sus ventajas puede citarse:

No se requiere un suministro externo de corriente.

- Los costos de mantenimiento son bajos.

Rara vez causa problemas de interferencia a estructuras adyacentes.

Costos bajos de instalación.

Utilización efectiva de la corriente protectora

En contraposición pueden citarse las siguientes desventajas:

- Los potenciales de protección disponible son fijos.

Corrientes de salida bajas y limitadas.

- Pueden presentarse limitaciones debido a la resistividad del suelo.

- No presentan una protección efectiva para tuberías mal recubiertas o de gran diámetro.
- La eficiencia a obtener es función de los requerimientos de corriente.

3. . . .ANODOS- CARACTERISTICAS

Para el diseño de una protección efectiva, es necesario considerar el tipo de ánodo a usar en la instalación. El tipo de ánodo a usar resulta de una evaluación técnico-económica, como un compromiso entre la garantía de suministrar una intensidad de corriente adecuada para la protección y un mínimo costo.

Las principales condiciones que debe satisfacer los ánodos son:

- El material anódico debe ser electro negativo frente al material que se desea proteger.
- El potencial de solución debe ser lo suficientemente negativo como para polarizar una estructura de acero lo razonablemente rápido hasta un potencial más negativo que -850 mv., pero

no debe ser tan electronegativo para causar un pasaje innecesario de corriente. En todo caso el rango práctico debe estar entre -950 y -1600mv.

- El ánodo no debe desarrollar una película pasiva en su superficie.

Debe tener una alta salida eléctrica. Esta queda determinada por el equivalente electroquímico y la eficiencia galvánica de disolución.

- Se debe corroerse en forma lenta y uniforme.

Debe ser disponible comercialmente en diversas formas y tamaños.

Deberá tener bajo costo.

TIPOS DE ANODOS

El zinc y el magnesio son los principales metales usados como ánodos galvánicos. Aunque ultimamente se han introducido aleaciones de aluminio como ánodos para aplicaciones en servicios de agua de mar y el plomo pero en menor proporción.

ANODOS DE ZINC

Los ánodos de zinc son disponibles en tamaños y formas variadas. Los tipos estándar se muestran en la Tabla N° 3.8. En la práctica pueden usarse ánodos de dimensión no estandar cuando la aplicación particular así lo exija. Las características principales de estos ánodos se indican en la Tabla N° 3.9.

Cuando se usan ánodos de zinc es necesario tener en cuenta lo siguiente:

- Los ánodos deben instalarse en un "BACKFILL" químico apropiado.

Para aplicaciones en suelos, el zinc debe ser de alta pureza (Min. 99.99% Peso).

- La eficiencia galvánica debe ser razonablemente constante en un rango amplio de densidades de corriente de salida. (En términos de m amp./ft de superficie de ánodo). El 90% de eficiencia se asume constante.

El Zinc es el único ánodo que no presenta problemas cuando existe evolución de hidrógeno que ordinariamente se presenta en las reacciones catódicas.

- El uso de este tipo de ánodo es muy extenso en instalaciones enterradas o sumergidas como barcos, muelles, tanques, etc.

TABLA 3-8 TAMAÑOS ESTANDAR DE ANODOS DE ZINC

TAMAÑO NOMI NAL (in)	PESO (lb)	DESIGNACION AZI (1)
1.4 x 1.4 x 9	5	2 - 5
1.4 x 1.4 x 60	30	2 - 30
2 x 2 x 45	50	4 - 50
2 x 2 x 60	60	4 - 60
4 x 4 x 36	150	16 - 150
1/2 x 9/16 (plati na)	0.6 lb/ft	-
5/8 x 5/8 (plati na).	1.2 lb/ft.	-

(1) AMERICAN ZINC INSTITUTE.

TABLA N° 3-9 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANODOS DE ZINC

Gravedad Específica (Agua -1)	7
Densidad (lb/ft ³)	440
Rendimiento Teórico	
- (amp-hr/lb)	372
- (lb/amp. año)	23.5
Eficiencia de corriente (%)	90.0
Rendimiento Real	
- (amp-hr/lb)	335
- (lb/amp.año)	26
Potencial de Solución (1)	-1.1
Potencial de Polarización a-0.90 volt.	0.2
Potencial de Polarización a-0.85 volt.	0.25

(1) Con referencia al electrodo de Cobre -SO₄CU(sat.)

ANODOS DE MAGNESIO

Estos ánodos son los de uso más extenso donde los requerimientos de corriente son altos o donde el electrolito presenta una alta resistividad. Las características principales de este tipo de ánodo se indican en la Tabla N° 3.10, en la Tabla N° 3.11, se muestran las dimensiones estándar de los mismos para aplicaciones en suelos.

Cuando se usan ánodos de magnesio deben tomarse en consideración los siguientes puntos:

- Deben instalarse dentro de un "BACKFILL" químico.

La eficiencia varía con la densidad de corriente.

La eficiencia calculada (que resulta del rendimiento real y consumo real, es aproximadamente 30 mamp/ft². La eficiencia es mayor a mayores densidades de corriente. Ver figura N° 3.21.

El magnesio puede presentar problemas cuando hay evolución de hidrógeno.

- Las aleaciones standar utilizadas contienen 6% de aluminio, 3% de zinc, y 0.2% de manganeso. Los ánodos de alto potencial tienen-

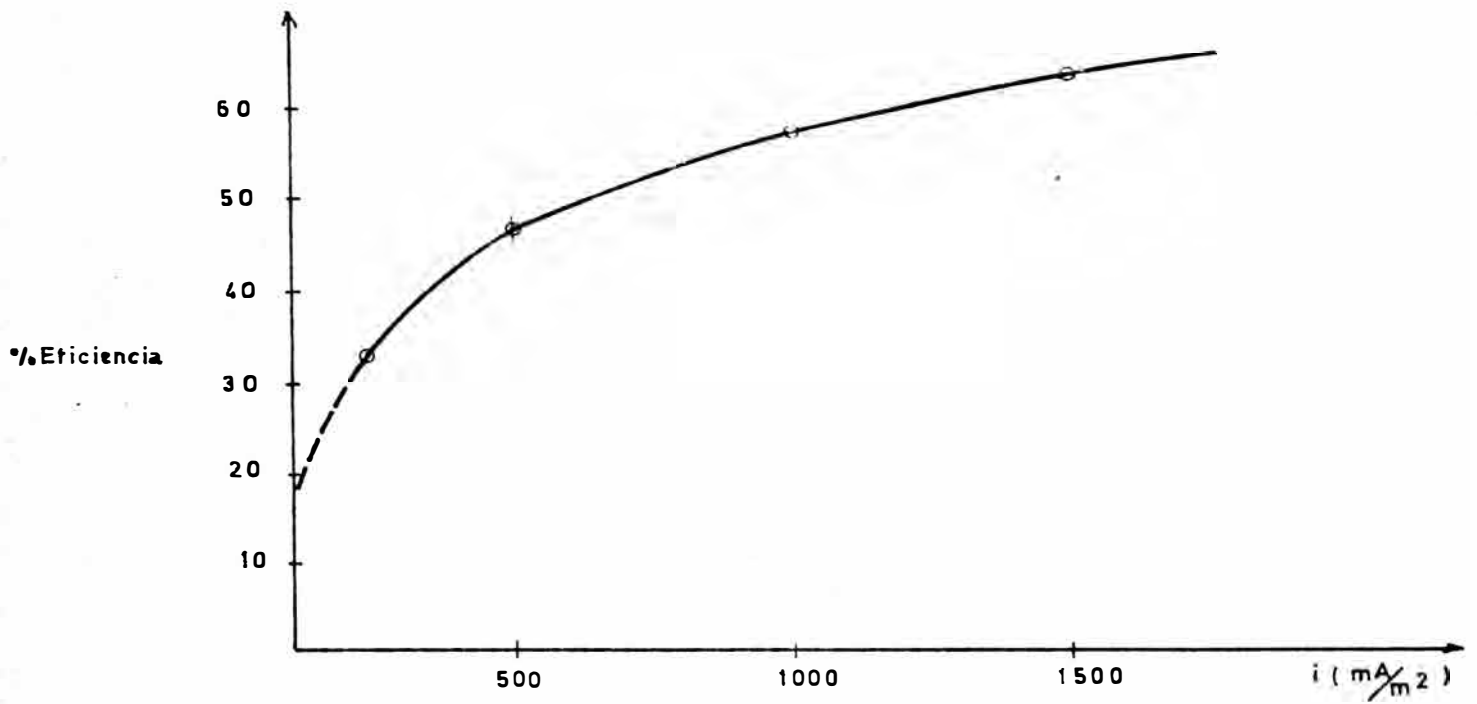


FIGURA 3.21. EFICIENCIA DE ANODOS DE MAGNESIO.

como aleante básico al manganeso y su composición específica depende del fabricante.

ANODOS DE ALUMINIO

El tercer material industrial que puede usarse como ánodo de sacrificio para proteger el acero es el aluminio. La fuerza electromotriz para proteger el acero lo sitúa entre el magnesio y el zinc (Ver Tabla 3.1.)

El aluminio comercial (99.5% pureza) tiene un potencial ^{disponible} entre -0.6 y -0.8 V dependiendo de los aleantes. Comercialmente se encuentran ánodos de aluminio aleados con zinc (3%) que se usan como sustitutos de los de zinc debido a la similitud de comportamiento. También se disponen de ánodos aluminio-estaño y que se utilizan en aplicaciones con agua de mar. En la Tabla 3.12 se resumen las características principales de estos ánodos.

Una de las ventajas que se pueden citar para este tipo de ánodos es que presentan una corriente de salida mayor que los ánodos de zinc y magnesio, pero pueden ser susceptibles a corrosión localizada.

BACKFILL QUIMICO

Debido a que la resistividad efectiva de los alrededores

TABLA N° 3-10

CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS DE MAGNESIO

Gravedad Específica	1.94
Densidad (lb/ft ³)	121
Rendimiento Teórico (amp.hr/año)	1000,0
Consumo Teórico (lb/amp./año)	8.7
Eficiencia (%)	50
Rendimiento Real (amp-hr/lb)	500
Consumo Real (lb.amp./año)	17.4
Potencial solución.	
- Aleaciones estandar	-1.55
- Aleaciones de alto potencial	-1.80
Potencial para polarizar -0.90 volt(1)	
- Aleaciones estandar (volt)	+0.55
- Aleaciones alto potencial (volt)	+0.80

(1) Con referencia al electrodo Cu-SO₄Cu(sat.)

TABLA N°3-11

DIMENSIONES ESTANDAR DE ANODOS DE MAGNESIO

DIMENSIONES I(in)	PESO (lb)	PESO ANO DO +BACK FILL	DIMENSIONES ANODOS + BACKFILL	
			Dia (in)	Log (in)
3 x 3 x 8	5	13	5 1/4	11 1/4
3 1/2 x 3 1/2 x 14	9	25	6	19
3 x 3 x 14	9	27	5 1/4	20
4 x 11 x 12	12	32	7 1/2	18
4 x 4 x 17	17	45	7 1/2	24
3 1/2 x 3 1/2 x 18	17	44	6 1/2	29
2 1/2 x 2 1/2 x 59	20	60	5	66
5 x 5 x 20 1/2	32	68	8 1/2	28
5 1/2 x 5 1/2 x 22	32	65	8	28
5 1/2 x 5 1/2 x 32 1/2	48	100	8	38
7 x 7 x 16	50	100	10	24
4 1/2 x 4 1/2 x 60	60	125	7	66
1 1/2 x 1 1/2 x 70	10	(2)	-	-
2 x 2 x 60	16	(2)	-	-
3 x 3 x 60	40	(2)	-	-
4 x 4 x 60	60	(2)	-	-
3/8 x 3/4 (platina)	0.23lb/ft	(2)	-	-

(2) Generalmente se proveen sin Backfill,

TABLA N°3-12

CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS DE ALUMINIO

A N O D O	POTENCIAL (voltios)	SALIDA amp-hr/lb	CONSUMO lb/amp./año	COSTO APROX ⁺ XIMADO (1)
Alumini <u>o</u> de bajo poten <u>cial</u> (aluminio 5%)	-1	700	12.5	0.70
Aluminio de Pot.Medio (aleación TERNARIA)	-1.13	450-500	9.0	0.55
Aluminio de Alto poten <u>cial</u> .	-1.4	1100	19.0	1.0

(1) Relative al Magnesium.

TABLA N° 3-13

COMPOSICION DEL "BACKFILL" QUIMICO (%)

TIPO	YESO (SO ₄ CU) HIDRATO DE MOLDES.	BENTONITA	SULFATO DE SODIO	RESISTENCIA APROXIMA.	OBSERVAC.	
A	25	--	75	-	250	Para suelos secos
B	50	--	50	-	250	Para aplica con áncos de zinc.
C	-	50	50	-	250	Para áncos zn.mg. en - suelos húme dos.
D	75	--	20	5	50	Para suelos de alta re- sistividad.

dores del ánodo, se confina a la región adyacente inmediata al electrodo, es una práctica común reducir la resistencial local mediante el uso de un relleno o "BACKFILL".

Dicho relleno consiste generalmente en una mezcla de yeso, bentonita y sulfato de sodio. Estos compuestos permiten un potencial de trabajo más alto y una resistencia ánodo-tierra más bajo y distribuyen el ataque-corrosivo uniformemente en la superficie del ánodo para prevenir su falla prematura.

En la Tabla N°3.13 se muestran los tipos más usados de relleno químico

3.2.6.2. PROTECCION CATODICA POR CORRIENTES IMPRESAS.

El uso y diseño de sistemas de corriente impresa es más flexible que los sistemas con ánodos galvánicos. Los requerimientos de diseño se establecen a partir de un muestreo de la estructura a ser protegida.

Básicamente el principio para ambos sistemas es el mismo excepto que los sistemas de corriente impresa energizan ánodos por el uso de una fuente externa de corriente. Generalmente para este efecto se usa un rectificador de corriente. La corriente continua se introduce al electrolito, por medio de un ánodo diseñado especialmente para tener una larga vida sobre condiciones de altas densidades de corriente. Es decir que en la protección por corrientes impresas, la corriente es forzada a fluir desde una fuente externa hacia la tubería o superficie a proteger, ajustándose apropiadamente de forma tal que se sobrepone a la que se está descargando en

las áreas anódicas, y logrando que las áreas catódicas y anódicas de la superficie sean al fin equipotenciales.

El rectificador usado, generalmente convierte la corriente alterna en continua, de bajo voltaje (10-100 voltios) Los elementos de rectificación con sistemas de celdas de óxido de cobre, selenio o diodos de silicio.

El voltaje del sistema de protección debe ser mayor que el correspondiente a las celdas de corrosión. La descarga de la corriente al suelo se realiza a través de un lecho de ánodos auxiliares los que al igual que en el caso de la protección con ánodos de sacrificio estará sujeto a corrosión, pero debido a que su único fin es descargar corriente al sistema, es deseable usar materiales que se corroan a velocidades bastante lentas.

Para los efectos de la protección se disponen de varios tipos de ánodo, algunos de estos son de grafito, aceros fundido con alto contenido de silicio,

aleaciones de plata plomo, platino y deshechos ferrosos (Chatarra), cada uno de los cuales tiene un diseño especial así como diferentes características de operación e instalación.

Los sistemas de corriente impresa son ventajosos cuando:

- 1) Los requerimientos de corriente son altos.
- 2) Cuando la resistividad del electrolito es grande, que se requieran voltajes más altos que los que pueden ofrecer los ánodos galvánicos.
- 3) Cuando se encuentran variaciones o fluctuaciones en los requerimientos de corriente.
- 4) Cuando se requiere un sistema de protección con gran vida útil.
- 5) Cuando realmente se dispone de energía eléctrica.
- 6) Es aplicable a estructuras desnudas o pobremente cubiertas.

Sus principales desventajas son:

- 1) Altos costos de instalación.
- 2) Altos costos de mantenimiento.

- 3) Requieren de inversión para consumo y suministro de corriente.
- 4) Pueden ocasionar problemas de interferencia con otras líneas.

ANODOS PARA LA PROTECCION POR CORRIENTE IMPRESA.

Teniendo en cuenta que en los sistemas de protección catódica por corriente impresa, generalmente las demandas de corriente son grandes, es necesario utilizar ánodos que permitan proporcionar al sistema dichas corrientes sin sufrir desgaste acelerado.

Entre los principales tipos de ánodo se tiene a los siguientes:

- Anodos de grafito.
- Fundiciones de alto contenido de silicio
- Platino y aleaciones de platino.
- Aleaciones de plomo.

Magnetita y

- Chatarra de fierro.

ANODOS DE GRAFITO

Los primeros ánodos permanentes utilizados, fueron grafito y carbón. Presentan la desventaja de que son porosos y por ello deben de impregnarse con una resina inerte. se requiere que éstos ánodos sean de alta pureza y son muy utilizados por el hecho que no son sometidos a esfuerzos mecánicos.

La máxima densidad de corriente por ánodo es de 3amp/m² y su consumo del orden de 0.5 kgr/amp. año.

HIERRO DE ALTO CONTENIDO DE SILICIO

Pueden operar sin dificultad con alta densidad de corriente (20-100 amp/m²) y bajo consumo (100-900 gr/ - amp. año). Tienen la desventaja de ser muy frágiles - por lo que su manipuleo é instalación debe efectuarse con mucho cuidado. La adición de molibdeno les confiere una mayor resistencia mecánica.

PLATINO.

Son ánodos muy eficientes que al permitir altas corrientes de salida hacen posible la fabricación de estos en tamaños muy reducidos. Además del platino puro se usan aleaciones con 10% de Rodio o Paladio o va

rillas de un metal base (plata, titanio, tantalio) , con un recubrimiento de platino de orden 0.2 mm., su alto costo hace que su aplicación sea muy limitada.

ALEACIONES DE PLOMO

Estos ánodos se han desarrollado con la intención de reducir costos. Se fabrican en la forma convencional seguida de un tratamiento de anodizado dentro de un electrolito especial. Las aleaciones más utilizadas como ánodos permanentes son de plomo-antimonio - (6 - 8%) las que forman una capa de peróxido para fuertes densidades de corriente (Más de 200 amp/m²) y con un consumo de 0.5 - 1 kg/amp. año. También se pueden encontrar en el mercado ánodos de estaño (6%) Antimonio (6%) y Plata (1%).

CHATARRA DE FIERRO

Se utilizan normalmente desechos estructurales que por su bajo costo permiten un alto desgaste (9 kgr/amp. año) presentan la desventaja de que si se entierran directamente, el óxido producido polariza la superficie, disminuyendo su eficiencia, esta situación puede aliviarse usando un BACKFILL de carbón.

RECTIFICADORES

El propósito del rectificador es transformar la corriente alterna en corriente continua al nivel requere

rido para la protección. La corriente que entrega el rectificador debe acondicionarse a los cambios de resistividad del medio.

Los rectificadores para aplicaciones de protección catódica tienen como mayores componentes a los siguientes:

- Un transformador de corriente alterna con regulación del voltaje de salida en el secundario.
- Un elemento rectificador (Generalmente de onda total).

Cubierta externa para conexiones y montaje.

- Instrumentos de lectura y/o registro de voltaje y amperaje e interruptor de corriente y sistemas de alarma por falla en el suministro de corriente al rectificador y hacia la estructura protegiéndose

Comercialmente son disponibles rectificadores con entrada de corriente trifásica o monofásica. En las figuras 3.21 y 3.22 se muestran los esquemas simplificados de estos prototipos. En la Fig. 3.23 se muestra el frente de onda que se obtiene en los terminales positivo y negativo, se observa que la tensión de salida presenta un rizado que disminuye la entrega de corriente contínua, este efecto puede atenuarse instalando circuitos de filtro de señal lo que redundará en una mayor eficiencia del rectificador y el consiguiente ahorro de energía.

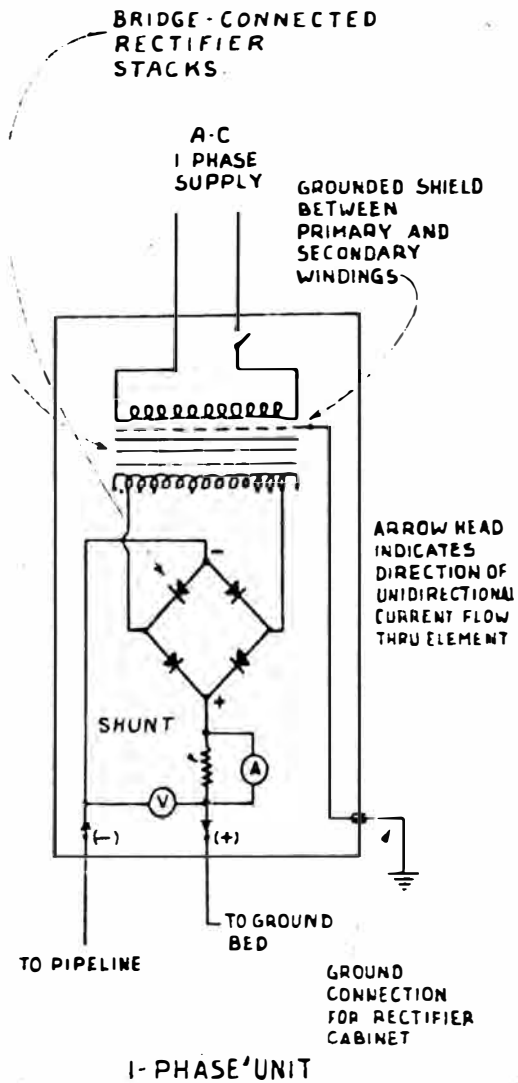


FIGURA N° 3 21

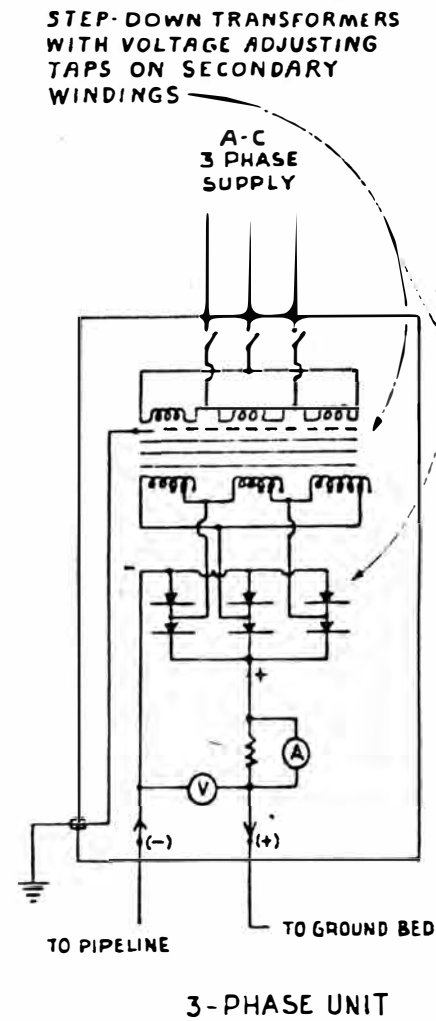


FIGURA N° 3.22

ESQUEMAS DE RECTIFICADORES

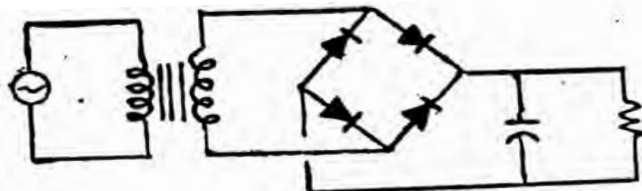
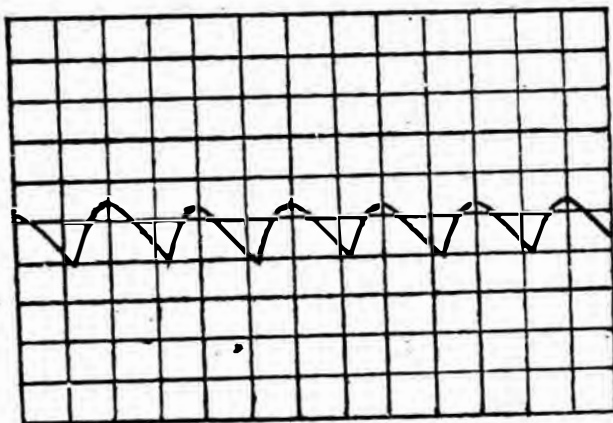
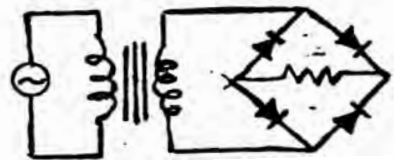
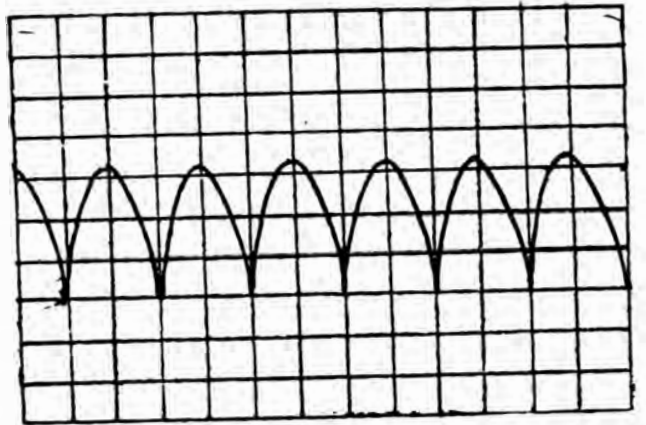
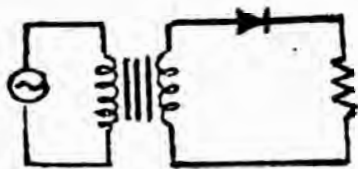
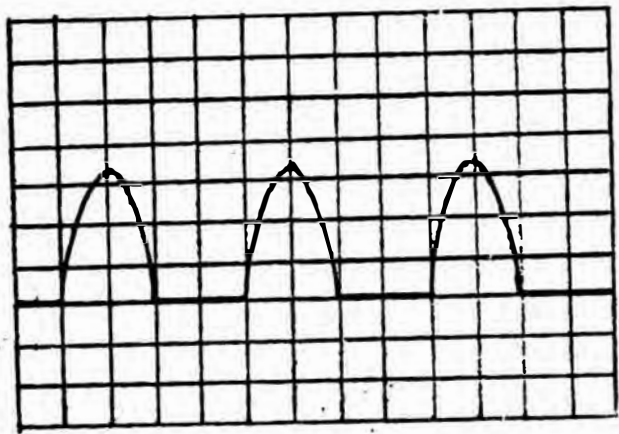


FIGURA 3.23. FRENTE DE ONDA

Los fabricantes de rectificadores producen unidades de diverso diseño atendiendo al tipo de enfriamiento proporcionado, material de los diodos y rango de voltaje de operación.

Desde el punto de vista del enfriamiento pueden ser de dos tipos:

Enfriadores con aire.- Son los más económicos.

- Enfriadores con aceite.- Para sistemas que operan en ambientes corrosivos y/o polvorientos. Si el ambiente está en zonas de peligro potencial de explosión - el blindaje del rectificador deberá ser a prueba de explosión.

Teniendo en cuenta los materiales de fabricación pueden ser de: Placas de selenio, silicio u óxido de cobre. Los rectificadores de silicio son los de mayor uso debido a que la eficiencia de conversión de corriente es alta y porque ocupan poco espacio, presentan la desventaja de estar propensos a fallas por sobrecargas y por ello requieren de sistemas de protección adicionales que incrementan su costo.

Por otro lado, se disponen de rectificadores con rango de voltaje de salida de 10-100 V.DC, para entradas de 110-440V.AC, pero deben especificarse para operar instalaciones de mayor voltaje como lo establece el "NATIONAL ELECTRIC CODE".

LECHOS DE ANODOS PARA LA PROTECCION

El diseño, ubicación y distribución de los lechos de ánodos para la protección de la estructura son factores de notable importancia en el diseño integral del sistema. Otros factores a considerar son:

- Presencia de estructuras adyacentes que puedan ocasionar problemas de interferencia o generar sobre ellas corrientes parasitas.
- Accesibilidad del terreno para una adecuada instalación y mantenimiento.
- Existencia de proyectos futuros que puedan comprometer las instalaciones de ánodos.

Los sistemas de instalación de los lechos de ánodos son dos y en cada uno de ellos los ánodos podrán ubicarse en forma vertical u horizontal.

i .- Anodos remotos.

ii .- Anodos dispersos

i . .- LECHOS DE ANODOS REMOTOS.- Se instalan en puntos distantes de la estructura y consisten en concentraciones de ánodos uniformemente distribuidos - de modo que puedan garantizar un suministro adecuado de corriente hacia la estructura.

Pueden instalarse superficialmente o en lechos - profundos, en el primer caso el ánodo se encuen-

tran a distancias entre 10 y 100 pies de la estructura dependiendo de la calidad de recubrimiento de la misma. (A mejor recubrimiento mayor distancia).

Si bien es cierto que la distribución de corriente es satisfactoria pueden producirse interferencias con estructuras extrañas elevando los costos de operación y originando otros problemas de corrosión.

En los lechos profundos los ánodos son distribuidos en forma vertical hacia la profundidad del suelo. Esta disposición se escoge generalmente donde existen limitaciones de espacio pero con las desventajas siguientes:

- Su mantenimiento es dificultoso.
- Las pruebas sobre requerimientos de corrientes no pueden realizarse a menos que se efectúen sondeos preliminares con ánodos temporales.
- Pueden presentarse problemas de polarización anódica, los que han intentado solucionarse con venteos, sin resultados totalmente satisfactorios.

Son aparentes para usarse a bajas densidades de corriente (15-20 amp), por lo cual pueden -

usarse como ánodos rieles de tuberías de acero de desecho.

ii .- ANODOS DISPERSOS.- Se usan para estructuras complejas, como redes de tubería, sistemas de tanques de almacenamiento, terminales de bombeo muelles, etc., donde la distribución con un lecho no es eficiente.

En este caso los ánodos se ubican de modo que la distribución concuerde con la geometría del sistema.

Tiene la ventaja que la distribución de corriente es más eficiente sobre todo si en el sistema hay muchas tuberías desnudas. También los problemas de interferencia son menores.

• EVALUACION DEL SISTEMA ACTUAL Y COLECCION DE DATOS.

4.1. DESCRIPCION DE LA PLANTA.

La planta se encuentra ubicada en la Provincia Constitucional del Callao, su actividad principal es la Manufactura de Aceites Lubricantes y consiste básicamente en la Unidad de Procesos con los equipos convencionales para sistemas de mezcla y un patio de tanques (siete en total), para el almacenamiento de base lubricantes y productos terminados.

En la Figura 4.1, se describen esquemáticamente las operaciones principales de la planta en mención. En la Tabla 4.1, se muestran las características de los tanques de almacenamiento y su disposición de Planta en el Plano N°33-A-101-F

4.2. MATERIALES DE FABRICACION.

Dado que el problema que nos ocupa está referido exclusivamente a los tanques de almacenamiento, describiremos lo relacionado a los materiales de fabricación de estos equipos, ya que los mecanismos de corrosión implican la interrelación entre material y medio corrosivo.

Los tanques han sido construidos con planchas de acero de carbono estructural tipo ASTM A 283 Grado C, cuya composición química y propiedades mecánicas se encuentran en la Tabla 4.2, el espesor del casco y base de 1/4". Los detalles de diseño se encuentran contenidos en el plano típico N° 33-A-102E. Puede observarse directamente en contacto con un lecho de mezcla de grava-arena.

Debe hacerse notar así mismo, que los aceros usados en estos tanques corresponden a los denominados de bajo carbono o aceros dulces; los cuales debido a su proceso de fabricación de laminado en caliente y a su estructura micrográfica son propensos a la corro -

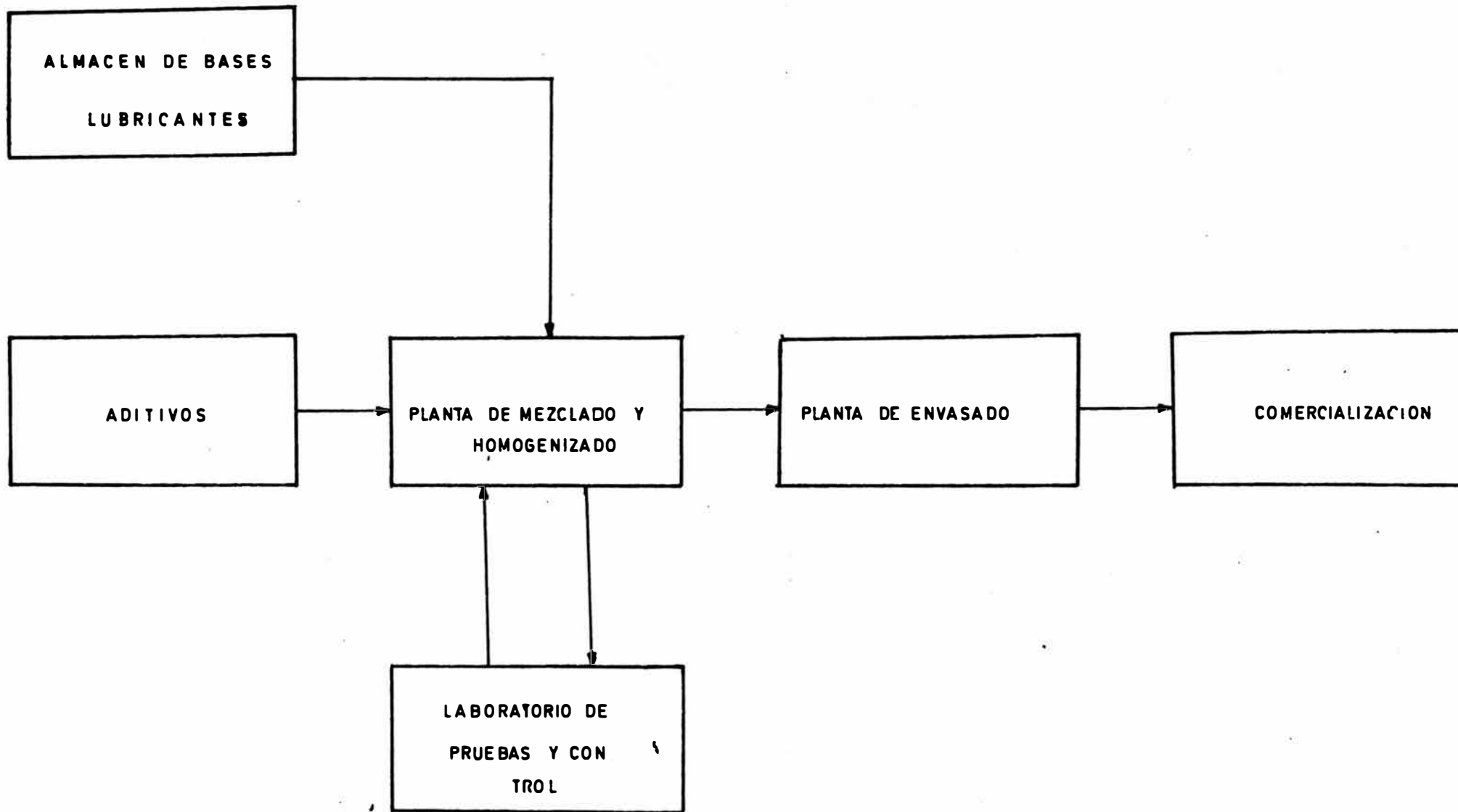


FIGURA 4.1.- DIAGRAMA DE FLUJO

TABLA 4-1

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS TANQUES DE
ALMACENAMIENTO

TANQUE	PROD. ALMAC.	DIAMETRO (m)	CAPACIDAD (m ³)	MATERIAL	AREA (m ²)
31085	Base Lubric.	9.73	445.8 ^{2MB}	ASTM A 283	74.3
31086	Base Lubric.	9.15	329	ASTM A 283	65.8
31087	Base Lubric.	7.6	228	ASTM A 283	45.6
31088	Base Lubric.	5.3	112	ASTM A 283	22.4
31089	Base Lubric.	9.15	329	ASTM A 283	65.8
31090	Base Lubric.	7.6	228	ASTM A 283	45.6
31091	Base Lubric.	7.6	228	ASTM A 283	45.6

TABLA N° 4-2

1.- MATERIAL Acero al Carbono structural.

2.- TIPO : ASTM A283 GrC (JIS 5541)

3.- PROCESO DE FABRICACION: Proceso de convertidor, SIEMENS-MARTIN, HORNO ELECTRICO u OXIGENO BAJICO.

4.- COMPOSICION QUIMICA:

% C = 0.31

% P = 0.048

% Mn = 0.83

% S = 0.058

% OTROS - -

5.- PROPIEDADES MECANICAS:

Resistencia tracción (TENSYL STRENGHT) (PSI) = 68,000

Punto sup. fluencia (YIEL STRENGHT) (PSI) = 29,000

Módulo de Young. (PSI) = 20×10^6

Dureza (H B) = 140 - 180

- Elongación (% in 8") = 27

6.- MICROESTRUCTURA: Ferrita + perlita.

sión en muchos medios como suelos agresivos, agua natural, agua marina, etc.

4.3. CARACTERISTICAS DEL MEDIO CORROSIVO.

El medio corrosivo es el suelo, constituido fundamentalmente por arena y arcilla como es característico de los terrenos costeros (la planta se encuentra situado a 800 m. de distancia del mar.)

De los análisis efectuados para cuantificar la agresividad del terreno sobre el fondo de los tanques se han encontrado los valores que se reportan en la Tabla 4.3.

SE han seguido las pautas indicadas por K.H. Logan y M. Romanof de la "National Boureau of Standard" que indican que la corrosividad de un suelo está relacionada a los factores siguientes:

- Humedad
- Alcalinidad
- Acides
- Contenido de oxígeno
- Sales disueltas
- Permeabilidad al agua y aire (grado de compactación o textura)
- Corrientes erráticas.

Cabe advertir que el contenido de oxígeno y humedad-reportado en la práctica será mucho mayor. El efec-

TABLA 4-3

ANALISIS DEL SUELO

1.- CARACTERISTICAS GENERALES

Densidad (lb/ft ³) (seco)	134.6
Humedad (%)	0.8
Pérdidas por ignición (%)	
PH	8.5

2.- COMPOSICION (% PESO)

Materia orgánica	3.0
Sílice (SiO ₂)	63.0
Alúmina (Al ₂ O ₃)	24.0
Calcio (CaO)	1.6
Magnesio (MgO)	1.1
Sodio (Na ₂ O)	0.3
Potasio (K ₂ O)	0.1
Cloruros (CP-)	300 ppm
Sulfatos (SO ₄ =)	200 ppm
NO DETERMINADOS.	6.9

to de impelencia ocasionado en las operaciones de llenado y vaciado implica oxigenación intermitente del suelo en contacto con el tanque así como acumulación de humedad, por lo que se espera que la concentración de oxígeno y humedad en el fondo del tanque sea mayor.

En función de lo indicado anteriormente puede inferirse que se trata de un terreno medianamente corrosivo y como es característico de estos casos la forma de deterioro será localizada.

4.4. PROBLEMAS DE CORROSION OBSERVADOS

4.4.1. ANTECEDENTES.

Los tanques fueron instalados juntamente con la planta en 1960 y de acuerdo con el diseño original, que fué respetado hasta el inicio del presente estudio, no se contaba con ningún sistema de protección contra la corrosión por suelos y solo se había acondicionado el terreno compactándolo para soportar la carga prevista.

Según datos históricos extraídos de la misma planta se ha efectuado cambio de fondos con una frecuencia de 5 años, lo que como es de suponer implica un alto costo de mantenimiento.

En Octubre de 1977, en vista de haberse detectado perforaciones múltiples, se decidió hacer el cambio de fondos de los 7 tanques de almacenamiento e iniciar simultáneamente un estudio para dar protección contra la corrosión a los mismos.

La inspección previa al cambio de fondos indicó que la corrosión en el interior de los tanques era despreciable comparada con la que se producía exteriormente.

4.4.2. ANALISIS DEL MECANISMO DE CORROSION.

Por lo expuesto en el punto anterior es evidente que la corrosión se produjo por efecto del suelo. El tipo de corrosión morfológicamente corresponde al tipo "PICADURA" como puede observarse en la Figura 4.3. y fotografías 4.3., 4.4.

El mecanismo de corrosión puede interpretarse como un fenómeno electroquímico simple donde los componentes de la celda galvánica se encuentran en el metal mismo, con zonas anódicas y catódicas cuya localización es función:

- Del Proceso de Fabricación.
- Fases presentes en la estructura del metal.
- Presencia de escamas de laminación ("Mill Scale")



FOTOGRAFIAS 4.3-4.4

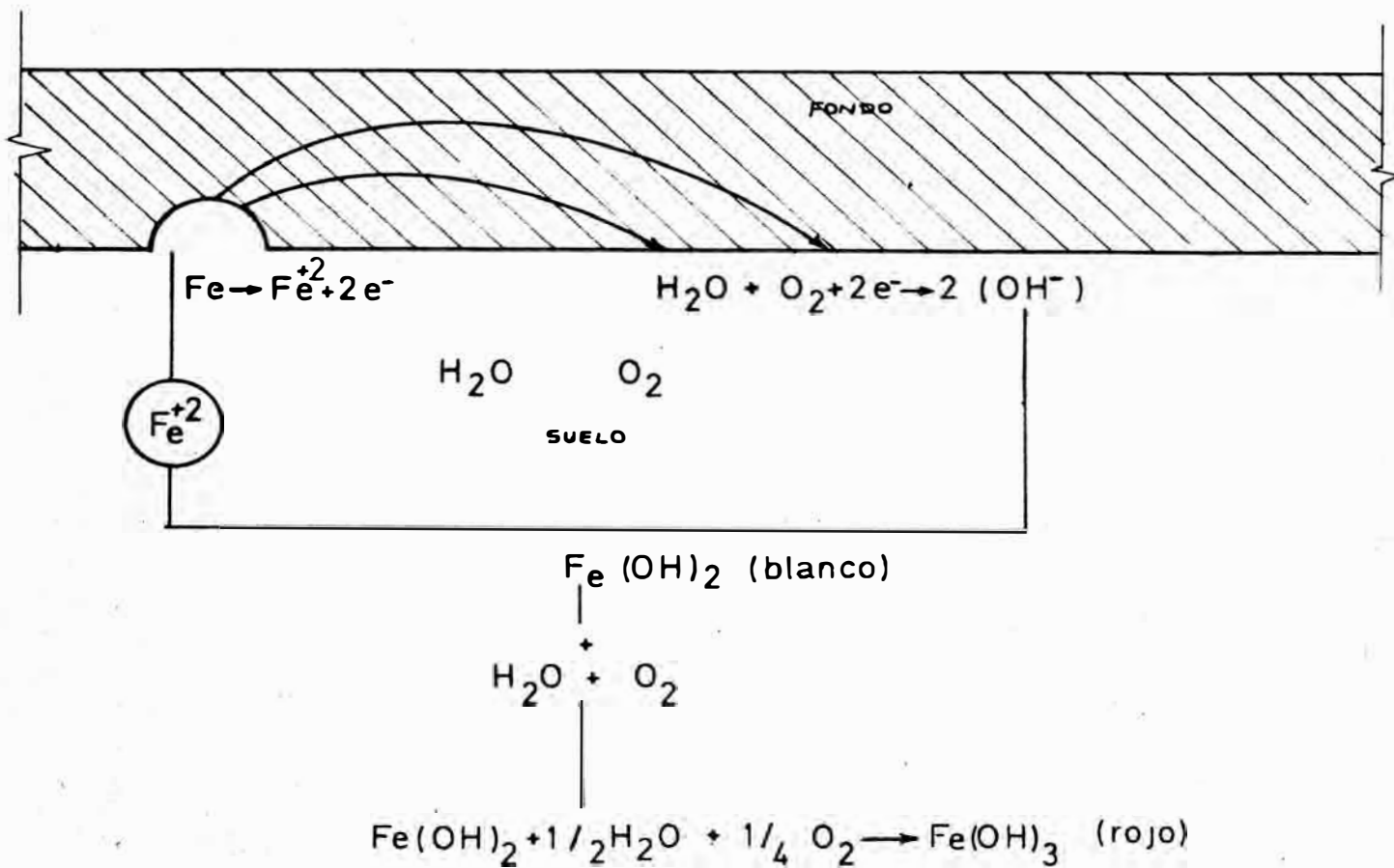
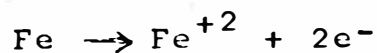


FIGURA N° 4.3

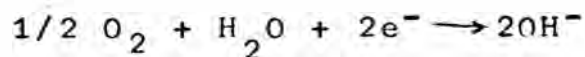
Es conocido que el proceso de laminado (rolado) introduce esfuerzos a nivel superficial que ocasionan zonas de diferente comportamiento electroquímico. Así mismo las fases presentes en este tipo de aceros (ferrita y perlita) producen el mismo efecto.

El electrolito es en este caso el suelo debido a su humedad y a sus características eléctricas. Así mismo, teniendo en cuenta las características del suelo mostradas en el punto 4.3, se trata de un terreno de mediana corrosividad con PH neutro por lo que las reacciones electroquímicas pueden escribirse como:

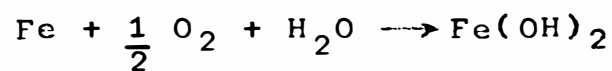
Reacción Anódica



Reacción Catódica



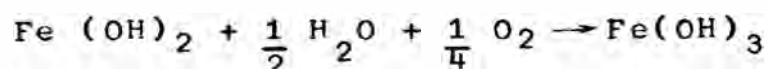
Reacción Global



El producto intermedio es:



Dadas las condiciones de humedad y oxigenación se genera hidróxido férrico que tiene mayor estabilidad según:



Este producto final de la corrosión; puede es-
tar bajo dos formas, la forma alta (hematita)-
y/o la forma gama (magnetita); siendo más esta-
ble la primera.

Por lo expuesto anteriormente se puede suponer
una corrosión generalizada uniforme, pero debi-
do a las características de porosidad, forma-
ción de capas de óxido adherentes y aún las es-
camas de laminación ("Mill Scale") se generan
zonas de aireación diferencial o barreras loca-
lizadas que restringen la difusión de oxígeno,
derivando en una corrosión fuertemente locali-
zada. En las figuras se muestran esquemática-
mente la formación de celdas de corrosión loca-
lizada (Pitts).

4.5. MEDICIONES DE POTENCIAL

Como se ha mencionado en el capítulo 2 el criterio de
protección está basado en las mediciones de potencial
de corrosión entre la estructura metálica a ser prote-
gido y el medio corrosivo, esto es, si se polarizan
las áreas catódicas hasta el potencial de circuito a
bierto de la zona anódica, la corrosión quedará redu-
cida a cero. Con este objeto se han efectuado las me-
diciones directas entre la estructura del tanque y el
suelo donde están instalados.

Las mediciones se efectuaron periódicamente utilizando electrodos de cobre-sulfato de cobre sat. Así mismo para asegurarse que las medidas fueran consistentes éstas se tomaron a diferentes distancias de los tanques (Ver Tabla 4.4.)

Los resultados muestran que el potencial de corrosión es de -500mv y por tanto el terreno es medianamente agresivo.

Adicionalmente se hicieron mediciones de potencial -suelo-suelo con la intención de establecer la presencia de suelos de distinto comportamiento electroquímico que como se sabe pueden generar un ataque corrosivo irregular. Esta información es muy importante para un diseño apropiado del sistema de protección. Se encontró que el comportamiento del suelo en el área bajo estudio es uniforme.

4.6. MEDICIONES PARA EL CALCULO DE LA RESISTIVIDAD.

Como cuestión previa al diseño del sistema de protección se evaluó la resistividad del suelo. Se realizaron mediciones a diferentes profundidades respecto a la superficie (0.55, 0.75 y 1.25 m), con el objeto de determinar la severidad de las áreas corrosivas - puesto que el perfil de resistividades es una herramienta valiosa para la futura selección de los lugares de instalación de los ánodos auxiliares.

TABLA 4.4.

MEDICION DE POTENCIAL SUELO TANQUE EN FUNCION DE LA POSICION
RADIAL RESPECTO AL MISMO.

TANQUE	POSICION RADIAL (m) (1)				
	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	<u>7</u>
85	-	-	490	415	505
86	-	-	488	504	502
87	-	496	500	500	-
88	498	510	505	-	-
89	-	-	496	498	502
90	-	500	500	498	-
91	498	505	495	-	-

(1) Las distancias consideradas son respecto al centro del tanque.

Las mediciones se realizaron en las nueve zonas indicadas en el plano 33-A-103F. En términos generales se encontró que la resistividad varia entre 300 y 2500 OHm-cm. Para la zona periférica al área de los tanques y entre 2550 a 5000 OHm-cm en las zonas intermedias a los mismos. Los últimos valores se deben fundamentalmente al alto contenido de aceite en el suelo a consecuencia de los frecuentes derrames del mismo durante la operación. El método utilizado es el denominado de los cuatro electrodos cuyo detalle se ha expuesto en el Capítulo 1. En el anexo I se indica el procedimiento detallado de trabajo y los resultados obtenidos.

4.7. DETECCION DE CORRIENTES ERRATICAS

A priori se estableció que no existían corrientes erráticas debido a que en el área estudiada no hay presencia de fuentes de corriente continua. Se ha indicado en el capítulo correspondiente que las fuentes de corriente alterna no causan mayor efecto sobre el sistema.

Sin embargo, con el objeto de verificar esta hipótesis se realizaron medidas de potencial por períodos de 36 horas en el área de tanques, encontrándose que esta se mantenía esencialmente constante.

Durante las mediciones de resistividad del suelo se

confirmó la ausencia de corrientes erráticas efectuando la inversión de polaridad de la fuente de alimentación. Al efectuar la inversión de polaridad se encontró que el valor absoluto de la lectura de potencial se mantuvo constante lo que confirmó la no existencia de fuentes externas de tensión.

4.8. DENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA

Para los cálculos de la corriente necesaria se han adoptado los métodos explicados en el Capítulo 3.

De ellos se descartó el método de cambio de potencial por no considerarse adecuado.

De las mediciones y cálculos efectuados se han encontrado los siguientes resultados:

1. Polarización de la estructura de acero	<u>$i(\text{mA}/\text{m}^2)$</u>
HASTA -850mV	18.5
2. Métodos gráfico	13.4

En el anexo II, se detalla el procedimiento seguido para cada caso así como los resultados obtenidos.

En base a las densidades de corriente calculadas se considera para el diseño $15.0 \text{ mA}/\text{m}^2$. Debe hacerse notar que éste valor se encuentra dentro del rango que corresponde a este tipo de suelos como se observa comparado el valor de diseño con los reportados en la Tabla 3.7.

5.0- DISEÑO DEL SISTEMA DE PROTECCION.

5.1. BASES PARA EL DISEÑO

Para el diseño del sistema de Protección Catódica se han tomado en consideración las siguientes condiciones básicas:

- Resistividad Promedio del terreno (~~80~~ ohm-cm) 1000
- Densidad de corriente necesaria (mamp/m²) 15
- Area de superficie a proteger (m²) 365.1
- Potencial suelo-estructura (mV) -500
- Recubrimientos protectores ninguno
- Corrientes erráticas nulas
- Interferencias por fuentes externas de corriente despreciables
- Corriente total necesaria para protección (mAmp) 5476

En la Tabla N°5-1 se Indica el valor de la corriente de protección necesaria para cada tanque de almacenamiento.

5.2.- ALTERNATIVAS CONSIDERADAS.

Para la evaluación del proyecto se han tomado en cuenta los dos sistemas de protección catódica descritos en los Capítulos anteriores, estos es:

- P.C. Por ánodos de sacrificio.
- P.C. Por corriente impresa.

Más adelante se discute con mayor detalle la aplicación de dichos sistemas, tanto desde el punto de vista técnico como desde el económico.

Desde el punto de vista técnico se ha evaluado la corriente total necesaria, el número y características de los ánodos para la protección. Desde el punto de vista económico se ha efectuado un estimado de la inversión inicial necesaria y los costos operativos de cada alternativa.

Finalmente se realiza el análisis de rentabilidad del proyecto, considerando las siguientes alternativas:

- Alternativa	<u>Descripción</u>
A	No implementar sistema de protección catódica
B	Protección con ánodos de magnesio.
C	Protección con corriente impresa.

5.3.- EVALUACION TECNICA

5.3.1. PROTECCION CATODICA CON ANODOS DE SACRIFICIO

Para evaluar esta alternativa se establecerán las características principales de la instalación de los ánodos de sacrificio, esto es, se determinarán el número, tipo y características

TABLA 5.1

CORRIENTE DE PROTECCION PARA LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO

TANQUE	SUPERFICIE A PROTEGER(m ²)	CORRIENTE NECESARIA (m Amp).
38085	74.3	1114.5
38086	65.8	987
38087	45.6	684
38088	22.4	336
38089	65.8	987
38090	45.6	684
38091	45.6	684
TOTAL		5476

de los mismos.

La protección con ánodos de sacrificio se realizará con el sistema de tanque por tanque, debido a que por la distribución y geometría de las estructuras a proteger es más conveniente hacerlo de este modo.

Los cálculos se han realizado para brindar protección al sistema durante 15 años, ya que ese es el tiempo de vida remanente de la planta.

El número de ánodos se calcula determinando la resistividad eléctrica del sistema y el potencial disponible para vencer a la misma; este último función del material usado como ánodo.

La resistividad eléctrica del sistema se calcula como la suma de las siguientes:

- Anodo Backfill
- Backfill- Tierra
- Cables de conexión

De estas, la más importante es la resistencia - Backfill-Tierra. Puede calcularse con la ecuación empírica de Sunde y M.B. Dwight para ánodos verticales.

$$R_V = \frac{0.0054 \rho}{NL} \left[\ln \frac{8L}{d} (0.656N)^{2L/s} - 1 \right]$$

Donde:

- R_v = resistencia del conjunto de ánodos en paralelo (OHM)
- ρ = resistividad del suelo (OHM-cm)
- L = longitud del ánodo (incluyendo Backfill) (ft)
- d = diámetro del ánodo (ft)
- N = número de ánodos en paralelo
- S = espaciamiento entre ánodos (ft)

La resistencia interna de un ánodo vertical - puede calcularse considerando que el espaciamiento es infinito. La resistencia del cable de conducción se puede determinar a partir de la resistencia específica (OHM/ft) y la longitud del mismo.

El procedimiento específico para la selección de los ánodos es de tipo iterativo, por el hecho que debe optimizarse el número de estos - en función de la resistencia eléctrica del sistema y el peso resultante para dar protección durante un número dado de años.

El peso de ánodo, puede calcularse a partir - de las siguientes ecuaciones:

- Anodo de zinc.

$$w_z = \frac{L \cdot i_a}{42.4 \cdot E \cdot f}$$

- Anodo de Magnesio.

$$w_M = \frac{L \cdot i_a}{114.16 \cdot E \cdot f}$$

Donde:

L = Vida del ánodo (años)

ia = corriente de salida (m amp)

E = eficiencia

f = factor de utilización.

En las Tablas 5-2 a 5.5 se sumarizan los resul
tados obtenidos con ánodos de magnesio. En
las Tablas 5-6 a 5-8, se presenta el resumen
correspondiente para los ánodos de zinc.

Los resultados indican basicamente lo siguien
te

i .- En los tanques 38085, 38086 y 38089 es
posible usar ánodos estandar de 12,16,20
ó 40 lb. con las características que se
indican en la Tabla 5-2. De esos es mas
conveniente usar ánodos de 40 lb. por
cuanto el número resultante de los mis
mos es menor.

ii .- En los tanques 38087, 38088, 38090 y
38091 pueden usarse ánodos de 12,16,20,
32,40 ó 60 lb. (ver características en
la Tabla 5-6), de ellos es más convenien
te usar ánodos de 60 lb. por la misma ra
zón expresada en el punto anterior.

iii . No es posible la utilización de ánodos -

estandar de zinc para este servicio, por cuanto el potencial disponible es pequeño, comparado con el necesario para vencer la resistencia del sistema.

iv .-Es recomendable por tanto emplear para el sistema de protección los ánodos indicados en la Tabla 5-5, dentro de un Back fill químico de 50 OHM-cm y usando para las conexiones, conductor de cobre N°8Aw

Se considera así mismo que los ánodos serán instalados a una distancia de 3 metros de los tanques y equidistantes entre si, según el esquema que se muestra en la Fig. 5-1.

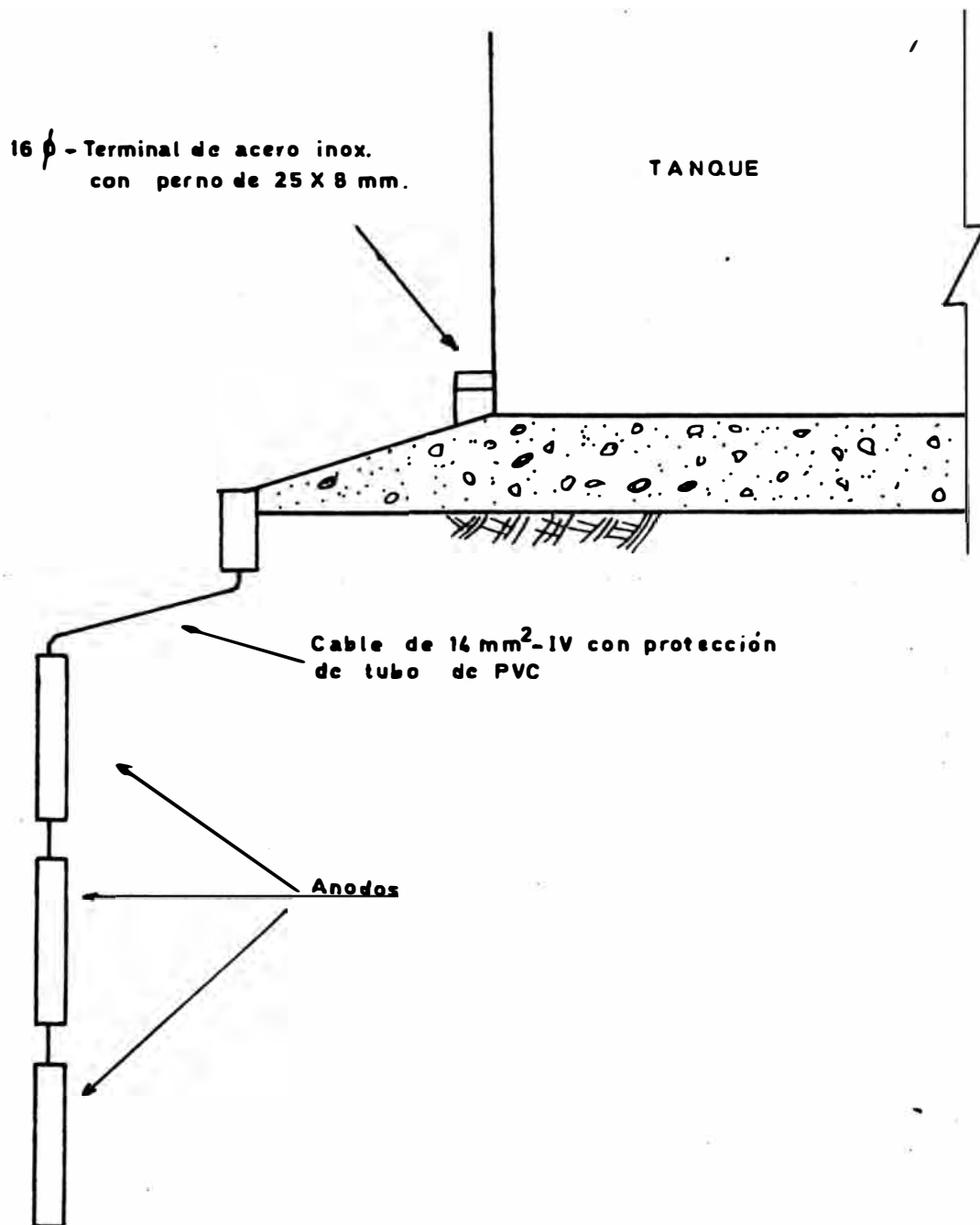


FIGURA Nº 5.1 ... ANODOS VERTICALES

TABLA 5-2

CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS DE MAGNESIO USADOS PARA
LA EVALUACION

<u>PESO</u> <u>(16)</u>	<u>DIMENSIONES</u> <u>(in)</u>	<u>DIMENSIONES CON BACKFILL</u>	
		<u>DIAM (ft)</u>	<u>LONG.(ft)</u>
12	4 x 11 x 12	0.625	1.5
16		0.580	5.0
20	2 1/2 x 2 1/2 x 50	0.420	5.5
32	5 1/2 x 5 1/2 x 22 5 1/2	0.670	2.3
40		0.580	5.0
48	5 1/2 x 5 1/2 x 32	0.670	3.2
50	7 x 7 x 16	0.830	2.0
60		0.580	5.5

TABLA 5-3

NUMERO DE ANODOS DE MAGNESIO Y ESPACIAMIENTO (1) EN FUNCION
DEL PESO DE ANODO (2)

PESO (lb)	T A N Q U E S							
	38085		38086		38087		38088	
	N(#)	2S(ft)	N	2S	N	2S	N	2S
12	28	11.7	26	12	18	15.5	9	25.3
16	21	15.3	19	16.4	14	20	7	32.5
20	17	18.8	15	20.7	11	25.4	6	37.1
32	11	29.3	10	30.7	7	39.2	4	52.5
40	9	35.3	8	38.1	6	44.7	3	64.3
48	9	35.3	7	43.6	5	52.5	3	64.3
50	7	45.3	7	43.6	5	52.5	3	64.3
60	6	51.6	6	49.8	4	63.2	2	74.2

(1) El espaciamiento expresado en ft.

(2) Los valores correspondientes a los tanques 38090 y 38091 son los mismos que los del tanque 38087 y los del 38089 son iguales al 38086

TABLA 5-4

RESUMEN DE RESISTENCIAS (OHM) CALCULADAS PARA LOS TANQUES
USANDO ANODOS DE MAGNESIO

PESO (LB)	T A N Q U E S						
	38085	38086	38087	38088	38089	38090	38091
12	0.428	0.451	0.562	0.917	0.451	0.562	0.562
16	0.331	0.346	0.406	0.621	0.346	0.406	0.406
20	0.361	0.364	0.462	0.705	0.364	0.462	0.462
32	0.604 x	0.652 v	0.864 x	1.405	0.652 v	0.864 x	0.864 x
40	<u>0.491</u>	<u>0.535</u>	<u>0.668</u>	1.196	<u>0.535</u>	0.668	0.668 ✓
48	0.595 v	0.719 x	0.955 x	1.508	0.719 v	0.955 x	0.955 x
50	0.829 x	0.833 x	1.115 v	1.774 v	0.833 v	1.115 x	1.115 x
60	0.618 x	0.621 x	<u>0.863</u> v	<u>1.615</u>	0.621 v	<u>0.868</u> v	<u>0.868</u> x
MAX. RESIS PERMI. ABLE SIBLE	0.538	0.608	0.877	1.786	0.608	0.877	0.877

$$R_{MAX} = \frac{DP}{I} \quad \frac{\text{Driving. pot.}}{\text{curr. pot.}}$$

TABLA 5-5

RESUMEN DE ANODOS DE MAGNESIO SELECCIONADOS

<u>TANQUE</u>	<u>PESO (LB)</u>	<u>Nº DE ANODO</u>	<u>CORR. INIC. SAL (mAmp/ ANODO)</u>	<u>VIDA UTIL (AÑOS)</u>
38085	40	9	123.83	15.67
38086	40	8	123.38	15.73
38087	60	4	171.0	17.02
38088	60	2	168.0	17.33
38089	40	8	123.38	15.23
38090	60	4	171.0	17.02
38091	60	4	171.0	17.02

TABLA 5-6

CARACTERISTICAS DE LOS ANODOS DE ZINC USADOS PARA LA EVA
EVALUACION(1)

<u>PESO (LB)</u>	<u>DIMENSIONES (in)</u>	<u>DIMENSIONES CON BACKFILL</u>	
		<u>DIAM (ft)</u>	<u>LONG. (ft)</u>
30	1.4 x 1.4 x 60	0.45	7.0
50	2 x 2 x 45	0.50	5.8
60	2 x 2 x 60	0.50	7.0
150	4 x 4 x 36	0.67	5.0

TABLA 5-7

NUMERO DE ANODOS DE ZINC Y ESPACIAMIENTO EN FUNCION DEL
PESO DE ANODO

<u>TANQUE</u>	P E S O (L b)							
	30		50		60		150	
	N	2S	N	2S	N	2S	N	2S
38085	18	17.9	11	29.1	9	35.3	4	73.1
38086	16	19.4	10	30.8	8	38.1	4	70.4
38087	11	25.2	7	38.8	6	44.7	3	77.4
38088	6	37.1	3	64.3	3	64.3	2	74.2
38089	16	19.4	10	30.8	8	38.1	4	70.4
38090	11	25.2	7	38.8	6	44.7	3	77.4
38091	11	25.2	7	38.8	6	44.7	3	77.4

TABLA 5-8

RESUMEN DE RESISTENCIAS (OHM) CALCULADAS PARA LOS TANQUES
USANDO ANODOS DE ZINC

TANQUE.	PESO DE ANODO (lb)				RESISTENC. MAXIMA (OHM)
	30	50	60	150	
38085	0.318	0.417	0.424	0.874	0.135
38086	0.336	0.444	0.459	0.876	0.152
38087	0.407	0.570	0.568	1.134	0.219
38088	0.603	1.130	0.996	1.648	0.446
38089	0.336	0.444	0.459	0.876	0.152
38090	0.407	0.520	0.568	1.134	0.219
38091	0.407	0.570	0.568	1.134	0.219

5.3.2. PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA

Para la evaluación de esta alternativa se han -
determinado las características mas importantes
del sistema de protección, en especial lo refe-
rente a la potencia del rectificador, numero y
tipo de ánodos y los detalles básicos de la ins-
talación de los mismos.

La fuente de tensión continua se ha seleccionado
tomando en cuenta que la máxima tensión dispo-
nible es de 24 voltios DC por limitaciones de se-
guridad de personal.

Así mismo, partiendo de un criterio de diseño -
conservador, pueden usarse hasta 3 amperios co-
mo corriente de salida por ánodo.

Para el cálculo de la potencia del Rectificador
se ha determinado previamente el voltaje neces-
ario para la protección del sistema, mediante el
diseño preliminar de la red eléctrica asociada-
(ver esquema de la Fig. 5-2) y plano 33-A-104).
En las Tablas 5-1 y 5-10 se indican los deta-
lles del cálculo del voltaje requerido en el
sistema, usando cables 14AMG. que son los reco-
mendados para este caso, dado que su amperaje -
máximo es 15 A.

Así mismo, en base a los cálculos de resisten -

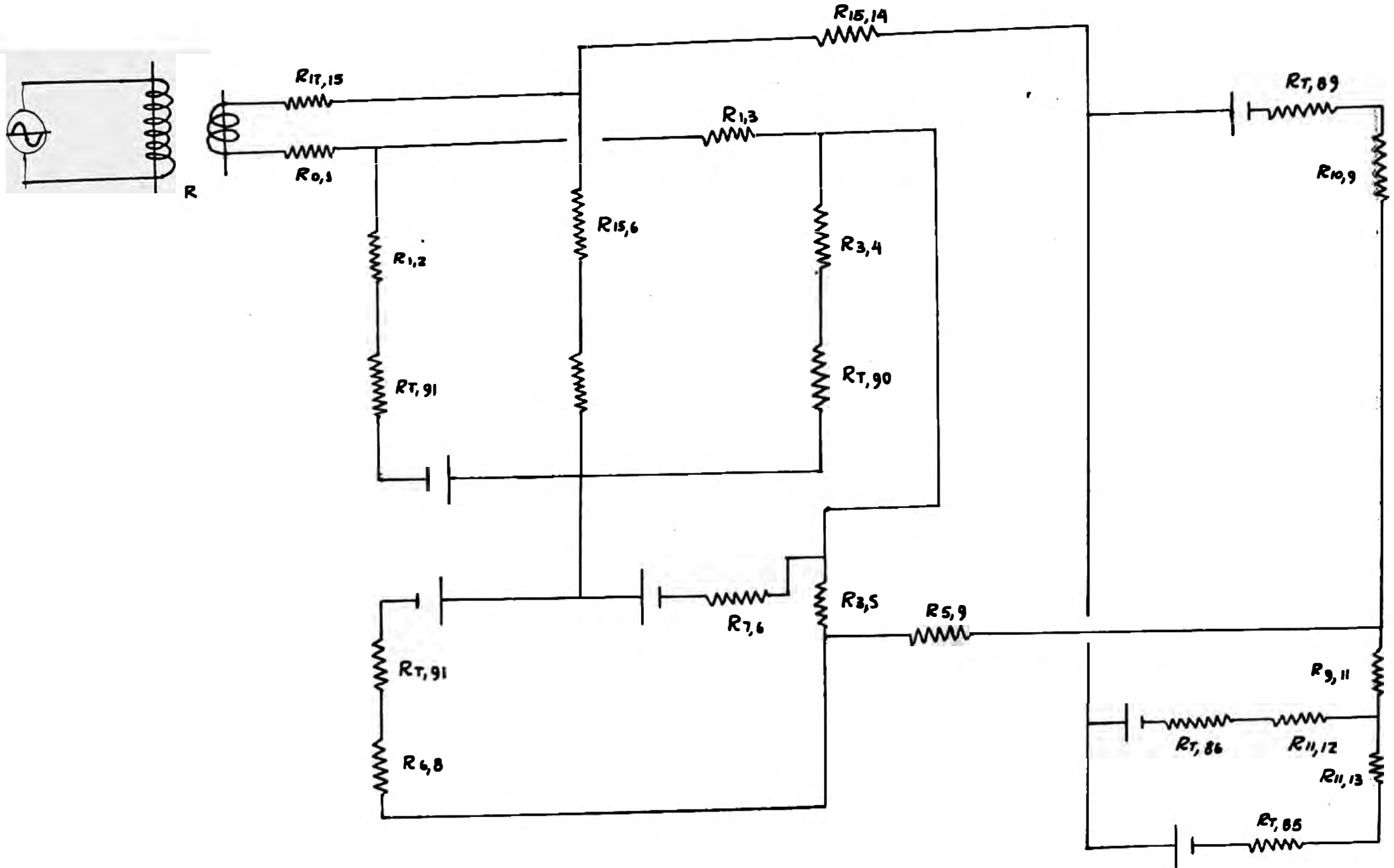


FIGURA N° 5.2.- RED ELECTRICA

cia se ha calculado la diferencia de potencial necesario para dar protección al sistema, con lo cual resulta un rectificador de 15V DC y 6.85 amperios de salida y una potencia de 103 watts: (Ver Tabla 5-11)

Se ha considerado así mismo el uso de ánodos de duriron de 2"Ø x 60" LONG. dentro de un Backfill químico de 50 OHM-cm.

De acuerdo con los cálculos realizados, se deduce que será necesario instalar resistencias adicionales en los tanques con el objeto de asegurar que la corriente de protección sea la adecuada en cada tanque.

TABLA 5-9

RESISTENCIA CALCULADA PARA CADA TRAMO (OHM)(1)

<u>TRAMO</u>	<u>LONG.(m)</u>	<u>i(mamp)</u>	<u>R(OHM)</u>	<u>ΔV(Voltios)</u>
0-1	12.5	5476	0.108	0.589
1-2	2.0	684	0.017	0.012
1-3	13.0	4792	0.112	0.536
3-4	2.0	684	0.017	0.012
3-5	11.0	4108	0.095	0.389
5-6	11.0	1020	0.095	0.097
6-7	2.0	684	0.017	0.012
6-8	21.0	336	0.181	0.061
5-9	12.0	3088	0.103	0.319
9-10	10.0	987	0.086	0.085
9-11	8.5	2101	0.073	0.154
11-12	1.0	987	0.009	0.008
11-13	17.0	1114	0.146	0.163
15-17	18.0	5476	0.155	0.848
15-16	11.5	2388	0.099	0.236
14-15	26.0	3088	0.224	0.691

(1) USANDO CABLE 14 AWG

TABLA 5-10=

CALCULO DEL VOLTAJE DEL RECTIFICADOR

TRAMO	T A N Q U E S							
	38085	38086	38087	38088	38089	38090	38091	
0-1	0.589	0.589	0.589	0.589	0.589	0.589	0.589	0.589
1-2	-	-	-	-	-	-	0.012	0.012
1-3	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	0.536	-	0.536
3-4	-	-	-	-	-	0.012	-	0.012
3-5	0.389	0.389	0.389	0.389	0.389	-	-	0.389
5-6	-	-	0.097	0.097	-	-	-	0.097
6-7	-	-	0.012	-	-	-	-	0.012
6-8	-	-	-	0.061	-	-	-	0.061
5-9	0.319	0.319	-	-	0.319	-	-	0.319
9-10	-	-	-	-	0.085	-	-	0.085
9-11	0.154	0.154	-	-	-	-	-	0.154
11-12	-	-	-	-	-	-	-	0.008
11-13	0.163	-	-	-	-	-	-	0.163
15-17	0.848	0.848	0.848	0.848	0.848	0.848	0.848	0.848
15-16	-	-	0.236	0.236	-	0.012	0.236	0.236
14-15	<u>0.691</u>	<u>0.691</u>	-	-	<u>0.691</u>	-	-	<u>0.691</u>
Sub-Total	3.689	3.526	2.707	2.756	3.457	1.997	1.685	
Anodo -	0.719	0.719	0.556	0.556	0.719	0.556	0.556	
Backfill								
Backfil/ Tierra.	6.940	6.940	5.366	5.366	6.940	5.366	5.366	
Sobre Vol taje.	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	
Pot.Prot.	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	0.850	
	=====	=====	=====	=====	=====	=====	=====	
	14.198	14.035	11.479	11.528	13.966	10.769	10.457	

$R_{AB} = 0.233$

$R_{BT} = 2.247$

5.4. EVALUACION ECONOMICA

Para la evaluación económica se han considerado las tres alternativas de solución del problema, expuestas en el punto 5.2. La alternativa de usar ánodos de zinc fué descartada por cuanto técnicamente no satisface los requisitos del sistema de protección. Mas adelante se discuten con detalles las tres alternativas.

5.4.1. ALTERNATIVA A.- NO IMPLEMENTAR SISTEMA DE PROTECCION CATODICA.

Esto es considerado como la alternativa base , ya que representa el costo que la empresa tendría que asumir en el caso de mantener su política de reemplazo periódico del fondo de los tanques.

En la Tabla 5-12, se presenta el resumen del estimado de la inversión necesaria y que resulta de 10419.8 M S/.; puede observarse que el mayor costo está representado por el correspondiente al de las planchas de acero al carbono (2501.8 M \$). Debe hacerse notar que no se ha considerado aquí el costo de las pérdidas de producción que resultarían si se produce una subita falla en las planchas del fondo, se asume que dichas fallas no revisten mucha grave -

dad al punto que puedan ocasionar pérdidas de producción; en todo caso, si la evaluación da resultados favorables el cálculo habrá sido conservador.

Para el estimado del costo de la mano de obra se han considerado los costos unitarios y tiempos descritos en la Tabla 5-13.

En la Tabla 5-14 se ha calculado el flujo neto de fondos correspondiente a esta alternativa. para dicho cálculo se ha considerado que en promedio los tanques fallarán al 5º año de operación con un margen de dos años, es decir que los costos pueden ser distribuidos en cinco años a razón de 20% anual. Los costos se han escalado con un factor inflacionario de:

Factor	Año
9%	1º
8%	2º
7%	3º
6%	4º+

Como quiera que los egresos por reemplazo de fondo de tanques, causarán un ahorro en el pago de impuestos, el flujo neto de fondos puede calcularse según:

$(\text{flujo neto de fondos}) = (\text{Total Egresos}) - (\text{ahorro en pago de impuestos})$.

Para el cálculo del ahorro en el pago de impues
tos se estima que por el volumen de las opera -
ciones, la empresa se mantendrá en el nivel de
50% de tasa de impuestos.

TABLA 5-11

HOJA DESPECIFICACION RECTIFICADOR

Tipo de Regulación.	CONTROL POTENCIAL CORRIENTE CONSTANTE VOLTAJE CONSTANTE	X
Enfriamiento	AIRE ACEITE A PRUEBA EXPLOSION FAN COOLED.	X
Elemento Activo.	SELENIO SILICON GERMANIO	X
Tipo Corriente Entrada	FASE SIMPLE TRES FASES	X
Voltaje Entrada	115, <u>220</u> , 460 AC	
Rango Voltaje Salida	15 V	
Corriente de Salida.	6.85 A	

TABLA 5-12

ALTERNATIVA A.- NO IMPLEMENTAR SISTEMA DE PROTECCION

CATODICA A LOS TANQUES

ESTIMADO DE LA INVERSION

<u>1.- COSTOS MATERIALES.</u>	<u>M\$.</u>	
1.1. Costo planchas de acero al carbono A-283 de 6 x 16ft y 1/4" espesor - (\$ 635/ft ²)	2501.8	
1.2. Soldadura tipo 6011 de 1/4" Ø - (\$ 740 kw).	<u>554.5</u>	3056.3
<u>2.- COSTO DE MANO DE OBRA</u>		
2.1. Limpieza (5 dias/tanque)	364.0	
2.2. Corte planchas de fondo (4 días / tanque)	339.3	
2.3. Reparación piso (6dias/tanque)	433.4	
2.4. Acomodo de planchas y apuntalado (6 dias/tanque)	561.2	
2.5. Soldadura (8dias/tanque)	<u>322.6</u>	2020.5
<u>3.- COSTO DE INSPECCION Y PRUEBAS</u>		
3.1. Pruebas de líquido penetrante.	1799.0	
3.2. Pruebas de vacio y prueba <u>hidros</u> <u>tática</u>	<u>1460.0</u>	3259.0
		<hr/>
	SUB-TOTAL	8335.8
	MAS 25% CONTINGENCIAS	<u>2084.0</u>
	<u>TOTAL</u>	10419.8
		=====

TABLA 5-13

ALTERNATIVA A.- DETALLES PARA EL CALCULO DE LA
INVERSION INICIAL

1.- COSTO DE MANO DE OBRA.

	COSTO UNIT.	+ UNIDAD
CAPATAZ	440	(\$ / H)
AYUDANTE	215	(\$ / H)
OXIGENISTA	225	(\$ / H)
SOLDADOR	360	(\$ / H)
ESMERILADOR	225	(\$ / H)
2.- COSTOS DE MOVIMIENTO DE TIERRAS	350	(\$ w ³)
3.- ENERGIA ELECTRICA INSTALADA	107.6	(\$/Kw mes)
4.- CONSUMO DE ENERGIA ELECTRICA	3.8	(\$/Kw A)

TABLA 5-14

ALTERNATIVA A.

FLUJO NETO DE FONDOS PROYECTADO

<u>AÑO</u>	<u>TOTAL EGRESOS</u> (u \$.)	<u>AHORRO EN PAGO</u> <u>IMPUESTOS</u> (u \$.)	<u>FLUJO NETO</u> (u \$.)
0	-	-	-
1	-	-	-
2	-	-	-
3	(2625.0)	1312.5	(1312.5)
4	(2782.0)	1391.	(1391.)
5	(2948.8)	1474.4	(1474.4)
6	(3125.9)	1562.9	(1562.9)
7	(3313.5)	1656.6	(1656.6)
8	(3512.3)	1756.1	(1756.6)
9	(3723.0)	1861.5	(1861.5)
10	(3946.4)	1973.2	(1973.2)
11	(4183.2)	2091.5	(2091.5)
12	(4434.2)	2217.1	(2217.1)
13	(4700.3)	2350.1	(2350.1)
14	(4982.3)	2491.1	(2491.1)
15	(5281.2)	2640.6	(2640.6)

5.4.2. ALTERNATIVA B.- PROTECCION CON ANODOS DE MAGNESIO.

Para la protección con ánodos de magnesio se ha estimado que se requerirá una inversión inicial de 8332.5 M\$. y un costo anual de mantenimiento de 26.2 M\$.(Ver Tabla 5-15). El costo más importante en esta alternativa corresponde a los ánodos de magnesio, debido a que su fabricación no es nacional. Los costos operativos sin embargo son bastante bajos. Debido a que este sistema no requiere mantenimiento continuo, sino más bien su inspección periódica.

Para el cálculo del flujo neto de esta alternativa se ha empleado la conocida ecuación.
(flujo neto) = (ahorro impuestos) + (depreciación).

Donde el ahorro en impuestos se calcula como la semi-suma de los egresos mas la depreciación. Es sabido que los mayores egresos y la depreciación causarán que el monto susceptible a impuestos disminuya, logrando de este modo un ahorro en el pago de impuestos. En la Tabla 5-16 se muestran los resultados del cálculo del flujo neto de fondos para esta alternativa.

5.4.3. ALTERNATIVA C.- PROTECCION POR CORRIENTE IMPRESA.

La inversión inicial para esta alternativa asciende a 1029.5 u\$. y esta constituida principalmente por el costo del Rectificador (372.6 μ\$.) y el costo de instalación (247.6 μ\$.) Así mismo se ha estimado que los costos operativos serán de 136.1 μ\$. debido al consumo de energía eléctrica del sistema y a los costos de inspección y mantenimiento. En la Tabla 5-17 se muestra el detalle de los resultados.

El flujo neto de fondos para esta alternativa se ha calculado del mismo modo que en el caso anterior y se muestra en la Tabla 5-18.

5.4.4. COMPARACION DE ALTERNATIVAS.

Dado que se trata de alternativas mutuamente excluyentes, consideramos suficiente comparar la rentabilidad DCF de los flujos diferenciales que corresponden a las alternativas de protección por corriente impresa (C) y ánodos de sacrificio (A) respecto al costo base. En la tabla 5-19 se muestra el detalle de los cálculos efectuados.

TABLA B-15

ALTERNATIVA B.-

PROTECCION CON ANODOS DE MAGNESIO ESTIMADO DE LA INVERSION

<u>1.- COSTO EQUIPOS Y MATERIALES.</u>	M \$.	
1.1. Anodos de magnesio de 40 y 60 lb.	6377.0	
1.2. Cables Eléctricos 8 AWG	8.2	
1.3. Tubería PVC tipo SAP para instalación eléctrica.	<u>28.5</u>	6413.7
<u>2.- COSTO INSTALACION</u>		
2.1. Movimiento de Tierras.	50.2	
2.2. Instalación y tendido cables.	<u>202.1</u>	252.3
	SUB TOTAL INV. INICIAL	6686.0
	MAS 25% CONTINGENCIAS.	<u>1666.5</u>
		8352.5

<u>3.- COSTOS OPERATIVOS</u>		
3.1. Inspección y Mantenimiento.		26.2

TABLA 5-16

ALTERNATIVA B.- CALCULOS DE FLUJO NETO (M\$)

AÑO	EGRESOS	DEPRECIACION	AHORRO EN IM PUFSTOS	FLUJO NETO
0	(8332.5)			(8332.5)
1	(28.6)	320.7	174.7	495.4
2	(30.8)	320.7	175.8	496.5
3	(33.0)	320.7	176.9	497.6
4	(35.0)	320.7	177.9	498.6
5	(37.1)	320.7	178.9	499.6
6	(39.3)	320.7	180.0	500.7
7	(41.7)	320.7	181.2	501.9
8	(44.2)	320.7	182.5	503.2
9	(46.8)	320.7	183.8	504.5
10	(49.6)	320.7	185.2	505.9
11	(52.6)	320.7	186.7	507.4
12	(55.8)	320.7	188.3	509.0
13	(59.1)	320.7	189.9	510.6
14	(62.6)	320.7	191.7	512.4
15	(66.4)	320.7	193.6	514.3

TABLA 5-17

ALTERNATIVA C.- PROTECCION CON CORRIENTE IMPRESA

ESTIMADO DE LA INVERSION

1.- COSTO EQUIPO Y MATERIALES

1.1. Rectificador 15 V-DC,6.85A	376.6	
1.2. Anodos tipo DURIRON 2"Ø x 60" LONG.	142.7	
1.3. Cable eléctrico 14AwG..	8.0	
1.4. Tubería PVC tipo SAP para Instalación eléctrica.	<u>48.7</u>	
		576.0

2.- COSTO DE INSTALACION

2.1. Movimiento de tierras.	56.0	
2.2. Tendido cables, tuberías - y conexiones.	<u>191.6</u>	

247.6

SUB-TOTAL INV.INICIAL 823.6

MAS 25% CONTINGENCIAS . 205.9

TOTAL INVERSION INICIAL . 1029.5

=====

3.- COSTOS OPERATIVOS

3.1. Energía eléctrica. M \$/año-109.9

3.2. Inspección y mantenimiento. 26.2

TOTAL 136.1

=====

TABLA 5-18

ALTERNATIVA C.- CALCULO DE FLUJO NETO DE FONDOS

(M \$.)

AÑO	EGRESOS	DEPRECIACION	AHORRO EN IMP.	FLUJO NETO
0	(1029.5)			(1029.5)
1	(148.7)	28.8	88.8	117.6
2	(160.6)	28.8	94.7	123.5
3	(171.8)	28.8	100.3	129.1
4	(182.1)	28.8	105.5	134.3
5	(193.0)	28.8	110.9	139.7
6	(204.6)	28.8	116.7	145.5
7	(216.9)	28.8	122.9	151.7
8	(229.9)	28.8	129.4	158.2
9	(243.7)	28.8	136.3	165.1
10	(258.3)	28.8	143.6	172.4
11	(273.8)	28.8	151.3	180.1
12	(290.3)	28.8	159.6	188.4
13	(307.7)	28.8	168.3	197.1
14	(326.1)	28.8	177.5	206.3
15	(345.7)	28.8	187.3	216.1

TABLA 5-19 RESUMEN DE FLUJOS NETOS Y FLUJO DIFERENCIAL

AÑO.	ALTERNATIVAS			FLUJO DIFERENCIAL	
	A	C	B	C	B
0	-	(1029.5)	(8332.5)	(1029.5)	(8332.5)
1	-	112.6	495.4	112.6	495.4
2	-	123.5	496.5	123.5	496.5
3	(1312.5)	129.1	497.6	1441.6	1810.1
4	(1391.)	134.3	498.6	1404.3	1889.6
5	(1474.4)	139.7	499.6	1614.1	1974.
6	(1562.9)	145.5	500.7	1708.4	2063.6
7	(1656.6)	151.7	501.9	1808.3	2158.5
8	(1756.6)	158.2	503.2	1914.8	2259.8
9	(1861.5)	165.1	504.5	2026.6	2366.
10	(1973.2)	172.4	505.9	2145.6	2479.1
11	(2091.5)	180.1	507.4	2271.6	2598.9
12	(2217.1)	188.4	509.0	2405.5	2726.1
13	(2350.1)	197.1	510.6	2542.2	2860.7
14	(2491.1)	206.3	512.4	2697.4	3003.5
15	(2640.6)	216.1	514.3	2856.7	3154.9

A partir de los fondos diferenciales se ha efectuado el cálculo del valor actual de cada alternativa con los resultados que se muestran en la Fig. 5-3. Se deduce que es conveniente la implementación de un sistema de protección por corriente impresa, por cuanto su rentabilidad es mayor que para la protección con ánodos de sacrificio, y también porque a la tasa de corte de la empresa (60%) este tipo de protección da un valor actual positivo.

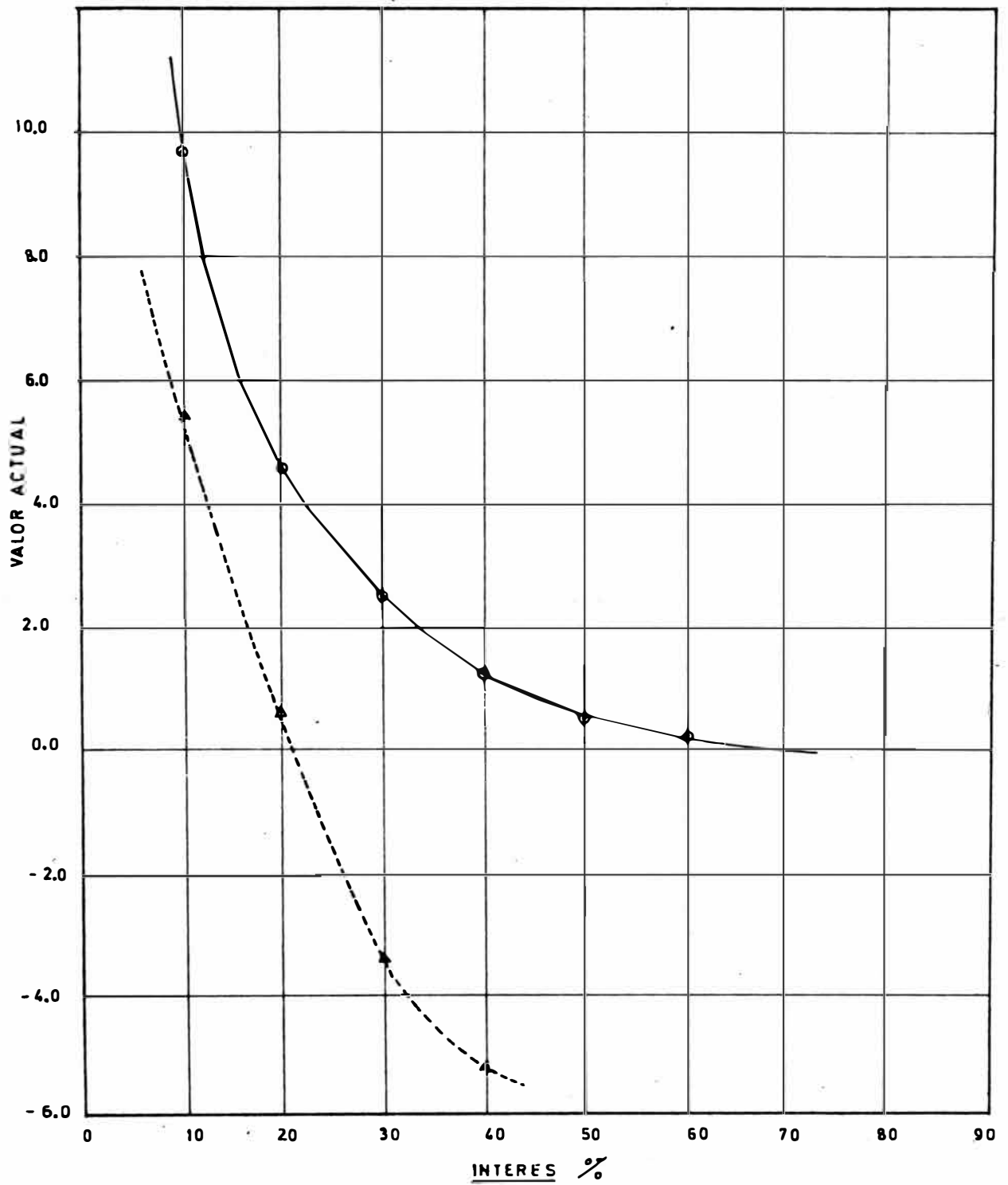


FIGURA N° 5.3.- Rentabilidad DCF

6.- CONCLUSIONES

- 6.1.- Dado los problemas de corrosión observados en esta planta y en Industrias similares se concluye que es facti-
ble lograr una protección eficiente de la corrosión en
los tanques de almacenamiento mediante la aplicación de
sistemas de protección catódica, logrando una sustan-
cial reducción de los costos asociados al mantenimiento
y a pérdidas de producción.
- 6.2.- Para las características del suelo, así como para las -
formas de corrosión encontrados técnicamente es facti--
ble proteger las instalaciones con protección catódica--
por corriente impresa o con ánodos de sacrificio de mag-
nesio.
- 6.3.- No es conveniente la utilización de ánodos de zinc por
cuanto el número y peso de los mismos resulta muy eleva-
do.
- 6.4.- La utilización de un sistema de protección por corrien-
te impresa es económicamente más atractiva que la apli-
cación de ánodos de sacrificio.
La rentabilidad diferencial DCF en el primer caso es de
70% mientras que en el 2º es de 21%.

ANEXO I

DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

ANEXO I

DETERMINACION DE LA RESISITIVIDAD DEL SUELO

I.1. PROCEDIMIENTO

La resistividad del terreno se ha determinado utilizando el método de Wenner, descrito en el capítulo 3.0. Las mediciones se han efectuado en las nueve zonas señaladas en el plano 33-A-103F. El arreglo para las mediciones se muestra en el esquema I-1.

En cada zona se efectuaron las mediciones retirando previamente una capa superficial de tierra de alrededor de 25 cm, que estaba impregnada con aceite debido a derrames. Así mismo, se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- I .- Las resistividades se midieron a profundidades de 0.55, 0.75 y 2.25 mts., con un espaciamiento de electrodos de 0.30, 0.50 y 1.00 mts.
- II .- Se usaron electrodos externos de cobre. Los electrodos internos fueron tipo standar de $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}(\text{sat})$.
- III.- Se usaron miliamperímetros y milivoltímetros de alta impedancia (10^6 ohm/voltio), y como fuente de suministro de corriente se usó una batería.
- IV .- Las lecturas de potencial se hicieron con polaridad directa e inversa para eliminar probables errores por corrientes vagabundas.

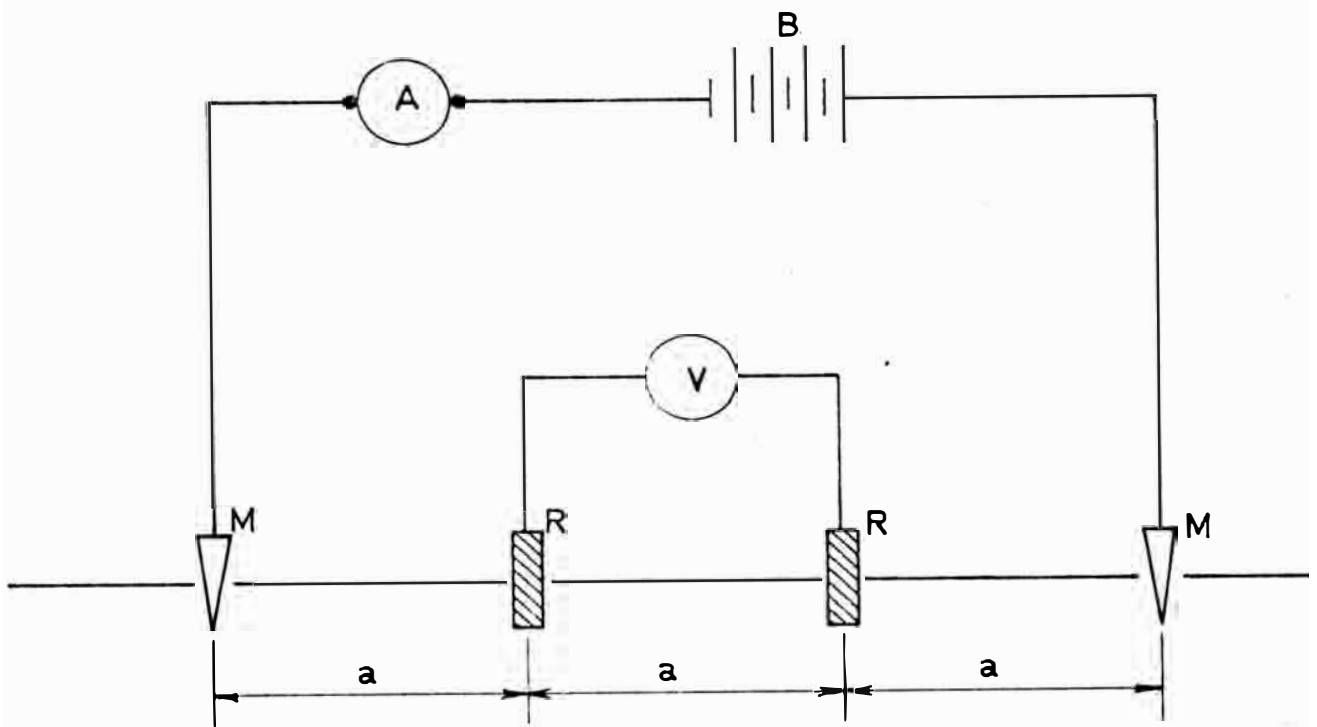
En la Tabla I.1, se muestran los resultados de las mediciones realizadas y en la Tabla I-2, las resistividades calculadas.

I.2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Como se puede observar de la Tabla I-2, la resistividad varía entre 600 y 2,000 OHM-cm. deduciéndose de ello que se trata de un suelo de mediana corrosividad. Así mismo, las zonas 3, 4 y 6 (Ver plano 33-A-103F), son las de mayor corrrosividad ya que en ellas la resistividad es de 600-800 - OHM-cm.

De otro lado se encontró que los valores de resistividad elevados (2500 a 4,000 OHM-cm), corresponden a las zonas entre tanques donde existe una fuerte impregnación de aceite, por derrame frecuente.

Finalmente de acuerdo a los resultados ya mencionados, se puede considerar una resistividad promedio de 1,000 OHM/cm a lo largo de todo el terreno.



A: MILIAMPERIMETRO DE ALTA IMPEDANCIA

B: BATERIA

V: MILIVOLTIMETRO DE ALTA IMPEDANCIA

R: ELECTRODO REF. $\text{Cu-SO}_4\text{Cu}(\text{sat})$

a: ESPACIAM. ENTRE ELECTRODOS

FIGURA N° I.1.- Arreglo utilizado para medir Resistividad de Los suelos.

TABLA I-1

MEDICIONES PARA DETERMINAR LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

ZONA	DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	AV MEDIDO	I APLICADA
Nº	a (mt)	(mV)	(m.a)
1	0.3	291.5	50
	0.5	103.0	35
	1.0	101.0	60
2	0.3	86.3	18.5
	0.5	56.6	18.5
	1.0	37.6	22.5
3	0.3	356.9	111.5
	0.5	149.3	75.0
	1.0	168.6	150.0
4	0.3	891.0	225.0
	0.5	621.0	250.0
	1.0	256.3	205.0
5	0.3	240.8	36.0
	0.5	91.4	25.8
	1.0	77.0	48.0
6	0.3	1026.7	290.0
	0.5	519.0	265.0
	1.0	450.0	300.0
7	0.3	230.1	50.0
	0.5	175.0	55.0
	1.0	168.4	85.0
8	0.3	264.2	12.7
	0.5	115.7	9.2
	1.0	53.0	8.6
9	0.3	57.4	10.5
	0.5	29.2	9.5
	1.0	9.1	5.8

TABLA I-2

RESISTIVIDAD DEL SUELO (OHM-cm).

ZONA	P R O F U N D I D A D (m)		
	0.55	0.75	1.25
1	1099	924	1056
2	879	960	1049
3	603	625	706
4	746	780	785
5	1260	1112	1008
6	667	615	942
7	867	999	1244
8	3920	3950	3870
9	1030	965	988

ANEXO II

DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE NECESARIA
PARA LA PROTECCION

I-1. METODO E-Log I

Para aplicar este método ya descrito en el capítulo correspondiente, se seleccionó el tanque 31088 de 22.4 m². de su superficie expuesta al suelo y se le aisló electricamente, totalmente del resto de las instalaciones.

Para efectuar la polarización catódica gradual y obtener á datos para la extrapolación E- log I, se instaló una batería como fuente de corriente en cuya salida negativa (-) se conectó un reostato variable (R) con el objeto de regular la corriente entregada, la misma que se medía con el amperímetro (A) conectado en la misma red (Ver Fig II-1). Como ánodo auxiliar se utilizó un ánodo de grafito con Back-Fill enterrado a 10.00 mt. del borde del tanque y a una profundidad de 0.80 mt.

Las mediciones de polarización se realizaron en 3 puntos - alrededor del tanque como se muestra en el Esquema Fig. II-1, mediante celdas de referencia Cu-SO₄Cu(sat), y a distancias variables entre 0.30 y 1.0 mt.

Los resultados de las mediciones se dan en la Tabla II-1, y en el gráfico II-3, se muestra el resultado de la extrapolación.

II-2. METODO DE POLARIZACION A-0,85V

Se hicieron mediciones sobre una plancha de 0.5 m². (0.50 x 1.0 mt), la cual fué enterrada a 0.80 mt. de profundidad

(Ver fig. II-2), El suministro de corriente se dió a partir de una batería con reostato regulable y utilizando un ánodo auxiliar de grafito enterrado a 3.00 mt. de la plancha . Las mediciones del potencial se efectuaron a 30 cm. de la plancha. y utilizando electrodos de referencia $\text{Cu SO}_4\text{Cu}$ (sat).

En la Fig. II-2., se muestra el esquema de las instalaciones utilizadas, y en la Tabla II-2, se dan los resultados obtenidos al polarizar la plancha a un potencial de -0.85V.

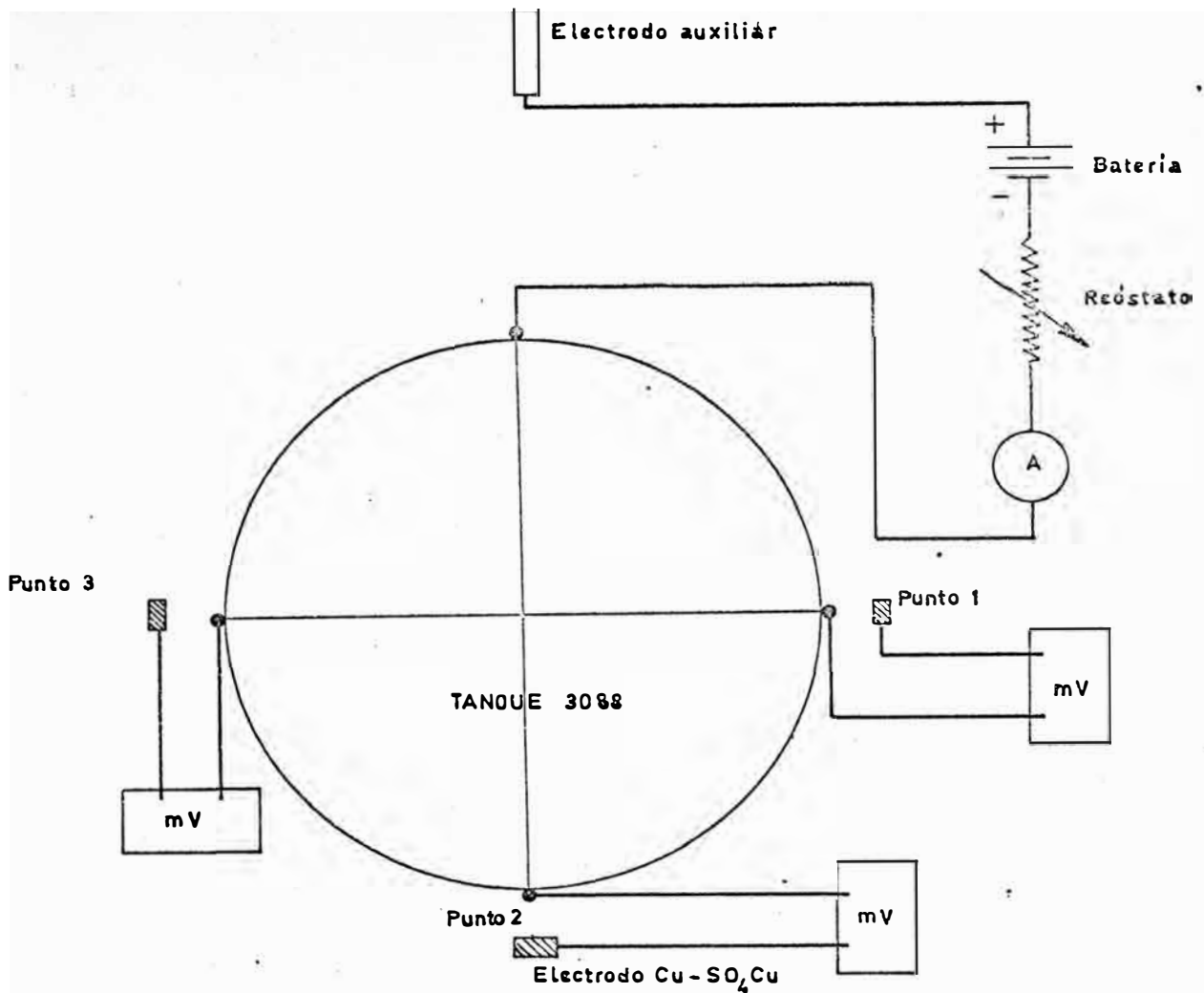


FIG. 11.1.- CONEXIONES PARA MEDIR POLARIZACION CATODICA (METODO E - log I).

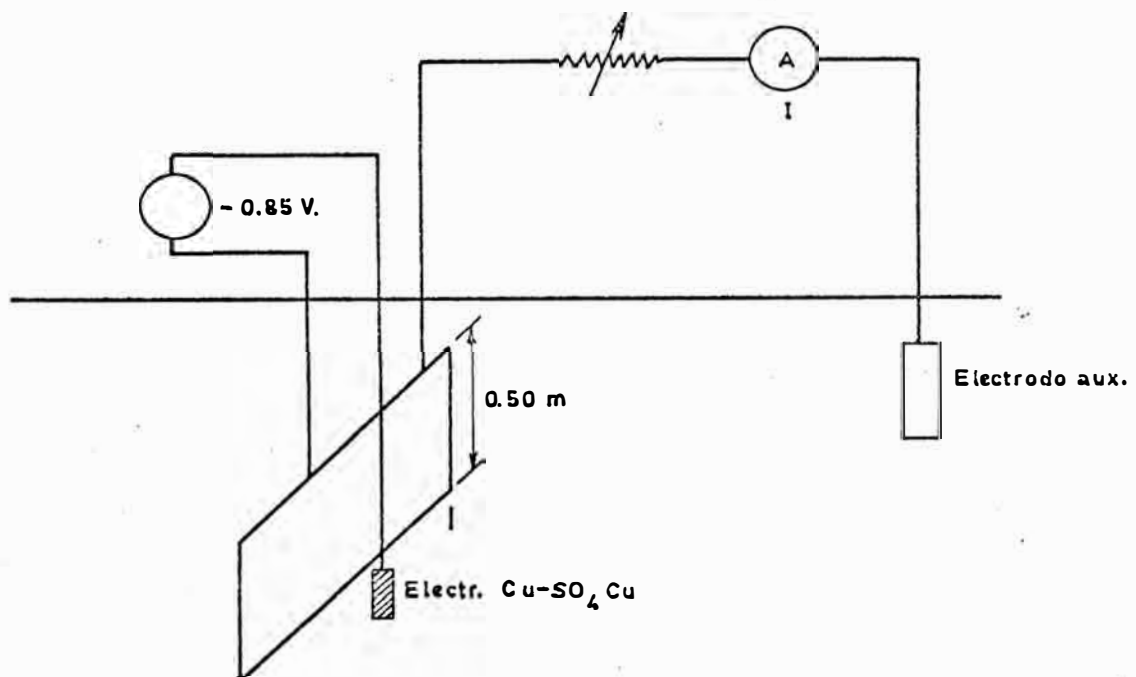


FIG. 11.2.- POLARIZACION A - 0.850 V. PARA DETERMINAR LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCION.

TABLA II-1

MEDICIONES DE POLARIZACION CATODICA PARA LA EXTRAPOLACION
DE E-LOG.I

CORRIENTE TOTAL IMPUESTA (mA) (1)	DENSIDAD DE CORRIENTE IMPUESTA (mA/m ²)	POTENCIALES DE POLARIZACION (mV)		
		PUNTO 1 (2)	PUNTO 2 (2)	PUNTO 3 (2)
56.0	2.50	590	580	580
112.0	5.00	630	660	650
168.0	7.50	660	705	680
224.0	10.00	710	730	720
280.0	12.50	740	775	770
336.0	15.00	815	835	820
392.0	17.50	850	875	850
448.0	20.00	890	915	915
504.0	22.50	940	960	950
560.0	25.00	975	985	975
616.0	27.50	1020	1035	1035
672.0	30.00	1075	1100	1080
728.0	32.50	1130	1160	1150
784.0	35.00	1190	1190	1190

(1) Para una superficie de 22.4 m²

(2) Referidos al esquema Fig. II-3.

TABLA II-2.

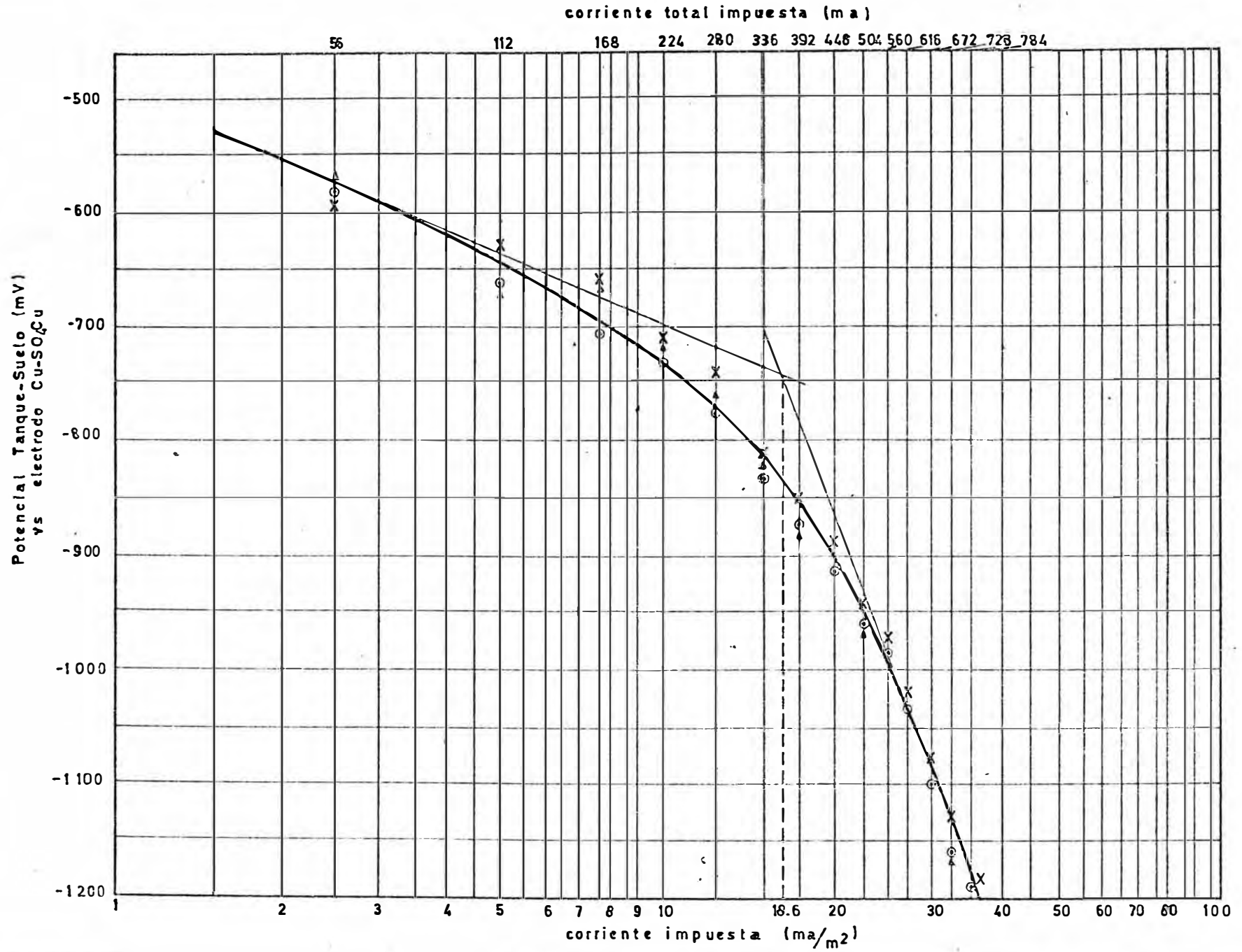
DETERMINACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCION -
METODO DE POLARIZACION A- 850 mV

ZONA (1)	POTENCIAL MEDIDO (mV)	CORRIENTE TO- TAL NECESARIA (mA)	DENSIDAD DE CORRIENTE PROTEC. (mA./m ²)
1	- 850	7.65	15.3
2	- 850	7.0	14.0
3	- 850	6.05	12.1
4	- 850	6.75	13.5
5	- 850	8.35	16.7
6	- 850	5.56	11.3
7	- 850	6.10	12.2
8	- 850	8.80	17.6
9	- 850	7.50	15.0
Densidad de corriente de Protección Promedio			14.1

(1) Referido al Plano 33-A-103F

FIGURA 11-3

EXTRAPOLACION E-log I, PARA OBTENER LA CORRIENTE DE PROTECCION.



BIBLIOGRAFIA

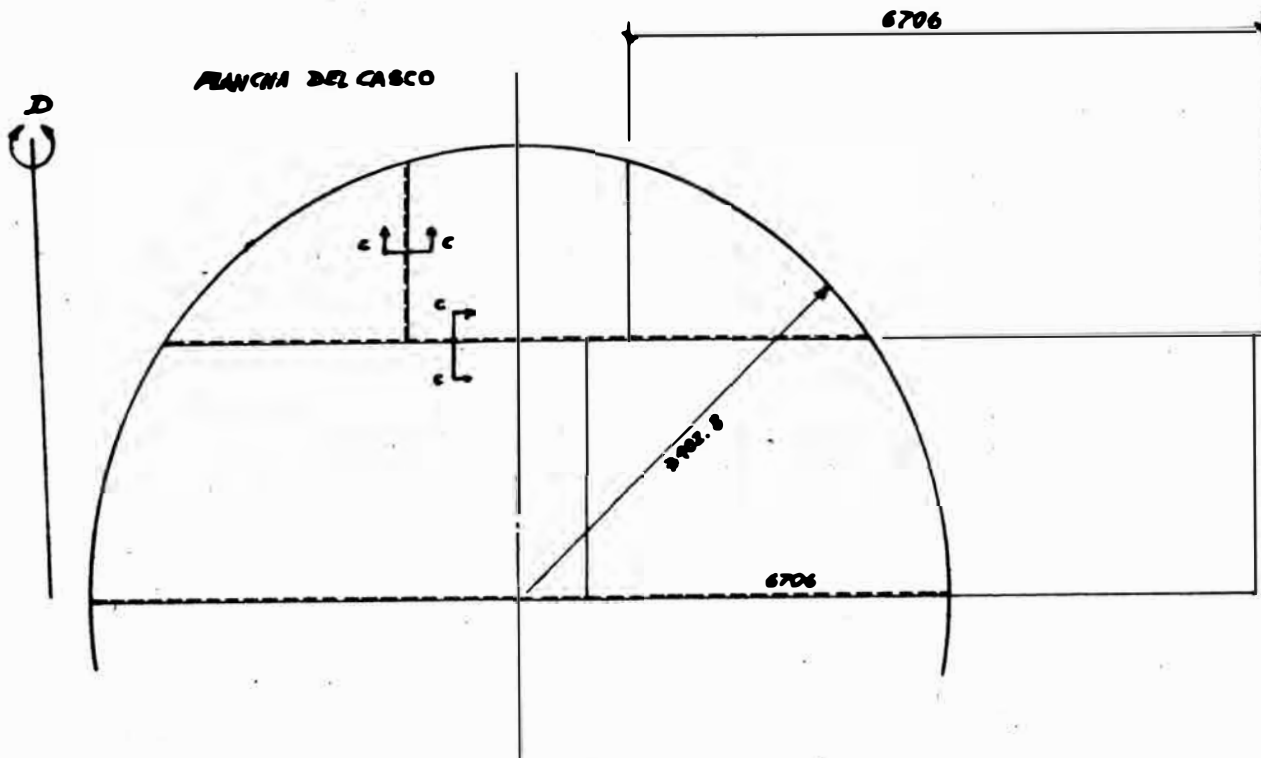
- 1.) UHLIG, H.H. "Corrosion and Corrosion Control" - John Willy & Sons. 1963.
- 2.) NAKASAWA CORROSION PROT. CO. LTD. - "Corrosion of Bottom Plate of oil storage tank and Corrosion Control" - Tech. Bulletin N° 219-E - Tokyo, Japan.
- 3.) NACE-STANDARD RP-01-69, "Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems" - NACE, Houston, Texas. 1969.
- 4.) DURCO - "Cathodic protection by impressed current anodes". The Duriron Co. Inc. - Dayton, Ohio. 1978.
- 5.) NACE-STANDARD RP-05-72, "Design, installation, operation and maintenance of impressed current deep ground beds" - NACE, Houston, Texas, 1972.
- 6.) PEABODY A.W. - "Control of Pipeline Corrosion" - An official NACE Publication - Houston, Texas. 1975.
- 7.) MORGAN J.H. - "Cathodic Protection it's theory and practice in the prevention of corrosion". Leonard Hill (Books) Limited, London. 1963.
- 8.) FONTANA M.G. - GREENE N.D. - "Corrosion Engineering" - McGraw-Hill Book Co. 1967.
- 9.) POUREAIX M. - "Atlas of Electrochemical Equilibria in Aquos Solutions" - Pergamon Press, N.Y. 1966.
- 10.) HENTHORNE, M. "Cathodic and Anodic Protection for Corrosion Control" - Chemical Eng. Dic. 27, 1971 - pg. 73-79.
- 11.) AILOR W.H. - "Handbook on Corrosion Testing and Evaluation"- Wiley, N. York, 1971.
- 12.) TOMASHOV N.D. - "Theory of Corrosion and Protection of Metals Mac Millan, N.Y. 1966.

- 13.) HENTHORNE, M. "Electrochemical Corrosion" - Chemical Eng. Junio 14, 1971 - pp. 102-106.
- 14.) HENTHORNE, M. "Polarization data yield corrosion rates" - Chemical Eng. Julio 20, 1971. pp. 127-132.
- 15.) LEE R. - "Fast cure for failures" - Chemical Eng. Enero 1972, pp. 118-122.
- 16.) PEABODY A.W. - "Use of steel as an anode material in deep groundbeds" - Mat. Protect. Mayo 1970. pp. 13.
- 17.) COSTANZO F.E. - "Using Graphite as impressed current anode for deep groundbeds" - Mat. Protect. and Perf. Abril 1970.
- 18.) MARSHALL P. - "Effect of continuous cathodic protection on current requeriments" - Mat. Prot. and Perf. Julio 1964. p.p. 32.
- 19.) LENNOX T.J. - "Charact. and applications of zink anodes for cathodic protection". Mat. prot. and perf. Setiembre 1962 p.p. 37.
- 20.) MARSHALL P. - "Cathodic Protection" - Mat. Prot. and Perf. Dic. 1966.
- 21.) SUDRABIN L.P. - "Cathodic protection is not always successful on ferrous structure - Mat. Protect. and Perf. Febrero 1966, pp. 49.
- 22.) SUDRABIN L.P. - "A review of cathodic protection theory and practice" - Mat. Prot. and Perf. Mayo 1963 - p.p. 8.
- 23.) REINDEHL J.E. - BECK F.H. - "Posivity and anodic protection" Corrosion 1969 - p.p. 233.
- 24.) COMPTON K.G. - "Criteria and their application for cathodic protection of underground structures" - Mat. Prot. and Perf. Agosto 1965-p.p. 93.

- 25.) ANDREWS J.L. - "Cathodic protection design - Important factors for offshore structures" - Mat. Prot. and Perf. - Enero 1967, p.p. 49.
- 26.) TEFANKJIAN D.A., "Application of cathodic protection", Materials protection and performance, Nov. 1972, p.p. 50.

P L A N O S

Nº	DESCRIPCION
33-A-101F	Disposición de Planta-Tanque de Almacenamiento.
33-A-102E	Detalles de diseño-tanques de Almacenamiento.
33-A-103F	Zonas de medición de resistividad.
33-A-104F	Esquema de instalación- Sistema de P.C. por corriente impresa.



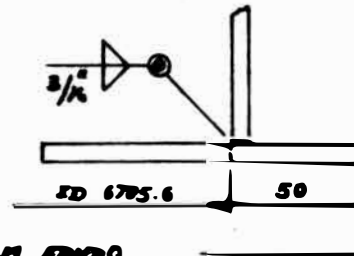
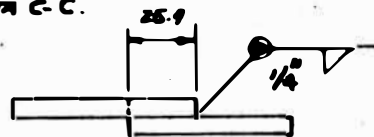
N° PLANCHAS NECESARIAS:

	TANQUE	TOTAL
$\frac{3}{4} R = 15'0''$ $30'0''$	2	4
$\frac{1}{4} R = 6'0''$ $22'0''$	1	2

NOTA:

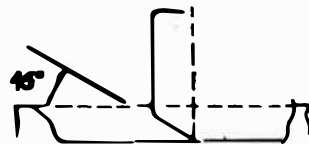
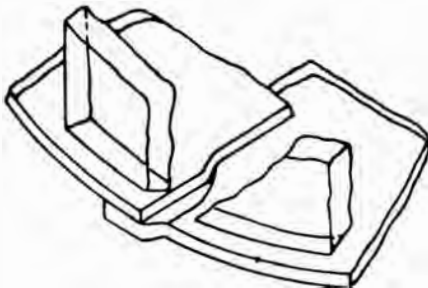
LA PLACMA DEL FONDO DEBE SER CORTADA EN CAMPO A UN MENO DE 3403.0 mm.

VISTA C-C.



DIAM. FONDO

DETALLE 'A'



MARTILLADO



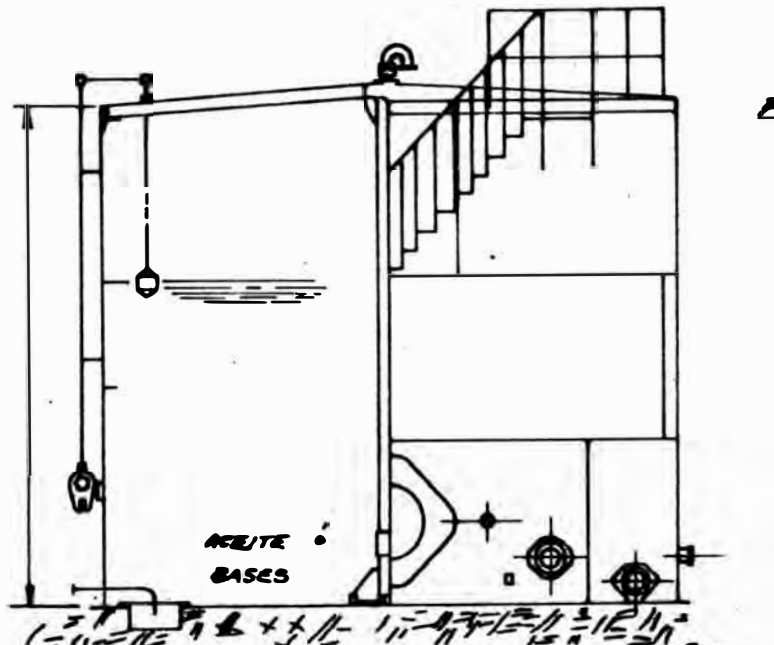
N°	PARTES	MAT.	1TX	700	000.
3			4	0	
2			2	4	
1	$\frac{1}{4} R$	A-232 C	1	2	

UNI. P.A. DE ING. QUIMICA Y M.

PROYECTO:

PROTECCION CATODICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

PROYECTISTA	ESCALA	DETALLES - FONDOS
INC 79	1/40	
DISEÑADOR	REV.	DWG N°
ACB	EDM/070	33-A-102-E
TESIS DE GRADO:		
R. ROJAS - G. NEGLIA		



PLANTAS CASCO

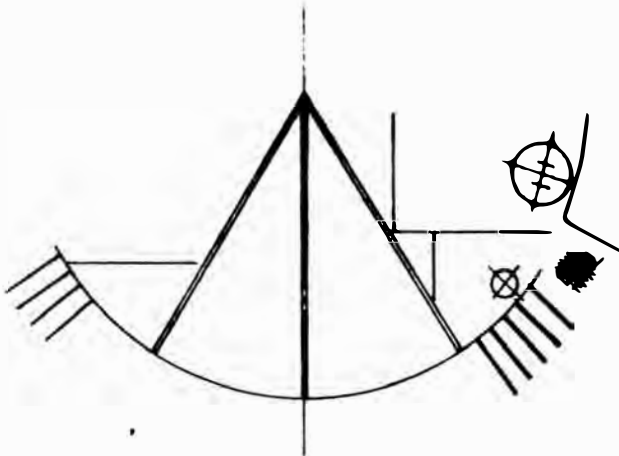
N° 3 3/16 R

N° 2 3/16 R

N° 1 3/16 R

GRANA-ARENA

VISTA SUPERIOR - DESARROLLO



ESPECIFICACIONES:

1.- CAPACIDAD NOMINAL:	1000 GAL
2.- TAMAÑO:	ED. 22" x ALTEZA 18"
3.- CONTENIDO:	BASES LUBRICANTES
4.- ITEM:	3089
5.- CANTIDAD:	2

N°	PORTE	TAMAÑO	CANT.	OBSEV.
1	PLANTAS CASCO	24"	1	
2	CONEX. LLENADO	8"	1	
3	CONEX. SUCCION	10"	1	TIPO BAJO
4	CONEX. VALV. SEC.	3/4"	2	C/BOBINAS CERRA
5	SUNIDERO	4"	1	C/BOBINAS
6	CONEX. TERMOMETRO	1"	1	
7	CONEX. TIERRA	-	1	
8	ESCALERA CIRCULAR	-	1	DIRECC. INVERSA.
9	MAN-HOLE TECNICO	30"	1	
10	INDICADOR DE NIVEL	6"	1	
11	VENTEO	3"	1	C/BOBINAS PLANO
12	CONEX. CALENTADOR	3"	1	
13	PLACA DE IDENTIF.	-	1	
14				

UNI-PA. DE ING. QUIMICA Y M.		
PROYECTO: "PROTECCION CATODICA EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO"		
FECHA D/C 79	REV. S/E	DETALLE - TANQUES
DIB. ACB	REV. BUB/BO	
		DWG N° 33-A-102-E (A)
TESIS DE GRADO: BOLIVAS - G NEGLIA		