

621-31924
R763

19/11/2016

Ing. Maria José Nieto Marán
ASISTENTE DE ACTIVOS FIJOS - CIB

**CORROSION EN LAS INSTALACIONES
SUBTERRANEAS DEL SISTEMA
ELECTRICO DE LA CIUDAD
DE GUAYAQUIL**

**TESIS PARA LA REVALIDACION
DEL TITULO DE INGENIERO
EN ELECTRICIDAD**

16 MAYO 1972
INGRESADO A INVENTARIO CON
ORD. NO. R-5

06-03-00
DR



SECRETARIA

POR:

NICOLAS ROMERO SANGSTER

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

GUAYAQUIL - ECUADOR

" LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS, IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTA TESIS, CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE AL AUTOR".

ART. VI DEL REGLAMENTO DE EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.



SECRETARIA

ING. NICOLAS ROMERO S.

GUAYAQUIL, NOVIEMBRE 1971

DIRECTOR DE TESIS

ING. JUAN GARCIA



SECRETARIA

A MIS PADRES, ESPOSA E HIJO



SECRETARIA

DEJO CONSTANCIA DE MI AGRADECIMIENTO A LA EMPRESA ELECTRICA DEL ECUADOR, INC. POR LA AYUDA PRESTADA EN LA ELABORACION DE ESTA TESIS

INDICE

	<u>pagina</u>
SUMARIO	1
INTRODUCCION: ASPECTOS TEORICOS DEL FENOMENO DE LA CORROSION	
Corrosión por Acción Química	2
Corrosión por Ataque Bacterial	3
Corrosión por Corrientes Parásitas	4
Sistemas eléctricos de transporte	5
Aparatos de soldadura D.C.	6
Sistemas de protección catódica.	8
Corrosión por Corrientes Galvánicas.	10
Corrosión por metales diferentes	11
Corrosión por ambientes diferentes	16
Factores que determinan la velocidad de la acción corrosiva galvánica.	21
Corrosión por Corriente Alterna	32
Medio para Combatir la Corrosión.	33
Drenaje de electrólisis.	33
Uso de metales galvánicos similares.	39
Aumento de la resistencia del circuito galvánico	40
Uso de capas y pinturas anticorrosivas	41
Protección catódica.	42
PUESTA A TIERRA Y CORROSION	57

DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRICO DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL	69
 CORROSION EN LOS CABLES DE ALUMINIO	
Historia y Presentación del Problema.	73
Pruebas de Laboratorio	76
Resultado de las Pruebas de Laboratorio	80
Conclusiones.	81
 CORROSION EN LOS CABLES DE PLOMO	
Presentación del Problema	85
Soluciones al Problema	87
Experiencia en la E.E.E..	102
Investigaciones, Reconocimientos y Pruebas	103
Análisis de los Datos Obtenidos de las Dife- rentes Pruebas y Reconocimientos.	126
Interpretación de los Datos Obtenidos	130
 CORROSION EN LOS TRANSFORMADORES SUBTERRANEOS	
Presentación del Problema	138
Formas de Mitigar la Corrosión	140
Experiencia de la E.E.E.; Soluciones	161
 NOTA FINAL	 171

SUMARIO



SECRETARIA

La presente tesis constituye un análisis exhaustivo del fenómeno de corrosión en cables e instalaciones subterráneas de la ciudad de Guayaquil. Se presenta primero un análisis completo y una recopilación extensiva del aspecto teórico de la corrosión. Luego se analiza el fenómeno de corrosión como se lo experimenta en el sistema eléctrico subterráneo de la ciudad de Guayaquil, bajo tres aspectos:

- 1.- Corrosión en cables de aluminio,
- 2.- Corrosión en cables de plomo, y
- 3.- Corrosión en transformadores

La experiencia con cables de aluminio es reforzada con pruebas de laboratorio. Al analizar la situación en los cables de plomo y la situación en los transformadores, se da una descripción detallada de los diferentes reconocimientos y mediciones eléctricas que se utilizan para prevenir, detectar o remediar problemas corrosivos. Pruebas y comparaciones en el laboratorio fueron realizadas cuando fue factible: Se da también descripciones de los métodos para mitigar corrosión, tanto en cables de plomo como en los transformadores.

Especial consideración se dió a la práctica de aterrizaje en su relación con el fenómeno corrosivo. Soluciones fueron dadas para mitigar la corrosión en el sistema de Guayaquil, y normas de construcción fueron establecidas.

INTRODUCCION

ASPECTOS TEORICOS DEL FENOMENO DE LA CORROSION



EDITORIAL LA

Corrosión es por definición la destrucción de un metal por acción química o electrolítica con su medio ambiente. Podemos visualizar el fenómeno corrosivo como la forma en que la naturaleza se las arregla para regresar metales trabajados a su estado natural. Tomemos hierro como un ejemplo, cuando este metal se corroe se forma sobre la superficie óxido, el cual al ser sometido a un análisis químico nos muestra ser óxido de hierro. Pues bien, en las minas, el hierro o mejor dicho el mineral de hierro, se nos presenta en forma de óxidos. Por lo tanto, podemos figurarnos que el fenómeno corrosivo es el medio que utiliza la naturaleza para deshacer la intervención del hombre en sus dominios minerales.

Las causas más comunes de corrosión son: I.- corrosión por acciones químicas, II.- corrosión por acción bacterial, III.- corrosión por corrientes parásitas, y IV.- corrosión por baterías galvánicas creadas por metales diferentes o ambientes diferentes.

I.- CORROSION POR ACCION QUIMICA.

La corrosión química se caracteriza por un ataque homogéneo y generalizado sobre la superficie metálica atacada. Por esta misma razón, la destrucción del metal es menos profunda y, además más lenta. La corrosión química de estructuras metálicas subterráneas puede ser ocasionada por ácidos orgánicos provenientes de madera o vegetales en descomposición, aguas servidas, desperdicios industriales, etc.

Corrosión por álcalis es el resultado del contacto con mortero de ce

mento mal curado o con concreto que contenga hidróxidos de sodio o calcio. En el mayor de los casos, la alcalinidad se debe a presencia de concreto fresco y frecuentemente ocurre en ductos y bóvedas en los que se acumula agua, la cual sólo es eliminada por evaporación a causa del calor generado por cables y equipos eléctricos. Esto produce una concentración de las sales alcalinas disueltas de las paredes del ducto y la tierra circundante; valores de PH de 11 y 12 han sido obtenidos en estas circunstancias.

II. CORROSION POR ATAQUE BACTERIAL.

Bacterias anaeróbicas son asociadas con corrosión en suelos mal aereados. Las condiciones para este tipo de corrosión son: ausencia de oxígeno en la tierra o líquido electrolítico y la presencia de humedad, sulfatos y materiales orgánicos.

Es probable que algunas especies de bacterias y hongos en materias orgánicas en descomposición que se encuentren en la tierra, absorban el oxígeno de la misma en cientos de puntos, causando que la porción del metal que está en contacto con esta zona se vuelva anódico con relación a otras partes más aereadas. Las zonas anaeróbicas se convierten en sitios para el desarrollo de sulfatos reductores que causan sulfitos ferrosos de coloración negra.

La presencia de sulfitos negros en el metal, o la presencia de agua gris oscura de fuerte olor en las bóvedas subterráneas señala

la existencia de un ambiente de bacterias anaeróbicas altamente corrosivo.

Una prueba para determinar la presencia de sulfito puede ser hecha sumergiendo el producto de corrosión en ácido clorídrico diluido. Si el olor típico del sulfito de hidrógeno es detectado, corrosión por acción de bacterias es evidente.

III.- CORROSION POR CORRIENTES PARASITAS.

La corrosión ha sido definida como un proceso electroquímico. Los cambios químicos que constituyen la corrosión de un metal pueden ser producidos por corrientes eléctricas de una fuente externa. Este fenómeno es comúnmente conocido como corrosión por corrientes parásitas. Este tipo de corrosión es causado por corriente directa entrando y, luego abandonando una estructura metálica particular a través de un electrolito. En el lugar en que entra la corriente la estructura no se ve afectada e incluso es en algo protegida, pero en el punto en que la corriente abandona la estructura metálica, tendremos problemas de corrosión.

Algunos de los causantes de corrosión por corrientes parásitas son: A.- sistemas eléctricos de transporte, que usan los rieles como conductor de retorno; B.- aparatos de soldadura de corriente directa; C.- sistemas de protección catódica; y ocasionalmente D.- sistemas Edison de transmisión de corriente directa.

A.- Sistemas eléctricos de transporte.

En un sistema eléctrico de transporte, corriente directa para la operación de los tranvías es producida en varias subestaciones y transmitida a los carros por líneas aéreas. El camino normal de retorno a la subestación es a través de los rieles de acero, los cuales están conectados por cables a los convertidores en las subestaciones. Como los rieles están en contacto con la tierra, algo de la corriente se escapa y fluye a través de la misma al encontrar alguna ruta de baja resistencia. Parte de esta corriente "escapada" puede ser recogida por una tubería metálica o por un cable con camisa de plomo en un punto alejado de la subestación y luego descargada a la tierra en puntos cercanos a la subestación, también por medio de caminos de baja resistencia del terreno. Corrosión ocurre en el punto en que la intensidad abandona la superficie metálica, como se ilustra en la Fig. 1.

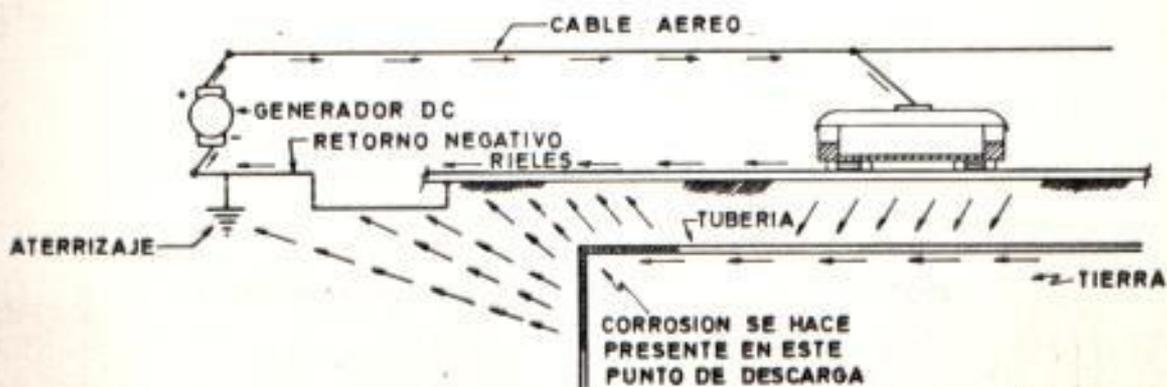


fig 1

Este tipo de corrosión puede prevenirse conectando la estructura metálica que queremos proteger a la barra negativa del sistema en la subestación o a las rieles, como veremos más adelante. Si las condiciones son muy severas, se puede aplicar un sistema convencional de protección catódica a las estructuras amenazadas.

B.- Aparatos de soldadura de corriente directa.

La corrosión por corrientes parásitas originadas por la operación de soldadoras eléctricas de corriente directa se presenta cuando la soldadora es puesta a tierra a través de una estructura metálica que no está conectada a la estructura que está siendo soldada. La corriente de soldadura circulará entonces de la estructura a la cual se ha aterrizado la soldadora, hacia la tierra, y de ésta a la estructura que está siendo soldada para completar el circuito. La estructura desde la cual la intensidad eléctrica se descarga hacia la tierra sufrirá fuerte corrosión. Durante la construcción de una planta industrial se pueden producir daños de consideración en estructuras soterradas debido a impropias conexiones a tierra de equipos de soldadura D.C. Inclusive, así sea corto el tiempo de la descarga, las altas intensidades asociadas con esta operación pueden causar fuertes daños a las estructuras metálicas.

Este tipo de corrosión la prevenimos conectando la soldadora directamente a la estructura que se va a soldar y asegurándose que no hay uniones resistivas entre las conexiones a tierra y el punto

de soldadura. Métodos correctos e incorrectos de puesta a tierra se muestran en la Fig.2.

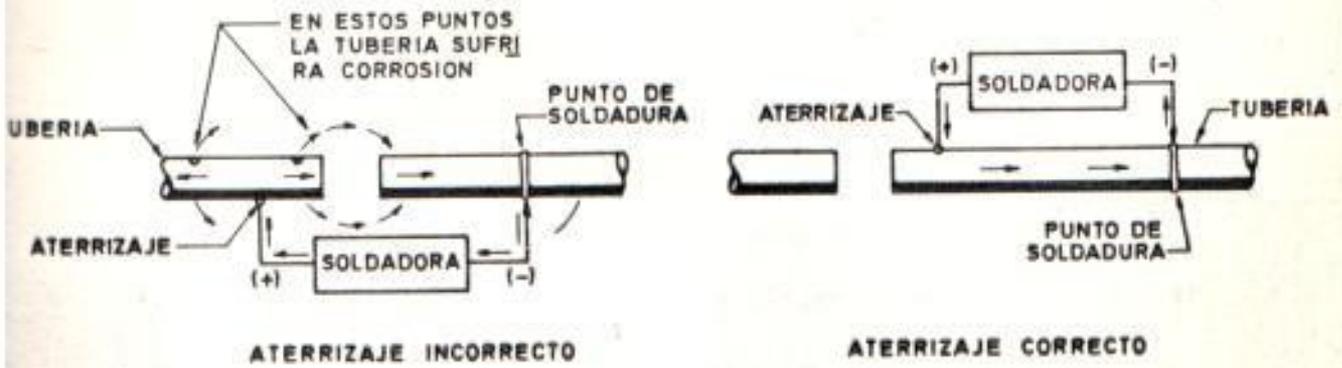


fig.2

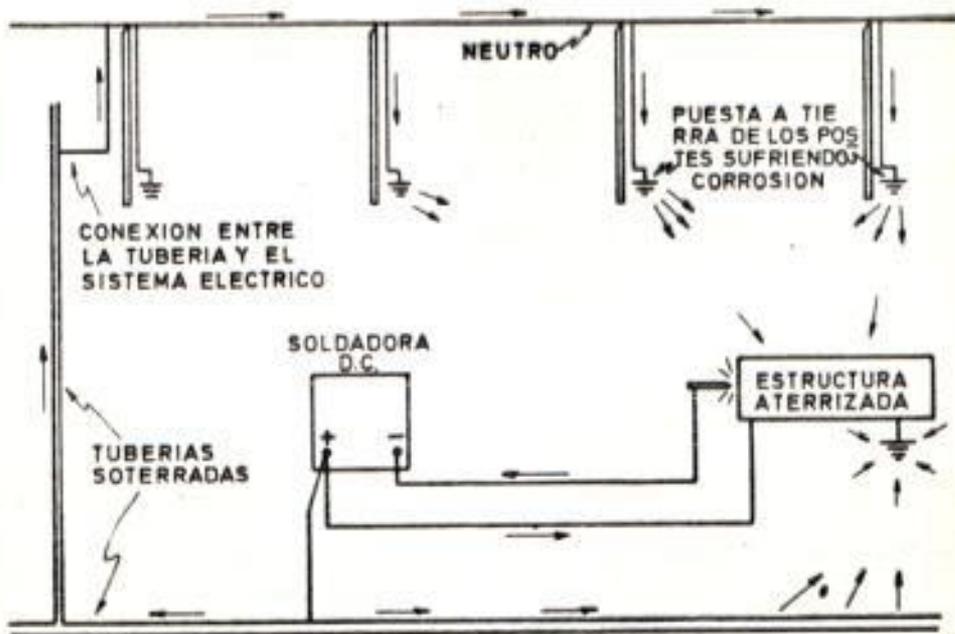


fig.3

La Fig.3 nos muestra otra situación en la cual podemos ocasionar corrosión de estructuras metálicas soterradas, al efectuar trabajos de soldadura. En la figura el circuito es tal que un lado del mismo está también aterrizado a estructuras subterráneas independientes de la estructura que está siendo soldada. A pesar de que el circuito soldadora-pieza a soldarse está cerrado, parte de la corriente fluirá por la conexión paralela a tierra. Al presentarse este flujo, corriente eléctrica se descarga de las estructuras subterráneas con el consiguiente perjuicio.

En general, corrosión por corrientes parásitas puede ser prevenida mediante el correcto diseño de los sistemas que al principio mencionamos como los culpables directos de este tipo de corrosión.

C.- Sistemas de Protección Catódica.

Otra situación de corrosión por corrientes parásitas la ocasionan corrientes directas generadas por equipos de protección catódica. La Fig.4 nos muestra un ejemplo.

Estas instalaciones consisten en un rectificador A.C.-D.C. trabajando como una fuente de corriente directa de bajo voltaje. La salida de D.C. del rectificador tiene su terminal negativo conectado al metal a ser protegido y su polo ^{POSITIVO} negativo conectado a una conexión a tierra de baja resistencia, comunmente llamada "lecho de puesta a tierra".

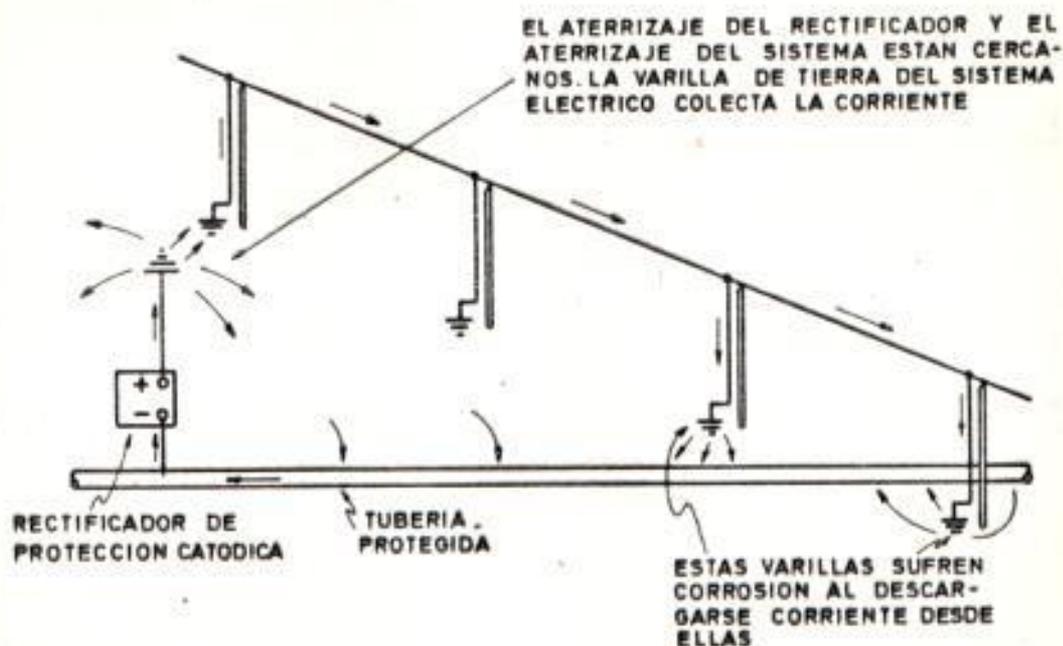


fig 4

Para continuar con el ejemplo de la Fig.4, si un sistema de distribución multi'aterrizado da servicio a la fuente rectificadora, y si el "lecho de puesta a tierra" se encuentra ubicado en las cercanías de las varillas de aterrizaje del sistema eléctrico, las condiciones para que la corrosión se haga presente están establecidas. Como se muestra en la figura, la corriente fluirá del "lecho de puesta a tierra" a las varillas adyacentes. Esta corriente colectada por el sistema de puesta a tierra fluye en cualquier dirección por el conductor neutro para descargarse a través de otras varillas más lejanas, en donde encuentre condiciones favorables para ello; estas varillas sufrirán los efectos de la corrosión. Situaciones similares a

la descrita se presentan en cables e instalaciones subterráneas.

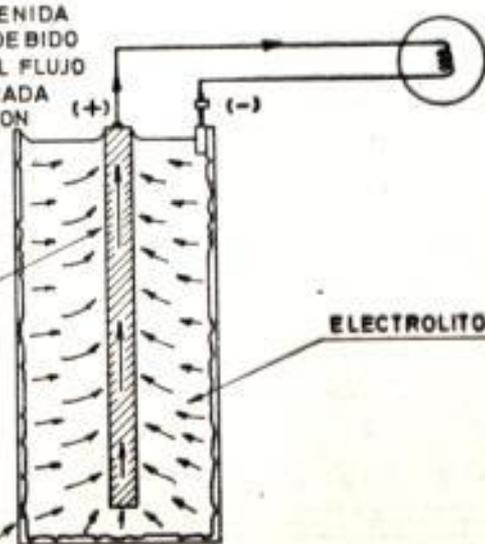
IV.- CORROSION POR CORRIENTES GALVANICAS.

La corrosión frecuentemente ocurre en instalaciones subterráneas, entre metales diferentes, por la acción galvánica entre ellos ante la presencia de un electrolito. Básicamente nos encontramos ante un proceso electroquímico; corrosión ocurre porque se establecen potenciales eléctricos entre diferentes metales o diferentes condiciones en el mismo metal, en un electrolito. La corriente eléctrica fluye en el electrolito del metal anódico al metal más noble o catódico y a través de un circuito de retorno, del cátodo al ánodo. La corriente en el electrolito abandona el ánodo como iones positivamente cargados del metal y por lo mismo éste se desgasta en el proceso, en otras palabras, se corroe electroquímicamente. Los iones metálicos positivos proceden al cátodo donde las cargas positivas son neutralizadas por electrones. El metal que hace de cátodo no interviene en la reacción electroquímica.

TODA LA CORRIENTE OBTENIDA DE UNA PILA SECA ES DEBIDO A LA ACCION QUIMICA. EL FLUJO DE LA CORRIENTE GENERADA RESULTA EN LA CORROSION DEL ANODO

ELECTRODO DE CARBON, EL CATODO

CAPA METALICA EXTERNA DE ZINC, EL ANODO



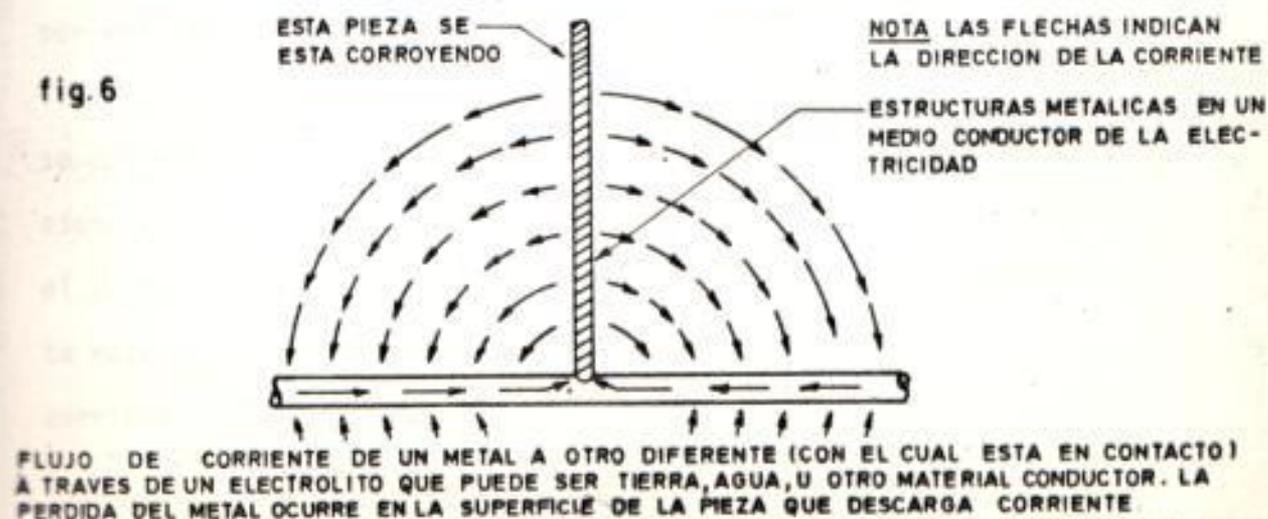
CARGA CONECTADA A TRAVEZ DE LOS TERMINALES DE LA BATERIA

fig 5

Este tipo de mecanismo se ilustra en la Fig. 5, la cual muestra el tipo más sencillo de célula galvánica: la pila seca. Zinc, el mismo metal que se utiliza para galvanizar la superficie de una tubería de hierro, es usado como la capa metálica externa que encierra una barra de carbón colocada en el centro. El espacio entre el zinc y la barra de carbón se encuentra lleno de materiales químicos que conforman el electrolito. Cuando cualquier resistencia se conecta entre el zinc y el carbón, tenemos un circuito eléctrico y acciones químicas causan que una corriente eléctrica fluya del zinc al electrolito, de éste al carbón y por último a través de la resistencia de regreso al zinc. Esta corriente eléctrica originada en el zinc, lo desgasta y decimos comúnmente que se corroe. La cantidad de corriente que fluirá depende de tres cosas: esencialmente: 1° el potencial entre los terminales; 2° la resistencia interna de la batería; 3° la resistencia de la carga externa.

Cuando dos metales cualesquiera, enterrados o sumergidos en un electrolito son conectados por un alambre, por un acoplamiento, por soldadura, o cualquier otro tipo de unión, de manera que se proporcione el camino para que una corriente eléctrica fluya, estamos dando origen a una pila galvánica y uno de ellos tiende a corroerse (Fig. 6).

fig. 6



CLASE DE METALES CONECTADOS Y DIRECCION DEL FLUJO DE CORRIENTE	CAIDA DE POT. A TRAVES DE LA RESISTENCIA	FLUJO DE CORRIENTE	PERDIDAS ANUALES DEL METAL
ACERO GALVANIZADO ACERO NUEVO	.16 VOLTS	.016 AMP	.32 LBS
ACERO NUEVO ACERO OXIDADO	.10 "	.01 "	.20 "
ACERO OXIDADO HIERRO FORJADO	.02 "	.002 "	.04 "
HIERRO FORJADO COBRE	.175 "	.0175 "	.35 "
COBRE PLOMO	.14 "	.014 "	.96 "

tabla I

La Tabla I muestra algunas de las combinaciones de metales comunemente usados en las instalaciones de agua potable, fuerza eléctrica, gas, etc. El metal que se corroe y la dirección de la corriente galvánica también está indicada.

La corrosión galvánica es similar a la ocasionada por corrientes parásitas en lo que a desgaste del ánodo se refiere. La diferencia esencial reside en que, en el segundo caso, es un agente externo el que genera la corriente eléctrica que

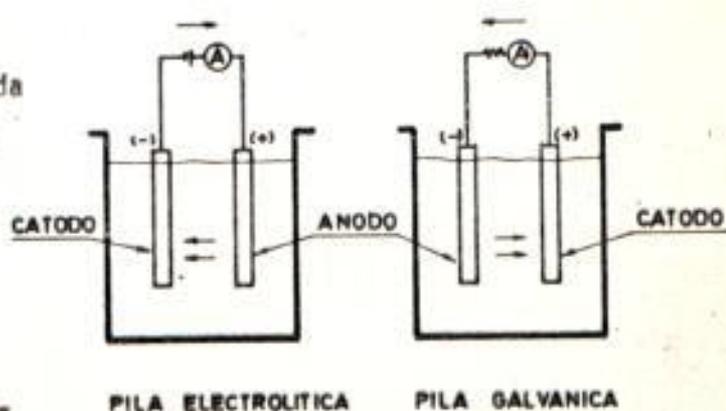


fig 7

produce la corrosión. Existe también una diferencia en polaridad; en una pila electrolítica el ánodo es positivo, mientras que en una pila galvánica el ánodo es negativo (Fig.7).

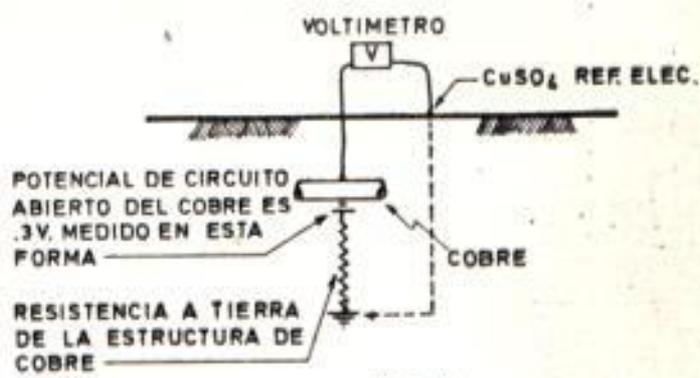


fig. 8

A esta altura de nuestra exposición conviene señalar que cada metal tiene un potencial galvánico característico cuando entra en contacto con un electrolito. Este potencial es también llamado el potencial de medio-elemento, ya que se requieren dos de estos elementos para formar una pila galvánica. El potencial de medio-elemento se determina como lo muestra la Fig. 8, usando un electrodo de sulfato de cobre saturado (Fig. 9) como referencia.

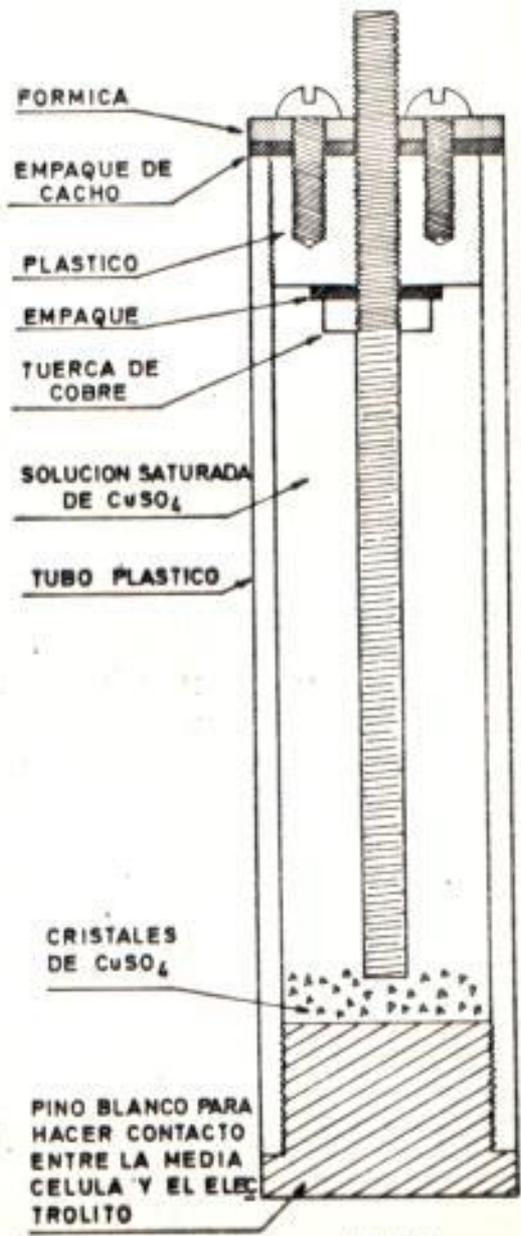


fig. 9

La Tabla II nos da los valores de potencial de medio-elemento de algunos metales, refe-

TABLA II

SERIE ELECTROMOTIVA DE LOS METALES

METAL	POTENCIAL NEGATIVO A UNA MEDIA CELDA DE CuSO SATURADO (VOLT.)
Magnesio (aleación Galvomag.).....	1,750
Magnesio (aleación H-1- 6% Al.- 3% Zn.-0,15% Mn)	1,550
Zinc	1,106
Aluminio (aleación 3003 - 5% Zn.).....	1,016
Aluminio Puro	0,800
Cadmio	0,800
Hierro Forjado (nuevo)	0,686
Acero Carbón	0,686
Acero Inoxidable Tipo 430, Estado Activo, 17% Cr.	0,646
Hierro Forjado Ni-Resist., 20% Ni.	0,616
Acero Inoxidable Tipo 304, Estado Activo, 18% Cr., 8% Ni....	0,606
Acero Inoxidable Tipo 410, Estado Activo, 13% Cr.	0,596
Hierro Forjado Ni-Resist., 30% Ni.	0,566
Hierro Forjado Ni-Resist., 20% Ni. + Cu.	0,536
Plomo	0,500
Estaño	0,500
Bronce Enrollado Naval	0,476
Bronce Amarillo	0,436
Cobre	0,436
Bronce Rojo	0,406
Bronce Normal	0,386
Bronce Tipo "Admiralty"	0,366
90:10 Cu.-Ni.+ .8% Fe.	0,356
70:30 Cu.-Ni.+ .06% Fe.	0,346
70:30 Cu.-Ni.+ .47% Fe.	0,326
Acero Inoxidable Tipo 430, Estado Pasivo, 17% Cr.	0,296
Niquel	0,276
Acero Inoxidable Tipo 316, Estado Activo, 18% Cr., 12% Ni., 3% Mo.	0,256
Inconel	0,246
Acero Inoxidable Tipo 410, Estado Pasivo, 13% Cr.	0,226
Titanio Comercial	0,226
Soldadura de Plata	0,206
Titanio de Alta Pureza	0,176
Acero Inoxidable Tipo 304, Estado Pasivo, 18% Cr., 8% Ni....	0,156
Aleación Hastelloy C.	0,156
Monel	0,156
Acero Inoxidable Tipo 316, Estado Pasivo, 18% Cr., 12% Ni., 3% Mo.	0,126
Plata	+0,100
Platino	+0,160
Carbón, Grafito, Coque	+0,300
Oro	+0,660

ridos a un medio-elemento de sulfato de cobre saturado. Cada metal es ánodico a aquellos metales con potenciales más positivos; acero dulce, por lo tanto, se corroerá cuando se lo conecte con cualquier metal que no sea magnesio, zinc o aluminio. La corriente galvánica fluye por lo tanto, del metal más negativo al menos negativo.

En la Fig. 10 vemos algunos ejemplos de corrosión causada por la presencia de metales diferentes en un electrolito.

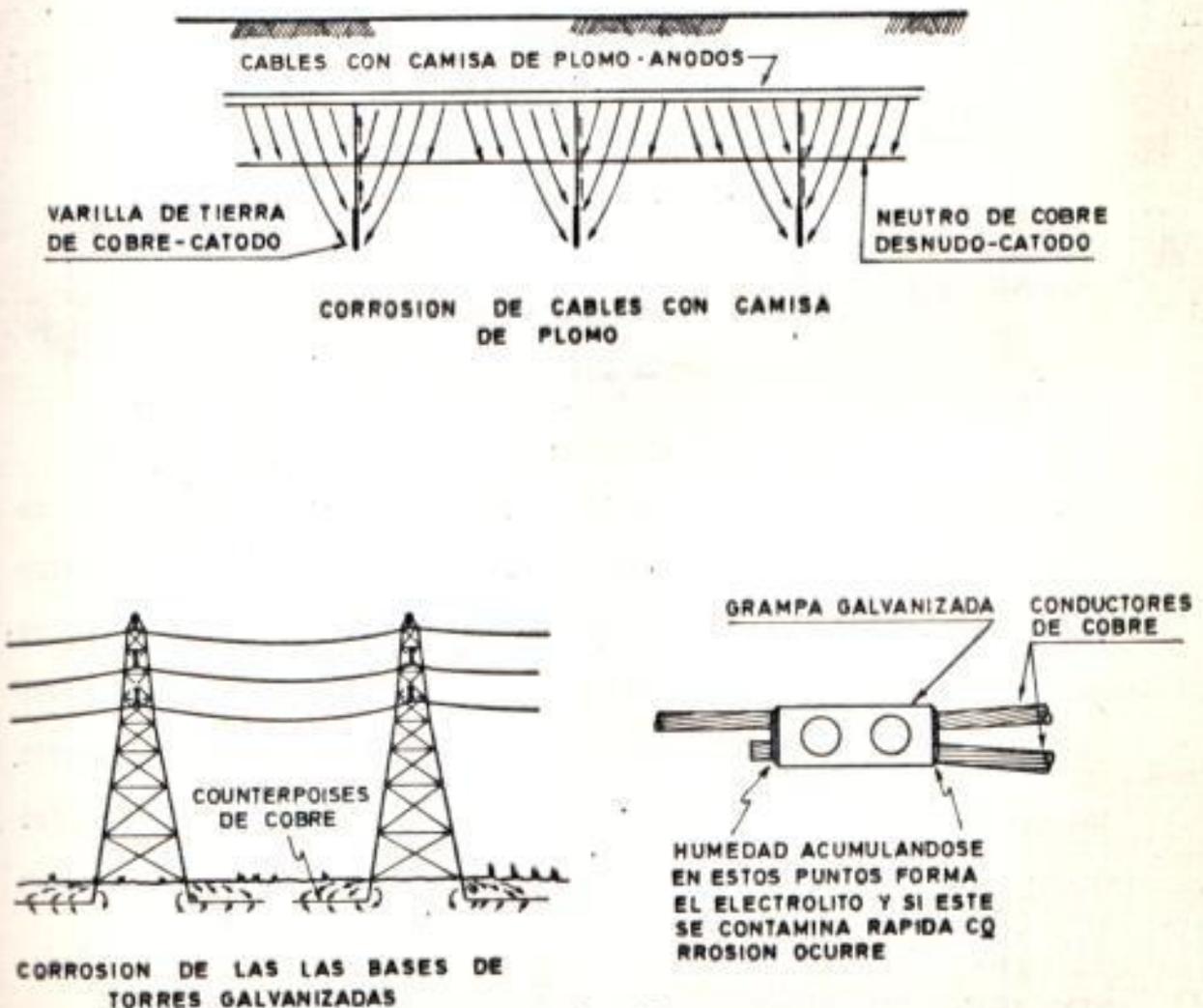
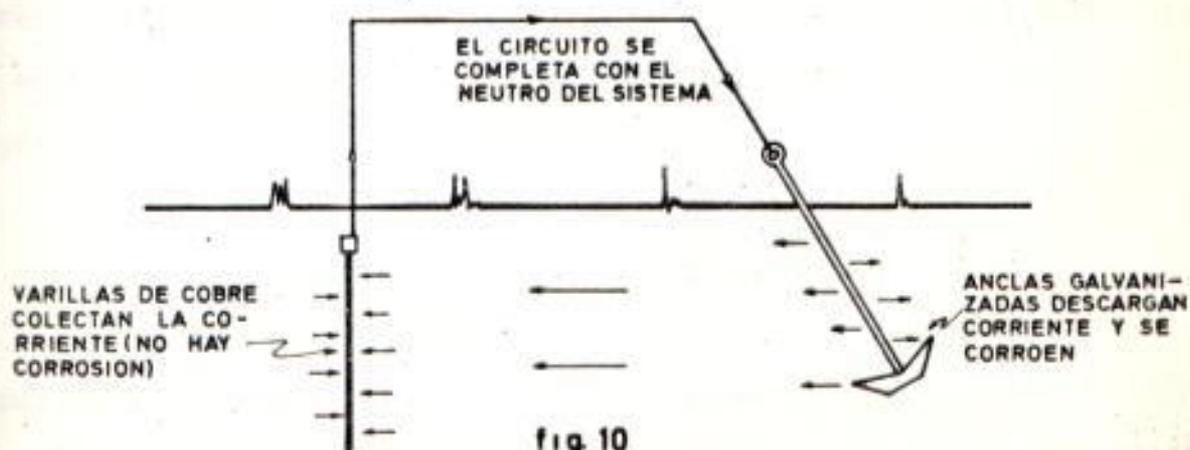
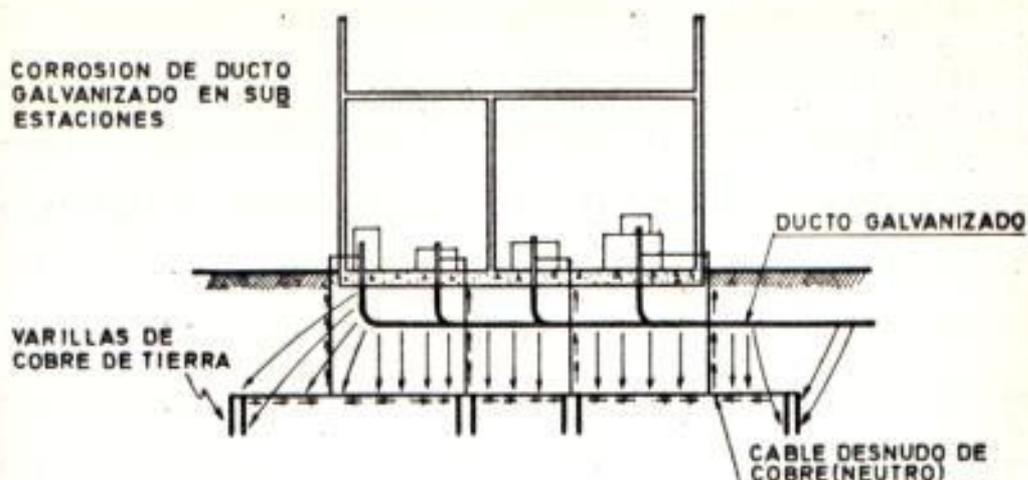


fig.10

SUBESTACION

CORROSION DE DUCTO GALVANIZADO EN SUB ESTACIONES



Hay otro aspecto de corrosión galvánica que aún no hemos considerado, y éste es la corrosión causada por la formación de pilas electroquímicas que resultan de las diferencias en el medio ambiente que está en contacto con un metal. El potencial de la superficie metálica varía dependiendo de la naturaleza del electrolito en contacto con ella. Estas diferencias de potencial establecen corrientes galvánicas entre partes del mismo metal. En la parte del metal de la cual emerge el flujo, corrosión se hará presente.

Probablemente un gran porcentaje de la corrosión que sufren superficies metálicas directamente enterradas bajo tierra, es el resultado

de corrientes galvánicas generadas debido a diferentes condiciones físicas y químicas de la tierra en contacto con dichas superficies. Estas diferentes condiciones pueden ser variadas: la clase y cantidad de las sales químicas contenidas en la tierra, la cantidad de humedad presente, la resistividad eléctrica de la tierra y, las diferencias en concentración de oxígeno en la misma. Las pilas causadas por diferencias en la concentración de oxígeno son más frecuentes que las causadas por diferencias en la composición o concentración del electrolito y además generan voltajes más altos. En este tipo de pila electroquímica la parte metálica que se encuentra en contacto con el electrolito que tiene mayor concentración de oxígeno, es el cátodo.

En un ducto subterráneo, en que la cantidad de aireación varía de un punto a otro por la acumulación de lodo o sedimentos; o en un banco de ductos congestionado en el cual la aireación de los ductos inferiores es más o menos limitada, se puede presentar corrosión por diferencias en la concentración de oxígeno. En este caso las superficies metálicas de baja concentración de oxígeno serían anódicas con relación a las otras superficies mejor aireadas.

Cuando una superficie metálica atraviesa variadas condiciones de terreno -por ejemplo: arena y arcilla- o a través de un terreno seco en partes y extremadamente húmedo en otras, se puede presentar corrosión debido a estas variaciones del terreno a pesar de que estamos hablando de un mismo metal. Usualmente en terrenos que contienen ciertos compuestos químicos y en terrenos muy húmedos, tendremos problemas de

corrosión con la corriente galvánica producida por la acción química que se presenta entre el medio ambiente y el metal. Esta intensidad circulará de la parte que está en contacto con la tierra más húmeda, hacia la parte del metal que se encuentra en contacto con la tierra más seca. El conductor de esta corriente es la misma tierra.

Pueden haber considerables diferencias en el tipo de terreno, metro por metro a lo largo de una tuberfa o de un cable directamente enterrado, debido a innumerables razones. Al excavar para colocar un cable o tuberfa, la excavación puede atravesar diferentes capas de tierra por ejemplo; al volver a llenar la zanja, estas diferentes clases de tierras se mezclan alrededor de la superficie metálica propiciando que corrosión se haga presente debido a esta situación. La Fig.11 muestra ejemplos de este tipo de corrosión.

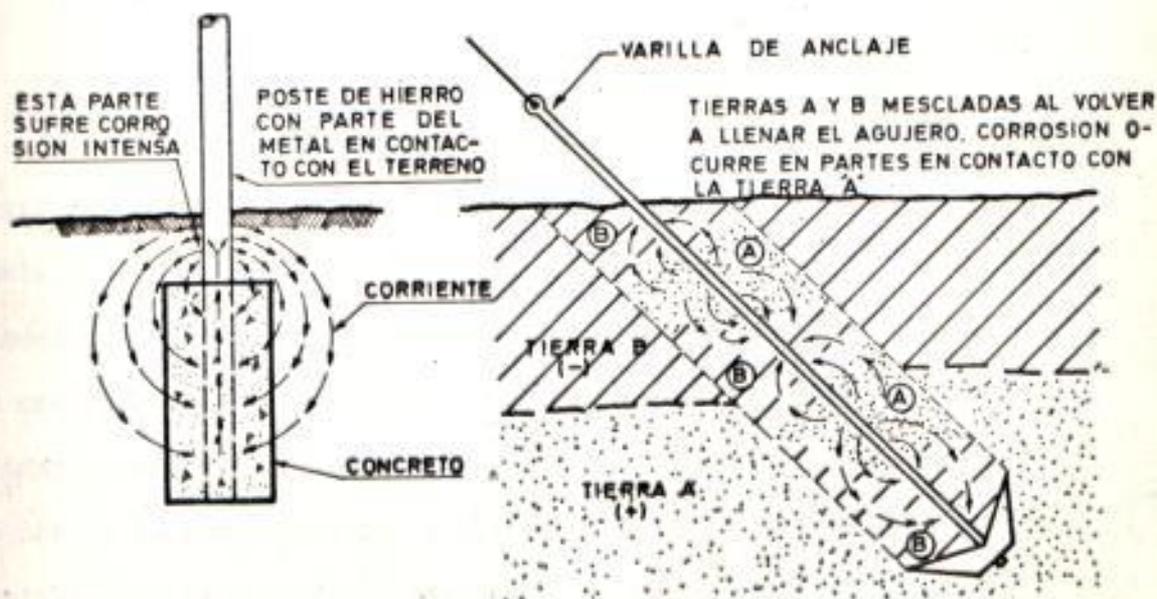
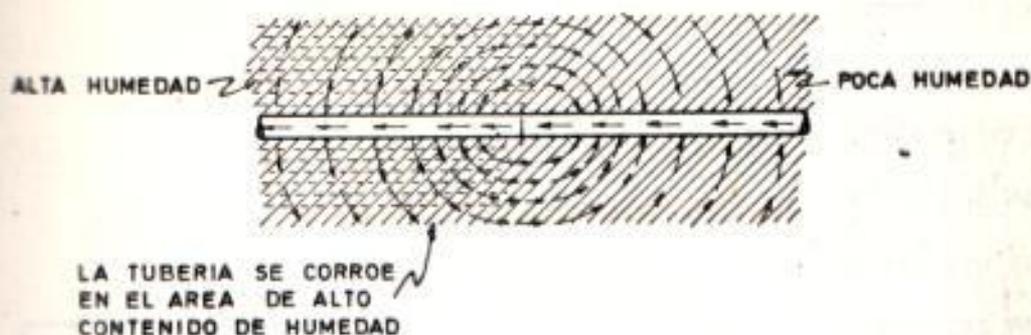


fig 11

CORROSION CAUSADA POR DIFERENCIA EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL TERRENO



CORROSION CAUSADA POR DIFERENTE AEREACION DEL SUELO

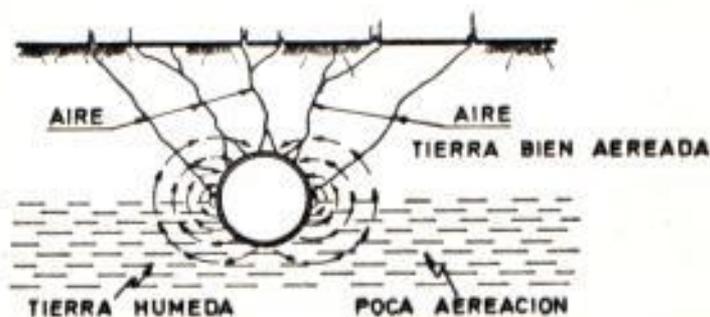
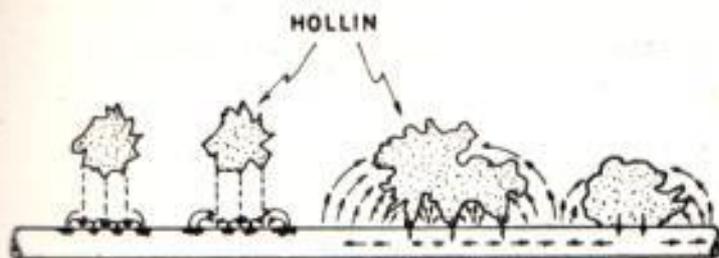


fig 11

Las cenizas u hollín que se encuentren normalmente en la tierra, ocasionan seria corrosión por dos razones: donde el hollín entra en contacto con el metal corrientes eléctricas de considerable magnitud pueden producirse, con direcciones como se indican en la Fig.12, cuando cenizas se mezclan con la tierra sobre una superficie metálica, ácidos provenientes de estas cenizas pueden ser arrastrados hacia abajo por el agua a través de la tierra hasta que estos ácidos entran en contacto con la superficie del metal, lo que resulta en una aceleración de la acción química y por lo tanto de corrosión. Esto también se muestra en la Fig.12



CORROSION CAUSADA POR ACCION GALVANICA DEL
HOLLIN Y ACIDOS PROVENIENTES DEL HOLLIN

fig. 12

la acción de un electrolito líquido, las impurezas pueden tener potenciales diferentes al resto de la estructura; tenemos en nuestras manos una pila galvánica y corrosión. (Fig.13) Si estas impurezas son pequeñas y anódicas tendremos rápida corrosión con la formación de orificios en la estructura metálica.

Las pilas galvánicas también pueden ser causadas por grasas, pinturas, ácidos, etc., adheridos a las estructuras metálicas, o por raspaduras ocasionadas en el manejo de las mismas. (fig.14)

La discusión que acabamos de presentar sobre corrosión galvánica nos hace ver que la causa de la misma no es una condición simple y sencilla.

Para hacer las situaciones más difíciles aún, es usual el caso en que dos o más mecanismos de corrosión estén actuando sobre una misma estructura metálica.

1 CORROSION POR IMPUREZA EN LA SUPERFICIE METALICA.



fig. 13

2 CORROSION POR RASPONES Y ROSCAS DESCUBIERTAS

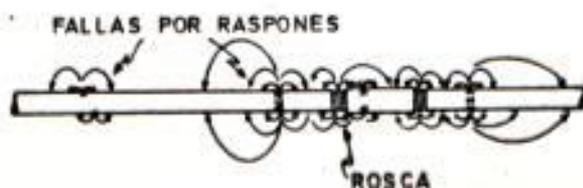


fig 14

Pasemos ahora a considerar los factores que determinan la velocidad de la acción corrosiva galvánica:

A. - Potencial e Intensidad Galvánica: potenciales galvánicos encontrados en corrosión subterránea, los cuales son originados por el acoplamiento de metales diferentes, son usualmente de valores en el orden de 1 voltio o menos. Potenciales galvánicos originados por diferencias físicas y químicas en el electrolito usualmente no exceden 0,5 voltios

Es lógico que mientras más alta la diferencia de potencial, más alta será la corriente que fluya entre los polos, y mayor por lo tanto, la corrosión.

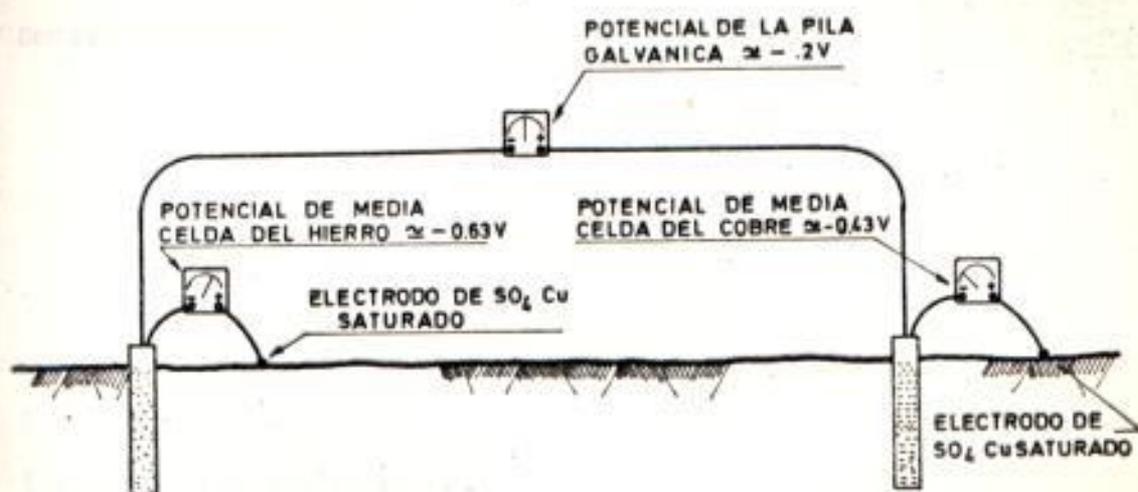


fig. 15

En la Fig. 15 se muestra una situación típica de medición de potencial y de corriente galvánica entre dos metales diferentes en presencia de un electrolito. La figura 16 nos muestra la batería galvánica formada entre una estructura de acero y otra de cobre.

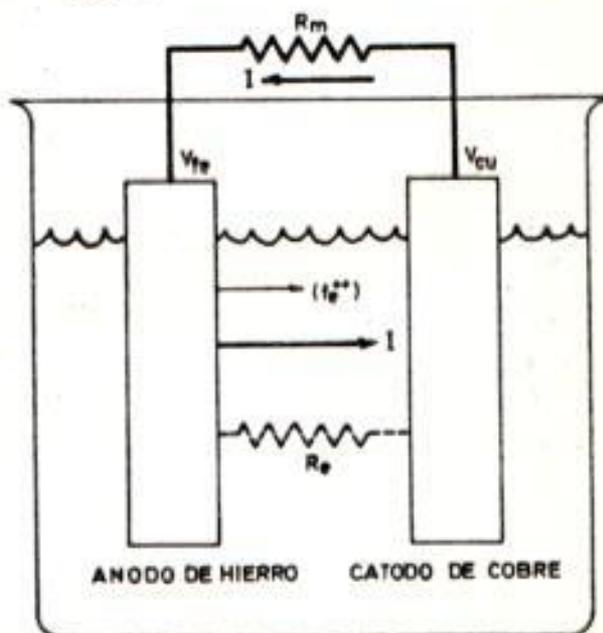


fig.16

La cantidad de corrosión en esta batería es directamente proporcional a la corriente, nos dice Faraday. Por otro lado, de acuerdo a Ohm es directamente proporcional al potencial e inversamente proporcional a la resistencia del circuito.

$$I = \frac{V_{fe} - V_{cu}}{R_m + R_e} \quad (1)$$

En donde:

I = corriente galvánica

V_{fe} = voltaje galvánico del hierro

V_{cu} = voltaje galvánico del cobre

R_m = resistencia del circuito de retorno

R_e = resistencia del electrolito

A esta fórmula hay que añadir las consideraciones del efecto de polarización. A. Wesley y Uhlig¹ han desarrollado otro tipo de formulaciones más exactas tomando en cuenta los efectos de la polarización.

La siguiente adaptación de la ley de Faraday nos da la cantidad de metal que se corroe debido al paso de la corriente arriba formulada.

$$P = \frac{M \times I}{e (1,39)} \quad (2)$$

En donde:

P = libras del metal que se corróen por año

M = peso gran-molecular del metal ión

I = amperios de corriente galvánica

e = VALENCIA DEL IÓN METÁLICO

TABLA III

RELACION DE CORROSIÓN DE LOS METALES

(Lbs. por amperio por año)

Oro	47.40
Zinc	23.57
Aluminio	6.48
Magnesio	8.77
Hierro	20.14
Plomo	74.80
Grafito	2.2
Níquel	21.15
Tin	42.80
Cobre	22.92
Plata	77.78
Platino	35.19

La tabla III nos da valores típicos de cantidad de metal corroído por año para diferentes elementos e intensidad constante.

B.- Polarización anódica o catódica: Polarización

es un término general usado para agrupar los diversos facto-

res que influyen el potencial de la pila galvánica con el paso de la corriente, reduciendo la intensidad de la corrosión. Polarización puede incluir factores como: concentración de iones en los electrodos, cambios de resistencia resultantes de procesos electrolíticos, y ciertos efectos en los electrodos que dependen de la naturaleza y composición de los mismos.

La polarización ocurre en varios grados, tanto en el ánodo como en el cátodo, pero usualmente es más pronunciada en el cátodo. Cuando la polarización del cátodo es más importante en un proceso galvánico se dice que el mismo es cátodo-controlado. Cuando la polarización del ánodo es predominante se dice que la corrosión es ánodo-controlada.

La polarización puede ser considerada como una disminución del potencial galvánico en una batería electrolítica, como resultado de la misma intensidad que circula en la pila. La Fig.17 nos presenta este fenómeno.

El potencial inicial de esta pila es la diferencia de los potenciales galvánicos de los dos metales diferentes (V_{dpo}). La corriente fluye del cuerpo más anódico y lo deteriora. En cuanto se cierra el circuito los potenciales de circuito abierto disminuirán con el tiempo hasta alcanzar los valores V_a y V_c . Este cambio se debe a la polarización causada por la acumulación de productos de reacción en los metales, hidrógeno en el cátodo, por ejemplo. El

potencial de polarización V_{dp} reduce a su vez a la corriente de polarización haciendo este efecto menor. Realmente se podría alcanzar una situación de "descanso" cuando $V_c = V_a$ y su diferencia sea cero.

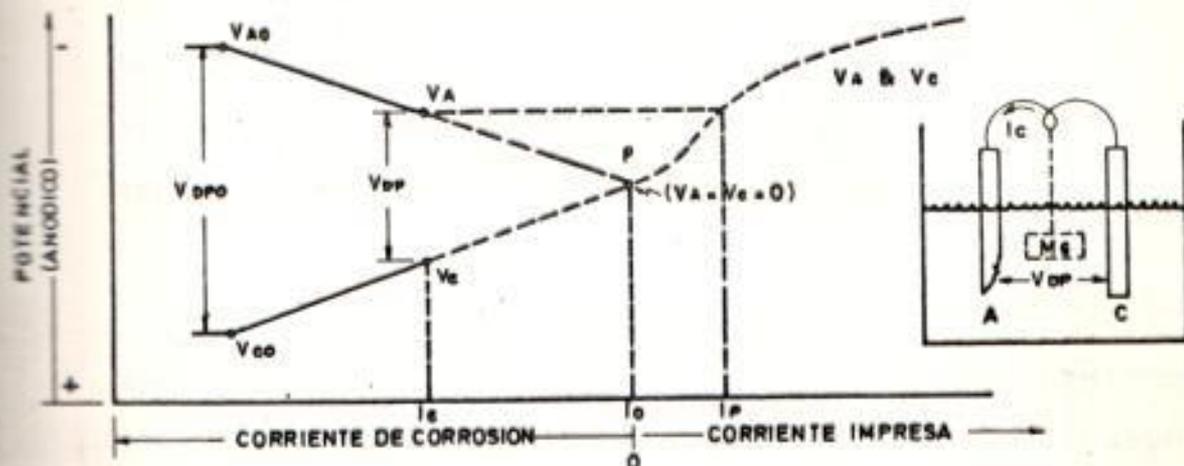


fig.17

En el ánodo, donde la corriente fluye hacia el electrolito, las partículas del metal pueden ir a la solución y combinarse con químicos en el electrolito resultando de todo este proceso un cambio químico de este último. Este cambio químico ocasiona un cambio en el potencial del ánodo. Usualmente este cambio es de tal naturaleza que torna al potencial del ánodo menos negativo, reduciendo la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo.

Si los cambios químicos en el electrolito en la vecindad del ánodo forman una sal o químico insoluble que se deposita sobre la

superficie del área anódica no solamente se reduce la diferencia de potencial del metal al electrolito, sino que la capa, al tener una gran resistencia disminuye aún más la intensidad de la corriente galvánica.

La cantidad de oxígeno que le llegue a la superficie anódica, sales químicas contenidas en el electrolito, tipo de metal y otros factores tienen influencia en los cambios químicos y en los depósitos en el ánodo.

En el área catódica, la corriente fluye del electrolito a las áreas catódicas del metal causando cambios químicos en el electrolito adyacente al metal, los cuales alteran el potencial del cátodo con respecto al electrolito, haciéndolo más negativo. Esto resulta en una diferencia menor de potencial entre el ánodo y cátodo. Si este cambio es suficiente, como puede ser el caso si el área del cátodo es pequeña comparada con el área del ánodo, la diferencia de potencial entre las áreas anódicas y catódicas puede virtualmente desaparecer, y por lo tanto, el flujo de corriente galvánica será mínimo. Usualmente las áreas catódicas son mucho mayores que las anódicas y la cantidad de corriente galvánica no es suficiente para que se produzca el cambio arriba descrito.

Si los cambios químicos forman sales insolubles que se depositan en la superficie catódica, una capa o película de alta resistencia se puede formar, la cual reduce lógicamente aún más la cantidad

de corriente que fluye.

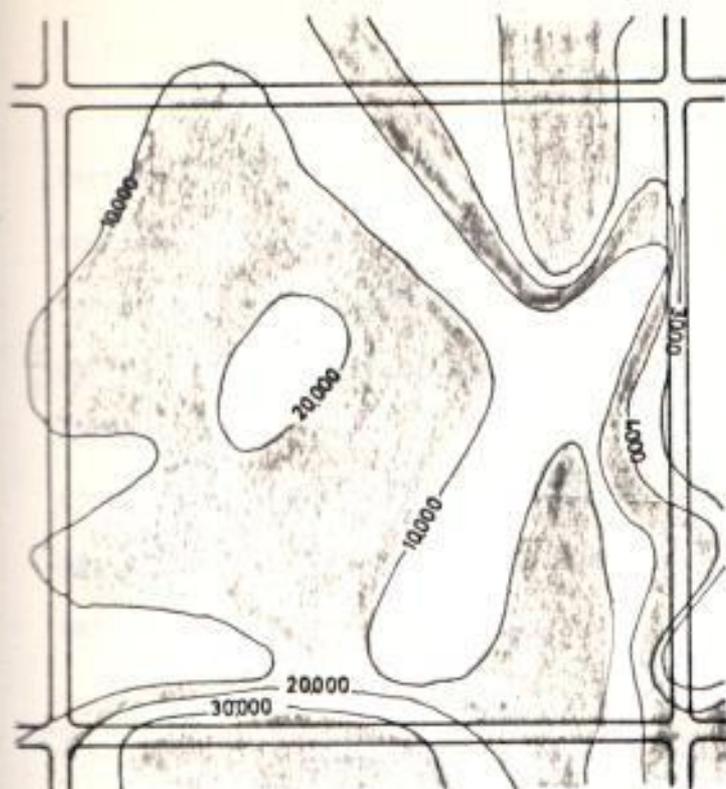
La cantidad de oxígeno disponible en las áreas catódicas es muy importante. El oxígeno contraataca a algunos de los cambios químicos deseables que alteran el potencial metal-electrolito en la dirección conveniente. Polarización por películas de hidrógeno formadas sobre el cátodo es muy importante cuando las áreas anódicas y catódicas son similares en magnitud. Si oxígeno se encuentra en el electrolito en proporciones considerables, entrará en combinación con el hidrógeno despolarizando el electrodo. Si el electrolito es agitado se aumenta su concentración de oxígeno y se eliminan las burbujas de hidrógeno anulando el efecto de polarización.

C.- Resistividad del electrolito: La resistividad del electrolito depende de la temperatura y la concentración de las sales ionizadas presentes y es un factor importante en determinar la magnitud del flujo de corriente corrosiva. La resistividad de aguas y tierras electrolíticas puede variar desde 20 ohm-cm. a más de 100,00 ohm-cm. La corrosión es más acentuada en electrolitos de baja resistividad.

Investigaciones sobre la resistividad del electrolito son esenciales en un estudio de corrosión. Si se trata de la tierra, estos estudios pueden ser hechos con un megger y sus resultados pueden ser transpolados a un gráfico como el mostrado en la Fig. 18

Estos gráficos son de extraordinaria utilidad al ingeniero de corrosión en análisis sobre posibilidades de corrosión y sus remedios.

Cuando el electrolito es un líquido, se puede utilizar el método del "soil box" que veremos más adelante para determinar su resistividad.



CIFRAS EN OHMNIO-CM.

fig 18

A pesar de que la resistividad del electrolito no es siempre el factor más importante a ser considerado en corrosión de metales, una guía general es considerar electrolitos de menos de 1,000 ohmios-cm. como activamente corrosivos; electrolitos con valores de 1,000 a 5,000 ohmios-cm. como corrosivos en varios grados, y electrolitos con valores de 5,000 a 10,000 ohmios-cm. como poco corrosivos. Electrolitos con valores mayores de 10,000 casi nunca dan origen a problemas de corrosión.

D.- Constitución del electrolito: La naturaleza de los productos de corrosión dependen de los tipos de sales que se encuentran en el electrolito. La solubilidad de los productos de corrosión determina si capas o películas protectoras se formen o no en las áreas anódicas y catódicas y por lo tanto es factor determinante en retardar el proceso corrosivo. Si son insolubles, productos que son pobres conductores se depositarán en el ánodo, por ejemplo, y la corrosión será menor. La presencia de oxígeno en el electrolito ejerce gran influencia en el proceso corrosivo. En general, este gas ayuda a acelerar el proceso despolarizando las áreas catódicas, como ya hemos analizado.

E.- Separación geométrica entre el ánodo y el cátodo: es más fácil que la corrosión ocurra en lugares donde las áreas catódicas y anódicas están cercanas, o sea, donde el camino que la corriente tiene que recorrer en el electrolito es corto y su resistencia eléctrica por lógica, sea menor.

F.- Área relativa del ánodo con respecto al cátodo: La cantidad de corrosión es directamente proporcional a la intensidad y es inversamente proporcional al área de descarga. Si la pérdida por corrosión es distribuida uniformemente sobre toda la superficie de un transformador, por ejemplo, esta pérdida será mucho menor que si se limita al fondo del mismo transformador. La relación de penetración en un metal (en pulgadas por año) es aproximadamente inversamente proporcional al área desde donde se origina la corriente.

te galvánica, asumiendo que la magnitud de dicha corriente se mantiene constante. Esta es otra forma de decir que la relación de corrosión varía directamente con la intensidad de la corriente. Relaciones teóricas de corrosión están dadas en la tabla IV.

TABLA IV

<u>Metal Anódico</u>	<u>Densidad Lbs. por in³</u>	<u>Penetración en Pulgadas por año causada por la descarga de 1 ma por in²</u>
Magnesio	0,063	0,139
Zinc	0,258	0,091
Aluminio	0,098	0,065
Acero Dulce	0,284	0,071
Plomo	0,409	0,182
Cobre	0,323	0,142

Se deduce de lo arriba expresado, que si metales diferentes tienen que usarse en un trabajo, buen diseño nos aconseja acoplar un área anódica grande con una catódica pequeña. Otro factor que hay que considerar es que cuando

el cátodo es mayor que el ánodo habrá muy poca polarización en el primero y la corriente tiende a mantenerse en su alto valor inicial. Pero, si la situación es lo contrario, el cátodo se polariza intensamente disminuyendo la corrosión.

En el uso de películas o capas protectoras o aislantes que se aplican para prevenir la acción galvánica originada por la formación de una pila al acoplar dos metales diferentes en un electrolito-

to, es usualmente preferible cubrir el cátodo y no el ánodo. Capas aplicadas deficientemente sobre el ánodo pueden dar origen a corrosión intensa en puntos del área anódica que han quedado expuestas al electrolito por fallas en el protector.

V.- CORROSION POR CORRIENTE ALTERNA

Para terminar no podemos dejar de considerar la corrosión por corriente alterna (electrolisis A.C.) Este fenómeno ocurre cuando corriente alterna se induce en un conductor desnudo neutro de los sistemas subterráneos de distribución. Esta corriente inducida es rectificada por los óxidos del metal en la superficie. Esto puede ocurrir cuando un conductor de cobre desnudo se encuentra instalado en el mismo ducto o en un ducto paralelo a una línea de alto voltaje en largas distancias. Veremos un ejemplo de corrosión por corriente alterna cuando analicemos la situación de los cables de aluminio usados en el sistema subterráneo de la Empresa Eléctrica.

Hasta el momento hemos hablado exclusivamente sobre los fundamentos teóricos del fenómeno corrosivo. Dedicemos ahora, las siguientes páginas de esta introducción a analizar los distintos medios con que contamos para combatir la corrosión.

I.- DRENAJE DE ELECTROLISIS

Drenaje de electrolisis es usado extensivamente para la mitigación de electrolisis por corrientes parásitas en cables e instalaciones subterráneas. El drenaje consiste esencialmente en proveer una conexión entre la camisa de plomo ^{o estructura metálica protegida} y la barra negativa o el retorno del sistema de transporte. El objeto es proveer un retorno metálico para las corrientes parásitas recogidas por el cable y bajar así el potencial de la camisa de plomo a un valor inferior del potencial del electrolito vecino. En las áreas normalmente positivas donde los cables son así mantenidos a un potencial negativo estos también están protegidos por acción catódica contra corrosión del tipo galvánico.

Debido a la interconexión que normalmente existe entre las alimentadoras, los cables de secundario, el sistema de neutro y la tubería de agua potable, el drenaje de un cable de poder presenta más dificultades que las que se encuentran en el drenaje de cables de comunicación u otros cables que no están conectados a un sistema de distribución. Además las camisas de plomo están conectadas indirecta pero efectivamente al cobre de los cables secundarios a través de la bobina de baja de los transformadores del sistema, los cuales tienen una resistencia D.C. en el orden

de 0,0001 ohmio para los tamaños grandes; esto reduce en mucho la efectividad del drenaje de la camisa.

En la situación normal se estima que sólo del 10 al 20% de la intensidad de drenaje es efectiva en reducir el potencial de la camisa de plomo. Cuando se requiere una protección especial para los cables de alta tensión, frecuentemente se hace necesario desconectar la unión entre la camisa de plomo y el sistema de bajo voltaje.

En muchos casos el potencial de la barra negativa del tranvía puede cambiar de polaridad con respecto al sistema de cables, y, cuando el potencial de la barra es positivo, corriente fluirá hacia el sistema a través de las conexiones de drenaje. En estos casos, un switch automático consistente en un relay polarizado y un contactor son instalados en el cable drenado para prevenir el cambio de dirección de la corriente. Una innovación reciente consiste en instalar un rectificador de selenio en el circuito de drenaje para que actúe como válvula. En ciertos casos puede ser necesario contrarrestar la resistencia del selenio a la corriente de drenaje introduciendo un pequeño "booster" de voltaje A.C. en el orden de 2 voltios en el circuito de drenaje.

La figura 19 nos muestra una situación encontrada en la cercanía de una subestación de D.C. para un sistema de tranvía en donde no se han tomado medidas de drenaje. Bajo estas condiciones como ya hemos explicado, la corriente abandona las rieles en puntos distantes de la estación, fluye a través de la tierra a una estructura metálica soterrada que se en-

cuentre adyacente, sigue a lo largo de esta estructura a un lugar cercano a la subestación en donde es descargada a tierra para por los rieles regresar a la subestación, a la barra negativa. El área llamada "área positiva" es aquella en la cual la corriente deja la estructura y es aquí en que corrosión ocurre. En el caso en que esta situación se pretende resolver con drenaje directo, cables de drenaje de cobre son conectados de la estructura a protegerse a la barra negativa de la subestación en un intento de cambiar la dirección del flujo de la corriente entre la subestructura y los rieles en el "área positiva". Esto se muestra en la Fig.20

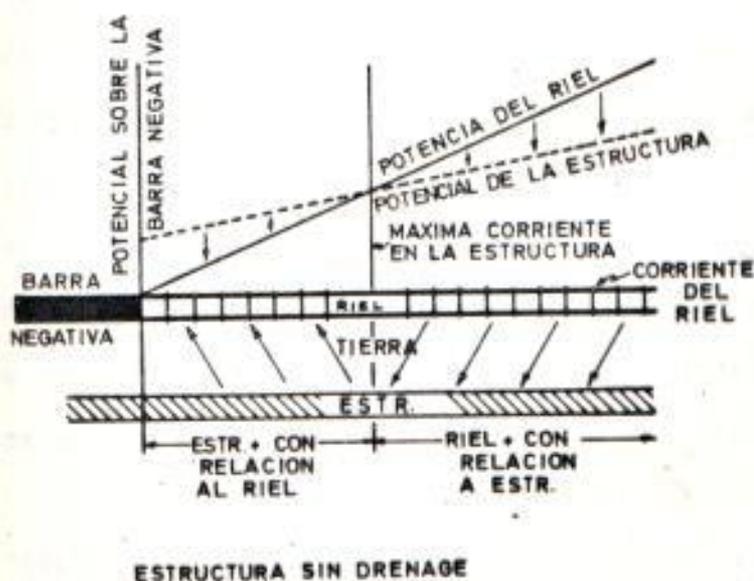
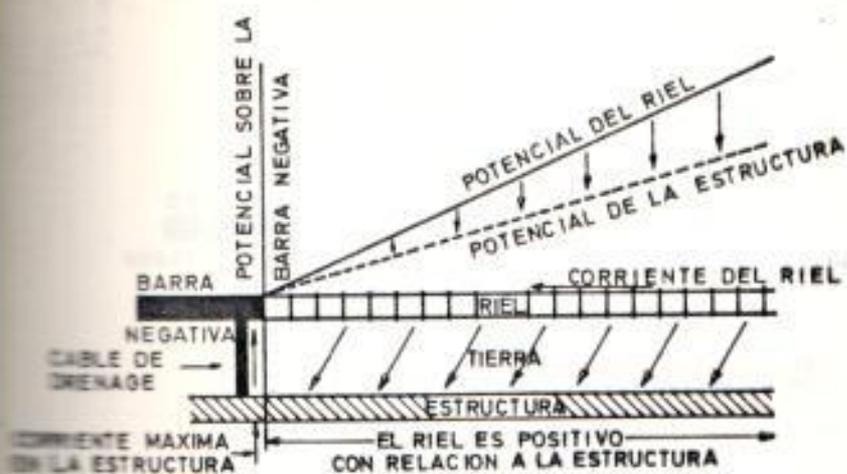


fig.19

Sin embargo siempre deberá existir una caída de potencial a través de esta conexión de manera que a no ser que el cobre adecuado sea usado, el potencial del punto de conexión a la subestructura



SISTEMA DE DRENAJE DIRECTO

fig. 20

alta, esta condición es aceptable. En el caso de estaciones grandes, una cantidad considerable de cobre puede ser necesario para hacer que el potencial de la subestructura sea menor que el potencial de la vía y se provea de esta forma completa protección. Inclusive cuando esta condición es establecida, puede resultar difícil eliminar el efecto de potenciales desiguales entre varias estructuras soterradas que se encuentren próximas la una de la otra. Es también difícil establecer potenciales adecuados entre subestructuras y rieles en donde la disposición no es simétrica y estas no corren paralelas.

El "Sistema Negativo Extendido" que se muestra en la figura 21 consiste de un número de cables negativos de retorno paralelo al riel y derivándose de él en puntos predeterminados. Cada retorno también drena una porción de la subestructura paralela en puntos más cercanos a la es-

puede estar ligeramente por encima del de la conexión del riel en la subestación. En algunos casos, particularmente cerca de estaciones donde el suelo tiene una resistividad

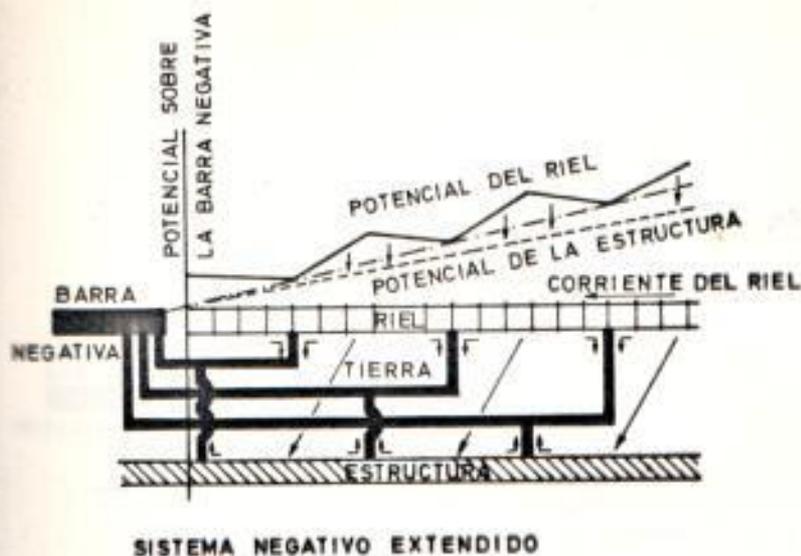


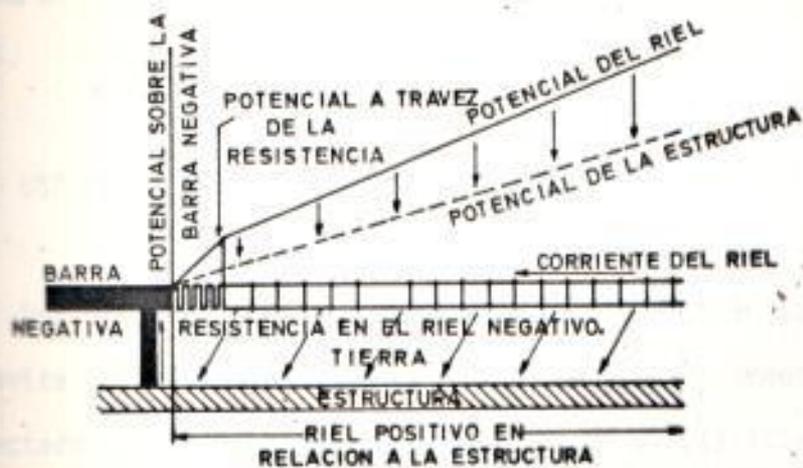
fig. 21

tación que su unión con la riel, proporcionando así una caída de voltaje preferencial a una sección de la subestructura. El sistema que estamos describiendo tiene la ventaja de proveer drenaje en varios pun-

tos, logrando con esto mantener la cantidad de corriente que fluye en la subestructura en cualquier lugar particular, a un mínimo. Las desventajas residen en su alto costo y en las dificultades de simetría por la disposición en el terreno de rieles y las estructuras soterradas a proteger.

Como resultado de la revisión de los dos sistemas descritos, un tercero que emplea una resistencia negativa entre el riel y la barra negativa fue considerado y ha sido gradualmente usado con mayor importancia.

Este sistema conocido como "Resistencia Negativa" o "Resistencia de Riel" es en realidad una modificación o extensión del Sistema de Drenaje Directo. La figura 22 muestra que la resistencia negativa aumenta el potencial de la riel sobre el potencial de tierra y asegura un flujo de corriente hacia las estructuras. La resistencia empleada usualmente propor-



METODO DE LA RESISTENCIA DEL RIEL

fig. 22

Topografía del área de la subestación, trazado de las calles, etc., influyen mucho en el número y disposición de los cables de drenaje empleados en el sistema. Muchas veces sólo es necesario conectar la estructura metálica en un punto en la vecindad inmediata a la subestación; pero, en algunos casos, puntos adicionales de drenaje han tenido que ser colocados. Generalmente hablando, la aplicación de este método eleva el potencial del riel y del terreno circundante a un valor tal que hace que todas las estructuras estén recibiendo corriente en las áreas de la subestación, haciendo innecesario el uso de otras conexiones excepto para igualar potenciales en puntos en que el riel y la estructura soterrada se encuentren muy próximas. Este sistema, tiene como resultado además "forzar"

ciona una caída de un voltio por 1.000 amperios. El método de la "Resistencia del Riel" tiene la ventaja de su bajo costo y proporciona por lo general, un margen mayor de protección positiva en la vecindad de la subestación.

una cierta cantidad de corriente adicional a regresar a través de las estructuras soterradas protegidas. En ningún caso, sin embargo ésta ha sido de un valor suficientemente alto como para causar problemas de corrosión.

III.- USO DE METALES SIMILARES

Una disminución apreciable en corrosión galvánica puede lograrse si se evita en todo lo posible el uso de metales diferentes eléctricamente conectados, especialmente en presencia de electrolitos altamente corrosivos. Tuberías galvanizadas, transformadores y otros equipos de acero conectados al sistema de neutro desnudo de una bóveda; las bases galvanizadas de una torre de transmisión conectadas a barras de tierra, etc.; son situaciones en las que intensa corrosión es usual si no se toman medidas preventivas.

Algunos usos de metales diferentes son muy difíciles de evitar, y frecuentemente resulta práctico y económico a la larga usar estos metales diferentes pero aislándolos eléctricamente el uno del otro y aplicándoles capas protectoras de pinturas anticorrosivas. Sin embargo, en donde el área del metal catódico es pequeña en comparación con el área del metal anódico, el uso de metales diferentes puede no ser un problema, inclusive en presencia de electrolitos corrosivos, porque polarización completa, del área catódica puede cambiar su potencial e igualarle al del área anódica y cubrir el área catódica de compuestos o películas aislantes de alta resistencia que reducen casi a cero la corriente galvánica. Además, la pequeña intensidad que aún pueda existir es emi-

tida de una superficie tan grande que la corrosión que produce no es de importancia ni de peligro.

Donde el área anódica es pequeña en comparación con el área del cátodo, rápida corrosión del ánodo puede resultar porque algunos metales anódicos no se polarizan fácilmente y una alta densidad de corriente galvánica puede continuar fluyendo de la pequeña área anódica, la pequeña intensidad que circula no puede polarizar la mayor área catódica y el resultado es un desgaste a corto plazo del ánodo por corrosión.

III.- AUMENTO DE LA RESISTENCIA DEL CIRCUITO GALVANICO

Una considerable reducción en la intensidad de la corrosión se obtiene mediante la instalación estratégica de acoplamientos, uniones, coronas, etc., aisladas eléctricamente, en donde es factible hacerlo. No solamente es deseable aislar uniones entre metales diferentes, sino, también hacerlo entre partes del mismo metal cuando éste atraviesa electrolitos de diferentes propiedades físicas y químicas. Podemos aumentar la resistencia de la conexión de retorno de la pila galvánica en un afán de reducir la corrosión. Esta conexión es normalmente un circuito metálico que conecta los dos metales diferentes. En la Fig.16 si pudiéramos aumentar el valor de R_m reduciríamos el proceso corrosivo. Esto nos sugiere separar físicamente los metales lo más posible para aumentar la resistencia que los une.

IV.- USO DE CAPAS Y PINTURAS ANTICORROSIVAS .

Capas protectoras aplicadas sobre las superficies metálicas que forman la pila galvánica constituyen otro método de reducir corrosión. Considerando los muchos factores que contribuyen a que se presente corrosión, muchos de los cuales son imposibles de predecir o prevenir durante construcción, la aplicación de capas de pinturas anticorrosivas parece ser un medio económico y práctico de combatir o prepararse a combatir corrosión. Sin embargo, hay que tener mucho cuidado al aplicar pinturas anticorrosivas.

Si aplicamos esta protección a un área anódica, siempre tendremos algún defecto en la pintura o luego al instalar la estructura se producirán rayones, fallas, etc. Al establecerse estas condiciones, la pila galvánica está formada por un área anódica muy reducida (el sector en que se presenta una falla en la protección). La intensidad estará altamente concentrada sobre un área reducida y la penetración de la corrosión será mucho mayor que si no hubiéramos aplicado la pintura anticorrosiva. Si la protección es aplicada al área catódica, las fallas que pueden existir no tienen importancia mayor porque la descarga de corriente está siendo dirigida a un área catódica reducida, desde un área anódica mucho mayor. La corrosión no se ha detenido, pero la hemos disminuido en mucho.

En caso de que se proceda a proteger también las estructuras anódicas, es muy importante la limpieza, preparación y tratamiento que se

le deba dar a la superficie. Es importante también una cuidadosa selección de las pinturas o lacas a usarse como base y del tipo adecuado de pintura anticorrosiva de acuerdo con las condiciones en que la estructura va a trabajar y el medio ambiente en el que será instalada. El grosor de la capa protectora es obviamente importante así como su poder de adhesión.

V.- PROTECCION CATODICA

Por último, protección catódica es en un gran porcentaje el método primordial usado para evitar el problema de corrosión, aunque siempre acompañado con otro medio secundario de protección. Protección catódica es pues de mucha importancia en el estudio de soluciones al proceso corrosivo y por lo tanto dediquemos unos párrafos a explicar brevemente sus fundamentos y algunos de los métodos de aplicación.

A. ¿Qué Es La Protección Catódica?

Si uno puede lograr que una estructura metálica recoja corriente en cada uno de los puntos que tenga sumergidos en un medio electrolítico, uno puede evitar la llamada corrosión galvánica. Este es el principio en que se basa la protección catódica.

Básicamente, la protección catódica es el suministro de una corriente eléctrica artificial que se opone a la corriente galvá-

nica natural y por lo tanto anula o contrarresta sus efectos dañinos.

En la práctica, la corriente artificial impresa se mantiene con un valor ligeramente superior al de la corriente galvánica. El efecto obtenido es el cambio de la estructura bajo protección de un estado anódico a un estado catódico. Esto explica el por qué del nombre "Protección Catódica"

Existen dos métodos corrientemente usados para proveer la corriente artificial que se requiere para la protección catódica de superficies enterradas o en contacto con electrolitos que ocasionan corrosión. (Fig.23)

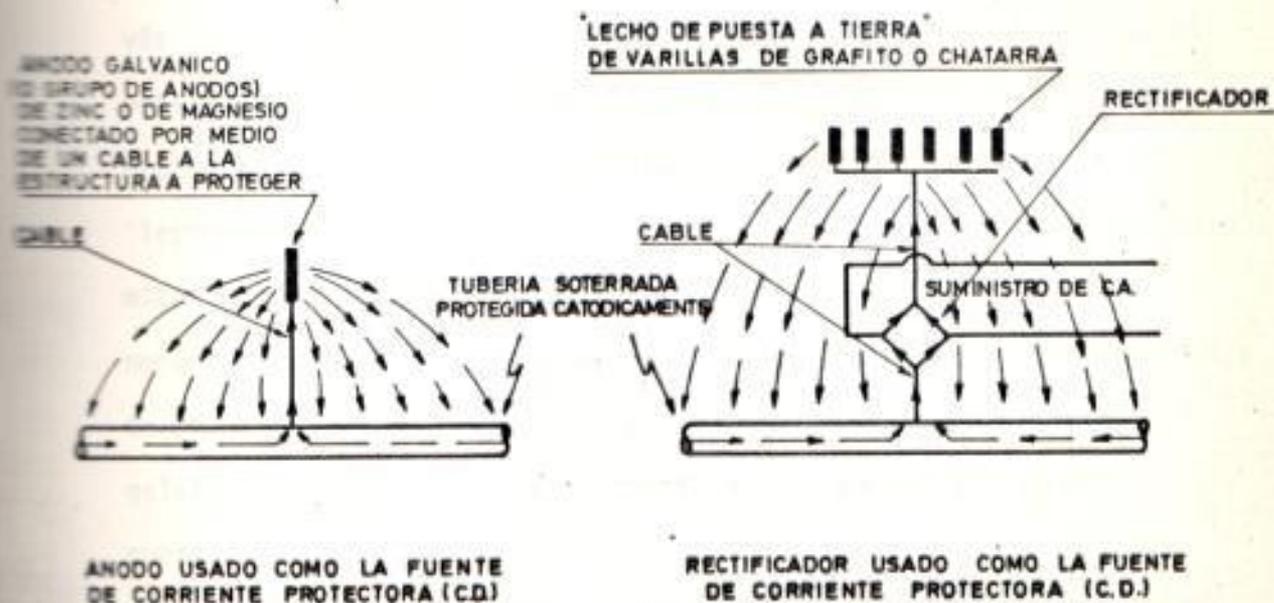


fig. 23

El primer método consiste en establecer un ánodo galvánico mediante un metal como zinc, magnesio y aluminio, con un potencial lo suficientemente alto y de una capacidad de emitir corriente lo suficientemente alta como para neutralizar todos los ánodos que se formen en el metal a protegerse. El segundo método consiste en forzar una corriente directa de una fuente externa (batería, rectificador o generador) a que fluya a través del electrolito al metal para obtener el mismo resultado que con los ánodos de sacrificio. En resumen, al aplicar protección catódica, el objeto es imprimir una corriente directa que fluya a través del electrolito a toda la superficie del metal que se va a proteger, eliminando así las áreas anódicas de este metal y convirtiendo toda la estructura en un cátodo.

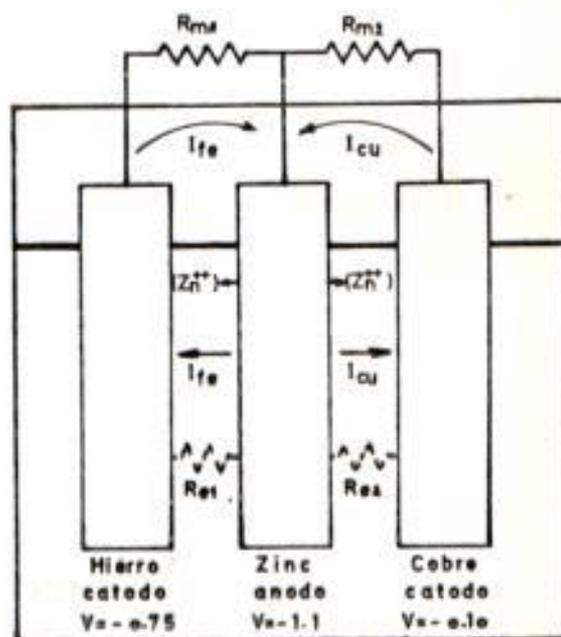
Como se explicó anteriormente cuando una corriente fluye a través de un electrolito a un metal, cambios químicos ocasionan que el potencial del metal se torne más negativo. Esto ocurre al aplicar protección catódica. La corriente de protección que fluye de los "lechos de puesta a tierra" a las áreas catódicas y los cambios químicos resultantes en dichas áreas, hacen el potencial del cátodo más negativo, con el resultado que hay, entonces, una menor diferencia de potencial entre las áreas anódicas y catódicas, y la intensidad galvánica es reducida. La corriente que fluye de los "lechos de puesta a tierra" también tiende a contrarrestar la intensidad que fluye de las áreas anódicas. Cuando suficiente corriente de protección fluye como para polarizar completamente las áreas catódicas y contrarrestar por completo el flujo de corriente galvánica proce-

dente del ánodo, la corriente de corrosión deja de fluir y el proceso de corrosión ha sido detenido. En la práctica, corriente de protección adicional es forzada a fluir a través del electrolito hacia el metal hasta que la superficie metálica toda colecta corriente y todas las partes que antes fueron anódicas se tornan cátodos y se hayan polarizado.

Después que se alcanza polarización completa, esta situación usualmente se puede mantener y corrosión puede prevenirse de allí en adelante con una intensidad mucho menor de la que se requiere para producir esta polarización. En ciertos electrolitos y bajo ciertas condiciones, la corriente de protección catódica, si es mantenida, tiende a producir una capa mayor de polarización sobre el metal, lo que permite reducir aún más la corriente requerida. Analicemos un poco más a fondo los dos métodos que hemos mencionado.

1º- Protección Catódica Usando Metales Anódicos: Anteriormente hemos visto que cuando dos metales que tienen diferentes potenciales son unidos en la presencia de ambientes corrosivos, el metal más negativo se corroe rápidamente y el otro metal puede resultar protegido de corrosión por la corriente galvánica que se genera. El mismo principio es usado al aplicar protección catódica usando metales anódicos. La pila galvánica de protección catódica mostrada en la Fig.24 es gobernada por el mismo principio que la pila galvánica simple que ya hemos descrito anteriormente en la Fig.16

En la pila ilustrada, un electrodo de zinc es conectado en el circuito con los ánodos de cobre y hierro. Zinc, con un potencial galvánico de -1,1 v. es más anódico que el hierro o el cobre, haciendo al cobre y al hierro catódicos con respecto al electrodo de zinc. Corriente de corrosión abandona el zinc y fluye del electrolito al hierro y al cobre. El zinc se corróe, pero no le ocurre lo mismo ni al hierro ni al cobre.



$$I_{zn} = I_{fe} + I_{cu} \quad (4)$$

$$I_{fe} = \frac{V_{zn} - V_{fe}}{R_{m1} + R_{el}} \quad (3)$$

$$I_{cu} = \frac{V_{zn} - V_{cu}}{R_{m2} + R_{m2}} \quad (5)$$

fig 24

En donde:

I_{fe} = Corriente galvánica del zinc al hierro

I_{cu} = Corriente galvánica del zinc al cobre

I_{zn} = Corriente total que consume al ánodo de sacrificio (electrodo de zinc)

R_{m1}, R_{m2} = Resistencias de los circuitos de retorno

R_{e1}, R_{e2} = Resistencia de los electrolitos

V_{zn}, V_{fe}, V_{cu} = Voltajes galvánicos de cada uno de los metales

Un ánodo comercial de magnesio tiene una "capacidad de almacenamiento útil" de unos 500-600 amperios-hora por libra. Si esto se compara con una batería de automóvil que tiene unos 120 amperios, se puede comprender cuánta energía hay disponible en un ánodo galvánico.

Debido a que los ánodos se desgastan en el método galvánico, se requiere su reemplazo periódico. Por lo tanto se puede decir que este método transfiere los efectos dañinos de la corrosión, de una estructura valiosa a un sustituto disponible; o sea, concentra los efectos dañinos de la corrosión en un punto conocido. Además, no se ocasionan pérdidas de tiempo en la operación del sistema o la industria, para reemplazar estructuras deterioradas. Tampoco se requiere el emplear mucho tiempo de mantenimiento localizando posibles daños en dichas estructuras. Los ánodos se desgastan por sí solos. Es más, la mayor parte de las instalaciones de protección catódica pueden ser

diseñadas para operar durante un cierto número de años sin que los ánodos tengan que ser reemplazados.

Para tratar de alargar la vida del ánodo de sacrificio es conveniente que la resistencia del electrolito y del circuito de retorno sean lo más altas posibles. Por otro lado, si utilizamos el ánodo con el menor voltaje posible, también vamos a alargar su vida al disminuir la intensidad de corrosión. La Fig.25 nos muestra algunos casos de este tipo de protección.

Si los ánodos son instalados en forma adecuada su eficiencia puede ser en el orden del 90%. Esto significa que durante la vida del ánodo, 90% del mismo será consumido en producir la corriente de protección que se requiere y el 10% será consumido en autocorrosión. Un ánodo de zinc, que son los más usados, puede reemplazarse cuando 85% de él se ha consumido.

Los efectos de la resistividad del suelo en la intensidad y en la vida de ánodos de zinc de 30 y 60 lbs., y 60 pulgadas de largo, con potenciales de 0,2 a 0,6 voltios se muestran en la Fig.26. Como un ejemplo, suponga que un ánodo es instalado en un suelo de 2000 ohmios-cm. y que es conectado a una estructura con un potencial de -0.7 voltios con referencia a un electrodo de sulfato de cobre, el potencial de la pila establecida será de -1.1 voltio (-0.7 de la estructura + -0.4 del zinc). Del gráfico esto nos dará una intensidad de 65 miliamperios pa-

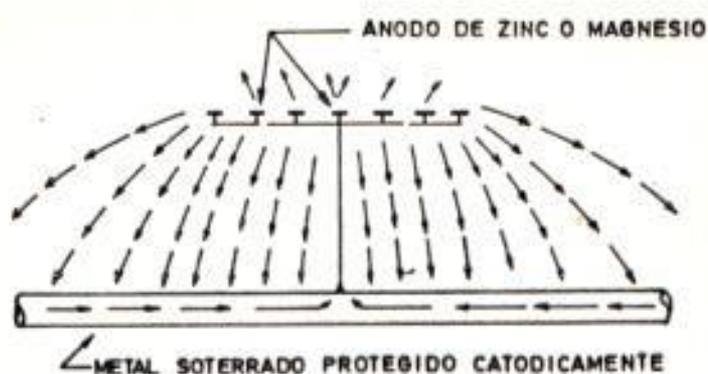


fig. 25

ra ambos ánodos de 30 y 60 lbs. Con esta intensidad el ánodo de 30 lbs. durará 15 años, y el de 60 lbs. 30. La vida de cualquier ánodo será muy corta si el suelo es de baja resistividad y el potencial galvánico de la pila es alto. Hasta un ánodo de

60 lbs. puede ser rápidamente consumido y la necesidad de usar varios ánodos o de aplicar rectificadores se hace imperiosa.

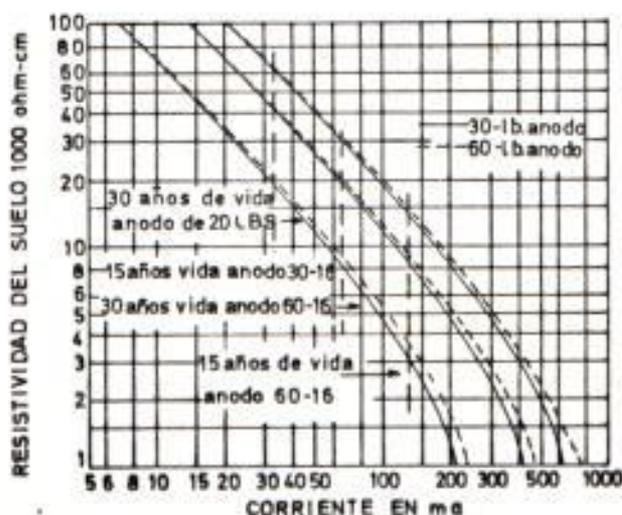


fig. 26

2º- Protección Catódica Usando Fuente Externa: Un gran porcentaje de las instalaciones de protección catódica usan rectificadores, generadores o baterías para suministrar la corriente directa que se requiere. Al aplicar protección catódica usando corriente de una fuente externa, es necesario forzar la intensidad a través del electrolito al metal que vamos a proteger y de allí de regreso a la fuente. La Fig.27 nos muestra una instalación típica de protección catódica.

Una de las principales dificultades en una instalación como la mostrada, es forzar la corriente eléctrica a través de la tierra. El contacto con la tierra se hace enterrando puzos de

chatarra metálica tales como pedazos de rieles o de tuberías; también se utiliza varillas de carbón, grafito, etc. Esto se llama un "lecho de puesta a tierra".

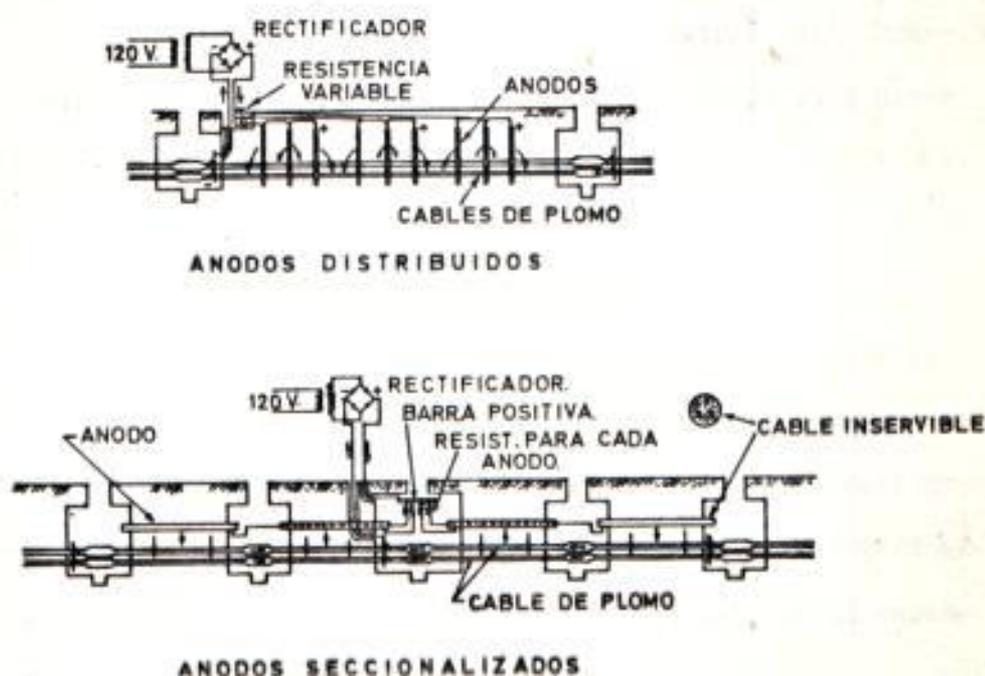


fig. 27

Si la resistividad del terreno es alta, la resistencia entre este "lecho de puesta a tierra" y la tierra también puede serlo, y un voltaje considerable será necesario para forzar una intensidad a circular, lo que resulta en un alto porcentaje de pérdida de potencia.

Un potencial positivo aplicado al ánodo, con el polo negativo del circuito conectado a la estructura que se desea proteger, hace que una corriente eléctrica circule a través de

la tierra a la estructura a protegerse. Esta intensidad contraataca a cualquier otra que quiera circular de la estructura a la tierra.

La selección del tipo de ánodo que se quiera usar depende del material disponible, la extensión que se le va a dar a la protección, limitaciones de corriente por ánodo y a las características electroquímicas del área en que se opera. Anodos de este tipo son instalados a un nivel de constante humedad y usualmente son rodeados de polvo de coque, para disminuir la resistencia de contacto a tierra y así aumentar la vida del ánodo. La cantidad de corriente que se necesita para proteger completamente una estructura metálica soterrada o sumergida en un electrolito varía en una gran escala pero en general depende de:

- a) Resistencia eléctrica de las capas protectoras o del área de la estructura metálica;
- b) Extensión relativa de las áreas anódicas y catódicas;
- c) Condición del electrolito o del suelo;
- d) Potenciales de media celda del ánodo y el cátodo;
- e) Distribución de la corriente de protección catódica;
- f) Actividad bacteriana; y
- g) Clase de metal de la estructura.

B.- ¿Qué Abarca Una Instalación De Protección Catódica?

La protección catódica solamente es efectiva si se aplica en forma continua suficiente corriente protectora para mantener catódica toda la superficie de la estructura. Cumplir plenamente este requisito es el problema primordial en el diseño de cada sistema de protección catódica.

Existen muchos factores a considerar para obtener un diseño satisfactorio para cada caso en particular. Especialmente en áreas con instalaciones congestionadas, un diseño inadecuado puede reducir la corrosión en una sección deseada, pero puede también aumentarla en una sección adyacente si la corriente protectora no se controla adecuadamente, o si se permiten corrientes parásitas en las estructuras adyacentes. Para preparar diseños satisfactorios y tomar las precauciones necesarias con el fin de evitar cualquier daño posible, se requieren los conocimientos de un ingeniero de corrosión que disponga del equipo adecuado para realizar todas las pruebas necesarias. También se requiere personal entrenado para supervisar a las cuadrillas en las técnicas especiales de instalación de los distintos equipos, inclusive los ánodos.

Los métodos de prueba son muy distintos de aquellos normalmente usados para comprobar equipos eléctricos en instalaciones industriales, aparatos de medidas especiales, de naturaleza altamente sensible, son necesarios para efectuar y evaluar las características de

las corrientes eléctricas corrosivas y sus respectivos voltajes.

Cuando se efectúan estas pruebas, se está trabajando con corrientes galvánicas que tienen potenciales de fracciones de un voltio y con intensidades de corriente de solamente miliamperios. Por ejemplo, en suelos no muy corrosivos se puede obtener la protección completa de una estructura de acero con una densidad de corriente impresa de menos de un miliamperio por pie cuadrado de estructura. En agua de mar se puede necesitar una densidad de más de 10 miliamperios por pie cuadrado de acero. Los valores varían para los distintos metales, llegando a ser hasta del orden de 50 o más miliamperios.

Es importante el diseñar un sistema que provéa exactamente la protección adecuada. Un exceso de protección desgasta los ánodos, puede descascarar las cubiertas y pinturas protectoras, y en un sistema de corriente impresa, también se desperdicia energía eléctrica. El control de la densidad de corriente determina la razón de consumo del ánodo. El ingeniero de corrosión puede calcular la duración específica de los ánodos a determinadas entregas de corriente, de forma que se pueda planificar el reemplazo de los mismos en un tiempo determinado.

C.- Mantenimiento Requerido En Las Instalaciones De Protección Catódica

Si se desea que un sistema de protección catódica sea totalmente efectivo, se requiere planificar la inspección y el mantenimiento del mismo. El interés principal es mantenerlo siempre en operación, sin tiempo fuera de servicio.

No existe ninguna manera en que se pueda apreciar si un sistema de protección catódica está realizando su trabajo en un 100%. Hay que realizar pruebas eléctricas de rutina periódicamente, en puntos clave, para comprobar los potenciales protectores y para hacer ajustes o reemplazos de ánodos según las condiciones lo requieran.

D.- Costo De La Protección Catódica

Todo depende del tamaño y del tipo de la instalación necesaria. Sin embargo, existen ciertas generalidades que se aplican a todos los casos.

La protección catódica de estructuras uniformes y simples, tales como tuberías en áreas no congestionadas, es mucho más barata que la protección de estructuras más complejas. En este último caso se requiere un diseño más cuidadoso del sistema de ánodos para asegurarse que la corriente protectora alcance todas las partes de las superficies que han de ser protegidas. Esto ocasionará mayores

gastos de ingeniería como punto principal, así como mayor cantidad de materiales y mayor costo de instalación.

Los costos de instalación de protección catódica para estructuras metálicas complejas no tienen que ser necesariamente prohibitivos, pero naturalmente siempre hay que buscar una justificación económica. Primero hay que determinar cuánto es lo que la corrosión cuesta anualmente. Este costo debe incluir no solamente los costos de reparación y mantenimiento, sino también los costos de la paralización de equipos, cualquier desperdicio de productos o daños a otras propiedades, y depreciación avanzada debido a la menor duración del equipo. Después hay que calcular los gastos fijos anuales de una instalación de protección catódica y los ahorros esperados anualmente debido a la mitigación de la corrosión. La decisión hay que hacerla balanceando los costos tangibles contra los ahorros, pero no se debe olvidar el introducir en este balance los beneficios intangibles, como el aumento en la dependibilidad del servicio y la mayor seguridad en la operación.

¿Qué sistema de protección se debe escoger? Son, acaso, los sistemas de corrientes impresas con su continuo costo de energía eléctrica más costosos que los de ánodos galvánicos? Esto también hay que decidirlo por análisis de cada caso. Cuando el total de corriente requerida para la protección sea alto, el costo de una instalación con rectificador puede ser bajo. Los ánodos galvánicos generalmente tendrán un costo anual bajo en aplicaciones donde la can-

tidad de corriente requerida en un punto sea pequeña. La decisión entre los dos tipos de fuente de corriente dependerá del costo de la energía eléctrica, de los costos relativos de los materiales, y de los costos locales de instalación.

E.- Limitaciones De La Protección Catódica

Como se habrá podido comprender, el uso de la protección catódica es en combinación con otros ^{medios} ~~metales~~ secundarios de control la mejor opción para obtener un programa adecuado de mitigación de la corrosión. Ninguno de los sistemas por sí solos, resuelve totalmente todos los problemas de corrosión

La corrosión galvánica se puede reducir considerablemente por medio del uso de pinturas y cubiertas protectoras. El uso de materiales aislantes de electricidad, alrededor de tuberías o cables soterrados, interrumpirá las corrientes galvánicas. El uso de juntas aisladas eléctricamente, interrumpirá los circuitos eléctricos cerrados. Muy a menudo, el uso adecuado de materiales, o el cambio en el diseño, eliminará o reducirá la corrosión galvánica.

Además, la protección catódica no es el método principal para controlar la corrosión electrofítica en estructuras soterradas, que resulta de corrientes eléctricas parásitas originadas por equipos industriales, como ya hemos visto. Es más, las corrientes parásitas pueden proveer protección catódica en aquellas áreas en las cuáles dichas corrientes entran en las estructuras metálicas desde el suelo u otro material conductor.

PUESTA A TIERRA Y CORROSION



SECRETARÍA

A pesar de que la práctica de aterrizaje está bien establecida, sus implicaciones no siempre son comprendidas. En los sistemas de potencia, transmisión y distribución, en las plantas industriales y en los sistemas telefónicos, el aterrizaje es parte de un diseño eléctrico coordinado. Pero en otras aplicaciones, como sistema de combustible y protección contra descargas atmosféricas la práctica del aterrizaje no está bien definida y es aplicada en forma deficiente. Hay seis razones para aterrizar estructuras y circuitos eléctricos:

- 1) Para proteger a las personas de electrocución si accidentalmente el individuo proporciona un camino a tierra a la corriente;
- 2) Para igualar potenciales A.C. o D.C. entre componentes de un sistema eléctrico;
- 3) Para disminuir la diferencia de potencial entre tierra y estructuras que pueden acumular carga eléctrica estática;
- 4) Para proporcionar un camino a tierra a corrientes eléctricas producidas por descargas atmosféricas;
- 5) Para proveer una conexión de baja impedancia a través de tierra entre partes de un sistema eléctrico para poder coordinar adecuadamente la operación de dispositivos de protección; y
- 6) Para disminuir interferencia con, o radiación de, sistemas de comunicación.

Las condiciones del terreno deben ser primero examinadas al diseñar un sistema de puesta a tierra, ya que no todos los suelos presentan la misma resistividad y puede darse el caso de que se requiera un sistema extenso de puesta a tierra cuando hablamos de suelos de alta resistividad. Otros suelos tienen valores de resistividad bajos lo que resulta sumamen-

de conveniente para el diseño de puesta a tierra, pero no para la corrosión.

El diseño más común de aterrizaje usa varillas de cobre o Copperweld por tres razones: cobre es altamente resistente a la corrosión; segundo: cobre ha sido asociado con conducción de electricidad por mucho tiempo, por su baja resistividad; tercero: es fácil enterrar las varillas de cobre y más fácil aún las de Copperweld por su dureza y rigidez. Otros metales son igualmente aceptables para aterrizaje, pero corrosión puede afectarlos.

Como la conexión a tierra debe ofrecer baja impedancia a las corrientes de fallas y de descargas atmosféricas, el metal seleccionado debe tener buena conductividad eléctrica.

Pilas galvánicas pueden establecerse, como ya hemos visto, cuando cobre se usa para aterrizaje y estructuras de hierro, acero, plomo, o cualquier otro metal es utilizado en el sistema subterráneo, ejemplos de estas condiciones son innumerables y ya hemos citado algunos. Cuando tratemos específicamente del fenómeno corrosivo en cables de plomo y en los tanques de los transformadores, analizaremos con más detalle la pila galvánica creada.

La práctica de aterrizaje conspira así mismo contra la aplicación de protección catódica al obligar el uso de mayores intensidades que las que se requerirían si el sistema no estuviera conectado a tierra. También a-

realizaremos esta situación con mayores detalles más adelante.

En vista del problema corrosivo creado a estructuras subterráneas por el uso de varillas de puesta a tierra de cobre, investigaciones se realizaron para determinar el uso de varillas de zinc en conjunción con varillas de cobre existentes; también se hicieron investigaciones para determinar el efecto de las varillas de ambos metales en estructuras subterráneas de acero.

La posición del zinc en la serie galvánica lo hace anódico con respecto al acero y al cobre, ésto nos hace pensar en la posibilidad de darle al zinc un doble papel. El metal puede servir como varilla de puesta a tierra y como ánodo de sacrificio al mismo tiempo. Si esto es posible, zinc eliminaría el problema establecido entre el cobre de las varillas y el acero de las estructuras.

Para poder determinar el efecto de usar zinc y cobre como materiales de las varillas de puesta a tierra en el mismo sistema, se llevaron a cabo pruebas en los terrenos de las subestaciones El Guasmo y Los Ceibos y la Central Térmica Estero Salado. Las varillas usadas fueron: varillas galvanizadas de 5/8", varillas Copperweld de 1" y varillas de acero de 3/4". La resistividad del suelo varío de valores medios a valores altos.

Las tablas V y VI muestran valores de corrientes y potenciales obtenidos por la combinación de varillas de zinc, cobre y acero en varios suelos.

TABLA V
CORRIENTE GALVANICA- COMPARACION ENTRE VARILLAS
DE ATERRIZAJE DE COBRE, ZINC Y ACERO

	Resistividad del suelo ohmios-cm.		
	6000	14000	24000
<u>Resistencia a tierra, ohmios</u>			
Varilla de Zinc	20	48	75
" " Cobre	15	44	72
" " Acero	15	45	75
Varillas de Zinc, Cobre y Acero Conectadas	12	24	45
Tres Varillas de Cobre Conectadas	6.7		
<u>Corriente entre las varillas de Zinc y Cobre, m Amp.</u>			
Calculada	10,0	8,4	6,7
Corriente Inicial	13,0	6,8	6,2
" después de 5 minutos	8,7	3,9	5,4
<u>Corriente entre las varillas de Zinc y Acero, m Amp.</u>			
Calculada	10,0	4,3	2,3
Corriente Inicial	13,0	4,1	2,9
" después de 5 minutos	8,3	3,1	1,8
<u>Corriente entre las varillas de Cobre y Acero, m Amp.</u>			
Calculada	0,0	4,7	4,5
Corriente Inicial	0,0	5,1	5,2
" después de 5 minutos	0,0	1,6	4,7
<u>Corriente entre las varillas cuando las tres se conectan entre sí, m Amp.</u>			
Inicial			
Zinc al Cobre	5,5	7,0	6,8
Zinc al Acero	6,3	3,2	2,2
Después de 5 minutos: Zinc al Cobre	4,0	3,1	6,2
Zinc al Acero	4,1	1,5	1,7
<u>Corriente entre una varilla de Zinc y tres de Cobre instaladas a 40 ft., m Amp.</u>			
Calculada	31,7		
Corriente Inicial	22,0		
Corriente después de 5 minutos	5,4		
<u>Corriente entre una varilla de Zinc y otra de Cobre instaladas a 40 ft.</u>			
Calculada	24,1		
Corriente Inicial	17,6		
Corriente después de 5 minutos	5,0		

*Cada grupo de varillas diferentes fue colocado en triángulos igualmente espaciados.
Las distancias entre varillas fueron: 13, 28 y 48 pulgadas respectivamente.

TADLA VI

POTENCIALES DE METAL A TIERRA- COMPARACION ENTRE VARILLAS DE TIERRA DE ZINC, COBRE Y ACERO

	Resistividad del suelo ohmios			
	6000	14000	24000	
<u>Potenciales Metal- a- Tierra (Voltios)</u>				
<u>(Las varillas no conectadas)</u>				
Varilla de Zinc	-1,10	-1,06	-1,05	
" " Cobre	-0,74	-0,27	-0,066	
" " Acero	-0,74	-0,66	-0,72	
Tres varillas de Cobre conectadas entre sf	-0,255	-	-	
<u>Potenciales entre Metales</u>				
Cobre a Zinc	0,35	0,79	0,38	
Cobre a Acero	0,00	0,42	0,66	
Acero a Zinc	0,35	0,40	0,32	
Zinc a tres varillas de Cobre conectadas entre sf	0,845	-	-	
<u>Potencial Metal-a-Tierra (Voltios), 5 minutos</u>				
<u>Después Varilla de Zinc conectada a:</u>				
Varilla de Cobre	Potencial Zin - a - Tierra	-0,35	-0,79	-0,55
	Potencial Cobre - a - Tierra	-0,05	-0,53	-0,36
Varilla de Acero	Potencial Zinc - a - Tierra	-0,36	-0,79	-0,78
	Potencial Acero- a -Tierra	-0,86	-0,71	-0,765
Varillas de Cobre y de Acero	Potencial Zinc - a - Tierra	-0,96	-0,76	-0,60
	Potencial Cobre -a- Tierra	-0,87	-0,66	-0,39
	Potencial Acero -a- Tierra	-0,87	-0,64	-0,545
Tres varillas de Cobre a 40 M.				
Una varilla de Cobre a 40 M.				

En el suelo con 6.000 ohmios-cm. la corriente inicial entre zinc y cobre fue de 13 miliamperios y disminuyó rápidamente; después de 5 minutos la intensidad se encontraba casi estabilizada en 8.7 miliamperios. La corriente elevó el potencial de la varilla de cobre a -0.86 voltios. La relación de cobre a zinc en este caso fue de 1.67 a 1. Cuando la varilla de zinc fue conectada a la de acero, la corriente inicial fue de 13 miliamperios, pero en 5 minutos disminuyó a 8.3 miliamperios. La relación de acero a zinc fue de 1.2 a 1 y el potencial de la varilla de acero -0.86 v.

La corriente combinada que fluye del zinc al cobre y del zinc al acero fue de 11.8 miliamperios; en 5 minutos disminuyó a 8.1 miliamperios (divididos en partes iguales entre las varillas de cobre y acero) el potencial de ambas varillas era -0.87 voltios.

Cuando las tres varillas (en el suelo de 6.000 ohmios-cm. solamente) no fueron conectadas entre sí, el zinc aparentemente tuvo cierta influencia tanto en el cobre como en el acero, posiblemente como resultado de la proximidad entre las varillas (13 pulgadas.) Los potenciales de las varillas de cobre y acero tuvieron un valor igual de -0.74 voltios y fueron más altos de lo anticipado. El potencial de tres varillas de cobre alejadas del sitio de prueba pero en suelos de la misma resistividad fue de -0.255 voltios.

En el suelo de 14,000 ohmios la corriente inicial entre el zinc y el cobre sólo fue de 6.8 miliamperios disminuyendo a 3.9 miliamperios en

5 minutos. Para las varillas de zinc y acero los valores fueron, en las mismas situaciones, 4.1 y 3.1 miliamperios. Cuando las tres varillas fueron conectadas entre sí, el flujo total de corriente fue 7 miliamperios entre el zinc y el cobre y sólo 3.2 miliamperios entre el zinc y el acero. En 5 minutos esta misma relación de corriente se mantuvo pero con 3.1 miliamperios circulando del zinc al cobre y 1.5 miliamperios del zinc al acero.

Cuando las varillas de acero y cobre fueron interconectadas no hubo flujo de corriente en el suelo de 6.000 ohmios-cm. Sin embargo, en los suelos con valores de 14,000 y 24,000 ohmios-cm. la corriente inicial que circuló del acero al cobre fue mayor que la anticipada. En 5 minutos la corriente disminuyó de un valor de 5.1 miliamperios a 1.6 miliamperios en el suelo de 14.000 ohmios-cm. pero en el de 24,000 ohmios-cm. sólo disminuyó de 5.2 a 4.7 miliamperios.

Cuando una varilla de zinc fue conectada a tres de cobre a una distancia aproximada de 40 metros en el suelo de 6.000 ohmios-cm., la corriente inicial entre los dos metales fue de 22 miliamperios. En cinco minutos la corriente disminuyó a 9.4 miliamperios con un potencial de -0.69 voltios. La relación cobre-zinc era de 4.8 a 1 en este caso.

Cuando una varilla de zinc fue conectada a una sola de las 3 varillas a la distancia de 40 metros, la corriente inicial fue de 17.6 miliamperios y disminuyó a 5.8 miliamperios en 5 minutos. El potencial de la sola varilla fue de -0.75 voltios.

En prácticamente todos los casos, las lecturas de voltaje y corriente tomadas a los cinco minutos no se habían estabilizado. Corrientes más bajas y potenciales más altos resultarían si todas las varillas en cada grupo se mantuvieran conectadas y lecturas fueran tomadas a los 10 o 15 minutos.

Una varilla de 5/8" galvanizada de 10 pies de extensión en un suelo de 6.000 ohmios-cm. mostró una resistencia a tierra de 15 ohmios contra 20 ohmios que mostró una varilla de cobre de las mismas dimensiones.

Podemos concluir de estas pruebas que no se perderá eficiencia en el aterrizaje si se substituyen las varillas de cobre por varillas de zinc en el sistema de puesta a tierra. El uso de varillas de acero merecen un mayor estudio y habría que considerar si es que se puede tolerar el enmohecimiento del metal con la consiguiente pérdida de la eficiencia en el aterrizaje. En nuestra prueba la varilla estuvo un mes enterrada y su resistencia a tierra ya era algo más alta que la del cobre.

Los resultados nos indicaron también que la distancia del ánodo al cátodo tiene muy poca influencia en el flujo de corriente. La diferencia de potencia y la resistividad del suelo determinan la magnitud de la corriente. Sin embargo, sólo una pequeña disminución en la intensidad resultó de caídas IR a través del suelo.

Otra conclusión que se obtuvo es que se requiere de 2 a 5 miliamperios de corriente para elevar el potencial de un pie cuadrado de cobre a

-0.85 voltios, voltaje que está establecido como el necesario para proteger al acero. En el suelo de mayor resistividad, la relación de corriente fluyendo al cobre, comparada con la corriente fluyendo al acero fue de 2.7 a 1. Por lo tanto, una considerable corriente de protección catódica será consumida en contrarrestar el potencial del cobre antes de se obtenga protección del acero.

Estas pruebas también indicaron que a medida que la relación cobre a zinc es aumentada, la polarización del cobre (cátodo) es menor y la corriente fluyendo del zinc (ánodo) aumentará. En un sistema de puesta a tierra que utilice varillas de cobre y zinc, el cobre será el cátodo cuando se lo conecte a las estructuras ferrosas del sistema subterráneo. Por lo tanto, la relación cobre-acero será un factor determinante para la corriente de protección de la estructura de acero.

Estas pruebas también nos indican que el cobre se vuelve más noble mientras más tiempo permanece enterrado. El potencial -0.066 voltios obtenido en el suelo de 24,000 ohmios-cm. es probablemente una indicación de buena aereación lo que resulta en la continua formación de una película óxida. Si nuevas estructuras de acero son instaladas en donde viejas estructuras de cobre existen, la diferencia de potencial entre los dos metales es suficiente para causar rápidamente corrosión del acero.

Obviamente la resistividad del suelo es otro factor en la rapidez con que puede presentarse corrosión. A medida que la resistividad del suelo disminuye, la intensidad que fluye del acero anódico al cobre catódico au-

mentará proporcionalmente. Hubo también indicaciones que la polarización del ánodo de acero disminuye en suelos de mayor resistividad. Como polarización del electrodo es un factor de control en corrosión galvánica, el resultado será un ataque más severo en el metal.

Como el cobre es un metal indeseable para los sistemas de puesta a tierra desde el punto de vista de corrosión, ¿por qué no sustituirlo por zinc o magnesio que son metales anódicos? Estos metales se los puede obtener en cualquier tamaño y forma, y la resistividad del suelo será una gafa en cuanto a la duración del ánodo. Además de proporcionar el terrillaje requerido, estos metales complementan el sistema de protección catódica. Por este motivo, comunmente se utilizan ánodos de zinc o magnesio en lugar de simples varillas para diseñar el sistema de puesta a tierra.

Un ánodo normalmente usado consiste de un pequeño núcleo recubierto de zinc. A pesar de que como hemos dicho estos ánodos vienen en todo tamaño, el denominado AZI-4-60 es el más indicado para ser utilizado como varilla de puesta a tierra (AZI por American Zinc Institute, 4 el área de sección en pulgadas cuadradas y 60 el peso en libras.) Todos los ánodos tienen 5 pies de largo. Comparaciones de valores de resistencia a tierra para varillas de cobre y ánodos de zinc están dados en la Fig.28

Anodos de zinc pueden ser usados con éxito en lugar de varillas de tierra. Cuando se los instala en forma correcta, ellos conducen corrientes de falla y de descargas atmosféricas de manera adecuada y pueden tener

menos resistencia a tierra que las varillas convencionales de cobre. Un ánodo de zinc (tipo AZI-2-30) con un conductor N°6 AWG de cobre tiene una capacidad de corriente de 2.500 amperios por 3 segundos y 4.500 amperios por 1 segundo; diseño del aterrizaje limitará los valores de intensidad para cada varilla a cifras inferiores a las mencionadas. Anodos pueden llevar 14.000 amperios por 0.10 segundos y 45.000 amperios por 0.01 segundos; esto cubre intensidades ocasionadas por descargas atmosféricas en forma adecuada. Para comparación, una varilla de cobre de 5/8" con la misma resistencia a tierra que un ánodo de zinc de 1,4" x 60" en relleno preparado, tendrá que tener 9.5 pies de longitud donde el suelo tiene 1.000 ohmios-cm. de resistividad.

La instalación de un ánodo de zinc debe ser hecha en un agujero preparado con un relleno especial y debe ser enterrado lo suficiente como para que siempre esté en contacto con tierra húmeda. El relleno especial que rodea al ánodo (una mezcla 50-60 de bentonita y gypsum hidrado ha sido usada) tiene resistividades relativamente bajas de 250

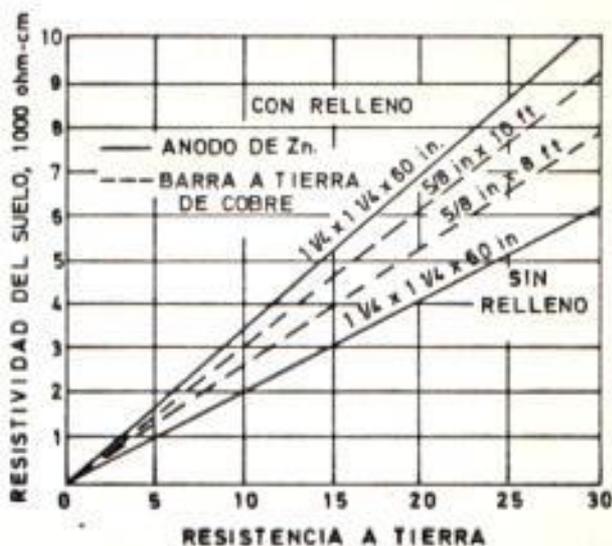


fig. 28

a 300 ohmios-cm., lo cual tiende a reducir la resistencia neta del ánodo de zinc en suelos con resistividades sobre 300 ohmios-cm. Una ventaja adicional es que el relleno especial rodea al zinc con una materia uniforme y homogénea, lo que favorece un consumo uniforme del ánodo.

El relleno es normalmente instalado seco y apisonado concienzudamente para evitar vacfos. Además este relleno especial absorbe humedad del medio y se hincha, asegurando que no hay vacfos entre varilla, relleno y paredes del agujero; si se instala el relleno mojado éste puede encogerse.

Un problema que se puede presentar al usar zinc o magnesio como varillas de puesta a tierra es el tamaño del conductor que conecta el ánodo al sistema. Anodos de estos metales normalmente vienen con conductores N°10 o 12, pero no existe razón para que los fabricantes proporcionen dichos ánodos con el conductor requerido.

**DESCRIPCION DEL SISTEMA ELECTRICO
DE LA CIUDAD DE GUAYAQUIL**

El sistema subterráneo de distribución de la ciudad de Guayaquil tiene un voltaje nominal de 4160 v. de línea a línea, 2400 v. de línea tierra con un conductor neutro conectado sólidamente a tierra en todas las bóvedas subterráneas que posee el sistema y sólidamente conectado al sistema de puesta a tierra de las plantas y subestaciones.

Este sistema subterráneo sirve exclusivamente al sector del centro de la ciudad y consiste en el momento del presente estudio de diez alimentadoras, cuatro alimentadoras que salen de Planta a Diesel, a saber:

<u>Alimentadora</u>	<u>Extensión total</u>	<u>Porcentaje subterráneo</u>
Pedro Carbo	2150 mts.	100%
Pichincha	1050 "	54%
Boyacá	2550 "	100%
Tumichaca	2500 "	15%

Des alimentadoras que salen de la Planta a Vapor, a saber:

<u>Alimentadora</u>	<u>Extensión total</u>	<u>Porcentaje subterráneo</u>
Chinlorazo	3200 mts.	44%
Garaicoa	2800 "	11%

tres alimentadoras que salen de la subestación Boyacá, a saber:

<u>Alimentadora</u>	<u>Extensión total</u>	<u>Porcentaje subterráneo</u>
9 de Octubre	1260 mts.	100%
Bolívar	1500 "	100%
Juan Montalvo	3700 "	57%

Existe además una alimentadora subterránea de una extensión aproximada de 1 Km. que dá servicio exclusivo a la Cervecería. Esta alimentadora se origina en la subestación Bogotá al norte de la ciudad.

Los cables utilizados en estas alimentadoras son del tipo PILCA y del tipo PILCPE, ambos constan de 3 conductores trenzados, cubiertos con aislamiento de papel impregnado en aceite, teniendo una camisa de plomo recubriendo los 3 cables y el papel. El tipo PILCA posee sobre el plomo yute impregnado y encima una armadura de acero. El tipo PILCPE posee una chaqueta de polietileno "extruido" sobre la camisa de plomo

El primero se encuentra directamente enterrado en el sistema de Guayaquil, comprendiendo apenas el 15% del total de cable con camisa de plomo existente. Como además su instalación data desde 1920 a 1950 y poco a poco está siendo retirado del sistema y reemplazado por cable PILCPE instalado en ductos, hemos dejado a un lado la investigación del fenómeno corrosivo en estos cables, limitándonos entonces al estudio de la corrosión experimentada por los cables PILCPE que se encuentran en su totalidad ins-

instalados en ductos de concreto. Los cables PILCPE son unidos mediante empalmes de plomo como el mostrado en la fotografía 1

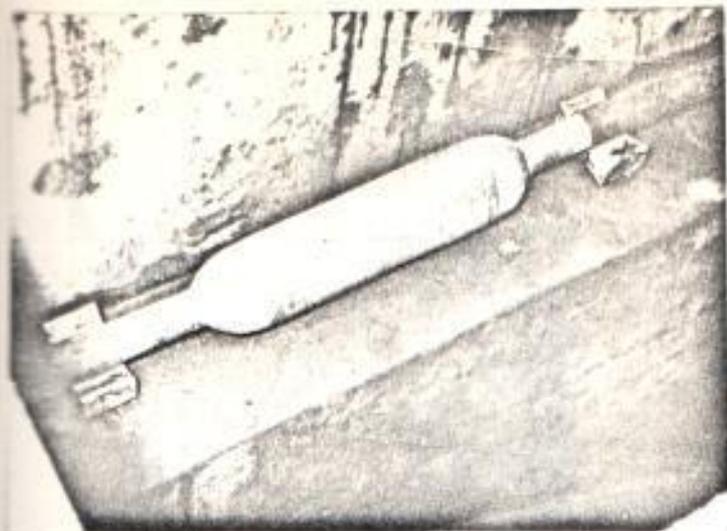
En las fotografías 2 a 10 vemos los equipos normalmente usados en las bóvedas subterráneas del sistema de 4.16 Kv. de Guayaquil. Fotografías 2 y 3 nos muestran interruptores de aceite sumergibles de 3 y 4 vfas de 400 amperios de capacidad. La fotografía 4 nos presenta cortocircuitos de aceite sumergibles de 200 amperios de capacidad. La fotografía 5 nos muestra una caja sumergible de 4 vfas. Las fotografías 6 y 6-A nos presenta un transformador sumergible del tipo CST de la General Electric. La fotografía 7 nos presenta cortocircuitos de aceite convencionales de 200 amperios de capacidad. La fotografía 8 nos muestra un banco de capacitores desconectable controlado por un reloj visible en el centro de la fotografía. La fotografía 9 y la 9-A nos muestran bancos de transformadores del tipo convencional para uso en exteriores pero que han sido instalados en bóvedas subterráneas. La fotografía 10 nos muestra interruptores de aceite de 400 amp. y 300 amp. marca Allis Chalmers y Line Material. En esta fotografía también podemos apreciar cabezotes terminales. En el apéndice, sección I se incluyen descripciones y datos técnicos sobre estos equipos.

Como podemos apreciar en las fotografías indicadas, el sistema subterráneo de la ciudad de Guayaquil está compuesto de una mezcla heterogénea de equipo convencional para uso en exteriores y equipos sumergibles para uso subterráneo. Originalmente el sistema subterráneo estaba formado exclusivamente por el equipo que hemos llamado convencional con excep-

ción de las cajas de 4 vfas que sí son sumergibles. Luego poco a poco se fue introduciendo el uso de los interruptores de 3 y 4 vfas sumergibles y por último, durante el año 1970 se introdujo el uso de los transformadores CST y los juegos de cortacircuitos de aceite sumergibles con el objeto de equipar las bóvedas subterráneas que sufrían inundación total durante la temporada invernal con equipo capaz de soportar completa inmersión por tiempos prolongados.

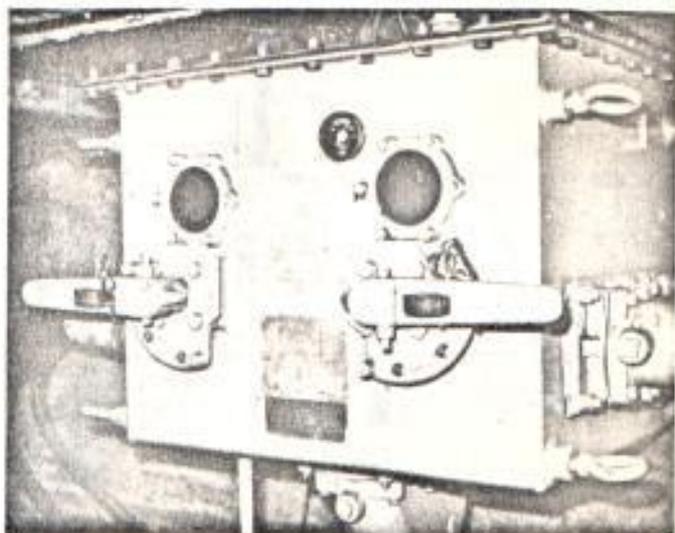
Toda bóveda que contiene interruptores, cortacircuitos y transformadores se haya provista de una bomba de centina automática para evacuar el agua que penetra durante la temporada lluviosa.

Los ramales para alimentar a los diferentes bancos de transformadores constan de conductores unifilares con aislamiento de 5 Kv. de polietileno "CROSSLINKED" en calibres N°6, 4 y 2 AWG. Por último el sistema secundario se compone de cables de cobre con aislamiento de PVC y de polietileno. Se ha venido utilizando conductores desnudos de cobre como neutros, tanto para el primario como para el secundario. El sistema secundario subterráneo también se encuentra circunscrito al centro de Guayaquil. Se utilizan ductos de concreto de 2 y 4 vfas y en los cruces de calles ductos de fibra.

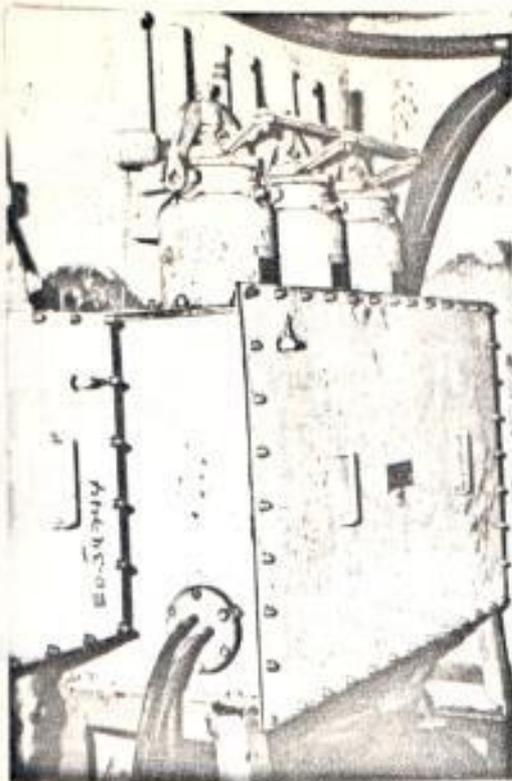


FOTOGRAFIA 1

FOTOGRAFIA 2

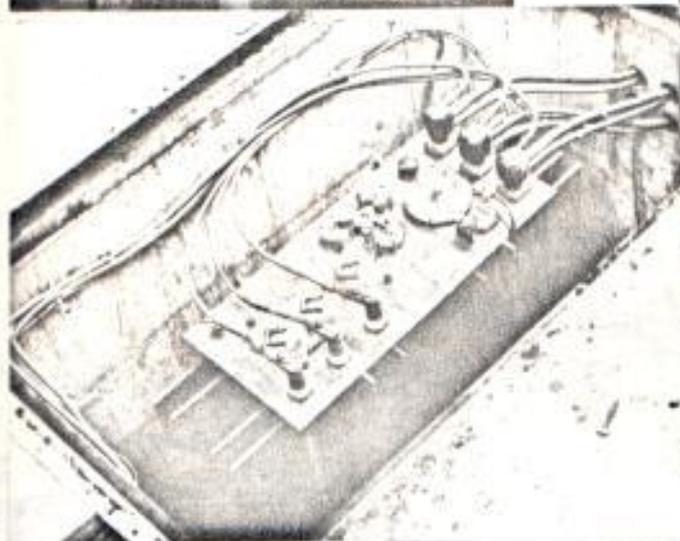
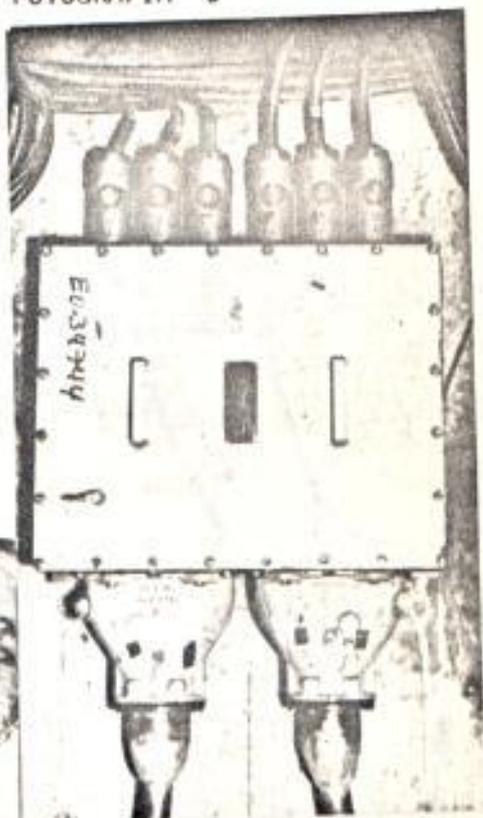


FOTOGRAFIA 3



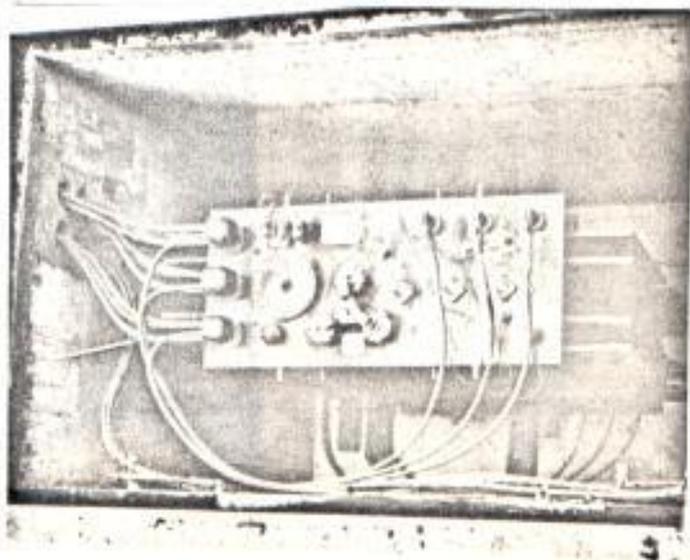
FOTOGRAFIA 4

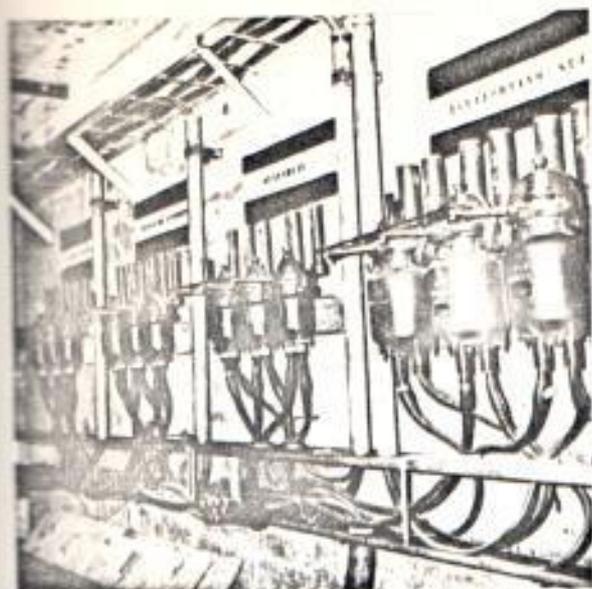
FOTOGRAFIA 5



FOTOGRAFIA 6

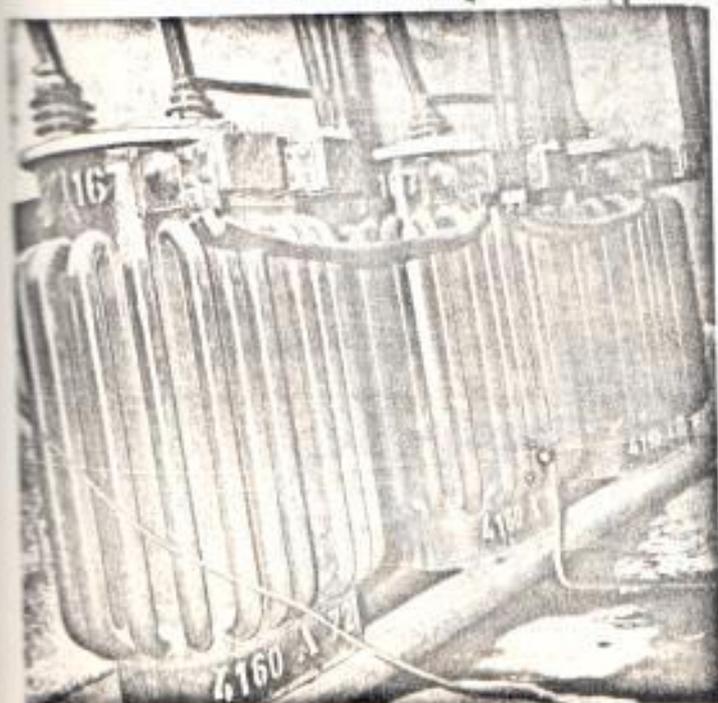
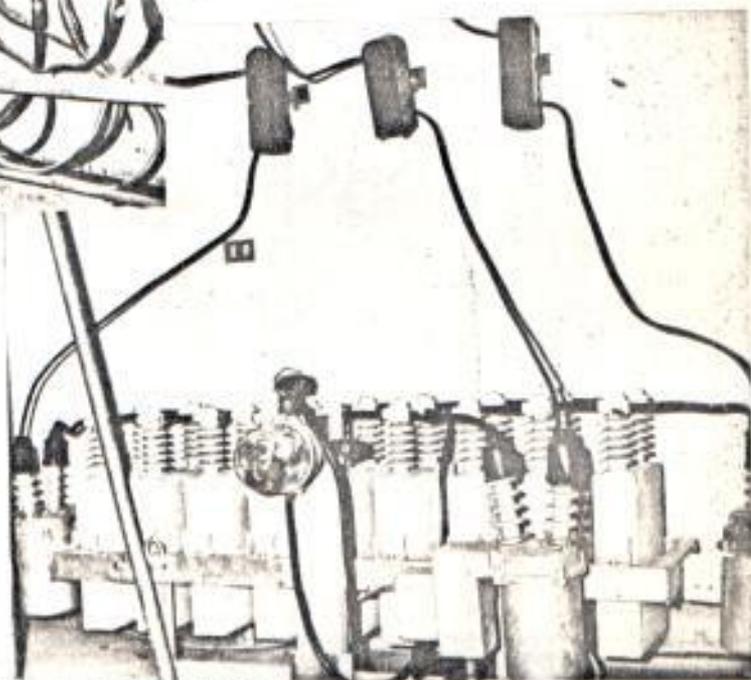
FOTOGRAFIA 6-A



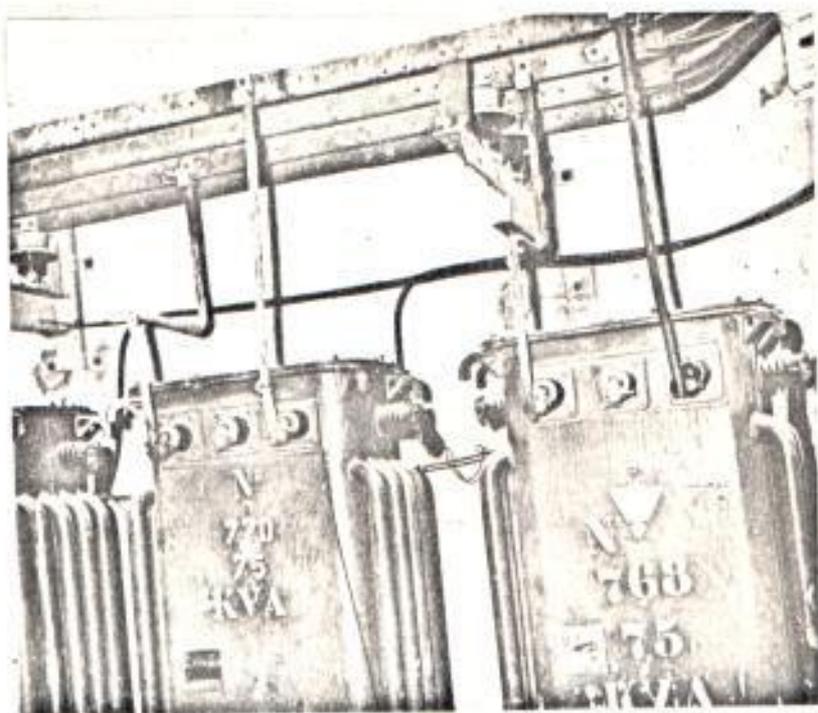


FOTOGRAFIA 7

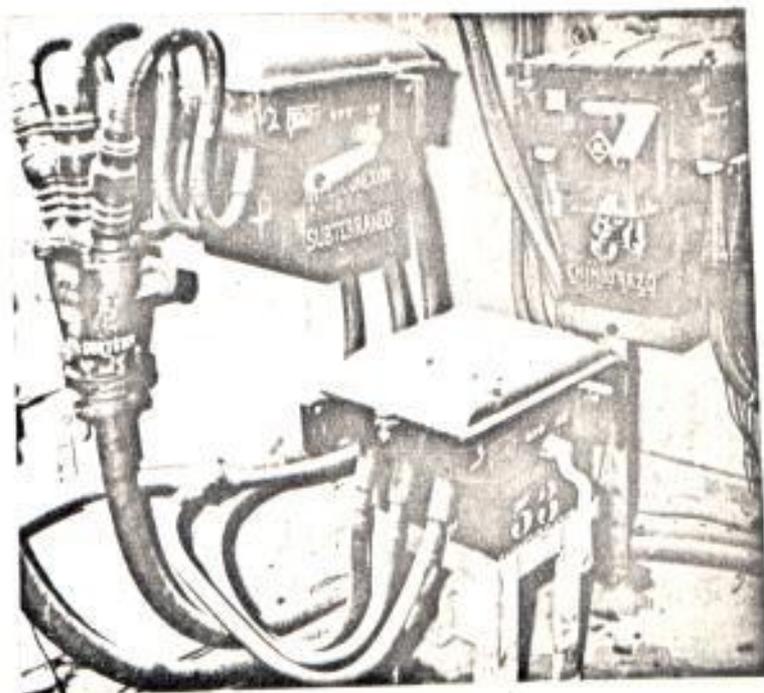
FOTOGRAFIA 8



FOTOGRAFIA 9



FOTOGRAFIA 11



FOTOGRAFIA 12

CORROSION EN LOS CABLES DE ALUMINIO

La Empresa Eléctrica del Ecuador comenzó a usar cables de aluminio en su sistema subterráneo en el año 1969. En ese entonces, no se tenía mayor conocimiento de la experiencia que otras compañías eléctricas en Ecuador y en el extranjero, hubieran tenido con cables de aluminio en ductos subterráneos.

El aluminio presenta la ventaja incuestionable de costar 35% menos que los conductores de cobre, ser más liviano y más flexible, lo que facilita mucho su manipuleo. Estas ventajas en una época en que por la demanda ocasionada por la guerra de Viet-Nam, y por las huelgas en las minas de cobre en EE.UU. el mineral había aumentado en un 30% en su costo, hicieron que la empresa se decidiera a experimentar con cables subterráneos de aluminio. También pesó en esta decisión la exitosa experiencia que la empresa había tenido con cables aéreos de aluminio.

Se procedió entonces a instalar cables subterráneos de aluminio en los alrededores de la Plaza del Centenario, con el objeto de experimentar con este sector, antes de tomar una decisión definitiva sobre el cambio del uso de conductores de cobre por conductores de aluminio en el sistema subterráneo. Polietileno y cloruro de polivinilo fueron los aislantes usados en los cables energizados y el cable del neutro fue instalado desnudo. Se planeó hacer revisiones del estado de los cables cada tres meses, y llevar estadísticas de estas revisiones para al cabo de un año reunir suficiente información como para tomar una decisión con respecto al uso de conductores subterráneos de aluminio.

Antes de la primera revisión planeada, se reportaron problemas de desigualdades en el voltaje secundario en uno de los sectores servidos con aluminio. Al examinar las instalaciones, se encontró al cable de neutro que había sido instalado sin aislamiento totalmente corroído en muchas secciones y mostrando severas muestras de corrosión en las extensiones que quedaban aún. Se procedió entonces a examinar todos los neutros de aluminio alrededor de la Plaza del Centenario, encontrándose todos ellos en similares condiciones al neutro del sector en que se registró la queja del cliente.

En el sector de Pedro Moncayo entre Vélez y 9 de Octubre, en que existe una caja de aguas servidas en mal estado, dichas aguas habían invadido los ductos de la Empresa Eléctrica, y el neutro de aluminio desnudo había desaparecido por completo, víctima del proceso corrosivo acelerado que un electrolito de tal naturaleza, obviamente, ocasiona.

Se ordenó el cambio de todos los conductores neutros, reemplazándolos por cables de cobre desnudo con el cual no había existido nunca problemas de corrosión.

Con el antecedente de esta falla en el neutro, se procedió a una revisión minuciosa de todas las líneas subterráneas de aluminio, encontrándose muestras de principios de corrosión en empates con grilletes de aluminio que habían estado sujetos a inmersión en agua. (Fotografía N°12) Se consideró la falla como causada por el uso del número indebido de capas de cinta aislante y se especificó usar el doble de capas de

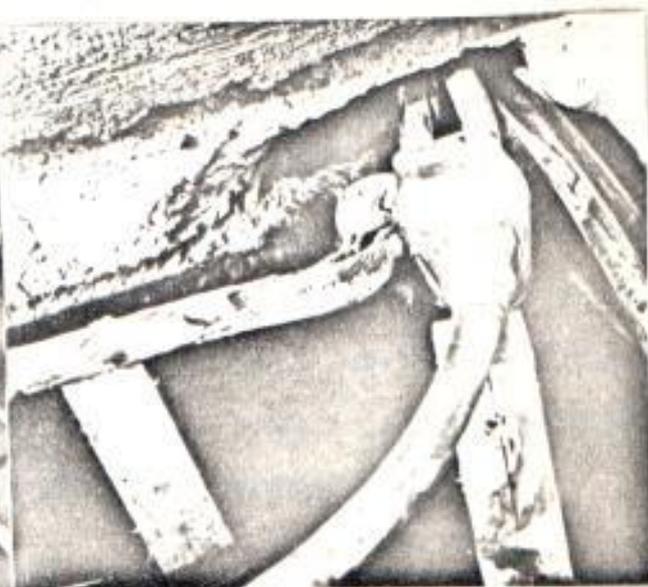
cintas de caucho vulcanizante y de plástico, que las usadas en aislar empates de cobre, para evitar la penetración de humedad.

Las dos revisiones subsiguientes no arrojaron indicios de problemas por corrosión del conductor de aluminio.

En el mes de Mayo de 1970, al finalizar el período de lluvias y al año de estar trabajando los cables de aluminio en el sistema subterráneo de la ciudad de Guayaquil, se reportaron las primeras fallas en los secundarios aislados energizados. Advertidos por la queja de un grupo de clientes sin servicio, acudieron las cuadrillas de la Empresa Eléctrica para encontrar tramos de cable de aluminio completamente corroídos, como lo muestran las fotografías 13 y 14.



← FOTOGRAFIA 12



FOTOGRAFIA 13

Se procedió entonces a realizar una revisión completa de todas las instalaciones secundarias de aluminio, encontrándose en todas las cajas de paso claras muestras de corrosión en los cables y en los empates como lo muestran las fotografías 15, 16 y 17. Se retiró entonces todo el secundario subterráneo de aluminio que había sido instalado un año antes, reemplazándolo por conductores de cobre. Vale la pena anotar que los conductores con aislamiento de PVC sufrieron menos daños que los aislados con polietileno.

Antes de tomar una decisión definitiva sobre el uso de conductores de aluminio en el sistema subterráneo se creyó conveniente investigar un poco más a fondo las causas de las fallas que presentaron los cables de aluminio. Para este objeto se seleccionaron 12 muestras de cables de aluminio 300 MCM, forrados con los dos tipos de aislantes, 6 de PVC y 6 de Polietileno "Crosslinked". Se realizaron incisiones mínimas en 3 muestras de PVC y 3 de Polietileno "Crosslinked" para simular fallas en el aislamiento que podrían haber ocurrido por mala instalación del cable en los ductos. Luego se colocaron los 3 cables perforados de aislamiento PVC en 3 ductos, uno lleno de aguas servidas, otro lleno de agua potable y otro lleno de agua mezclada con lodo y tierra. El mismo procedimiento se siguió con las 3 muestras perforadas de Polietileno "Crosslinked" y las 3 muestras no perforadas de PVC y de Polietileno "Crosslinked". Se procedió a energizar estos cables sin carga con un voltaje de 120 v. con respecto a tierra.

Al cabo de seis meses se procedió a retirar las muestras y examinar los resultados.



FOTOGRAFIA 14

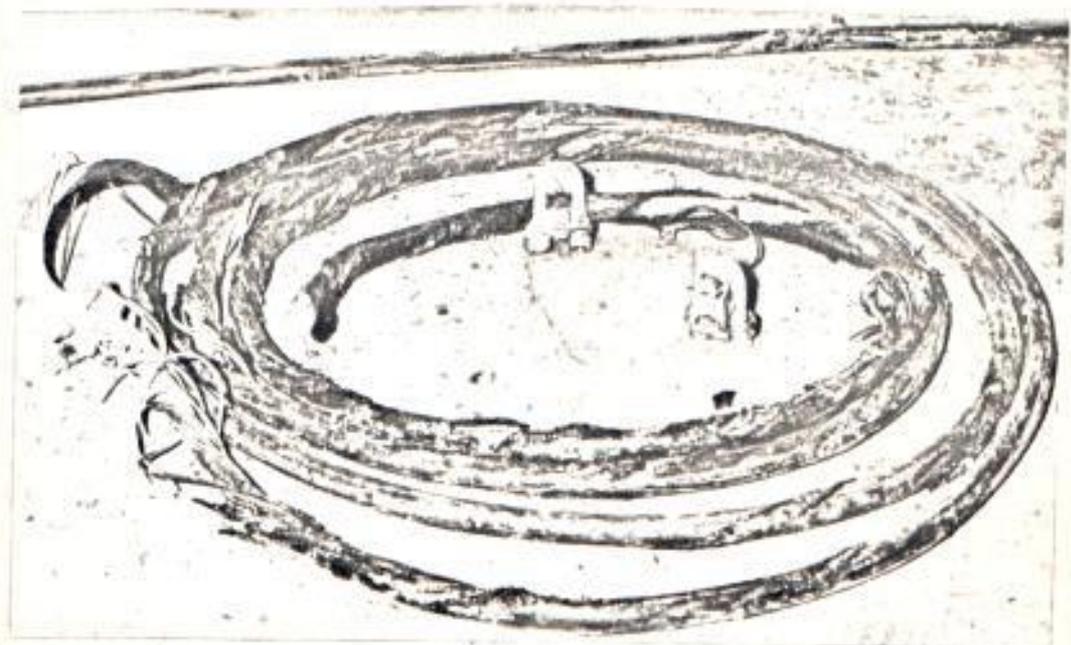


FOTOGRAFIA 15

SECRET - 117



FOTOLGRAFIA 16



FOTOGRAFIA 17

Diferentes mecanismos parecieron entrar en los fenómenos corrosivos que se observaron en las muestras. Los conductores con el aislamiento previamente perforado fueron los que sufrieron mayor deterioro, tal como se esperaba. La intensidad de la corrosión dependió en forma general del tipo de agua que inundaba el ducto de concreto.

En la mayor parte de las muestras en que se encontraron fallas o en las partes en que la corrosión era evidente, se encontró amplia evidencia de erosión en la superficie y de resquebrajamiento escalonado del aislamiento, lo que contribuyó a la aceleración de la corrosión. En los casos de los cables que presentaron evidencias de corrosión en puntos que no habían sido perforados intencionalmente, otro mecanismo de corrosión se hizo presente.

Casi todas las fallas se presentaron en la cara superior del cable, o sea la parte del mismo que no estuvo constantemente cubierta de agua. Dada las altas temperaturas existentes en nuestro sistema subterráneo deducimos de esta experiencia que el agua, como moléculas de agua, parece no ser capaz de penetrar el aislamiento, pero el vapor de agua aparentemente sí lo hace. Una vez que este vapor de agua penetra en el aislamiento se condensa entre el conductor y el aislamiento reaccionando con el aluminio. Evidencia de manchas de agua y monohidrato de aluminio fue hallada en todos los cables que no presentaron fallas.

Un efecto "cataplasma" también fue evidente en donde hidratación del óxido de la superficie del conductor ocurrió, seguida por oxidación del a-

aluminio. Una palabra sobre este "efecto cataplasma".

Corrosión por "acción cataplasma" ocurre cuando tenemos materiales porosos que absorben humedad, que están en contacto con el metal aluminio. Durante la corrosión del aluminio, oxígeno se consume en las áreas catódicas en donde actúa como un despolarizador y acelerador de corrosión. Sin embargo, oxígeno también desempeña un papel importante a través de su capacidad de formar y reparar películas que combaten la corrosión. Bajo una superficie porosa el oxígeno en solución es rápidamente agotado y consecuentemente no puede actuar en su papel de formar y reparar películas que se forman en la superficie del metal. Además, la velocidad de difusión del oxígeno en estas áreas inaccesibles es lenta, no solamente porque el camino de difusión es largo y lleno de obstáculos, sino también porque productos de corrosión insolubles se han ido formando, dificultando aún más la llegada del oxígeno. Por lo tanto, las propiedades protectoras del oxígeno están ausentes del punto en que son más necesarias. Otras áreas cercanas del aluminio que tengan mayor facilidad de absorber oxígeno se tornarán catódicas con relación al área sedienta de oxígeno que hemos descrito arriba. Mientras el electrolito (humedad) exista en la "cataplasma" la célula galvánica originada causará corrosión del metal. En la Fig.29 se da una explicación gráfica bastante clara del tipo de corrosión que llamamos por "acción de cataplasma"

Los cables con aislamiento de PVC, tanto aquellos que fueron perforados como los que no, se encontraron al terminar la prueba en mucho

mejor es-
tado que
los ca-
bles ais-
lados con
polietile-
no "Cross-
linked".

Aunque es-
te no era
previsible
y más bien

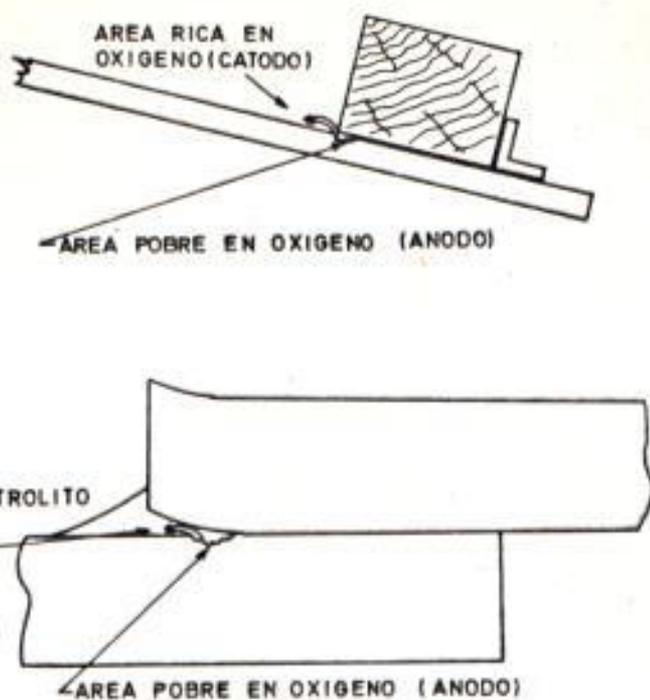


fig.29

fue un resultado inesperado, podemos con algo de conocimiento de la constitución de los aislantes, racionalizar este resultado. Los compuestos de cloruro de polivinilo son tradicionalmente ricos en yesos y arcillas, los cuales actúan como barreras para impedir la penetración de la humedad en los casos en que el cloruro de polivinilo fue atacado eléctricamente y destruido. Los productos de descomposición de este aislante son ácidos en su naturaleza y, por lo tanto, tendrán una tendencia a disminuir la velocidad de la corrosión.

RESULTADO DE LAS PRUEBAS

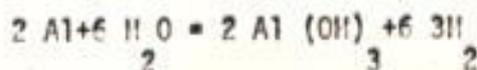
- 1.- Todos los cables que fueron perforados mostraron corrosión en distintos grados;
- 2.- En los cables perforados la corrosión fue más intensa en los duc-

tos inundados por aguas servidas;

- 3.- La corrosión fue mucho más fuerte en los cables con aislamiento de polietileno "Crosslinked" que en los cables con aislamiento de cloruro de polivinilo;
- 4.- Corrosión se presentó en los cables con aislamiento de polietileno "Crosslinked" que no habfan sido perforados y que estaban en los ductos inundados con agua servida y con agua potable mezclada con lodo y tierra;
- 5.- Muestras evidentes de humedad y de comienzos de corrosión masiva fueron observados en el cable de aislamiento de polietileno "Crosslinked" que estuvo en el ducto innundado con agua potable y pura, y
- 6.- Muestras muy ligeras de humedad fueron encontradas en los cables con aislamiento de cloruro de polivinilo.

CONCLUSIONES DE LA EXPERIENCIA PRACTICA CON EL USO DE CONDUCTORES DE ALUMINIO SUBTERRANEO Y DE LAS PRUEBAS EFECTUADAS EN EL LABORATORIO.

- I.- Cuando conductores de aluminio son energizados con corriente alterna y los conductores desnudos o partes desnudas de los conductores se ven expuestas al contacto de un electrolito, electrolysis por corriente alterna puede ocurrir con la consiguiente pérdida del metal. Los detalles de las reacciones en el ánodo y el cátodo son complejas pero la reacción resultante puede ser expresada de la forma siguiente:



Durante el paso de corriente en la dirección donde los electrones fluyen al conductor desde tierra o desde un conductor adyacente en el mismo sistema, el conductor es anódico y está sujeto a pérdidas por electrolisis. La cantidad de metal que se pierde es una función de la cantidad de corriente de fuga y de la duración del flujo. La cantidad de corriente de fuga que puede circular depende a su vez de la resistencia del electrolito que está sirviendo de puente. Pérdidas del metal ocurren únicamente durante las 60 veces por segundo durante las cuales el conductor es anódico. Es importante volver a enfatizar que esta condición sólo ocurre cuando parte o todo el conductor está expuesto al electrolito por ausencia total o parcial del aislamiento. En cables correctamente aislados este fenómeno no se presenta;

II.- El fenómeno arriba indicado fue la causa de las fallas en los conductores que habían sido perforados en su aislamiento. La acción electrolítica de la corriente que fluye a tierra formó grandes cantidades de óxido e hidróxido de aluminio. Este proceso electrolítico continuó hasta que el conductor fue completamente corroído. Corrosión tan intensa como ésta sólo es posible cuando el aislamiento sufre daños y se presentan perforaciones;

III.- La corrosión causada por humedad que penetró por el aislamiento de los conductores que no se encontraban perforados fue mínima, excepto en el caso ya anotado. Este proceso parece ser auto-controlado y se detiene al formarse una capa de producto corrosivo entre el

conductor y el aislamiento. Medidas que se tomaron para determinar la disminución en capacidad de conducción eléctrica de los cables nos indicaron variaciones mínimas;

- IV.- Cualquier voltaje, por mínimo que sea, aplicados a un conductor de aluminio desnudo corroerá el metal. También la presencia de otros metales como cobre desnudo ocasiona pilas galvánicas con la consiguiente corrosión acelerada del aluminio desnudo, y
- V.- Es importante el uso de un aislante de poca capacidad de absorción de agua. Otros experimentos son necesarios con diferentes tipos de aislamientos o con capas de diferentes materiales de aislantes para determinar el óptimo resultado.

La experiencia de la Empresa Eléctrica con cables de aluminio subterráneos y las pruebas realizadas nos llevan a opinar que el uso de este metal en cables subterráneos es práctico y económico siempre y cuando se utilice cables con aislantes de poca capacidad de absorción de agua y siempre y cuando la integridad del aislamiento esté asegurado por correcta construcción, traslado y manejo de la fábrica al lugar de instalación y por una cuidadosa instalación de los cables en los ductos subterráneos. Mientras el aislamiento del conductor no sea afectado, corrosión no representará ningún problema para la empresa de servicio público.

La corrosión que hemos observado en el terreno y en el laboratorio

es sólo un síntoma, no la enfermedad. El problema es la falla del aislamiento, la corrosión es un producto.

CORROSION EN LOS CABLES DE PLOMO

El aterrizaje de los cables de plomo en los sistemas subterráneos es una práctica establecida por muchos años en la industria eléctrica. La forma del aterrizaje es variada pero en todo caso lo esencial es la interconexión de las camisas de los distintos cables tendidos en los ductos para mantenerlos a un potencial similar. Esta interconexión se realiza normalmente en los extremos de los cables y en toda bóveda que lo permite. Además en estos puntos también se conectan las camisas al neutro del sistema. Por último, para suplementar el aterrizaje, en las bóvedas a las salidas de la planta o de las subestaciones se conectan las camisas al sistema de puesta a tierra de la planta o de la subestación y en algunas bóvedas, generalmente aquellas que tienen bancos de transformadores las camisas son conectadas a varillas de puesta a tierra Copper-weld.

Todas estas medidas se observan en el sistema de Guayaquil y como ya hemos visto, tenemos una pila galvánica establecida entre las camisas de plomo y los diferentes sistemas y dispositivos de puesta a tierra que hemos nombrado. El plomo es el ánodo y por lo tanto el metal que sufre corrosión.

Estructuras de acero o hierro del sistema subterráneo pueden formar también pilas galvánicas con el plomo constituyéndose en cátodos y corroyendo también a las camisas de plomo. Estructuras galvanizadas también forman pilas galvánicas con el plomo, pero en este último caso el plomo es el cátodo y corrosión se presenta en el material galvanizado.

La experiencia de años de investigación de los fenómenos corrosivos y de las soluciones a los mismos nos dice que si logramos cambiar el potencial galvánico del plomo de su valor normal de $-0,6$ v. a un valor de $-0,85$ v. (voltajes con relación a una media celda de sulfato de cobre colocada cerca del plomo) corrosión dejará de ser un problema de consideración.

Para obtener esta situación, o en otras palabras, para hacer el plomo más catódico con relación a otros metales, le aplicamos voltaje directo mediante generadores, rectificadores o ánodos como analizaremos más adelante. Ahora bien, si la camisa se encuentra solidamente conectada a tierra, la fuente de protección catódica tiene que generar suficiente corriente para disminuir el potencial de las camisas y del sistema de aterrizaje. Para obtener esto se requeriría de intensidades de valores tan altos que su producción no es práctica y además peligrosa por los problemas que puede ocasionar.

Si las camisas no están sólidamente aterrizadas la intensidad de protección necesaria será muchísimo menor, pero la falta de un aterrizaje de baja resistencia no es conveniente ni reúne las condiciones requeridas para un buen sistema de puesta a tierra.

Esta es en esencia la paradoja que el Ingeniero Eléctrico especializado en corrosión tiene que enfrentar: si se tiene un buen aterrizaje protección catódica no es posible ni económica y si se protege el sistema de cables contra corrosión, no podemos aterrizar sólidamente las camisas de

plomo, con las consiguientes desventajas que esto acarrea.

Una solución al problema es proteger catódicamente los cables con generadores de corriente directa capaces de producir altas intensidades que contrarresten el efecto de las conexiones a tierra. Otra solución es aplicar protección catódica individual con fuentes más pequeñas en cada sitio en que es necesario para obtener iguales valores de intensidad. Ambos métodos son sumamente costosos.

Una solución muy satisfactoria para la eliminación del problema corrosivo comprende lo siguiente:

- I.- Uso de un aislamiento de alta resistencia sobre la camisa de plomo;
- II.- Aislamiento de la camisa de plomo del sistema de puesta a tierra en las plantas generadoras y subestaciones de estructuras subterráneas, equipos, varillas de puesta a tierra, cables, ductos, etc. En otras palabras las camisas de plomo deben de tener una alta resistencia al medio, la misma resistencia que debe poseer un conductor energizado.
- III.- Instalación de interconexiones especiales en puntos seleccionados del sistema.
- IV.- Diseño de dispositivos especiales para puesta a tierra que no requieren aumentar la magnitud de la corriente de protección catódica, que proporcionen un buen aterrizaje y que no interfieran con los sistemas de protección catódica.
- V.- Instalación de fuentes de protección catódica.

La primera condición se cumple forrando el cable con aislamiento de Polietileno, Cloruro de Polivinilo o Neopreno. Hablemos algo sobre cada uno de ellos.

Polietileno: plásticos en contraste con los metales permiten el paso de la humedad. Polietileno parece ser una buena elección para proteger las camisas de plomo ya que su constante de difusión es más baja que la de otros plásticos. Las propiedades mecánicas del polietileno a las temperaturas que tienen que trabajar los cables de plomo también son aceptables. Es un plástico duro, resistente a la abrasión y puede ser extrudido a temperaturas cercanas a los 300°F. Se torna rígido a temperaturas muchísimo más bajas que las encontradas en nuestro sistema. La vibración y el flexionarlo no trae consigo la fatiga que metales pueden presentar. Por otro lado es bastante inerte a la acción de microorganismos y químicos que se encuentran en los sistemas de ductos. Es un excelente aislante eléctrico y su superficie fuerte y lisa es una ventaja para la introducción de los cables de ductos. Degradación de este polímero en su estado claro ocurre si se lo expone al sol. Sin embargo, dispersando en él ciertos pigmentos finamente divididos de carbón negro se aumenta la resistencia de este plástico a la acción solar. Alcohol, detergentes, jabón pueden ocasionar rajaduras en el polietileno y hay que evitar el contacto de dichos elementos con este plástico. Compuestos lubricantes que se utilizan para facilitar la introducción de cables forrados con polietileno en ductos deben de estar libres de los elementos arriba indicados.

Neopreno: es el nombre con que comunmente se conoce a los elástomeros

sintéticos preparados a base de cloropreno. Cuando se lo mezcla con los ingredientes convenientes forma un compuesto que puede vulcanizarse en forma similar a la usada para curar el caucho. Las propiedades básicas del Neopreno vulcanizado son similares a las del caucho vulcanizado, presentando sin embargo superior resistencia química, física y mecánica.

Cloruro de Polivinilo: este compuesto ha sido ampliamente usado para recubrir las camisas de plomo de cables de alta tensión. Se lo aplica por extrusión y sin vulcanizarlo. Ofrece excelente resistencia al calor y a la acción de aceites, químicos, microorganismos, humedad, abrasión, etc. Su uso a temperaturas bajas no es recomendado por su poca flexibilidad bajo estas condiciones. Como es termoplástico, las altas temperaturas lo deforman, aunque a 60°u 80°C. que es la temperatura normal de trabajo su comportamiento es satisfactorio.

Cubrir el cable de plomo con un plástico aislante trae además la ventaja de separar al metal del electrolito, eliminando así la pila galvánica. Especial cuidado debe ser puesto en no dejar fallas en el plástico que dejen al descubierto pequeñas áreas anódicas que sufrirían corrosión acelerada.

La segunda condición que señalaremos, que la camisa de plomo debería poseer una alta resistencia al medio, es importante de observar; un sólo contacto accidental a tierra destruiría el efecto del forro aislante y

sería prácticamente imposible la protección catódica.

La tercera condición menciona interconexiones entre las camisas. Estas interconexiones deben efectuarse mediante soldadura a la camisa y deben de ser de un calibre tal que al presentarse las fallas la corriente circulante no funda los cables de interconexión. Por último estos conductores deben poseer aislantes capaces de soportar inmersión.

Para cumplir la cuarta condición métodos especiales de aterrizaje a la salida de las plantas o de las subestaciones han sido desarrolladas por distintas compañías eléctricas.

A.- En Florida, Arkansas y Louisiana, R. J. Kuhn³ usó un dispositivo consistente de dos electrodos grandes de carbón separados entre sí por una hoja delgada de papel. Un electrodo es conectado a la camisa de plomo y el otro al sistema de puesta a tierra. Este diseño permitió la instalación de un sistema de protección catódica a un costo moderado. Durante fallas, las diferencias de potencial elevadas que se presentan entre el carbón conectado a las camisas de plomo y el carbón conectado al sistema de puesta a tierra, establecen un campo eléctrico de tal magnitud que el dieléctrico es perforado y el aterrizaje deseado durante fallas es obtenido. El papel tiene que ser reemplazado cada vez que fallas se presentan en el sistema. Revisiones

periódicas del papel se hacen necesarias.

B.- En New York, F. E. Kulman, ⁴ conectó la camisa de plomo de los cables de alto voltaje directamente al sistema de puesta a tierra de las plantas y subestaciones mediante un conductor de gran calibre. Luego hizo circular suficiente intensidad por este cable por medio de un rectificador hasta establecer una caída de potencial en dicho cable de alrededor de 0,3 v. El sentido de la corriente fue del extremo conectado a tierra al extremo conectado a las camisas. La caída de potencial establecida en este cable de interconexión a tierra tendió a bajar el potencial de las camisas a valores inferiores al potencial de tierra; por lo tanto, protección catódica fue posible y al mismo tiempo las camisas se hallaban solidamente conectadas a tierra para caso de fallas.

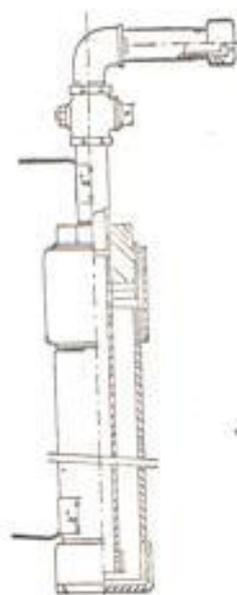
C.- Irwin Dietze, ⁵ en California fue el primero en utilizar la pila electrolítica de plata y plomo. Esta pila consiste de dos electrodos de los metales mencionados sumergidos en una solución de nitrato de potasio. Un electrodo se conecta a tierra y el otro a las camisas de plomo; el resto de la camisa se aísla de tierra. La pila no es usada para proporcionar protección catódica a la camisa, su objeto es aislar a la misma de un contacto directo con tierra, proporciona un paso de potencial a tierra pero al mismo tiempo un paso a través de un electrolito de baja impedancia para conducir las corrientes de fallas. Se aplicó entonces sistemas convencionales de protección catódica. El voltaje de la pila, alrededor de 0,75 v.,

evita que la corriente de protección catódica se concentre en el sistema de aterrizaje y de allí fluya a las camisas.

D.- Una batería standard de 2,0 v. fue usada originalmente en Florida por "Florida Power and Light Company" en colaboración con ingenieros de "Ebasco Services". El polo negativo de la batería fue conectado a la camisa y el positivo a tierra. Un pequeño rectificador mantuvo a la batería siempre cargada. La batería permitió el paso de corrientes de falla de alta intensidad y corta duración.

E.- Una pila polarizante de agua salada fue desarrollada por R. J. Kuhn, e instalada en Jacksonville, Florida. Esta pila consiste de una tubería de acero galvanizado de 12" de diámetro y 3 m. de largo centrada en otra tubería de hierro negro de 16" de diámetro y la misma longitud. Ambas tuberías se encuentran aisladas entre sí y el espacio entre ellas lleno de agua salada. Oxígeno fue excluido de esta pila. La tubería de hierro negro se conectó al sistema de aterrizaje y la galvanizada a las camisas a protegerse que se encontraban aisladas de tierra. Protección catódica se obtuvo mediante los dispositivos convencionales. Sólo una pequeña cantidad de corriente de protección pasó por la pila, polarizando la superficie del tubo interior con una película de hidrógeno. Esta película polarizante eventualmente redujo el flujo D.C. a prácticamente cero. Al mismo tiempo el camino electrolítico de baja impedancia del agua salada permite pasar rápidamente corrientes de falla sin dañar la pila. En colaboración

con Kuhn, ingenieros de la compañía eléctrica desarrollaron y pusieron en servicio una serie de pilas de este tipo pero algo más pequeñas, la longitud de los tubos fue reducida a 1.5 m. y los diámetros fueron 3/4" para el interior y 2" para el exterior. El electrolito consistió en una solución al 3.5% de agua salada (agua potable mezclada con sal de cocina). El oxígeno fue cuidadosamente excluido de estas pilas hirviendo el agua y purificándola con nitrógeno. Una válvula de presión fue incorporada al diseño porque pruebas preliminares mostraron que cuando valores sostenidos de 1.000 a 1.500 amperios de corriente alterna pasaron a través de la pila un considerable aumento de presión y temperatura se hizo presente. La Fig 30 nos muestra detalles de esta pila. Estas pilas trabajaron por un número de años. Tuvieron que ser reemplazadas porque sales y productos de corrosión puentearon el espacio entre las tuberías cortocircuitándolas.



CELDA SIMPLIFICADA DE AGUA SALADA

Fig - 30

F.- Otra pila de aterrizaje fue diseñada por R.J. Kuhn, La Fig. 31 nos presenta detalles de la misma.

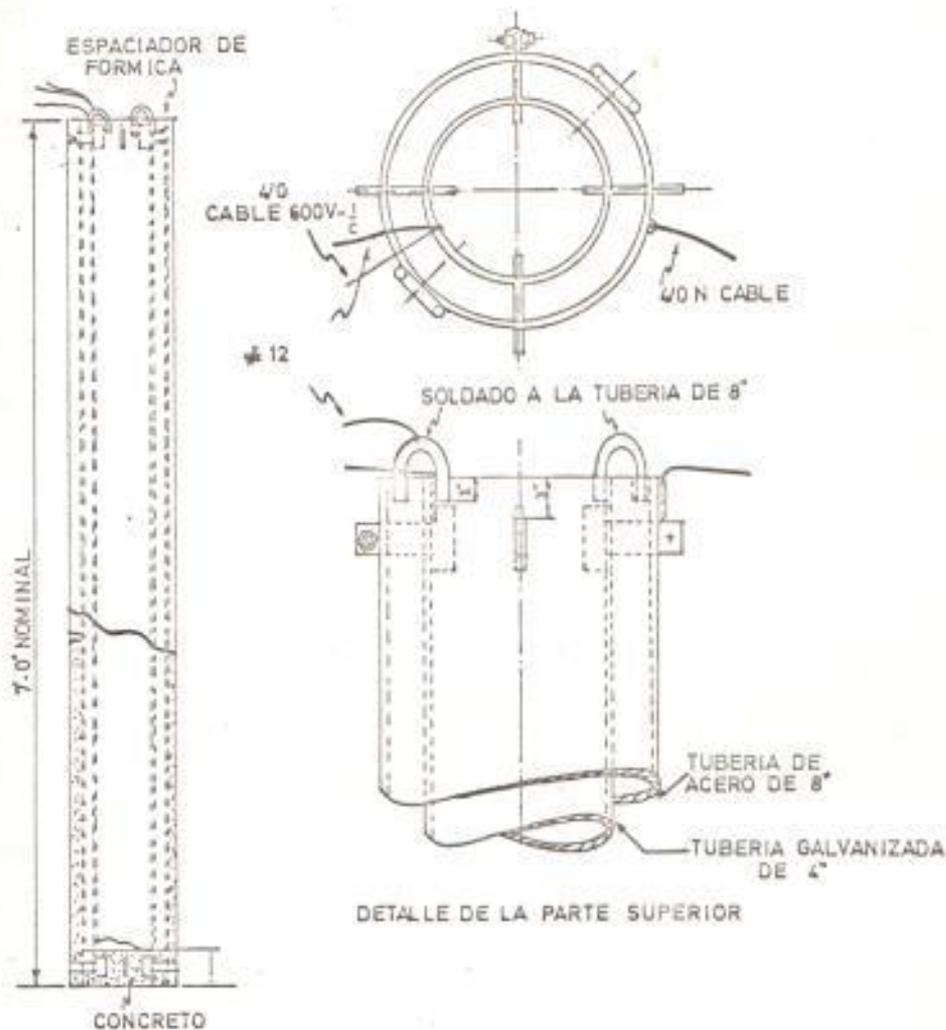


Fig-31

Esta pila que funciona con el mismo principio de películas polarizantes, consiste en un tubo de 4" de acero galvanizado de 2m. de longitud, centrado en un tubo de acero negro de 8" de diámetro y mis-

na longitud. Este último tubo es revestido en concreto e introducido en un agujero en la tierra a la cuál se le ha añadido sal en cantidades apreciables. El tubo interior se lo conecta a las camisas y el exterior al sistema de puesta a tierra mediante un conductor aislado de 250 M.C.M. de sección. Antes de instalar estas pilas en el sistema se probó un modelo haciéndole pasar por 6 veces consecutivas corrientes de falla de un sistema de 13.8 Kv. Corriente y potencial a través de la pila fueron medidos con un osciloscopio. La intensidad fue de 8.000 amperios y el voltaje de 39 voltios. La corriente de falla duró entre 18 y 19 ciclos. Los datos de corriente y de voltaje arrojan una impedancia sumamente baja de 0,0049 ohmios. No hubo ninguna evidencia palpable de recalentamiento después de la prueba y la baja impedancia nos indica que no se registraron voltajes peligrosos en las camisas de plomo durante fallas del sistema. Algunas de estas pilas ya tienen más de 10 años trabajando con éxito. Muy poca corriente del sistema de protección catódica se escapa a través de esta pila y sin embargo el sistema se encuentra bien aterrizado mediante este dispositivo. Hay que anotar que un buen aterrizaje en las subestaciones o plantas generadoras no evitará que se presenten voltajes peligrosos en las camisas de plomo si es que los cables tienen extensiones considerables. Para fallas de fase a tierra en el cable subterráneo, una caída de voltaje IR se produce por la corriente de falla que fluye por la camisa, de regreso a la subestación o planta generadora. Voltajes aún más altos serán inducidos en las camisas de plomo si la falla se presenta en la parte aérea del sistema. Por lo tanto es de desear que las camisas sean aterrizadas en el poste de

transición, y posiblemente en puntos intermedios de la parte subterránea. Una forma efectiva de aterrizar las camisas en el poste de transición será discutida en el próximo punto. Aterrizaje en puntos intermedios puede lograrse usando ánodos galvánicos enterrados y lo discutiremos más adelante.

6.- Los ingenieros de "New Orleans Public Service Inc." desarrollaron una pila de aterrizaje modificada para aterrizar las camisas en el poste de transición (Fig 32)

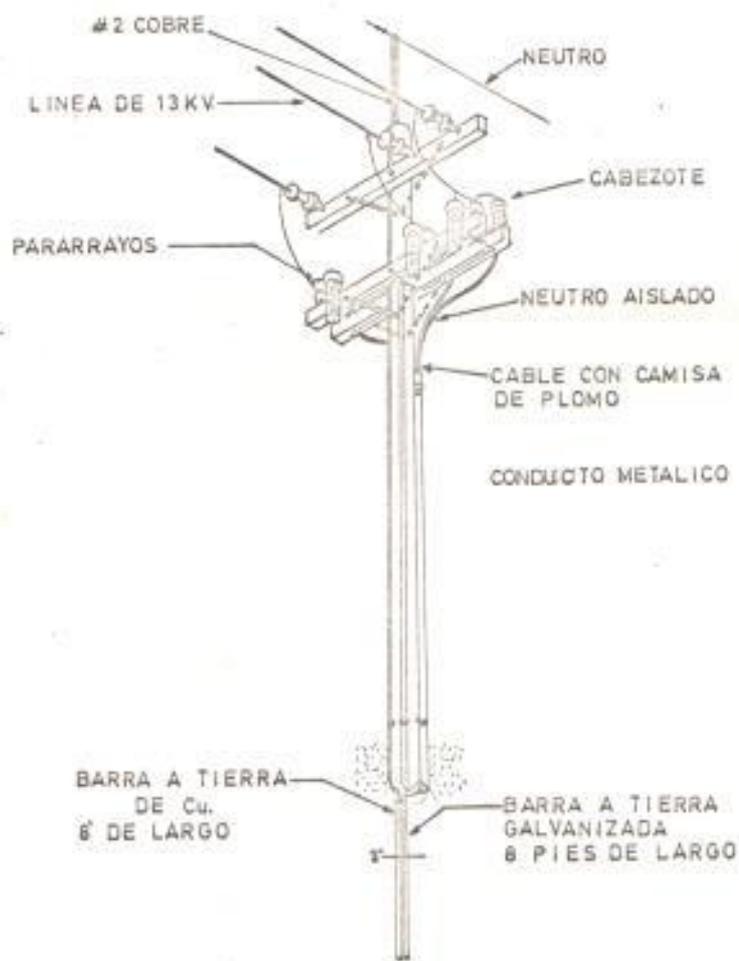


Fig -32

Una barra a tierra galvanizada de 8' de largo se entierra cercana a la base del poste y se conecta a la camisa de plomo y al ducto galvanizado. Otra barra de Copperweld de la misma longitud es enterrada a 2" de la primera, y es conectada al neutro del sistema. En suelos de 200 ohmios-cm. pruebas han mostrado que la resistencia a tierra de cada barra es de 2 ohmios y la resistencia entre ellas 1,5. Como la barra Copperweld está conectada al neutro y la barra galvanizada a la camisa con un camino de 1,5 ohmios de resistencia entre ellas, el potencial de la camisa durante fallas estará limitado a valores seguros. La barra galvanizada no recogerá corriente del sistema de protección catódica hasta que el potencial de las camisas alcance el potencial galvánico del zinc el cual es de -1,1 v. Como las camisas difícilmente son protegidas de manera que alcancen valores superiores a -09 v. porque el exceso de alcalinidad que se produciría es peligroso para el plomo, resulta que no se recoge corriente de protección en absoluto.

Por último hablemos de la quinta condición.

En ciertos casos, cuando es factible, protección catódica es una de las soluciones. Consiste esencialmente en colocar electrodos de tierra dispuestos en forma conveniente con respecto a los ductos que portan cables de plomo y en aplicar un potencial positivo para elevar el potencial de la tierra o de los ductos, lo suficiente para mantener a los cables con potenciales negativos con respecto a tierra. En esta forma, corriente eléctrica que fluye a través de la tierra hacia la camisa de plomo tiende a neutralizar cualquier potencial positivo en las camisas que pueda dar origen a corrosión. Corriente al potencial requerido es suministrada por generadores o rectificadores adecuados.

Usualmente, la corriente eléctrica descargada desde ánodos pequeños individuales, o desde secciones de un ánodo largo y continuo, varía entre valores muy amplios de un punto a otro, dependiendo de las condiciones del terreno; existe, por lo tanto, la posibilidad de aplicar un exceso de corriente protectora en ciertos lugares en el afán de proteger correctamente otros. En estos casos de lugares sobreprotegidos es muy factible que tengamos corrosión. La razón es la siguiente: en la protección catódica, la reacción electroquímica que existe con el flujo de la corriente directa hacia una estructura metálica, crea un medio alcalino en las superficies protegidas. El grado de alcalinidad es usualmente insignificante, debido a las densidades de corrientes mínimas requeridas para la protección catódica. Pero, si se usan corrientes excesivas, los medios circundantes pueden convertirse en altamente alcalinos. Esta alcalinidad no daña a las tuberías de acero o de hierro fundido, pero puede dañar considerablemente al plomo y a otros metales denominados anfotéricos, tales como

el aluminio y el estaño. Este efecto se conoce por el nombre de corrosión catódica.

Para evitar que este problema se presente, el ánodo continuo puede ser seccionalizado y la cantidad de corriente suministrada a cada sección puede ser controlada con resistencias.. La Fig.33 nos muestra arreglos para la instalación de ánodos seccionalizados y distribuidos con sus resistencias de control.

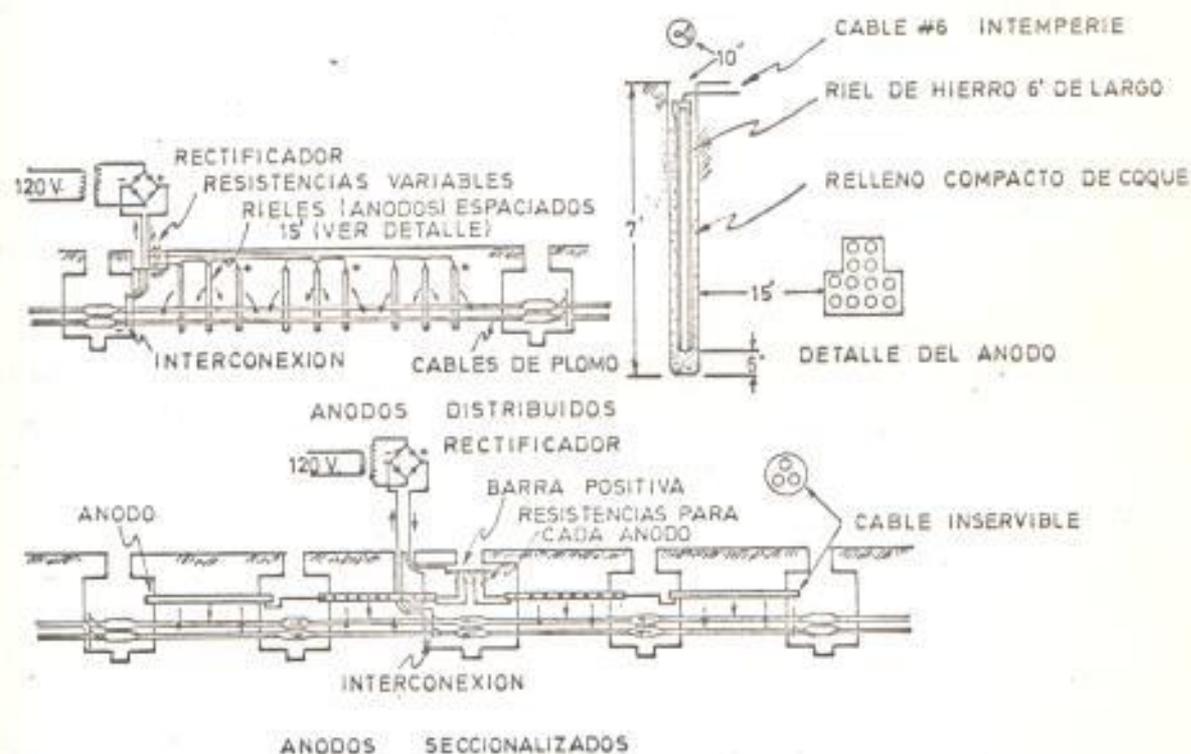


Fig-33

Debido a la existencia de cables telefónicos, tuberías de agua, y otras estructuras metálicas paralelas al banco de ductos, se debe de tener mucho cuidado en la instalación y operación de sistemas de protección catódica para evitar daños a estas instalaciones. Los ánodos deben ser instalados en los bancos de ductos o muy cercanos al mismo.

En ciertas instalaciones, el ánodo consiste en pedazos de cables inservibles electricamente, con el plomo al descubierto. Estos pedazos se instalan en un ducto libre y la camisa es conectada a través de un rectificador a los cables que se desea proteger. La Fig.33 ilustra este sistema.

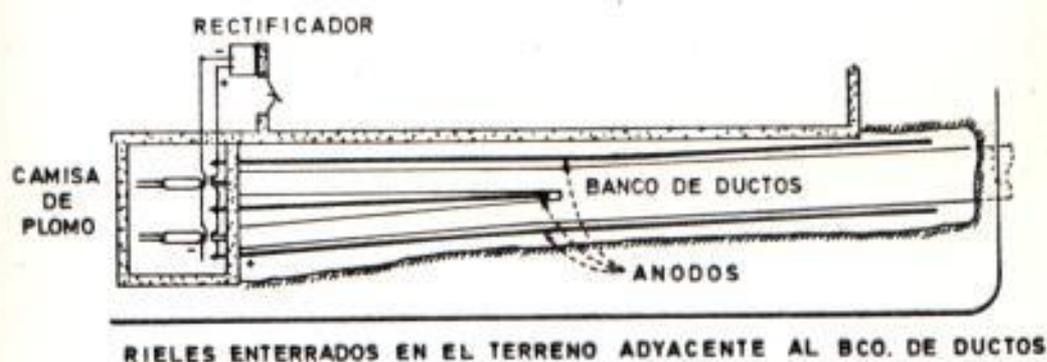


fig. 34

En otras instalaciones, rieles son enterradas junto al banco de ductos como lo muestra la Fig.34. Este tipo de ánodo se usa cuando la corriente de protección requerida no es muy alta. Si se necesita mayor intensidad eléctrica, los rieles deben ser enterrados embebidos en cisco de coque o quizás será necesario utilizar electrodos de carbón especialmente diseñados.

Anodos de zinc también han sido utilizados para proveer la corriente necesaria para la protección catódica de cables de plomo. Más sobre la aplicación de estos ánodos de zinc a un sistema subterráneo, lo veremos al analizar el problema corrosivo en los transformadores..

A pesar de que la Empresa Eléctrica del Ecuador, Inc. ha conservado records de las fallas presentadas en sus cables con camisa de plomo (ver apéndice, sección III-A), no se han investigado a fondo todas las posibles causas de estas fallas. El autor de esta tesis, a través de indagaciones realizadas entre el personal de linieros y Supervisores y en base a experiencias propias e investigaciones realizadas, considera que un gran porcentaje de ellas se ha debido a corrosión galvánica del plomo. En los años que el autor tiene trabajando en la Empresa Eléctrica del Ecuador, sólo se presentaron tres fallas que podían atribuirse en forma precisa a causas ajenas a corrosión.

Ya hemos dado anteriormente una descripción del sistema subterráneo de alta tensión indicando el tipo de cable que vamos a investigar cables con camisas de plomo.

El plomo es uno de los metales menos sujetos a la acción de corrosión. Muchos techos de plomo existen en la actualidad con edades que sobrepasan las cinco centurias. Los Romanos utilizaban tuberías de plomo para conducir agua y muchas de estas instalaciones han perdurado hasta nuestros tiempos. En parte la inactividad del metal cuando es expuesto al aire es debida a la formación de una capa óxida protectora en la superficie; pero, cuando un cable con camisa de plomo es introducido en ductos subterráneos sujetos a inundaciones, el agua con la cual entra en contacto puede ser de tal naturaleza que pueden presentarse acciones químicas que resulten eventualmente en la perforación del cable.

Pasemos a describir el tipo de investigación, reconocimientos, pruebas y mediciones que se llevaron a cabo para determinar la extensión del fenómeno corrosivo en el sistema de cables de plomo de la ciudad de Guayaquil.

I.- RECONOCIMIENTOS PRELIMINARES

Se realizó una inspección del sistema de ductos en los que cables PILCPE estaban instalados para determinar sectores mayormente sujetos a inundaciones; sectores en que el sistema de aguas servidas, por deterioro, ocasionaban filtraciones a nuestro sistema subterráneo; y cualquier otra eventualidad externa que influya sobre el medio ambiente con el cual nos enfrentamos: acumulación de desperdicios, basuras, tierra, productos orgánicos, etc.

II.- RECONOCIMIENTOS GENERALES

A continuación se procedió a determinar situaciones que podían ser motivo y causa de corrosión con el objeto de que con este tipo de información, aunada a la información proporcionada por los reportes de desconexiones de alimentadoras, poder determinar sectores en que la corrosión podría ser de mayor consideración.

III.- INVESTIGACIONES ESPECIALES

Seleccionadas partes del sistema por los reconocimientos antes ano-

tados, se procedió a efectuar investigaciones, químicas y eléctricas,

A.- ANALISIS QUIMICO:

El conocimiento químico puede ser aplicado de muchas formas al tratar con el problema corrosivo, y uno de los más importantes es determinar la causa de las fallas que han ocurrido. Una de las ventajas de hacer este trabajo químicamente es que puede ser realizado en el laboratorio, usando especímenes del cable dañado y muestras de la tierra y el agua que han estado en contacto con el cable, en las vecindades en que la falla ocurrió.

Por supuesto, lo más importante es el exámen de la camisa de plomo. Esta se encuentra generalmente sucia cuando se la recibe, y primero se la procede a limpiar y a quitarle la grasa con bencina. En el caso de especímenes más pequeños, una mejor limpieza se logra con tetracloruro de carbono o triclorotileno. Una vez que se lo ha limpiado y desgrasado, el espécimen se encuentra listo para ser observado bajo el microscopio y para analizarlo químicamente.

Al examinar el espécimen con el microscopio, especial atención se pone al producto de corrosión. Este puede ser: 1) masas de polvo de color café; 2) una substancia blanca opaca que tiende a desprenderse en escamas al ser hurgada con una aguja; 3) cristales translúcidos y algo húmedos- algunos con formas tetragonales definidas- que se presentan en su mayoría como masas translúcidas algo pareci-

das a jabón en polvo; 4) masas rojas brillantes; 5) productos corrosivos en la forma de agujas blancas, y 6) productos corrosivos en la forma de escamas amarillas.

La corrosión puede presentarse: 1.- distribuida en forma general sobre toda la camisa de plomo; 2.- confinada a perforaciones y estrías en la parte inferior de la camisa, y 3.- limitada a la parte superior de la camisa.

Para poder descubrir el tipo de corrosión es necesario retirar el producto corrosivo de la camisa y examinarlo física y químicamente. Los tipos generales de corrosión son los siguientes: 1.- ataque general del metal, sin que éste se acentúe en los límites de los cristales. La estructura cristalina no es fácilmente identificable. El metal corroído aparece como una masa homogénea y áspera; 2.- ataque intercristalino en el cual los cristales del plomo no sufren mayor daño, pero sus superficies limítrofes son fuertemente atacadas hasta llegar en casos a desprender por entero los cristales, los cuales pueden ser levantados con una aguja; 3.- perforaciones que pueden tener forma de plato y ser poco profundos, o ser muy profundos y sesgados siendo más anchas en la parte externa; 4.- otras peculiaridades: Ocasionalmente un tipo extraño de ataque se puede encontrar.

Una muestra representativa del producto de corrosión es analizada químicamente. Las determinaciones a hacerse son general-

mente: 1) cloruros, 2) sulfatos, 3) carbonatos. Análisis cualitativos son hechos para peróxidos y nitritos.

Además del examen realizado al producto corrosivo, se debe examinar una muestra del agua que ha estado en contacto con la camisa en el punto en que la corrosión se ha hecho presente. Análisis del agua generalmente comprende determinación del residuo (total e inorgánico) cloruro, sulfato, carbonato, nitrato, nitrito, amonía, sodio, calcio y magnesio. Una prueba calorimétrica para determinar el Ph también es realizada.

Con los datos obtenidos de exámenes y pruebas como los descritos anteriormente se pueden llegar a diagnósticos aceptables sobre el fenómeno corrosivo investigado. Bases para este diagnóstico son la experiencia acumulada a través de los años por ingenieros de corrosión.

Como la literatura disponible no era muy extensa en este respecto, se llevaron a cabo algunas pruebas en la Empresa Eléctrica. Se seleccionó pedazos de cable a los cuales se les había retirado el forro externo para dejar el plomo expuesto. Se introdujeron estos cables en recipientes de vidrio llenados con agua recogida de diferentes bóvedas subterráneas. A algunas de estas muestras se les permitió corroerse con estimulación externa, otras fueron hechas ánodos en la pila electrolítica. Diferencias de potenciales en el orden de 0,1 a 0,35 voltios fueron generados, siendo

estos valores típicos de los valores registrados en las instalaciones subterráneas.

Como regla general, se encontró de estas pruebas que las muestras que sufrieron corrosión electrolítica fueron atacadas en sus estructuras intercristalinas. Esto confirma la regla general, expresada en nuestra única fuente de información sobre análisis químicos de los productos corrosivos. Podemos generalizar y expresar como una regla que electrolisis² tiende a producir un ataque que es caracterizado por perforaciones, cráteres y estrías más o menos profundas en el metal, dañando una pequeña proporción de la superficie total que está expuesta a contacto con el electrolito, tal como lo muestran las fotografías 18, 19 y 20.

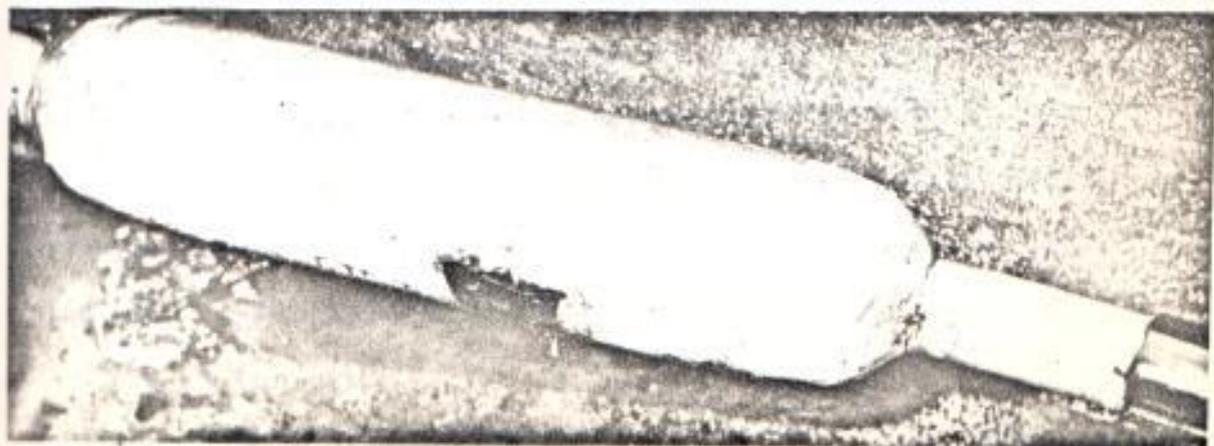
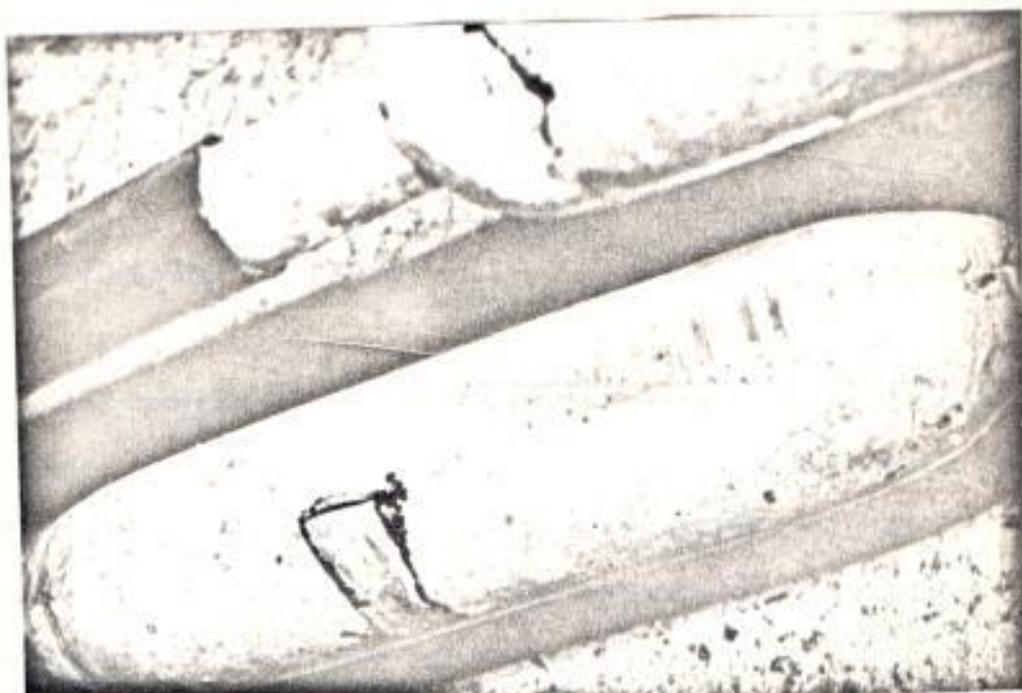
La corrosión química tiende a presentarse sobre toda la superficie expuesta y es más uniforme que la corrosión electrolítica en su naturaleza. Electrolisis tiende a atacar el metal en sus regiones intercristalinas dejando fisuras entre los cristales. Esto no significa que el ataque electrolítico se limitó a las regiones intercristalinas dejando el resto del cristal intacto. Lo que queremos decir es que el ataque fué mucho más acentuado en estas regiones.

Numerosos análisis que se han realizado en productos de corrosión nos llevan a poder establecer la presencia de cloruros como una indicación de que corrosión galvánica es la culpable del pro-

blema. En todos los casos en que el producto de corrosión tiene más del 5% de cloro, las pruebas eléctricas realizadas en los puntos de corrosión nos confirmarán a ciencia cierta que intensidad galvánica se ha descargado de la superficie corroída. La confirmación negativa también se ha realizado con resultados positivos. Cuando se ha encontrado menos del 5% de cloro en el producto de corrosión fue imposible determinar con mediciones eléctricas la existencia de la pila galvánica.

En el laboratorio improvisado en la Estación de Servicio de la Empresa Eléctrica del Ecuador se comprobó estas aseveraciones. Con una diferencia de potencial de 0,20 a 0,35 voltios generada por la pila galvánica producida se logró corrosión galvánica en las muestras anteriormente indicadas. Los productos de corrosión fueron investigados con el siguiente resultado: a) en donde la corrosión química fue el único agente destructivo se encontró una concentración al 1% de cloro; b) en la muestra en que se creó la pila galvánica la concentración fue de 9,5%.

Con la información recogida a través de los años y los resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio podemos decir que la presencia de productos corrosivos ricos en cloro, puede ser tomada como una clara indicación que la corrosión ha sido de origen galvánico, sin embargo, el contenido de cloro en el electrolito debe ser siempre considerado.



Electrolitos con Ph en el rango normal de 6,5 a 8,5 que contienen cantidades normales de concentraciones de cloruros, carbonatos y sulfatos, y que substancialmente no poseen materias orgánicas, amoniaco u otras formas de nitrógeno disueltas nos indican con claridad que si corrosión se ha hecho presente, el ataque es electrónico y no químico.

Por otro lado, aguas con Ph que muestran su naturaleza ácida o alcalina, con grandes concentraciones de cloruros, presencia de amoniaco, nitratos o nitritos, presencia de materias orgánicas, particularmente en forma coloidal, nos indican una corrosión química.

B.- MEDICIONES ELECTRICAS:

Las mediciones eléctricas se realizaron mediante el método conocido como "Reconocimiento de Ductos" (DUCT SURVEY) método que discutimos a continuación, acotando datos estadísticos que pueden ayudarnos a sentar criterios y poder expresar generalizaciones como acabamos de hacer para las pruebas químicas.

El método de "Reconocimiento de los Ductos" o "duct survey" se ha popularizado como el método más eficiente usado en sistemas de cables subterráneos para explorar las condiciones de electrolisis que existen en el sistema de ductos que conectan bóvedas subterráneas, y particularmente para investigar la condición de los

ductos en su relación a fallas por corrosión en los cables de plomo. Este método es muy útil cuando se quiere hacer investigaciones previas a la instalación de cables de plomo de manera que se pueda prever problemas de corrosión. Por último, estudios estadísticos de un número suficiente de este tipo de investigaciones obtenidas en conjunto con informaciones sobre fallas de cables y estructuras por corrosión ha hecho posible establecer criterios e informaciones que pueden ser usados como base para estimar la seriedad del problema corrosivo a resolverse.

El reconocimiento de los ductos se realiza haciendo pasar un electrodo por un ducto vacío adyacente a los ductos que contienen los cables. Se conectan instrumentos entre este electrodo y la camisa de plomo de los cables adyacentes, y se efectúan lecturas de potencial, intensidad y resistencia a intervalos de 2 mts. o más a través del ducto.

La Fig.35 nos muestra la disposición de los elementos e instrumentos para el reconocimiento. El electrodo de prueba más comúnmente usado consiste en un pedazo de cable de 12 pulgadas de largo, 2.75 pulgadas de diámetro con la lámina de plomo al descubierto, un ojo para halar acoplado a un extremo, y un cable soldado a la lámina para poder conectar el electrodo a los instrumentos.

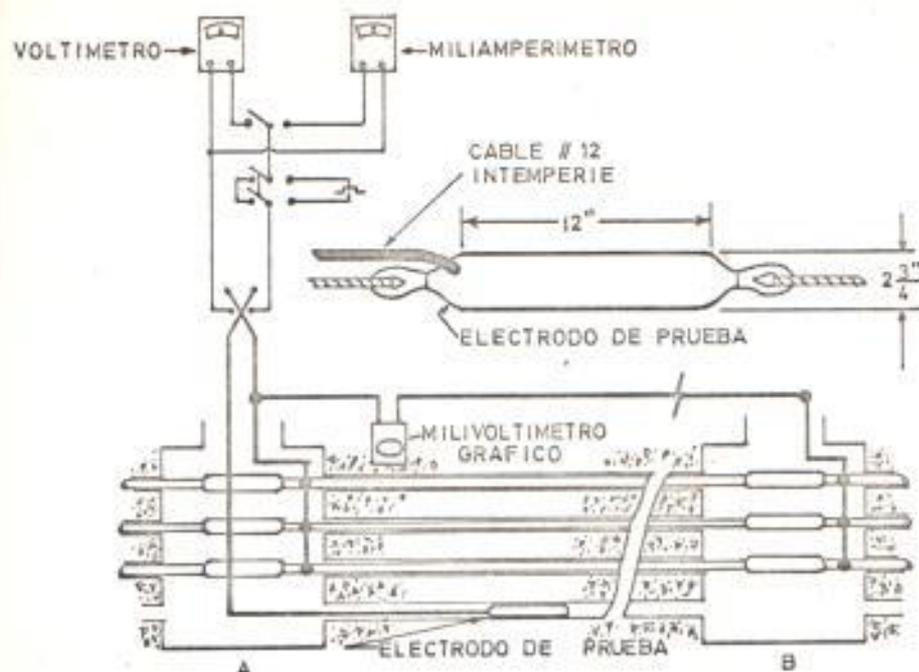


Fig-35

Un pequeño potencial galvánico puede existir entre la camisa de plomo de los cables y el electrodo de prueba a pesar de que se trata del mismo metal, sin embargo, esta diferencia es muy pequeña (0.01 voltio, o menos aún) y no afecta seriamente los resultados obtenidos. La superficie del electrodo debe ser mantenida en buenas condiciones, y su potencial con respecto a la camisa de los cables, debe ser chequeada periódicamente usando el agua de la bóveda o de los ductos como electrolito. A pesar de que se ha experimentado con otros electrodos, no polarizantes, y algunos de diseño especial, el simple electrodo de plomo descrito en este párrafo es el más indicado para realizar el reconocimiento de los ductos.

El potencial existente entre las paredes de los ductos y las camisas de plomo de los cables en el banco de ductos es medido con el voltímetro mediante la conexión indicada en la Fig.35 . Un voltímetro de alta resistencia debe ser usado para reducir a lo mínimo el error que pueda introducir la resistencia de contacto del electrodo. Voltímetros con resistencias de 400,000 ohmios por voltio, o más, son satisfactorios. Debido a la alta resistencia del circuito del voltímetro, el potencial del electrodo de prueba será substancialmente el potencial de las paredes de los ductos, y las mediciones así obtenidas nos dan una aproximación del potencial de las camisas de los cables con relación al potencial de las paredes del ducto para los diversos puntos a través del banco de ductos.

Normalmente, esta investigación del potencial mencionado se suplementa tomando valores en un mismo lugar del ducto a intervalos de tiempo. La característica de la curva potencial vs. tiempo nos dará una clara indicación si el potencial es debido a una fuente extraña (corrosión por corrientes parásitas) o a una situación galvánica. Como en Guayaquil podemos desechar el problema de corrientes parásitas, esta prueba no fue realizada. La Fig.36 nos muestra un análisis estadístico obtenido de 100 reconocimientos de ductos en lugares en que se presentaron fallas por corrosión de la camisa de plomo. En cada caso el potencial de la camisa en su punto de falla era positiva con relación a la pared del ducto.

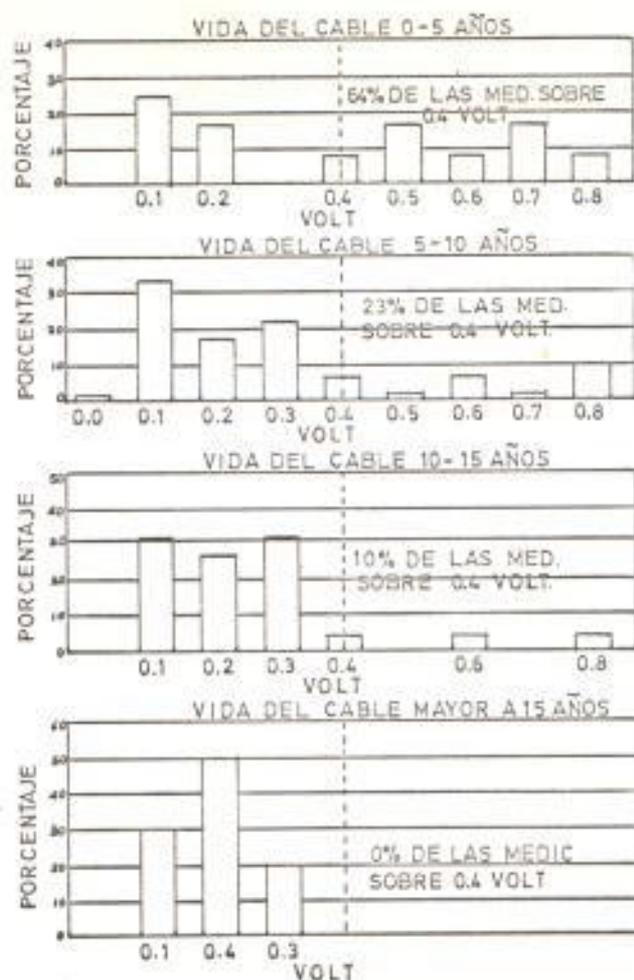


Fig-36

Para determinar la magnitud y la dirección de la corriente recogida o descargada de la pared del ducto a través del electrodo de prueba, un miliamperímetro de baja resistencia es conectado en lugar del voltímetro. Como la resistencia del miliamperímetro es relativamente pequeña, el potencial del electrodo de prueba será substancialmente el potencial de los cables adyacentes, y se puede presumir que la corriente descargada por pie de cable en el punto de prueba es aproximadamente en el mismo orden de magnitud como la intensidad medida. Esta corriente al fluir hacia la pared del cable, causará corrosión anódica, y puede, al fluir hacia la camisa de plomo de los cables, causar corrosión catódica.

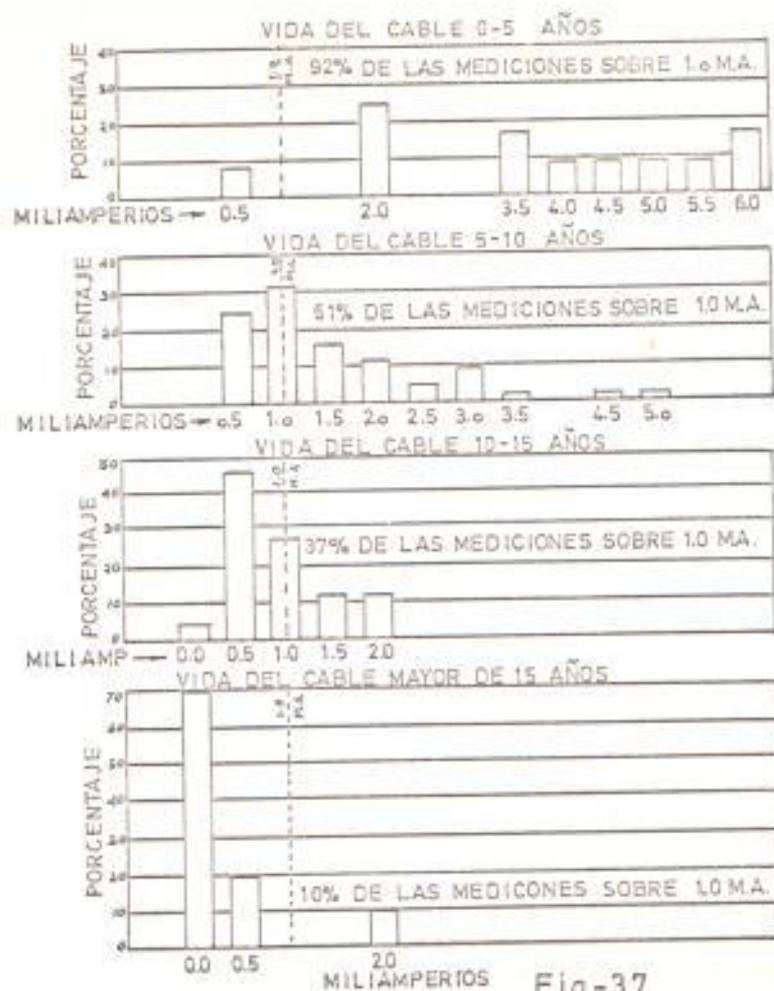


Fig-37

La Fig.37 muestra la distribución de mediciones de corriente en las 100 localidades en que se presentaron fallas por corrosión anódica; los gráficos sugieren una fuerte correlación inversa entre la vida del cable y la descarga de corriente como podemos esperar de la ley de Faraday.

En las mediciones de potencial y corrientes de puntos en el interior de los ductos, es importante considerar las correcciones que hay que introducir por las caídas IR debidas a cualquier corriente parásita que fluya por la camisa del cable. Cuando los cables conducen corrientes parásitas de consideración, por ejemplo, de la bóveda

A a la bóveda B en la Fig.35, habrá una caída de potencial a lo largo de la camisa, y una lectura tomada en cualquier posición media en el ducto o referida a la camisa en la bóveda A no nos dará una buena lectura del potencial y la corriente en el punto de prueba. Para corregir los errores introducidos por este concepto, la práctica usual es determinar la magnitud y dirección de la corriente parásita que fluye en la camisa y calcular las caídas IR al punto de prueba. La corrección apropiada puede entonces ser aplicada a las lecturas de potencial y corriente medidas entre la lámina de plomo y el electrodo de prueba. En la mayor parte de los casos la caída IR entre A y B puede ser medida directamente con un milivoltímetro como muestra la Fig.35.

La resistencia entre el electrodo de prueba como un terminal y el cable adyacente como el otro, es medida en cada punto de prueba como parte del reconocimiento. Las medidas pueden ser hechas en forma muy conveniente, conectando una batería de bajo voltaje (pila seca de 1.5 v), en serie con un miliamperímetro sensitivo entre la camisa de plomo y el electrodo de prueba. La resistencia se calcula del voltaje de la batería y la corriente medida. El miliamperímetro debe de tener una sensibilidad en el orden de 0.05 miliamperios por división, y su resistencia no debe ser mayor a dos o tres ohmios. Un interruptor reversible se necesita para invertir el potencial en el electrodo de prueba y disminuir los errores que pueden introducirse por el pequeño potencial DC de las camisas, por polarización u otros efectos. La corriente de la batería en esta prueba es normal-

mente pequeña y no tiene influencia apreciable sobre el voltaje de la batería. Sin embargo, conviene revisar este voltaje de tiempo en tiempo durante esta prueba.

La resistencia medida como se describe en el párrafo anterior, es un valor algo arbitrario, y es mayormente la resistencia de contacto entre la superficie del electrodo en contacto con el ducto y las paredes del mismo, y representa aproximadamente, la resistencia de contacto por pie de cable en el ducto. El área de contacto variará, dependiendo de las condiciones del ducto. En ductos secos el área de contacto será pequeña, mientras que en ductos llenos de lodo y agua, el área de contacto puede ser la casi totalidad del área del electrodo de prueba. La resistencia del banco de ductos, la tierra, y la resistencia de contacto entre las paredes del ducto y las camisas de plomo de los cables adyacentes también están incluidas en las medidas. Sin embargo, estas resistencias son relativamente pequeñas comparadas con la resistencia del electrodo y aparentemente no tienen influencia apreciable sobre los resultados.

En cualquier tipo de reconocimiento debe de tenerse en cuenta que hay numerosos puntos a través de los ductos en que la camisa de los cables está sometida a pequeños potenciales locales debidos a causas tales como diferentes aereación, concentración de pilas galvánicas, etc., cuyos valores son imposibles de determinar. Normalmente, estos valores son pequeños, pero se ha llegado a suponer la existencia de valores en el orden de 0.1 a 0.2 voltios en casos especiales. En general,

se puede asumir que estos pequeños potenciales locales existen, en un mayor o menor grado, en todo ducto que contiene un cable. La eficacia de estos potenciales en causar corrosión dependerá de la resistencia del medio ambiente en contacto inmediato con la lámina de cable, y de los efectos polarizantes causados por el flujo de corriente.

Esto pone énfasis en la importancia de la resistencia de los ductos y su influencia en la corrosión de las camisas de plomo de los cables subterráneos. La Fig.38 nos ilustra la distribución de las medidas de resistencia de ducto para las 100 localidades en que se detectó fallas por corrosión en las láminas de plomo.

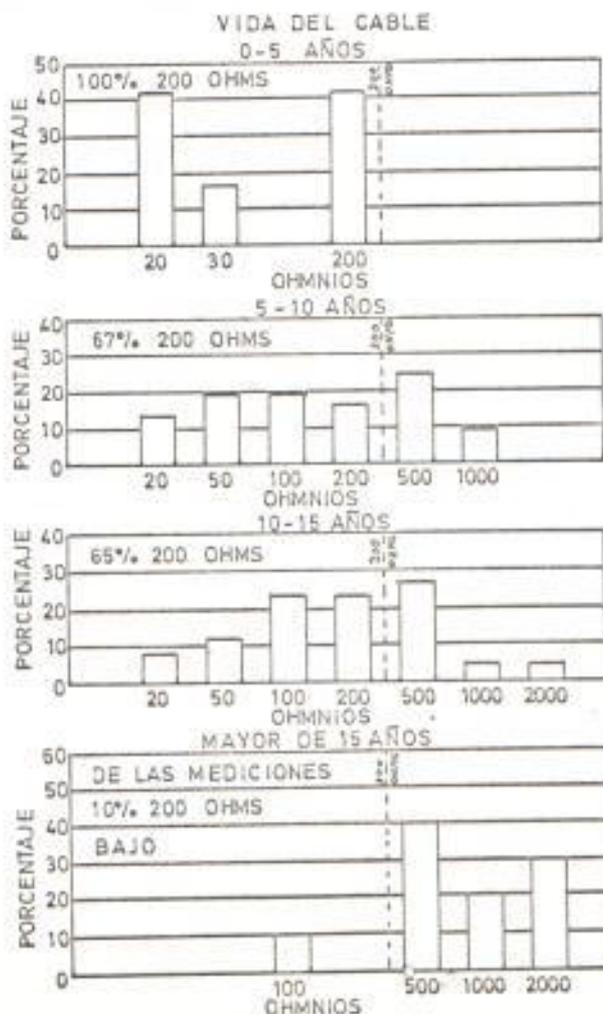


Fig - 38

ANALISIS DE LAS INFORMACIONES OBTENIDAS

Una evaluación exacta de una condición de electrolisis puede sólo ser obtenida a través de un análisis e interpretación adecuados de la información obtenida en las pruebas. Lecturas de potenciales e intensidades no poseen significación particular alguna, a no ser que puedan ser traducidas en términos de corrosión en cables y estructuras. La interpretación deseada de estas informaciones pueden ser obtenidas de la mejor forma a través de la investigación sistemática de las condiciones incidentales a los casos de corrosión y a través de estudiar la información acumulada por años de acuerdo con métodos estadísticos apropiados. La información obtenida en pruebas de electrolisis sirven dos propósitos generales:

- 1.- Para casos individuales, sirven para identificar la causa y proporcionar la información requerida para la aplicación de medidas convenientes para remediar el caso particular.
- 2.- Cuando se clasifica y analiza propiamente la información obtenida de una prueba comparándolas con similares obtenidas sistemáticamente en todo el sistema, esta clasificación constituye las bases para estudios estadísticos de las condiciones existentes en el sistema como un todo. Por estas razones, el tomar y graficar informaciones por observadores entrenados, de acuerdo con un plan bien desarrollado, es de primordial importancia al realizar reconocimientos de electrolisis y al planear mejoras para el sistema.

Los principios arriba anotados han sido aplicados al análisis de

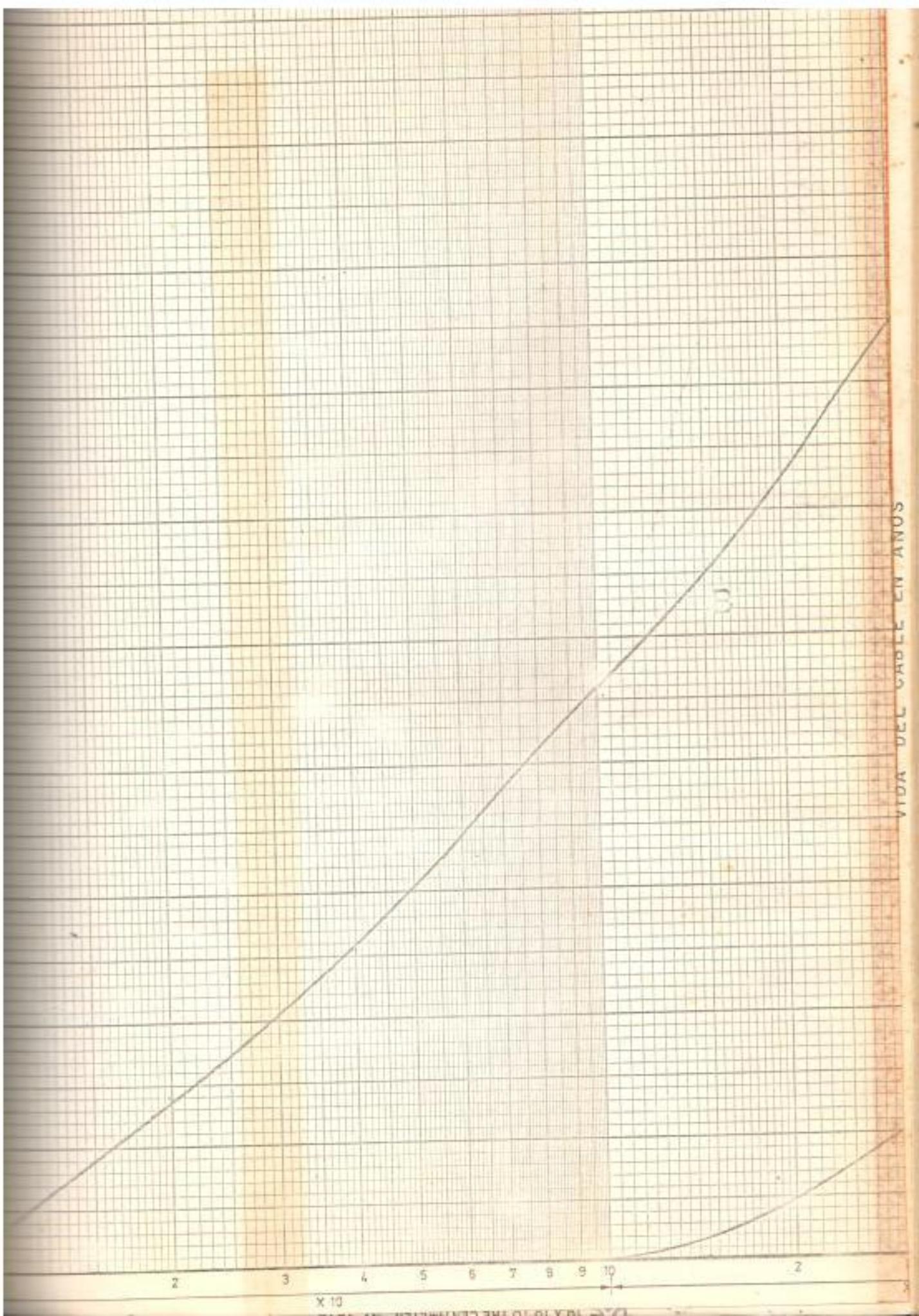
la información obtenida en el reconocimiento de ductos realizados en un período de determinados años con miras a mostrar la relación entre la información obtenida y casos de corrosión en las camisas de plomo. Las figuras 36, 37 y 38 nos muestran los resultados de la aplicación de estos principios.

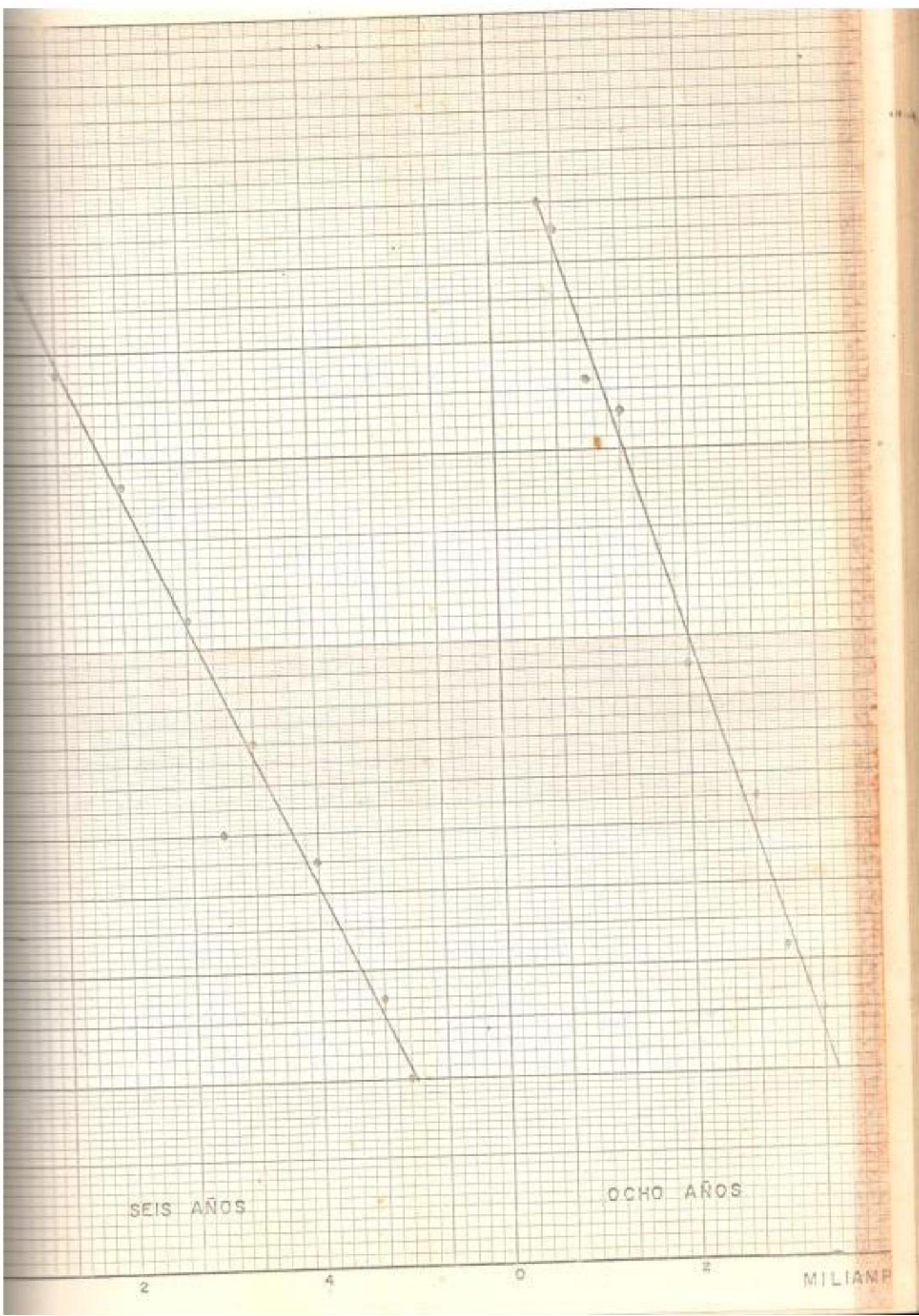
La Fig.39 nos muestra los resultados de la investigación de la resistencia de los ductos. La curva A muestra la resistencia de los ductos graficada en base a un porcentaje acumulado para aproximadamente 9,500 pruebas de resistencia de ductos bien distribuidas a través del sistema. Esta curva muestra, por ejemplo, que en un 65% de las pruebas la resistencia de ductos se encontraba sobre los 1000 ohmios; la curva B es una curva similar de porcentaje de resistencia de ductos obtenida en conexión con aproximadamente 200 fallas de corrosión. En esta curva podemos notar que sólo 5% de las fallas por corrosión ocurrieron en ductos que tenían resistencias de 1000 ohmios o más. Además, se nota que el 70% de las fallas por corrosión ocurrieron en ductos cuya resistencia era 250 ohmios o menos (en curva A sólo 6% del total de pruebas daba lecturas bajo 250 ohmios). Estos resultados indican que la mayor parte de la corrosión ocurre en una parte relativamente pequeña del sistema, 70% de las fallas ocurre en 6% de los ductos. En general, las curvas muestran la importancia de la resistencia de los ductos como un factor para las clasificaciones de ductos con respecto a corrosión. En las bases de esta información, ductos en los cuáles se encuentran resistencias de 250 ohmios o menos, son ductos en los cuáles la corrosión es un pe-

ligro inmediato.

Para relacionar la información recogida en el reconocimiento con casos reales de corrosión y para establecer una base para la interpretación del reconocimiento del ducto, estudios han sido hechos de los valores de potencial, corriente y resistencia tomados en la investigación de 100 fallas por corrosión para las cuales información completa y consistente fue recogida.

La Fig.40 nos muestra la distribución de la vida del cable en su relación a la descarga de intensidad promedio del electrodo de prueba a la pared del ducto en, o cerca, del punto de falla. Para este propósito, la vida del cable, desde la fecha de instalación hasta la fecha de la falla fue agrupada en períodos de años. Esto es, todas las fallas ocurridas dentro de N años menos 5 meses y N años más 6 meses fueron agrupadas bajo N años. Las columnas verticales en la figura muestran los promedios de las corrientes medidas para las fallas en cada uno de los grupos por años. La desviación patrón del valor medio de corriente fue computada y mostrada por la línea vertical asociada con cada una de las columnas. La magnitud de las desviaciones y otros elementos en la información muestran que las variaciones para cualquier período son más de las que pueden ser atribuidas a la casualidad y nos impiden establecer con exactitud una correlación entre corrosión y la corriente promedio medida. Además, la falta de correlación es también evidente del hecho que el área de contacto del electrodo varía considerablemente bajo diferentes condiciones de los ductos, introduciendo así la cuestión de la resistencia de los ductos.





SEIS AÑOS

OCHO AÑOS

2

4

0

2

MILIAMP

Para incorporar la resistencia de los ductos como un factor en el análisis la información fue agrupada, por conveniencia, en períodos de dos años y la corriente con relación a la resistencia del ducto fue graficada en papel semilogarítmico, como se muestra en la Fig. 41. Líneas rectas fueron dibujadas para mostrar los mejores promedios entre intensidad y resistencia del ducto en cada uno de los grupos. De estas figuras, curvas fueron diseñadas para mostrar la relación entre la vida del cable y la corriente para cuatro valores de resistencia del ducto, como se muestra en las curvas de la figura 42. Al comparar estas curvas con las de la Fig. 40, se verá que las desviaciones del promedio de la figura última pueden ser justificadas por las variaciones en la resistencia de los ductos. A pesar de que hay algunas variaciones en la resistividad de los contenidos del ducto y las paredes del mismo, se cree que la resistividad del ducto depende esencialmente del área de contacto. Consecuentemente, para un valor dado de descarga total por pie de cable, la corriente por unidad de área es relativamente menor en los ductos de baja resistividad, esto es, un miliamperio medido en un ducto de 50 ohmios-cm representa una densidad de corriente mucho menor que la misma corriente medida en un ducto de 400 ohmios-cm de resistividad.

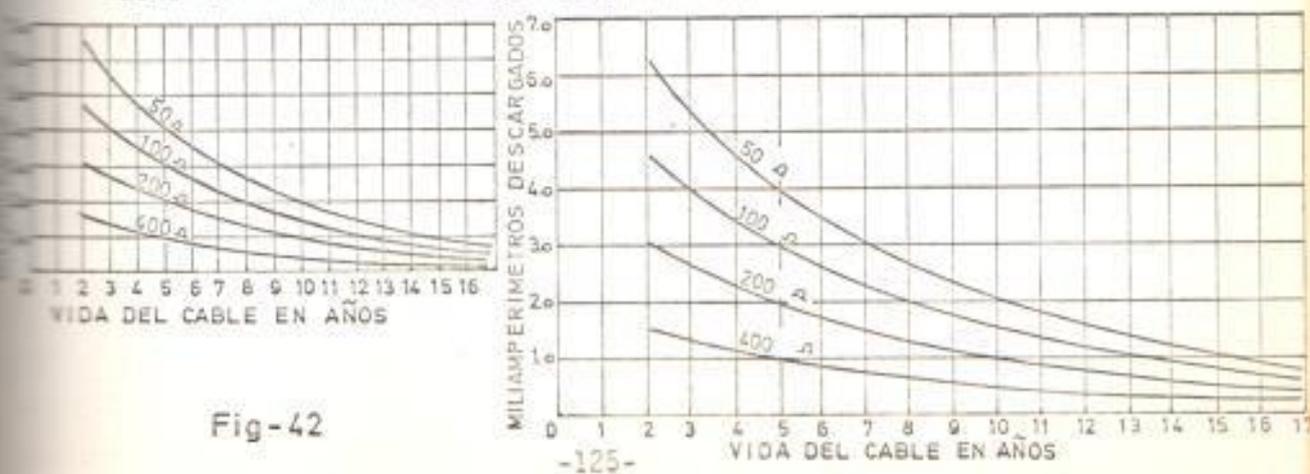


Fig-42

I.- RECONOCIMIENTOS PRELIMINARES Y GENERALES

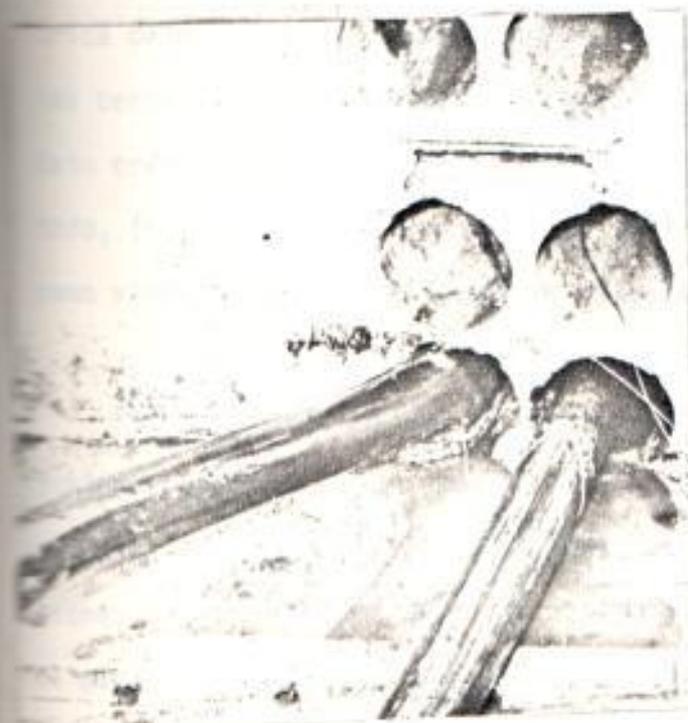
De los reconocimientos preliminares y generales más la información obtenida de los reportes de desconexión de alimentadoras se determinaron dos sectores en los que por las situaciones existentes, la corrosión en los cables PILCPES, era posible. Estos sectores fueron por la calle Boyacá, de Piedrahita a Colón y por la calle Eloy Alfaro, de Gral. Gómez a Mejía.

Estos sectores permanecen inundados toda la temporada invernal y durante la estación seca, el sector de Boyacá-Piedrahita-Junín y el sector de Eloy Alfaro-Gral. Gómez-Mejía sufren inundaciones ocasionales, debido a filtraciones por mal funcionamiento de las tuberías de agua potable. No se encontró filtraciones de aguas servidas a los ductos subterráneos en ninguno de los sectores revisados.

Dos situaciones que colaboran para producir corrosión en los cables PILCPES fueron detectadas por simple observación en los reconocimientos preliminares y generales:

A.- El neutro usado en el sistema de 4.160 voltios, un cable de 4/0 AWG. de cobre ha sido corrido en los ductos sin aislamiento alguno y en muchos casos dicho neutro ha sido corrido en el mismo ducto con el cable PILCPE como lo muestra la fotografía 21. El cable desnudo de neutro se halla conectado a varillas de puesta a tierra de Copperweld en todas las bóvedas del sistema y las camisas de plomo de los cables PILCPE son conectadas al neutro en todos los empalmes.

de plomo y en los terminales o potheads. Esta situación, como ya hemos analizado, crea una pila galvánica entre el plomo de los cables PILCPE y el cobre del neutro desnudo, causando la corrosión del primer metal.



FOTOGRAFIA 21

Después de abrir el circuito, una corriente de cortocircuito al cable de la planta de 45 miliamperios fue medida, con el cable neutro de cobre colectando la corriente y un voltaje galvánico de cerca de 400 milivoltios. Esta corriente consumiría aproximadamente 3 lbs. de plomo en un año. Como el neutro y las camisas de plomo están interconectadas con otras estructuras metálicas, no toda la corriente medida provendrá del plomo y la pérdida por corrosión no será las 3 lbs. indicadas, sino un valor menor; pero, la importancia de la pila galvánica entre el neutro desnudo de cobre y el plomo del cable de alta tensión

La influencia del cable desnudo de cobre usado como neutro en la corrosión de los cables de plomo es indicada por el hecho de que una sección de una cuadra (aproximadamente 100 m.) que fue aislada del neutro de la planta, presentó una resistencia al resto del cable de la planta de 8,5 ohmios. Inmediatamente des-

queda establecida y claramente ilustrada.

B.- El cable PILCPE como ya hemos indicado tiene un aislamiento de polietileno sobre el plomo. Ha sido costumbre en la Empresa Eléctrica dejar el metal al descubierto en los empalmes de plomo y en las cercanías a los cabezotes o potheads (ver fotografías 1, 19 y 20) Esto crea una desfavorable relación de áreas entre el ánodo y el cátodo, (neutro de cobre desnudo) que acelera la corrosión del primero, como vimos en la primera parte de esta tesis.

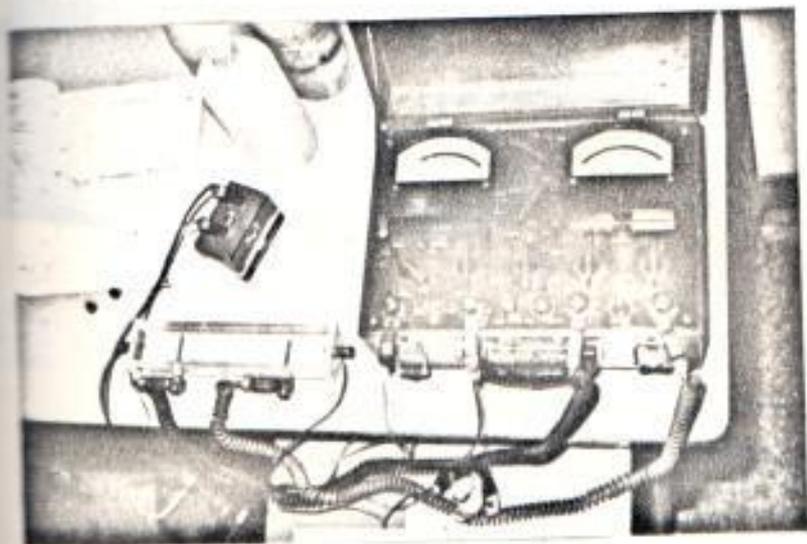
Nos referimos una vez más a los reportes de desconexión que adjuntamos en el apéndice, sección III-A. Podemos constatar que con excepción de una, todas las desconexiones han sido debidas a explosiones en los empalmes de plomo, único punto del cable PILCPE en que el plomo está expuesto a contacto con el electrolito.

III.- RECONOCIMIENTOS ESPECIALES

Al corroerse el plomo, el compuesto aislante se sale por el orificio producido, permitiendo la entrada de agua. El agua al entrar en contacto con los cables energizados produce el consiguiente cortocircuito, destruyéndose el empalme de plomo en el sector en que la corrosión ha ocurrido. Por este motivo no fue posible realizar análisis químicos de los compuestos de corrosión de los empalmes de plomo.

Sin embargo, en aquellos empalmes que se encontró con agujeros pro-

afectados por corrosión pero que aún el compuesto no había sido completamente evacuado (fotografías 18, 19 y 20), se procedió a limpiar el empalme y examinar la superficie corroída con un microscopio portátil. No se recogió los productos de corrosión por el peligro que existía de aumentar el diámetro del orificio y hacer más difícil la sellada del empalme.



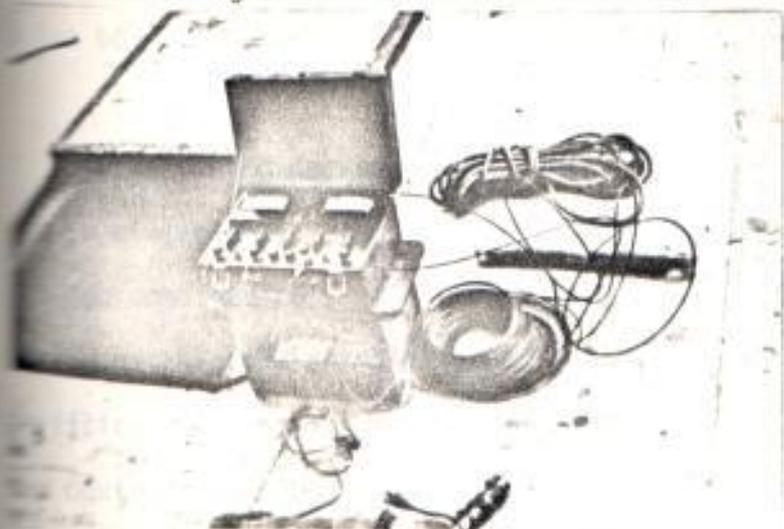
FOTOGRAFIA 22

Se realizaron análisis químicos y calorimétricos de muestras del agua acumulada en 6 bóvedas en las que las camisas de plomo habían sufrido corrosión.

Los resultados los encontramos en la sección III-C del apéndice. Así mismo utilizando un "medidor múltiple combinado" especialmente diseñado para efectuar mediciones de corrosión se procedió a determinar la resistividad de las muestras de agua utilizando el método del "soil box" (ver fotografía 22 y detalles del "soil box" y del M.C.M. en el apéndice, sección II) Los resultados están reunidos en la sección III-D del apéndice.

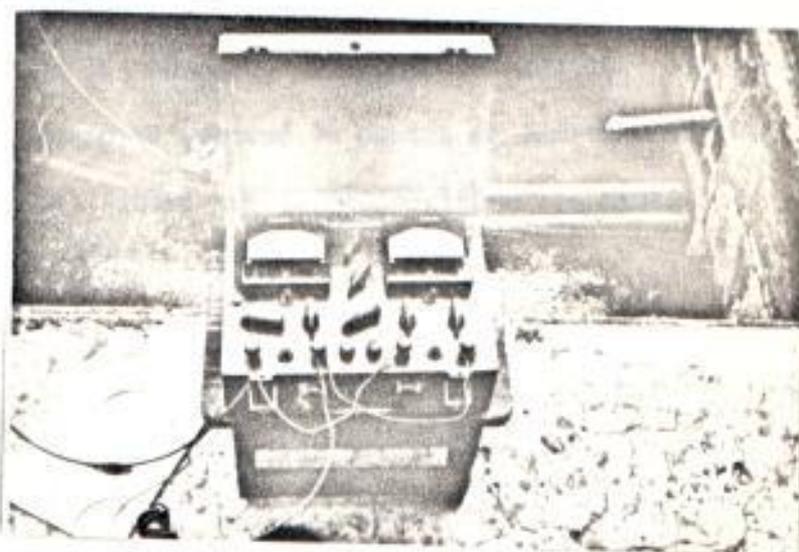
Por último se efectuaron reconocimientos de ductos con el M.C.M. y el electrodo de plomo en el sector de Boyacá, de Sucre a Piedrahíta y en el sector de Eloy Alfaro, de Argentina a Mejía, sectores en los que se han experi-

mentado casi todas las fallas por corrosión (fotografías 23 y 24). También se efectuó estos reconocimientos en tres sectores más de la ciudad. Los datos recogidos se encuentran tabulados en el apéndice, sección III-D



FOTOGRAFIA 23

FOTOGRAFIA 24



INTERPRETACION DE LOS RECONOCIMIENTOS Y RECOMENDACIONES

I.- RECONOCIMIENTOS PRELIMINARES Y GENERALES

Se recomendó proceder a taponar en forma debida todas las salidas y

locas del sistema de ductos subterráneos en cada una de las bóvedas del sistema de Guayaquil. Así mismo, se recomendó reparar cualquier situación que podría ocasionar filtraciones de agua potable o aguas servidas a las bóvedas subterráneas.

Se recomendó que todos los cables de neutro usados en el sistema tengan su aislamiento y que por ningún concepto se utilicen cables de cobre desnudo como neutros. Al constatarse la gran importancia de la pila galvánica establecida entre el plomo y el cobre desnudo, e inclusive entre superficies galvanizadas y el cobre desnudo, se ordenó el inmediato retiro de los neutros desnudos y su reemplazo por conductores aislados. En aquellos casos en que no se pudo o no fue conveniente retirar pequeñas extensiones de neutro, en el interior de las bóvedas, se procedió a encintar las extensiones desnudas. Igual proceso se efectuó en puntos de empate o uniones. También fueron encintados los cables que interconectaban las camisas de plomo entre sí y con los neutros del sistema.

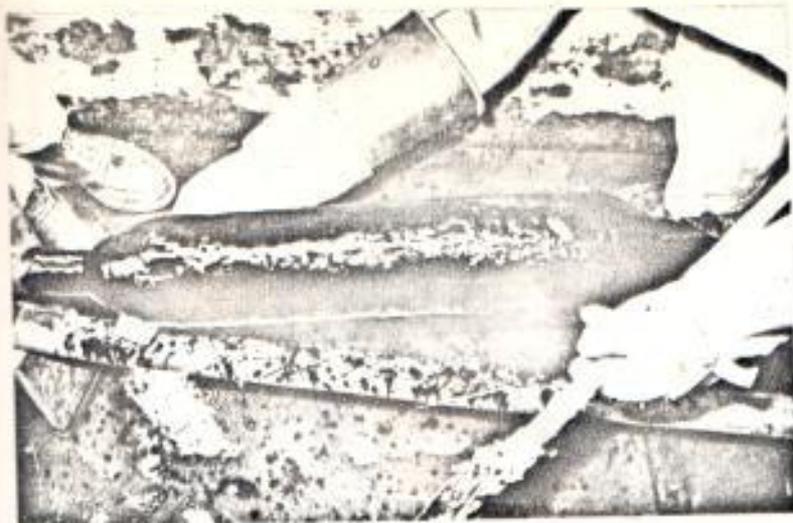
Aunque aislando el cable del neutro se estaba eliminando casi por completo la pila galvánica, establecida con los empalmes de plomo, para tener una mayor seguridad de que se estaba haciendo más difícil el establecimiento de la pila galvánica se procedió a revestir los empalmes de plomo.

Para esta operación se siguieron dos procesos algo similares, que se encuentran ampliamente ilustrados en las fotografías 25, 26, 27, 28, 29 y 30. En el primer caso se aplicó un baño de compuesto asfáltico caliente sobre el empalme. Inmediatamente antes de que el compuesto se endurezca,

se aplicó sobre éste una vuelta de cinta de lino de 3/4" Luego, se aplicaron sobre la cinta de lino dos vueltas de cinta de caucho vulcanizante y dos de cinta de plástico para impermeabilizar por completo al empalme. En el otro proceso se sustituyó el compuesto asfáltico por una pintura anticorrosiva, la cual fue aplicada dos veces con profusión, una directamente sobre el plomo y otra sobre la cinta de lino, hasta que ésta estuvo empacada. Se dejó secar la pintura y se procedió con la aplicación de las cintas de caucho y plástico como en el caso anterior.

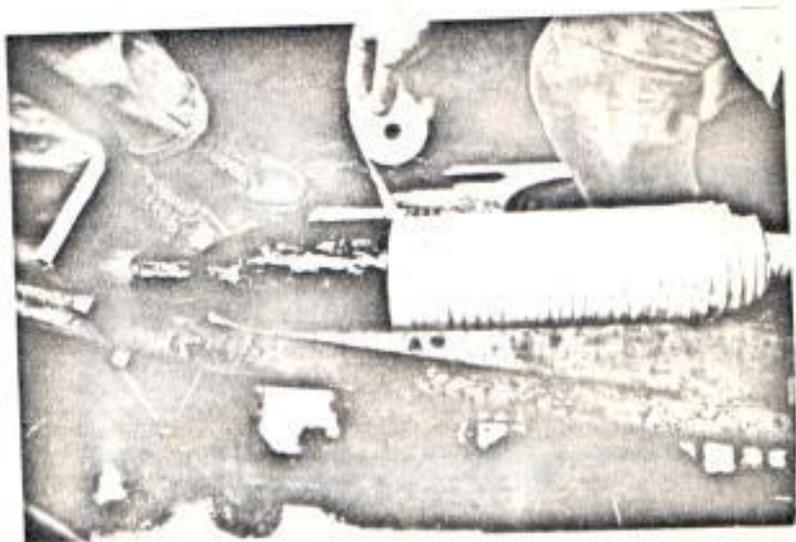
III.- RECONOCIMIENTOS ESPECIALES

De las observaciones que se efectuaron con un microscopio portátil en los empalmes de plomo que presentaban indicios de corrosión se pudo constatar el característico ataque intercrystalino que evidencia la existencia de corrosión por efecto galvánico. El ataque intercrystalino fue más palpable en la bóveda frente a la subestación Doyacá, en la calle Doyacá entre Padre Aguirre y Manuel Galecio, y en otra bóveda de Eloy Alfaro y Letamendi. Como se puede observar en la sección III-C del apéndice, mediciones eléctricas realizadas con el agua encontrada en estas bóvedas, nos indican que ambas registraron los valores más bajos de resistividad; dándonos una clara explicación del porqué de la mayor corrosión observada en estas bóvedas. Además en este sector los ductos se encuentran a un nivel inferior de lo que normalmente se los instala, ocasionando que los períodos de inundación de los mismos, sea mayor, por lo tanto, el tiempo que la pila galvánica actúa. Por último en este sector se encontraban dos conductores a tierra de cobre desnudos N°4/0 y un conductor N°2/0, lo

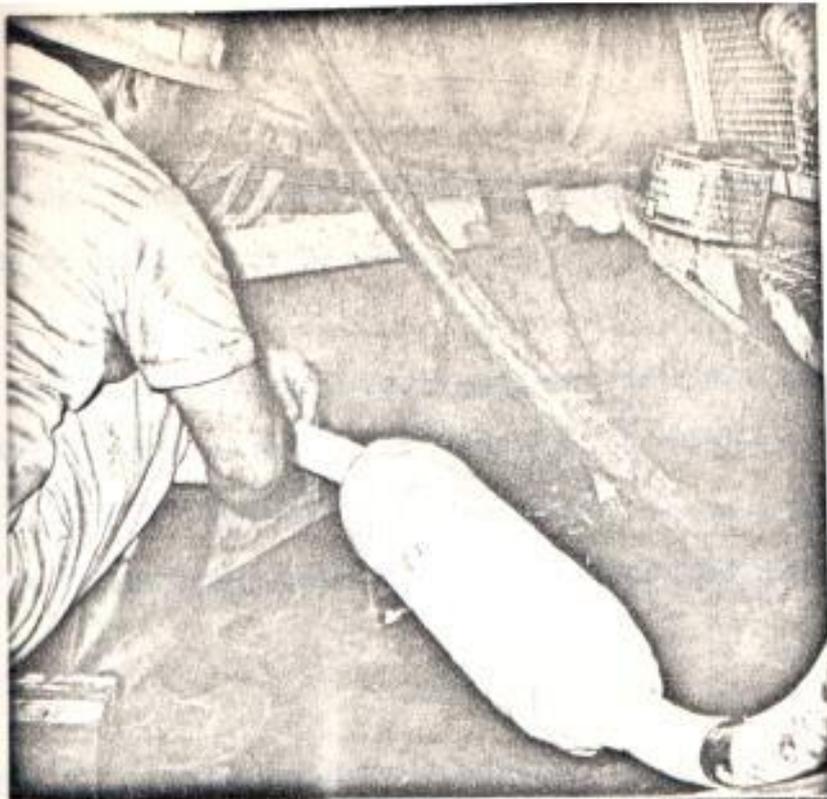


FOTOGRAFIA 25

FOTOGRAFIA 26



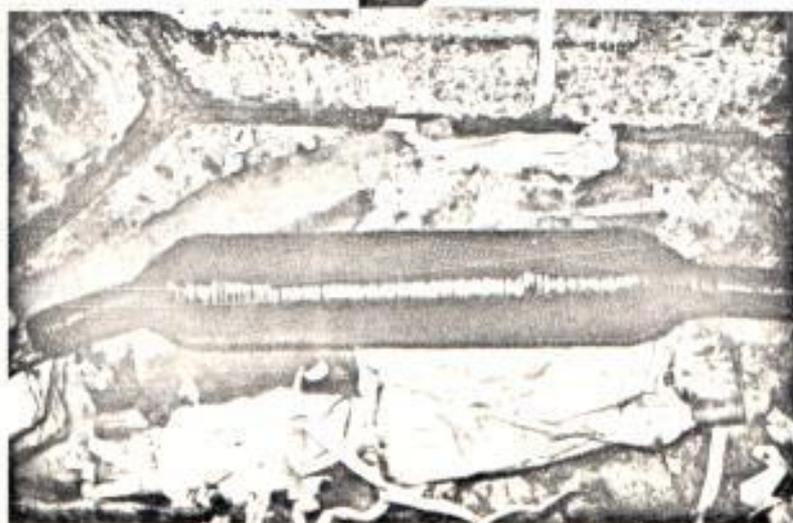
FOTOGRAFIA 27



FOTOGRAFIA

28

FOTOGRAFIA 29



FOTOGRAFIA 30

representaba una gran área catódica recogiendo la corriente que se descargaba de los empalmes de plomo.

Los análisis de las muestras de agua nos indican PH en el orden de 7,4 y ausencia de materiales orgánicos. Corrosión química no es por lo tanto la causante de nuestras dificultades. Los resultados del reconocimiento de ductos están resumidos en los gráficos del apéndice, sección III-2.

Sector de Eloy Alfaro-Argentina-Ave. Olmedo: Se obtuvieron medidas de resistividad del ducto hasta 300 ohmios-cm., con un valor promedio de 800. Se registraron intensidades de corriente de hasta 2 miliamperios, aunque el valor promedio fue algo más bajo que 1 ma. Por último, potenciales de hasta 0,5 voltios fueron medidos, el valor promedio fue establecido en algo menos de 0,25 voltios.

Sector de Boyacá-Padre Aguirre-9 de Octubre: La resistividad de los ductos se estableció en un valor promedial de algo más de 800 ohmios-cm. Se registró una medición inferior a los 200 ohmios-cm. Cercano a la bóveda frente a la subestación Boyacá, los valores de descarga eléctrica promedia-ron cercanos a un valor de 0,8 ma., y se registró un valor máximo de 2 miliamperios. Potenciales de hasta 0,65 voltios fueron medidos, estableciéndose un promedio de 0,3 voltios.

Sector Boyacá-Vélez-Colón:

	<u>Valor Máximo</u>	<u>Valor Mfimo</u>	<u>Valor Promedio</u>
Resistividad	150.000 ohm-cm.	800 ohm-cm.	3.000 ohm-cm.
Corriente	0,8 ma.	0,1 ma.	0,4 ma.
Voltaje	0,3 v.	0,06 v.	0,15 v.

Sector B. Moreno-V.M. Rendón-9 de Octubre:

	<u>Valor Máximo</u>	<u>Valor Mfimo</u>	<u>Valor Promedio</u>
Resistividad	1400 ohm-cm.	950 ohm-cm.	1.100 ohm-cm.
Corriente	0,4 ma.	0,1 ma.	0,2 ma.
Voltaje	0,15 v.	0,09 v.	0,11 v.

Sector Rumichaca-9 de Octubre-Luque:

	<u>Valor Máximo</u>	<u>Valor Mfimo</u>	<u>Valor Promedio</u>
Resistividad	1.400 ohm-cm.	600 ohm-cm.	900 ohm-cm.
Corriente	0,7 ma.	0,1 ma.	0,5 ma.
Voltaje	0,33 v.	0,12 v.	0,2 v.

De estas mediciones deducimos que los sectores Eloy Alfaro-Argentina-
Ave. Olmedo y, Boyacá-Padre Aguirre-9 de Octubre, son sectores corrosivos.

Además de las circunstancias que ya hemos anotado sobre estos sectores, cabe indicar que están cercanos a la Planta Térmica Guayaquil y a la subestación Boyacá, lugares en que existen extensos sistemas de puesta a tie-

En los otros sectores revisados el ambiente corrosivo era algo menor, pero no a tal grado que deje de representar una dificultad con la cual hay que enfrentarse y tomar medidas para su corrección.

Como la corrosión de los cables de plomo en el sistema subterráneo de Guayaquil, se ha circunscrito a los empalmes de plomo, se consideró que con las medidas tomadas de aislar el plomo y el cobre, taponar las bóvedas e instalar bombas de centina en todas ellas, no era necesario aplicar ahora un sistema costoso de protección catódica.

Se consideró conveniente esperar un par de años antes de tomar una decisión sobre la instalación de protección catódica a los cables de plomo. Por otro lado, seguramente, será necesario proteger transformadores del sistema con ánodos de zinc, los cuales también protegerán indirectamente a los cables de plomo.

Se recomendó lavar los ductos con mangueras de presión y considerar este proceso siempre antes de instalar cables en un banco de ductos nuevos.

Reconocimientos de ductos serán realizados nuevamente el próximo año en el mes de marzo o de abril, en plena temporada lluviosa para continuar

Revisando estadísticas y tener así toda la información disponible para cuando llegue el momento de evaluar experiencias y considerar nuevamente la posibilidad de instalar un sistema de protección catódica.

Se recomendó efectuar la puesta a tierra en las nuevas bóvedas a construirse en la forma en que lo muestra la Fig.43

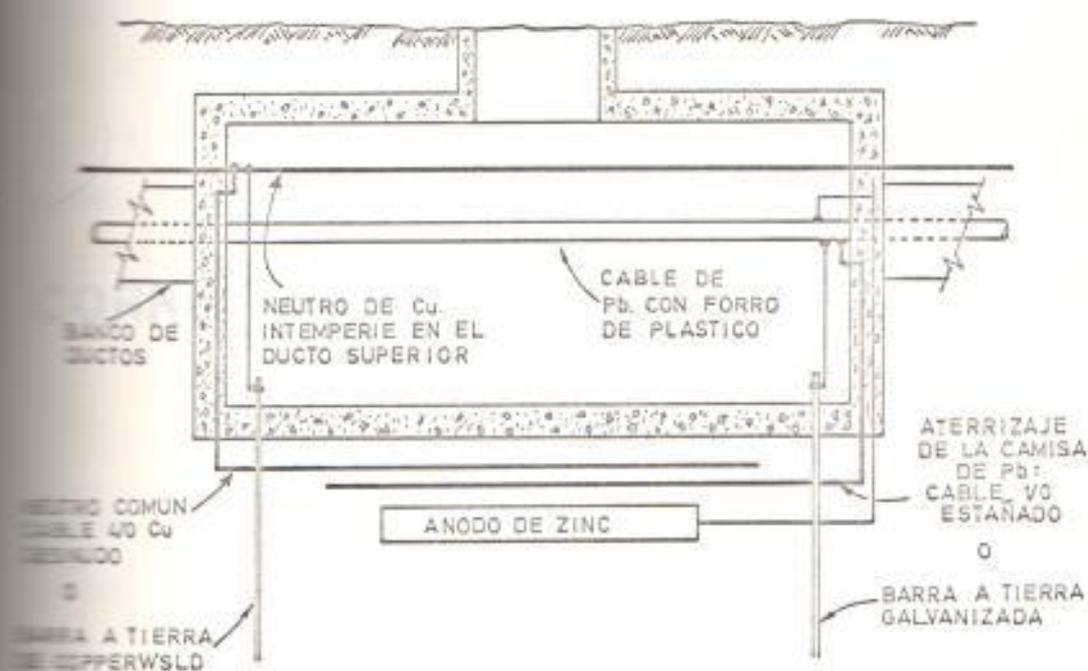


Fig-43

Este método permite aterrizarse separadamente el neutro común y la camisa de plomo que está aislada eléctricamente. Espaciadores aislantes son usados en todos los cabezotes terminales para permitir aterrizarse interruptores, capacitores, etc., sin aterrizarse las camisas. Con la camisa así aislada, si tenemos que aplicar protección catódica, la corriente necesaria no será muy grande. A la salida de la planta será necesario aplicar una de las piletas galvánicas de aterrizaje que ya describimos.

CORROSION EN LOS TRANSFORMA- DORES

El medio ambiente que se le presenta a un transformador en una bóveda subterránea es muy distinto y mucho más severo que el que rodea a un transformador convencional montado en un poste. Como el aire en la bóveda es caliente y húmedo la mayor parte del tiempo, el ambiente es altamente corrosivo. Los productos que se acumulan en la superficie del tanque una vez eliminada el agua de la bóveda pueden ocasionar corrosión en presencia de un aire húmedo. Si la corrosión en la presencia de aire húmedo puede ser de consideración, el fenómeno corrosivo cuando hablamos hablando de bóvedas expuestas e inundaciones por períodos más o menos largos puede ser sumamente intenso. Este último tipo de corrosión será el objeto principal de nuestra investigación.

La clase y corrosividad el agua en la cual el transformador se encuentre sumergido, así como el tiempo que se encuentre sujeto a la inmersión, varía en forma notoria de un sector a otro del sistema. La resistividad del agua es el mejor indicador de su corrosividad, resistividades bajas significan más materiales disueltos y más corrosión. El grado de acidez o alcalinidad del agua natural no es una indicación importante de su corrosividad. Sin embargo, el agua que tiene un PH de 4 o menos produce fuerte corrosión al acero dulce. Agua salada cercana al océano es muy corrosiva. Otras agua altamente corrosivas que pueden entrar en las bóvedas subterráneas son: 1) Agua ácida proveniente de tuberías, fangales y tanques sépticos; 2) agua filtrada de jardines y pastos y zonas verdes que contengan fertilizantes, abonos químicos; y 3) agua

calina que se encuentra presente en muchas áreas de poca precipitación pluvial.

La corrosión que se presenta en los transformadores instalados en bóvedas subterráneas trae consigo todos los problemas de control que ya hemos presentado en esta tesis. Sin embargo, dos situaciones hacen que el problema en los transformadores sea algo especial. En primer lugar, las bóvedas por su tamaño reducido dificultan la inspección del tanque para señalar inicios de corrosión y dificultan aún más cualquier reparación que se intente realizar en la bóveda. Por otro lado, retirar el transformador para repararlo es un proceso caro y complicado en el cual se hace imprescindible interrumpir el servicio eléctrico a los clientes en la mayor de las ocasiones.

Hay un número de cambios que pueden ser hechos en la construcción y el diseño de los sistemas subterráneos para reducir el ataque galvánico en los transformadores instalados en bóvedas.

II- UTILIZACIÓN DE METALES CON POTENCIALES GALVANICOS IGUALES O MUY CERCANOS.

Ya hemos mencionado cuando introducimos la teoría general de la pila galvánica y de la corrosión por metales diferentes, que si utilizamos el mismo metal para todos los elementos del sistema subterráneo reduciríamos la corrosión galvánica a su mínima expresión.

Cobre sería el metal ideal para usar en los tanques de los transformadores; tanques de cobre desnudo sólidamente aterrizados al neutro de corriente del sistema, constituyen un sistema seguro y libre de corrosión, pero las razones principales hacen este uso inconveniente, y hasta prohibitivo. En primer lugar tenemos el alto costo que esto implicaría en el transformador; en segundo lugar existe el problema corrosivo que se pueda estar pasando a estructuras galvanizadas o a estructuras de otro metal más negativo en la escala galvánica que el cobre al aumentar las áreas catódicas e incrementar la densidad de la corriente que se descarga del ánodo. En nuestro caso estaríamos conspirando contra la integridad de los cables de aluminio, por ejemplo.

Si no es económico usar cobre como el metal del tanque de los transformadores, lo lógico es usar metales muy cercanos a él en la escala de Potenciales Galvánicos. Tanques de transformadores hechos de hierro forjado fueron usados por muchos años en sistemas subterráneos, pero su peso y el costo siempre en aumento hizo que la Industria Eléctrica experimente con otros metales y aleaciones.

Algunas empresas utilizan tanques de acero dulce a los cuales se les aplican capas de pintura altamente anticorrosiva, más adelante hablaremos de los problemas que en ellos se presentan. Otras han utilizado aceros inoxidables de varios tipos, de costo más elevados, sin pinturas protectoras, pero con protección catódica aplicada al tanque desnudo. Estos tanques son más resistentes a la corrosión, pero como ya indicamos su costo es más alto sin considerar el costo del ánodo de sacrificio usado para

protegerlo catódicamente. En la tabla VII vemos el efecto de los costos de estos materiales en el costo de la fabricación y el precio de venta. Los valores indican que si incluímos el costo adicional para fa-

TABLA VII

PROTECCIÓN EN LOS TANQUES DE ALEACIONES

Material usado en el tanque	Costo Relativo/lb.	%Incremento sobre la alternativa de usar acero dulce con pintura anticorrosiva	de acero inoxidable AISI 304 cuesta cuatro veces más que uno hecho de acero dulce. Este costo adicional implica un aumento de precio de 20 a 35% para el transformador.
Acero Dulce con pintura anticorrosiva	1	0	
Acero Inoxidable Tipo SAE 51409	2	10 a 15	
Acero Inoxidable Tipo AI 51304	4	20 a 35	
Aleación de Silicio-Bronce	6	45 a 60	
Aleación de Cobre-Níquel	8	75 a 100	

Hay además dos problemas fundamentales asociados con la instalación de este tipo de tanques desnudos con protección catódica. Primero, no estamos protegiendo la parte que no está sumergida del tanque desnudo; el mojarse y secarse en forma alternada y repetida hará que el acero se corroa rápidamente. Segundo, corrientes mayores son necesarias para proteger el metal cuando un tanque está completamente sumergido, haciendo que el ánodo se consuma rápidamente. Si el electrolito tiene baja resistividad la corriente máxima que produzca el ánodo puede no ser suficiente para pro-

al tanque entero. Por último, existe el problema de que en estos aceros inoxidables, las áreas que han sido soldadas sufren cambios que disminuyen su resistencia a la corrosión.

Un nuevo acero inoxidable con aleaciones de cromo ha sido últimamente utilizado con óptimos resultados en los tanques de los transformadores RST. (Transformadores Residenciales Sumergibles). Este nuevo acero contiene 11.5% de cromo, es bajo en carbono y es estabilizado a base de titanio para obtener mayor resistencia en las zonas en que se le aplicado soldadura. Este acero ha exhibido excelente resistencia a la corrosión sin mucha dependencia en el grosor del tanque o la pintura anticorrosiva aplicada.

En electrolito de baja resistividad (menos de 100 ohmios-cm.) corrosión puede hacerse presente en estos transformadores, sin embargo, esta corrosión puede eliminarse aplicando un voltaje de protección moderado (-0.45 voltios) que resulta en una vida conveniente para el ánodo de sacrificio y no tiende a "pelar" las capas protectoras de otras estructuras metálicas en las bóvedas.

Parecería obvio, como resultado de todos los problemas de corrosión que se presentan en tanques metálicos, y que como vemos, no podemos eliminar por completo, que el uso de tanques plásticos en lugar de los metálicos sería la solución definitiva para el problema corrosivo. Desgraciadamente, tanques de plástico que han sido usados con éxito en otras aplicaciones no han podido ser utilizados para tanques de transformadores al

encontrarse las siguientes dificultades:

- A.- Necesidad de resistencia perdurable a la descomposición del plástico por acción del agua caliente que usualmente rodea al tanque.
- B.- Capacidad suficiente de transferencia e irradiación de calor.
- C.- Obtención de una adecuada resistencia mecánica y permeabilidad del tanque.
- D.- Resolución de los problemas anotados a un precio conveniente.

Vale anotar, antes de abandonar el tema que también se ha experimentado con tanques de porcelana en las bóvedas subterráneas no habiendo sido posible para el autor de esta tesis obtener información sobre la experiencia de la Industria Eléctrica con este material.

III.- AISLAR EL CATODO DEL ELECTROLITO

Para lograr esto, todo lo que tenemos que hacer es forrar, aislar, pintar o cubrir de alguna manera todos los metales que son normalmente catódicos con respecto al tanque del transformador. En una bóveda subterránea el cátodo es para el tanque del transformador el cable neutro de cobre desnudo y el sistema de puesta a tierra.

El uso de cables de cobre desnudo como neutro es muy común en los sistemas subterráneos debido al bajo costo que significa y el alto grado de aterrizaje que se obtiene al permitir que el neutro esté en contacto directo con la tierra, ductos y agua. Por otro lado el neutro desnudo

disminuye la posibilidad de que se presenten voltajes de neutro a tierra durante fallas en los conductores. Sin embargo, el uso del neutro de cobre desnudo implica la creación de una destructiva pila galvánica con los tanques normalmente de acero dulce, de los transformadores sumergibles; el cobre desnudo del neutro es el cátodo y el tanque de transformador el ánodo. Este problema ya lo analizamos al presentar el fenómeno corrosivo de los cables de plomo y recomendaciones fueron dadas para eliminar todos los neutros desnudos. Lo aconsejable es por lo tanto formar todos los conductores neutros para disminuir de esta forma el ánodo catódica, y en consecuencia, disminuir la densidad de corriente galvánica que abandona el ánodo.

La disminución del área de contacto entre el conductor neutro y la tierra no debe de considerarse como un perjuicio muy grande al sistema de aterrizaje. La cantidad de metal desnudo que se requiere en contacto con la tierra para proveer un sistema adecuado de aterrizaje es una función directa de la resistividad de la tierra. Sin embargo, la cantidad de actividad galvánica corrosiva es inversamente proporcional a esta resistividad. Por lo tanto en áreas donde la resistividad del medio es alta, la actividad galvánica corrosiva no es de consideración, y los conductores neutros desnudos pueden ser usados para dar un aterrizaje óptimo. Por otro lado, con áreas de baja resistividad del medio, la corrosión será grande; afortunadamente, una menor área del neutro en contacto directo con la tierra proporciona un aterrizaje tan adecuado como el proporcionado por un área mayor del neutro desnudo en contacto con la tierra en áreas de medios con mayor resistividad.

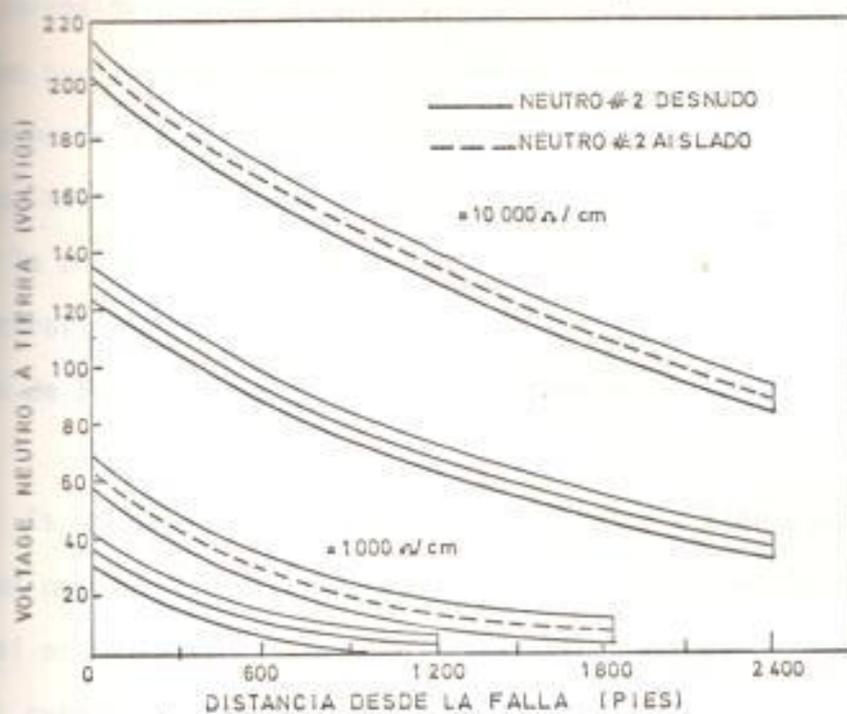


Fig -44

Voltajes de neutro a tierra para una corriente de falla de 1,000 amperios pueden ser calculados para circuitos primarios de gran extensión con cables # 2 AWG como neutros. (Fig.44). Las curvas sólidas muestran los voltajes producidos por una corriente de falla de 1,000 amperios en un cable con el neutro desnudo y en contacto directo con la tierra. Las líneas pespunteadas muestran los voltajes producidos por la misma corriente de falla en cables aislados aterrizados sólo por barras a tierra en los transformadores y en los tableros de los clientes. Los valores están dados para resistividades de 1,000 y 10,000 ohmios-cm. Es de importancia observar que el voltaje de neutro a tierra para el cable aislado en un medio de 1,000 ohmios-cm. de resistividad es mucho más bajo que el voltaje de neutro a tierra para el conductor desnudo en un suelo de 10,000 ohmios-cm. No solamente el aislar el neutro reducirá

La corrosión que los tanques de los transformadores y los cables de aluminio puedan experimentar, sino que permitirá que la protección catódica pueda ser aplicada a un menor costo y con mayor eficiencia. Por otro lado, la corrosión galvánica, que el mismo neutro puede sufrir por la acción de pilas galvánicas locales originadas por los diferentes electrolitos que el neutro tiene que atravesar o por diferente aereación de los ductos o por impurezas, también es detenida.

Es sabido que los potenciales de neutro a tierra pueden ser reducidos usando un neutro de mayor calibre. Esto debe de tenerse en mente si es necesario aislar neutros existentes. La resistividad del medio, corrientes de falla, etc., son otros datos que entran en la decisión. Como una ilustración, si en lugar de cable # 2 AWG usáramos un conductor # 4/0 AWG aislado y aterrizado de igual forma, la reducción en voltaje de neutro a tierra para la misma falla será de un 40%.

III.-AISLAR EL TRANSFORMADOR DEL ELECTROLITO APLICANDO CAPAS DE PINTURA ANTICORROSIVA

La aplicación de una capa protectora anticorrosiva es esencial para asegurar larga vida a las estructuras metálicas que se utilizan en instalaciones subterráneas. Un número casi infinito de revestimientos protectores existen en el mercado, pero debido a los requerimientos particulares de los sistemas subterráneos, tres tipos han sido los que han recibido aceptación por su óptimo comportamiento. Ellos son los vinilos, los epoxies simples, y los epoxies carbón-alquitranosos.

La importancia de la selección del protector a usarse puede destacarse si hacemos una breve descripción del medio operan. El tanque de un transformador puede operar a una temperatura interna de 100°c. mientras se encuentra sumergido en agua de baja resistividad con sales diluidas en ella. Al mismo tiempo está sometido a dilataciones mecánicas debidas al ciclo variable de carga. Para poder sobrevivir a estas condiciones, el revestimiento debe poseer las siguientes características: 1.- Resistencia mecánica; 2.- Resistencia química; 3.- Impermeabilidad; 4.- Resistencia a degeneración por temperatura, y 5.- Alto poder de adhesión. Las pruebas a las que se someten los revestimientos protectores deben satisfacer estas condiciones. Valores absolutos son de menor importancia que valores relativos, por lo tanto las pruebas deben de comparar los tipos de revestimientos bajo mismas condiciones de trabajo.

El comportamiento de una capa protectora sólo debe ser convenientemente evaluado si es aplicada a una superficie correctamente preparada. No hay forma específica que sea la mejor para preparar superficies metálicas, pero es esencial que la misma se encuentre completamente limpia. La experiencia indica que la limpieza mediante el chorro de arena es el método que produce una superficie limpia y brillante, que asegura una buena adherencia del revestimiento.

A.- PRUEBAS MECANICAS: Las propiedades mecánicas de los revestimientos son importantes ya que estos deben ser lo suficientemente fuertes y elásticos para absorber sin descascararse los impactos a los que pueden estar sujetos. Una penetración en el revestimien-

to a consecuencia de un golpe o rozamiento, dejará expuesto al metal del tanque, formando una relación ánodo-cátodo sumamente desfavorable y la cual puede ser desastrosa en una atmósfera corrosiva. La pérdida que sufre el metal en un electrolito puede ser fácilmente calculada de la Ley de Faraday.

$$\text{GRAMOS DE METAL PERDIDOS} = \frac{\text{P.M.} \times I \times T}{(96.500) \times n} \quad (6)$$

en donde

P.M. = Peso Molecular

I. = Intensidad

T. = Tiempo en segundos

n. = Electrones arrancados por Atomo

El volumen de acero en un agujero de 1/32" en una plancha de acero de medida 12 representa un peso molecular de 55,8; una corriente galvánica de sólo 1 microamperio, corroerá esta cantidad en sólo 350 días. En términos prácticos, esto significa que una falla en el revestimiento del transformador que deje expuesto un área equivalente al área de un círculo de 1/32" puede resultar en una falla del tanque metálico en menos de un año. Por supuesto que estamos hablando de situaciones ideales, pero en ningún momento químicas.

Pruebas de impacto han sido hechas en varios estudios de revestimientos protectores, y a pesar de que los resultados variaron mucho, si se ha podido determinar en forma concluyente que los vinilos soportaron mejor las pruebas seguidos por los epoxis sencillos o simples. (Fig.45)

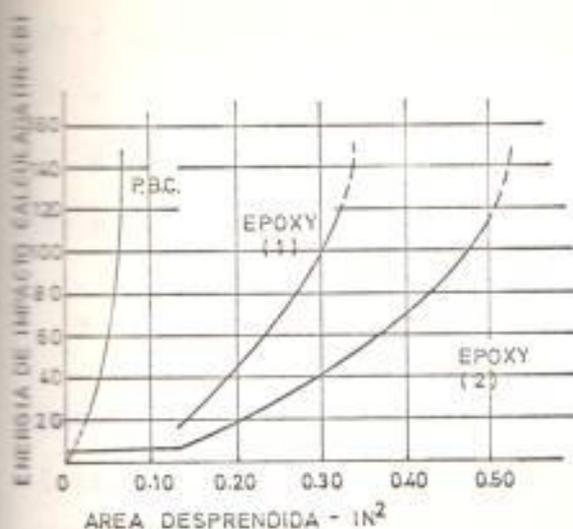


Fig-48

Las bases usadas son muy importantes para prevenir desprendimientos de una capa anticorrosiva. Por lo tanto es conveniente establecer pruebas para las distintas combinaciones de bases y revestimientos protectores que se pueden usar, las bases deben ser específicamente diseñadas para el uso con cada revestimiento.

D.- PRUEBAS DE PENETRACION DE AGUA: Estos tipos de pruebas nos muestran la forma en que los revestimientos soportan la penetración del agua. En una prueba hecha, tramos de 6 pulgadas de tubería "Schedule 40" fue preparada cuidadosamente y revestida con los materiales a probarse. Dos pedazos fueron colocados a distancias equidistantes de un electrodo de acero inoxidable con un electrolito de una solución, salina 25°C. Usando un rectificador, uno de los tubos se mantuvo a +6 voltios y el otro a -6 voltios con respecto al electrodo. Una resistencia de 1.000 ohmios en el circuito permitió controlar la corriente. La resistencia fue calculada de la siguiente manera:

$$R_r = \frac{1000 \times A \times (V - V_r)}{V_r} \quad 7$$

En donde

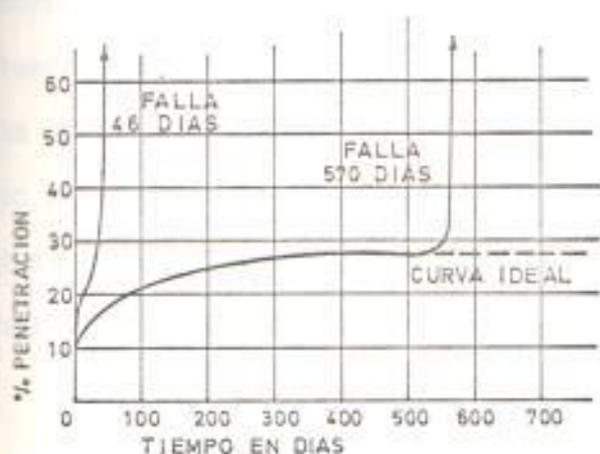
R_r = Resistencia del revestimiento, ohmios por pie cuadrado

A = Area del revestimiento bajo el fluido, en pies cuadrados

V = Voltaje de la fuente, voltios D.C.

V_r = Caída de voltaje a través de la resistencia

Cuando la resistencia así calculada bajó de 20,000 ohmios por pie cuadrado se consideró que el revestimiento había fallado. Estas pruebas también mostraron un mejor comportamiento de los vinilos. (Fig.46)



LAS CURVAS MUESTRAN LA PENETRACION DE H₂O EN 2 PLANCHAS DE ACERO DULCE REVESTIDAS

Fig-46

C.- PRUEBAS DE DESPRENDIMIENTO CATORDICO: En el sector en que el revestimiento protector se pela o desprende por golpes, rasmilladuras, etc., el metal será corroído a no ser que se le aplique protección catódica, sin embargo, la corriente catódica, ocasiona que en este lugar se formen iones hidróxidos proporcionalmente a la densidad de la corriente. Bajo estas condiciones, las capas protectoras muestran una tendencia a desprenderse del metal, por lo tanto la aplicación de corriente catódica a una muestra que presente rasmilladuras y fallas del revestimiento parece ser un buen método.

para determinar la fuerza con que el revestimiento se adhiere al metal.

En una prueba típica, una placa de acero es cubierta con el revestimiento a ser probado. Se efectúa un rayón de 4" de longitud paralelo al filo de la placa. Esta es entonces sumergida en un electrolito, con el rayón mirando a un electrodo de zinc o de magnesio. Se mantuvo esta situación por cuatro semanas a una temperatura del electrolito de 80°C. y la cantidad de desprendimiento del revestimiento se midió cada semana en unidades de 1/32" medidas desde el rayón. El comportamiento relativo a la capa de pintura corrosiva puede ser evaluada en una escala arbitraria en la cual por ejemplo un desprendimiento de 10 unidades es excelente, 20 bueno, 30 regular y 40 malo. El ánodo de magnesio usado produjo 0.30 miliamperios a un voltaje de 1.5 v. y el de zinc 0.02 miliamperios con un voltaje de 1 v. cuando se usó una solución al 0.1% de Na Cl con un PH entre 5 y 6.

El efecto del PH en el desprendimiento fue revisado efectuando pruebas con electrolitos de diferentes valores de PH. Una solución de NaCH y H_3BO_3 con un PH de 10 produjo muy poco cambio de la placa en un período de 10 semanas, con muy poca pérdida en el ánodo. El desprendimiento fue menos considerable en este electrolito que en la solución salina primero usada.

Una solución CH_3COH al 0.55% con un PH de 4 resultó en un ataque inmediato y severo al revestimiento, pero a medida que avanzó la

prueba, el desprendimiento fue cada vez menor. De interés fue el aumento en concentración de ion hidrógeno de 2 a 7 unidades en las cuatro semanas de la prueba. En esta solución ácida los ánodos fueron consumidos casi por completo.

La temperatura a la cual son ejecutadas estas pruebas es de importancia. Una regla aproximada para cualquier reacción química es que la rapidez de la misma se dobla por cada aumento de 10°C . en la temperatura. Pero no podemos asegurar la validez de esta relación y efectuar extrapolaciones para encontrar y determinar resultados a otras temperaturas. La temperatura de 80°C es un compromiso para tratar de usar una temperatura similar a la temperatura promedial a la que está sometido el electrolito alrededor del tanque del transformador considerando variaciones de temperatura del medio y las variaciones de la carga del transformador en un día. De estas pruebas un cloruro de polivinilo dió los mejores resultados y los epoxis simples los peores.

TABLA VIII
PRUEBAS DE DESPRENDIMIENTO CATODICO

TIPO DE MATERIAL	AREA DESPRENDIDA In^2	Un nuevo revestimiento que se está popularizando en los últimos años es un poliestireno fusionado al tanque del transformador que es extremadamente flexible y resistente. También se ha comenzado
Epoxy D(carbón-alquitrán) (base: Epoxy-Zinc)	0	
Cloruro de Polivinilo B	0,012	
Plastisol Vinílico F.B.	0,571	
Epoxy Fenólica Modificada	0,293	
Epoxy A.(carbón-Alquitrán) (Sin base)	0,77	
Cloruro de Polivinilo F.B.	0,31	
Epoxy A.(carbón-Alquitrán) 2(base:Epoxy-Zinc)	1,42	
Epoxy F.B.	2,17	
Epoxy C.(carbón-Alquitrán) (base: Óxido de hierro)	toda la placa	
Epoxy B.(carbón-Alquitrán) (base: Zinc)	toda la placa	

experimentar con un revestimiento de porcelana esmaltada. Tendremos que esperar mayores experimentaciones y experiencias prácticas antes de decir la última palabra sobre este esmalte, aunque su mayor precio es una desventaja que tendrá que ser descontada con un comportamiento excelente.

Queda claramente dibujada la importancia de aplicar correctamente una buena capa anticorrosiva a los tanques de transformadores de uso subterráneo. Estas capas tienen que ser aplicadas con la mentalidad de que su duración debe ser la misma que la vida del transformador por cuanto reparaciones en el sitio de instalación es normalmente imposible. Es importante evitar que el revestimiento no sufra daño por los motivos que ya especificamos anteriormente, pero la experiencia nos dice que esto es imposible. Por eso, protección catódica, es una segunda línea de defensa necesaria, y pasemos a hablar de ella.

III.- PROTECCION CATODICA:

El aumento de protección catódica a un tanque de transformador que ha sido ya protegido con un revestimiento de calidad comprobada, reduce las posibilidades de que la corrosión se haga presente. Protección catódica, por lo tanto, es una segunda línea de defensa. El uso de ánodos de sacrificio para proteger un sistema pobremente diseñado resultará en un rápido consumo del ánodo con el consiguiente alto costo de mantenimiento. Si nos aseguramos primero que el neutro se encuentre aislado y luego que el revestimiento protector del tanque esté en buen estado, protección catódica no sería necesario. Sin embargo, sabemos que esto es diff-

amente realizable y por eso, añadir protección catódica complementa nuestro sistema defensivo contra el problema corrosivo, si este es lo suficiente severo como para justificar la inversión.

Magnesio o zinc pueden ser empleados para protección catódica, los ánodos de magnesio tienen un potencial más alto que los de zinc; y como revisiones en los sistemas subterráneos han indicado que circuitos de alta resistencia interna requieren potenciales más altos, magnesio está siendo preferido ultimamente en casi todas las instalaciones a pesar de que el zinc continúa siendo el más usado. En ocasiones un rectificador puede ser instalado para ayudar al ánodo. Un diseño popularizado consiste en un ánodo en forma de una cinta de magnesio de 10 pies de largo por 3/4" x 3/8" con un núcleo de acero y un conductor N°12 AWG de 10 pies de largo. La cinta se la forma en configuración circular y se la instala en el fondo de la bóveda rodeando al transformador. La configuración anular provee un potencial máximo y uniforme a cualquier punto en peligro del tanque. Colocar el ánodo en el fondo de la bóveda nos asegura que lo hemos situado en el área más húmeda posible.

Con las varillas de puesta a tierra enterradas bajo la bóveda fuera del alcance del oxígeno de la atmósfera, la corriente inicial entre el ánodo y la varilla resultará en polarización de la varilla de puesta a tierra; esto es, resultará en la formación de una fina película de hidrógeno en la superficie de la varilla, suficiente para bloquear a cualquier corriente que fluya del ánodo pero insuficiente para impedir a la varilla que efectúe su trabajo durante fallas en el sistema.

Ya estamos familiarizados con la pila galvánica establecida entre el cable del transformador y el conductor de cobre desnudo. La figura 47 muestra la situación y el flujo de corriente galvánica.

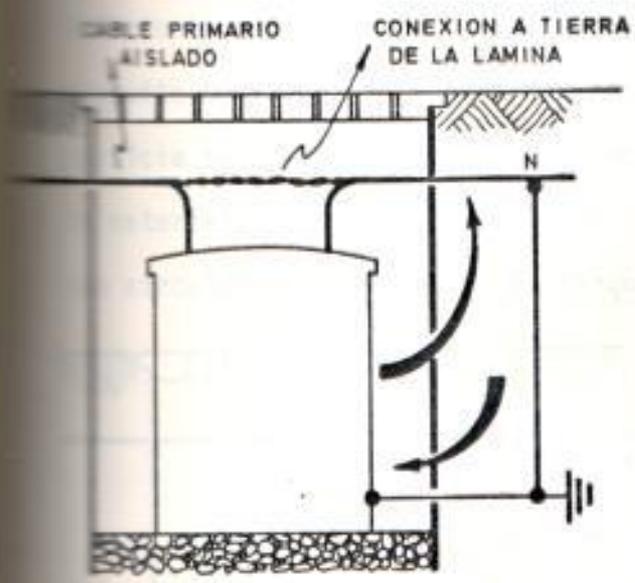


fig 47

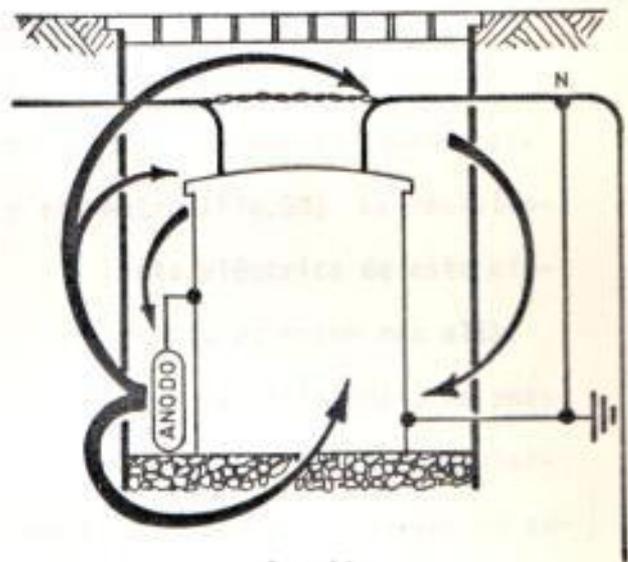


fig 48

La figura 48 nos muestra la situación cuando un ánodo aterrizado se conecta al tanque, una corriente fluye del ánodo al tanque, como se desea, pero una segunda corriente fluye del ánodo al neutro y retorna a través de la conexión a tierra. El área expuesta del metal del tanque (una falla en el revestimiento) es pequeña mientras que el área expuesta del neutro es mayor. Cobre o estaño de la superficie del neutro son metales más nobles que el hierro o acero del tanque; por lo tanto, el ánodo puede sacrificar mucho de su volumen protegiendo al neutro, el cual ordinariamente no requiere protección. Para evitar esta pérdida, se ha modificado en ciertos sistemas la puesta a tierra del transformador, entremos a discutirlo.

ISLAR EL TRANSFORMADOR DEL SISTEMA DE NEUTRO

Se ha experimentado aterrizar el tanque a través del ánodo, aterrizando el neutro separadamente como se ilustra en la Fig.49. Esto sería suficiente para evitar el desgaste inútil del ánodo siempre y cuando el circuito mostrado sea ideal; desafortunadamente esto no es así. La superficie externa del conductor primario y el conector de alta son hechos de materiales que conducen algo de electricidad y forman un camino para que circule corriente entre el tanque y el neutro (Fig.50). La resistencia

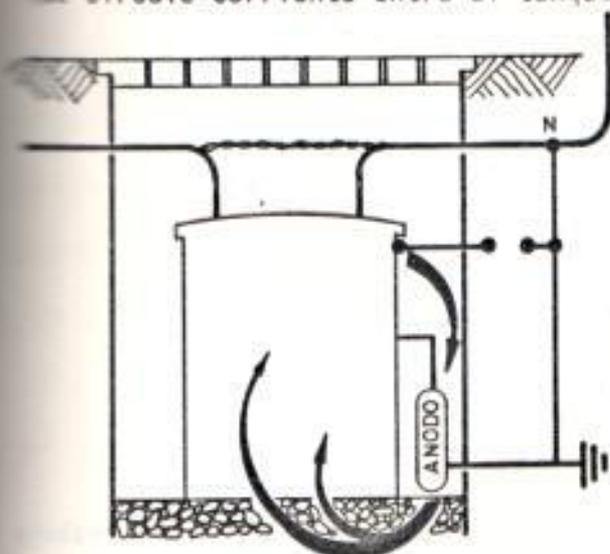


fig. 49

eléctrica de este circuito es mucho más alta que la resistencia de puesta a tierra, pero en ciertos casos, puede ser lo suficientemente baja como para permitir el paso de una corriente apreciable. Este circuito existe incluso cuando no hay agua en la bóveda, porque tanto el ánodo como el neutro están en contacto con la tierra.

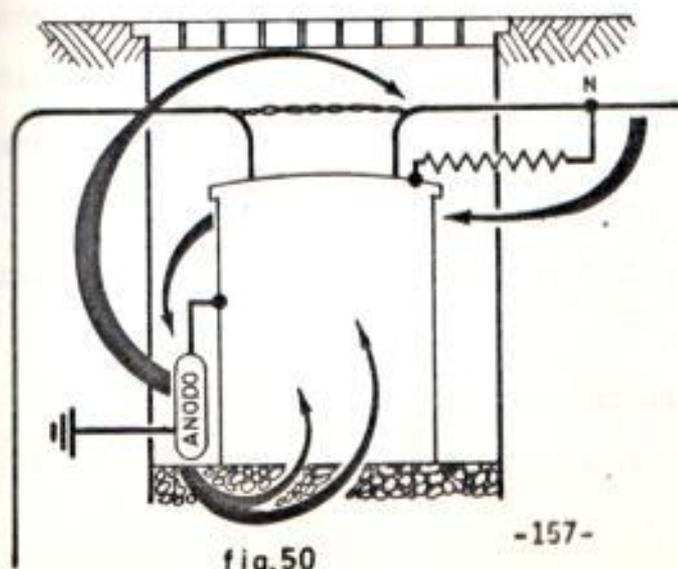


fig.50

Para eliminar este problema, hacer el ánodo más accesible y para lograr una me-

Para protección del tanque, algunas compañías eléctricas están usando un ánodo descansado sobre el piso de la bóveda y sin aterrizar directamente a tierra. Esto ciertamente elimina la rápida consunción del ánodo cuando la bóveda está seca, pero hay ciertos problemas que se pueden presentar que muy bien pueden contrarrestar este beneficio. La Fig.51 nos

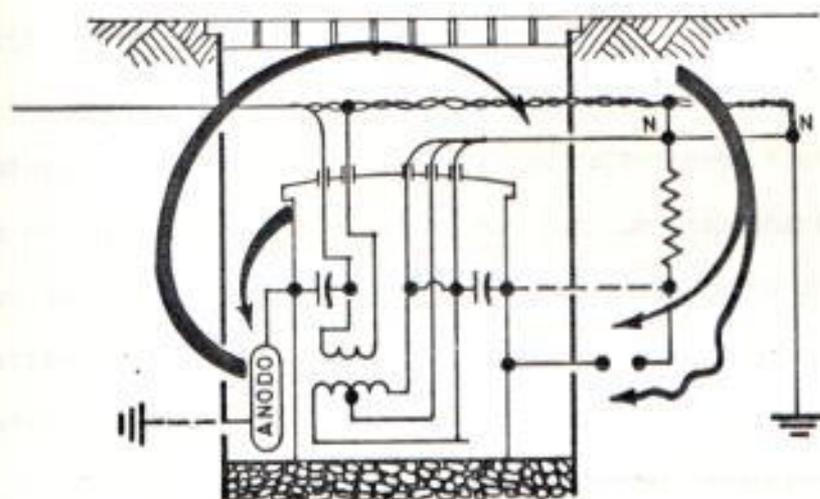


fig. 51

ayudará a explicar esto. En el gráfico, el ánodo, tanque y conductor neutro están conectados como en la figura anterior, pero el aterrizaje del ánodo está indicado con una línea pespunteada para especificar que sólo existe esta conexión cuando la bóveda está mojada. Los embobinados del transformador y sus conexiones al sistema están mostrados esquemáticamente. Las bobinas están aisladas del tanque, pero entre las dos existe una capacitancia como está mostrado en la figura.

Un paso de aire en paralelo con una línea pespunteada se muestra en serie con la resistencia que representa la conexión entre el neutro y el

pasos a través del conector y el aislamiento del cable primario. Mientras la mayoría de los conectores presentan un camino a la corriente que es representado por la línea pespunteada, algunos no ofrecen este camino y esta discontinuidad del camino está representada por el paso del aire. Cuando la bóveda está llena de agua el paso de aire será puentado y dejará de causar efecto alguno. Cuando la bóveda se encuentra seca, el ánodo no está aterrizado. Si los conectores usados forman un camino continuo del tanque al neutro, el tanque se encuentra aterrizado por medio de este camino y la corriente de carga de los capacitores fluirá por la superficie del conector y cable primario. Esto no ocasionará problemas y el tanque se mantendrá con un potencial casi igual al de tierra, durante la operación normal del transformador. Sin embargo si se presenta una falla de alta impedancia en el aislamiento entre las bobinas y el tanque, la corriente de falla seguirá por este mismo camino. Esto puede dañar al cable y conector y puede hacer que el potencial del tanque alcance valores peligrosos, antes que la falla sea interrumpida por los fusibles de protección.

El tanque se encuentra aislado de tierra si los conectores usados tienen resistencia infinita. La capacitancia entre bobinas y tanques hará que éste adquiera potenciales de valores que pueden ser hasta la mitad del voltaje primario de línea a tierra. El ánodo, al estar directamente conectado al tanque del transformador tendrá el mismo potencial. Un hombre al tocar, sea el tanque, o el ánodo recibirá un choque eléctrico que probablemente no sea mortal, pero sí de consideración. Además, este voltaje estará aplicado a través del paso de aire y puede causar corona. El efecto co-

dañará al conector y es además una fuente de interferencia a radios y televisores. Finalmente, si es que el nivel del agua es tal que no toca al ánodo, pero está muy cerca, corona puede ocurrir también en el ánodo.

Ante estas dificultades, algunas compañías han decidido enterrar el ánodo, usar conductores primarios con aislamiento sobre la lámina de cobre y usar aislamiento para el cable de neutro. Esto asegura una buena protección contra corrosión para el tanque, elimina una rápida consunción del ánodo y termina con las complicaciones que hemos descrito. Todo esto, sin embargo tiene su costo. Cables primarios con aislamientos sobre la lámina son mucho más caros, y el trabajarlos es más difícil.

Los transformadores que la Empresa Eléctrica utiliza para sus instalaciones subterráneas son transformadores del tipo convencional diseñados para uso en exteriores (ver fotografías 9 y 9A), no para uso subterráneo; por lo tanto son por lo tanto contruidos para trabajar bajo condiciones de total inmersión aunque nuestra experiencia nos indica que si la tapa se encuentra bien colocada y ajustada estos transformadores han podido soportar, por cortos intervalos, inmersión total sin experimentar problemas de fallas en el dieléctrico del aceite por penetración de agua. Son normalmente instalados sobre pedazos de madera, como lo muestra la fotografía 9 para evitar que el fondo esté siempre en contacto con el agua que las bombas de centina instaladas en las bóvedas no puedan eliminar por diversos factores. Como es de suponer estos transformadores no tienen ninguna preparación especial en su superficie, ni pinturas especiales le han sido aplicadas, dado su diseño para instalación en postes al aire libre.

Durante 1970 se instalaron 3 transformadores trifásicos del tipo CST de la General Electric (Fotografías 6 y 6A y datos en el apéndice). Estos transformadores están diseñados para trabajar en condiciones de completa inmersión en agua por períodos prolongados y fueron instalados en las bóvedas que sufrían el problema de completa inundación durante las lluvias fuertes de la temporada invernal.

En el sistema subterráneo de la Empresa Eléctrica del Ecuador se han presentado numerosos casos de transformadores quemados por cuanto el aceite había sido evacuado completamente por agujeros en el fondo del tanque o en los costados cercanos al fondo. No se identificó este problema con

corrosión por no estar prevenidos contra este fenómeno . En los dos casos que el autor de esta tesis pudo examinar, la corrosión se había hecho considerablemente en el fondo del tanque. Al examinar el mismo se encontraron perforaciones por las cuales el aceite había salido; además se observó que todo el fondo del tanque mostraba corrosión intensa y que se había debilitado mucho la plancha de acero.

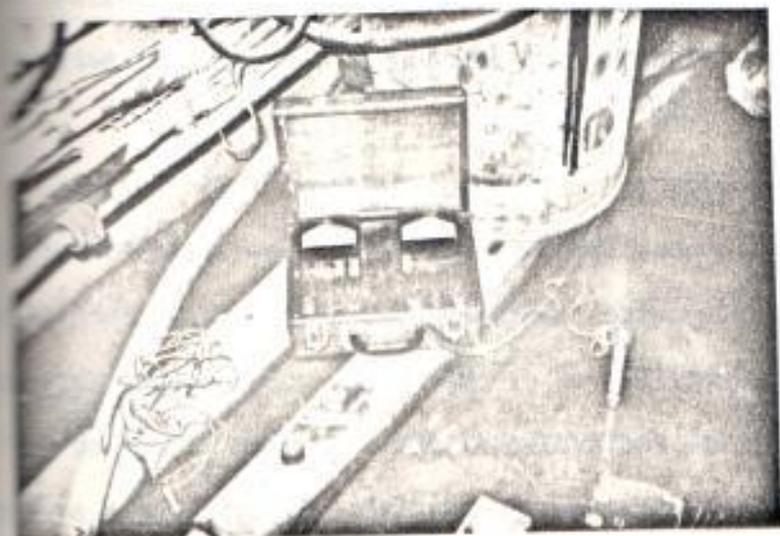
Se ha explicado que los transformadores se montan sobre pedazos de concreto precisamente considerando que siempre existe algo de agua en el fondo de la bóveda por más que se dispone de bombas de sentina para evacuarla. En ciertas bóvedas, por encontrarse obstruido el sistema de descarga de la sentina o por mal funcionamiento de la misma, el agua se mantenía en la bóveda a un nivel tal que el fondo del tanque siempre se encontraba sumergido, como este nivel de agua no implica peligro para las instalaciones eléctricas, no se prestó mayor atención a la importancia de eliminar esta agua, la cual ocasionó la corrosión del transformador.

Se procedió a un examen de todos los transformadores instalados en el sistema subterráneo, encontrándose al menos dos situaciones en que fue necesario reemplazar el transformador por que el proceso corrosivo se encontraba tan avanzado que una perforación inminente del fondo del transformador era de esperarse.

Todos los transformadores del sistema subterráneo mostraron indicios de corrosión en el fondo, por lo cual fue necesario esperar la temporada seca para realizar interrupciones y poder reparar y tratar el fondo del

transformador en la misma bóveda.

Con el H.C.H. y un electrodo de cobre saturado se tomaron mediciones del potencial que tenía el metal del tanque de los transformadores (foto-



FOTOGRAFIA 31

graffa 31) y de la corriente que se descargaba de la superficie metálica. El valor promedio de corriente que obtuvimos fue de + 0,89 ma mostrando claramente que el acero estaba sufriendo corrosión. El voltaje promedio que se obtuvo fue de alrededor de -0.45 v. La resistividad del agua en estas bóvedas era de 3000 ohmios-cm. de promedio con un PH promedio de 6,5. Como la resistividad del agua es la mejor indicación de su potencialidad corrosiva, información sobre la resistividad y el PH del agua recogida de distintas bóvedas del sistema están dados en esta tesis, en la sección III-B y C del apéndice.

Subestaciones portátiles fueron instaladas en la calle cerca de las bóvedas para servir provisionalmente al sector y poder limpiar y proteger la parte del tanque que mostraba indicios de corrosión. Se lijo conscientemente la plancha del tanque para eliminar trazas de pintura, y el óxido formado, se tuvo cuidado de no debilitar la plancha. A

continuación se limpió la superficie repetidas veces, usando vitriolo para asegurarse de una limpieza total. Luego se aplicó una pintura de base de zinc especialmente diseñada para este uso. Finalmente dos manos de pintura anticorrosiva vinílica fue aplicada sobre la base. Al término de cada estación lluviosa se procederá a revisar todos los transformadores así tratados para registrar la calidad de la limpieza y protección dada y constatar la bondad de la pintura anticorrosiva y la base usadas.

Antes de decidirnos sobre la forma de aplicar protección catódica a los transformadores, una prueba fue realizada en la bóveda de Pedro Monca y 1° de Mayo. Esta bóveda no tiene equipo eléctrico alguno y permanece con agua todo el año. La prueba se la realizó durante la temporada lluviosa de 1.971, de manera que la naturaleza del electrolito sea lo más cercana a la situación real encontrada en el sistema. Un tanque vacío obtenido de un transformador quemado fue introducido en la bóveda y rellenado con pesos para evitar que flote. 6m de cable N°4 AWG de cobre desnudo y 4 m de cable N°4/0 AWG de cobre desnudo fueron introducidos en la bóveda para simular la cantidad de cobre desnudo que usualmente encontramos en las bóvedas de nuestro sistema. Casi todo el fondo del tanque fue lijado antes de introducirlo en la bóveda. También se lijó la pintura en partes del tanque cercanas al fondo para simular la situación de un tanque con área del metal expuesto al electrolito.

La resistividad del agua que se encontró originalmente en la bóveda fue de 6000 ohmios-cm. Se añadió sal a este electrolito para obtener menores resistividades hasta alcanzar 40 ohmios-cm. (cercano al valor del

del mar).

Se realizaron pruebas conectando primero un ánodo de zinc de 9 lbs. y luego otro del mismo peso de magnesio al tanque y colocando estos ánodos en el fondo de la bóveda. Se utilizó el M.C.M. y un electrodo de sulfato de cobre para realizar las mediciones, la Fig. 52 ilustra el circuito

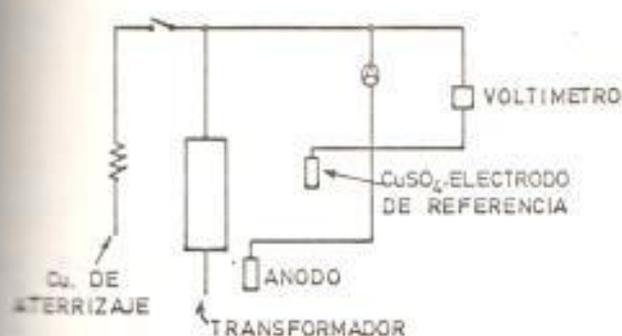


Fig - 52

eléctrico formado. Las mediciones de voltaje se hicieron con el electrodo lo más alejado del ánodo de sacrificio para evitar cualquier influencia de este en las lecturas. Se efectuaron mediciones con los cables de cobre desnudo conectados al transformador y se esperó siempre por lo menos 3 horas antes de tomar lecturas para permitir que ocurra polarización y se estabilizen las condiciones de la bóveda. Luego se volvieron a efectuar las pruebas, pero con los cables de cobre desnudos sin conectarse al transformador. Se aterrizó estos cables por medio de una varilla de puesta a tierra colocada fuera de la bóveda. También se esperó un tiempo prudencial antes de cada medición.

Los resultados de la primera serie de pruebas están tabulados en las figuras 53 a 56. Las figuras 53 y 54 indican que un voltaje mayor de -0.75 v.

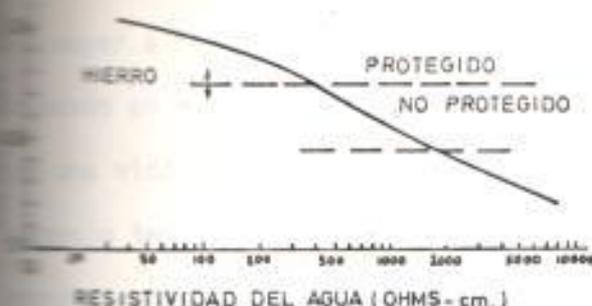


Fig-53

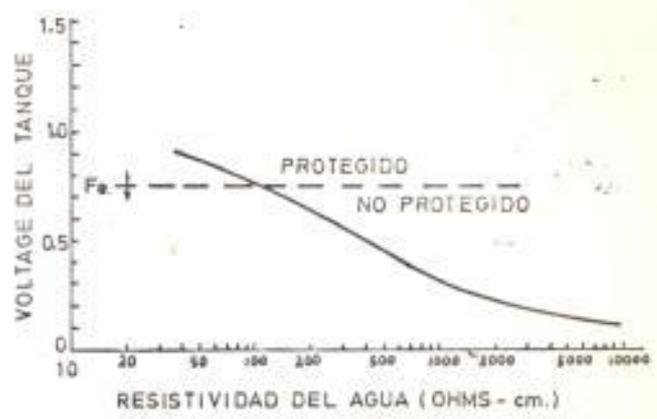


Fig-54



Fig-55

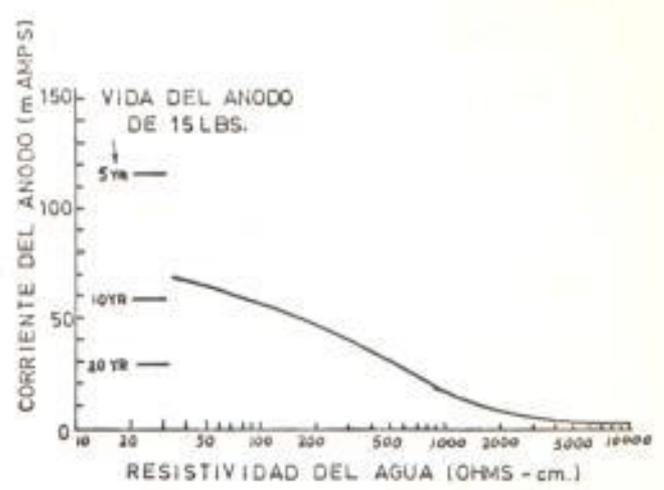


Fig-56

protegerá catódicamente al tanque, mientras que un voltaje inferior a -0,75 v. lo dejará sin protección.

Ánodos de Magnesio: Las figuras 53 y 55 presentan información para ánodos

magnesio. A pesar del alto voltaje galvánico que este metal posee, un ánodo de acero dulce no será protegido en electrolitos de una resistividad mayor a 500 ohmios-cm. La Fig. 55 muestra que un solo ánodo de 17 lbs., colocado en el fondo de una bóveda llena de agua de baja resistividad tendrá una vida que variará de 1 1/2 a 5 años. Debido al alto voltaje que el magnesio imprime al tanque, se pueden presentar serios problemas con desprendimientos de las pinturas protectoras de los tanques de los transformadores.

A pesar de que ánodos de magnesio protegen a un transformador en presencia de electrolitos con mayor rango de resistividad, no se recomienda su uso en aguas de baja resistividad debido a la corta vida que bajo esas condiciones tienen, y el problema de desprendimiento que puede ocasionar a las capas protectoras.

Ánodos de Zinc: Las figuras 54 y 56 nos dan igual información para los ánodos de zinc que las figuras 53 y 55 dieron para los de magnesio. Debido a su menor voltaje galvánico, el zinc no es tan eficiente protegiendo acero dulce. Con un ánodo de 17 lbs. de zinc en el fondo de la bóveda, el tanque no se encuentra protegido si el electrolito registra resistividades sobre 400 ohmios-cm. La Fig. 56 indica que un ánodo de 15 lbs. tendrá una vida de 10 a 20 años dependiendo de la resistividad del agua.

Los resultados de las pruebas con los cables de cobre desnudo independizados del tanque y puestos a tierra en el exterior de la bóveda están tabulados en las figs. 57 a 59. Como se indica en la figura 56, si el poten-

si es mayor a $-0,75$ v. el tanque estará protegido. Esta información muestra que tanto el ánodo de zinc como el de magnesio protegerán al tanque del transformador cuando este no está conectado al neutro del sistema sino que es conectado directamente al ánodo, el cual le sirve de aterrizaje. La corriente para un ánodo de magnesio en la Fig.58 indica que un ánodo de 5 lbs. tendrá una vida aproximada de dos años en aguas de baja re-



Fig-57

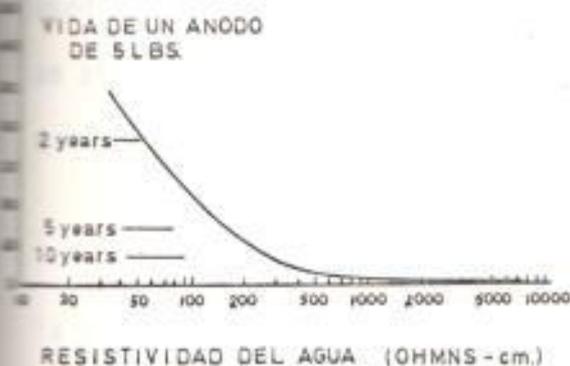


Fig-58



Fig-59

resistividad; en un electrolito de media o alta resistividad su vida será de 10 años y más. Sin embargo, un ánodo de zinc de igual peso durará 60 años en electrolitos con resistividades medias (Fig.59)

Debido a los problemas que puedan presentarse con altos voltajes durante fallas con un tanque de transformador aterrizado en la forma arriba indicada se solicitó información a las oficinas de Ebasco Services sobre este problema. Pruebas fueron realizadas en Nueva York sobre esta dificultad analizando los sobrevoltajes que puedan ocurrir en bóvedas de transformadores durante fallas en el lado de alta o descargas atmosféricas. Los sobrevoltajes que se presentaron tuvieron iguales valores para el caso del tanque aterrizado directamente al neutro del sistema y para el caso del tanque aterrizado separadamente a través del ánodo. Únicamente cuando una falla ocurrió entre una fase de alta y el tanque del transformador se registró un voltaje mayor para el segundo caso. En estas condiciones, el tanque aterrizado separadamente permite que un voltaje excesivo se presente a través del aislamiento entre el tanque y las bobinas del transformador, lo que puede dañar este aislamiento. Este problema podría obviarse aterrizando el tanque al neutro del sistema en forma temporal siempre que personal tenga que entrar a una bóveda.

Para la protección de los transformadores del sistema subterráneo de la ciudad de Guayaquil, se recomendó la instalación de ánodos de zinc AZI-4-60 de 5 pies de largo. Estos ánodos podrán ser instalados en el fondo de la bóveda, con 3 1/2 pies enterrados directamente y 1 1/2 pies sobresaliendo del fondo de la misma. Los tanques de los transformadores no serán conectados al neutro del sistema para obtener todos los beneficios de la protección catódica. Con un ánodo instalado en cada bóveda de transformadores en la forma descrita, se considera que también se proporcionará protección catódica a los cables de plomo para complementar las otras

medidas que se han tomado. Se recomienda la conexión de los transformadores al neutro del sistema siempre que el personal de la Empresa tenga que entrar a trabajar en estas bóvedas.

NOTA FINAL

Hemos llegado al término de nuestra investigación del fenómeno corrosivo en el sistema subterráneo de la ciudad de Guayaquil. Creemos que con las medidas tomadas y recomendadas, la corrosión en los cables de plomo y en los tanques de los transformadores quedará definitivamente erradicada de nuestro sistema. Anualmente se harán reconocimientos, mediciones y pruebas para constatar que nuestra aseveración es correcta o para utilizar y aplicar las nuevas técnicas que surjan en la batalla contra la destrucción de estructuras metálicas por corrosión.

No quisiera terminar esta tesis sin antes hacer un llamamiento a los ingenieros eléctricos a que le den toda la importancia que tiene el fenómeno corrosivo. Los ingenieros eléctricos especializados en potencia están inclinados a considerar corrientes en el orden de miliamperios como insignificantes y despreciables por completo. El ingeniero de corrosión, sin embargo, ha aprendido a respetar en mucho el poder destructivo que poseen pequeños valores de corriente directa. Únicamente un Miliamperio de corriente directa descargado desde un área localizada en cualquier superficie metálica puede en el tiempo de un año:

- 1) consumir 9 cms. de alambre de cobre # 6 A.M.G.
- 2) consumir 154 cms. de 2 oz. de galvanizado por inmersión
- 3) consumir 0,6 cm. de una varilla de hierro de 5/8"
- 4) causar 40 huecos de 2.54 cms. de diámetro en una camisa de plomo de 3/32"

Aunque los Ingenieros Electricistas tienen una reputación envidiable

de ser progresistas en todo lo concerniente a nuevos desarrollos y modernización, la industria eléctrica está aún atrasada en lo que respecta a la aplicación de métodos para reducir la corrosión galvánica de conductos eléctricos, cables de plomo, y de otras estructuras metálicas soterradas o en contacto con agua y lodo. Sería de esperar que la industria eléctrica estuviera más adelantada que los demás en lo que se relaciona a la mitigación de la corrosión a través del uso de la electricidad. Esto es aún más sorprendente cuando se considera como ya hemos analizado que la mayor parte de las formas de corrosión, por no decir todas, ya bien sean ocasionadas por electrolisis o corrosión galvánica en los suelos, o por la corrosión atmosférica, son fenómenos eléctricos y debieran ser parte de las especialidades de un ingeniero electricista.

Considérense algunas de las normas que se aplican a diario a través de toda la industria eléctrica en plantas generadoras, subestaciones, sistemas de transmisión y de distribución aéreos y soterrados. Estas normas a veces ocasionan la corrosión en lugar de evitarla.

Las varillas de puesta a tierra Copperweld, por ejemplo, empezaron a tener el favor del público hace unos 20 años, y hoy en día son usadas extensivamente debido a la corta duración experimentada con las varillas de puesta a tierra galvanizadas. ¿Acaso las varillas de puesta a tierra galvanizadas se empezaron a corroer de la noche a la mañana y desde entonces han tenido una corta duración? A lo mejor la duración era mayor cuando los pararrayos se conectaban a una varilla de puesta a tierra independiente y las

Tierras de los secundarios no se interconectaban con los sistemas de agua. Con el advenimiento del sistema de neutro y común y la interconexión de las tierras de los pararrayos y de los secundarios a los sistemas de agua, las varillas de puesta a tierra galvanizadas se convirtieron en ánodos galvanizados que trataban de proteger catódicamente a los sistemas de tuberías de agua y de gas. En los lugares en donde las condiciones del terreno eran adecuadas para la corrosión, la corrosión de las varillas galvanizadas debía ser rápida y así lo fué; por lo tanto el uso de las varillas Copperweld se extendió rápidamente. Como éste se pueden citar muchos otros ejemplos.

Los fabricantes de equipos también merecen parte de la crítica que estamos haciendo. Sus ingenieros de diseño aparentemente ignoran la acción del par galvánico simple ocasionado por metales disímiles en los terrenos y en las soluciones acuosas. Ellos parece que consideran los aspectos de la corrosión y los aspectos mecánicos de cada metal por separado, en lugar de considerar todas las partes como una unidad. A veces resulta difícil determinar si lo que están diseñando es una pieza mecánica o un par múltiple de corrosión. Los resultados de esto son los altos costos de mantenimiento de las distintas piezas debido a la corrosión rápida que tiene lugar.

De alguna manera efectiva se debe lograr que los ingenieros electricistas estén conscientes de la corrosión, de forma que diseñen en contra de la misma y no a favor de ella. Parecería natural que cualquier empresa de servicio eléctrico de cierto tamaño debe tener un ingeniero experto en ma-

lencia de corrosión (o un departamento de corrosión y electrolisis), el cual debe ser consultado con respecto a todas las normas de diseño, para evitar diseños que pudieran ser una causa de corrosión.

El autor de esta tesis es de la opinión, que los ingenieros de la industria eléctrica pudieran lograr muchos adelantos en lo que respecta a la mitigación de la corrosión en estructuras metálicas, si estuvieran conscientes a los problemas de la misma y diseñaran las estructuras en una manera tal que tienda a reducir dicha corrosión.

Esta tesis ha señalado algunas de las causas de la corrosión inherentes a las normas generales de diseño. Es necesario el revisar estas normas para ver si es posible realizar cambios en las mismas que tiendan a mitigar la corrosión sin dejar de satisfacer los requerimientos mecánicos, estructurales y eléctricos.

SECCION IV

BIBLIOGRAFIA

S.E. Trouard and H.J. Haier "The Role of Grounding Cells and Similar Devices in the Effective Cathodic Protection of Lead-Sheathed Power Cables of substation exit systems" AIEE Trans. (Power Appar. and Syst.) pp. 642-647, Oct. 1961

G.C. Nonken "Fundamentals of Corrosion and Corrosion control for residential Subsurface Transformers" IEEE Trans. (Power Appar. and Syst.) vol. pas-88, N°3, pp. 207-218, Marzo 1969

W. C. Hayes (Editor) "Corrosion in Urd Systems" Special Report. Electrical World, pp. 87-106, Mayo 5, 1969

L.J. Gorman "Electrolysis and Corrosion of Underground Power System Cables" AIEE Trans. vol. 64 pp. 329-336, 1945

R.A. Prat "Corrosion Protection and Thermal Tests for Submersible Urd Systems" Transmission and Distribution pp. 80-85, Agosto 1969

I.J. Marwick and J.H. McIlamara "Corrosion in Primary U.D.Cables" Underground Engineering, pp. 17-24, Abril/Mayo 1971

M. C. Miller "Corrosion of Buried Metals and Cathodic Protection" The Petroleum Engineer, Marzo/Junio 1944

M. C. Miller "Characteristics and Field Use of Electrical Instruments for Corrosion Investigation and Cathodic Protection" Cathodic Protection, Sym-

posium de la Sociedad Electroquímica y la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión, Feb. 1951

M. Thielers "Concepto de Corrosión Química y Electrolytica considerando especialmente los Cables Subterráneos con cubierta de Plomo" Revista Tele N°2 Real Dirección de Telecomunicaciones, Estocolmo 1954

M. Thielers "Corrosión en los Cables Telefónicos bajo Plomo" Revista Tele N°4, Real Dirección de Telecomunicaciones, Estocolmo 1951

H.C. Ghen "The Joint Corrosion Committee for Electrolysis Mitigation" Edison Electric Institute Bulletin, pp. 231-233, Mayo 1940

D.E. Cooper "Utility Evaluates Corrosion Problem for Urd" Transmission and Distribution. pp. 97-101, Mayo 1969

J. Jacobs "Corrosion Studies in Urd Installations" Underground Engineering. pp. 22-25, Agosto/Septiembre 1970

K. R. Gosnell "Power System and Equipment Grounding in Conformance with Cathodic Protection Practices" IEEE Cp.60-398 Febrero 1960

R. G. Medley "Grounding Affects Corrosion" Power. pp.71-73 Sept. 1965

Edison Electric Institute "Underground Reference Book" Capítulo 14, Quinta Edición 1970

J. B. Prime "Isolation, Drainage, Keys to Cable Corrosion Problem" Electric Light and Power. pp. 60-61, Mayo 15 1958

C.H. Broom "Corrosion and Cathodic Protection in the Miami Area". Presentado en la Conferencia del Distrito Sur del IEEE, Miami Beach, Abril 1951

J.B. Prime "Corrosion Mitigation on Florida Power and Light Company System" Octubre 1954

D. Bressen "Aluminum Cable for U.D.: A) Tips on Installation" Electric Light and Power. pp.140-141 Julio, pp. 92-93 Agosto, 1969

R.C. Graham "Aluminum 1970- Mostly Underground" Underground Engineering, pp. 45-49, Junio/Julio 1970

L.D. Cronin and J.H. McIlamara "Behavior of Insulated Aluminum Conductor Buried in the Earth" Presentado en la Conferencia de Sistemas Subterráneos del IEEE Anaheim- Calif., Octubre 1969



PIE DE NOTAS

- 1 M.A. Mesley. "Controlling Factors in Galvanic Corrosion" Proc. A S T M, vol. 40, pp. 690 - 704, 1940
H. H. Uhlig, Corrosion Hand Book. New York: Wiley, 1948
- 2 W. G. Radley and C.E. Richards "The Corrosion of Underground "Cables". Journal of the Institution of Elect. Eng. vol 85, N°516. pp. 685-712 Dec. 1919
- 3 Robert J. Kuhn "Grounding and Corrosion Protection on Underground Electric Power Cable Sheaths and Oil or Gas Filled Pipelines" AIEE Trans. (Power Appar. and Syst.) vol. 71 pp. 920-93, Dec. 1952
- 4 F. E. Kulman "Corrosion Control of Underground Power Cables in New York" AIEE Trans PT. III-A (Power Appar. and Syst.) vol.73, pp. 745-758, August 1954
- I. C. Dietze "Cathodic Protection of 138 Kv Lead Sheathed Power Cables" Corrosion, Houston - Texas, vol. 3 pp. 432-447, 1947