



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

"PROTECCION CATODICA A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
EN LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA".

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELECTRICO - ELECTRONICO

P R E S E N T A N :
ABEL IBARRA TAPIA
NICODEMO OROCIO ESQUIVEL



DIRECTOR DE TESIS: ING. GUILLERMO LOPEZ MONROY

MEXICO, D. F.

2002.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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


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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Abel Ibarra Tapia

FECHA: 31-OCT-02

FIRMA: 



DEDICATORIAS

A MI ADMIRABLE MAMÁ:

FRANCISCA TAPIA

POR QUE ESTAMOS JUNTOS EN LOS MOMENTOS MÁS DIFÍCILES.

A MI PADRE:

ABEL IBARRA

POR SU FUERZA Y CARÁCTER.

A MIS HERMANAS:

LIZ

GABY

PATY

POR TODO EL AMOR DE SIEMPRE.

A:

RICARDO JUÁREZ

POR EL APOYO Y ATENCIÓN HACIA NOSOTROS.

A MIS AMIGOS:

ANGÉLICA

OFELIA

VICENTE

RENÉ

MIGUELÓN

JOEL

FELIPE

POR SU ÁNIMO TRANSMITIDO Y AMISTAD BRINDADA.

A NICODEMO OROCIO, GRAN TRABAJO Y FELICIDADES.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO POR LA OPORTUNIDAD DE SER UNIVERSITARIO.

A LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR EL ORGULLO DE SER INGENIERO.

Agradecimientos.

A dios por guiarme en el camino correcto y estar conmigo en todo momento. Por haberme permitido concluir con satisfacción la carrera.

A mis padres agradezco, porque gracias a ellos tengo una carrera profesional, pero sobre todo tengo su apoyo moral..

A mis hermanas y hermanos, porque gracias a ellos tuve las fuerzas suficientes para seguir adelante..

A la UNAM y la Facultad de Ingeniería por darme las herramientas y la formación integral de un Ingeniero.



Nicodemo



AGRADECIMIENTOS

MUY ESPECIALMENTE A NUESTRO DIRECTOR DE TESIS:

ING. GUILLERMO LÓPEZ MONROY

QUIEN DEMOSTRÓ GRAN INTERÉS EN TODO MOMENTO Y QUE SIN SU GRAN APOYO NO HABRÍA SIDO POSIBLE LA REALIZACIÓN DE ESTA TESIS.

LE AGRADECEMOS SIEMPRE.

AL ING. ARMANDO LIRA MENESES

POR SUS ATENCIONES Y AMABILIDAD QUE TUVO EN TODO MOMENTO PARA GUIARNOS EN EL DESARROLLO DE ESTE TEMA.

A LOS INGENIEROS DE COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA:

**ING. FERNANDO GÓMEZ
ING. JOSÉ LUIS MONROY**

QUIENES NOS APOYARON Y AUXILIARON CON INFORMACIÓN MUY VALIOSA.

AL ING. ENRIQUE FOSADO BATREZ

POR FACILITARNOS LOS MEDIOS NECESARIOS PARA LA CULMINACIÓN DE ESTE TRABAJO.

Y AL PERSONAL DE CUADRILLA DE CABLES SUBTERRÁNEOS DE LUZ Y FUERZA QUE COLABORÓ CON NOSOTROS.

**A TODOS:
MUCHAS GRACIAS**

**“PROTECCIÓN CATÓDICA A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

INDICE

PAGINA

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN. 1

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. 8

2.1 PLANTAS GENERADORAS. 8

2.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. 15

2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN. 22

CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN. 43

3.1 EFECTO GALVÁNICO. 50

3.2 TIPOS DE CORROSIÓN. 53

3.3 CORROSIÓN POR EL MEDIO AMBIENTE. 59

3.4 CORROSIÓN BAJO FATIGA Y TENSIÓN. 61

CAPÍTULO IV

CORROSIÓN EN EQUIPOS Y ESTRUCTURAS DE LOS
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA. 67

4.1 EN PLANTAS GENERADORAS. 67

4.2 EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN. 72

4.3 EN EQUIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN. 75

**“PROTECCIÓN CATÓDICA A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

	PAGINA
CAPÍTULO V	
MÉTODOS PARA EL CONTROL DE LA CORROSIÓN	85
5.1 ALEACIONES RESISTENTES	88
5.2 RECUBRIMIENTOS Y REVESTIMIENTOS	89
5.3 ALTERACION DEL MEDIO.	90
5.4 INHIBIDORES SOLUBLES.	90
5.5 PROTECCIÓN ANÓDICA.	91
5.6 PROTECCIÓN CATÓDICA.	93
CAPÍTULO VI	
SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA.	97
6.1 FUNDAMENTOS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA	97
6.2 PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO.	100
6.3 PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA.	108
6.3.1 SISTEMA INTERCONECTADO.	113
6.3.2 SISTEMA AISLADO.	113
6.4 CRITERIOS PARA ALCANZAR LA PROTECCIÓN CATÓDICA.	116
6.5 PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	120
6.5.1 EQUIPOS DE PRUEBA.	121
6.5.2 INSTRUCCIONES DE PRUEBA	121

**“PROTECCIÓN CATÓDICA A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS
EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA”**

	PAGINA
CAPÍTULO VII	
DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA	124
7.1 INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL DISEÑO	124
7.1.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO	124
7.1.2 POTENCIAL ELECTROQUÍMICO NATURAL	126
7.1.3 CORRIENTE NECESARIA DE PROTECCIÓN.	128
7.1.4 CORRIENTE DE DISEÑO	130
7.2 CÁLCULO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA DEPÓSITOS Y TUBERÍAS ENTERRADAS	131
7.3 CÁLCULO DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA PARA ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	138
7.4 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN CABLES TIPO TUBO DE 85 kV Y230 Kv	141
CAPÍTULO VIII	
APLICACIÓN DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA	149
8.1 PROTECCIÓN CATÓDICA PARA UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN TIPO POZO DE COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA	149
8.2 LOCALIZACIÓN DE FALLA POR CORROSIÓN EN UN CABLE TIPO TUBO DE 85 KV	160
CAPÍTULO IX	
RESULTADOS Y CONCLUSIONES.	164
BIBLIOGRAFÍA	174



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El mantener la continuidad en el suministro de energía eléctrica a todo el país es de gran importancia, para ello se requiere un óptimo funcionamiento de todos y cada uno de los elementos que componen a todo el Sistema Eléctrico Nacional, de manera general, podemos identificar tres grandes grupos que lo integran en mayor importancia.

Se trata de las Plantas de Generación, las Líneas de Transmisión y los Sistemas de Distribución, todos concentran una gran cantidad de elementos asociados entre si para la generación, transporte y distribución para el consumo de la energía eléctrica, encontrándose a lo largo y ancho del territorio nacional bajo diversas condiciones climáticas que afectan directamente a sus estructuras y equipos que los integran.

La generación de energía eléctrica para el consumo es permanente por lo que su transporte y distribución también lo es, y debido a que la extensión geográfica de nuestro país es una de las más diversas del mundo, ubicamos a las Centrales Generadoras en regiones alejadas de los centros de consumo, donde hay muchas variaciones geográficas y climáticas en cuanto a humedad, temperatura, fenómenos naturales, altitud, etc., teniéndose que transportar por largas Líneas de Transmisión que pueden provocar un efecto en la degradación de los materiales con los que se fabrican sus estructuras mecánicas.

Con los sistemas de distribución se tiene algo similar, la necesidad de llegar a prácticamente toda la población requiere de su ubicación en sitios donde se puedan instalar los equipos necesarios para llegar al consumidor final. Por esto se instalan en las calles, subestaciones y líneas de distribución aéreas, subterráneas o mixtas, según las condiciones que permita el lugar.

En la Ciudad de México, podemos agregar otros factores de deterioro que pueden afectar a los sistemas de distribución, pero hay uno que históricamente ha sido particular y es el del agua. Los problemas de las lluvias, inundaciones y encharcamientos hacen vulnerables a las líneas aéreas y un factor de riesgo en los sistemas subterráneos. Como veremos más adelante, bajo el nivel de la calle se ubican equipos eléctricos (transformadores, interruptores, cables, etc.) que en cierto momento fallan por estas causas.

Bajo estas condiciones encontramos dos grandes causas por las que se producen daños que a la larga pueden incurrir en situaciones de riesgo para la funcionalidad de nuestro Sistema Eléctrico, éstos son:

La presencia de la corrosión en elementos metálicos y los efectos de fuerzas mecánicas que se presentan ante tal deterioro.

La corrosión produce daños más significativos de los que se puede pensar, debido a que hacen perder resistencia, ductilidad y propiedades mecánicas y físicas de los metales, así tenemos por ejemplo el caso de las estructuras que tienen uniones por tornillería o soldaduras, siendo en éstos sitios donde los efectos de la corrosión son más dañinos que en sitios donde no los hay.

La importancia en retrasar los efectos corrosivos es fundamental, en el caso de las Plantas Generadoras, se deben proteger tanques de almacenamiento, calderas, tuberías, y sistemas de enfriamiento, en las Líneas de Transmisión, se deben proteger las estructuras de las torres, el hilo de guarda que es de acero al igual que las torres y en los Sistemas de Distribución a los transformadores, interruptores de la red subterránea, también se debe proteger al cable tipo tubo utilizado en distribución para alta potencia, de lo contrario su vida útil descendería considerablemente.

La corrosión origina daños, de tal manera que si el metal no se protege, con el transcurso del tiempo una picadura puede ser tan profunda, que en el caso de un transformador, le puede ocasionar una pérdida de su hermeticidad y su posterior salida del sistema.

Como vemos en la figura 1.1, el estado muy avanzado de corrosión, en el tanque de un transformador de la red subterránea, le ocasionó su salida del sistema, antes del tiempo de vida esperado.

Un problema frecuente que se presenta en ciudades densamente pobladas, como la nuestra, es que constantemente se hacen excavaciones para instalar o ampliar ductos de gas o telefónicos, que muchas veces al no tener el cuidado se ocasiona daños al revestimiento de los cables tipo tubo, dando origen a la corrosión. En la figura 1.2 se ve un cable tipo tubo dañado.

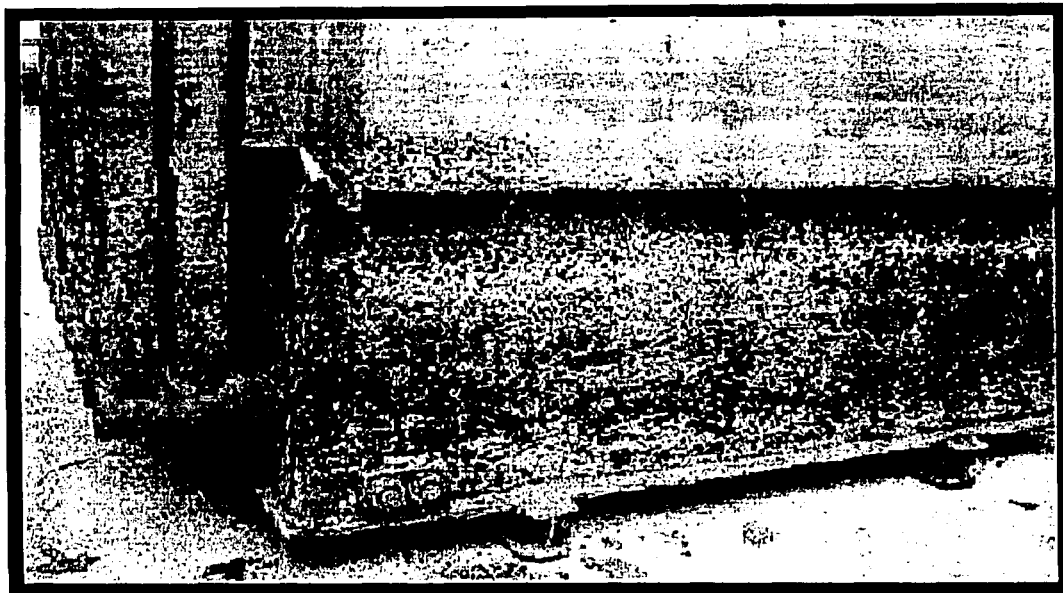


FIG. 1.1 CORROSIÓN EN UN TRANSFORMADOR DE LA RED SUBTERRÁNEA



FIG. 1.2 DAÑOS EN UN CABLE TIPO TUBO

Las causas más significativas de corrosión, pueden constar de mecanismos tan diversos como impurezas contenidas en los metales, imperfecciones en las redes cristalinas, diferencias térmicas, superficies rugosas, forma, concentraciones de oxígeno, soluciones abrasivas, fuerzas aplicadas, contactos entre diferentes metales, potenciales aplicados, etc.

Cuando se observa un material corroído, se hace necesario diagnosticar cuál ha sido la causa y además el estado en que se encuentra, es decir, reconocer el carácter y distribución de la corrosión encontrada para determinar el daño potencial. Así tenemos ataques uniformes en toda la superficie, efectos galvánicos severos, picaduras y formación de grietas.

Las picaduras, son una forma de ataque localizado que comienza con pequeñas perforaciones de diferentes diámetros que van creciendo con la consecuencia de orificios profundos hasta acabar con el material. Tal como puede ocurrir en tanques y tuberías enterrados o en los tubos de los intercambiadores de calor en las Centrales generadoras. Los efectos dañinos de la corrosión pueden agravarse si se encuentran fuerzas incidentes, como pueden ser tensiones mecánicas.

Debido a que la Ciudad de México se encuentra asentada en el suelo lacustre de un antiguo lago, el nivel freático es muy elevado, y si agregamos las fugas de la red de agua potable, drenaje y filtraciones pluviales, tenemos que el 90% del Sistema Subterráneo se encuentra con una considerable cantidad de agua a lo largo del año, oxidando los materiales de los equipos eléctricos subterráneos.

El costo en el mantenimiento de equipos en operación es muy caro, así que cualquier reducción posible siempre será más conveniente.

Según datos proporcionados por la Compañía de Luz y Fuerza, en el año 2000, se reemplazaron 10 transformadores tipo pozo del Sistema Eléctrico Subterráneo por causa de la corrosión, y el costo de rehabilitación de equipos sumergibles fue superior a los 40 millones de pesos. En el caso de las unidades generadoras en Centrales a partir de vapor, cuando se presentan picaduras en los tubos de los condensadores, se hace necesario sacarla de operación, representando pérdidas muy importantes, además de que el reemplazo puede tardar no menos de 3 semanas.

Debido a lo anteriormente descrito, se hace muy necesario la implementación de diferentes medidas encausadas a minimizar los efectos del problema de la corrosión por lapsos de tiempos que permiten alargar la vida útil de los materiales empleados.

La Protección Catódica es un método electroquímico de control de la degradación en los metales. en la actualidad representa la más útil herramienta para la prevención de la

corrosión. En la práctica se le puede aplicar a metales como el acero, cobre, plomo, hierro y aluminio, para casi todos los suelos y medios acuosos.

Dentro de los métodos descritos mas adelante, veremos los principios en los que se basan para alcanzar y proporcionar una protección eficaz a los equipos y estructuras del Sistema Eléctrico.

Los efectos de la corrosión en los metales, se da de manera generalizada, lo mismo se presenta en plataformas petrolíferas, muelles y pilotes de acero, que en aviones, barcos o en sitios donde hay flujo de corriente directa (por ejemplo vías de metro o trolebús) donde pueden generar efectos corrosivos (celdas galvánicas), en elementos metálicos cercanos a éstos y por consecuencia su deterioro.

El propósito de este trabajo es el de presentar información y mostrar aplicaciones de la Protección Catódica para minimizar problemas de corrosión en la red eléctrica subterránea a partir de una propuesta de la Compañía de Luz y Fuerza y ofrecer mejores condiciones de operación de los equipos en riesgo.



FIG. 1.3 UBICACIÓN DEL SITIO



FIG. 1.4 TRANSFORMADOR DAÑADO

En las figuras anteriores ubicamos el sitio donde se ubica la bóveda facilitada por la Compañía de Luz y Fuerza (Uruguay y Correo Mayor) para el desarrollo práctico de esta tesis, así como una imagen que nos ofrece una idea de la condición que guarda el transformador. Los efectos corrosivos están presentes en la parte inferior del tanque del transformador, además, la presencia de ampollas supone un ataque que puede ocasionar perforaciones severas.



CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN DE LOS
SISTEMAS ELÉCTRICOS
DE POTENCIA

Podemos denominar de forma general como Sistema Eléctrico de Potencia a un conjunto de elementos asociados para la generación, transmisión, transformación ó distribución de la energía eléctrica en grandes magnitudes.

Dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia podemos describir tres grupos muy importantes que integran al Sistema Eléctrico Nacional, éstos son:

- **PLANTAS GENERADORAS**

Son las Centrales donde se suministra a la Red Nacional la energía eléctrica obtenida a partir del aprovechamiento de fuentes de energía.

- **LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

Son el medio por donde se transmite la energía eléctrica del punto de generación a los puntos de enlace con la Red Nacional y centros de consumo.

- **SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

Son los encargados de transformar y transportar la energía eléctrica transmitida en los niveles adecuados para su distribución y comercialización.

A continuación se proporcionan los detalles de cada grupo.

2.1 PLANTAS GENERADORAS

La generación de energía eléctrica se realiza mediante la transformación de diversas fuentes de energía, tales como el empleo de combustibles fósiles, caídas y cauces de ríos, el viento, fuentes geotérmicas y nucleares.

Debido a la escasez de recursos hidráulicos, eólicos y geotérmicos, aproximadamente el 75% de la generación eléctrica tanto en México como en el Mundo se realiza mediante procesos termoeléctricos:

PLANTAS GENERADORAS MÁS IMPORTANTES EN LA REPÚBLICA MEXICANA



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

FIG. 2.1

De manera general, los procesos termoeléctricos se basan en el empleo de elementos combustibles (en el caso de las Plantas Nucleoeléctricas, se considera también como combustible al empleo del elemento radioactivo para generar la fisión nuclear) para obtener vapor de agua saturado que al aplicarlo a una turbina acoplada hace girar la flecha de un generador el cual induce en sus terminales la energía eléctrica.

El ciclo denominado Rankine es base en los procesos del mayor número de Plantas Generadoras de vapor concibiéndose como un recurso para emplear las características del agua como fluido de trabajo y manejar el cambio de fase entre líquido y el vapor.

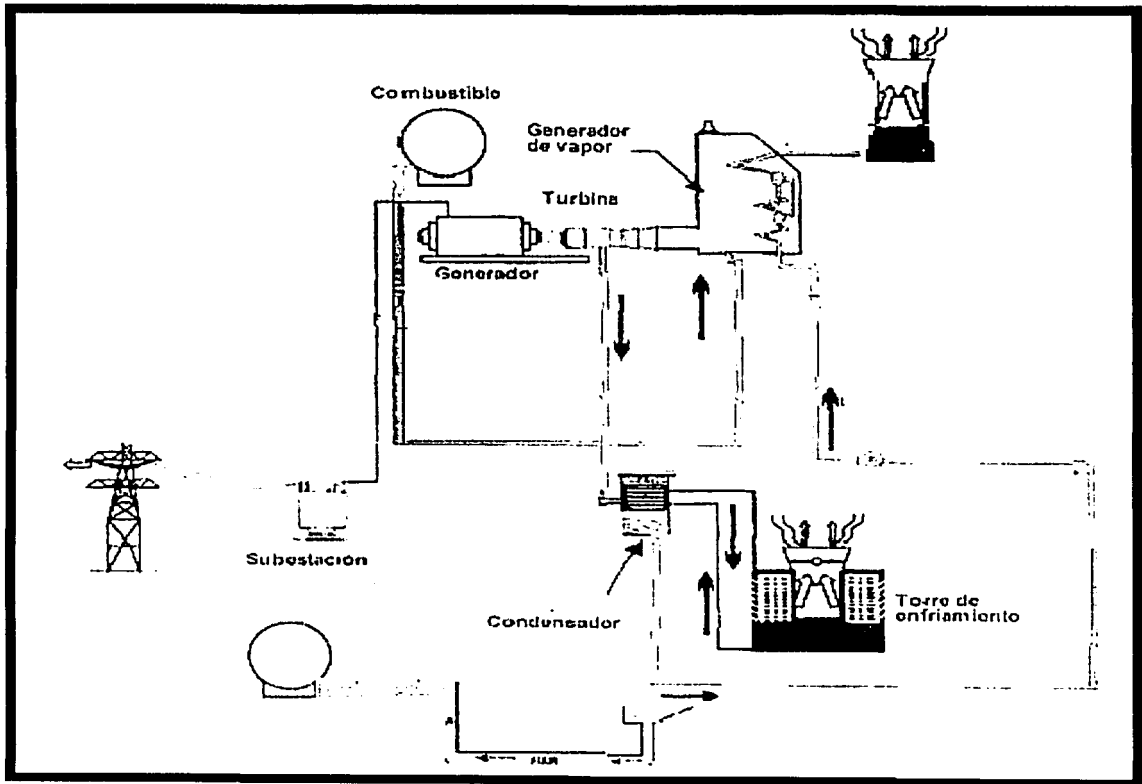


FIG. 2.2 ESQUEMA GENERAL DE UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA

Como se puede ver en la figura 2.2, se tiene el combustible almacenado en grandes tanques (también se pueden tener conexiones directas por ductos que destinan directamente el combustible desde la refinería mas cercana) que se conectan por tuberías hasta el sistema generador de vapor, el cual puede ser una gran caldera que contiene en su interior una enorme cantidad de tubos que están llenos de agua tratada obtenida de pozos locales y que se calienta hasta llegar al punto de saturación, este vapor de gran presión se encarga de hacer girar una turbina que está unida a un generador que induce en sus terminales energía eléctrica. Siguiendo el proceso de generación, el vapor de agua que sale de la turbina, va a un condensador tipo intercambiador de calor, sin embargo para ser totalmente enfriada se tiene que verter la composición de vapor y agua a una serie de enfriadores denominados torres de enfriamiento para alcanzar el estado líquido y así reiniciar con el ciclo de conversión.

Las Plantas actuales emplean procesos modernizados enfocados para aumentar la eficiencia del ciclo basados en el recalentamiento, regeneración y cambios de presión del vapor de agua. Lo anterior se conjuga con la implementación de ciclos combinados de varios tipos.

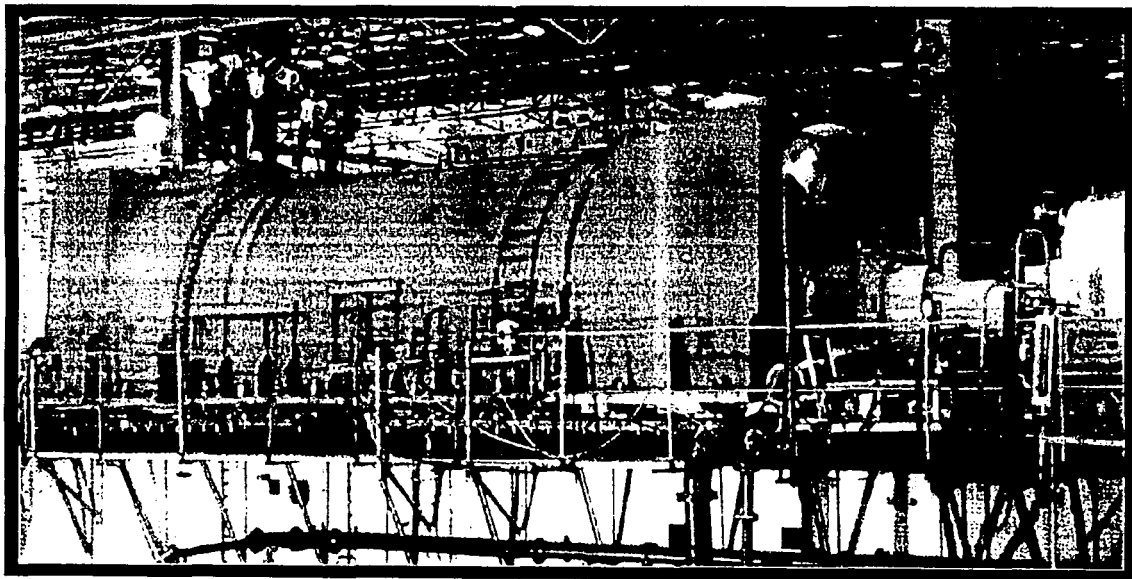


FIG 2.3 GENERADOR ELÉCTRICO

A través de un periodo de varias décadas, el desarrollo térmico de las plantas de energía a vapor han sido mejoradas, principalmente por la construcción de grandes calderas y turbinas generadoras y por el incremento de la eficiencia térmica del ciclo de vapor. El

incremento de la eficiencia térmica fue acompañada por el empleo de dispositivos que elevarán la presión y la temperatura, calentamientos regenerativos de los alimentadores de agua y recalentamientos de vapor.

Las Plantas de vapor actuales son sistemas de dos fluidos, o sea, la energía es intercambiada entre la combustión de gases y agua. La reacción de combustión ocurre esencialmente a presión atmosférica, y un cambio muy pequeño de presión es observado como el flujo de gases a través de varios intercambiadores de calor de la caldera previo a la descarga a presión atmosférica. Los procesos de combustión y transferencia de calor han sido mejorados, pero en las convencionales plantas de energía a vapor, la combustión no participa directamente en el proceso en el cual la energía térmica es convertida en energía mecánica.

La factibilidad de combinar gas y vapor en un ciclo de energía ha sido estudiado en gran cantidad, porque la generación de vapor envuelve el flujo de volúmenes grandes de gases en combustión, la expansión a gas es más apropiadamente acompañada por una turbina a gas.

Las Plantas termoeléctricas convencionales y las nucleares tienen muchos componentes en común: el generador de vapor, el colector de vapor, la turbina, el condensador y sistemas de suministro de agua, siendo en estos sitios donde hay gran susceptibilidad a encontrar problemas de corrosión que describiremos más adelante.

Cuando se ha logrado la generación eléctrica, se hace necesario para su transmisión a la Red Nacional, de elevar su nivel de tensión generado mediante la transformación en la subestación elevadora anexa, la cual se encarga de realizar la interconexión ya sea con alguna línea de transmisión u otra subestación de enlace.

En la figura 2.4, observamos el diagrama eléctrico unifilar de una planta de poco menos de 300 MW de generación. Tenemos en principio al generador eléctrico de 300 MVA, con un factor de potencia de 0.9 y una tensión de 21 kVolts, se emplea un transformador para la excitación, utilizando un sistema rectificador de potencia de tipo estática y de acción rápida además de un regulador automático de tensión. Para los servicios propios de la central, se requiere de otro transformador, el cual alimentará a los diversos sistemas que requieren de energía eléctrica, tales como los sistemas de baja tensión, los de corriente directa, de control, etc... El transformador elevador de generación eleva la tensión de 21 kV a niveles de transmisión, en este caso de 230 kV, pasando por la subestación de la central finalmente para ser transmitida por las líneas hasta el punto de interconexión con la Red Nacional.

En la tabla 2.1, citamos algunos de los elementos de protección y medición que se emplean en las centrales generadoras.

CAPÍTULO 2
 "DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

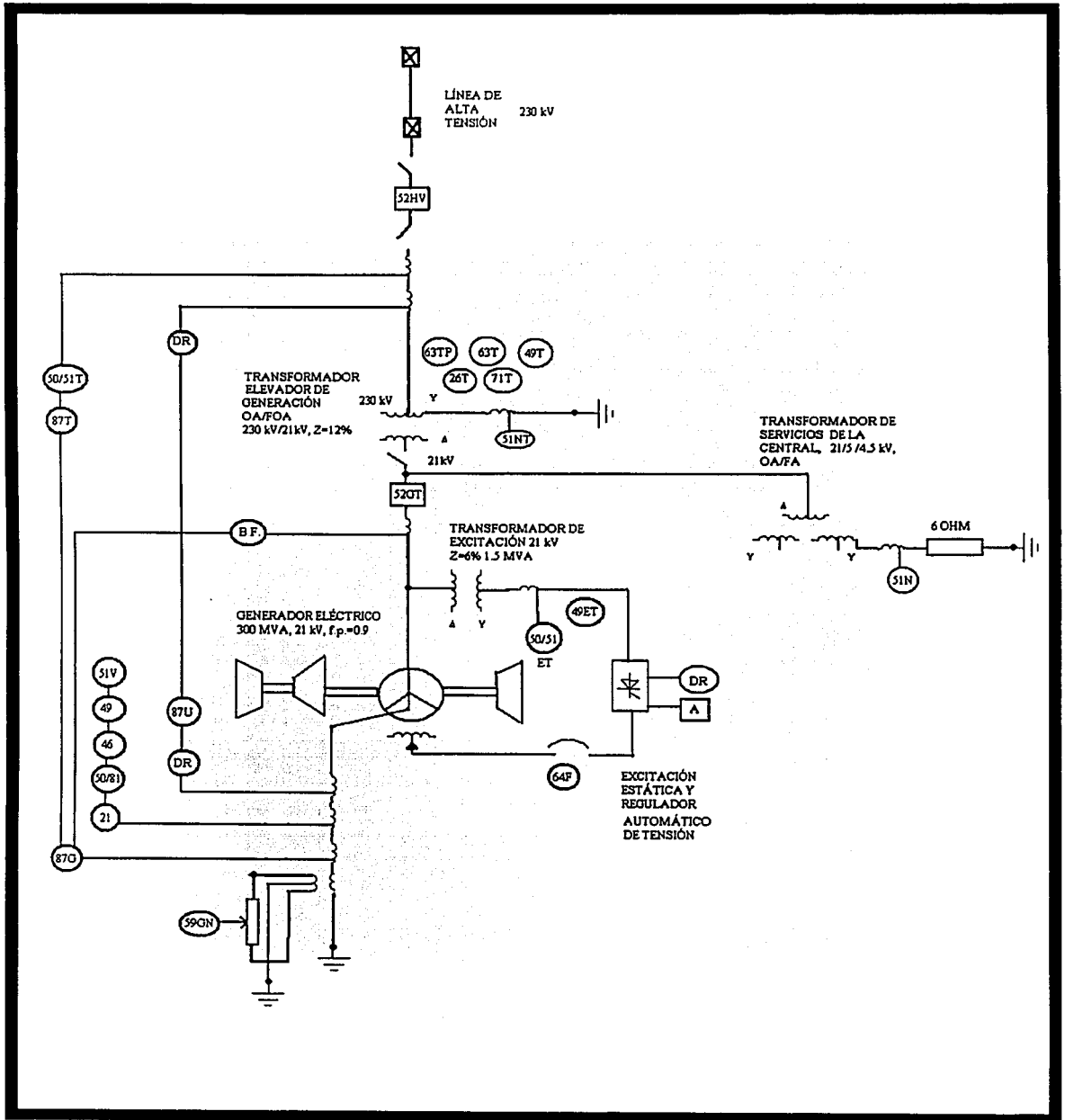


FIG. 2.4 DIAGRAMA UNIFILAR DE UNA PLANTA GENERADORA

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

ELEMENTOS DE MEDICIÓN Y PROTECCIÓN DE UNA PLANTA GENERADORA	
No.	ELEMENTO
21	PROTECCIÓN DE DISTANCIA
26T	PROTECCIÓN DE TEMPERATURA DEL ACEITE DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
46	PROTECCIÓN DE DESEQUILIBRIO DE FASES
49	PROTECCIÓN TÉRMICA DEL GENERADOR
49T	PROTECCIÓN DE TEMPERATURA DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
49ET	PROTECCIÓN TÉRMICA DEL TRANSFORMADOR DE EXCITACIÓN
50/51ET	PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DEL TRANSFORMADOR DE EXCITACIÓN
50/51T	PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
50/81	PROTECCIÓN CONTRA CIERRE INADVERTIDO
51N	PROTECCIÓN CONTRA FALLAS A TIERRA EN EL TRANSFORMADOR DE SERVICIOS
51NT	PROTECCIÓN CONTRA FALLAS A TIERRA EN EL TRANSFORMADOR ELEVADOR
51V	PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE CONTROLADO POR MÍNIMA TENSIÓN DEL GENERADOR
52HV	INTERRUPTOR DE ALTA TENSIÓN
52GT	INTERRUPTOR DE POTENCIA DEL GENERADOR
59GN	PROTECCIÓN CONTRA FALLAS A TIERRA EN EL 95% DEL ESTATOR
63T	PROTECCIÓN DE BUCHOLZ DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
63TP	DISPOSITIVO DE DESCOMPRESIÓN DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
64F	PROTECCIÓN CONTRA FALLAS A TIERRA EN EL ROTOR
71T	ALARMA DE NIVEL DE ACEITE DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
87G	PROTECCIÓN DIFERENCIAL DEL GENERADOR
87T	PROTECCIÓN DIFERENCIAL DEL TRANSFORMADOR ELEVADOR
87U	PROTECCIÓN DIFERENCIAL GLOBAL
DR	REGISTRADOR DE PERTURBACIONES
B.F.	FALLO DE INTERRUPTOR

TABLA 2.1

2.2 LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las Líneas de Transmisión son una parte importante en el Sistema Eléctrico Nacional, dado que a través de ellas, se transporta la energía eléctrica que se genera por las Centrales Eléctricas, por lo general están muy lejos de los centros de consumo, y constituyen líneas de cientos de kilómetros en todo el país.

La transmisión de energía eléctrica solo resulta económica al elevar el nivel de tensión generado debido a la cuestión de las pérdidas activas de las líneas por efecto Joule, teniendo que disminuir considerablemente la corriente.

Para darnos una idea de la magnitud y dispersión de las líneas de transmisión, se muestra en la figura 2.5 la red principal de interconexión del Sistema Eléctrico Nacional, mostrándose la capacidad máxima de los enlaces, los cuales van de 13.8 kV hasta 400 kV.

La estabilidad del Sistema Eléctrico Nacional depende en gran medida de la confiabilidad que se tenga en las Líneas de Transmisión, ya que un disturbio provocado por una falla, puede provocar la salida de varias centrales generadoras y la consecuente falta de energía eléctrica en el sector industrial, comercial y doméstico en el país.

En el año de 1903 entró en operación la línea que va de la Planta de Necaxa a la Ciudad de México, con una tensión de transmisión de 60 kV, en ese momento el más elevado en todo el mundo. Actualmente la red de transmisión considera los niveles de tensión de 400, 230 y 161 kV y de subtransmisión de 85 y 115 kV. Al finalizar diciembre del año 2001 esta red alcanzó una longitud de 38,270.78 km. en todo el Sistema Eléctrico Nacional

LONGITUD DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN EN LA REPUBLICA MEXICANA (km)				
Nivel de tensión (kV)	1998	1999	2000	2001
400	12,637.6	12,787.6	13,553.6	14,083.6
230	21,326.18	22,258.18	22,632.18	23,679.18
161	456	456	508	508
Total	34,419.78	35,501.78	36,693.78	38,270.78

TABLA 2.2

La potencia máxima que puede transmitir una línea, depende del límite térmico de los conductores o del margen de seguridad que permita dar la estabilidad del sistema ante una falla o desconexión imprevista. La longitud de una línea de transmisión determina los parámetros de impedancia y su comportamiento a la frecuencia de operación (60 Hz). Así que para distancias hasta 80 km, tenemos el modelo siguiente:

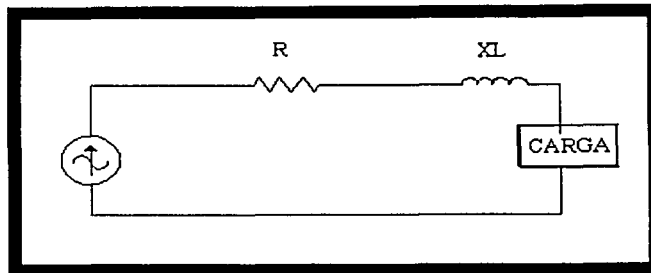


FIG. 2.5 LÍNEA CORTA

para longitudes mayores a 80 km, el efecto capacitivo se hace presente:

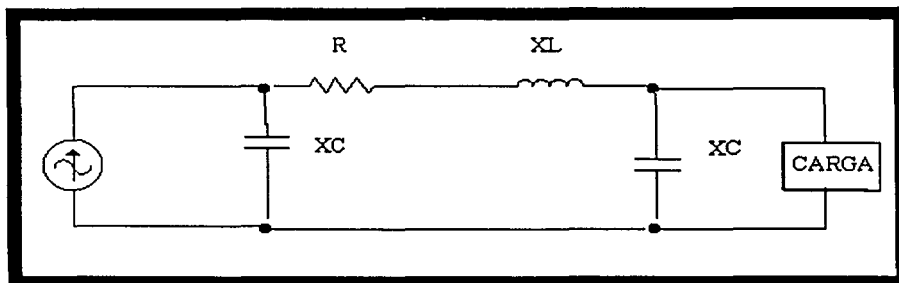


FIG. 2.6 LÍNEA LARGA

Se prevé que México tendrá un crecimiento de demanda de energía eléctrica anual por arriba del 6%, por lo que deberá aumentar la capacidad de generación instalada en más de 26,000 MW anuales, con esto se tendrán que ampliar las líneas de transmisión y debido a que tanto Comisión Federal de Electricidad como Luz y Fuerza del Centro no cuentan con el presupuesto suficiente para realizar dicha ampliación, se ha recurrido a capital privado para la construcción de plantas generadoras bajo la modalidad de productor independiente, y la construcción de líneas de transmisión, conocidos como Proyectos de Infraestructura Productiva de Impacto Diferido en el Registro del Gasto Público.

SISTEMAS ELECTRICOS Y RED PRINCIPAL DE INTERCONEXION

10 DE ENERO DE 2000

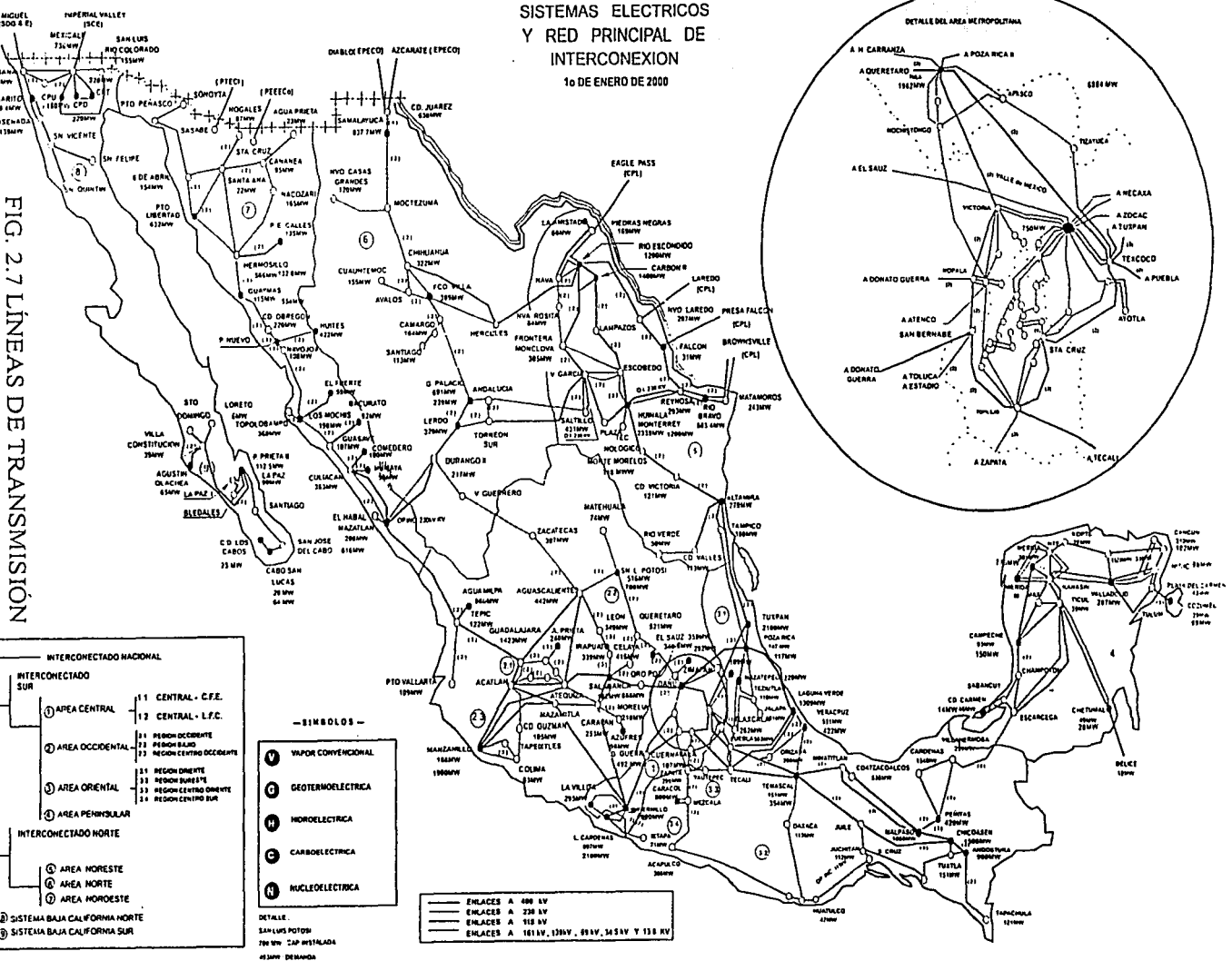


FIG. 2.7 LINEAS DE TRANSMISION

“DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA”

CAPITULO 2

INTERCONECTADO NACIONAL	
INTERCONECTADO SUR	
1	AREA CENTRAL
2	AREA OCCIDENTAL
3	AREA ORIENTAL
4	AREA PENINSULAR
5	SISTEMA BAJA CALIFORNIA NORTE
6	SISTEMA BAJA CALIFORNIA SUR
11	CENTRAL - C.F.E.
12	CENTRAL - L.F.C.
21	REGION OCCIDENTE
22	REGION ALTO OCCIDENTE
31	REGION ORIENTE
32	REGION CENTRO ORIENTE
33	REGION CENTRO SUR
41	AREA NORESTE
42	AREA NORTE
43	AREA NOROESTE

— SIMBOLOS —

(V)	VAPOR CONVENCIONAL
(G)	GEOTERMAL
(H)	HIDROELECTRICA
(C)	CARBON
(N)	NUCLEAR

(thick line)	EMISORES A 400 KV
(medium-thick line)	EMISORES A 230 KV
(medium-thin line)	EMISORES A 115 KV
(thin line)	EMISORES A 161KV, 138KV, 95KV, 66KV Y 138 KV

DETALLE SAN LUIS POTOSI 700 MW CAP INSTALADA 450 MW DEMANDA

Las partes que componen a una línea de transmisión son esencialmente:

- Estructuras autoportadas (torres)
- Conductores eléctricos
- Aisladores
- Hilos de guarda



a)



b)

FIG. 2.8 TORRES DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

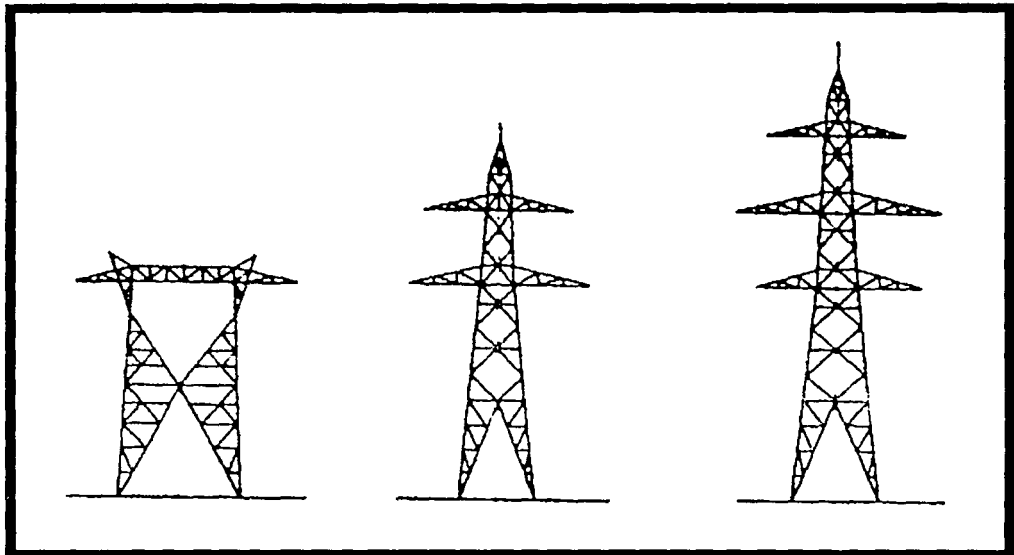


FIG. 2.9 ESTRUCTURAS AUTOSOPORTADAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

La gran mayoría de las Líneas de Transmisión están constituidas por estructuras autoportadas, hechas de acero al carbón galvanizado por inmersión en caliente. Estas estructuras autoportadas tienen cuatro patas enterradas, pueden estar en cimentación de concreto o enterradas directamente en el suelo, la cual se conoce como cimentación de acero. Las torres de transmisión de acero galvanizado típicas, son como las que vemos en la figura 2.9, donde se muestran tres tipos de estructuras diferentes.

En la figura 2.10, representamos un diagrama unifilar para línea de transmisión de 400 kV, en ella podemos ver el esquema normalizado de protección y en la tablas 2.3 y 2.4 su descripción:

No.	ELEMENTO
50FI	PROTECCIÓN DE FALLA DEL INTERRUPTOR
PP1	PROTECCIÓN PRIMARIA 1
PP2	PROTECCIÓN PRIMARIA 2
PR	PROTECCIÓN DE RESPALDO
MED	MEDICIÓN
DTD	DISPARO TRANSFERIDO DIRECTO
UA	UNIDAD DE ACOPLAMIENTO

TABLA 2.3

LÍNEAS LARGAS > 10km		LÍNEAS CORTAS <10 km		AMBAS LÍNEAS
PP1	PP2	PP1	PP2	PR
COMPARACIÓN DIRECCIONAL DE SECUENCIA POSITIVA Y NEGATIVA	COMPARACIÓN DIRECCIONAL CON RELEVADORES DE DISTANCIA	DIFERENCIAL DE LÍNEA CON FIBRA ÓPTICA	DIFERENCIAL DE LÍNEA CON FIBRA ÓPTICA	RELEVADOR DIRECCIONAL DE SOBRECORRIENTE PARA FALLAS DE FASE A TIERRA
ONDA SUPERPUESTA	ONDA SUPERPUESTA			RELEVADOR DE RESPALDO POR FALLA DE INTERRUPTOR
ONDA VIAJERA	ONDA VIAJERA			

TABLA 2.4

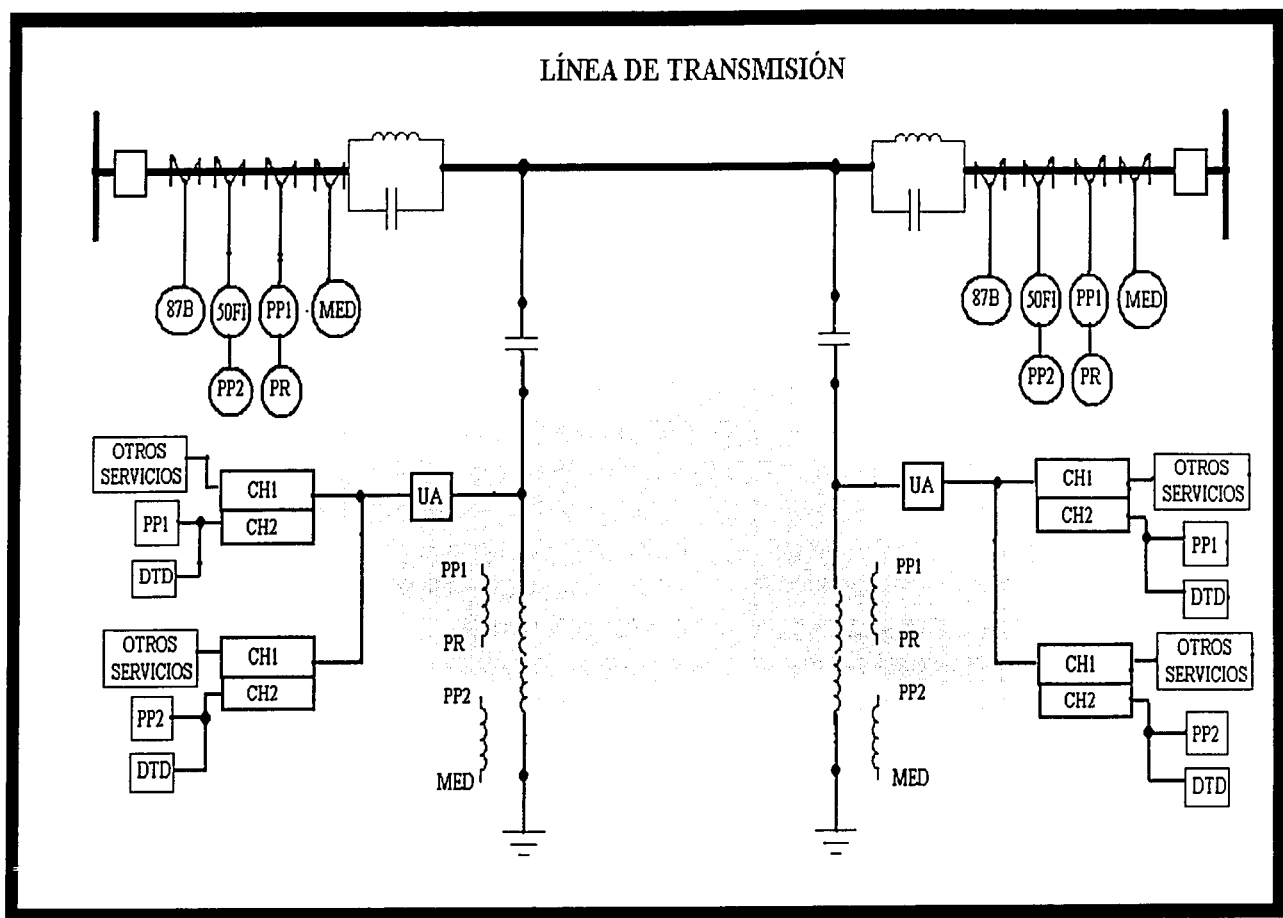


FIG. 2.10 DIAGRAMA UNIFILAR DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Los sistemas de distribución son una parte medular de los sistemas eléctricos, dado que las empresas estatales que venden la energía, necesitan de un sistema de distribución para poder hacer llegar a sus consumidores la energía eléctrica, como se ve en la figura 2.11, el consumo puede ser industrial, comercial o doméstico.

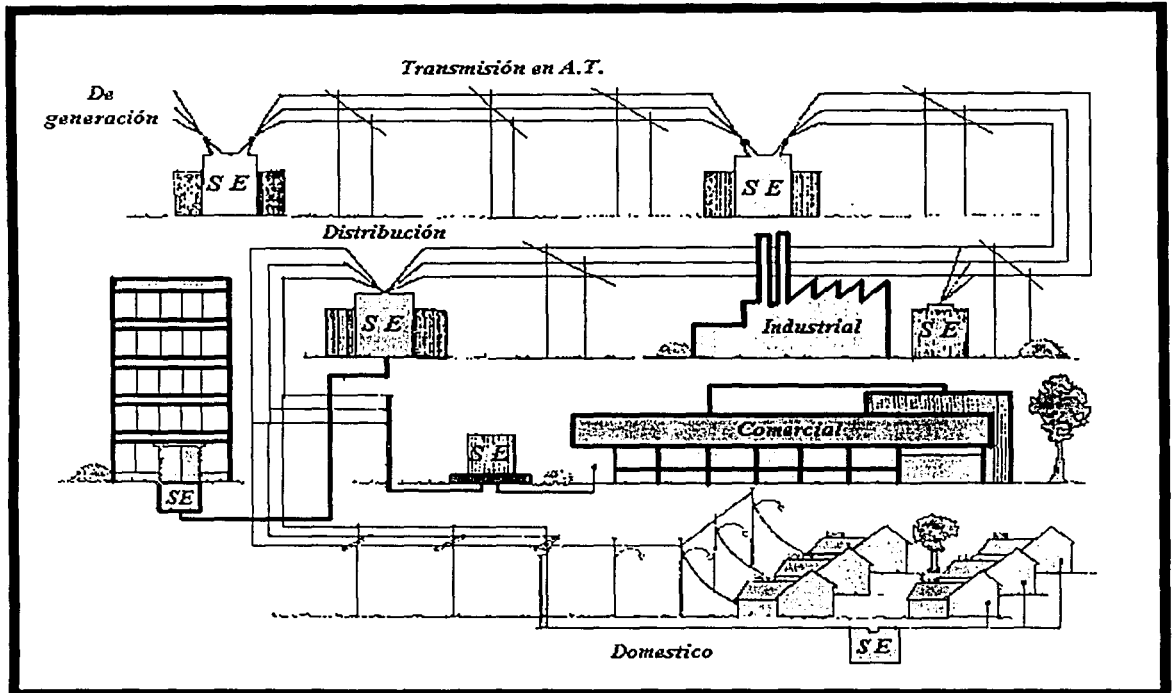


FIG. 2.11 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN AÉREO Y SUBTERRÁNEO

Un sistema de distribución se puede definir como el conjunto de instalaciones que operan en niveles de tensión desde 127 volts hasta tensiones de 34.5 kV. Encargadas de entregar la energía eléctrica a los usuarios. Estos sistemas de distribución para su mejor comprensión se clasifican en cinco áreas de distribución específicas:

- Sistemas de distribución industriales
- Sistemas de distribución comerciales

- Parques industriales
- Distribución urbana y residencial
- Distribución rural

Los tres últimos competen al sector paraestatal, por ejemplo, Luz y Fuerza del centro, al 31 de diciembre del año 2000, contaba con una longitud de 25,502 km, de red de distribución, aérea y subterránea, con tensiones de 23, 13.2 y 6 kV.

Los sistemas de distribución son en gran mayoría aéreos por la facilidad y el bajo costo de instalación que tienen sobre los sistemas de distribución subterráneos. Sin embargo las redes subterráneas presentan mayor confiabilidad en el servicio, además tienen ventaja en zonas densamente pobladas, contribuyendo a la limpieza del medio, sobre todo si se considera el factor estético. Debido a que la corrosión afecta en mayor grado a la red subterránea, se comentará solo ésta para su mayor comprensión.

Las estructuras de las redes de distribución, de acuerdo a su operación, son esencialmente, la estructura radial, estructura en anillo y la estructura mallada.

Red Radial: esta constituida por líneas donde el flujo de energía va directamente de la subestación a la carga, las cuales se localizan en los extremos o repartidas a lo largo de la línea.

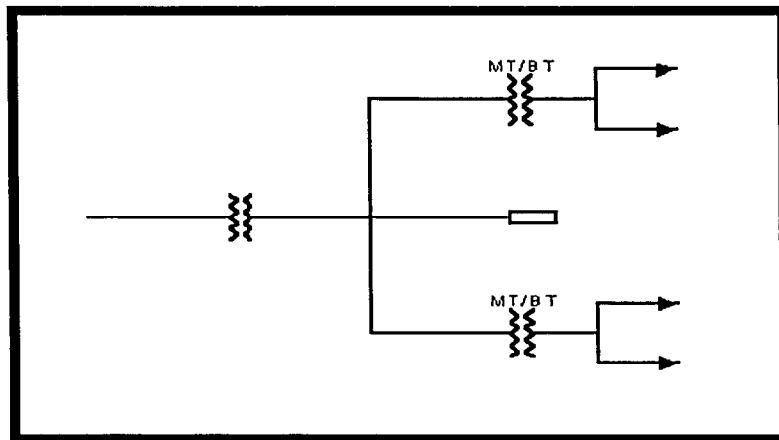


FIG. 2.12 ESQUEMA UNIFILAR DE UNA RED RADIAL

La estructura radial es la que más se emplea, debido al bajo costo de instalación, y la sencillez de diseño pudiendo ser esta aérea, subterránea o mixta.

Red en Anillo: esta red se compone de una línea cerrada con uno o dos alimentadores, en esta red se colocan elementos de maniobra que permiten aislar una parte del mismo como se ve en la figura 2.13, es utilizada tanto en MT como en BT.

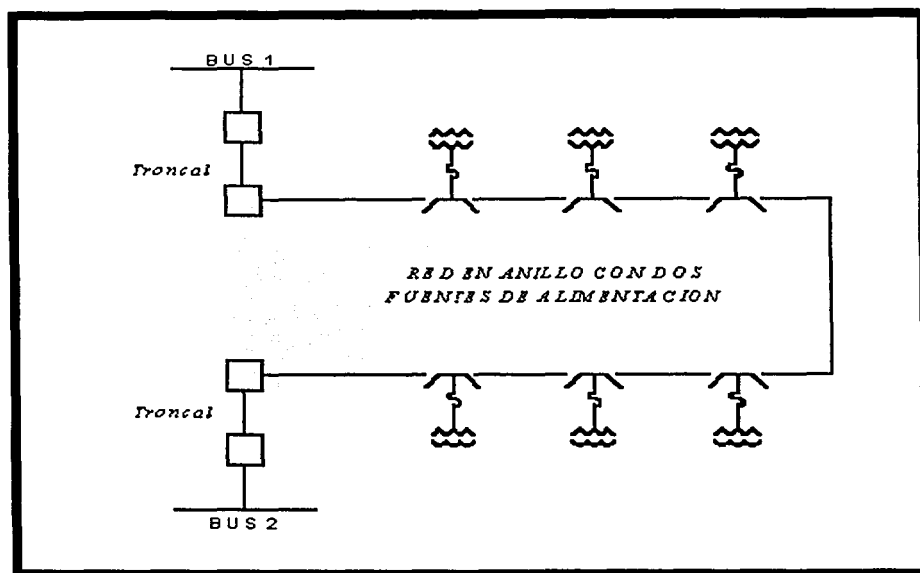


FIG. 2.13 RED EN ANILLO CON DOS FUENTES DE ALIMENTACIÓN

Las ventajas de esta red en comparación a la radial es que presenta una mayor seguridad y la baja caída de tensión debido a variaciones bruscas de carga.

Red mallada: en esta estructura las SE's están unidas por seccionamiento, formando anillos de igual sección con los cables, que operan en forma radial (figura 2.14), se colocan ligas entre los anillos para asegurar la alimentación, pudiendo ser esta por uno o varios puntos.

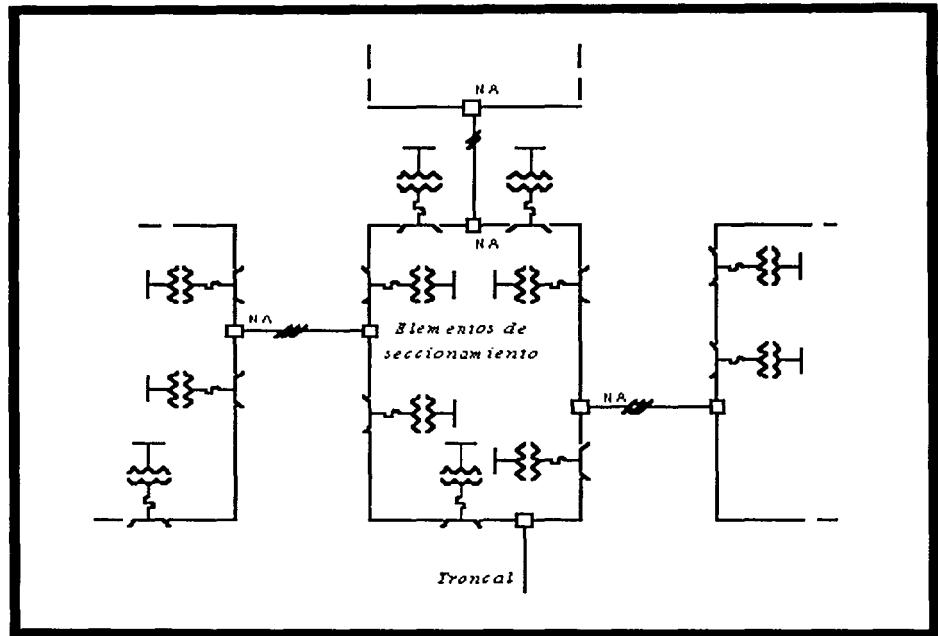


FIG. 2.14 ESQUEMA BÁSICO DE UNA RED MALLADA

Este tipo de red se utiliza en zonas de gran densidad de carga, debido a la seguridad que se tiene en el suministro, su principal ventaja es que puede fácilmente incorporar mas carga sin hacerle grandes cambios a la red.

La primer red subterránea en México se construyó en el centro de la ciudad de México en el año de 1925, cuatro años mas tarde dio origen a la red automática subterránea cuya demanda pico fue de 4,500 kVA. En la actualidad en la zona central del área metropolitana se tienen consideradas 14 redes subterráneas, (figura 2.15).

CAPÍTULO 2
 "DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

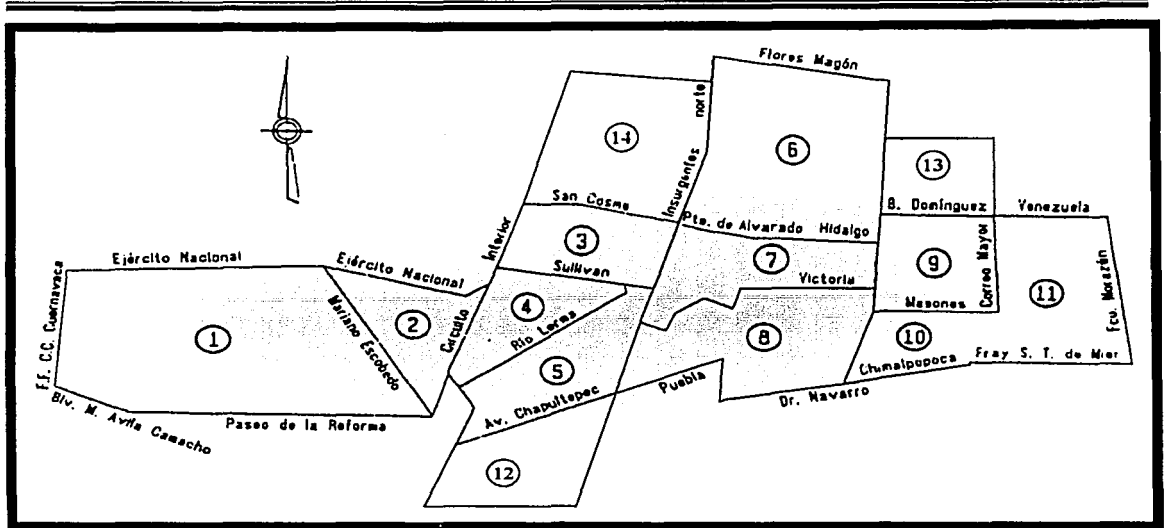


FIG. 2.15 RED SUBTERRÁNEA

Por su forma de conexión en la baja tensión se pueden clasificar en redes malladas o automáticas y redes radiales de acuerdo a la tabla 2.5, el total de las redes subterráneas es de 19.647 km², de los cuales se encuentran construidos en la actualidad 17.391 km² y 2,256 km² proyectados para futura construcción.

En la actualidad la red radial Anzures y Condesa están por iniciar su construcción, así como también parte de las redes de Cuauhtemoc, Santa María y Jamaica están por terminarse.

Como se ve en la tabla 2.5 las redes subterráneas se encuentran en 23 kV, con excepción de la red automática de Jamaica, que actualmente cuenta con 0.3 km², en 6 kV, los cuales ya se encuentran proyectados para pasar a 23 kV.

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

REDES SUBTERRÁNEAS			
REDES RADIALES	NIVEL DE TENSIÓN	REDES AUTOMÁTICAS	NIVEL DE TENSIÓN
Red Polanco *1	23 kV	Red central *9	23 kV
Red Anzures *2	23 kV	Red Jamaica *10	23 y 6 kV
Red San Rafael *3	23 kV	Red Verónica *5	23 kV
Red Cuauhtemoc *4	23 kV	Red Reforma *7	23 kV
Red Buenavista *6	23 kV		
Red Indianilla *8	23 kV		
Red Merced *11	23 kV		
Red Condesa *12	23 kV		
Red Lagunilla *13	23 kV		
Red Santa María *14	23 kV		

*# : ubicación en la figura 2.15

TABLA 2.5

Para llevar la energía desde las plantas de generación hasta los lugares de consumo es necesario de cuando menos tres transformadores, o dicho formalmente de subestaciones transformadoras. Una parte muy importante de los sistemas de distribución subterránea son los transformadores.

Un transformador es una máquina electromagnética, que transfiere energía de un circuito primario a un circuito secundario de corriente alterna con la misma frecuencia, variando parámetros como corrientes y tensiones. Los transformadores se les clasifica de distintas formas, de acuerdo a su operación, a su construcción o la utilidad que se les da, para nuestro caso solo nos interesa clasificarlo con base en su operación, refiriéndose a la potencia que manejan dentro del sistema eléctrico:

- Transformadores de potencia; capacidad mayores a 750 kVA
- Transformadores de distribución; capacidad de 5 kVA hasta 750 kVA

Los transformadores son construidos con un tanque hermético, para preservar el aceite que contiene como función de dieléctrico y refrigerante del núcleo y bobinas.

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

En la figura 2.16 vemos un transformador trifásico sumergible hasta 3 metros de profundidad y 400 kVA de capacidad conexión Δ / Y enfriado por aceite y relación de transformación 6000/220 V para conectarse a red automática en baja tensión.

La figura 2.17 representa un transformador trifásico sumergible hasta 3 metros de profundidad y 200 kVA de capacidad conexión Δ / Y igualmente enfriado por aceite y relación de transformación 6000/220 V para conectarse a red radial en baja tensión:

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

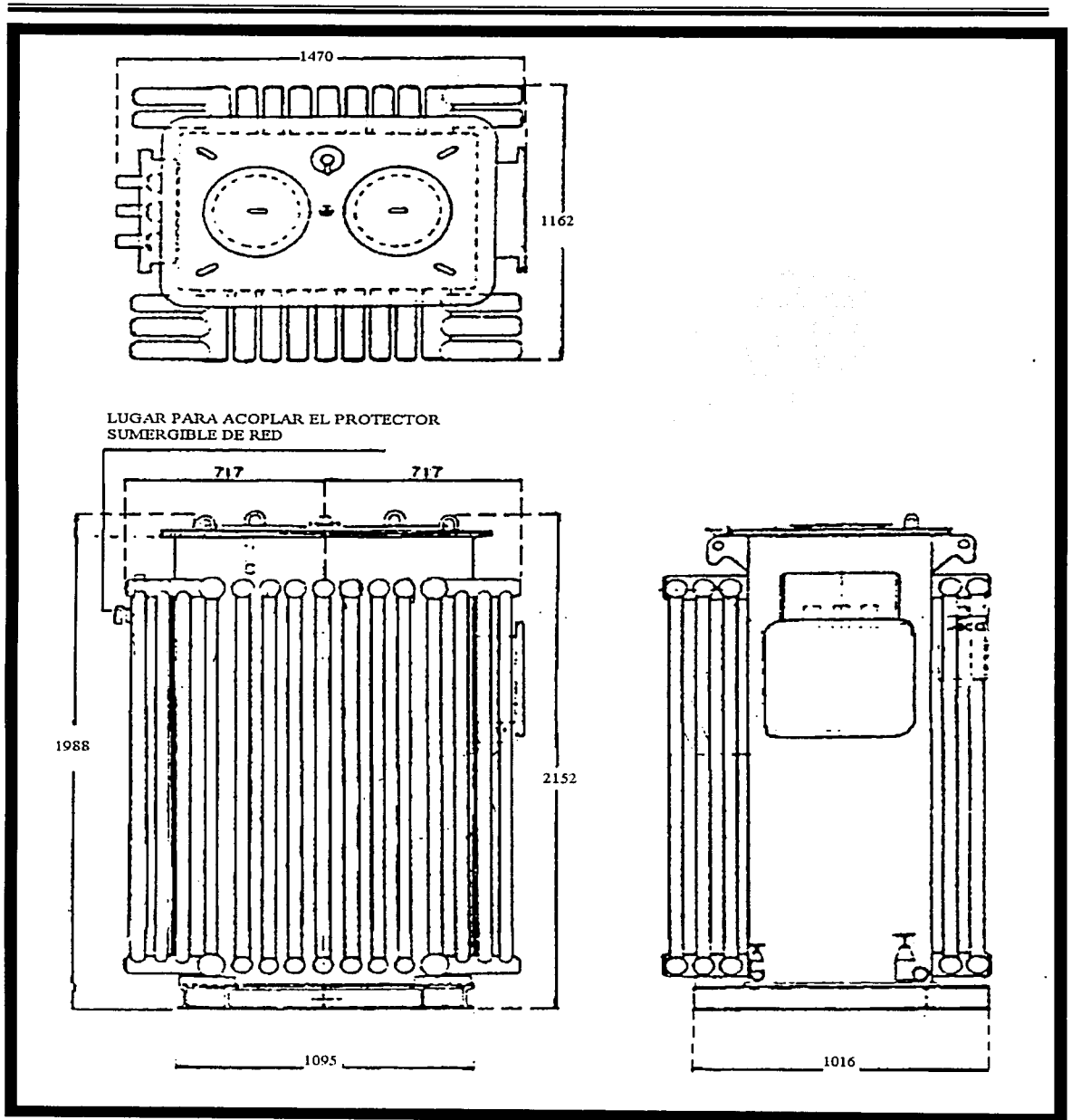


FIG. 2.16 TRANSFORMADOR SUMERGIBLE 400 kVA

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

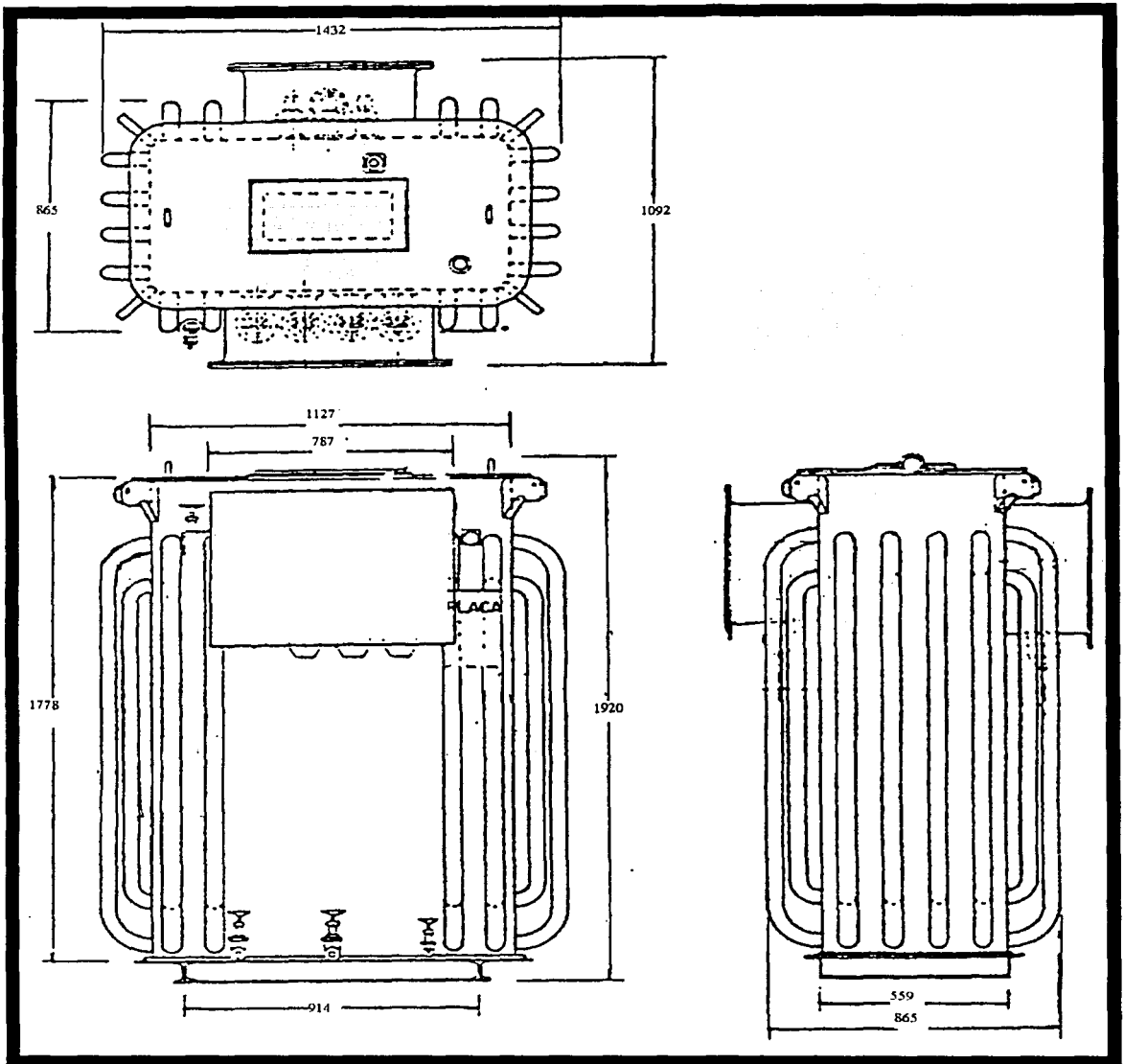


FIG. 2.17 TRANSFORMADOR SUMERGIBLE 200 KVA

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

Los accesorios más importantes de un transformador de distribución subterráneo tipo pozo se muestran en la figura 2.18 y tabla 2.6.

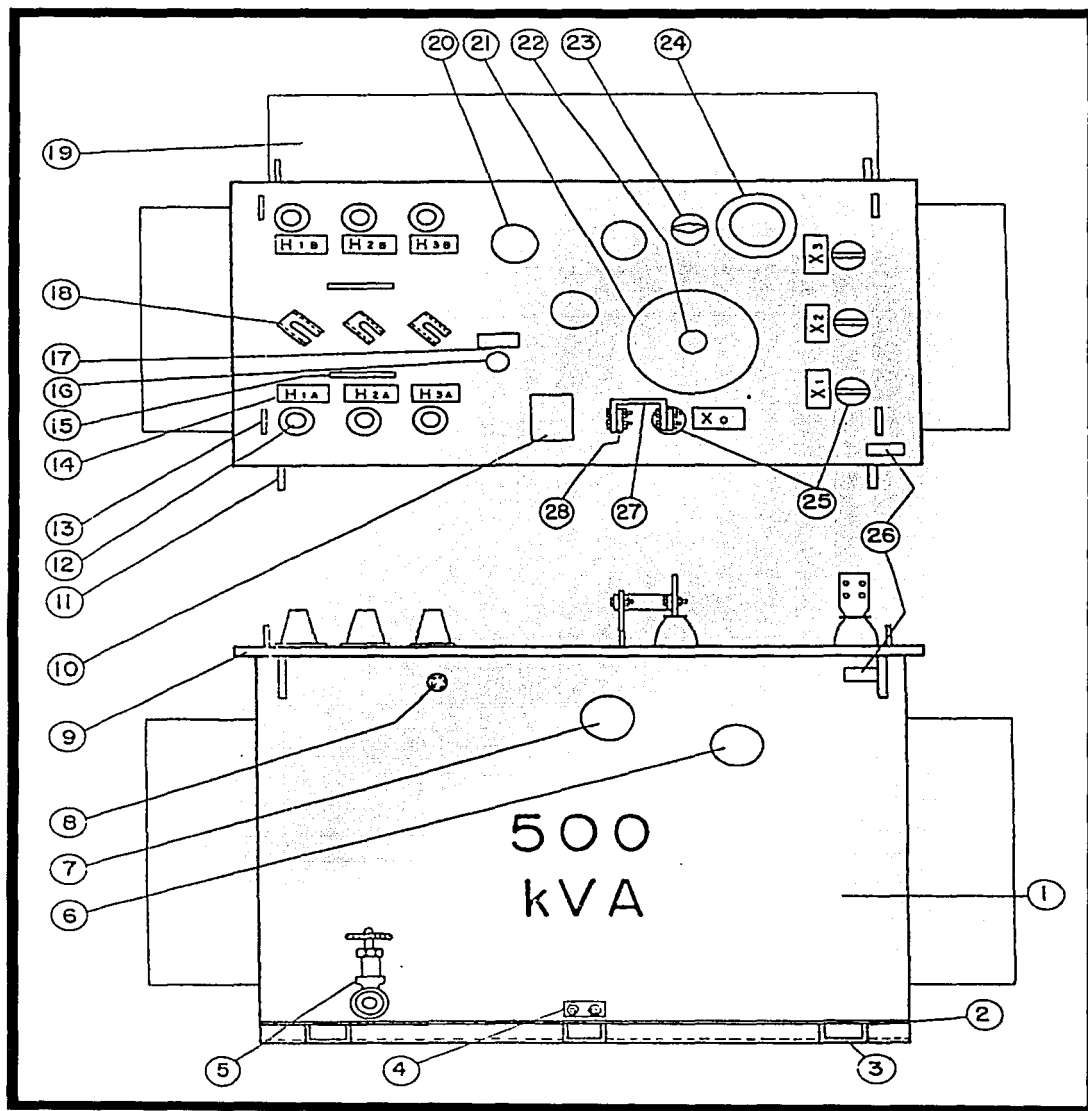


FIG. 2.18 ESQUEMA DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEO TIPO POZO

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

ACCESORIOS DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN SUBTERRÁNEO TIPO POZO	
Referencia	Descripción
1	Tanque
2	Fondo
3	Base
4	Conector del tanque a tierra
5	Válvula de Drenaje y dispositivo de muestreo
6	Termómetro
7	Indicador magnético del nivel de aceite
8	Niple para prueba de hermeticidad
9	Tapa
10	Placa de datos del transformador
11	Asas de izaje del transformador completo
12	Boquillas primarias
13	Asas de izaje de la tapa y conjunto interno
14	Identificación de terminales
15	Conector de tierra para los neutros de los cables y codos conectores
16	Seccionador
17	Placa de identificación del Seccionador
18	Soporte para codo conector
19	Enfriadores
20	Fusibles
21	Registro de mano
22	Tapón de llenado
23	Cambiador de derivaciones
24	Válvula de alivio de sobrepresión
25	Boquilla de baja tensión
26	Número d serie
27	Puente para aterrizar Xo
28	Placa de tierra de Xo

TABLA 2.6

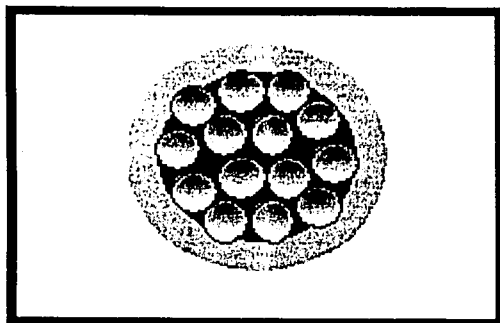
CABLES SUBTERRÁNEOS

Para transportar la energía eléctrica a través de las redes subterráneas es necesario el uso de cables especialmente diseñados para preservar constante el flujo eléctrico.

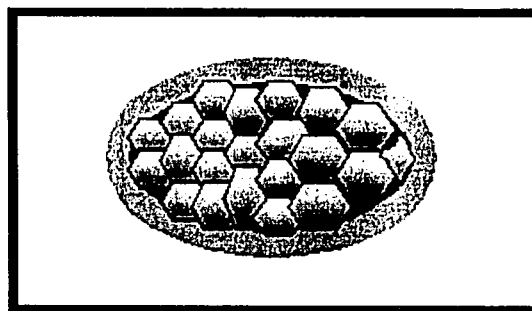
Un cable está constituido por una serie de hilos conductores dispuestos de diferentes formas rodeados con pantallas y cubiertas aislantes para transmitir altas tensiones y corrientes.

La forma en la cual se fabrican los conductores de los cables depende del uso que se le dará, en la siguiente figura se muestran algunos tipos:

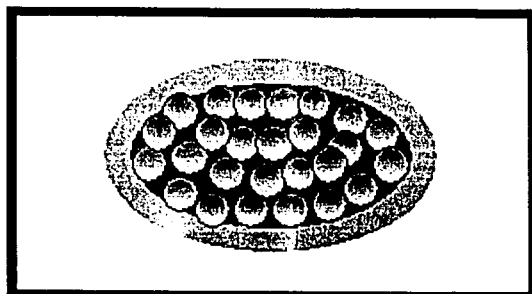
REDONDA CONCÉNTRICA



SECTORAL COMPACTA



SECTOR NO COMPACTO



SIN NÚCLEO

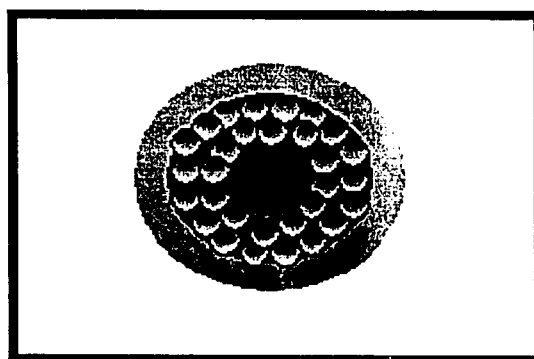


FIG. 2.18 SECCIONES TRANSVERSALES DE CABLES CONDUCTORES

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

Al área transversal del conductor se le denomina calibre, empleándose las escalas AWG(American Wire Gauge) que van del 36 al 2 y 1/0 al 4/0 AWG, y para mayores calibres se emplean los Circular Mil (CM). Otra escala empleada es la milimétrica, la cual define el calibre directamente en mm^2 .

Las pantallas eléctricas se localizan entre el conductor y el aislamiento para uniformizar el campo eléctrico generado a lo largo y amortiguar corrientes elevadas, también se localizan por encima del aislamiento, esto con el fin de proporcionar una trayectoria aterrizada para las corrientes que pueden dañarlo.

El aislamiento es el dieléctrico que se emplea para evitar que la corriente viaje a puntos no deseados. Entre los aislantes más usados podemos mencionar al papel impregnado en aceite y a los materiales plásticos tales como el policloruro de vinilo y el polietileno.

Los cables tienen una cubierta que los protege de fuerzas mecánicas durante su instalación y evitarle problemas en su funcionamiento, se localizan por encima de la pantalla electrostática o del aislamiento. Su material puede ser de hierro galvanizado o bronce, dispuesto en forma de hilos.

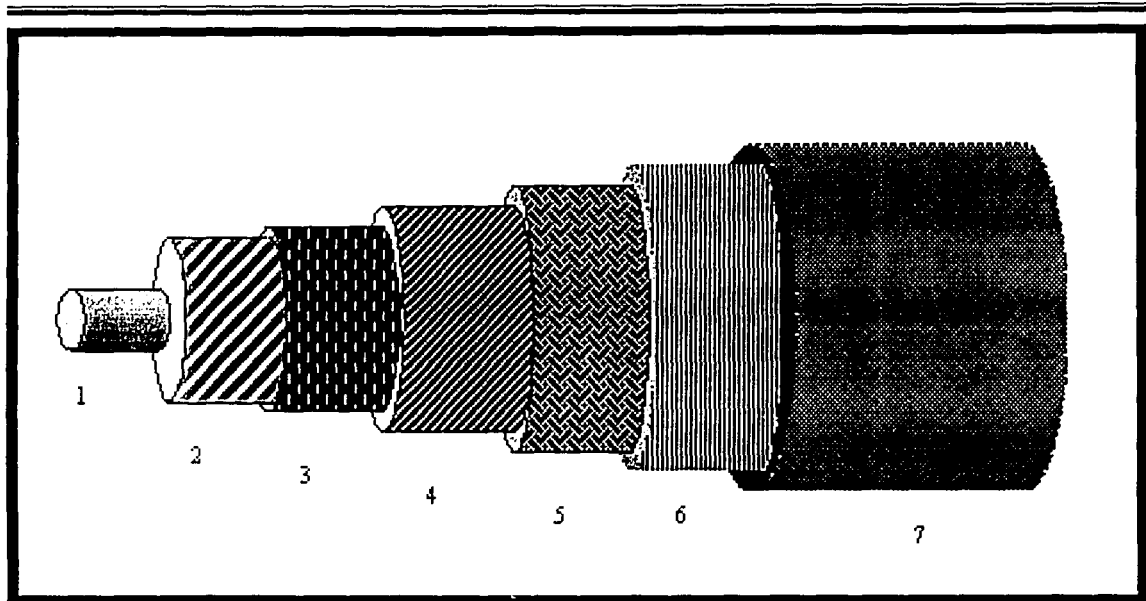
Finalmente, la cubierta del cable sirve como elemento protector contra el exterior, por lo que tienen que poseer grandes propiedades de resistencia a golpes, desgarres, humedad, etc.

La trinchera es el sitio donde se alojarán los cables conductores de muy altas potencias rellenas por capas de arenas térmicas que permiten mantener la temperatura de operación del cable.

Para la distribución en tensiones de 85 y 230 kV, se encuentran instalados dos tipos de cables aislados con papel impregnado:

- Autocontenidos en aceite OF (oil filled) y
- Tipo tubo

El cable autocontenido lleva en su interior aceite a bajas presiones entre 3 kg/cm^2 , 5 kg/cm^2 y 10 kg/cm^2 para evitar efectos de ionización.



1.-canal central de aceite

2.-conductor de cobre

3.-aislamiento de papel poroso
impregnado de aceite fluido
a presión

4.-envoltura de plomo

5.-armadura
antimagnética

6.-papel aceitado

7.-cubierta exterior
de plomo

FIG. 2.19 CABLE AUTOCONTENIDO O TIPO PIRELLI

El cable tipo tubo se encuentra dentro de un tubo de acero que contiene a presión 14 kg/cm² de aceite o gas. El tubo además se recubre de un protector anticorrosivo a base de polietileno para ser alojado en su trinchera.

Existen dos variantes de este tipo de cables, los de presión y los de compresión. En los de presión, el aceite ó el gas penetra en el aislamiento para evitar huecos, y en los de compresión, su cubierta es permeable, por lo que no se generan huecos por llenar.

Los cables tipo tubo y los autocontenidos tienen los siguientes accesorios:

- ◆ Tanques y bombas de aceite que sirven para almacenar y dar presión al aceite dentro de la tubería que alojan a los cables.
- ◆ Termopares que miden la temperatura del cable para evitar sobrecalentamientos

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

Además se requiere de Protección catódica para proteger las tuberías de acero donde se ubican los cables tipo tubo.

CARACTERÍSTICAS DE CABLES TIPO TUBO DE 230 Kv	
Tensión nominal	230 kV
Frecuencia	50/60 Hz
Presión del aceite	14 kg/cm ²
Temperatura máxima	85 ° C
Profundidad de instalación	1.20 m
Reactancia inductiva	0.127 Ω/km
Reactancia capacitiva	12400 Ω/km
Impedancia de secuencia cero	0.120 Ω/km
Peso	9.52 kg/m
ESPEORES	
Aislamiento	19.1 mm
Pantalla	0.3 mm
NIB	1050 kV
TUBERÍA	
Material	acero
Diámetro exterior	219.1 mm
Diámetro interior	206.4 mm
Espesor de pared	6.3 mm
Longitud de cada tramo	10.67m min 15.2 m max

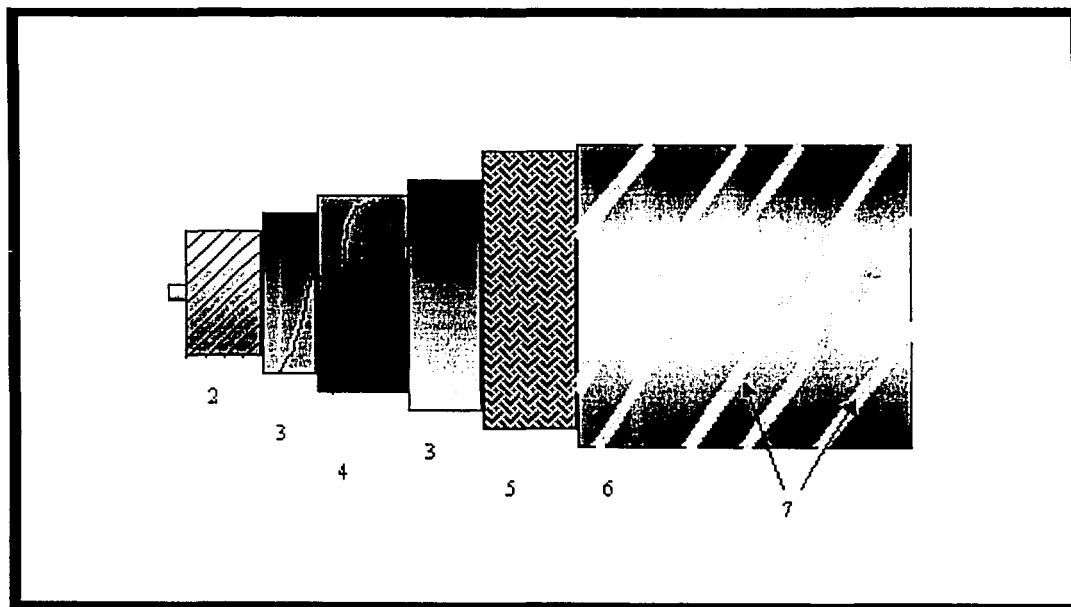
TABLA 2.7

RECUBRIMIENTO EXTERIOR

Cubierta protectora contra corrosión con una resistencia dieléctrica para 30000 V, con una base de cemento de hule y una capa de polietileno de alta densidad abarcando toda la superficie del tubo excepto extremos de conexión.

CONDUCTORES

Monopolar de cobre suave redondo compacto de 1000 MCM con hilo piloto al centro aislado, una pantalla sobre el conductor a base de una cinta de papel carbón, aislamiento de papel impregnado en aceite, pantalla sobre aislamiento de cinta de papel carbón intercalada con cinta aluminizada, sello de cinta Mylar con cinta de cobre y por último alambres de latón para arrastre.



- 1.-Alambre de cobre con aislamiento de nylon
- 2.-Conductores de cobre
- 3.-Cintas de papel carbón
- 4.-Aislamiento de papel impregnado

- 5.-Cinta de papel carbón con cinta aluminizada
- 6.-Sello de cinta mylar metalizada con cinta de cobre
- 7.-Alambres para deslizamiento

FIG. 2.20 CABLE TIPO TUBO DE 230 kV

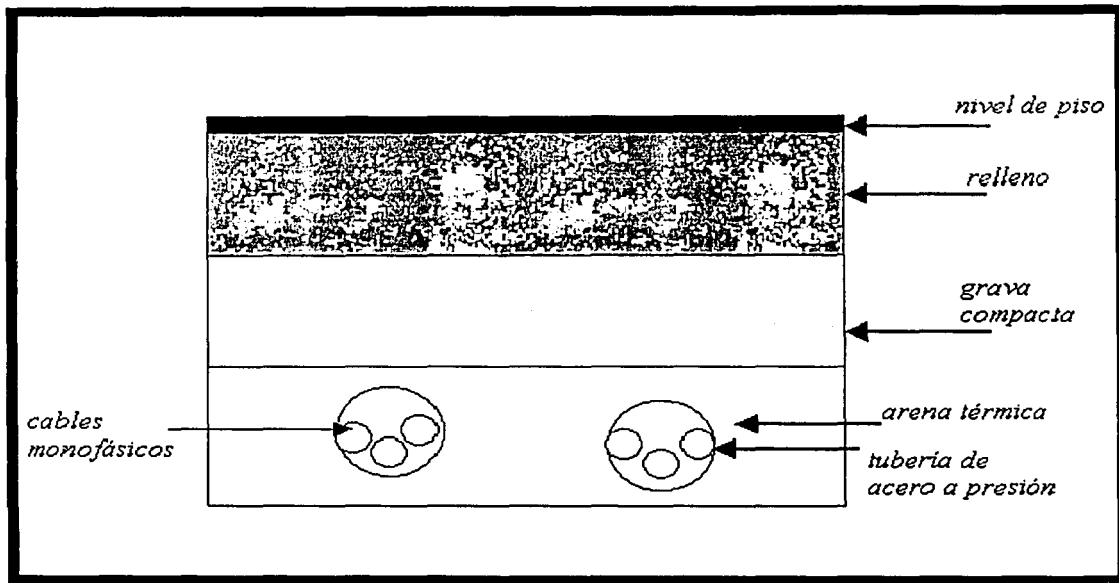


FIG 2.21 CORTE TRANSVERSAL DE DOS CABLES TIPO TUBO EN TRINCHERA

Con el desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de cables de muy altas potencias, desde comienzos de la década de los noventa se dejaron de instalar cables tipo tubo y en la actualidad se instalan tipo seco, sin embargo aún siguen operando los existentes.

En la tabla 2.8 se citan los cables tipos tubo instalados en la Ciudad de México hasta ahora:

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

CABLES TIPO TUBO INSTALADOS POR LyFC					
No.	NOMBRE CABLE	TIPO	NIVEL (KV)	CAPACIDAD NOMINAL (A)	SECCIÓN (MCM)
1	CINTURA	GAS	85	360	500
2	MORAZAN	GAS	85	360	500
3	TACUDESA	GAS	85	460	700
4	CONVARTE	GAS	85	530	700
5	NARQUEÑA I	GAS	85	530	900
6	NARQUEÑA II	GAS	85	530	900
7	MORAVER I	ACEITE	85	680	1000
8	MORAVER II	ACEITE	85	680	1000
9	VERINDIA	ACEITE	85	600	800
10	JAMILLA	ACEITE	85	600	800
11	METRO I	ACEITE	85	600	800
12	METRO II	ACEITE	85	600	800
13	HUASTECA I	ACEITE	85	680	1000
14	HUASTECA II	ACEITE	85	680	1000
15	PENSADOR	ACEITE	230	550	1000
16	MERCED I	ACEITE	230	550	1000
17	MERCED II	ACEITE	230	550	1000
18	VALLEJO I	ACEITE	230	650	1500
19	VALLEJO II	ACEITE	230	650	1500
20	COYOACAN I	ACEITE	230	650	1000
21	COYOACAN II	ACEITE	230	650	1000
22	AZCA I	ACEITE	230	765	1500
23	AZCA II	ACEITE	230	765	1500
24	PERA	ACEITE	230	765	1500
25	VERTIZ I	ACEITE	230	765	1500
26	VERTIZ II	ACEITE	230	765	1500
27	PEMEX I	ACEITE	85	765	1500
28	PEMEX II	ACEITE	85	765	1500
29	ESME I	ACEITE	230	765	1500
30	ESME II	ACEITE	230	765	1500
31	CUAHUTEMOC I	ACEITE	230	765	1500
32	CUAHUTEMOC II	ACEITE	230	765	1500

CONTINUACIÓN:

CAPÍTULO 2
"DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA"

No.	NOMBRE DEL CABLE	LONGITUD (km)	SUBESTACIONES		AÑO
			DESDE	HACIA	
1	CINTURA	576	NONOALCO	SN.LÁZARO	1950
2	MORAZAN	3.94	SN. LÁZARO	JAMAICA	1953
3	TACUDESA	3.46	TACUBAYA	CONDESA	1960
4	CONVARTE	4.48	CONDESA	NARVARTE	1960
5	NARQUEÑA I	5.29	NARVARTE	TAXQUEÑA	1960
6	NARQUEÑA II	5.33	NARVARTE	TAXQUEÑA	1960
7	MORAVER I	3.76	MORALES	VERONICA	1966
8	MORAVER II	3.7	MORALES	VERONICA	1966
9	VERINDIA	3.32	VERONICA	INDIANILLA	1966
10	JAMILLA	2.79	JAMAICA	INDIANILLA	1966
11	METRO I	3.54	JAMAICA	BUEN TONO	1969
12	METRO II	3.26	BUEN TONO	NONOALCO	1969
13	HUASTECA I	2.96	MORALES	HUASTECA	1982
14	HUASTECA II	0.948	HUASTECA	VERONICA	1982
15	PENSADOR	2.43	KO	PEN. MEX.	1972
16	MERCED I	3.92	MERCED	JAMAICA	1972
17	MERCED II	2.28	PEN. MEX	MERCED	1972
18	VALLEJO I	4.2	CEYLAN	VALLEJO	1978
19	VALLEJO II	4.19	CEYLAN	VALLEJO	1978
20	COYOACAN I	4.2	SN. ÁNGEL	COYOACAN	1980
21	COYOACAN II	4.1	SN. ÁNGEL	COYOACAN	1980
22	AZCA I	5.06	AZCAPOTZ.	REMEDIOS	1984
23	AZCA II	5.06	AZCAPOTZ.	REMEDIOS	1985
24	PERA	3.71	MERCED	PERALVILLO	1986
25	VERTIZ I	2.794	JAMAICA	VÉRTIZ	1987
26	VERTIZ II	2.794	JAMAICA	VÉRTIZ	1987
27	EMEX I	0.1347	HUASTECA	PEMEX	1988
28	EMEX II	0.963	VERONICA	PEMEX	1988
29	ESME I	5.2	ESMERALDA	PERALVILLO	1989
30	ESME II	5.2	ESMERALDA	PERALVILLO	1989
31	CUAHUTEMOC I	2.239	KO	CUAHUTEMOC	1989
32	CUAHUTEMOC II	2.239	KO	CUAHUTEMOC	1989

TABLA 2.8



CAPÍTULO III

FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN

La corrosión electroquímica ataca a estructuras metálicas originando cambios en su estructura interna y en pérdidas de metal, causada por descargas de corrientes de la estructura al medio físico circundante, en particular con la presencia de agua, soluciones salinas, o la simple humedad de la atmósfera y suelos.

Una reacción electroquímica se define como una reacción química que involucra la transferencia de electrones (oxidación y reducción). El fenómeno de la corrosión tiene como característica fundamental que solo se da con la presencia de un electrolito, originando en el medio regiones plenamente identificadas, denominadas anódicas y catódicas; así por ejemplo, una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y consecuentemente en la región catódica habrá una inmunidad del metal.

Cuando los átomos de la región anódica se disuelven para formar iones, los electrones que dejan libres hacen al ánodo negativo con respecto a la solución. Sus electrones pasan al cátodo a través de la masa metálica y allí neutralizan a los iones positivos. La corrosión, por tanto, es sostenida por procesos simultáneos anódicos y catódicos.

Las reacciones simultáneas que representan a la corrosión de los metales en presencia de Hidrógeno son:



La reacción anódica está representada por la liberación de iones (electrones) del elemento metálico (Me), causando su oxidación, mientras que son recibidos por los átomos de Hidrógeno circundante causando la reducción del elemento en átomos de gas H_2 . Lo anterior ocurre en un medio ácido, sin embargo cuando se encuentra en un medio más neutro, la generación de átomos de gas y su acumulación en la superficie del metal disminuyen la reacción y la acción corrosiva.

Esta corrosión electroquímica, es característica de estructuras sumergidas o enterradas, siendo sumamente peligrosa por tratarse de una corrosión localizada que puede ser origen de picaduras profundas.

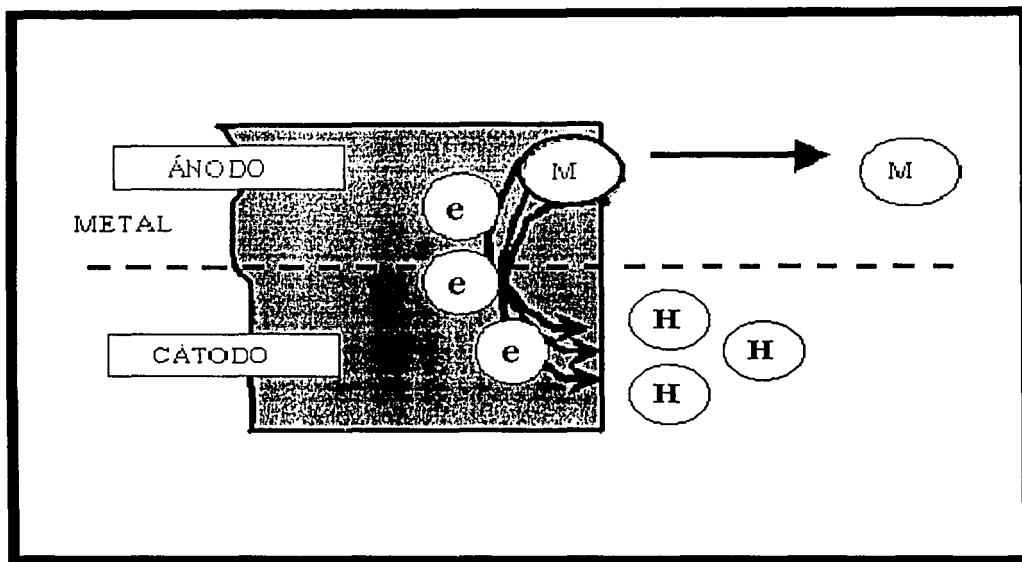


FIG. 3.1 ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN

Dos maneras de conducción de corriente eléctrica son a través de un material metálico y de una sustancia denominada electrolito. En la conducción metálica, la energía se transfiere por electrones que se trasladan de un átomo hacia otro manteniendo una gran velocidad de conducción, mientras que en la conducción electrolítica, la transferencia se realiza mediante el movimiento de cargas denominadas iones de un punto denominado "electrodo" a otro en niveles de menor velocidad.

El flujo de corriente a través del electrolito produce algunos cambios en sus propiedades y en los electrodos, uno de ellos es el de la corrosión.

La mayor causa de la corrosión de los metales es por la existencia de formación de "celdas de corrosión". Las celdas de corrosión se componen de cuatro elementos básicos:

- Un electrolito
- Dos electrodos: ánodo (-) y cátodo (+)
- Un circuito conector

El electrolito es un elemento o sustancia conductora de iones, los electrodos son de diferentes o iguales metales, y el circuito conector puede tener varios caminos y formas tales que permitan cerrar el circuito eléctrico formado.

Los tipos de celdas de corrosión más frecuentes las describimos a continuación.

CELDAS GALVÁNICAS

Se integran de diferentes metales en sus electrodos siguiendo la serie galvánica, caracterizando con esto al efecto Galvánico que se describe más adelante y a los efectos de la corrosión por contacto.

CELDAS DE CONCENTRACIÓN

La conformación de las celdas de concentración es la principal causa de la corrosión en las superficies de un mismo material. Si tenemos al mismo material en contacto de un electrolito, la celda se puede formar por varias causas, basta con la diferente concentración de electrolito en contacto con los electrodos para activar el flujo de corriente y que se intensifica si el electrolito tiene diferentes componentes disueltos, el cátodo será el sitio donde la concentración sea menor.

Las celdas de concentración de oxígeno causan corrosión a materiales expuestos a un electrolito de una manera similar, cuando hay diferencias en la cantidad de oxígeno presente en los puntos de un mismo material, se generará una diferencia de potencial entre estos puntos y un flujo de corriente en dirección a las zonas con más oxígeno (cátodos) desde los puntos con menos concentración (ánodos).

Este tipo de celdas es una de las más frecuentes en los problemas de corrosión tanto en exposiciones ambientales como en materiales enterrados.

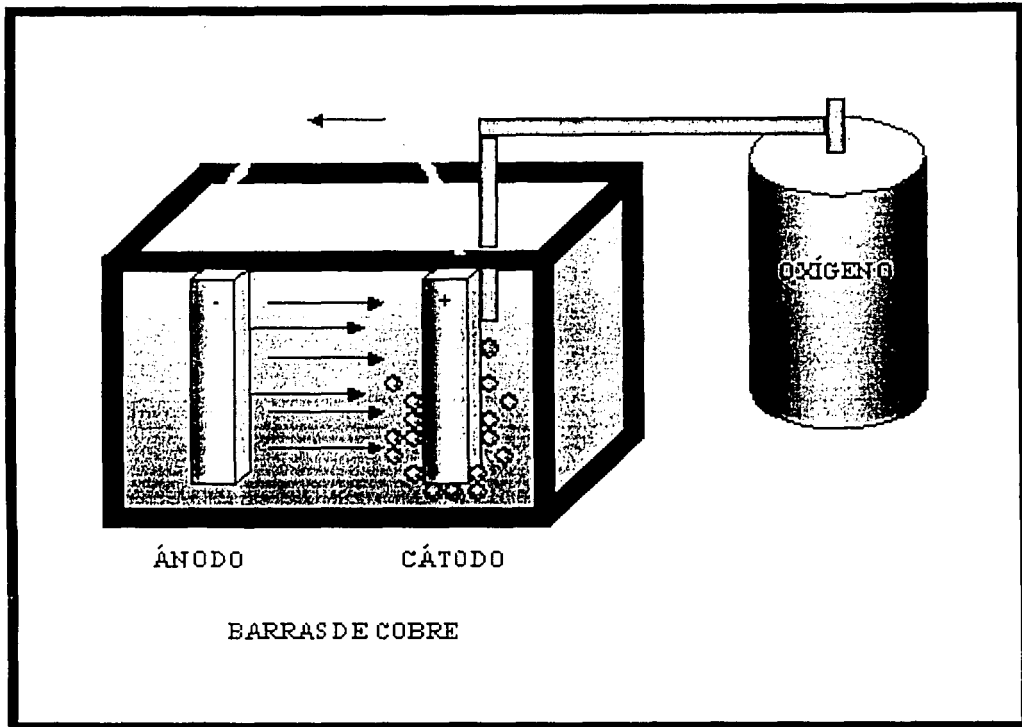


FIG. 3.2 CELDA DE CONCENTRACIÓN

CELDA DE TEMPERATURA

Otro tipo de celdas corrosivas que se pueden presentar, son aquellas que se generan cuando hay diferencias en las temperaturas de los fluidos a lo largo de su trayecto en tuberías, como se ve en la figura 3.3, se ubican las zonas anódicas en los puntos donde la temperatura es mayor.

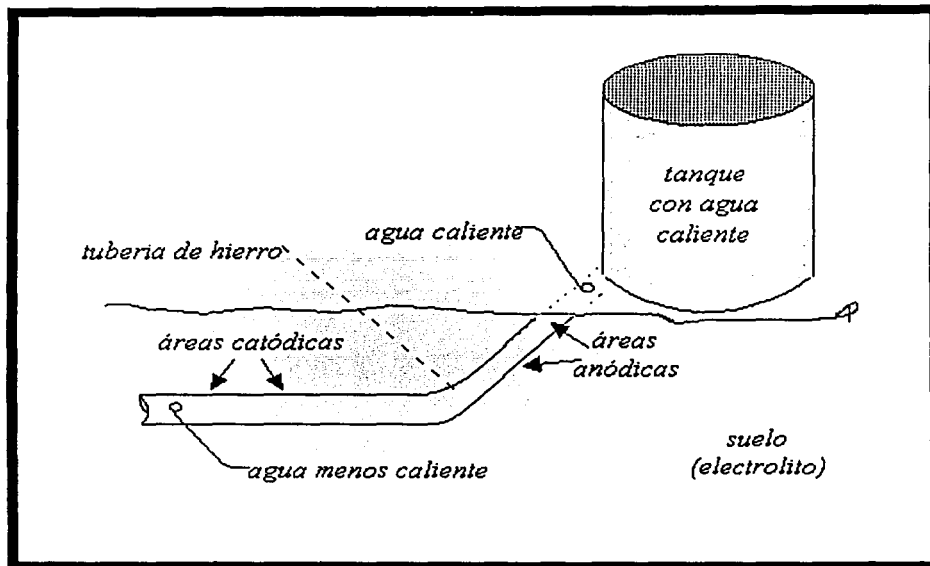


FIG. 3.3 CELDA DE TEMPERATURA

CELDA DE CORRIENTE IMPRESA

En las celdas que se han descrito, la fuente de potencial se encuentra en los elementos que constituyen a la celda corrosiva local, sin embargo también es posible tener una celda corrosiva en que la energía se suministre en forma de corriente desde una fuente externa. Nos referimos a sitios donde encontramos fuentes de corriente directa, ya sea por la presencia de un generador, un banco de baterías, líneas de transmisión de metro, tren o trolebús entre otras.

Básicamente encontramos dos formas, la celda accidental y la deliberada. La celda de corriente impresa deliberada es aquella que se forma al suministrarse corrientes de protección tal como ocurre con la Protección Catódica (y que se explica más adelante) por corriente impresa, sin embargo, las celdas de corriente impresa accidental son todo lo contrario, si la polarización cambia de sentido, sus efectos favorecen al avance de la corrosión. Es por esto que se debe tener en cuenta en que dirección fluyen las corrientes de Protección Catódica y qué fuentes de corriente directa hay cercanas para evitar serias equivocaciones que resulten perjudiciales.

CELDA DE TENSION

Se originan en los sitios donde hay tensiones o fuerzas incidentes que causan deformaciones en los materiales y estructuras metálicas empleados. Los puntos de mayor tensión suelen convertirse en las zonas anódicas:

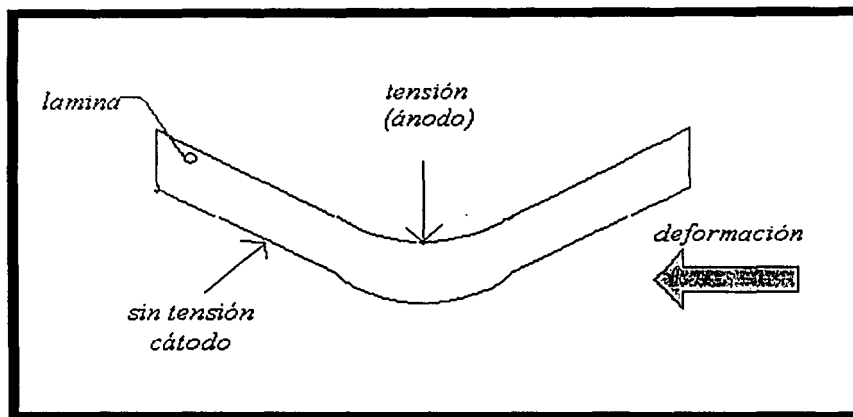


FIG. 3.4 CELDA DE TENSION

Para que exista corrosión hemos visto la necesidad de que existan simultáneamente la formación de regiones anódicas, catódicas, un medio conductor y la presencia de un electrolito. Estos ánodos y cátodos generan micro o macropilas con una diferencia de potencial entre sus dos semielementos.

La intensidad de la corrosión dependerá de varios factores, tales como el contenido de humedad, composición química, temperatura, soluciones ácidas y alcalinas, etc... del medio que interactúen con el metal. Pero también dependerá de la propia estructura metálica.

Las micropilas pueden tener su origen en el mismo metal o en el electrolito, siendo en cada caso provocadas por varios motivos.

Para que existan micropilas en el metal, es necesaria la presencia de heterogeneidades que pueden ser de varios tipos:

- a) de *construcción*: metales o aleaciones polifásicas.
- b) de *estructura*: fina, gruesa, deformada, etc.
- c) *mecánicas*: creadas por tensiones externas o internas.

CAPÍTULO 3
"FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN"

d) debidas a *diferentes estados superficiales*: grado de pulido, rayas, acoplamientos, óxidos.

Las micropilas debidas al electrolito pueden resultar de diferencias de temperatura, pH, concentración de material y, en particular, de diferencias en el contenido de oxígeno, formando las pilas de aireación diferencial (también llamadas celdas de oxígeno) que son una fuente importantísima de fenómenos de corrosión.

El reparto no uniforme de oxígeno es un importante factor de corrosión, independientemente de la naturaleza del metal; las partes más aireadas funcionan como cátodos y las menos aireadas (rayas, entrantes agudos, uniones con radio de curvatura insuficiente, etc.) como ánodos, y son, por consiguiente, atacados.

Las macropilas tienen su origen, por ejemplo, en uniones de metales distintos, o en diferencias de resistividad de suelos, o en el efecto de corrientes vagabundas.

Razones termodinámicas motivan que los metales que se han obtenido a partir de sus minerales en la naturaleza tiendan, en su uso normal, a volver al estado combinado, esto es que el metal tiende a estar en su estado de menor energía; por ejemplo el hierro, el estado de menor energía es en forma de óxido, hidróxido, sulfato o cloruro de hierro, lo que se conoce como mineral, tal y como se encuentra en la naturaleza.

Las diferencias de potencial electroquímico son el origen de que unas regiones actúen anódicamente frente a otras que lo hacen catódicamente. El conocimiento del potencial de electrodo es importante, su medida permite establecer cuales son las regiones anódicas y las catódicas en grandes estructuras, o entre metales diferentes en contacto y precisar la mayor o menor tendencia termodinámica a la disolución de cada metal o aleación.

Los diferentes metales presentan distintos potenciales de ionización, es decir se requieren distintos valores de energía para que un átomo metálico abandone la red cristalina y pase al electrolito como ion metálico cediendo electrones cuando menor sea esta energía más activo es el metal, y cuando sea mayor, el metal presentará mayor nobleza, en el sentido que su tendencia a la corrosión será menor, o bien su tendencia termodinámica a aparecer en la forma elemental será mayor.

CAPÍTULO 3
"FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN"

ENERGÍA QUE NECESITAN LOS MINERALES PARA SER METALES
MÁS ENERGÍA
POTASIO
MAGNESIO
BERILIO
ALUMINIO
ZINC
CROMO
HIERRO
NÍQUEL
COBRE
PLATA
PLATINO
ORO
MENOS ENERGÍA

TABLA 3.1

Quando ciertos metales o aleaciones se hallan situados en un medio corrosivo podemos encontrarlos con que dicho material se puede comportar como noble, tal es el caso del Aluminio y el acero inoxidable en presencia de oxígeno, que al recubrirse de una fina película de óxido detienen los avances corrosivos, denominándose a esto "pasivación". La pasivación se define como la pérdida de la reactividad química de ciertos metales y aleaciones bajo condiciones específicas ambientales mediante la formación de capas superficiales inertes. Metales como el cromo, hierro, níquel, titanio y sus aleaciones pueden llegar a formar capas pasivas.

3.1 EFECTO GALVÁNICO

El efecto galvánico es la forma electroquímica de corrosión que se lleva a cabo cuando dos metales bajo la presencia de una solución electrolítica forman un circuito eléctrico, conocido como celda galvánica.

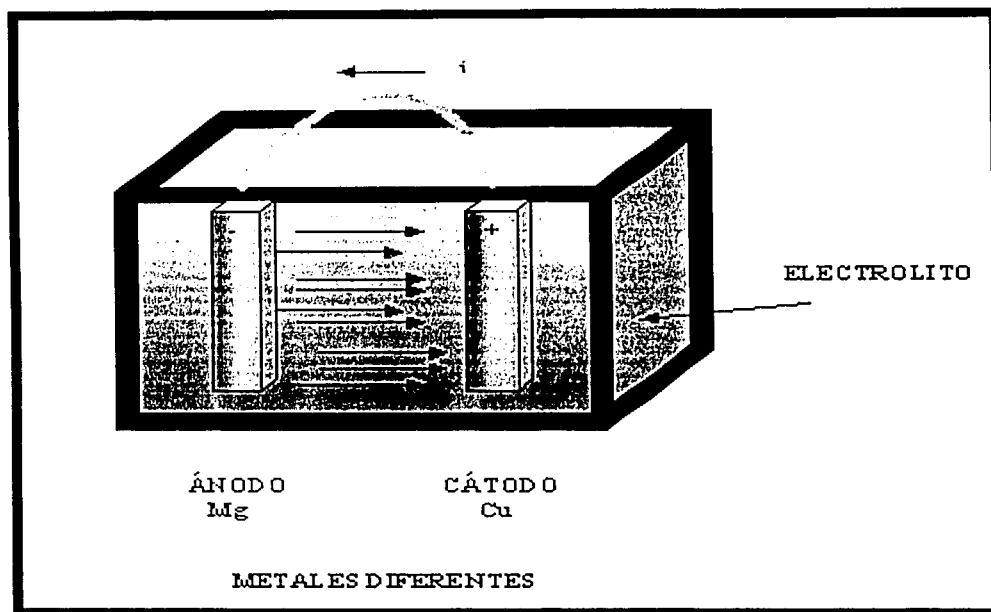


FIG. 3.5 CELDA GALVÁNICA

En una celda galvánica se lleva a cabo el intercambio de electrones lo cual ocasiona corrosión acelerada. El metal activo se le llama ánodo, el cual dona electrones al menos activo, que se le nombra cátodo. Cuando el ánodo se corroe por completo, el cátodo comenzará su proceso de corrosión de acuerdo a su posición en la serie galvánica como se muestra en la siguiente tabla:

SERIE GALVÁNICA PARA METALES EN AGUA DE MAR	
MAS ACTIVOS (ANÓDICOS)	
	Magnesio
	Aleaciones de magnesio
	Zinc
	Acero galvanizado (acero recubierto de zinc)
	Aleaciones de aluminio
	Hierro de fundición
	Acero
	Plomo
	Estaño
	Cobre
	Latón (cobre + zinc)
	Bronce (cobre + estaño)
	Titanio
	Acero inoxidable
	plata
	oro
platino	
MENOS ACTIVOS (CATÓDICOS)	

TABLA 3.2

Ésta serie es una escala de los metales de más a menos activos. Como se puede ver, si tenemos un trozo de hierro o acero en contacto con magnesio en agua salada, como el magnesio es más activo que el hierro, se oxidará primero el magnesio antes que el hierro y mientras haya magnesio en contacto con el hierro, éste no se verá afectado por la corrosión. Los metales más activos (más arriba en la tabla) protegen a los menos activos (más abajo en la tabla).

El empleo de distintos metales en una solución corrosiva no significa que la corrosión galvánica sea inevitable. Los factores que influyen la corrosión galvánica incluyen:

- a) **Conductividad del circuito:** Tiene que existir el contacto entre metales diferentes en una solución de alta conductividad para que se produzca el ataque galvánico.

b) **Potencial entre ánodo y cátodo:** la posición que ocupa cada metal en la serie galvánica determina el potencial y la dirección del flujo de corriente cuando se compone una celda. El metal que ocupa la posición más alta en la serie constituye el **cátodo**. El otro metal es el **ánodo** y, debido a ello, es el que resulta atacado por la acción de la celda. El potencial se incrementa cuanto más apartadas unas de otras son las posiciones ocupadas por cada metal en la serie. Los aceros inoxidable en estado pasivo figuran en la serie justo a continuación de la plata, del grafito y del oro. Así pues, en una solución oxidante, los aceros inoxidable pasivos suelen constituir el cátodo, mientras que serán los otros metales los que serán atacados. Cuando la solución es reductora, el acero inoxidable se vuelve activo y los metales tales como el cobre y el bronce constituirán el cátodo y acelerarán la corrosión del acero inoxidable. El acero y la fundición de hierro ocupan puestos inferiores en la serie galvánica que el que ocupa el acero inoxidable activo por lo que éste será atacado si se forma una célula entre ellos y el acero inoxidable, lo mismo si están sumergidos en una solución oxidante que en una reductora.

c) **Polarización:** Este efecto es el que se produce sobre los electrodos de una celda galvánica por el depósito sobre los mismos de los gases liberados por la corriente. La evolución de los iones de hidrógeno puede cambiar de pasiva en activa la superficie del acero inoxidable, acelerando así la corrosión del ánodo.

d) **Áreas relativas del cátodo y ánodo:** el área relativa de las superficies ejerce un efecto pronunciado sobre el daño producido por la acción galvánica. Un pequeño ánodo con un cátodo grande produce una corriente de elevada densidad y acelera la corrosión en el ánodo. Deberán evitarse las pequeñas áreas del metal menos noble. No se utilizarán piezas de sujeción de aluminio para el acero inoxidable. En cambio, el empleo de piezas de sujeción de acero inoxidable para aluminio da resultados satisfactorios.

e) **Relación geométrica entre superficies de distintos metales:** Un borde o una esquina del metal menos noble no deberá estar en contacto con el centro de un área de gran superficie del metal que ha de constituir el cátodo si llega a formarse una celda galvánica. Un factor importante en la corrosión galvánica, es la referente al "área o radio de efecto" entre las áreas anódicas y catódicas, que se define como:

$$\text{RADIO DE EFECTO} = \frac{\text{ÁREA DEL CÁTODO}}{\text{ÁREA DEL ÁNODO}}$$

Mientras mayor sea el valor del radio de efecto, la velocidad de la corrosión en la zona anódica se incrementará como se observa en la siguiente gráfica

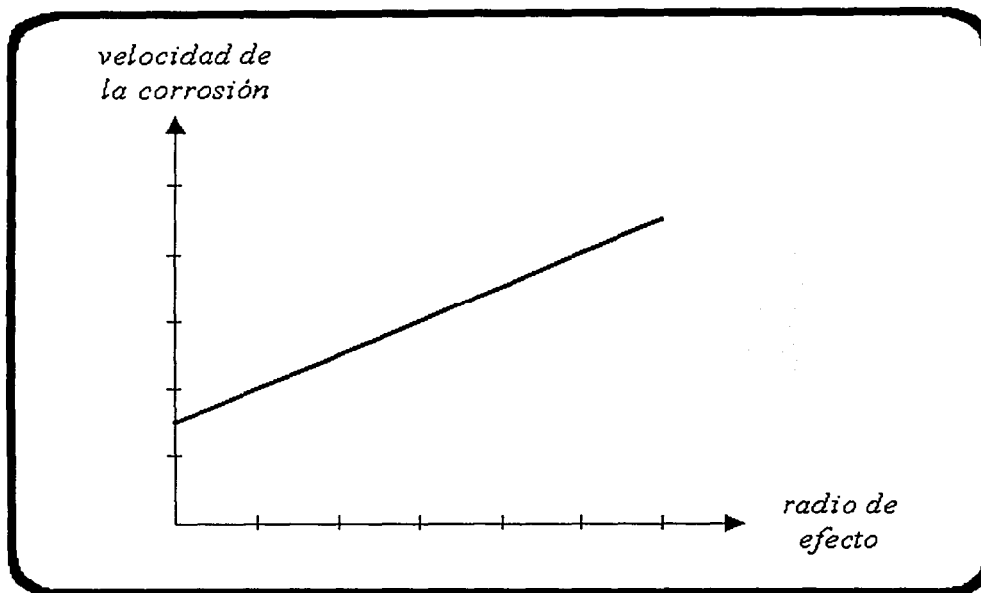


FIG. 3.6 GRÁFICO RADIO DE EFECTO VS VEL. DE CORROSIÓN

3.2 TIPOS DE CORROSIÓN

La corrosión puede tomar muchas formas dependiendo de los materiales, el medio que rodea, la temperatura y los daños generados.

La localización de la corrosión puede ser selectiva, en una superficie se pueden encontrar tanto zonas no afectadas, hasta sitios donde puede ocurrir un inminente daño, todo según a la exposición en la que se halle, esto debido a la concentración de celdas locales que pueden originar diversas formas de corrosión.

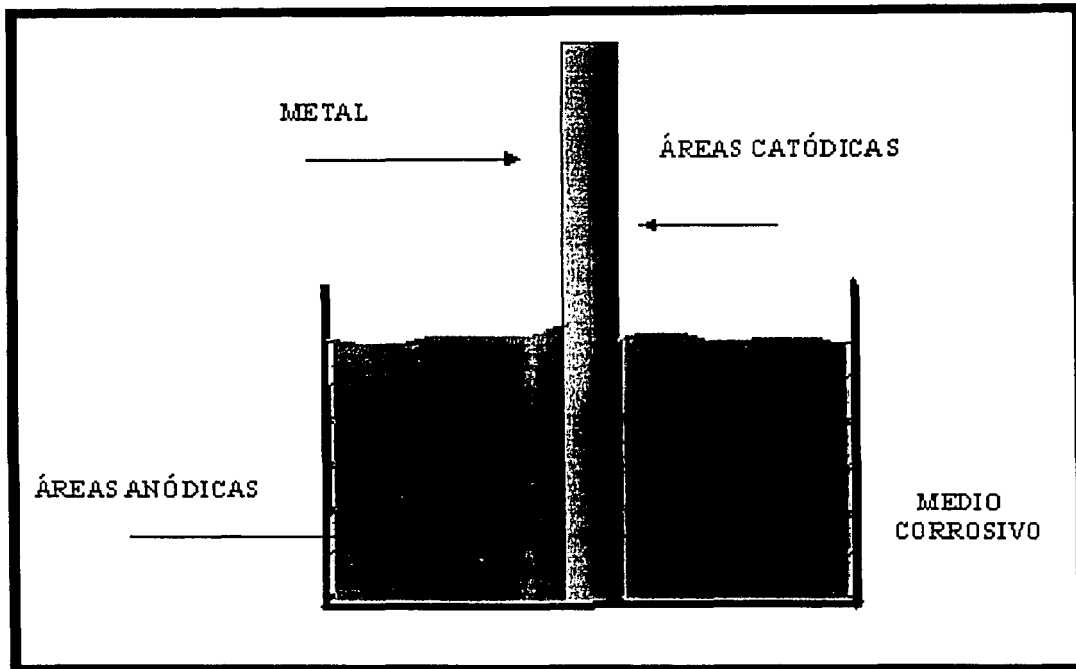


FIG. 3.7 CORROSIÓN LOCALIZADA

Dentro de los diferentes tipos de corrosión que se pueden presentar, mencionamos algunos a continuación:

- **CORROSIÓN UNIFORME Ó GENERALIZADA**

En esta forma, en las capas superficiales del material metálico se forma una capa corrosiva generalizada de espesor uniforme en toda el área.

• **CORROSIÓN POR PICADURAS**

Este es uno de los ataques más dañinos, el metal se corroe de una forma más agresiva generando picaduras profundas en diferentes sitios de la superficie, pudiendo ocasionar orificios en el material. En los sitios más profundos de las picaduras se localizan las secciones anódicas, mientras que en los sitios más superficiales las zonas catódicas.

Las picaduras generalmente se originan cuando hay rotura de la capa de óxido que cubre a la superficie del metal, propagando cavidades de forma cónica o hemisférica de diversos tamaños, y si el medio que rodea es muy húmedo, y además encontramos fisuras en el metal, con el paso del tiempo, va resultando un grave daño.

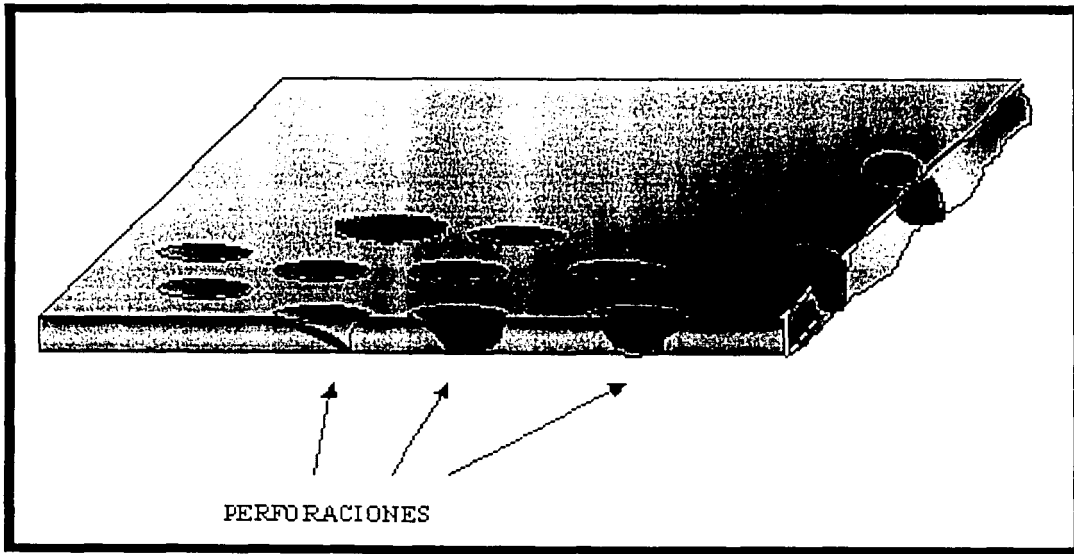


FIG. 3.8 CORROSIÓN POR PICADURAS

• **CORROSIÓN INTERGRANULAR**

Los metales y aleaciones están constituidos por estructuras cristalinas cuyos átomos tienen arreglos de manera geométrica tridimensional. Para determinar el tamaño del cristal (ó también denominado grano) o microestructura, usualmente se realiza un estudio de microscopio, revelando las características de los límites cristalinos (bordes de grano). En la elaboración de aleaciones y materiales metálicos, generalmente se presentan deformaciones plásticas de sus estructuras cristalinas e incorporación de impurezas:

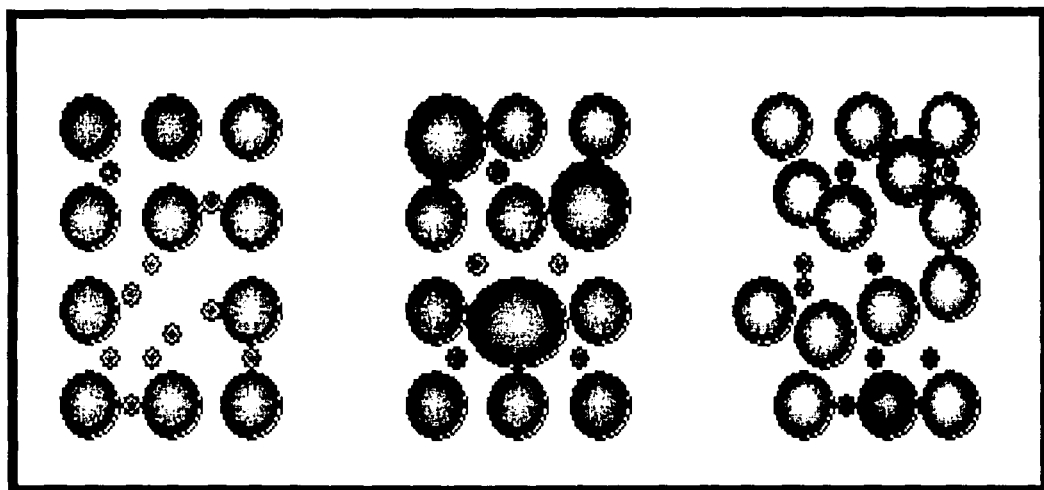


FIG. 3.9 DEFECTO EN ESTRUCTURAS CRISTALINAS

Los defectos pueden ser ausencias de átomos en el cristal, diferentes tamaños y distancias o dislocaciones en la red cristalina.

Cuando hay separación de algún elemento componente o impurezas en los bordes cristalinos de las aleaciones, una pequeña diferencia de potencial puede favorecer a los efectos corrosivos y a la presencia de grietas y fracturas. La retención de humedad y contaminantes en las pequeñas grietas pueden acelerar la corrosión principalmente en sus superficies.

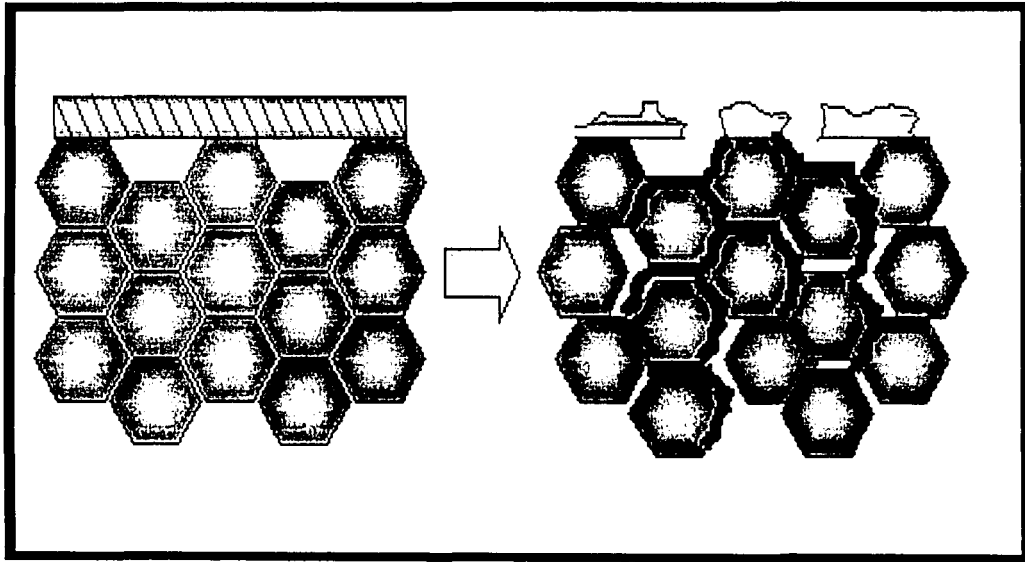


FIG. 3.10 CORROSIÓN INTERGRANULAR

- **CORROSIÓN TRANSGRANULAR**

Es una forma de ataque corrosivo subsuperficial en donde se forman fracturas que rompen las estructuras cristalinas en un metal, comenzando en la superficies en dirección hacia su interior por acción de celdas locales.

El ataque transgranular se puede evitar si se emplean adecuadas aleaciones resistentes.

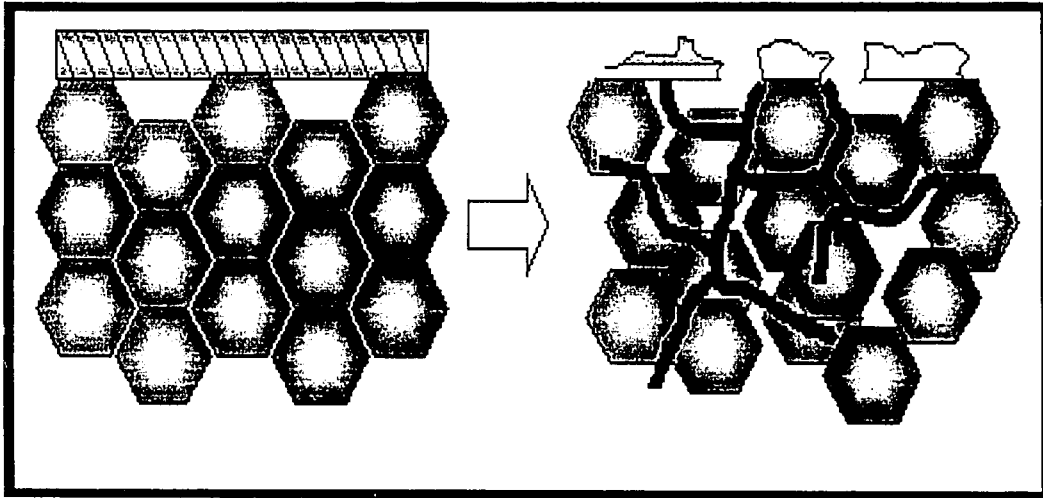


FIG. 3.11 CORROSIÓN TRANSGRANULAR

- **CORROSIÓN Y TEMPERATURA**

Los efectos causados por la temperatura en presencia de oxígeno y fuerzas externas, resultan en variaciones de la forma de la capa superficial de óxido, pudiendo resultar en adherencias debilitadas que pueden romperse y tener como consecuencias lo ya antes descrito:

CAPÍTULO 3
"FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN"

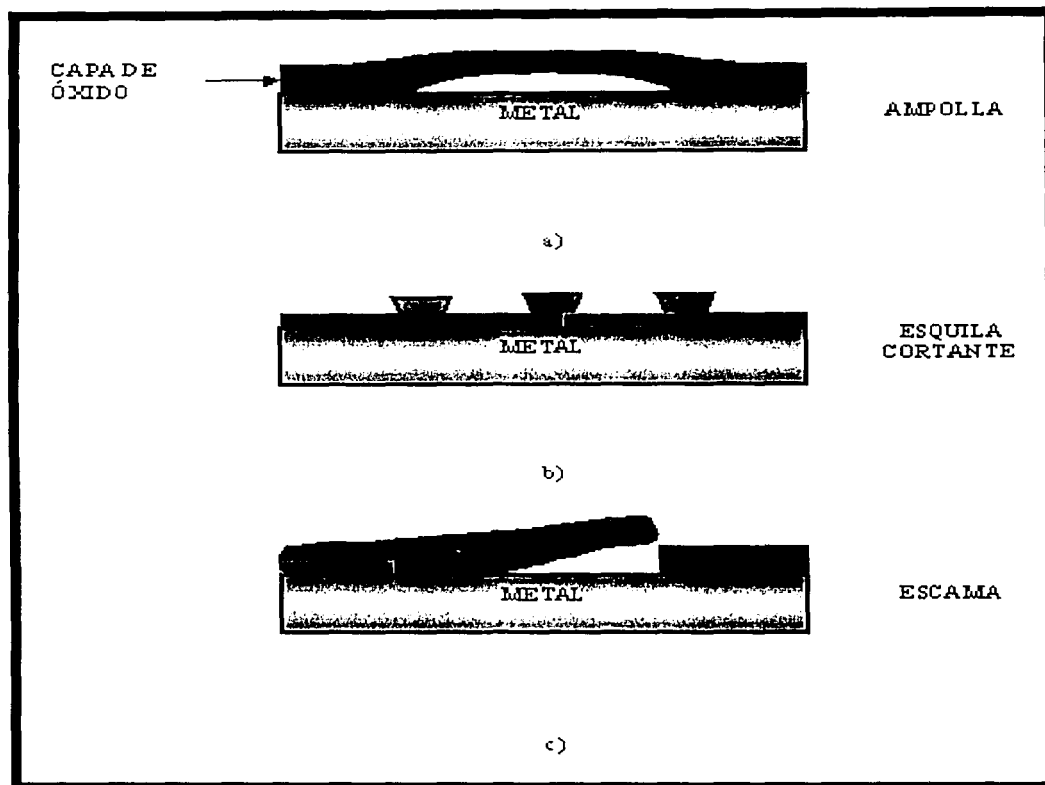


FIG. 3.12 EFECTOS POR TEMPERATURA

3.3 CORROSIÓN POR EL MEDIO AMBIENTE

Se puede considerar a la corrosión por el medio ambiente como una forma de corrosión que resulta de la interacción entre un medio natural y un material metálico expuesto en la misma. Por medio natural debe entenderse tanto la propia en exterior como en interior de lugares bajo abrigo.

La pérdida que sufre el material puede ser de manera uniforme o generalizada a lo largo y ancho de la superficie, o bien de forma localizada. De éstas, la segunda es más perjudicial ya que no involucra una gran pérdida de material, pero puede dejar el material inservible sin que éste cumpla su período de vida útil para el que fue diseñado.

CAPÍTULO 3
"FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN"

La corrosión total experimentada por un material en un medio generalmente no se presenta de manera continua sino de forma discreta a lo largo del tiempo, siendo la suma del producto de las velocidades de corrosión por el tiempo que la superficie parece húmeda o mojada (parámetro de humectación).

Este parámetro de humectación incluye factores como la temperatura ambiente afectadas por la insolación y nubosidad del sitio, precipitación pluvial, viento, humedad relativa, etc...

Los contaminantes atmosféricos producen efectos nocivos en el ser humano y su medio ambiente, además atacan a muchos metales y materiales de construcción, deterioran equipos eléctricos, superficies pintadas, etc..., siendo los de mayor importancia: las partículas suspendidas totales, ozono, monóxido de carbono, CO, óxido de nitrógeno, NO, y dióxido de azufre, SO₂.

Los agentes contaminantes inorgánicos son generados por los vehículos y las industrias y los orgánicos por basureros. Las centrales termoeléctricas, las refinerías y las fábricas contribuyen con el 85% del SO₂ en la atmósfera.

Uno de los factores que determina primeramente la intensidad del fenómeno corrosivo en el medio es la composición química del mismo. El SO₂ y el NaCl son los agentes corrosivos más comunes de la atmósfera. El NaCl se incorpora a la atmósfera desde el mar. Lejos de éste, la contaminación atmosférica depende de la presencia de industrias y núcleos de población, siendo el contaminante principal por su frecuencia de incidencia sobre el proceso corrosivo el dióxido de azufre SO₂, proveniente de la combustión de sólidos y líquidos que contienen azufre.

Esto implica, por consiguiente, la necesidad de medir la cantidad de los distintos contaminantes dispersados dentro de la capa de aire.

El SO₂ es un contaminante comúnmente encontrado en atmósferas urbanas y presente en lluvia ácida, siendo responsable de los altos niveles de corrosión encontrados en estos sitios en combinación de la humedad relativa o precipitación pluvial alta.

Para el acero el incremento de la corrosión es casi inmediato en presencia del contaminante hasta que alcanza un nivel estacionario, además se ha encontrado que puede presentar corrosión significativa a humedades relativas mayores del 70%

A espesores crecientes, disminuyen la resistencia de la capa del electrolito y la polarización catódica, lo que origina un aumento en la velocidad de corrosión hasta que pasa por un máximo, disminuyendo después con el aumento de espesor.

3.4 CORROSIÓN BAJO FATIGA Y TENSIÓN

Al fenómeno de la fisuración de los materiales bajo la acción combinada de una tensión fluctuante y de un ambiente agresivo se le denomina corrosión bajo fatiga.

La realidad demuestra que ambientes aparentemente inocuos, como la humedad del aire, puede incrementar varios órdenes de magnitud la velocidad de propagación de una fisura por fatiga.

En la actualidad se piensa que la corrosión bajo fatiga es la causa predominante de la mayor parte de las roturas que tienen lugar en presencia de cargas oscilantes siendo un campo de investigación muy activo. Como consecuencia de estos estudios es un hecho bien establecido que, a diferencia de la corrosión bajo tensión, no existe especificidad del sistema, es decir, en principio, cualquier material en cualquier ambiente no inerte puede presentar el fenómeno de la corrosión bajo fatiga, entendiéndose como tal una aceleración de la velocidad de crecimiento de las fisuras respecto de la velocidad de crecimiento por fatiga en ambiente inerte.

El medio que rodea tiene gran influencia en el comportamiento frente a la corrosión bajo fatiga de un metal; pequeñas variaciones de pH, potencial o temperatura pueden ocasionar grandes variaciones.

Para un valor en oscilaciones aplicadas al material, el límite de fatiga se reduce enormemente y puede llegar a ser un valor tan pequeño que no llegue a tener utilidad.

La corrosión bajo tensión sólo se manifiesta para un medio y material determinados, la corrosión bajo fatiga parece estar presente, con mayor o menor intensidad en todos los medios, solamente en los gases nobles y en el aire, prácticamente seco, no se han detectado efectos importantes.

La iniciación de la fatiga puede deberse a una deformación plástica localizada y en estas circunstancias lo que importa son los valores relativos de la tensión aplicada y del límite elástico del material.

Una vez iniciada una fisura, su propagación está controlada por el factor de intensidad de tensiones y la tenacidad del material.

La iniciación de las fisuras por corrosión bajo fatiga depende de los detalles de la formación de picaduras, por disolución de los bordes moleculares, por afloramiento de bandas de deslizamiento que rompen la capa pasiva, o por fragilización por presencia de hidrógeno.

Aunque la superficie inicial del elemento esté perfectamente pulimentada, la acción combinada del medio agresivo y la tensión oscilante ocasiona al cabo de un número variable de ciclos la aparición de pequeñas fisuras superficiales.

Dependiendo de las condiciones de pH y potencial del medio y de la estructura de la aleación, la iniciación puede tener lugar por alguno de los siguientes procesos:

- Picaduras superficiales que originan una concentración de tensiones que a su vez localiza la microfisura en el fondo.
- Disolución preferente de algunas zonas de la superficie, que actúan como ánodos; por ejemplo, bordes que originan una fisura intergranular.
- Rotura de la capa pasiva por la deformación plástica, que expone superficies frescas al ataque del ambiente y localiza la fisura.
- Adsorción en la superficie de elementos que reducen la energía de cohesión.

Una vez generada la fisura, ésta progresa debido a la acción combinada de la oscilación de tensiones y del ambiente agresivo hasta alcanzar un tamaño crítico que lleva a la rotura de la pieza.

Se puede proteger a un material estructural de las siguientes formas:

Disminuyendo el estado tensional

- Eliminando o modificando el medio agresivo
- Sustituyendo el material por otro más resistente
- Protegiéndolo catódicamente

La corrosión bajo tensión puede definirse como el ataque de un metal provocado por la acción simultánea de un medio corrosivo y de una tensión de tracción, que normalmente da lugar a formación de grietas. Este proceso ocasiona, con frecuencia, una apreciable reducción de las propiedades mecánicas de las estructuras metálicas.

Existe la evidencia de que la iniciación de la grieta puede ocupar hasta el 90% del tiempo hasta la rotura, lo que es de gran importancia práctica. Según el camino seguido por la grieta a través del metal, la corrosión bajo tensión puede ser intergranular o transgranular.

Para que se dé la corrosión bajo tensión es imprescindible que el metal o aleación se halle sometido a una exigencia mecánica superior a un cierto umbral en un medio agresivo específico.

Las grietas de corrosión bajo tensión pueden formarse únicamente si la velocidad de penetración del vértice es mucho mayor que la velocidad de ataque de las paredes de la grieta o del resto de la superficie. Esta condición puede conseguirse si la propagación de la grieta tiene lugar por un proceso puramente electroquímico, o cuando se hallan implicadas etapas mecánicas.

Los medios agresivos típicos, que dan lugar a la corrosión bajo tensión, son medios en los que en ausencia de tensiones no se produce apenas ataque del metal; siendo éste, además, de tipo generalizado.

La reducción en área de un material metálico que rompe por corrosión bajo tensión es siempre menor que cuando la rotura ha sido exclusivamente mecánica.

La corrosión bajo tensión se da en gran número de metales y aleaciones, habiendo ciertos medios en los que los materiales metálicos son particularmente propensos a este fenómeno corrosivo.

En el agrietamiento por corrosión bajo tensión de una aleación se distinguen las siguientes etapas: nucleación, propagación y rotura.

La nucleación puede tener lugar en puntos muy diferentes del metal, tales como bordes, inclusiones no metálicas, surcos del mecanizado, zonas de acumulación de dislocaciones, etc. En tales puntos o zonas el metal es más frágil y, por lo tanto más propenso a atacarse.

Hay dos factores que tienen una influencia importante en la nucleación de la grieta: superficie real en que puede actuar el medio corrosivo y presencia de tensiones residuales en la superficie.

Una vez iniciado el ataque el paso siguiente es su propagación, que tiene lugar en forma de grietas. El punto de arranque de una grieta puede ser el fondo de una picadura, o cualquier defecto que pudiera dar lugar a una concentración de tensiones.

La rotura es la última etapa del proceso de corrosión bajo tensión. Sin embargo, la separación total de las partes no llega a darse en algunos casos en que las tensiones van siendo absorbidas por el avance del agrietamiento, que atenúa las tensiones actuantes, con lo que éstas pueden quedar reducidas a valores inferiores al umbral y así podría llegarse a la detención del avance de la grieta. Este suele ser el caso de las piezas sometidas a deformación constante.

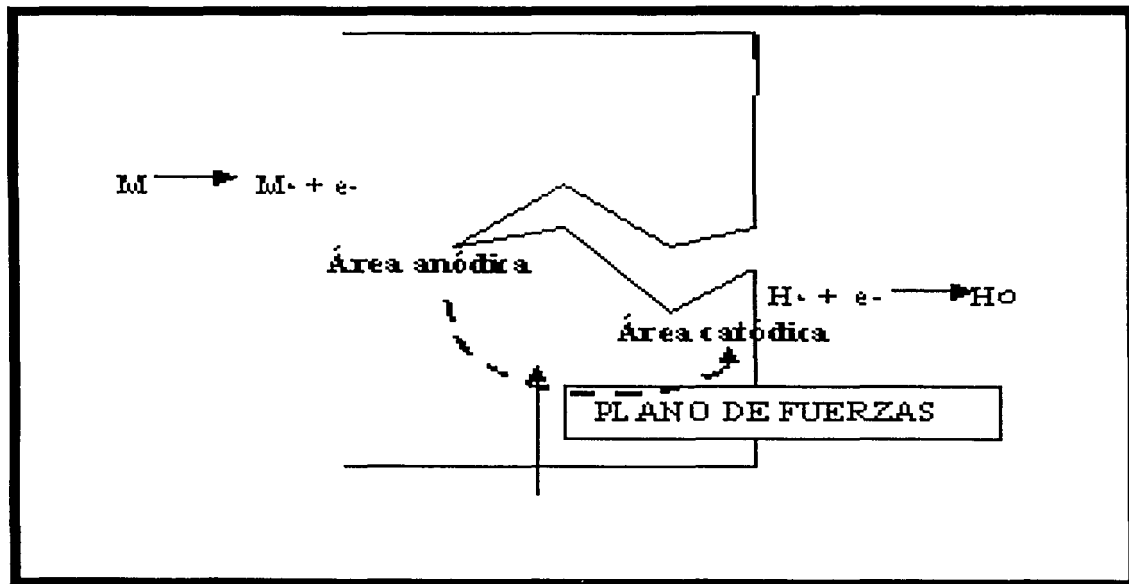


FIG. 3.13 CELDA GALVÁNICA EN UNA GRIETA

Son suficientes pequeñas picaduras para iniciar el agrietamiento, la aplicación de carga en los planos de deslizamiento origina rotura de la capa de óxido cuando dichos planos se hallan restringidos produciéndose un ataque localizado.

CAPÍTULO 3
"FUNDAMENTOS DE LA CORROSIÓN"

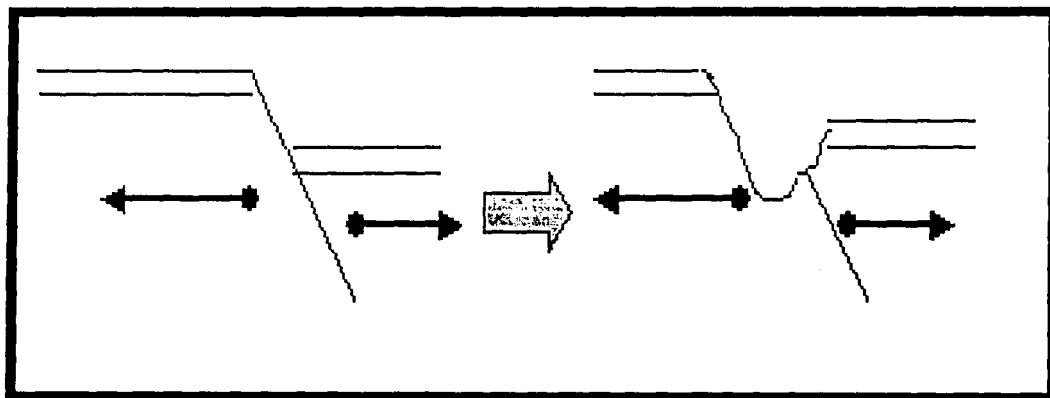


FIG. 3.14 CORROSIÓN EN DESLIZAMIENTOS



CAPÍTULO IV

CORROSIÓN EN EQUIPOS Y ESTRUCTURAS DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

4.1 EN PLANTAS GENERADORAS

Como se explicó en el Capítulo 2, el empleo del agua para la generación de vapor resulta muy indispensable en las Plantas Generadoras termoeléctricas, teniendo con ello que emplear sistemas de enfriamiento para mantener en operación el ciclo de conversión.

El agua pura sin el contenido de gases disueltos (como O_2 , CO_2 ó SO_2) no causa ataque corrosivo en la mayoría de los metales y aleaciones por arriba del punto de ebullición, sin embargo la cantidad de impurezas encontradas hacen que el agua sea un elemento que beneficia a la corrosión en la mayoría de los metales.

La impureza más significativa es el contenido de oxígeno del aire que se mezcla en el agua, y que favorece al ataque continuo de la corrosión electroquímica. También las sales de Sodio y el dióxido de Carbono se encuentran a menudo en las aguas tratadas favoreciendo la producción de óxidos, hidróxidos y óxidos hidratados de metales que componen a las aleaciones.

El hierro y el acero son corroídos por el agua y sus efectos dependen además de la temperatura de las condiciones del medio.

Los óxidos que normalmente se encuentran en los aceros son los siguientes:

- Óxido de hierro hidratado, cuando se encuentra a bajas temperaturas
- Fe_2O_4 (Magnetita), que forma una capa protectora en la superficie del metal a altas temperaturas y Fe_2O_3 , la capa que produce no es protectora, se hace presente cuando en los generadores de vapor hay oxígeno disuelto en el agua.

A bajas temperaturas, los productos de la corrosión del agua en aleaciones que contienen cobre es el óxido cuproso Cu_2O que se pueden presentar en tuberías como una película muy delgada de aspecto oscura.

Los efectos corrosivos en tanques y tuberías enterradas van desde la corrosión por efectos galvánicos, hasta la presencia de celdas de concentración por ubicarse en contacto con uno o más estratos de suelos con presencia de oxígeno, o en ambientes exteriores potencialmente dañinos.

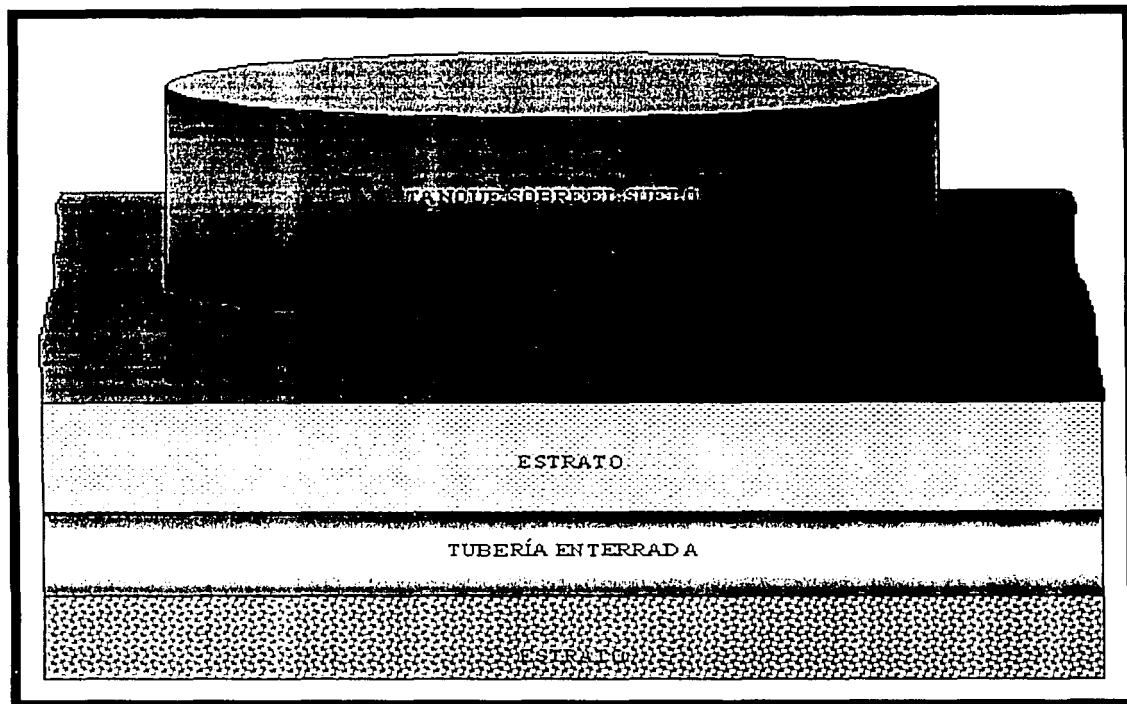


FIG. 4.1 TANQUES Y TUBERÍAS SUBTERRÁNEAS

La mayoría de los tipos de corrosión descritos en el Capítulo 3 pueden ser encontradas tanto en sistemas de enfriamiento como en los sistemas de generación de vapor.

La corrosión por picaduras es muy frecuente, puede darse desde la superficie de cualquier material metálico debido a diferencias en la composición de su estructura, deposición de impurezas metálicas y no metálicas, o contacto directo con otro metal (efecto Galvánico).

Las grietas son otro problema que se suman a la corrosión, las encontramos frecuentemente, en defectos de las superficies, en fisuras o en sitios donde se han depositado impurezas, causando un deterioro en los materiales, tal como ocurre con el acero inoxidable, que al estar en contacto directo con el agua, una pequeña grieta comenzará un ataque que se acelerará con la continua presencia de oxígeno.

Cuando un metal se oxida a altas temperaturas, también se genera una fina y estable capa de óxido en la superficie, siendo una barrera retardadora contra el medio corrosivo, sin

embargo al paso del tiempo muchos óxidos cambian su estructura cristalina haciéndola menos resistente y por lo tanto susceptible a la formación de grietas.

Las fracturas ocasionadas por la corrosión bajo tensión, se pueden presentar en los sistemas de generación de vapor en aceros inoxidable, mientras que la aparición de amoniaco en el agua a bajas temperaturas puede afectar a las aleaciones de Cobre.

Los metales empleados en los sistemas de agua y vapor incluyen a los aceros, aceros inoxidable y aleaciones a base de Níquel. La temperatura alcanzada en el generador de vapor llega a ser de los 415° C, el agua es adicionada con sulfito de Sodio para reducir las concentraciones de oxígeno, sin embargo si no llegara a ser así, se presentarían picaduras en los tubos de acero inoxidable del generador de vapor. A menudo las sustancias presentan impurezas en pequeñas cantidades favoreciendo a los problemas de corrosión. Los problemas de corrosión en el colector de vapor son similares a los de los tubos del generador de vapor.

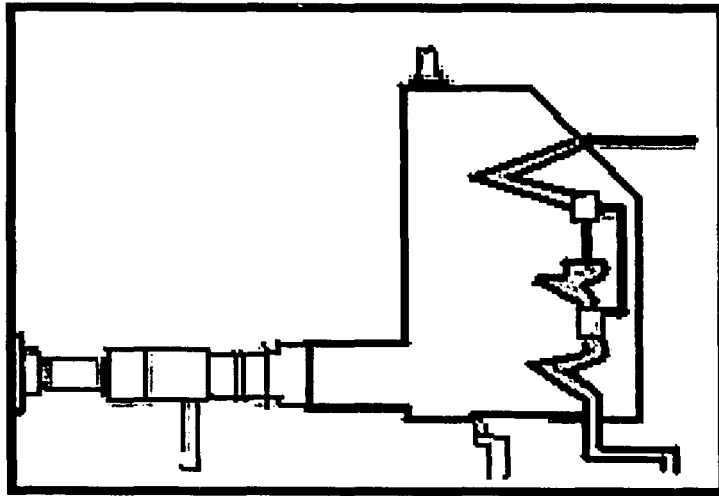


FIG. 4.2 CALDERA

En las secciones asociadas a la turbina más susceptibles al deterioro están los álabes, los cuales pueden corroerse debido al deterioro por erosión. Por esto los materiales de los que

se construyen son aleaciones muy resistentes como es el acero inoxidable con 12% de cromo AISI tipo 410.

Los condensadores están compuestos de tubos tipo intercambiadores de calor que se encargan de enfriar el agua a través de conductos y enfriadores externos, están hechos de aleaciones de cobre y níquel 90% y 10 % respectivamente. La corrosión debida al vapor condensado es usual como resultado de la presencia de dióxido de carbono disuelto.

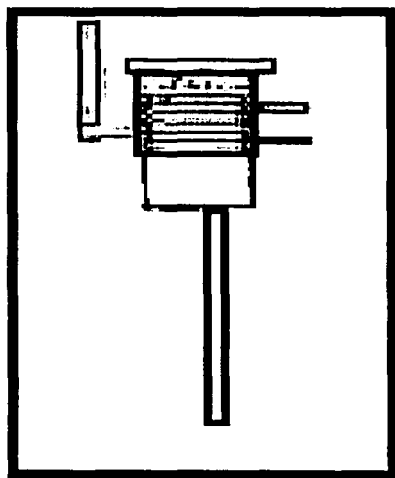


FIG. 4.3 CONDENSADOR

Un sistemas de recirculación con torre de enfriamiento típico se muestra en la siguiente figura:

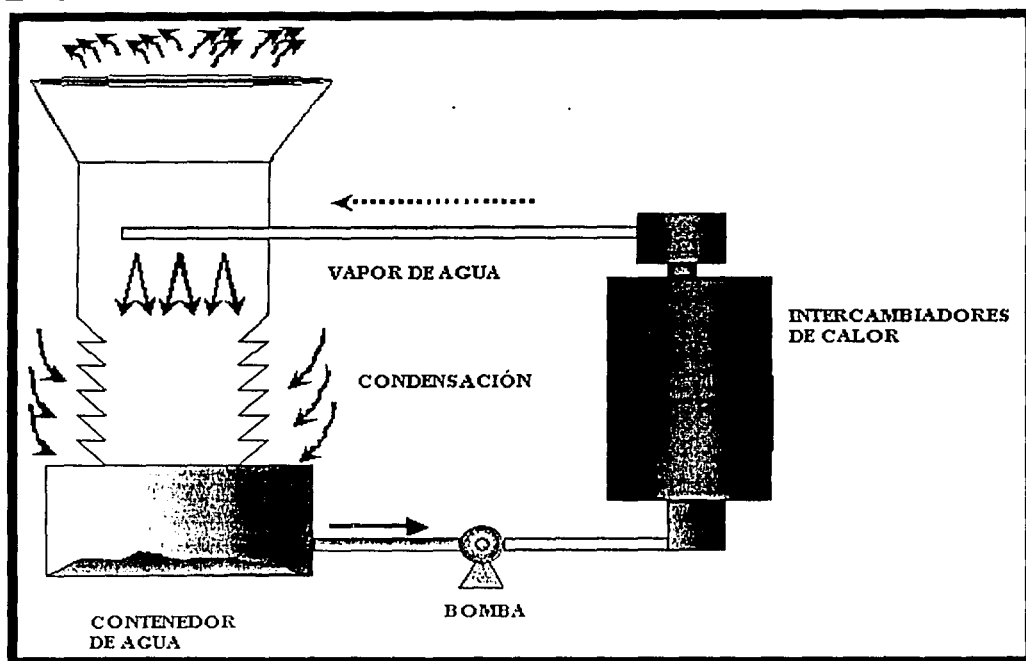


FIG. 4.4 TORRE DE ENFRIAMIENTO

Este sistema se emplea para recircular de manera más económica el agua una vez empleada en el proceso de transformación y mantener el control químico deseado del agua.

Existen dos tipos generales de sistemas de recirculación; el sistema abierto como lo son las torres de enfriamiento, y el sistema cerrado, que es empleado en pequeña escala como lo son en radiadores y calentadores domésticos.

En las torres de enfriamiento los problemas de corrosión y deterioro son comunes, debido a que pueden darse de manera continua variaciones de composición del agua y la variedad de materiales metálicos y no metálicos que pueden añadirse en varias etapas del sistema. Por esto es importante mantener a las torres de enfriamiento a intemperie con un pH neutro (entre 6 y 7), debido a que el método de enfriamiento que se lleva a cabo es el verter el agua evaporada sobre la porción de la torre, siendo aquí donde aumenta la cantidad de oxígeno disuelto en el agua aumentando el riesgo de corrosión en el estanque contenedor.

Además de lo anteriormente descrito, hay factores adicionales que pueden sumarse a los efectos corrosivos, tal es el caso de la presencia de flora (algas y lodos orgánicos) que se desarrollan con la presencia del agua y que se vuelven un problema adicional al alterar la composición química continuamente.

Los tubos de acero de intercambiadores de calor son susceptibles a la generación de grietas por celdas de concentración de oxígeno y residuos químicos depositados que a lo largo del tiempo también les producen erosión.

4.2 EN ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

La construcción de la red de transmisión considera la magnitud y dispersión geográfica de las cargas y la localización de las centrales generadoras, por lo que al poner las torres de transmisión, pueden quedar en una región de suelo sumamente erosivo de baja resistividad, por lo que puede contribuir más a la corrosión del metal, en la zona enterrada de la estructura, o pueden ser regiones costeras donde la humedad y la presencia de partículas salinas que son atraídas hacia la torre de la línea de transmisión por la acción del viento, contribuyan a la corrosión del acero galvanizado de la estructura en la parte aérea.

Las salidas de las líneas de transmisión se deben principalmente a descargas atmosféricas, contaminación por quema de caña y vegetación, vientos fuertes, etc..

La corrosión aunque pasa a un segundo termino, no deja de ser importante debido al costo económico que provoca al deteriorar a las estructuras autosoportadas de las líneas, a tal grado que se llegan a sustituir por otras para evitar su colapso.

El daño por corrosión en las estructuras es de gran importancia, dado que representa una degradación paulatina en el metal de las torres de transmisión, en mayor grado se presenta en la parte enterrada de la torre, pero también se presentan daños por corrosión en la parte superior del suelo, principalmente en las crucetas, herrajes y contactos donde existen tuercas y tornillos.

La corrosión más severa en las estructuras metálicas de las líneas de transmisión se da en la sección en contacto con el suelo, como se aprecia en la figura 4.5 a), se dice que su cimentación es al acero, es decir, las cuatro patas de la estructura van directamente enterradas, la otra forma de cimentación la observamos en la figura 4.5 b), es cuando las patas de la estructura metálica van embebidas en concreto, en este caso también se da la corrosión aunque en mucho menor grado:

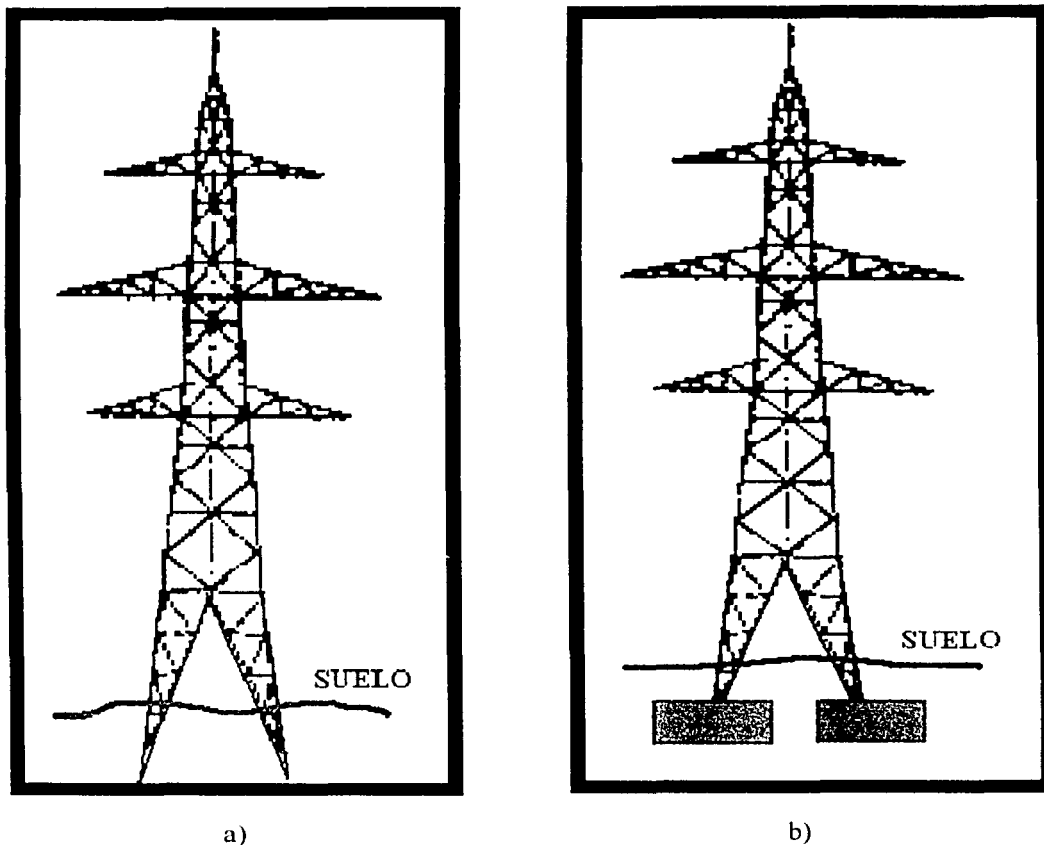


FIG. 4.5 CIMENTACIÓN DE TORRES

Las estructuras metálicas de las torres de transmisión son fabricadas de acero recubiertas por una capa de zinc de un espesor de $120\ \mu\text{m}$ mediante el proceso de galvanizado, sin embargo esta capa no es 100% uniforme, presenta en muchas ocasiones poros que a simple vista no son detectables y que al contacto con el medio agresivo propician el proceso de corrosión.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se van formando regiones anódicas y catódicas que en presencia del electrolito empiezan a circular los electrones provocando desgaste en la zonas anódicas y con la presencia de diferentes tensiones acelera el daño. Este proceso dependerá del medio, es decir mientras menor sea la resistividad de este más propiciara a la degradación del metal, por ejemplo en la tabla 4.1 se presenta la agresividad del suelo en función de su resistividad.

Resistividad Ω -cm	Características
bajo 500	Muy corrosivo
500 a 2000	Corrosivo
2000 a 5000	Moderadamente corrosivo
5000 a 10000	Medio corrosivo
Sobre 10000	Poco corrosivo

TABLA 4.1

En algunos casos se aplica alquitrán de hulla en las bases de las estructuras, el cual es un recubrimiento que no dura más de 5 años, por lo que se hace necesario el empleo de la protección catódica.

Basándose en la resistividad del suelo, se puede determinar si es factible la protección catódica, o algún otro medio anticorrosivo siguiendo la tabla 4.2

Las soldaduras pueden favorecer a los efectos de la corrosión, y a cambios en algunas de las propiedades de los metales. En la fabricación e instalación de equipos y estructuras, se hace necesario producir puntos de unión por el empleo de soldaduras. La aplicación de calor por soldadura puede originar altas tensiones en los puntos de unión causando reducción a la resistencia en esas zonas y favoreciendo la presencia de grietas en corrosión bajo tensión

Resistividad del suelo $\Omega\text{-m}$	Selección de la protección anticorrosiva
Menor a 25	Aplicar recubrimientos anticorrosivos totalmente en la cimentación y hasta 80 cm por encima del nivel del suelo y adicionarle protección catódica
De 25 a 50	Aplicar recubrimientos anticorrosivos 80 cm hacia abajo y por encima del nivel del suelo y adicionarle protección catódica
De 50 a 100	Aplicar recubrimientos anticorrosivos 80 cm hacia abajo y por encima del nivel del suelo. No requiere protección catódica
Mayor a 100	No requiere recubrimientos anticorrosivos ni protección catódica

TABLA 4.2

4.3 EN EQUIPOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La corrosión se presenta básicamente en los sistemas de distribución subterráneos, debido principalmente a que los pozos ó bóvedas que contienen a los equipos eléctricos se inundan de agua, por causa de que su superficie se encuentra a la altura de las banquetas protegida por rejillas, siendo por donde se introduce con facilidad el agua, la cual puede ser agua de lluvia, aguas negras del drenaje, e incluso muchas ocasiones los comerciantes utilizan estos pozos como coladeras, es tan grave este problema, que se estima que el 90% del sistema eléctrico subterráneo se encuentra con una considerable cantidad de agua durante todo el año.

Estos pozos o bóvedas que se encuentran en la zona metropolitana, carecen de un sistema de desagüe, y se desasolvan una o dos veces por mes, lo que implica que la mayor parte del año equipos como los transformadores e interruptores entre otros estén inmersos, esta agua presenta una alta conductividad debido a que tiene un alto contenido en sales, ocasionando en principio la formación de una capa de óxido férrico al metal, que con el

transcurso del tiempo y a causa de que el equipo al ser instalado sufrió pequeñas raspaduras, se produce entonces una corrosión localizada.

En la figura 4.6 se muestra un transformador que fue reemplazado, por que su tanque quedó inservible a causa de la corrosión.

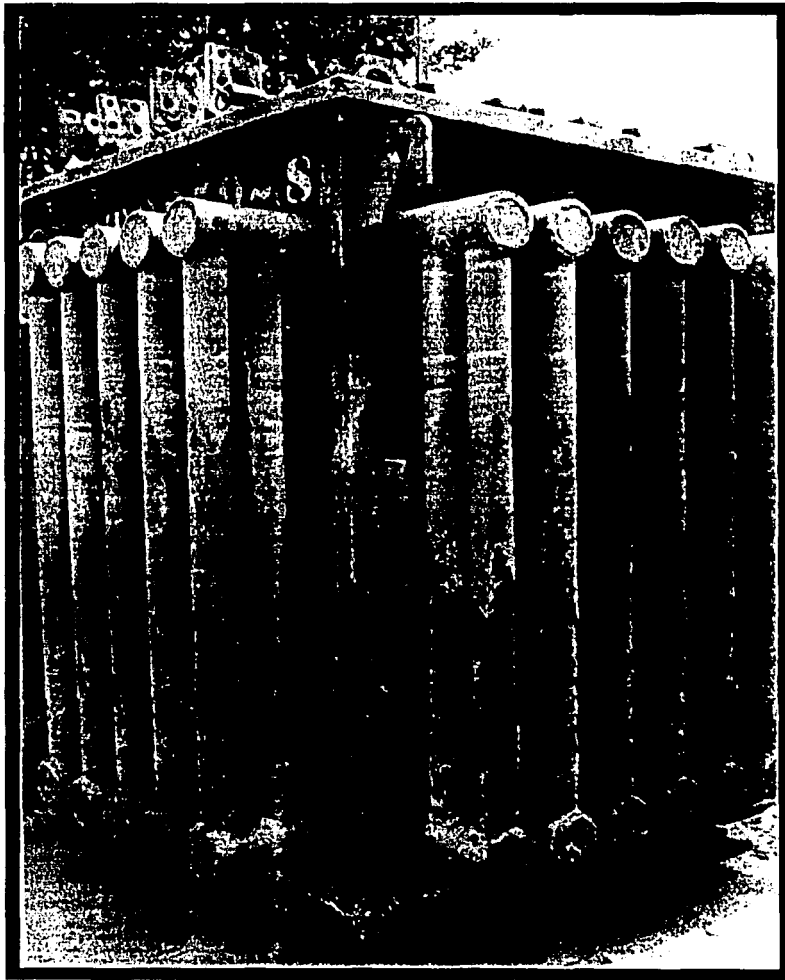


FIG. 4.6 ESTRUCTURA DE TRANSFORMADOR CORROÍDA

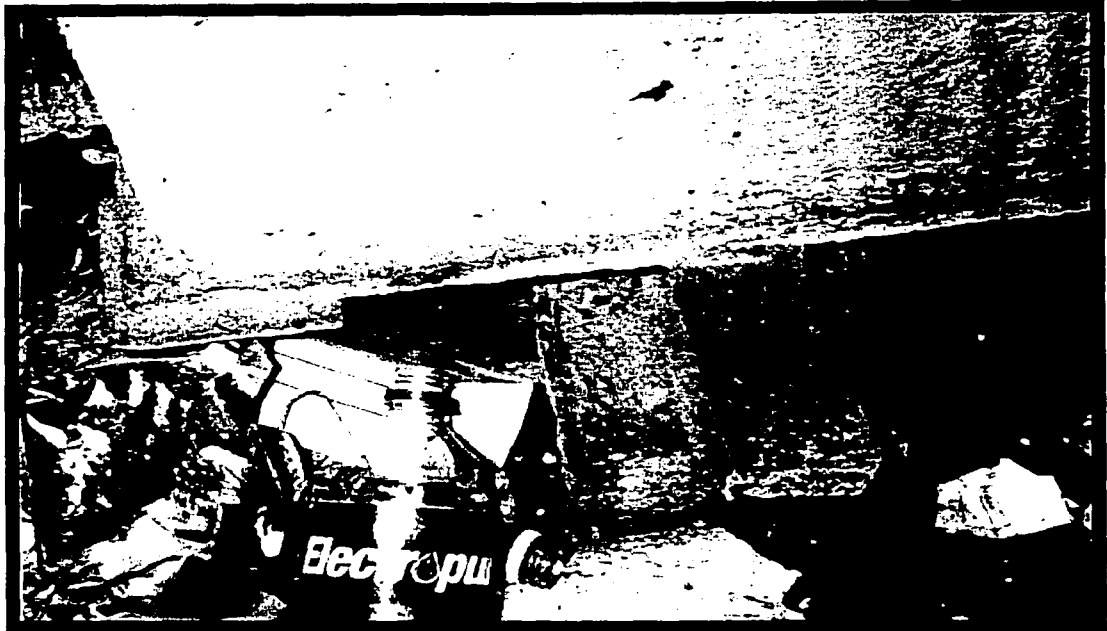


FIG. 4.7 TRANSFORMADOR SUBTERRÁNEO CORROÍDO EN USO

VALORES DE PH ENCONTRADOS EN EL AGUA DE BÓVEDAS DEL SISTEMA SUBTERRÁNEO	
Lugar	PH
Campestre Coyoacan	11
Paseos del Sur	10
Nativitas Xochimilco	10
Residencial Cafetales	13
Lomas de la Herradura	5
Red Indianilla	13
Red Central	13

TABLA 4.3

Para disminuir la corrosión en los sistemas subterráneos se ha recurrido a distintos métodos, tales como pinturas, plásticos, barnices, grasas, placas adhesivas de material plástico entre otros.

Otro método utilizado es la aplicación de resinas epóxicas para la protección de equipos eléctricos que se encuentren en soluciones corrosivas cuyo PH se encuentre de 1 a 13, esta aplicación se realiza antes de instalar el equipo, para obtener un grado de mayor protección, si el equipo ya está instalado, se tiene que raspar perfectamente antes de aplicar la capa protectora de resina.

Un método anticorrosivo que está utilizando Luz y Fuerza del Centro, por el bajo costo económico que representa, es el empleo de un inhibidor como el fosfato de sodio, el cual es colocado en pequeñas cantidades en un saco de lana en la parte inferior de las bóvedas, el fosfato de sodio al disolverse en el agua, forma una película pasiva de óxido de hierro en el metal del equipo eléctrico que se encuentra sumergido en agua, cuyo pH como vemos en la tabla 4.3 es muy elevado, para que se forme esta película se necesita que el agua cuente con suficiente oxígeno, por esta razón las bóvedas o pozos deben contar con una buena ventilación, el inconveniente de este método es que solo va a proteger la parte del equipo eléctrico que se encuentre permanentemente sumergida en agua, y también si la concentración de fosfato de sodio no es la adecuada, puede provocar que la corrosión se acelere más rápido.

Los daños por corrosión en el sistema de distribución subterráneo son considerables tanto técnica como económicamente, la tabla 4.4 muestra el equipo que reemplazó Luz y Fuerza del Centro en el año 2000.

En el caso de reemplazo de un transformador de una red radial, se secciona la red de tal forma que solo una parte quede sin energía eléctrica durante el tiempo que se tardan en hacer el cambio del equipo, aunque se puede utilizar una planta móvil para que solo tarde unos minutos sin energía parte de la red, no así en el caso de una red automática, en la cual durante el reemplazo del transformador dañado, el consumidor no sufre corte alguno, debido a que la carga es absorbida por transformadores de otros alimentadores.

EQUIPO REEMPLAZADO EN LA RED SUBTERRÁNEA POR LyFC EN EL AÑO 2000		
RED, S.E. FRACC. O HAB.	EQUIPO REEMPLAZADO	CANTIDAD
Red central	Protectores	6 bóvedas 6 S.E.
Fracc. y u. habitacionales	Transformadores DRS pozo	2-300 kVA, 2-225 kVA 5-112.5 kVA, 1-150 kVA
Varios	Cajas CS 4-500	12 cajas
Varios	Gabinetes	2-2QR

TABLA 4.4

El costo económico por reemplazo de equipo eléctrico en las redes de distribución subterráneas, a causa de la corrosión es muy alto, debido a que un transformador que teóricamente esta diseñado para tener una vida útil de 25 a 30 años, no sobrepasa los 15 años, la tabla 4.5 muestra el costo económico por reemplazo de algunos equipos en los sistemas de distribución subterránea.

COSTO DE EQUIPO DE RED SUBTERRÁNEA, AÑO 2000			
EQUIPO REEMPLAZADO	MATERIAL Y OTROS	LABOR	COSTO TOTAL
Interruptor VAC PAC	\$ 255,135.77	\$ 92,271.22	\$ 347,406.99
Transformador 112.5 kVA	\$ 88,757.73	\$ 73,891.78	\$ 162,649.51
Bus epóxico	\$ 20,655.09	\$ 11,167.40	\$ 33,697.68
S:E. Bóveda 23 B 750 kVA red automática	\$ 119,539.21	\$ 688,645.26	\$ 808,184.47

TABLA 4.5

PROBLEMAS DE CORROSIÓN EN CABLES SUBTERRÁNEOS

Se han presentado problemas de fugas en cables ocasionadas por perforación de la cubierta en el tubo de acero por la presencia de picaduras a causa de celdas corrosivas por corrientes impresas desviadas (también denominadas de fuga, vagabundas o errantes), en la figura 4.8, observamos un caso ocurrido en un tramo:

A pesar de que las tuberías que contienen en su interior a los cables se les protege con protección catódica por corriente impresa, se han llegado a presentar picaduras profundas ocasionando graves daños al circuito.

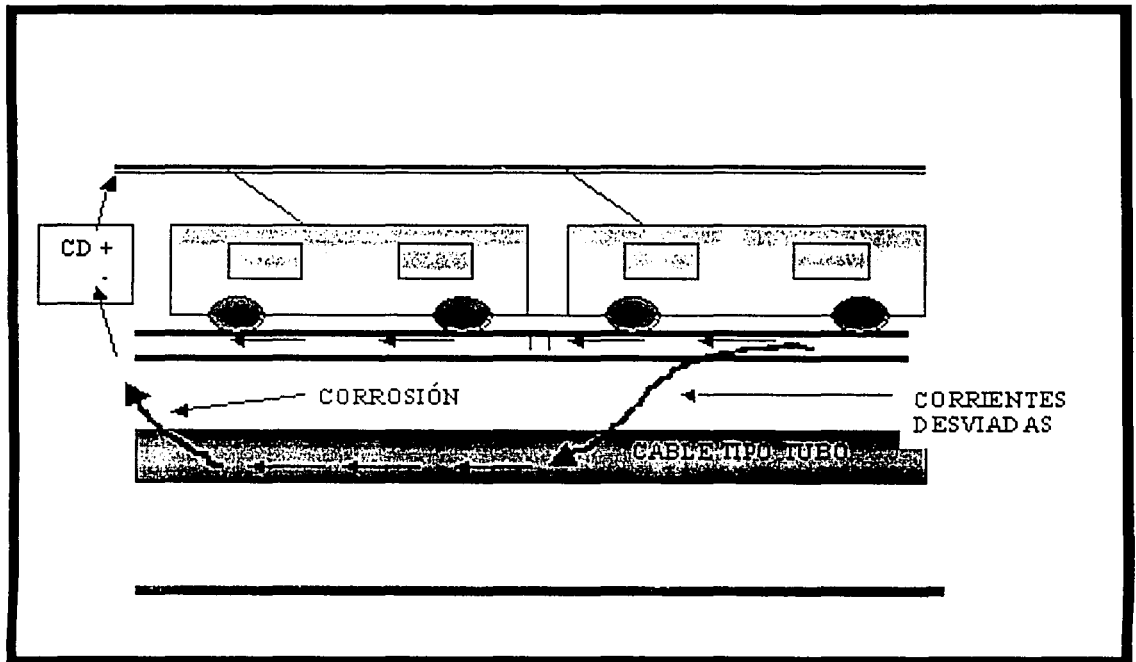
La causa en este caso fue la presencia de una protección catódica de una gasolinera cercana, generando corrientes vagabundas que incidieron directamente en la tubería.



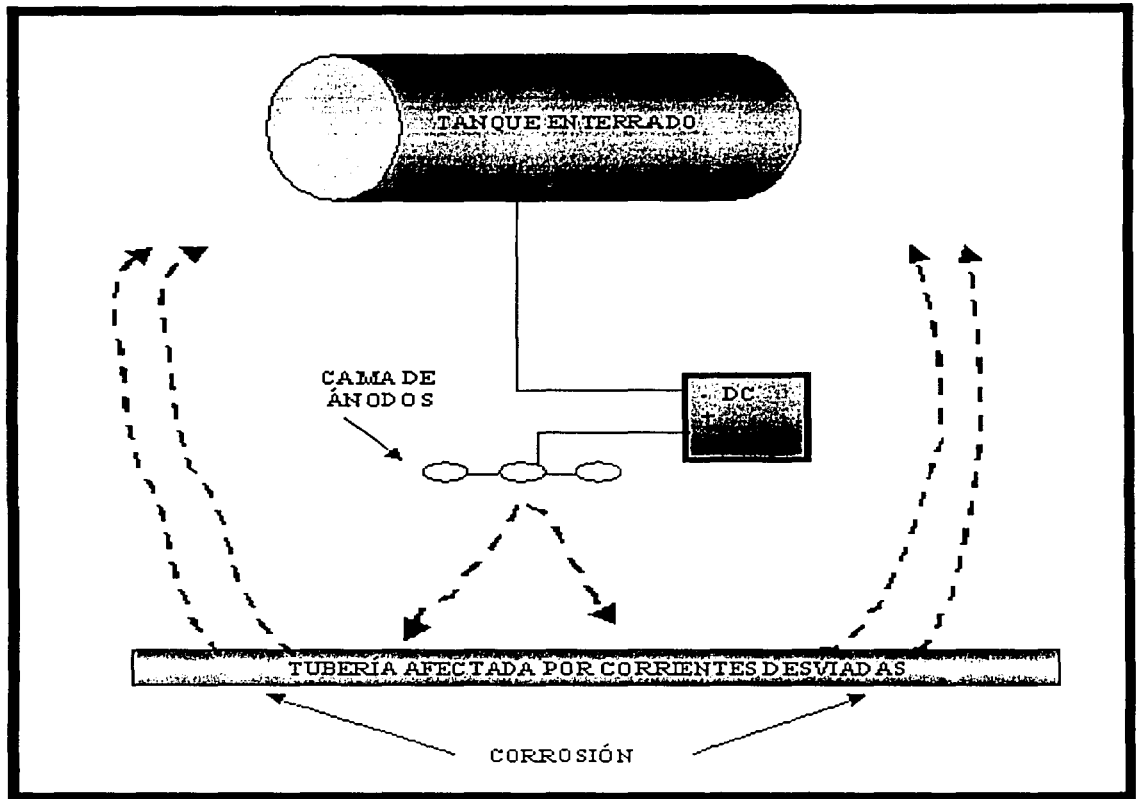
FIG. 4.8 PICADURA EN UN CABLE TIPO TUBO POR CORROSIÓN

CELDAS DE CORRIENTE IMPRESA EN CABLES SUBTERRÁNEOS

Como se explicó en el capítulo 3, éstas celdas corrosivas se originan cuando una estructura es afectado por flujos de corrientes que provocan la formación de regiones anódicas que favorecen a la corrosión, tal como se muestran en la siguientes figuras:



a)



b)

FIG. 4.9 CELDAS DE CORRIENTE IMPRESA

En la figura 4.9 a), vemos que al interrumpirse la continuidad en la vía de tren, la corriente sigue su flujo a través de la tierra encontrando en la tubería cercana un medio de conducción favorable haciendo que se genere una zona anódica en el punto de retorno causándole corrosión. Esto es frecuente en sistemas que emplean corriente directa tal como sucedió con tranvías durante su uso, por lo que hay que tomar en cuenta la posible presencia de otras fuentes de corriente directa al diseñarse cualquier Protección Catódica. En la figura 4.9 b), tenemos un caso similar donde la protección con corriente impresa de un tanque enterrado libera corrientes de fuga encontrándose con una tubería enterrada que una vez que las conduce, tiene que liberarlas en puntos que serán corroídos causando posibles daños.



FIG. 4.10 REPARACIÓN DE CABLE DAÑADO



CAPÍTULO V

MÉTODOS PARA EL
CONTROL DE LA
CORROSIÓN

De los cuatro componentes de una celda corrosiva (ánodo, cátodo, electrolito y conductor eléctrico) tres pueden ser afectados por la variación de sus magnitudes:

- 1) Ánodo
- 2) Cátodo
- 3) Resistencia eléctrica del circuito

En el caso de la polaridad del ánodo y el cátodo, se emplea la inhibición de sus valores para disminuir los efectos corrosivos según lo explicamos a continuación.

Para la aplicación de métodos inhibidores es necesario modelar un sistema para determinar valores de polaridad y así poderlos modificar convenientemente:

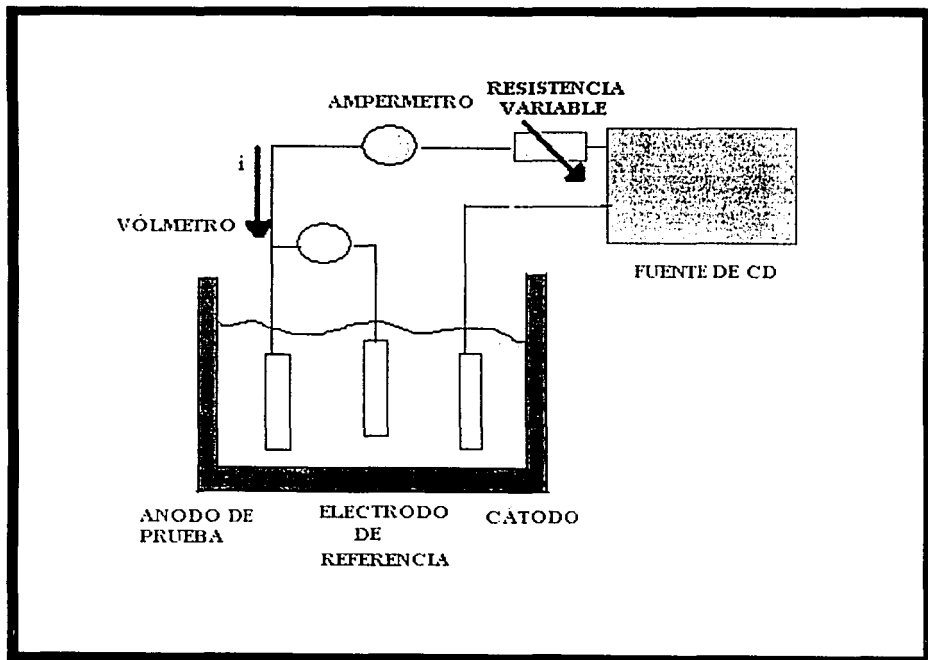


FIG. 5.1 MEDICIÓN DE POLARIZACIÓN DE ELEMENTOS

En la figura 5.1 se ilustra una celda que caracteriza a la corrosión mediante la aplicación de diferentes corrientes aplicadas desde una fuente de corriente directa variadas mediante un resistor variable. Para ciertos valores de corrientes aplicadas se obtienen valores de tensión y efectos corrosivos diferentes.

INHIBICIÓN ANÓDICA

Cuando se emplea un inhibidor que modifica directamente a la polaridad del ánodo como puede ser un recubrimiento o desde una fuente aplicada, la corriente que fluye por la celda disminuye en comparación que cuando no se aplica ninguno, reduce la corrosión. Lo anterior se puede observar en la siguiente gráfica:

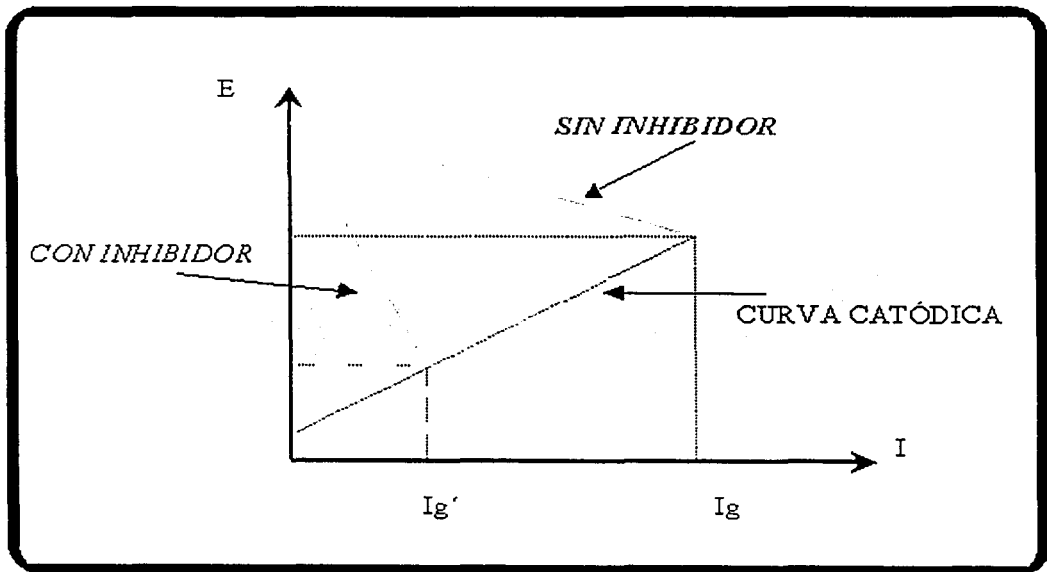


FIG. 5.2 CURVAS ANÓDICAS

El control anódico puede resultar en la mayoría de los casos en un frágil método de inhibición debido a que si no establecen o no se mantienen los niveles adecuados de polarización de los elementos, pueden causar mayores daños en lugar de minimizarlos.

INHIBICIÓN CATÓDICA

La inhibición catódica también puede ayudar a disminuir las reacciones corrosivas de manera similar a lo explicado con la inhibición anódica. Los inhibidores catódicos son aquellos que al aplicarse al cátodo reducen significativamente el proceso corrosivo.

La gráfica siguiente nos muestra un comportamiento asociado a la protección mediante inhibición catódica y uno que no la tiene.

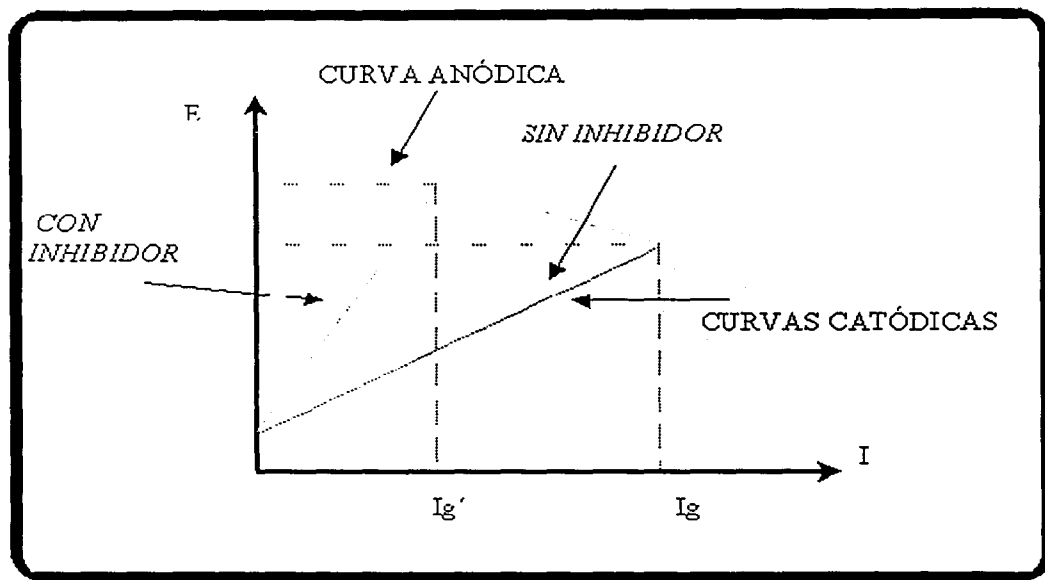


FIG. 5.3 CURVAS CATÓDICAS

Los inhibidores anódicos y catódicos permiten encontrar valores que nos permitirán a nuestros materiales en mejores condiciones contra la corrosión además de ser la base teórica de la Protección Anódica y Catódica que describimos mas adelante.

5.1 ALEACIONES RESISTENTES

Los metales comerciales suelen tener impurezas o imperfecciones, siendo inherentes causas de corrosión en medios agresivos, sin embargo es posible la creación de aleaciones resistentes y manejables en aplicaciones de ingeniería. Las aleaciones son combinaciones de diferentes elementos añadidos a otro denominado "Base".

Este método es el inicial para el diseño de cualquier equipo. Para seleccionar la aleación más resistente a la corrosión, se debe conocer el medio en el que estará expuesto, la concentración, temperatura, velocidad de flujo, tipo de proceso continuo o intermitente y agentes abrasivos. A continuación mencionamos algunas de las aleaciones más resistentes a la corrosión.

Las adiciones de Cromo y Molibdeno a los aceros de baja aleación retrasan la iniciación de fisuras por corrosión bajo fatiga, aunque incrementan el potencial de picaduras, así que para medios agresivos (cloruros) los contenidos de cromo superiores al 12% mejoran claramente la resistencia. Los aceros de fase dual, se pueden conseguir contenidos de cromo del 20% presentando elevadas resistencias mecánicas.

El Níquel y aleaciones, son ampliamente usados para exposiciones a la corrosión atmosférica, además de que tiende a ser pasivo en medios marinos. Sus aleaciones principalmente se constituyen de Silicio, Cobre, Cromo, Cromo-Hierro y Molibdeno-Cromo, teniendo nombres comerciales de Hastelloy, Monel, Nicromel e Inconel.

El Aluminio es muy resistente en cualquiera de sus formas contra los efectos atmosféricos, sus aleaciones se constituyen de cobre y silicio. El Magnesio le provee también mayor fortaleza contra la corrosión, debido a que hace estable a la capa natural de óxido que se forma.

Los recubrimientos de Zinc y sus aleaciones se utilizan para el galvanizado de aceros, sus cantidades son menores haciéndolo muy utilizado.

El Titanio es un metal muy resistente al agua a temperaturas de hasta 400° C, y a mayores tiempos de exposición, sólo genera una fina capa de óxido TiO_2 , por ello es un material ampliamente usado en centrales nucleares.

5.2 RECUBRIMIENTOS Y REVESTIMENTOS

Son aquellos que se emplean para mejorar la resistencia a la corrosión de ciertos metales empleados en equipos y estructuras, teniendo como propósito prevenir el contacto entre el medio y el material. Cuando el espesor de la capa es muy pequeño, se denomina recubrimiento y cuando es mayor a un milímetro, se considera revestimiento.

Podemos incluir a las películas orgánicas tales como pinturas, plásticos, barnices, grasas, adhesivos y a las inorgánicas como son cementos, cerámicos, silicatos entre otros materiales similares.

Los fosfatos compuestos con hierro, zinc o manganeso se aplican al material en caliente o en frío, el ácido fosfórico reacciona con el sustrato superficial para producir una capa protectora compuesta.

Los recubrimientos metálicos también son empleados siendo aplicados de forma eléctrica, química o mecánicamente.

Denominado como un recubrimiento anódico ó de sacrificio, la aplicación del Zinc produce superficies galvanizadas, es común de dos formas:

- a) Por inmersión directa en la fabricación de los equipos y
- b) Rociado en la superficie del material, aplicado generalmente durante el mantenimiento

También podemos mencionar a los recubrimientos Fenólicos que son muy resistentes a los ácidos y humedad, las resinas siliconas, acrílicos, asfaltos, poliuretanos y polímeros.

Un recubrimiento comercial empleado en equipos subterráneos por Compañía de Luz y Fuerza se llama Res-Clad, es un sistema epóxico modificado libre de solventes, empleándose en sitios donde se encuentran soluciones corrosivas tales como aguas residuales.

RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA TRANSFORMADORES

Superficies interiores de los Tanques:

Se debe preparar la superficie de forma manual, motorizada o con abrasivos a presión tipo grado comercial y aplicar un primario de cloruro de polivinilo, en una capa de $38\mu\text{m}$ de espesor seco como mínimo, de color uno blanco de acuerdo a especificación.

Superficies exteriores:

Se deben emplear un sistema de recubrimientos anticorrosivos, con una preparación de superficie con abrasivos a una presión a metal blanco, con un primario orgánico de zinc epoxi-poliamida, aplicada en una capa de 50 a 75 μm , de espesor seco y un acabado vinílico altos sólidos, aplicado en una capa con un espesor de 75 a 100 μm , de color 15 verde claro de acuerdo a especificaciones.

El aceptar o no otro tipo y proceso de recubrimiento implica la garantía de la superficie tratada, para no requerir mantenimiento durante un periodo de 10 años y sin condicionarlo a ningún tipo de ambiente donde sea instalado el transformador.

5.3 ALTERACIÓN DEL MEDIO

Dentro de las sustancias que se emplean contra la corrosión, contamos con aquellas que aplicadas al medio retardan sus efectos sin interactuar directamente con la superficie del material. Esta condición hace que en el medio circundante se encuentren precipitaciones favorables para remover constituyentes agresivos.

Algunos inhibidores se emplean para incrementar la resistencia óhmica del medio electrolítico, sin embargo pueden resultar imprácticos debido a que la cantidad del electrolito puede incrementarse y con ello la polaridad de los potenciales anódicos y catódicos.

5.4 INHIBIDORES SOLUBLES

Los inhibidores son productos químicos que al añadirse a los medios corrosivos, los vuelven inertes, o en su caso, disminuyen sus efectos.

Algunos inhibidores retardan la corrosión por adsorción para formar una fina capa protectora invisible, otros forman capas aislantes visibles que de igual manera resultan efectivas, y también hay inhibidores que producen una capa pasiva de óxido en la superficie permitiendo detener los efectos en el material, aunque si se añaden cantidades insuficientes de inhibidores, es probable que la corrosión se intensifique y puedan provocar picaduras y daños graves. La inhibición puede causar incremento de la polarización del ánodo, del cátodo o de la resistencia eléctrica del medio circundante.

Es en los medios abundantes en agua donde por mucho se emplean los inhibidores, se emplean comúnmente aceites solubles, que forman emulsiones de agua y aceite que depositan una película aceitosa por toda la superficie, debido a la carga que llevan, las partículas de aceite son atraídas hacia las zonas anódicas, que es en donde se necesitan.

El Fosfato de Sodio es un buen inhibidor, se coloca en pequeños sacos de lana en la parte inferior de los equipos subterráneos, es eficaz para proteger al acero contra el ataque del agua con pH ácido, provocando la formación de una película adhesiva y pasiva de óxido de hierro, el agua debe tener suficiente oxígeno para que el Fosfato de Sodio sea efectivo, por lo que se recomienda que el sitio esté lo suficientemente ventilado.

Concentraciones de silicato de Sodio (Na_2SiO_3) proveen inhibición mediante el control de pH entre 6.5 y 7.5.

5.5 PROTECCIÓN ANÓDICA

La explicación que se dio al principio del capítulo acerca del control de la corrosión mediante la aplicación de una corriente para modificar su estado es posible en la Protección Anódica.

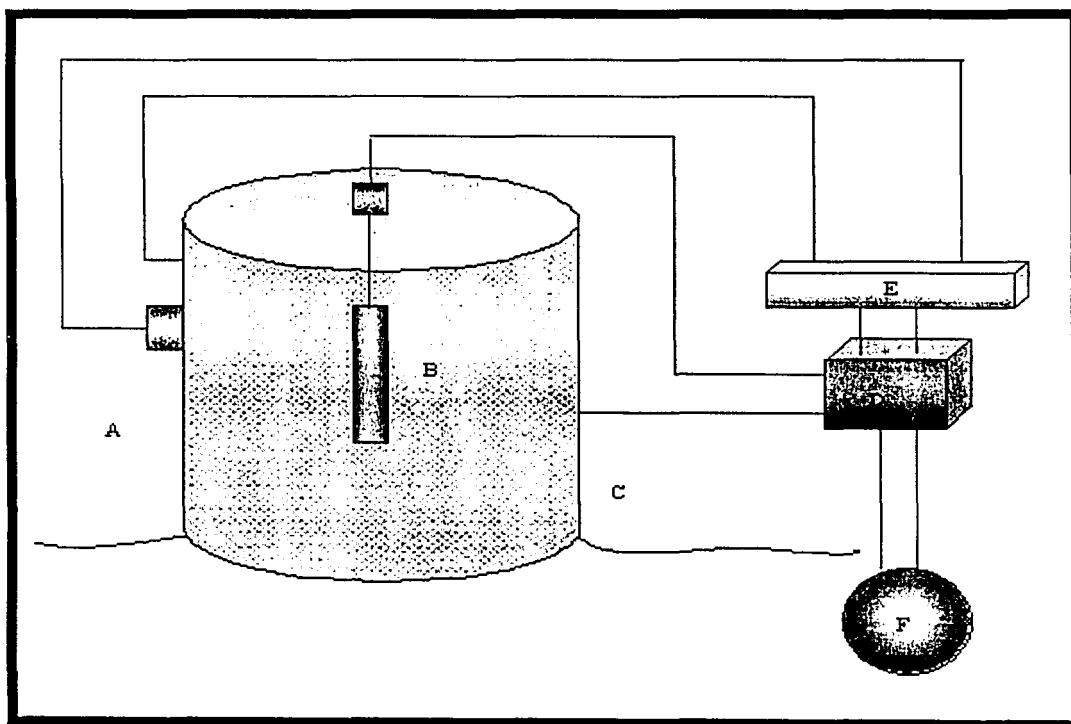
En la Protección Anódica, se requiere que desde la superficie a proteger se descargue una corriente en dirección a un área catódica, esto cuando existe la presencia de ciertas soluciones (generalmente ácidas) que pueden permitir la condición de pasivación del material durante la presencia de la corriente aplicada. Generalmente esto ocurre solo cuando el potencial entre la estructura y el medio está contenido en una estrecha banda de valores. Por esta razón, los potenciales de protección se deben controlar cuidadosamente.

Tenemos el ejemplo de un tanque de acero inoxidable, mostrado en la figura 5.4. los elementos básicos que se necesitan para realizar la protección anódica son: electrodos de referencia, cátodo auxiliar, rectificador de corriente directa, circuito controlador de tensión.

Se debe de mantener siempre la corriente de descarga requerida para proteger la estructura y mantener la pasividad en todo momento, debido a lo anterior, la protección no resulta absoluta, sin embargo, bajo la acción de la Protección Anódica, la razón de corrosión es mucho menor que si no la hubiera.

Es importante decir que la aplicación de la Protección Anódica sólo es para metales y aleaciones que tienen características de pasivación como son el acero, acero inoxidable, aleaciones de níquel y titanio.

Usualmente la Protección Anódica se aplica a tanques y vasijas donde existe la presencia de Oxígeno en abundancia y en medios ácidos (ácido sulfúrico, fosfórico, sales e hidróxidos de sodio y nitratos de amonio), donde hacen a la Protección Catódica impráctica por la dificultad de polarizar la superficie.



- A: Electrodo de referencia
- B: Cátodo auxiliar
- C: Estructura a proteger
- D: Rectificador de corriente directa
- E: Circuito controlador de tensión
- F: Suministro de corriente AC

FIG. 5.4 COMPONENTES DE PROTECCIÓN ANÓDICA EN UN TANQUE DE ACERO INOXIDABLE

5.6 PROTECCIÓN CATÓDICA

Podemos definir Protección Catódica como:

La reducción de la corrosión convirtiendo al metal a proteger en una región llamada "cátodo" por medio de la aplicación de una corriente directa impresa o transfiriendo el ataque corrosivo a un elemento denominado ánodo de sacrificio.

Antes de aplicar la Protección Catódica, la mayoría de las estructuras corroídas tendrán áreas anódicas y catódicas, con la aplicación, se pueden convertir las áreas anódicas en áreas catódicas, donde la corrosión se eliminará.

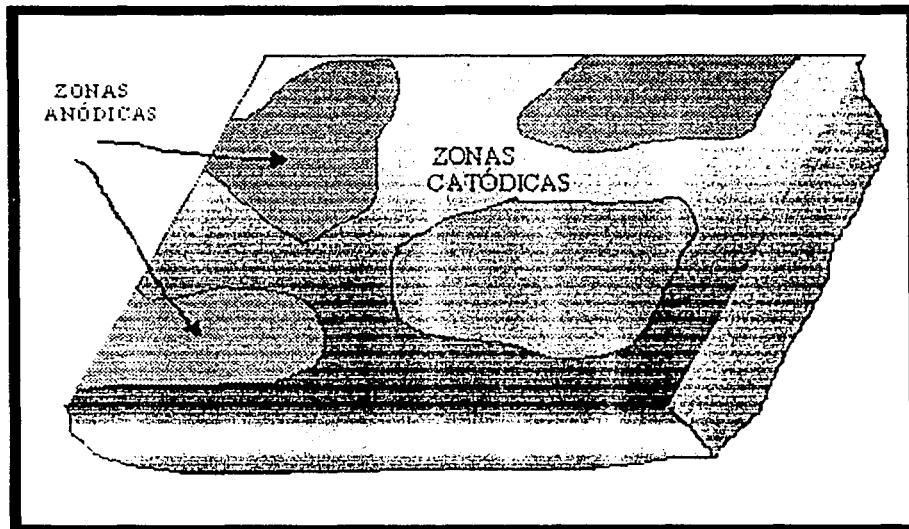


FIG. 5.5 ZONAS QUE SE FORMAN EN UNA ESTRUCTURA METALICA

La aplicación de una corriente directa a la estructura corroída puede causar que se convierta en un cátodo.

Veamos el caso de una estructura metálica enterrada o sumergida.

Como se ilustra en la figura 5.6, la corriente directa fluye de las áreas anódicas a través del suelo hasta las áreas catódicas.

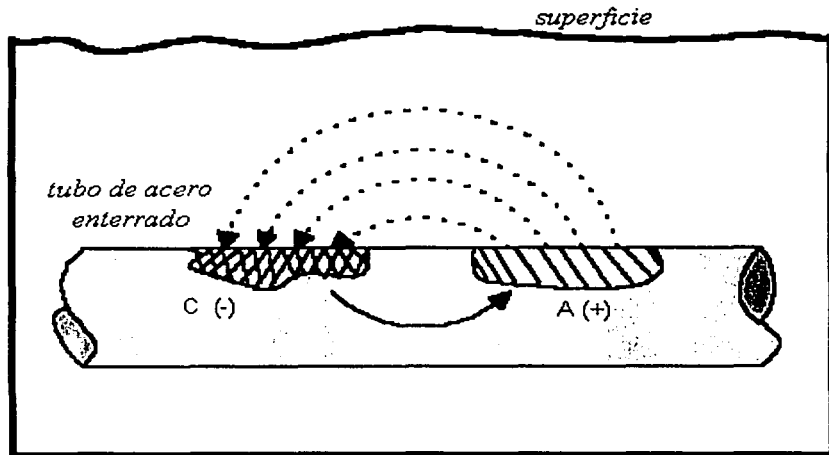


FIG. 5.6 CELDA CORROSIVA

Para un voltaje dado (potencial galvánico entre ánodos y cátodo), el monto de corriente que fluye, se limitará a factores como resistividad del medio, y del grado de polarización entre las áreas anódicas y catódicas.

La corrosión ocurre cuando las descargas de corriente del metal pasan a través del medio hasta las áreas catódicas.

La aplicación de la Protección Catódica en la estructura hace que en la superficie se colecte la corriente del medio ambiente, cuando esto ocurre, las superficies de las estructuras serán un cátodo, y la corrosión será mitigada.

En la figura 5.7 se muestra como la sección corroída originalmente del tubo de la figura 5.6 se convierte en un cátodo con la aplicación de corrientes en áreas superficiales del tubo. También, se puede ver que las líneas de corriente de Protección Catódica fluyen a través del medio ambiente que rodea a la pieza hasta llegar a una conexión a tierra (usualmente llamada cama de ánodos) para completar el propósito.

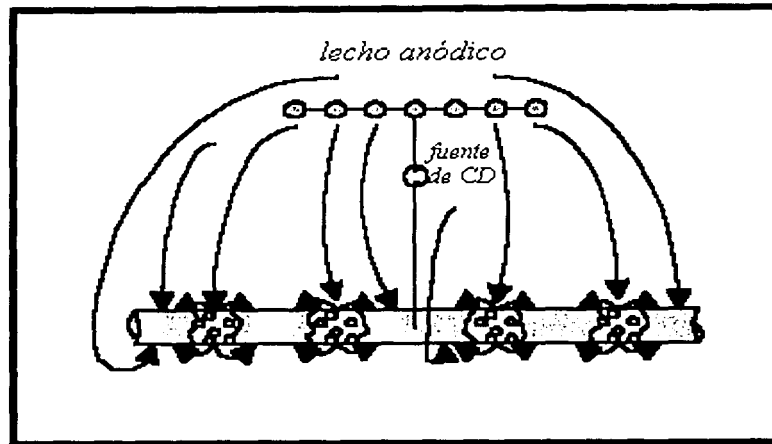


FIG. 5.7 CORRIENTES DE PROTECCIÓN

Lo anterior nos dice que la corrosión será eliminada por la aplicación de la Protección Catódica hasta que se transfiera de la estructura a proteger a las camas de ánodos, las cuales son diseñadas para descargar las corrientes de protección por un tiempo razonable, y que serán consumidos hasta su reemplazo.

A esta protección se debe agregar la ofrecida por los revestimientos, como por ejemplo las pinturas, casi la totalidad de los revestimientos utilizados en instalaciones enterradas, aéreas o sumergidas, son pinturas industriales de origen orgánico, pues el diseño mediante ánodo galvánico requiere del cálculo de algunos parámetros, que son importantes para proteger estos materiales, como son: la corriente eléctrica de protección necesaria, la resistividad eléctrica del medio electrolito, la densidad de corriente, el número de ánodos y la resistencia eléctrica que finalmente ejercen influencia en los resultados.

La protección catódica constituye el método más importante de todos los que se han mencionado anteriormente para conseguir el control de la corrosión, la corrosión se reduce y se puede mantener una superficie metálica en un medio corrosivo, sin sufrir deterioro durante un tiempo definido.

En el siguiente capítulo estableceremos todo lo necesario para aplicar la protección en casos generales y los criterios necesarios para obtener un buen diseño.



CAPÍTULO VI

SISTEMAS DE
PROTECCIÓN CATÓDICA

6.1 FUNDAMENTOS DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA

La Protección Catódica como se ha mencionado es un método que se usa para reducir la corrosión de una superficie metálica consistiendo en el suministro de electrones hacia la estructura a proteger por medio de una corriente impresa o mediante el empleo de ánodos de sacrificio.

Para conseguir la Protección Catódica necesitamos conectar a la estructura a proteger algún elemento que tenga una diferencia de potencial suficiente para hacer circular una corriente en el sentido deseado descargándose desde todas las áreas anódicas, así existirá entonces un flujo neto de corriente sobre la superficie llegando a convertir toda la superficie en un cátodo.

Esto se logra mediante la adhesión de un metal menos noble al metal por proteger (*figura 6.1 a*). De esta forma se crea una pila galvánica en donde el metal de la estructura protegida actúa como el polo positivo de la pila (cátodo), y el metal que sufre el desgaste es el ánodo, o mediante un flujo de corriente, que se le aplica al metal para hacerlo catódico (*figura 6.1 b*) mediante una fuente de corriente continua, esto se logra conectando el polo negativo de la fuente al metal por proteger y el polo positivo a un electrodo auxiliar.

El mecanismo, consecuentemente implicará una migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajarán desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados, cumpliendo así su función.

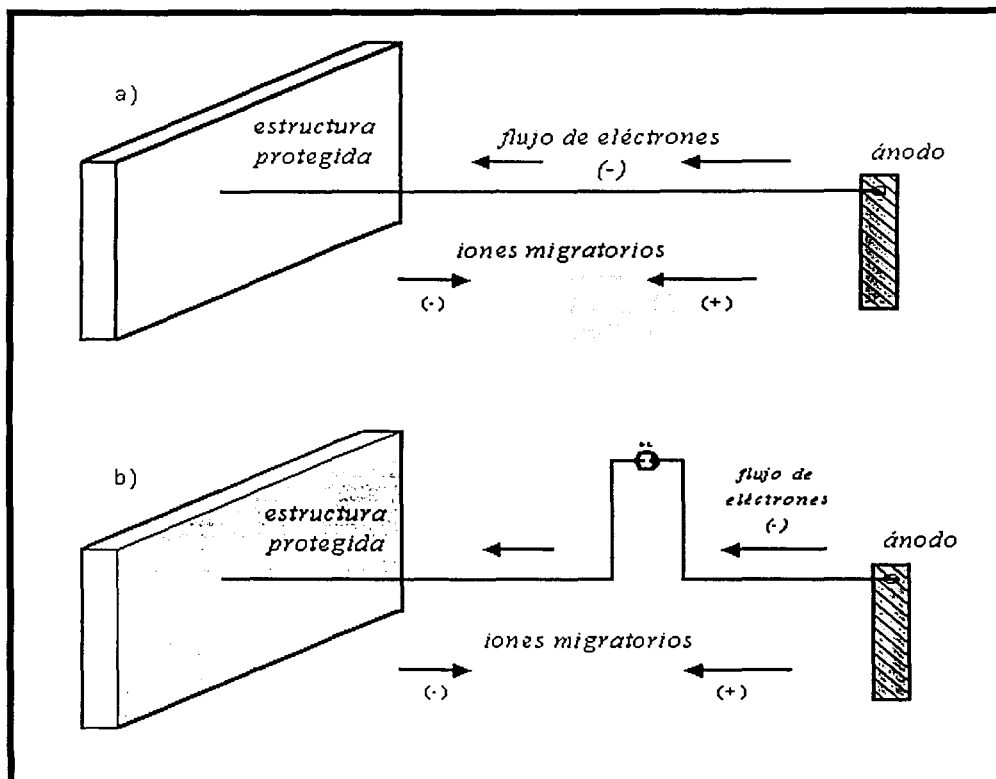


FIG. 6.1 PROTECCIÓN CATÓDICA

La Protección Catódica se puede usar en combinación con recubrimientos anticorrosivos para así poder aplicar menores cantidades de corrientes de protección, sin embargo hay que tomar en cuenta el desgaste que sufre a lo largo del tiempo para recubrirlo de nueva cuenta y así no tener que afectar el tiempo de sacrificio planeado para los ánodos instalados.

Como se ha visto la protección catódica se puede dar básicamente de dos formas:

- Mediante el uso de una fuente rectificadora de corriente directa, denominado Sistema de Protección Catódica con Corriente Impresa o aplicada.
- Con la conexión de un metal más electronegativo, llamado Sistema de Protección Catódica con Ánodos de Sacrificio.

La tabla 6.3 muestra las ventajas y desventajas de las dos formas generales de Protección Catódica.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO Y CORRIENTE IMPRESA	
ÁNODOS DE SACRIFICIO	CORRIENTE IMPRESA
No requieren potencia externa	Requieren potencia externa
Voltaje de aplicación fijo	Voltaje de aplicación variable
Corriente limitada	Corriente variable
Aplicable en casos de requerimiento de corriente pequeña	Útil en diseño de cualquier requerimiento de corriente
Útil en medios de baja resistividad	Aplicables en cualquier resistividad del medio
La interferencia con estructuras enterradas es prácticamente nula	Es necesario analizar la posibilidad de interferencia
Sólo se los utiliza hasta un valor límite de resistividad eléctrica hasta 5000 ohm-cm	Sirve para áreas grandes
Mantenimiento simple	Mantenimiento no simple

TABLA 6.1

6.2 PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO

En un sistema de Protección Catódica mediante ánodos de sacrificio la corriente de protección se logra conectando uno o varios ánodos de un metal menos noble a la estructura por proteger.

El ó los ánodos se pueden instalar directamente sobre la estructura o enterrados de tal manera que siempre compartan el mismo electrolito. Como se observa en la figura 6.2 deben unirse la estructura y los ánodos por medio de conductores eléctricos para buscar el espaciamiento óptimo tal que produzcan la mejor distribución de corriente sobre esta.

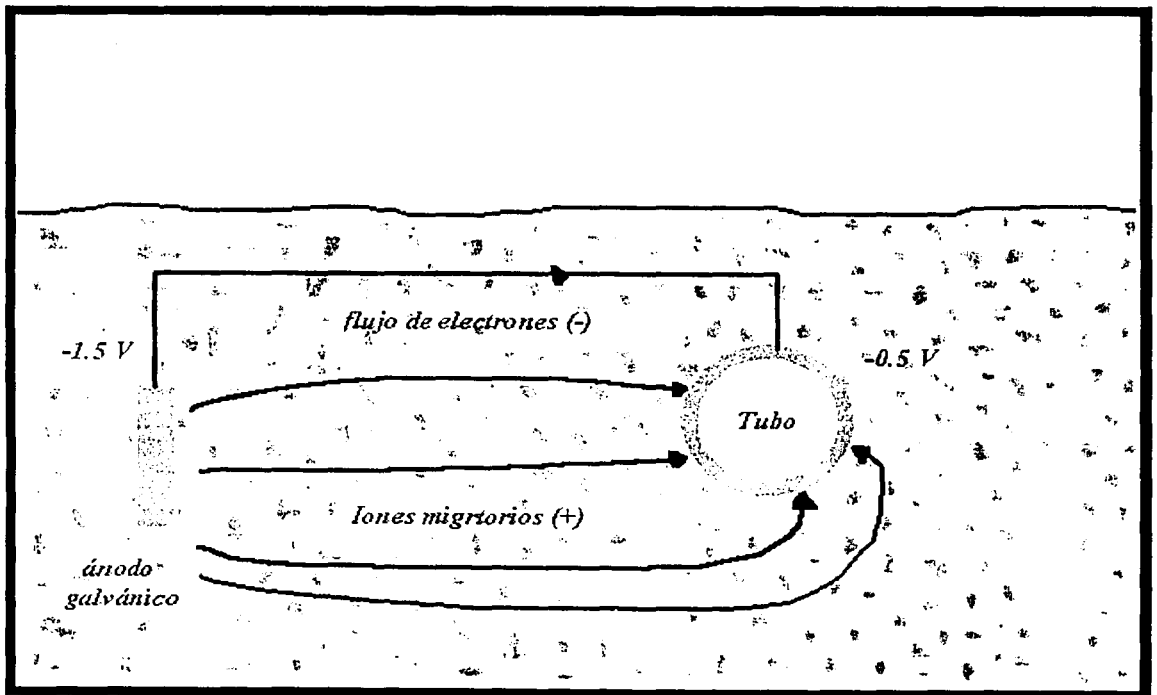


FIG. 6.2 DIAGRAMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO

Para que un elemento pueda ser considerado como material de empleo se tienen que tomar en cuenta tres factores:

- a) El potencial entre el ánodo y la estructura a proteger debe ser lo mayor posible para superar las magnitudes de las celdas corrosivas.
- b) El material del ánodo deberá proporcionar la suficiente energía eléctrica para permitir larga vida de uso.
- c) La eficiencia de los materiales a emplear tendrá que ser de un alto porcentaje para mantener un buen suministro de energía.

Los ánodos de sacrificio mas comúnmente empleados y que cumplen con los requisitos anteriores, son los formados por Zinc, Magnesio y Aluminio. A continuación daremos las características principales de estos ánodos.

Zinc: se recomienda utilizarse en medios de resistividad inferior a $5,000 \Omega\text{-cm}$, se emplea principalmente para la protección catódica en agua de mar, también suele usarse en suelos de baja resistividad.

Magnesio: se utilizan para la protección catódica de estructuras metálicas enterradas, en suelos de resistividad comprendidas entre $5,000$ y $10,000 \Omega\text{-cm}$.

Aluminio: su campo de aplicación es semejante a los ánodos de zinc, y tiene un comportamiento excelente para aguas dulces, tiene un precio mas elevado que el del zinc, el cual se compensa al necesitar menos ánodos por su elevada capacidad de corriente.

El ánodo de Zinc fue el primero que se utilizo en la protección catódica, posteriormente el de Magnesio y muy recientemente se utiliza el aluminio. Debido a que los metales presentan impurezas, afectan el rendimiento optimo de los ánodos para ser de sacrificio, por ejemplo en el caso del zinc, el hierro y el plomo en porcentajes elevados, ocasionan la pérdida de actividad del ánodo, para contrarrestar esto se agregan pequeños porcentajes de otros metales para un mejor funcionamiento en medio agresivo. En la tabla 6.2 se muestran la composición de algunos ánodos comerciales.

COMPOSICIÓN COMERCIAL TÍPICA DE ÁNODOS					
DE ZINC		DE MAGNESIO		DE ALUMINIO	
Elemento	Contenido (%)	Elemento	Contenido (%)	Elemento	Contenido (%)
Al	0.005	Al	0.01	Si	0.11-0.21
Cd	0.003	Mn	0.5 a 1.3	Zn	0.30-0.50
Fe	0.0014	Fe	0.03	Fe	0.10
Pb	0.003	Ni	0.001	Hg	0.020-0.050
Cu	0.002	Cu	0.02	Cu	0.006
Zn	Restante	Mg	Restante	Al	Restante

TABLA 6.2

Basándose en la composición de cada ánodo, se cuenta con ciertas características propias del ánodo, que nos servirán para proyectar el sistema de protección catódica con ánodos de sacrificio. En la tabla 6.3 se dan las características prácticas de los ánodos, referidos a la composición de cada ánodo según la tabla 6.2.

Considerando la figura 6.2 se toma como ejemplo al ánodo de Magnesio cuyo potencial es de -1.5 V y que al conectarlo a una tubería enterrada de un oleoducto cuyo potencial se estima en -0.5 V, se establecerá una corriente eléctrica en dirección del ánodo de Magnesio a través del conductor electrolito hasta la tubería de hierro que se comporta como un cátodo donde se descargará a través del electrolito (suelo) hasta cerrar el circuito.

CARACTERIATICAS PRACTICAS DE LOS ANODOS			
CARACTERÍSTICA	ANODO ZINC	ANODO MAGNESIO	ANODO ALUMINIO
Eficiencia	95%	50%	95%
Rendimiento A-hr/kg	778	1102	2817
Contenido de energía A-hr/kg	820	2204	2965
Potencial de trabajo (V)	-1.10	-1.45 a -1.70	-1.10

TABLA 6.3

El contenido de energía eléctrica en función del tiempo de un ánodo es una característica básica del metal a emplear, nos indica que si un ánodo de zinc teóricamente suministra 820 Amperes continuamente, en una hora se consumirá un kilogramo de material, sin embargo tenemos que considerar que su eficiencia es del 95% por lo que la corriente que drenará para fines prácticos será menor a lo teórico.

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos entre ellos el de Backfill (tabla 6.4), especialmente con ánodos de Zinc y Magnesio, estos productos químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

- a) Contribuyen a una mayor eficiencia;
- b) Desgaste homogéneo del ánodo;
- c) Mantienen humedad, disminuyendo la resistencia de contacto.

COMPOSICIÓN TÍPICA DE RELLENO PARA ANODOS GALVANICOS		
RELLENO	ANODO DE ZINC	ANODO DE MAGNESIO
BACKFILL	50%YESO;50%Bentonita	75%Yeso;20%Bentonita;5%SO ₄ Na ₂

TABLA 6.4

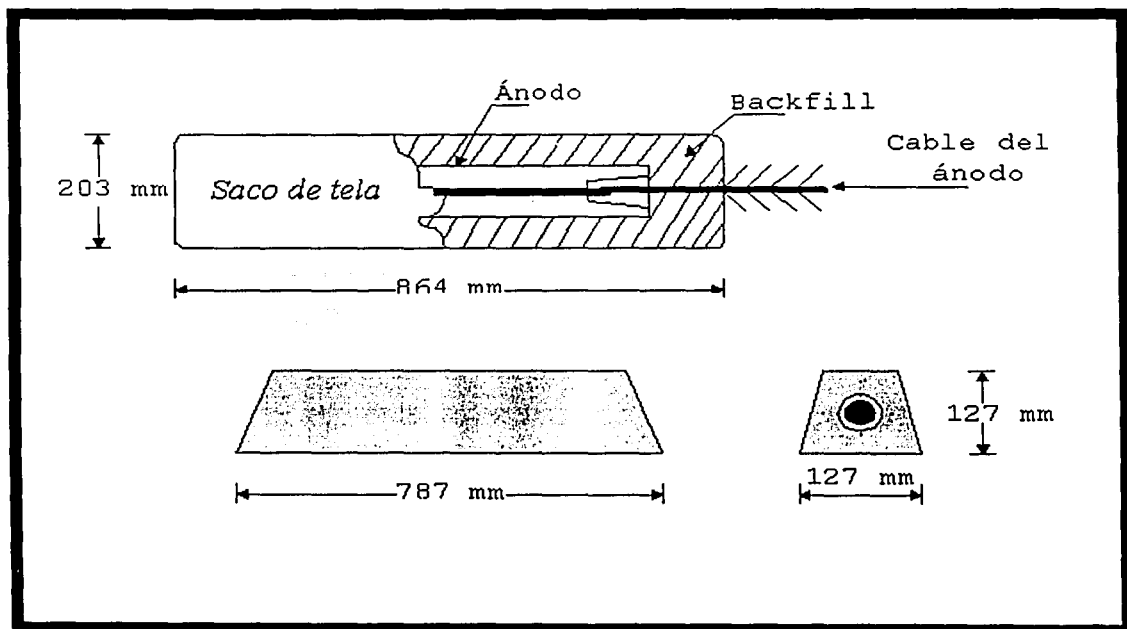
Como se ve en la tabla 6.4, la composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso, bentonita, sulfato de sodio, y la resistividad de la mezcla varía entre 50 a 250 Ω -cm.

Los ánodos de sacrificio utilizados en la protección catódica, varían en dimensiones y peso, de acuerdo al diseño que se obtenga, como se vera en el siguiente capitulo. Es así como comercialmente existen ánodos de diferentes tamaños, como ejemplo vemos en la tabla 6.5, diferentes tamaños de ánodos de Magnesio.

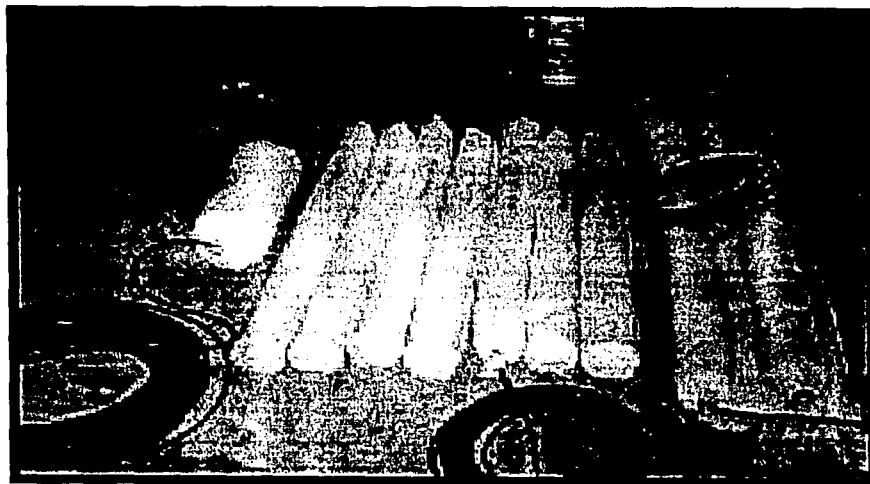
CARACTERÍSTICAS DE ÁNODOS DE MAGNESIO					
MASA DEL ÁNODO (kg)	A cm	B cm	L cm	MASA DEL RELLENO	MASA TOTAL
9 Lb	8.3	8.3	34.3	15 Lb	24 Lb
17 Lb	8.3	8.3	64.6	25 Lb	42 Lb
32 Lb	12.7	12.7	51.7	38 Lb	70 Lb
48 Lb	12.7	12.7	78.7	48 Lb	96 Lb

TABLA 6.5

En la figura 6.3 a) se muestra el esquema de un ánodo de magnesio comercial típico, de 48 Lb. con su respectivo relleno, y en la figura 6.3 b) tenemos diferentes tamaños de ánodos de magnesio, en su forma real.



a) ESQUEMA



b) FOTOGRAFÍA

FIG. 6.3 ÁNODOS DE MAGNESIO

En una gran cantidad de casos, debido a la falta de un sitio cercano para la colocación de los ánodos en los sistemas de Protección Catódica, se hace necesario ubicarlos a distancias remotas de las estructuras a proteger, con esto las mediciones de los potenciales cambian según el siguiente modelo:

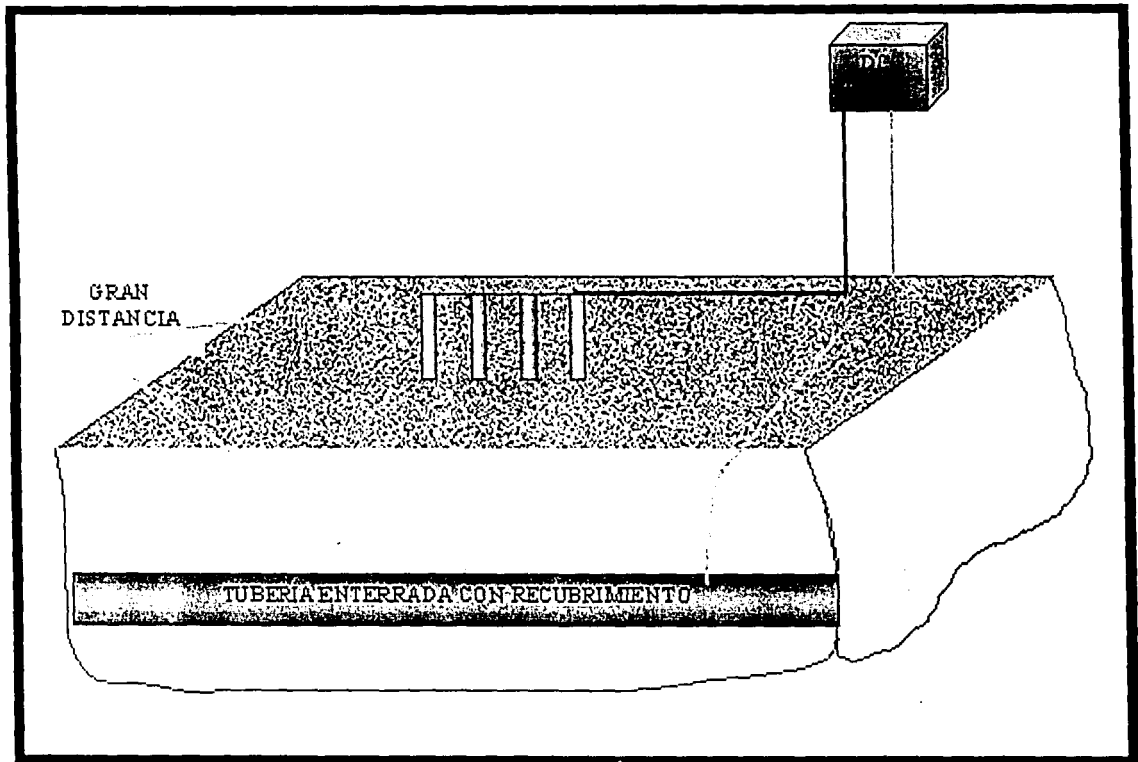
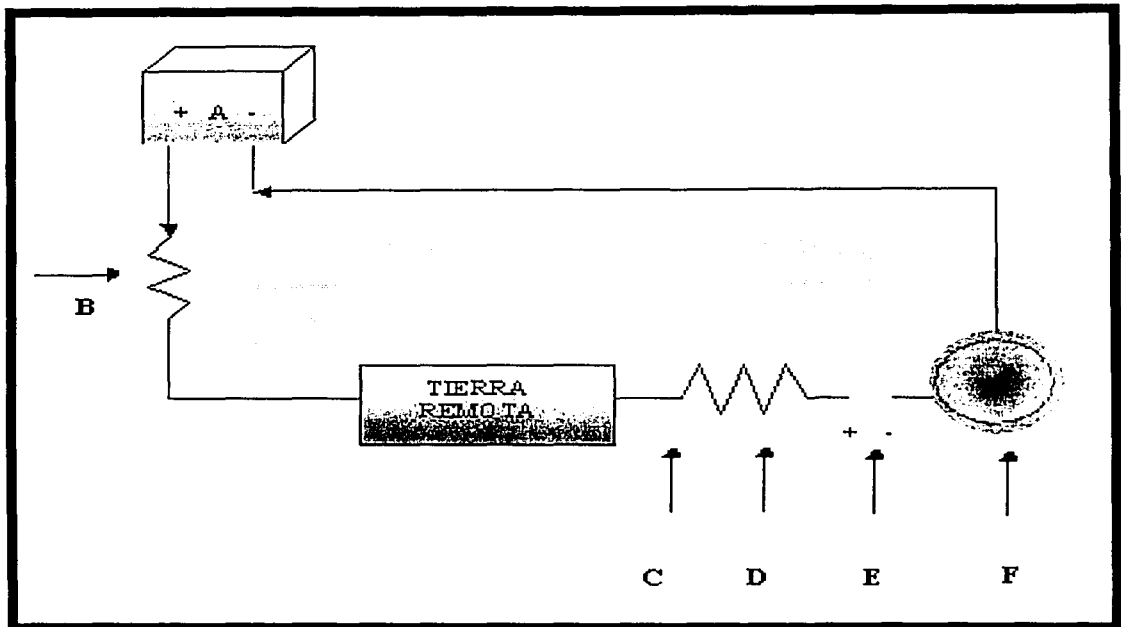


FIG. 6.4 CONEXIÓN A GRAN DISTANCIA



- A: Potencial de la cama de ánodos*
- B: Resistencia de los ánodos*
- C: Resistencia entre la estructura y tierra remota*
- D: Resistencia del recubrimiento*
- E: Potencial de polarización*
- F: Estructura a proteger*

FIG. 6.5 CIRCUITO EQUIVALENTE CON TIERRA REMOTA

Para el diseño con ánodos de sacrificio se debe tomar en cuenta factores tales como el sitio donde se ubicarán los ánodos, así como el cambio de potencial al conectarlos considerando resistencia propia, la resistencia de la tierra (ó agua), resistencia del recubrimiento, el potencial natural de la estructura, resistencia de conductores (de ser necesario), así como la resistencia del relleno (de llevarlo). Desde luego que con el tiempo irán cambiando los valores antes considerados, por lo que se puede recurrir a la conexión de equipos de medición permanentes para llevar un control óptimo de nuestro sistema.

La Protección Catódica con ánodos de sacrificio, se recomienda cuando no se tiene una fuente de energía eléctrica cercana a la estructura a proteger. Tal es el caso de las cimentaciones de torres de líneas de transmisión o bien cuando se tiene poca demanda de corriente.

6.3 PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

Como se explicó en el Capítulo 3, las celdas de corriente impresa pueden resultar perjudiciales si llegan a interferir accidentalmente a sistemas eléctricos cercanos, sin embargo si se modifica el sentido del flujo de esas corrientes circulantes se tendrá un efecto contrario que para nuestro caso puede traernos grandes beneficios.

En un sistema de corriente impresa, la corriente de protección pasa a través de un ánodo o varios ánodos inertes conectados a un rectificador. El ánodo o ánodos se instalan también en un electrolito común con la estructura por proteger.

Los conductores terminales del ánodo se conectan a la terminal positiva del rectificador. El camino de retorno de la corriente se hace conectando la estructura a la terminal negativa, como se ve en la figura 6.6.

La corriente de salida y la vida de la instalación dependen del material usado, del número de ánodos instalados y de la resistencia total del circuito. Sin embargo dado que la fuente de energía es variable, puede trabajarse con circuitos de alta resistencias siempre que el suelo tenga algo de humedad para lograr la operación del ánodo.

Los ánodos de referencia se pueden clasificar en *consumibles* y *permanente*, aunque en realidad todos los ánodos se *gastan* en cierta manera al suministrar la corriente, se consideran permanentes aquellos ánodos cuya pérdida de material por corrosión es despreciable.

- *Ánodos consumibles* son, principalmente: Fe y Al.
- *Ánodos permanentes* son: Grafito, FeSi, PbAg, TiPt, Ti MO, cerámicos, tántalo platinado, etc.

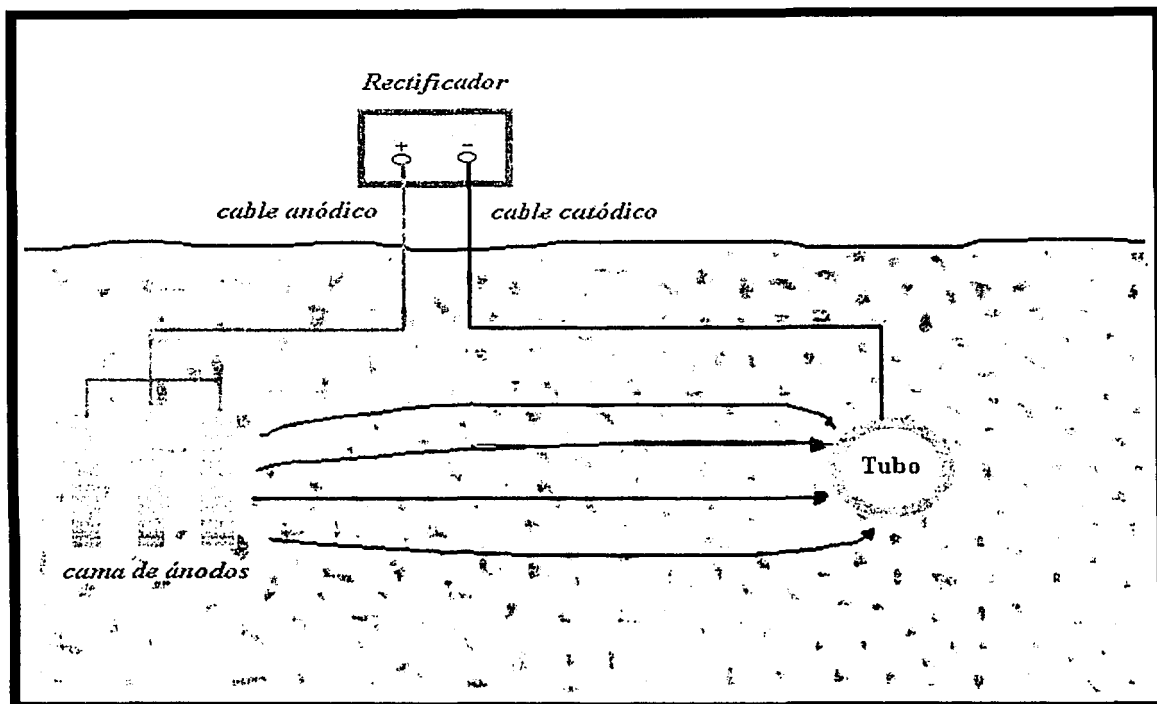


FIG. 6.6 DIAGRAMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

En general, los ánodos más utilizados son los de tipo permanente. La tabla 6.6 compara distintos tipos de ánodos para corriente impresa. En instalaciones enterradas se suelen utilizar de ferrosilicio o grafito, rodeados de un backfill que mejora sus condiciones de trabajo. El backfill es un tipo de carbón que mejora la superficie de contacto, reduce la resistencia con el terreno y permite la difusión de los gases producidos en las reacciones anódicas.

CARACTERISTICAS DE ANODOS PERMANENTES					
CARACTERISTICA	Ti /MMO	Ti/Pt	Grafito	Pb/Ag	Fe/Si
Densidad [gr/cm³]	4-6	4-6	1-3	12	8
Densidad de Corriente normal [mA/cm²]	80-100	30-80	0.1-0.4	6-18	1-2
[mg/A año]	4-5	6	250.10	68.10 ³	250.10 ³

TABLA 6.6

La Protección Catódica con corriente impresa, se utiliza cuando se cuenta con una fuente de energía eléctrica cercana a la estructura a proteger y que los requerimientos de corriente sean altos. Este tipo de protección se usa principalmente en obras de toma, condensadores, tuberías, intercambiadores de calor y fondo de tanques en centrales termoeléctricas.

Las fuentes externas para el suministro de corriente directa más empleadas para la protección catódica son las siguientes:

FUENTES DE CORRIENTE DIRECTA:

RECTIFICADORES

Es un dispositivo electrónico que convierte corriente alterna en corriente directa pulsante, siendo fabricados de silicio y selenio para el caso de muy altas potencias.

La presentación puede ser tipo puente:

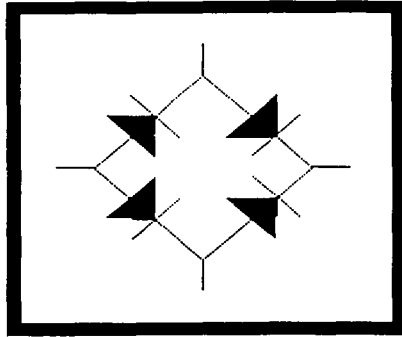
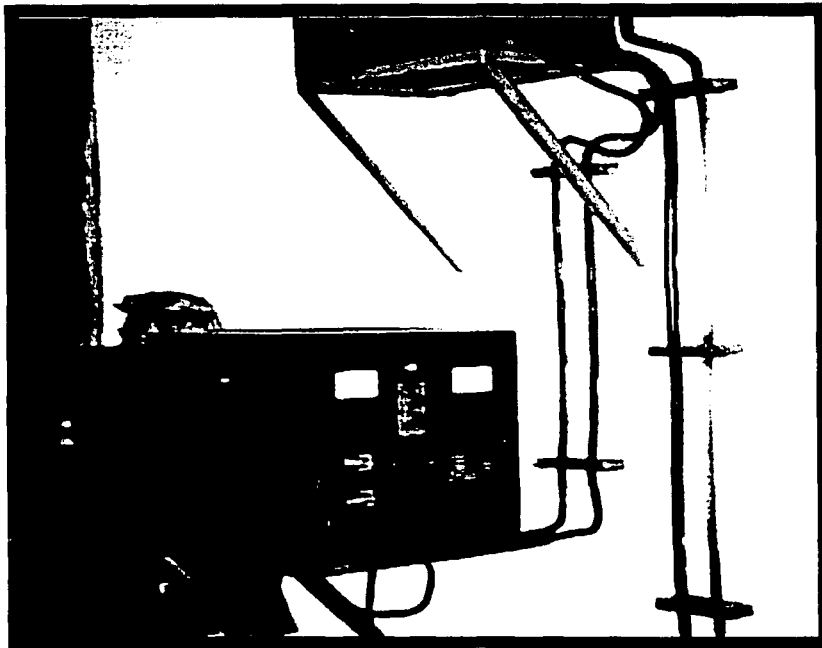
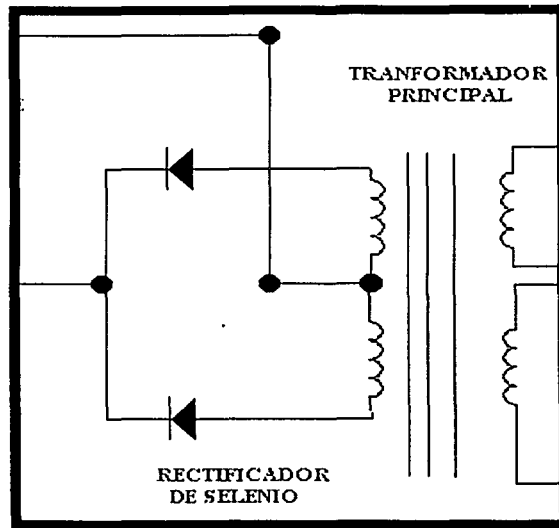


FIG. 6.7 PUENTE RECTIFICADOR

o constituidos por diodos de potencia:



a)



b)
FIG. 6.8 a) y b) RECTIFICADOR DE SELENIO

BATERÍAS

Las baterías recargables se emplean cuando no se tiene acceso de alguna otra fuente de energía, en muchos casos se les incluyen celdas solares para su recarga.

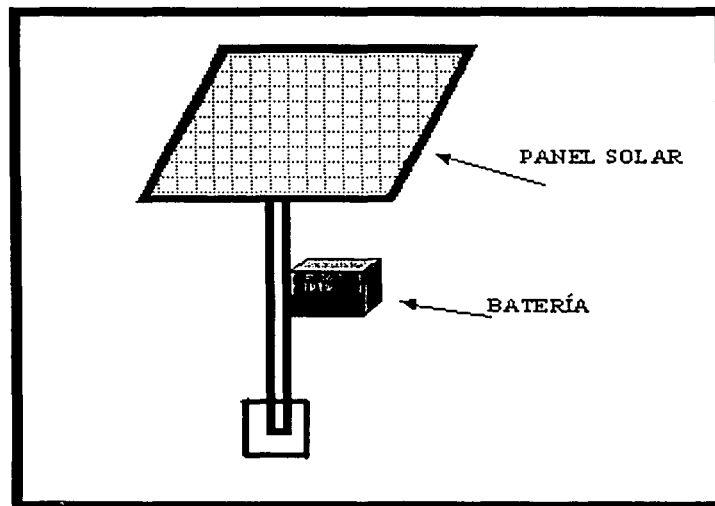


FIG. 6.9 CELDA SOLAR

6.3.1 SISTEMA INTERCONECTADO

Se caracteriza por que el polo negativo de la fuente de corriente directa se conecta al sistema de la red de tierras de las estructuras que se van a proteger, o a la estructura misma, debido a lo cercano que se encuentra la red de tierras de las estructuras metálicas. En la figura 6.10 observamos un diagrama típico de este sistema.

El sistema interconectado requiere capacidad adicional, para compensar la corriente drenada resultante de la incorporación en el sistema a proteger de los alambres de cobre del sistema de tierras.

6.3.2 SISTEMA AISLADO

Se caracteriza por que las estructuras a proteger no están conectadas a la red de tierras y son protegidas en conjunto como unidades aisladas. Esto se logra por medio del uso de aislantes, celdas electrolíticas, etc. En la figura 6.11 se muestra un diagrama del sistema aislado.

Los cables de retorno se conectan desde la estructura aislada hasta la terminal negativa del rectificador. En este sistema no se requiere de corriente adicional, para los alambres de cobre en el sistema de tierras.

La simbología utilizada en los diagramas de la figura 6.10 y 6.11, es la siguiente:

- A : Ánodo
- G: Ánodo para conexión a tierra
- Ec: Electrodo de referencia de sulfato de cobre/cobre
- Ez: Electrodo de referencia de zinc
- P: Estación de potencial
- R: Rectificador
- T: Estación de pruebas para estructuras
- J: Caja de derivaciones del ánodo
- Y: Caja de paso
- I: gabinete de instrumentos G

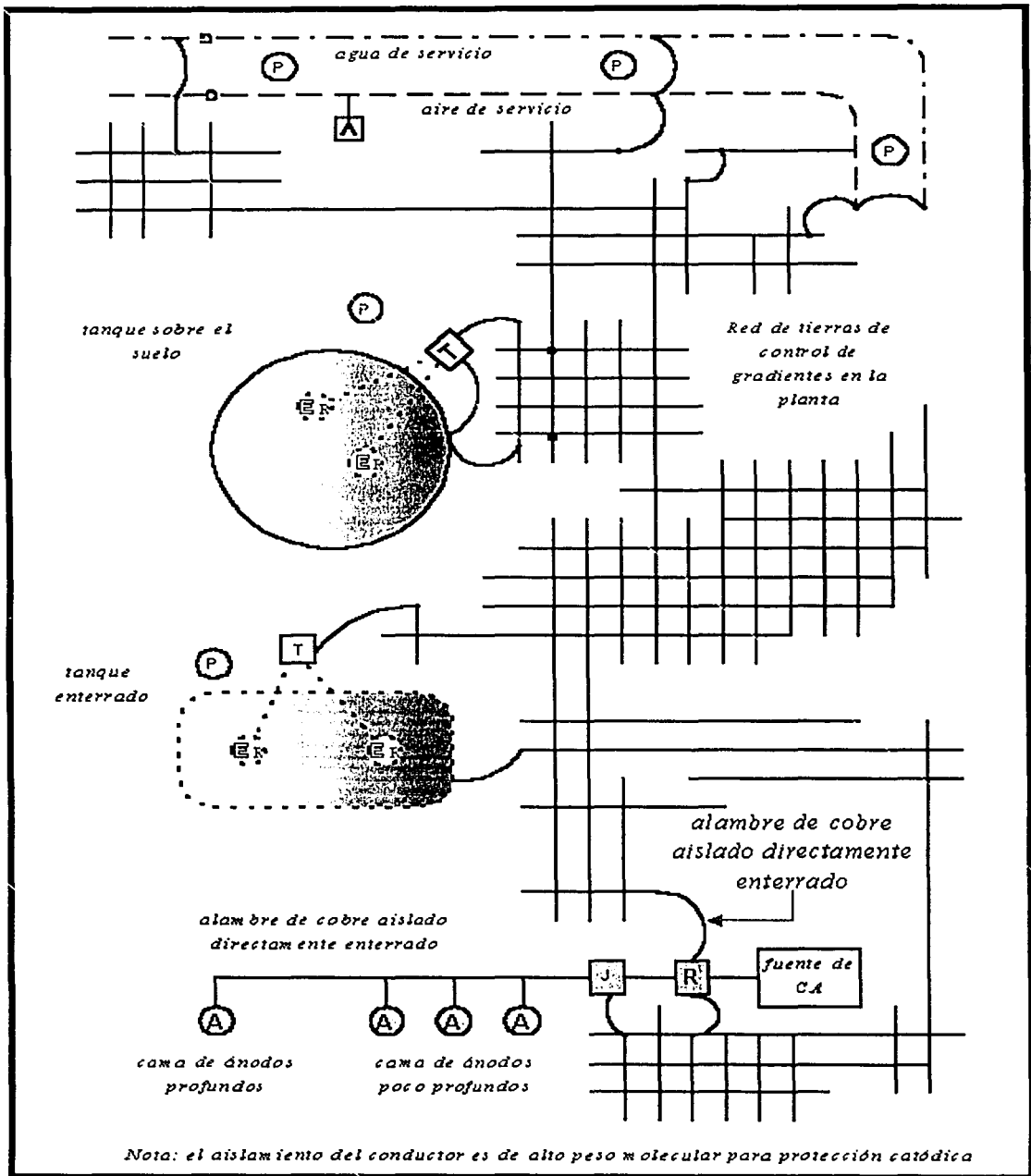


FIG. 6.10 INTERCONEXIÓN TÍPICA DE PROTECCIÓN CATÓDICA

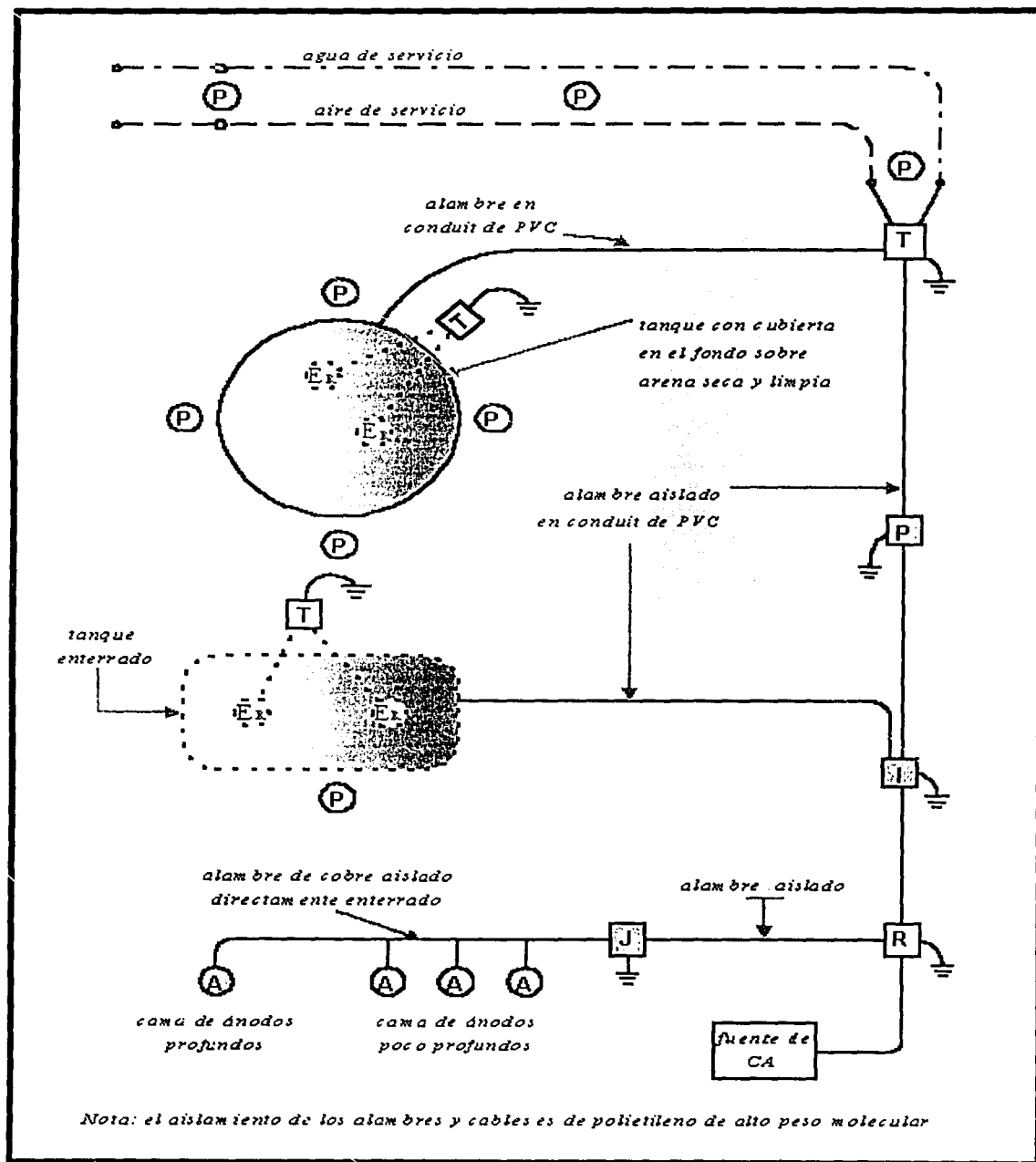
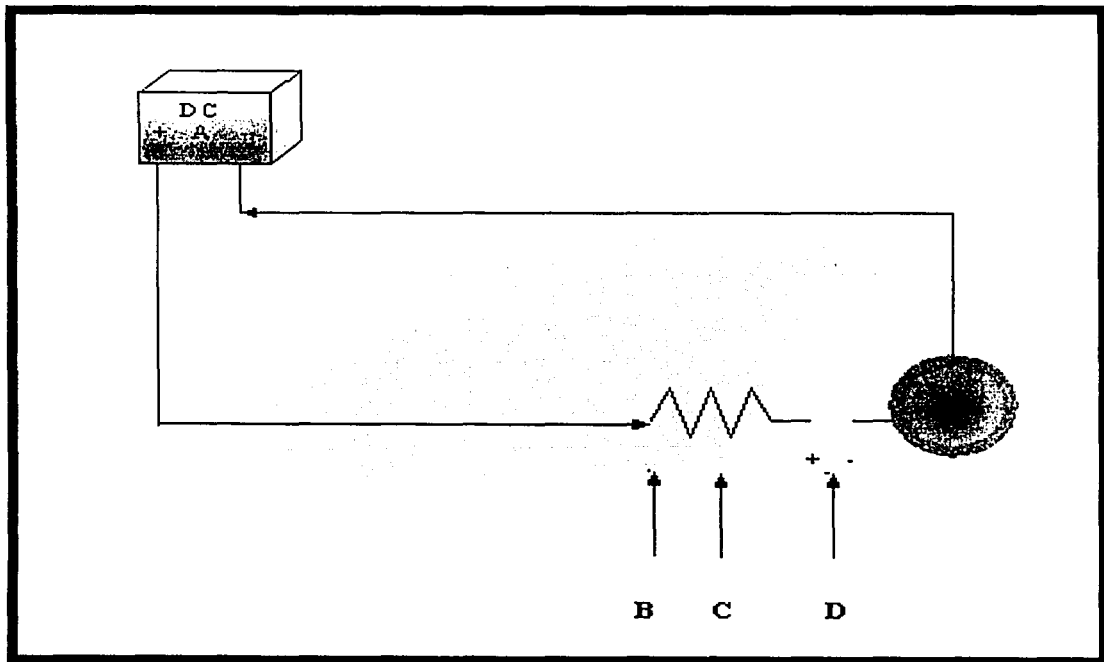


FIG. 6.11 SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA AISLADA

6.4 CRITERIOS PARA ALCANZAR LA PROTECCIÓN CATÓDICA

El cumplimiento parcial o total de los criterios para Protección Catódica indicará en que tanto se ha alcanzado una protección adecuada para un material metálico.

Los medidores de potencial son muy usados para determinar criterios de protección. La base radica en que si se aplica una corriente a la estructura a proteger, habrá un cambio en su potencial con respecto al medio. La resistencia entre la estructura a proteger y el medio incluye la resistencia de cualquier pintura o recubrimiento (de existir) dieléctrico. La red resultante sería la que se muestra a continuación:



- A: Fuente de alimentación de la Protección Catódica*
- B: Combinación de la resistencia de ánodo a tierra y resistencia de la estructura a proteger*
- C: Recubrimiento*
- D: Potencial polarizado*
- E: Contacto con la estructura*

FIG. 6.12 CIRCUITO EQUIVALENTE

Las lecturas de los potenciales de polarización en contacto directo con la estructura son un buen camino para verificar los valores de corriente aplicada para la protección.

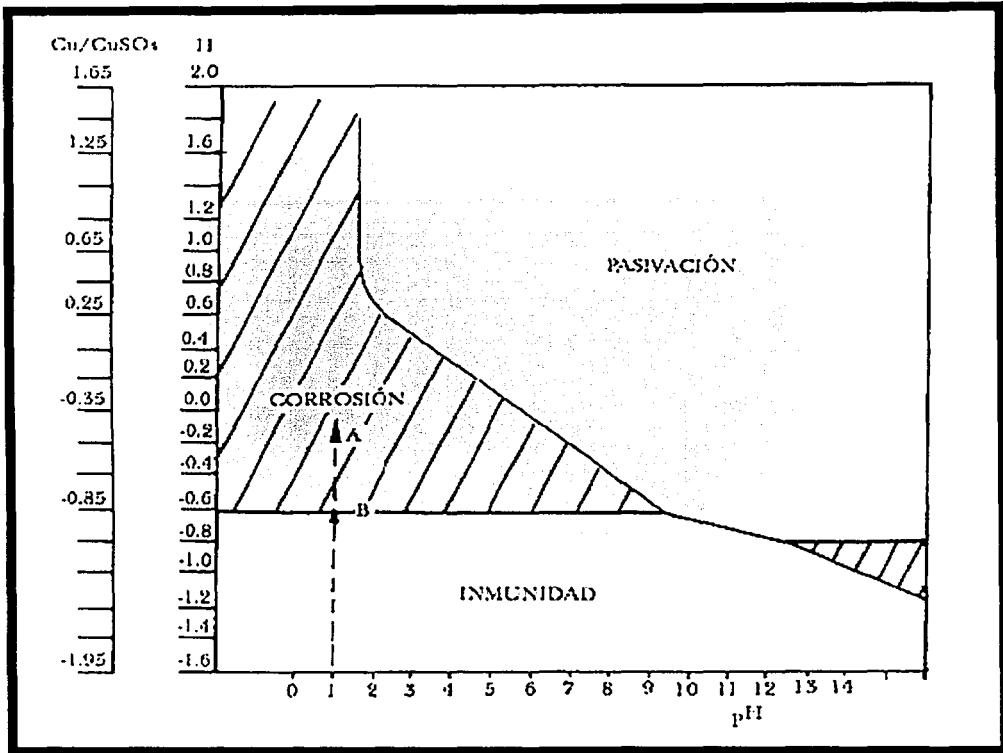


FIG. 6.13 GRÁFICA PH vs POTENCIAL NATURAL

Cuando se cuenta con la posibilidad de obtener el nivel de PH del medio (por ejemplo para agua), con la ayuda de la gráfica anterior podemos observar las diferentes regiones en que se puede encontrar una estructura en base a su potencial natural respecto a una celda de Cu/CuSO₄.

CAMBIOS DE POTENCIAL

Cuando se trabaja con estructuras de gran tamaño o longitud, es usual que en el momento de aplicarles una tensión desde un extremo, se presenten caídas de potencial en los puntos más alejados, lo que se debe considerar en el momento de hacer las mediciones del potencial natural.

En el momento de aplicar la corriente de protección se debe observar que haya un cambio mínimo del potencial de 0.1 volt (100mV) negativo, esto significa que la estructura si está recibiendo corriente, aunque no significa que se ha alcanzado el nivel mínimo de protección para detener la corrosión.

CRITERIO PARA ESTRUCTURAS DE ACERO Y HIERRO COLADO

- Un voltaje negativo de 850 mV como mínimo debe ser medido entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito.
- Una variación mínima negativa de 300 mV producida al aplicar la corriente de protección deberá medirse entre la superficie de la estructura y un electrodo de referencia.
- Una variación negativa de la polarización de 100 mV debe medirse entre la superficie de la estructura y un electrodo de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito.

Esta variación del voltaje de polarización se determina interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización. Inmediatamente después de interrumpir la corriente, se presenta una variación de voltaje y esta lectura de voltaje se usará como a partir de la cual se medirá el decaimiento de la polarización.

- Una tensión estructura-electrolito al menos tan negativa como aquella que originalmente se haya establecido al principio del segmento catódico.

PARA ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

- Una variación negativa de 150 mV debe producirse al aplicar la corriente de protección y medirse entre la superficie de la estructura y un electrodo de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Esta variación del voltaje de polarización se determina interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización. Al interrumpirse la corriente, se presenta una variación de voltaje. La lectura de voltaje inmediatamente después de producirse la variación será usada como lectura base a partir de la cual se medirá el decaimiento de la polarización.

Nota 1) No se aplicarán más de 1200 mV a menos que pruebas previas indiquen valores de corrosión apreciables en el medio ambiente particular.

Nota 2) Debe realizarse un cuidadoso estudio antes de aplicar la protección a las estructuras en Aluminio en ambientes con un pH natural mayor de 8.0.

PARA ESTRUCTURAS DE COBRE

- Debe medirse una variación negativa mínima de 100 mV entre la superficie de la estructura y un electrodo de cobre-sulfato de cobre saturado en contacto con el electrolito. Esta variación del voltaje de polarización se determina interrumpiendo la corriente de protección y midiendo el decaimiento de la polarización. Cuando la corriente se interrumpe se presenta una variación de voltaje. La lectura inmediatamente después de la variación se usará como lectura base a partir de la cual se medirá el decaimiento de la polarización.

Los electrodos de referencia saturados de cobre-sulfato de cobre son los más comúnmente usados, pero se pueden emplear de otros diversos materiales previendo que mantendrán un potencial estable y serán calibrados a -0.85 Volts, respecto al electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre.

Dos electrodos de referencia de uso común, con su tensión equivalente a -0.85 V referido al de cobre-sulfato de cobre son los siguientes:

- a) Electrodo de referencia de plata-cloruro de plata para uso en agua de mar con una tensión de -0.80 Volts.

- b) Electrodo de referencia saturado de KC/ Calomel, con tensión equivalente de -0.78 V.

Las mediciones de tensión entre las superficies de acero al carbón de una estructura y un electrodo de referencia indicando aceptación se dan en la tabla 6.7

POTENCIAL DE PROTECCIÓN PARA EL ACERO	
ELECTRODOS DE REFERENCIA	RANGOS DE TENSION
Cobre-sulfato de Cobre	-0.85 a -1.5 V
Plata-cloruro de Plata	-0.78 a -1.43 V
Zinc	0.25 a -0.4 V

TABLA 6.7

6.5 PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

El objetivo de las pruebas es demostrar que los sistemas de Protección Catódica implementados tienen la capacidad de proporcionar la corriente de protección necesaria para mitigar la corrosión de las superficies metálicas enterradas o expuestas en un medio electrolítico bajo las condiciones de operación.

Es muy importante de disponer en todo momento de documentos e información acerca del proyecto y de los fabricantes de los equipos y materiales.

6.5.1 EQUIPOS DE PRUEBA

El proveedor del servicio de Protección Catódica debe contar con el equipo siguiente:

- a) Probador de resistencia de aislamiento con rango de tensión de prueba de 500 a 2500 VCD.
- b) Voltmetro de alta impedancia de CD de 100 k Ω /V y rangos de escala de: 0.1, 0.2, 1.2, 10 y 20 V ó de 200 k Ω /V y rangos de 20 a 500 mV y de 1 a 5 V.
- c) Ampérmetro de CD.
- d) Electrodo de referencia de cobre-sulfato de cobre, plata-cloruro de plata y zinc portátiles con cable de longitud mínima de 15 metros y diámetro máximo de 5 cm..

6.5.2 INSTRUCCIONES DE PRUEBA

Antes de iniciar las pruebas se requiere que la instalación de los sistemas de Protección Catódica haya quedado concluida y de acuerdo a los diseños de construcción y todos los instrumentos de medición hayan sido calibrados y asegurarse de que todas las conexiones estén correctas.

Se debe verificar lo siguiente:

PARA TUBERÍAS ENTERRADAS Y TANQUES DE ALMACENAMIENTO

- Todos los ánodos y electrodos de referencia, las estaciones de prueba, cajas de conexiones y estaciones de potencial se encuentren instaladas de acuerdo con los planos realizados.
- Las bridas aisladas se encuentren correctamente identificadas y físicamente aisladas.
- Que no exista ningún tipo de herramienta o elemento metálico o de cualquier otro metal entre los ánodos.

EN CAJAS DE AGUA DE CONDENSADORES

- Los ánodos y electrodos de referencia, se encuentren instalados en las cajas del condensador, incluyendo los cables que alimentan a los mismos.
- La existencia de los retornos: son cables unipolares por caja localizados y conectados al cuerpo del mismo uno, servirá como retorno de la corriente al negativo y otro de retorno para la medición de polarización. La localización de cada una de estos retornos es diferente, no deben aceptarse que sea el mismo punto (deben estar aún mínimo de 0.5 m de distancia entre ellos).

PARA LOS RECTIFICADORES DE CORRIENTE IMPRESA

- Que no exista ningún elemento extraño en el interior de los rectificadores que pongan las partes vivas a tierra.
- Los cables de alimentación de C.A., así como los cables de retorno al rectificador se encuentren instalados correctamente identificados y etiquetados.
- La conexión al sistema de tierras del tablero del rectificador se encuentre realizada.



CAPÍTULO VII

DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

7.1 INFORMACIÓN NECESARIA PARA EL DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA

Para diseñar un sistema de protección catódica, se requieren conocer ciertas características de la estructura a proteger y del medio.

Se necesitan conocer en principio el tipo de material de las estructuras, así como el tipo de recubrimiento que tienen y las dimensiones de la estructura. Si es un equipo ya instalado necesitamos saber también el año.

Para llevar a cabo un buen diseño, se tiene que investigar si existen posibles fuentes de interferencia, tales como corrientes vagabundas creadas por fuentes de corriente continua, estructuras metálicas cercanas, e incluso otros sistemas de protección catódica que puedan interferir en el diseño.

Debemos conocer el espacio físico que disponemos, dependiendo del sistema seleccionado para la protección catódica, esto con la finalidad de distribuir lo mejor posible los ánodos. Y prever de donde se puede alimentar el rectificador en caso de proteger por medio de corriente impresa.

Una vez obtenida la información anterior, se complementara con mediciones realizadas en campo tales como:

- Resistividad del suelo.
- Potencial electroquímico natural
- Corriente necesaria de protección
- Corriente de diseño

7.1.1 RESISTIVIDAD DEL SUELO

La resistividad es la recíproca de la conductividad o la capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, su valor variará de acuerdo al tipo de suelo, sales solubles en los estratos y contenido de humedad del mismo.

La medición se efectúa por el método de los cuatro electrodos o método de Wenner, nombrado así en honor a su inventor Frank-Wenner. En la figura 7.1 se muestra el espaciamiento de los electrodos, los cuales suelen ser varillas de cobre enterradas a una

profundidad (B), que tiene que ser mucho menor a la separación entre electrodos (A), recomendándose una relación:

$$B \leq 0.1 A$$

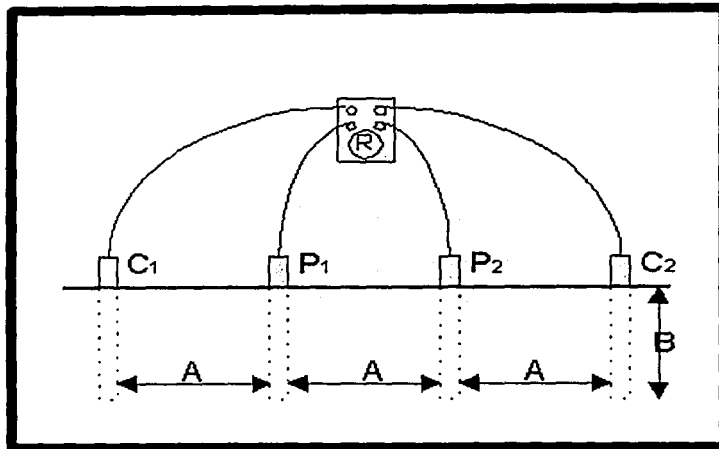


FIG. 7.1 MÉTODO DE LOS 4 ELECTRODOS

A = distancia entre electrodos en cm.

B = profundidad de enterramiento del electrodo en cm.

R = lectura del Vibro-Ground en ohms

Los electrodos de los extremos C1 y C2, se conectan a los bornes de corriente y los electrodos P1 y P2, se conectan a las terminales de potencial del Vibro-Ground. La lectura que se obtiene corresponde a la resistencia, la cual es empleada para calcular la resistividad de acuerdo a la siguiente formula:

$$\rho = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}} \quad \text{ohms-cm}$$

Si le damos una distancia mucho mayor a la separación entre electrodos, que a la profundidad de enterramiento de estos, es decir si $A \gg B$, entonces la formula de la resistividad será:

$$\rho = 2 \pi A R \text{ ohms-cm}$$

Si se encuentra una estructura metálica instalada, donde se realizarán las mediciones de resistividad, los electrodos se alinearán de forma perpendicular a la estructura, para evitar interferencia en las lecturas que se tomen de resistencia.

7.1.2 POTENCIAL ELECTROQUÍMICO NATURAL

Existe una diferencia de potencial entre una estructura metálica, al estar en contacto con el electrolito en que se encuentre, como vimos en el capítulo 3, el metal tiende a disolverse, con lo que queda cargado negativamente y el electrolito deposita iones sobre el metal.

Esta diferencia de potencial no se puede medir de manera absoluta, por lo que se hace de manera relativa, por medio de un electrodo de referencia. Para medir el potencial se necesita de un voltímetro, cuyo borne positivo se conecta a la estructura y el negativo se conecta al electrodo, como lo muestra la figura 7.2,

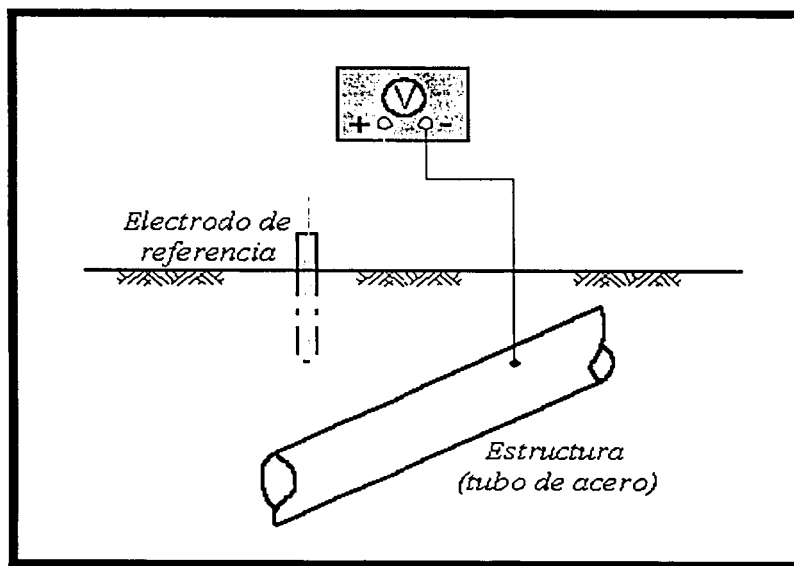


FIG. 7.2 MEDIDA DEL POTENCIAL NATURAL DE UNA ESTRUCTURA

Los electrodos de referencia que se emplean para medir el potencial pueden ser de diferente composición química, entre los que se encuentran:

- Electrodo de Zinc (Zn).
- Electrodo de Cobre / sulfato de Cobre (Cu/CuSO_4).
- Electrodo de Plata / cloruro de Plata (Ag/AgCl).
- Electrodo de Mercurio / sulfato de Mercurio ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{SO}_4$).
- Electrodo de calomelanos ($\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$).

El electrodo de referencia mas usado para medir el potencial electroquímico de una estructura enterrada en suelo, es el electrodo de Cu/CuSO_4 , la figura 7.3 ilustra a este electrodo.

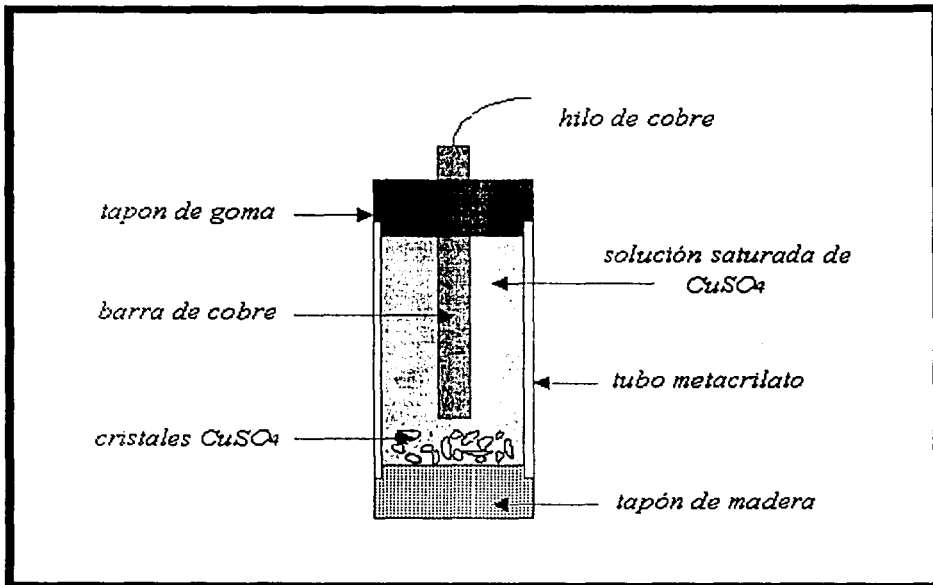


FIG. 7.3 ESQUEMA DE UN ELECTRODO DE REFERENCIA DE Cu/CuSO_4

7.1.2 CORRIENTE NECESARIA DE PROTECCIÓN

Es la corriente que se necesita para alcanzar la protección catódica, de tal forma que se elimine la corrosión de una estructura, en función de su estado superficial, que puede estar, o no, con algún recubrimiento pasivo.

La corriente necesaria para proteger una estructura depende de factores como el medio donde se encuentra (enterrada, sumergida, al intemperie, etc.), si tiene o no recubrimiento y el tiempo que deberá suministrarse. Desde luego que una estructura que posea una capa protectora y un buen mantenimiento hará que se prolongue en buenas condiciones por muchos años, además de suministrar la corriente de protección por más tiempo.

Para encontrar la corriente de protección, es necesario de una prueba de campo donde se colocará temporalmente un equipo de medición y una fuente de potencial que suministre valores de protección catódica tal como se explica a continuación.

La corriente se deberá suministrar de manera creciente por medio de una fuente de C.D. por una resistencia variable a intervalos de 50 mA, manteniendo esta corriente por 2 minutos como mínimo, posteriormente al interrumpir dicha corriente se tomarán lecturas del potencial.

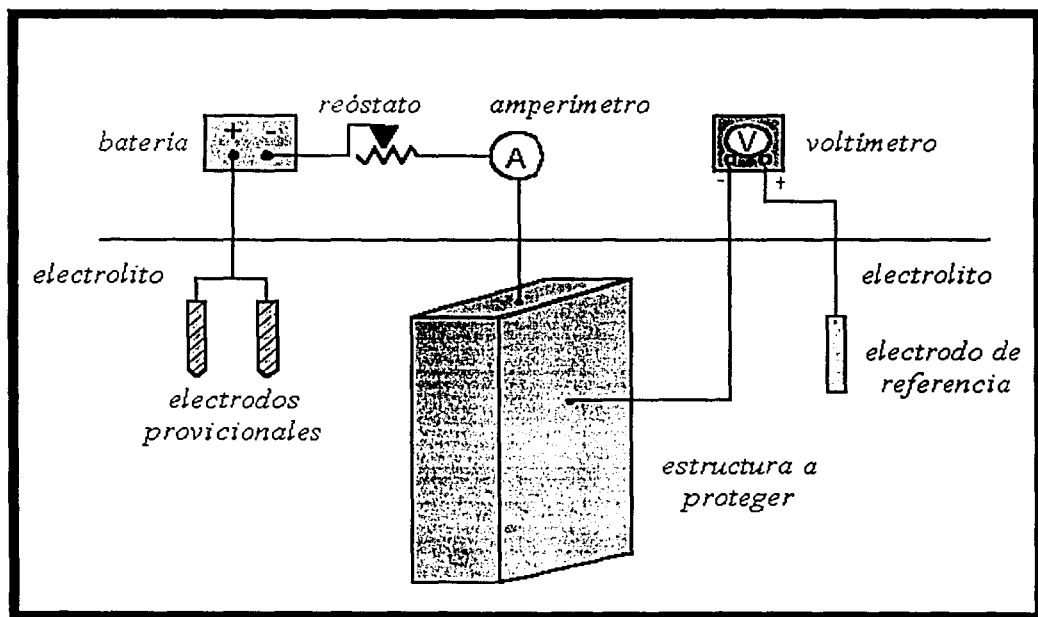


FIG. 7.4 CONEXIÓN PARA ENCONTRAR LA CORRIENTE DE PROTECCIÓN

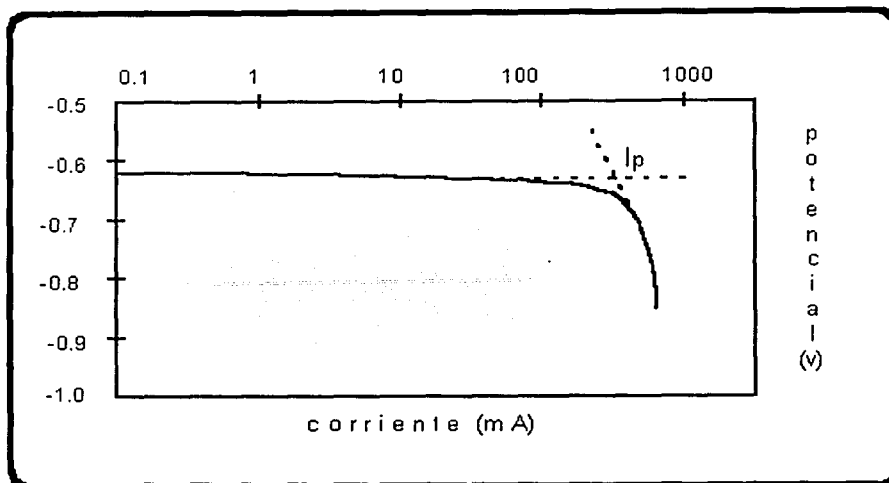


FIG. 7.5 CURVA DE POLARIZACIÓN CATÓDICA

Las lecturas se registran para posteriormente graficarlas mediante el logaritmo de la corriente suministrada contra el potencial alcanzado así como el potencial que se obtuvo al interrumpir la corriente, este método es conocido como curvas de polarización catódica o "Curvas de Tafel", la figura 7.5 muestra un ejemplo de como quedaría la gráfica.

Una vez obtenida la gráfica del log. corriente Vs potencial, quedará prácticamente una recta horizontal y una recta vertical inclinada, de estas dos rectas se obtiene la extrapolación, y en el punto de intersección determinará la corriente de protección (I_p).

Cabe mencionar que el potencial que se ocupa para obtener la corriente de protección, es el potencial que se obtiene una vez que se ha interrumpido la corriente.

Basándose en investigaciones y experiencias acumuladas a lo largo de los años, en que se ha utilizado la protección catódica por medio de ánodos de sacrificio, se han creado tablas, que contienen la densidad de corriente aproximada, requeridas para lograr el potencial de protección de estructuras de acero en distintos medios, como ejemplo en la tabla 7.1, se muestran algunos.

CAPÍTULO 7
"DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA"

DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCIÓN APROXIMADA		
ESTADO SUPERFICIAL	MEDIO AGRESIVO	DENSIDAD DE CORRIENTE mA/m ²
Acero desnudo	Agua de mar	80 a 200
	Agua estancada	56
	Suelo neutro	5 a 17
	Suelo húmedo	28 a 66
Acero pintado	Agua de mar	35 a 50
	Suelo normal	0.1 a 0.2
	Suelo ácido	30 a 60
Acero bien revestido	Agua de mar	25 a 35
	Suelo normal	0.01
	Suelo ácido	40-60

TABLA 7.1

7.1.4 CORRIENTE DE DISEÑO

Para evitar que se presente cualquier problema por mínimo que sea de corrosión, en la estructura que se piensa proteger, para obtenerse un buen diseño de protección catódica, a la corriente de protección que se ha obtenido, se le da un margen de seguridad del 15%, por lo que la corriente que se utilizará para hacer el diseño de la protección catódica por cualquiera de los dos métodos conocidos será:

$$I_d = 1.15 (I_p)$$

7.2 CÁLCULO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON ÁNODOS DE SACRIFICIO PARA DEPÓSITOS Y TUBERÍAS ENTERRADAS

El cálculo de protección catódica para cualquier estructura enterrada en esencia el mismo, sin embargo la distribución de los ánodos variará dependiendo del tamaño o longitud de la estructura.

Para empezar el cálculo de la protección catódica de estructuras enterradas, se necesita conocer como ya se indicó anteriormente, las características del medio así como la corriente de diseño que se aplicará. Con estos datos se procede a realizar el cálculo, según la siguiente secuencia.

a) Requerimiento de Corriente

Como se explicó anteriormente la corriente de protección se puede obtener en campo, o recurriendo a tablas que nos den la corriente necesaria aproximada, en tal caso se calcula de la siguiente forma:

$$I = Dc \times A$$

donde:

Dc = densidad de corriente en mA/cm²

A = área de la estructura a proteger en cm²

I = corriente suministrada en mA

b) Calculo de la resistencia del ánodo

$$R = \frac{\rho}{2 \pi L} \left(2.3 \text{Log} \left(\frac{4L}{r} \right) - 1 \right)$$

R = Resistencia del ánodo en ohms.

L = Longitud en centímetros

ρ = Resistividad en ohms-cm

r = Radio de un cilindro de igual superficie transversal que el ánodo, cuando se haya consumido 40 %

cuando se usa mas de un ánodo tendremos:

$$R = \frac{0.00521P}{NL} (2.3\log(8L/d) - 1 + (2L/S)*2.3\log0.656N)$$

Donde:

R: es la resistencia a tierra en ohms del grupo de ánodos

P: es la resistividad del suelo en ohm-cm

N: es el número de ánodos en paralelo

L: longitud del ánodo en pies

d: diámetro del ánodo en pies

S: espaciamiento entre ánodos en pies

c) Corriente drenada por ánodo

La corriente que drene cada ánodo estará en función de su masa, forma geométrica, potencial natural y de la resistividad del terreno, así como también dependerá del tipo de ánodo utilizado, podemos calcular la corriente drenada por ánodo.

$$I = V / R$$

Donde:

I: es la corriente drenada en Amperes

V: es la diferencia de potencial entre el potencial de disolución del metal anódico en el medio agresivo y el potencial de protección con respecto al electrodo de referencia

R: es la resistividad total del sistema en ohms

d) Número de ánodos

El número de ánodos por requerirse se obtiene de la división de la corriente necesaria entre la corriente teórica que suministraría cada ánodo.

$$N = \frac{I_{NECESARIA}}{I_{ANODO}}$$

e) **Tiempo de Vida esperado (TVE)**

El tiempo de vida esperado (dado en años) de los ánodos está en función del drenaje de corriente teórico, la eficiencia, cuyo valor es de 50% para ánodos de magnesio; el factor de utilización que se considera es del 85% y de la masa del ánodo. La vida del ánodo se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$TVE = \frac{IC \times W \times R \times F}{I_p}$$

Donde:

IC= capacidad de corriente del ánodo en A-año/kg

W = peso de los ánodos en kg

R = rendimiento porcentual en %

F = factor de utilización en %

I_p = corriente de necesaria de protección en Amperes

Cuando se protege a depósitos de gran tamaño que ya están en servicio, con ánodos de sacrificio, un problema que se presenta es la dificultad para dar una distribución apropiada de los ánodos, dado que estos tienen que estar a una misma distancia entre ellos y la estructura, encontrando resistividad que variable dependiendo de la profundidad de colocación.

Para obtener el potencial de protección, en este caso para mejores resultados, se recomienda obtener la corriente de protección mediante la inyección de corriente a la estructura, en campo.

Cuando se terminen de hacer los cálculos requeridos para el sistema de protección catódica, se procede a su instalación. X

Requiriendo de dispositivos adicionales a los ánodos, el sistema de protección catódica de tanques de almacenamiento y de tuberías enterradas por ánodos de sacrificio consta de los materiales y equipos que a continuación se mencionan, así como los accesorios, dispositivos y servicios que integran el suministro del sistema.

ÁNODOS DE SACRIFICIO

Deben ser de aleaciones variables de Magnesio, Zinc o Aluminio.

CAJAS DE ALIMENTACIÓN

Es una caja metálica, que contiene tablillas terminales para conectar las terminales de los ánodos, y los cables que van a la estructura.

CONDUCTORES DE ÁNODOS Y DEL ELECTRODO DE REFERENCIA

Cable de cobre flexible, monopolar de 7 hilos mínimo con aislamiento de polietileno de alto peso molecular, sección transversal de 8.367 mm² como mínimo para electrodos de referencia.

Alambre de cobre con aislamiento de polietileno de alto peso molecular calibre mínimo 12 AWG, para ánodos de sacrificio.

CAJAS DE CONEXIONES DE ÁNODOS

Es un contenedor hermético de material plástico o de fibra de vidrio para uso rudo, resistente a la intemperie para montaje en poste o estructura metálica, con puerta al frente con las mismas dimensiones de la caja, con chapa, con abatimiento lateral. Se debe contar con perforaciones en la parte inferior de los tubos conduit galvanizados de un diámetro máximo de 0.10 m. En su interior deben contar con tablillas con desconectador integrado, por un lado se conecta el cable multiconductor y por el otro se conectan los cables individuales de ánodos y electrodos de referencia.

En el interior de la caja se debe de alojar resistencias derivadas de valor 0.001 Ω , (50 V, 50 A, +- 1% de precisión), para medición directa de corriente por ánodo.

Debe contar con un amperímetro digital con escala de 0 a 5 A, +-1% de precisión, combinado con un selector rotativo, numerado del 1 al número de ánodos conectados a las tablillas y posición de desconectado para medir en forma directa la corriente drenada por ánodo.

El amperímetro debe contar con una protección por medio de fusible adecuado. Todos los dispositivos alojados dentro de la caja de conexiones deben ser montados sobre una placa aislante, tanto los instrumentos como los otros dispositivos deben quedar inaccesibles al cerrar la caja.

ELECTRODOS DE REFERENCIA FIJOS

Los electrodos de referencia fijos pueden ser de zinc de alta pureza, con un contenido máximo de hierro de 0.0014%, o de Cobre sulfato de Cobre, de forma cilíndrica, conectados y encapsulados a un conductor de características descritas anteriormente, soldados con plata. Una vez realizada la conexión, se debe aislar con un recubrimiento epóxico 100% sólido. Tanto el electrodo como 0.10 m de cable conductor deben forrarse por medio de una manga termocontráctil de tal manera que solamente quede expuesta la sección transversal del electrodo.

ESTACIÓN DE POTENCIAL

Es donde se coloca el electrodo de referencia permanentemente, se realiza por medio de concreto tipo caja, rellena de tierra limpia cuya tapa se encuentra al nivel del suelo.

ESTACIÓN DE PRUEBAS

Es una caja metálica que sirve de conexión entre la estructura y los electrodos de referencia, que nos permite supervisar el potencial de protección constantemente, se ubica por encima del suelo para la comodidad de la medición.

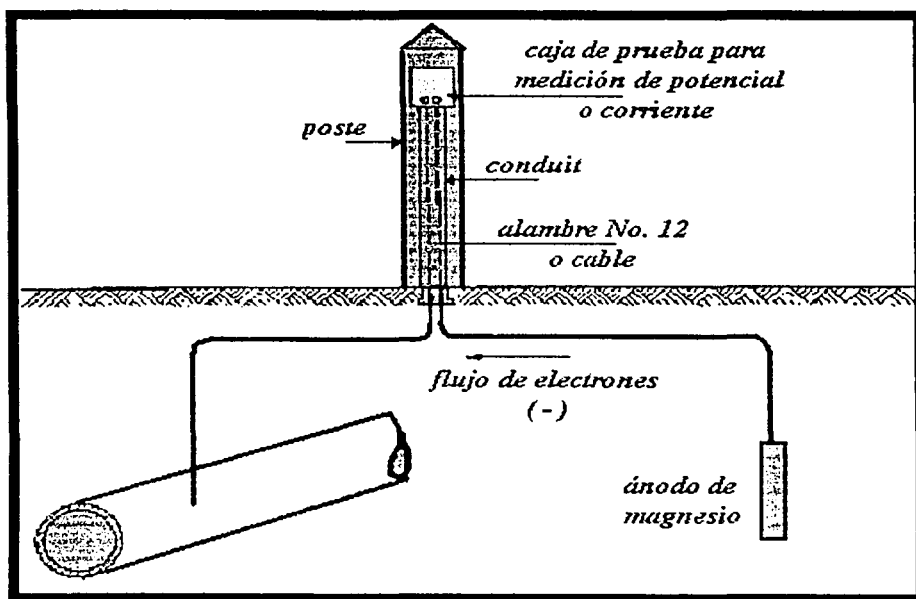


FIG. 7.6 CAJAS DE PRUEBA PARA MEDICIÓN

CAJA DE DERIVACIONES DEL ÁNODO

Es una caja metálica, que contiene tablillas terminales para conectar las terminales de los ánodos, y los cables que van a la estructura.

CABLES

Debido a que los cables van enterrados, estos deben ser apropiados para este medio, resistiendo la transmisión de humedad, y ser adecuado para transmisión de corriente directa, se recomienda el cable de cobre con aislamiento de polietileno de alto peso molecular.

El equipo y las estructuras que deben protegerse catódicamente en una Central generadora son:

- Las bases de los tanques que estén instalados directamente sobre tierra
- Tuberías que estén directamente enterradas
- Todas las estructuras que estén relacionados con ellos.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO	
Porcentaje de área desnuda a considerar	100 %
Resistencia eléctrica en la interconexión de superficies metálicas a proteger	0.05 Ω máximo
Resistencia eléctrica entre electrodo de referencia, ánodo contra cátodo general	2 Ω mínimo
Densidad de corriente de diseño	para acero desnudo
Vida útil del sistema	30 años

TABLA 7.2

Considerar la corriente para polarizar la estructura y para alimentar de acuerdo con la conductividad del agua.

En la figura 7.7 se esquematiza un sistema típico de protección catódica con ánodos de sacrificio, para proteger dos depósitos, uno de ellos totalmente enterrado y el otro puesto sobre el suelo.

De la figura 7.7 tenemos

- P : Estación de potencial
- T : Estación de pruebas
- J : Caja de derivaciones del ánodo
- A : Anodos
- ER : Electrodo de referencia

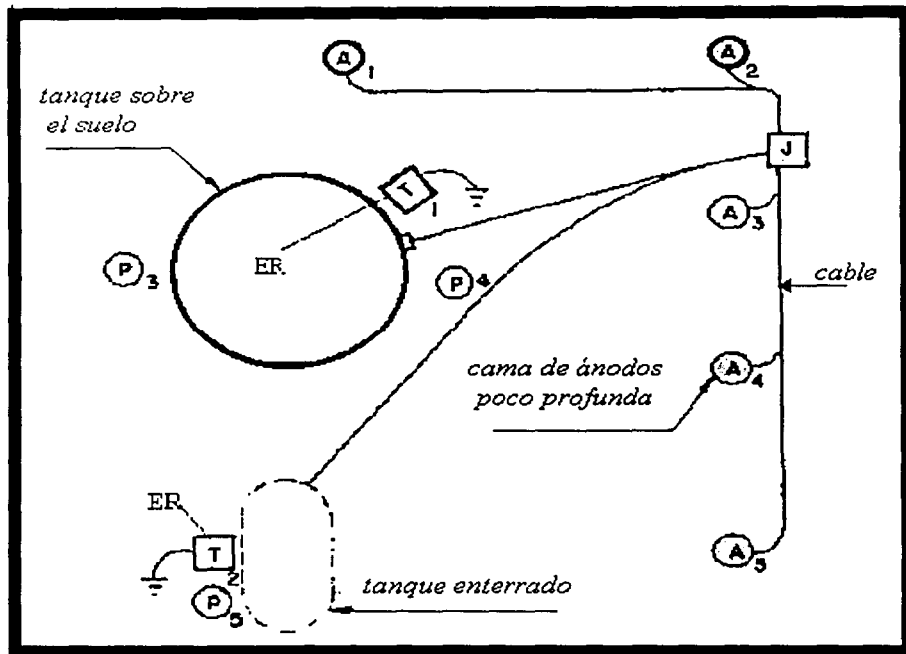


FIG. 7.7 SISTEMA TÍPICO DE PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica a tuberías enterradas con ánodos de sacrificio se emplea acompañada de recubrimientos anticorrosivos, suele emplearse en tuberías no muy extensas, también suele usarse como complemento a la protección catódica mediante corriente impresa, esto debido a que en muchos casos la extensión de la tubería es muy grande y hay puntos donde no se puede alimentar al rectificador.

7.3 CÁLCULO DE UN SISTEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA PARA ESTRUCTURAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.

La protección catódica a las estructuras de las líneas de transmisión normalmente se realiza con ánodos de sacrificio, debido a que no suele ser muy económico transformar altos voltajes, a los requeridos por un rectificador de 125V o 220V, para este caso de protección catódica mediante corriente impresa, se alimentará al rectificador mediante una batería que será recargada por medio de celdas fotovoltaicas.

De igual forma que con ánodos de sacrificio, los datos que se requieren para empezar el cálculo de protección catódica mediante corriente impresa, son las características del medio, procediéndose con la secuencia de cálculo siguiente:

a) Resistencia Total del Circuito (R_t)

Esta resistencia es la que hay entre los ánodos y la estructura a tierra así como la del cable que se utiliza para hacer la conexión. La resistencia total se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$R_t = R_e + R_a + R_c$$

Donde: R_e = resistencia de contacto entre la estructura y el suelo
 R_a = resistencia de contacto entre ánodo c/s relleno y el suelo
 R_c = resistencia de los conductores

El cálculo de las resistencias es el siguiente:

$$R_e = \frac{E_n - E_p}{I_p}$$

donde: E_n es el potencial natural de la estructura
 E_p es el potencial de protección respecto a un electrodo de referencia
 I_p corriente necesaria de protección

Rc se calcula de acuerdo al calibre del conductor y conociendo su longitud se busca el valor de la resistencia en tablas.

Ra se calcula con la siguiente formula:

$$R_a = \frac{\rho}{2 \pi L} \operatorname{Ln} \left(\frac{4L}{re} \right)$$

L = Longitud en centímetros de ánodo con relleno
ρ = Resistividad en ohms-cm
r = radio en centímetros del relleno
e = 2.718

en el caso de que se necesite más de un ánodo, la resistencia se puede calcular con la siguiente formula:

$$R_a = \frac{\rho}{n \pi} \left[\frac{1}{2L} \operatorname{Ln} \frac{4L}{er} + \frac{1}{d} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right) \right]$$

donde:

n es el número de ánodos enterrados verticalmente

d es la distancia entre ánodos

para simplificar el cálculo existen tablas y nomogramas, como el que se muestra en la figura 7.8, este nomograma esta basado en ánodos de 5 cm de radio por 152.4 cm de largo, con relleno de polvo de coque de 50 Ω-cm de resistividad.

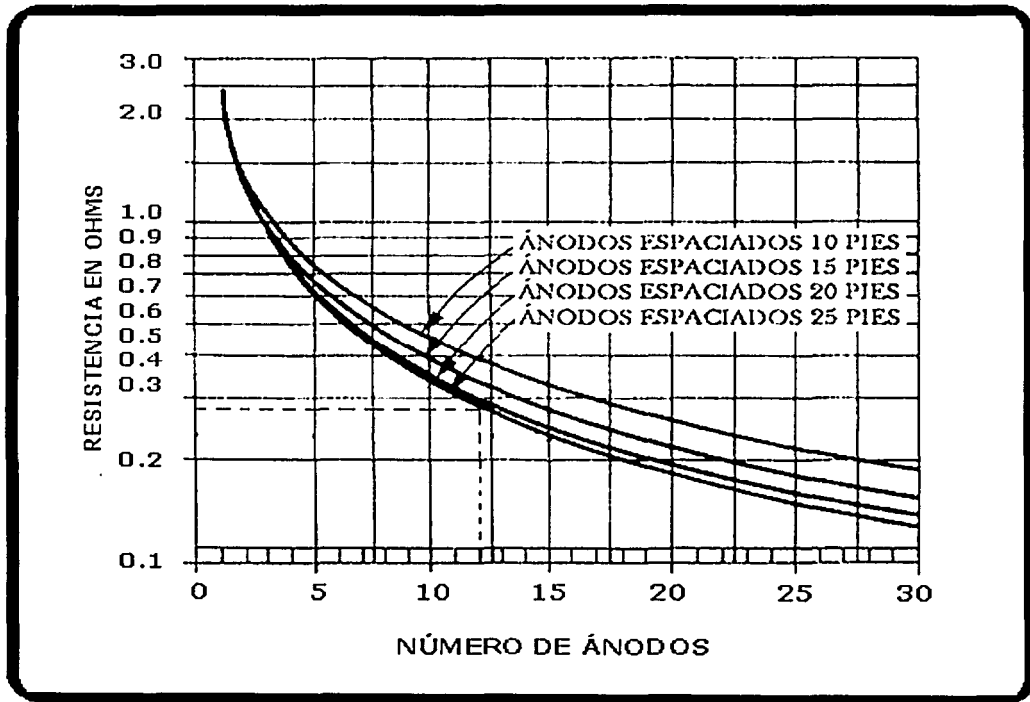


FIG. 7.8 NOMOGRAMA PARA LECHOS ANÓDICOS VERTICALES CON RESISTIVIDAD DE SUELO DE 1000 Ω-CM

Ejemplo: para obtener la resistencia de 12 ánodos en paralelo espaciados 25 pies en un suelo de 2,500 Ω-cm.

Del nomograma vemos que la resistencia de los ánodos en paralelo en un suelo de 1,000 Ω-cm es de 0.285Ω.

La resistencia en el suelo de 2,500 Ω-cm, se calculara de la siguiente manera:

$$Ra' = 0.285 \times 2500 / 1\ 000 = 0.7125 \Omega.$$

Añadir la resistencia interna de un ánodo dividida por el número de ánodos en paralelo:

$$R_a = 0.7125 + \frac{0.160}{12} = 0.726 \Omega$$

b) Potencial Aplicado (Ea)

Es la diferencia de potencial necesaria entre los ánodos y la estructura, se calcula basándose en la resistencia total del circuito y la corriente de protección de diseño.

$$E_a = R_t \times I_d$$

Donde:

Ea dado en Volts

Rt es la resistencia total del circuito en ohms

Id es la corriente diseño en Amperes

7.4 PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN EN CABLES TIPO TUBO DE 85 KV Y 230 KV

Como se mencionó en el capítulo 4, los cables tipo tubo requieren de una tubería de acero hermética que contendrá el gas o aceite a presión para evitar los efectos de la ionización, y se encontrará en una trinchera enterrada por capas de arena térmica y sometida a las diversas condiciones del subsuelo por donde se extiende.

Aunque la tubería contiene una cubierta de material anticorrosivo (Polietileno), se tiene que mantener protegida con protección catódica adicional, de -2 V de CD. Dado que esta puede sufrir daños durante la instalación, o por el deterioro del tiempo. En la figura 7.9 se ve la instalación de dos tuberías para dos circuitos.

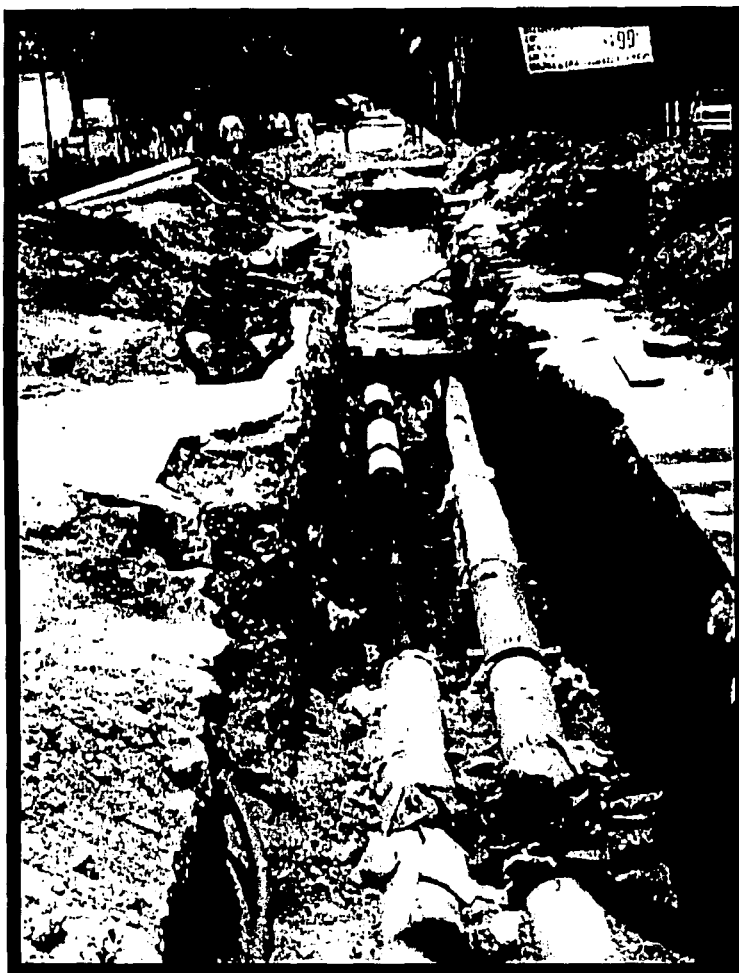


FIG. 7.9 CABLES TIPO TUBO

Existen reglamentos para no desproteger elementos al tratar de proteger otros, como ejemplo, en el cruce de tuberías de PEMEX con tuberías de cables subterráneos de LyFC. Con los cuales es necesario que no afecte el gas o gasolina de las tuberías por lo que el potencial de protección es de -4 volts de C.D. para PEMEX y -2 volts de C.D. para LyFC.

También en los cruces de tuberías por reglamento LyFC pide 1 m de radio como mínimo de separación, independientemente de su ubicación.

CAPÍTULO 7
"DISEÑO DE SISTEMAS DE PROTECCIÓN CATÓDICA"

Debido a las grandes distancias que alcanza el cable tipo tubo, se hace necesario aplicar la protección por corriente impresa.

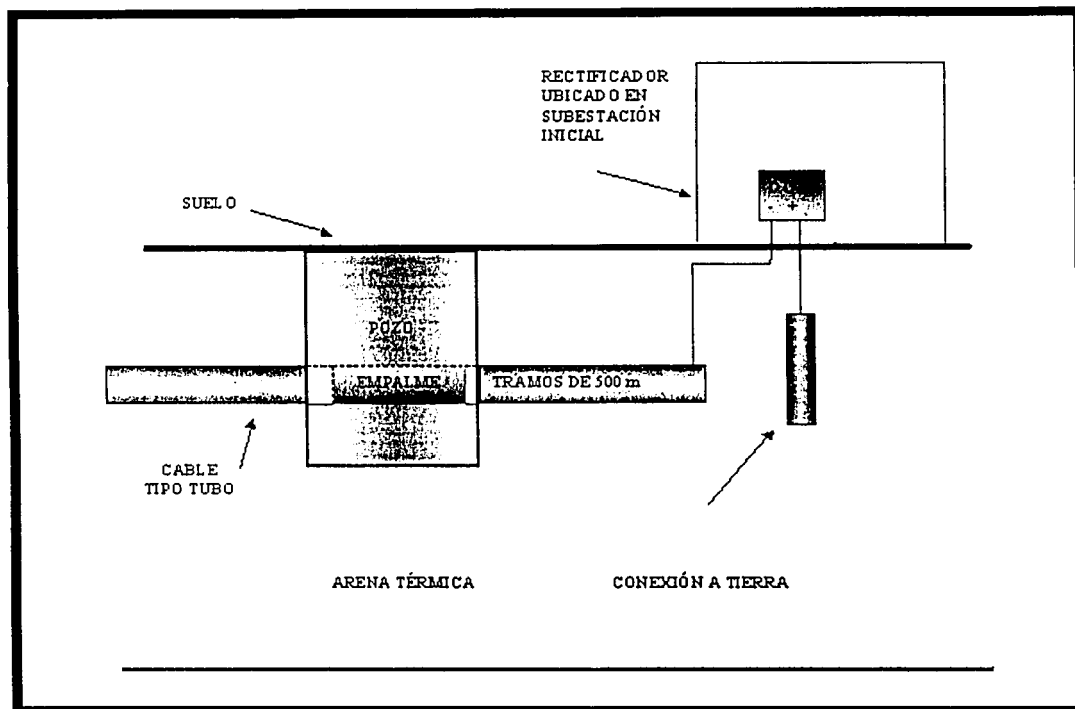


FIG. 7.10 ESQUEMA DE PROTECCIÓN CATÓDICA CON CORRIENTE IMPRESA

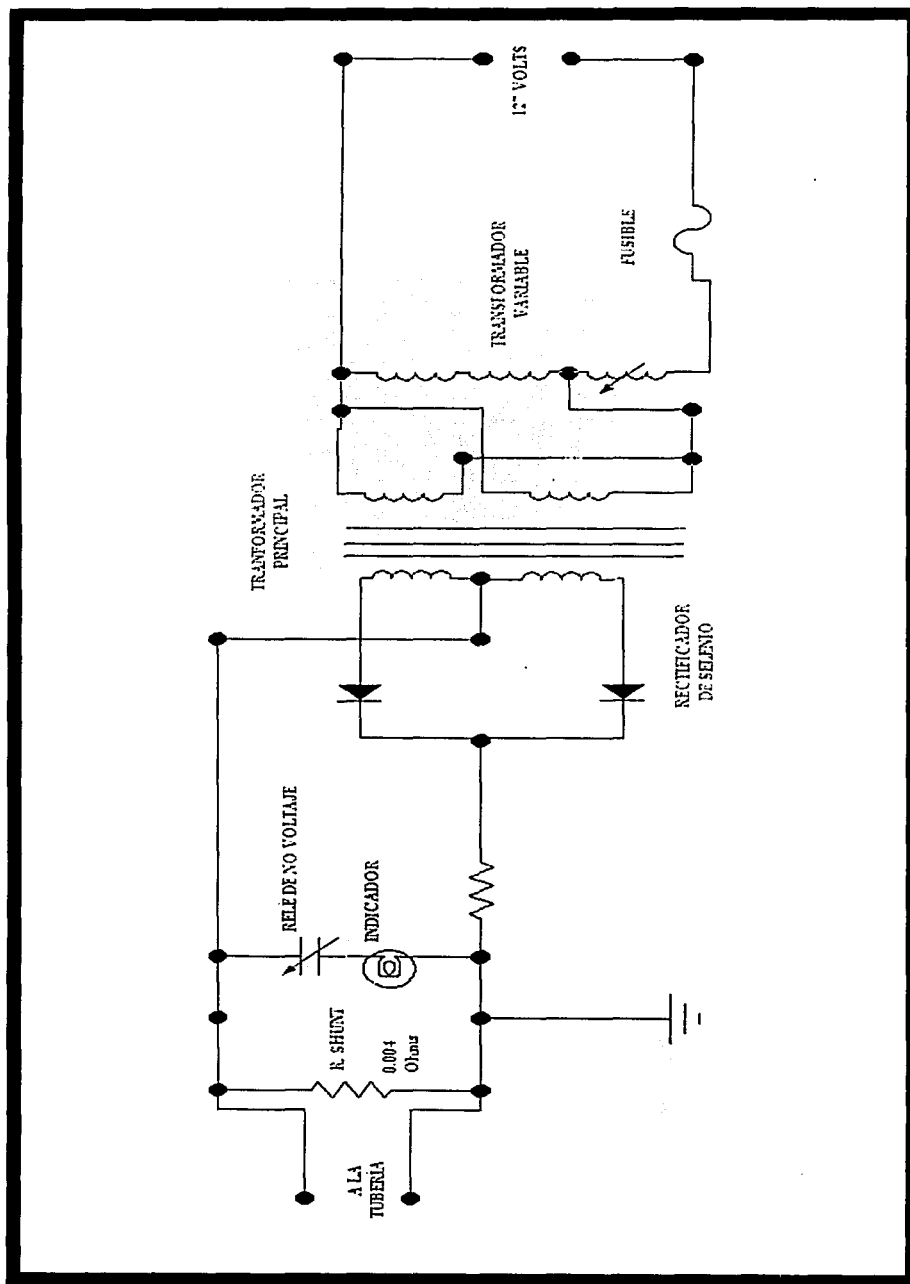


FIG. 7.11 DIAGRAMA DEL CIRCUITO RECTIFICADOR

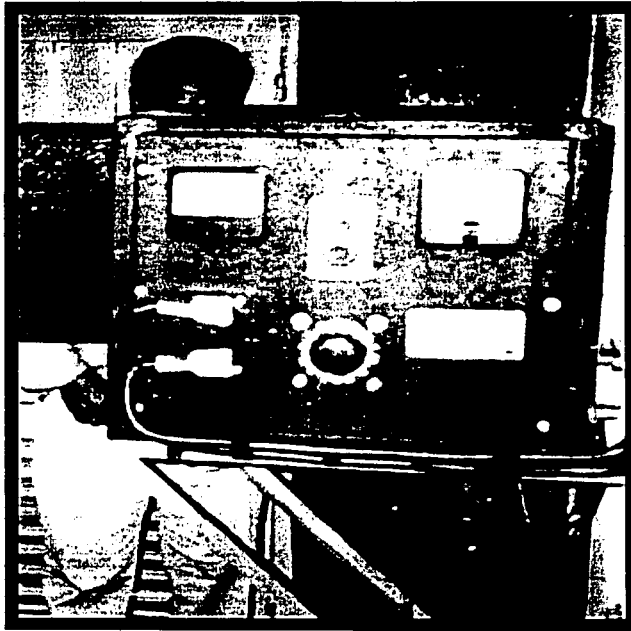


FIG. 7.12 RECTIFICADOR EMPLEADO POR LUZ Y FUERZA DEL CENTRO
CARACTERÍSTICAS DEL RECTIFICADOR

- ALIMENTACIÓN: 127 VAC 60 Hz
- TRANSFORMADOR PRINCIPAL: VARIABLE DE 1 kVA
- RECTIFICADOR: SELENIO
0 a 25 VDC, 200 A
- RESISTENCIA SERIE: VARIABLE
200 Amperes
- RESISTENCIA SHUNT: 0.004 Ω de acero
- VOLTAJE DE PROTECCIÓN: -2 V DC

El potencial de protección tomara valores menos negativos conforme vaya aumentando la distancia en la tubería, respecto del punto de conexión del rectificador, de acuerdo a la siguiente formula:

$$E_x = E_A \exp(-\alpha x)$$

en donde:

E_x = potencial tubería/suelo en un punto separado x km del punto de inyección de la corriente

E_A : potencial en el punto de inyección

a : factor de atenuación del potencial

x : distancia en km.

El factor de atenuación (α) es función particular de la tubería considerada y viene dado por:

$$\alpha = \sqrt{R_s x g}$$

en donde:

R_s = resistencia óhmica longitudinal de la tubería, en Ω /por unidad de longitud,

g = conductancia del revestimiento, en Ω^{-1} /por unidad de longitud,

Para lograr que toda la tubería este protegida, normalmente hay dos o más puntos de inyección de corriente, en la figura 7.13 se muestra el caso de dos puntos de conexión de corriente. Cuyo potencial se calcula de acuerdo a la siguiente formula:

$$E_A = E_m \cosh \alpha d$$

E_m = potencial en el punto medio entre los dos drenajes

d = mitad de la distancia entre los dos puntos de drenaje.

El potencial en el punto medio debe ser el necesario, para que la tubería quede protegida catódicamente, es decir el potencial en este punto no debe sobrepasar los -0.85 V, respecto al electro de Cu/CuSO_4 .

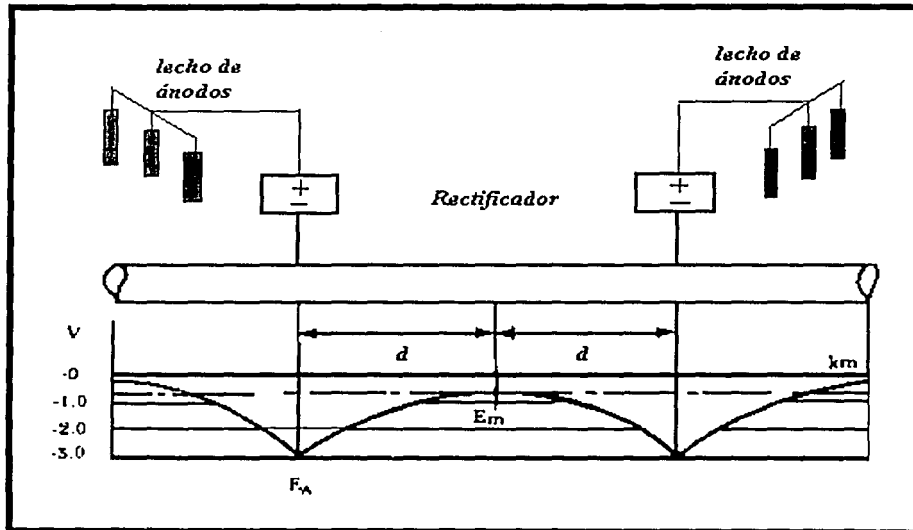


FIG. 7.13 CURVA DE ATENUACIÓN DEL POTENCIAL



CAPÍTULO VIII

APLICACIÓN DE
LOCALIZACIÓN DE
FALLAS Y PROTECCIÓN
CATÓDICA

El uso de la protección catódica en equipos eléctricos subterráneos hasta ahora no se había implementado, con la realización de este trabajo encontramos una magnífica oportunidad para extenderlo a un gran campo de aplicación.

La sugerencia en proteger catódicamente a transformadores subterráneos con ánodos de sacrificio resulta de la cantidad de equipos dañados que se tienen que rehabilitar, así que con el apoyo de la Compañía de Luz y Fuerza nos propusimos en realizar una aplicación práctica experimental.

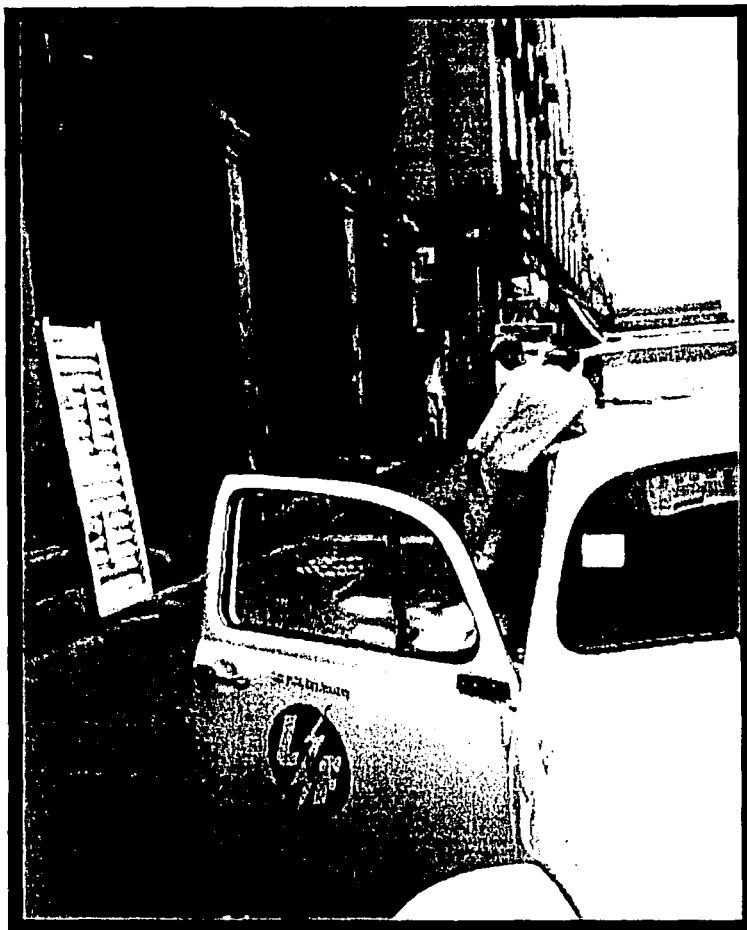
8.1 PROTECCIÓN CATÓDICA PARA UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN TIPO POZO DE COMPAÑÍA DE LUZ Y FUERZA.

Como ya se ha explicado, el problema que causa la corrosión a los equipos de la red subterránea es casi inevitable, aunque se les recubra con pinturas para agua, el estado en que permanecen la mayor parte del tiempo hace que se oxiden y se deterioren en menores lapsos de tiempo.

La bóveda facilitada por Compañía de Luz y Fuerza, es la que se localiza en la esquina que forman las calles de Correo Mayor y República de Uruguay en el Centro Histórico de la Ciudad de México:



a)



b)

FIG 8.1 a) y b) LOCALIZACIÓN DE LA BÓVEDA

En la inspección visual realizada, nos pudimos percatar que una bóveda (pozo) puede ser fácilmente convertida en un estanque de aguas casi negras cuando se inunda y en un gran basurero cuando se desagua, aún así se mantiene un nivel mínimo de agua que se vuelve casi permanente. En la figura 8.3 vemos un corte lateral de la bóveda donde se aloja el transformador.

CAPÍTULO 8
"APLICACIÓN DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA"



a)



b)

FIG. 8.2 a) y b) INSPECCIÓN VISUAL DEL SITIO

CAPÍTULO 8
 "APLICACIÓN DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA"

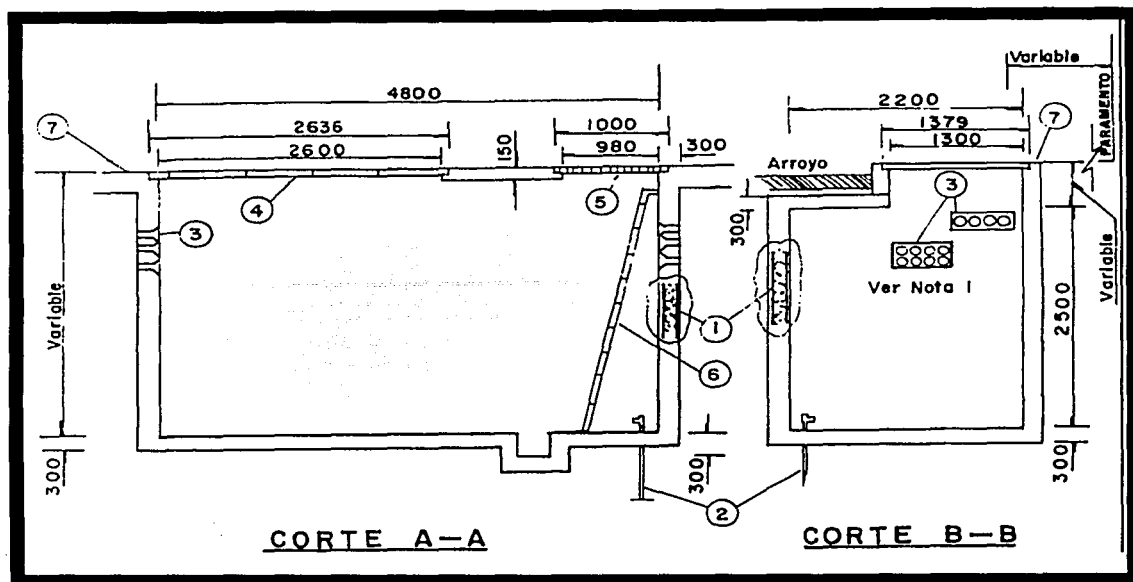


FIG. 8 .3 BÓVEDA Ó POZO

1	TRANSFORMADOR POZO 750 kVA
2	Protector sumergible red
3	Soporte de bus cubierto 6, 8.8
4	Bus cubierto 8.8
5	Cable BTC 1 X 250
6	Cable BTC 1 X 150
7	Zapata, funda, abrazadera
8	Cable BTP 6 X 150
9	Cable 23 PT 1 X 35
10	Aislantes y terminal auxiliar
11	Cable Cud (Cobre desnudo) 250
12	Cable Cud 1/0

TABLA 8.1

CAPÍTULO 8
 "APLICACIÓN DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS Y PROTECCIÓN CATÓDICA"

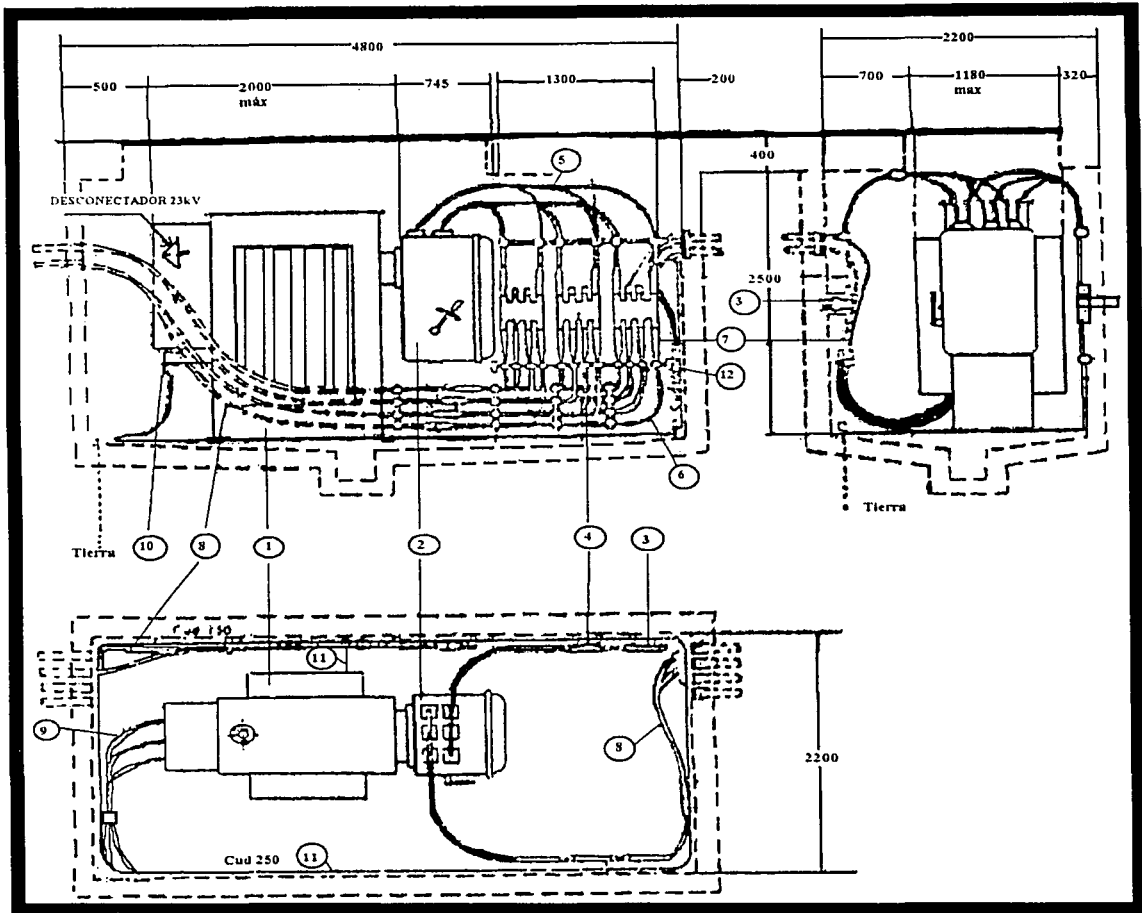


FIG. 8.4 ESQUEMA DE S.E. BÓVEDA 750

En la figura 8.4 observamos la localización del transformador dentro de la bóveda, y en la tabla 8.1 citamos algunos accesorios, y en los datos de placa algunas características.

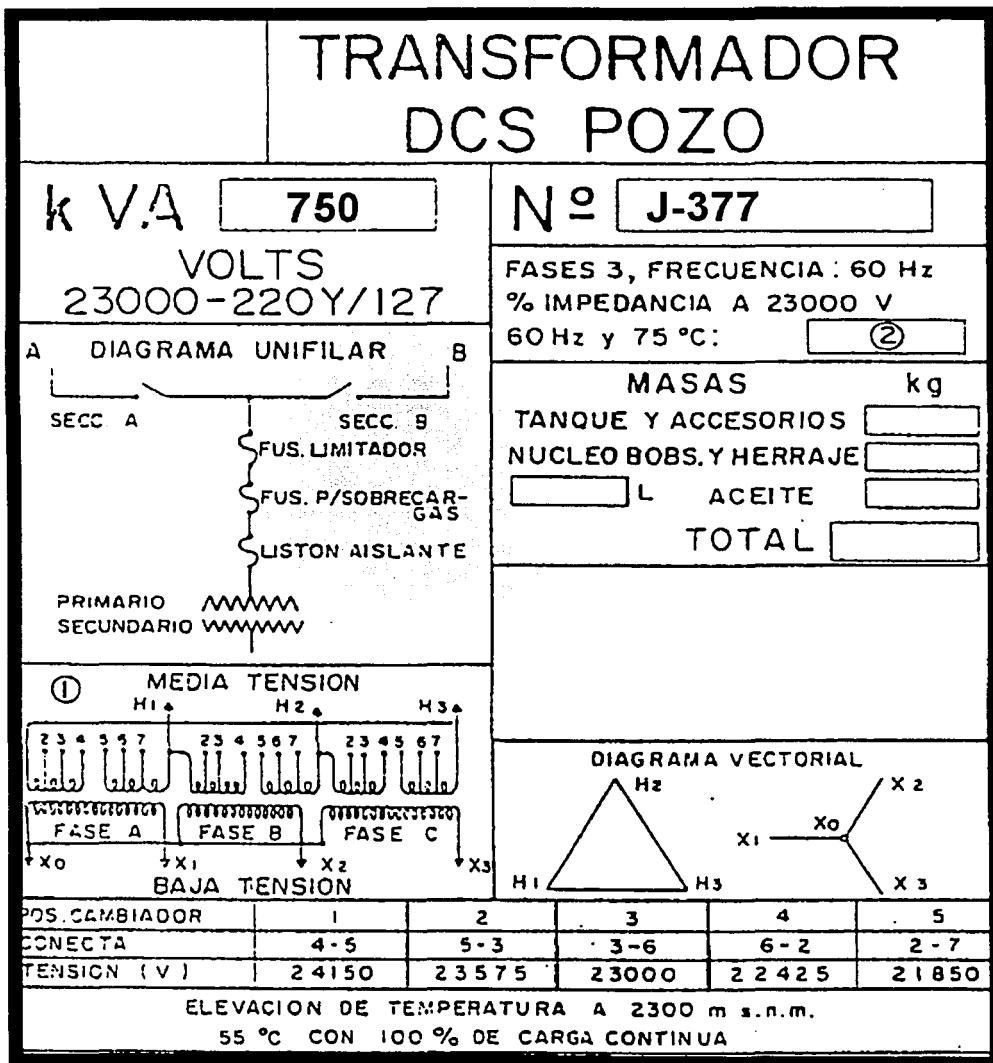


FIG. 8.5 DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR DE 750 kVA

La condición que guarda el exterior del tanque del transformador subterráneo tiene dos aspectos, en la parte inferior, en un nivel aproximado de 40 cm, se aprecia una corrosión plenamente localizada con capas de ampollas de óxido quebradizas superficiales y ataque generalizado, además el recubrimiento aplicado (pintura marina) está muy deteriorado. En el resto de la superficie del tanque, no encontramos ataque corrosivo, y la pintura guarda buen aspecto.

La causa del problema es sin duda el estancamiento de agua que contiene materia contaminante como tierra, basura y demás, desgastando con esto la pintura y provocando un ataque que con el tiempo se ven sus efectos.

El agua se introduce a la bóveda por las rejillas exteriores y no tiene otra forma de ser sacada mas que por bombeo.

Según testimonios de los propios trabajadores, el nivel máximo de agua que se llega a presentar rara vez es de 2 m aproximadamente, sin embargo en tiempo de lluvias se tiene que retirar el agua hasta dos veces por mes, para evitar inundación.

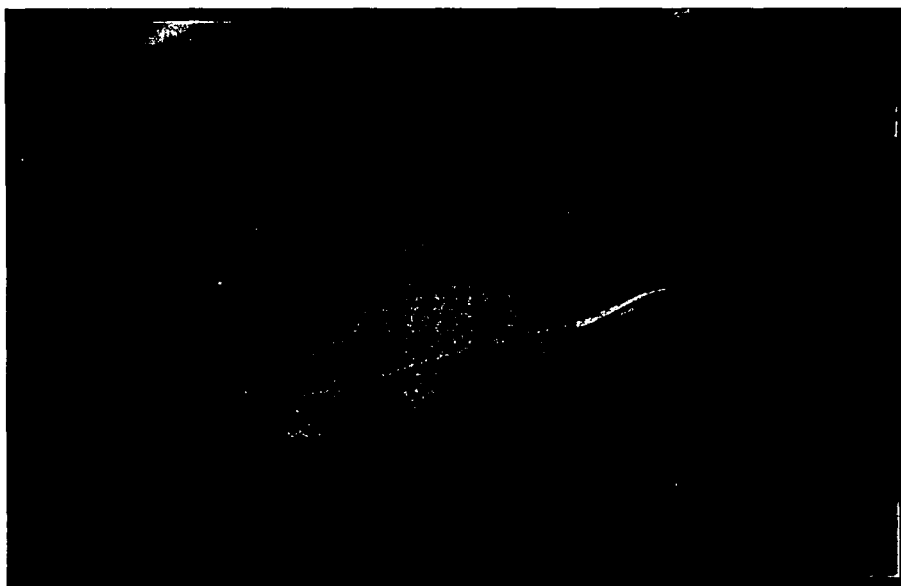
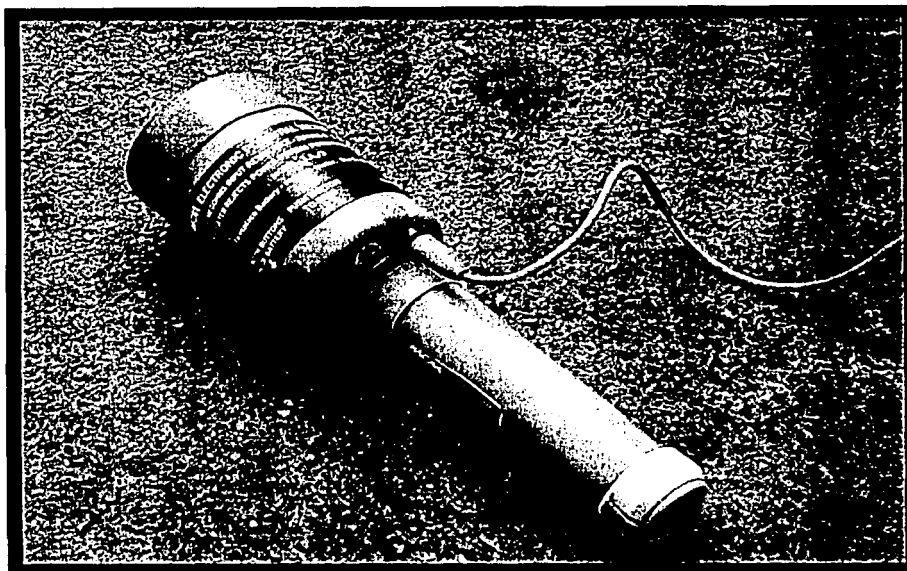
Por lo anterior, nuestro propósito será el de proveer protección catódica al área afectada para retrasar su deterioro.

La protección catódica al transformador se realizó por medio de ánodos de sacrificio, para esto se procedió en principio, en encontrar el potencial natural del tanque del transformador, utilizamos para esto un electrodo de referencia de Cu/CuSO_4 , de la marca MC Miller, el cual tiene incorporado un voltímetro analógico en la parte superior del electrodo tal como se muestra en la figura 8.6, obteniéndose un potencial natural de -0.82 V, lo que nos da un indicativo que el tanque del transformador, se encuentra en proceso de corrosión.

Para esto se procedió en principio en raspar una parte pequeña del transformador para obtener un buen contacto con el cable del voltímetro, disminuyendo de esta forma los errores por medición.

Cabe mencionar que la colocación de los cables necesarios para hacer las conexiones tanto para encontrar el potencial natural como la corriente de protección, se hicieron con anterioridad, es decir se tuvo que desasolvar la bóveda para poder realizar estas conexiones.

Las mediciones efectuadas se realizaron con la bóveda inundada unos 40 cm de agua, para esto se conectó el equipo de medición y la batería a los cables ya instalados previamente.



b)

FIG. 8.6 a) y b) ELECTRODO DE REFERENCIA DE Cu/CuSO_4

El siguiente paso fue encontrar la corriente necesaria de protección, para esto se realizó la conexión que muestra la figura 7.4, utilizando como electrodos provisionales varillas de Cobre, y para la fuente de corriente directa se utilizo una batería de 6 V, el proceso realizado fue el siguiente: se varió una resistencia de 1000 Ω , para ir aumentando el flujo de corriente hacia la estructura del transformador, empezando a probar con 50 mA, lo que nos disminuyo el potencial a -0.94 V, por lo que se procedió a inyectar corriente desde los 10 mA. con incrementos del mismo valor manteniendo la corriente por 3 minutos, para posteriormente tomar la lectura del potencial de la estructura respecto del electrodo de Cu/ CuSO₄. La tabla 8.1 muestra las lecturas obtenidas.

LECTURAS OBTENIDAS PARA ENCONTRAR LA CORRIENTE DE PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR		
Corriente suministrada (mA)	Potencial de la estructura respecto al electrodo de Cu/CuSO₄ (v)	
	Al inyectar corriente	Al interrumpir la corriente
0	0	-0.82
10	-0.84	-0.83
20	-0.88	-0.87
30	-0.91	-0.89
40	-0.95	-0.92
50	-0.99	-0.94
60	-1.03	-0.95

TABLA 8.2

Observando la tabla anterior podemos ver que la corriente de protección se encuentra entre los 10 y 20 mA, por lo que procedemos a realizar la grafica de la figura 8.7 del potencial obtenido al interrumpir la corriente, contra el logaritmo de la corriente suministrada. De esta forma obtenemos gráficamente el valor aproximado de 20 mA como corriente de protección.

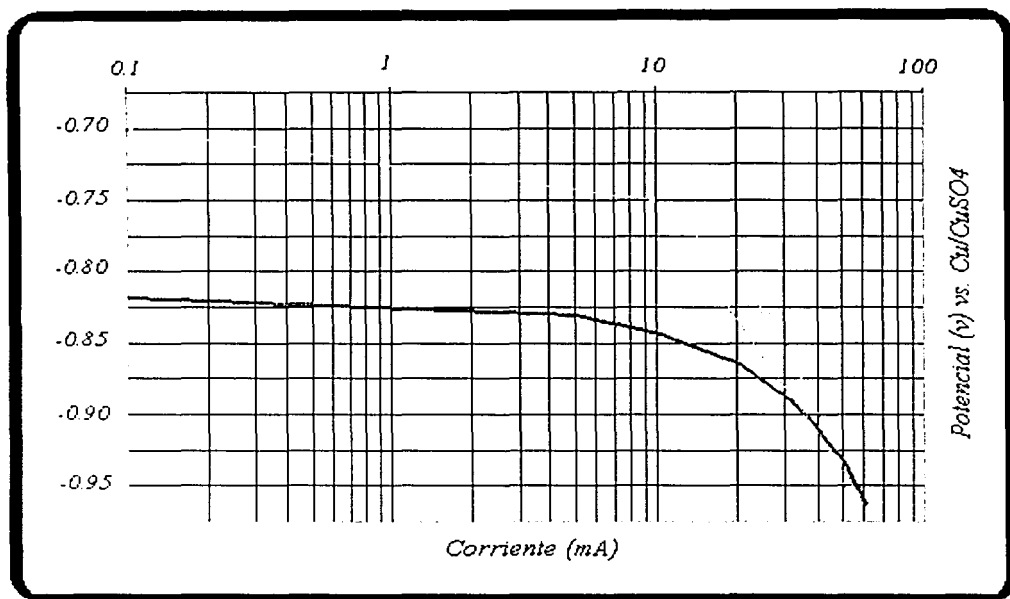


FIG. 8.7 GRÁFICA DE POLARIZACIÓN

Habiendo obtenido la corriente necesaria para proteger al transformador catódicamente, el siguiente paso será calcular la cantidad de ánodos para que suministren la corriente de diseño de:

$$I_d = (20 \text{ mA} * 1.15) = 23 \text{ mA}.$$

Debido a que este valor de corriente es pequeño, consideramos que con un sólo ánodo se puede suministrar los 23 mA, por lo que se procedió directamente a realizar la conexión de un ánodo de Magnesio como el que se muestra en la figura 8.9

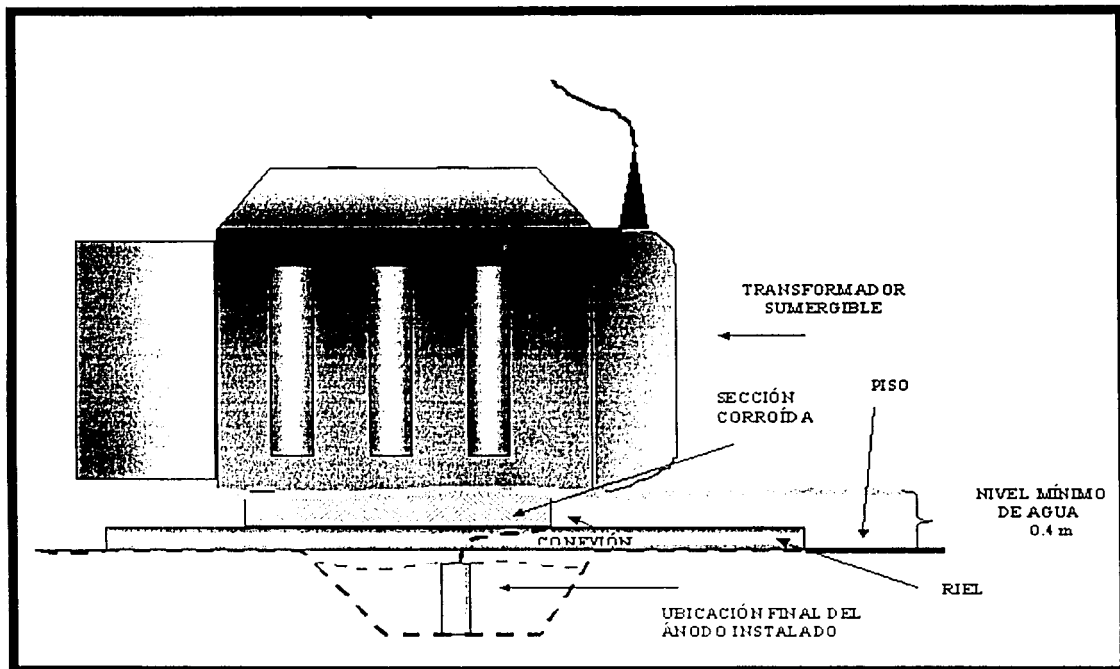


FIG. 8.8 UBICACIÓN DEL ÁNODO

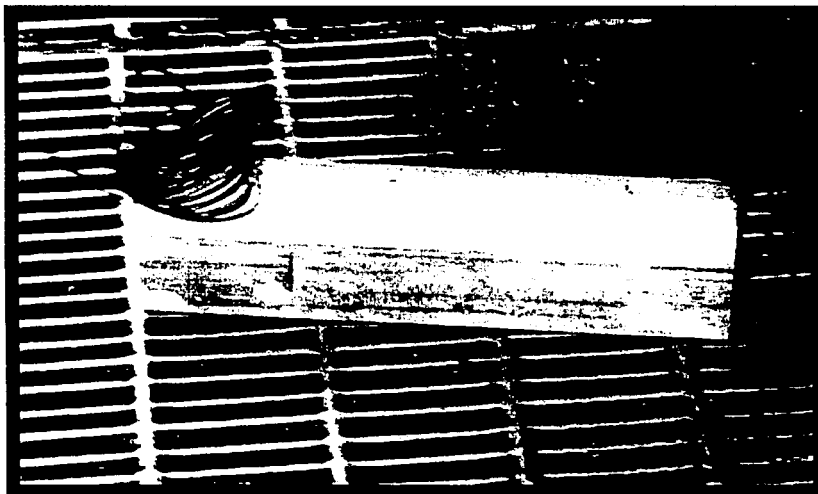


FIG 8.9 ÁNODO DE MAGNESIO

CARACTERÍSTICAS DEL ANODO EMPLEADO	
DIMENSIONES:	
ANCHO	0.09 m (3.5'')
LARGO	0.34 m (13.2'')
SECCIÓN TRANSVERSAL:	0.00741 m ² Triangular
ÁREA SUPERFICIAL:	0.124 m ²
MASA:	4.2 kg (9 LB)
MATERIAL:	Aleación de Magnesio
CONDUCTOR:	1 m de alambre # 12 AWG con forro de polietileno de alto peso molecular
FECHA DE INSTALACIÓN	4 de Julio de 2002

TABLA 8.3

Una vez que se hizo la conexión se procedió a medir el potencial del tanque del transformador respecto al electrodo de referencia de Cu/CuSO₄, después de un mes de instalado se midió el potencial del transformador siendo de -0.89 V y una corriente de 30 mA, siendo muy aceptables dado que se encuentran dentro de un rango de protección del acero.

8.2 LOCALIZACIÓN DE FALLA POR CORROSIÓN EN UN CABLE TIPO TUBO DE 85 kV

Como ya se ha explicado, los problemas de corrosión pueden llegar a causar perforaciones en los cables tipo tubo provocando fuga del gas o aceite contenidos.

Cuando su magnitud es considerable, llega a ser apreciable a simple vista:



FIG 8.10 LOCALIZACIÓN VISUAL DE FALLA EN CABLE TIPO TUBO

La inspección visual a lo largo de la trayectoria por donde se tiende el cable es muy importante, por lo que es necesario que el personal de mantenimiento de cables subterráneos de Compañía de Luz y Fuerza realice recorridos cada 15 días a todos los cables en operación, esto incluye a los puntos de conexión ubicados en los diferentes pozos.

Cuando la fuga que se presenta es de pequeña magnitud, se tiene que recurrir a los siguientes métodos.

Se introduce gas freón a la tubería en pequeñas cantidades mezclándose con el gas, sobre el terreno a lo largo de la trayectoria se colocan electrodos (varillas huecas) y con un detector de gas freón se mide el contenido de éste en cada uno de ellos y cuando en alguno se detecta la presencia de dicho gas, para precisar el punto de falla, se van colocando otros electrodos cada 10 metros hasta dar con el sitio para proceder a la reparación.

Otro método en la localización de fallas es el denominado de "pisón", el cual es un sistema de corriente directa pulsante que se aplica entre tubería y tierra.

En la siguiente figura observamos un diagrama esquemático:

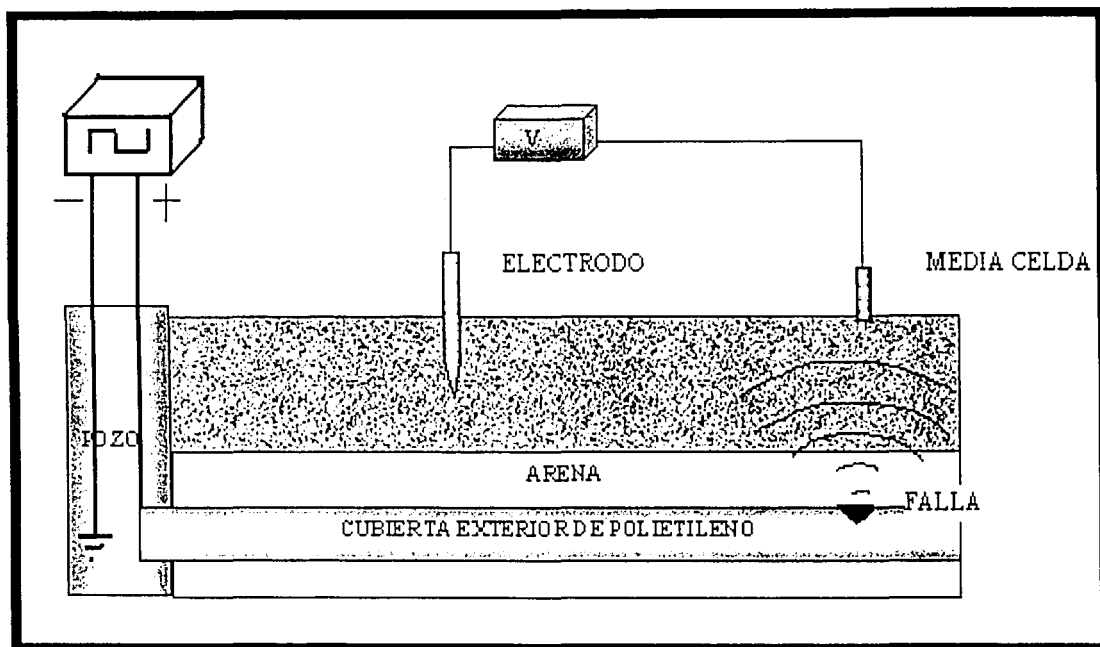


FIG 8.10 LOCALIZACIÓN DE FALLAS

Se conecta un voltímetro de alta impedancia sobre la trayectoria del tubo por medio de un electrodo provisional clavado a tierra y a una media celda. Si la falla está cerca, se detecta el potencial pulsante en escala menor, y cuando sea máxima, se estará sobre la falla. De ser necesario se tendrá que romper el piso de asfalto o concreto para la realización de esta prueba, la cual también se aplicaba durante el instante de la instalación del cable para localizar fallas que se pudieran presentar.



CAPÍTULO IX

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

RESULTADOS

Determinar un tiempo preciso en que durará el ánodo suministrando la corriente de protección es difícil, debido a que las condiciones en las que se encuentra el transformador pueden variar totalmente de un momento a otro, además de no contar con registros de niveles de agua de la bóveda, no se puede obtener un modelo aproximado.

Los factores variables mas determinantes para un análisis y diagnóstico corrosivo son los siguientes:

- Nivel de agua

La cantidad de volumen de agua acumulada en contacto directo con la estructura del transformador determina las zonas más susceptibles a deteriorarse.

- Tiempo

La decisión de cuantos días deben transcurrir para desasolvar la bóveda sin dejar agua.

- Sustancias mezcladas

El tipo de materiales o desechos que se filtran por la rejilla y se mezclan con las sustancias orgánicas residuales se disolverán con el agua teniendo como resultado niveles de pH corrosivos.

- Recubrimiento del tanque

A la estructura del transformador se le aplica una pintura resistente al agua, sin embargo en las zonas donde el contacto sea frecuente, se debilitará hasta desaparecer.

Sin embargo podemos establecer un procedimiento teórico que nos permita observar el comportamiento del ánodo cuando suministra cierta corriente y así darnos una idea de lo que le puede ocurrir.

TIEMPO DE VIDA DEL ÁNODO INSTALADO

Realizamos a continuación un análisis de desgaste del ánodo de masa inicial 4.4kg cuando suministra una corriente de protección continua de 30 mA. este valor representa el máximo a suministrar de manera continua.

Volumen inicial del ánodo (Vi) = Área transversal x Longitud = $74.1\text{cm}^2 \times 34\text{cm} = 2519.4\text{cm}^3$

CAPÍTULO 9
"RESULTADOS Y CONCLUSIONES"

Corriente suministrada por el ánodo (I_s) = 30 mA

$$\text{Densidad de corriente (Dc)} = \frac{I_s}{A_s} = \frac{30 \text{ mA}}{1242 \text{ cm}^2} = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$$

La velocidad de corrosión nos determina un valor teórico de desgaste lineal del ánodo por año.

$$\text{Velocidad de Corrosión (VC)} = Dc \cdot \frac{A}{1000 \text{ mA}} \cdot \frac{\text{eq}}{26.8 \text{ A} \cdot \text{h}} \cdot \frac{\text{mol}}{2 \text{ eq}} \cdot \frac{24.305 \text{ g}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{cm}^3}{1.74 \text{ g}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{\text{año}}$$

donde:

Dc= Densidad de corriente en mA/cm²

26.8 A*h/eq= Constante de Faraday

24.305 g/mol= Masa molecular

1.74 g/cm³ = Densidad Mg

$$\text{Velocidad de Corrosión (VC)} = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \cdot \frac{A}{1000 \text{ mA}} \cdot \frac{\text{eq}}{26.8 \text{ A} \cdot \text{h}} \cdot \frac{\text{mol}}{2 \text{ eq}} \cdot \frac{24.305 \text{ g}}{\text{mol}} \cdot \frac{\text{cm}^3}{1.74 \text{ g}} \cdot \frac{24 \text{ h}}{\text{día}} \cdot \frac{365 \text{ días}}{\text{año}}$$

$$VC = 0.054 \frac{\text{cm}}{\text{año}}$$

Lo anterior nos indica que la disminución lineal del ánodo es de 0.054 centímetros por año, con este valor comenzamos a realizar los cálculos de área, volumen y masa que se pierde por año que transcurre, para esto es necesario determinar con precisión la superficie total del ánodo en base a sus dimensiones.

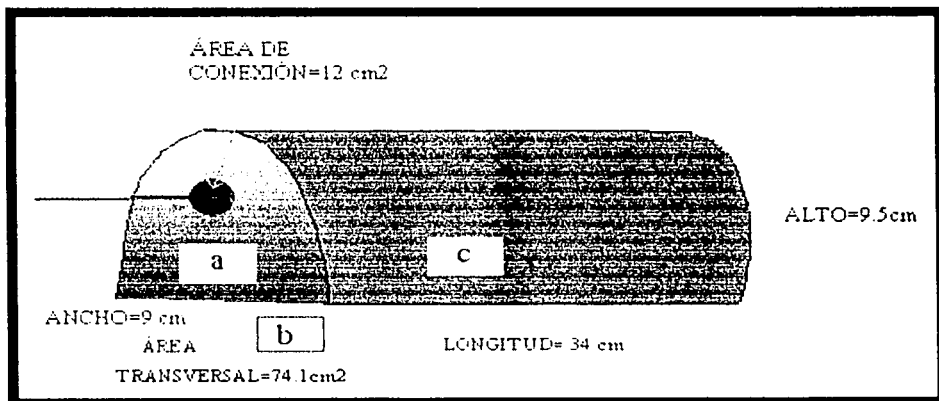


FIG. 9.1 DIMENSIONES DEL ÁNODO

Área superficial del ánodo (As):

$$As = 2 \text{Área Transversal (a)} + \text{Área de Base (b)} + \text{Área de Cuerpo (c)} - \text{Área de conexión}$$

Para encontrar el área "a" es necesario seccionar geoméricamente la sección transversal en dos caras simétricas y posteriormente dividir las en tres partes, una rectangular, otra triangular y una última en una cuarta parte de elipse.

$$a = 2[(4\text{cm} \times 6.5\text{cm}) + (6.5\text{cm} \times .5\text{cm})/2 + (4\text{cm} \times 3\text{cm}) \pi/4] = 74.1 \text{ cm}^2$$

Para la base "b" multiplicamos largo por ancho:

$$b = 9\text{cm} \times 34 \text{ cm} = 306 \text{ cm}^2$$

Para el área "c" multiplicamos la longitud por el perímetro del área transversal:

$$c = 34 \text{ cm} \times 23.5\text{cm} = 800\text{cm}^2$$

Finalmente restamos el valor del área de conexión igual a 12.5 cm²

$$As = 2(74.1\text{cm}^2) + 306 \text{ cm}^2 + 800 \text{ cm}^2 - 12.5 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área superficial del ánodo empleado (As)} = 1242\text{cm}^2$$

Encontrando los datos anteriores, procedemos a realizar las disminuciones lineales que sufrirá el ánodo (0.054cm/año) en lo sucesivo.

Para el año 1:

$$a = 2[(4-.054)\text{cm} \times (6.5-.054)\text{cm} + (6.5-.054)\text{cm} \times (.5-.054)\text{cm})/2 + (4-.054)\text{cm} \times (3-.054) \text{ cm} \pi/4] = 72 \text{ cm}^2$$

$$b = (9-.054)\text{cm} \times (34-.054) \text{ cm} = 303.68 \text{ cm}^2$$

$$c = (34-.054) \text{ cm} \times (23.5-.054)\text{cm} = 795.89\text{cm}^2$$

$$As = 2a + b + c - 12.5\text{cm}^2 = 1231 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen (V)} = a \times \text{longitud} = 72 \text{ cm}^2 \times (34-.054)\text{cm} = 2444 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = \frac{V \times 1.74}{1000} = \frac{2444\text{cm}^3 \times 1.74}{1000} = 4.25\text{kg}$$

$$\text{Corriente drenada (Is)} = Dc \times As = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \times 1231 \text{ cm}^2 = 29.54 \text{ mA}$$

Para el año 2:

$$a = 2[(3.88-.054)\text{cm} \times (6.446-.054)\text{cm} + (6.446-.054)\text{cm} \times (.446-.054)\text{cm})/2 + (3.94-.054)\text{cm} \times (2.94-.054) \text{ cm} \pi/4] = 69.65 \text{ cm}^2$$

$$b = (8.94-.054)\text{cm} \times (33.94-.054) \text{ cm} = 301.05 \text{ cm}^2$$

CAPÍTULO 9
"RESULTADOS Y CONCLUSIONES"

$$c = (33.94-.054) \text{ cm} \times (23.44-.054) \text{ cm} = 792.75 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2a + b + c - 12.5 \text{ cm}^2 = 1220.6 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen (V)} = a \times \text{longitud} = 69.6572 \text{ cm}^2 \times (33.94-.054) \text{ cm} = 2360.57 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = \frac{V \times 1.74}{1001} = \frac{2360.57 \text{ cm}^3 \times 1.74}{1000} = 4.107 \text{ kg}$$

$$\text{Corriente drenada (Is)} = D_c \times A_s = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \times 1220.6 \text{ cm}^2 = 29.29 \text{ mA}$$

Para el año 3:

$$a = 2[(3.82-.054) \text{ cm} \times (6.39-.054) \text{ cm} + (6.39-.054) \text{ cm} \times (.39-.054) \text{ cm}] / 2 + (3.88-.054) \text{ cm} \times (2.88-.054) \text{ cm} \pi / 4 = 67.1 \text{ cm}^2$$

$$b = (8.88-.054) \text{ cm} \times (33.88-.054) \text{ cm} = 298.3 \text{ cm}^2$$

$$c = (33.88-.054) \text{ cm} \times (23.39-.054) \text{ cm} = 789.6 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2a + b + c - 12.5 \text{ cm}^2 = 1209.65 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen (V)} = a \times \text{longitud} = 67.1 \text{ cm}^2 \times (33.88-.054) \text{ cm} = 2267.38 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = \frac{V \times 1.74}{1002} = \frac{2267.38 \text{ cm}^3 \times 1.74}{1000} = 3.94 \text{ kg}$$

$$\text{Corriente drenada (Is)} = D_c \times A_s = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \times 1209.65 \text{ cm}^2 = 29.0 \text{ mA}$$

Para el año 4:

$$a = 2[(3.76-.054) \text{ cm} \times (6.33-.054) \text{ cm} + (6.33-.054) \text{ cm} \times (.33-.054) \text{ cm}] / 2 + (3.82-.054) \text{ cm} \times (2.82-.054) \text{ cm} \pi / 4 = 64.75 \text{ cm}^2$$

$$b = (8.82-.054) \text{ cm} \times (33.82-.054) \text{ cm} = 295.94 \text{ cm}^2$$

$$c = (33.82-.054) \text{ cm} \times (23.33-.054) \text{ cm} = 786.17 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2a + b + c - 12.5 \text{ cm}^2 = 1199.11 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen (V)} = a \times \text{longitud} = 64.75 \text{ cm}^2 \times (33.82-.054) \text{ cm} = 2183.49 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = \frac{V \times 1.74}{1003} = \frac{2183.49 \text{ cm}^3 \times 1.74}{1000} = 3.79 \text{ kg}$$

$$\text{Corriente drenada (Is)} = D_c \times A_s = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \times 1199.11 \text{ cm}^2 = 28.77 \text{ mA}$$

Para el año 5:

$$a = 2[(3.70-.054) \text{ cm} \times (6.27-.054) \text{ cm} + (6.27-.054) \text{ cm} \times (.27-.054) \text{ cm}] / 2 + (3.76-.054) \text{ cm} \times (2.76-.054) \text{ cm} \pi / 4 = 62.45 \text{ cm}^2$$

$$b = (8.76-.054) \text{ cm} \times (33.76-.054) \text{ cm} = 289.82 \text{ cm}^2$$

$$c = (33.72-.054) \text{ cm} \times (23.22-.054) \text{ cm} = 783.0 \text{ cm}^2$$

$$A_s = 2a + b + c - 12.5 \text{ cm}^2 = 1185.26 \text{ cm}^2$$

$$\text{Volumen (V)} = a \times \text{longitud} = 62.45 \text{ cm}^2 \times (33.72-.054) \text{ cm} = 2102.19 \text{ cm}^3$$

$$\text{Masa} = \frac{V \times 1.74}{1004} = \frac{2102.19 \text{ cm}^3 \times 1.74}{1000} = 3.65 \text{ kg}$$

$$\text{Corriente drenada (Is)} = D_c \times A_s = 0.024 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2} \times 1185.26 \text{ cm}^2 = 28.44 \text{ mA}$$

Siguiendo con el mismo procedimiento, elaboramos la tabla siguiente hasta llegar a los 25 años de funcionamiento:

CAPÍTULO 9
"RESULTADOS Y CONCLUSIONES"

COMPORTAMIENTO DEL ÁNODO		
AÑO	CORRIENTE DRENADA mA	DISMINUCIÓN DE MASA Kg
0	30	4.4
1	29.5	4.25
2	29.2	4.107
3	28.92	3.94
4	28.65	3.79
5	28.39	3.65
6	28	3.51
7	27.84	3.33
8	27.58	3.19
9	27.3	3.0
10	27	2.9
11	26.78	2.76
12	26.5	2.60
13	26.1	2.47
14	25.68	2.30
15	25.4	2.14
16	25.1	2.0
17	24.8	1.87
18	24.4	1.70
19	24.1	1.59
20	23.8	1.41
21	23.6	1.25
22	23.3	1.10
23	23	.95
24	22.78	.80
25	22.5	.65

TABLA 9.1

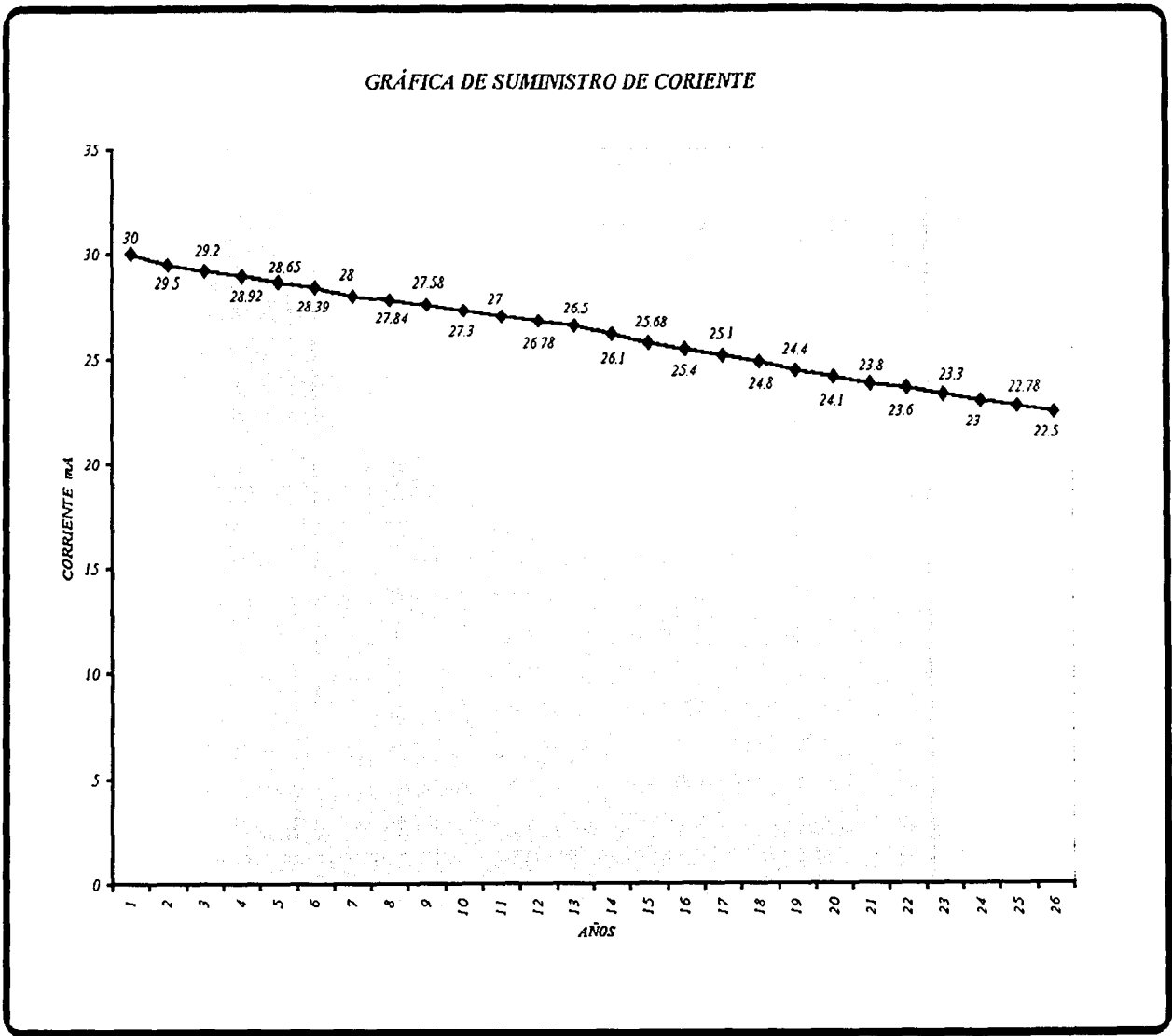


FIG. 9.2

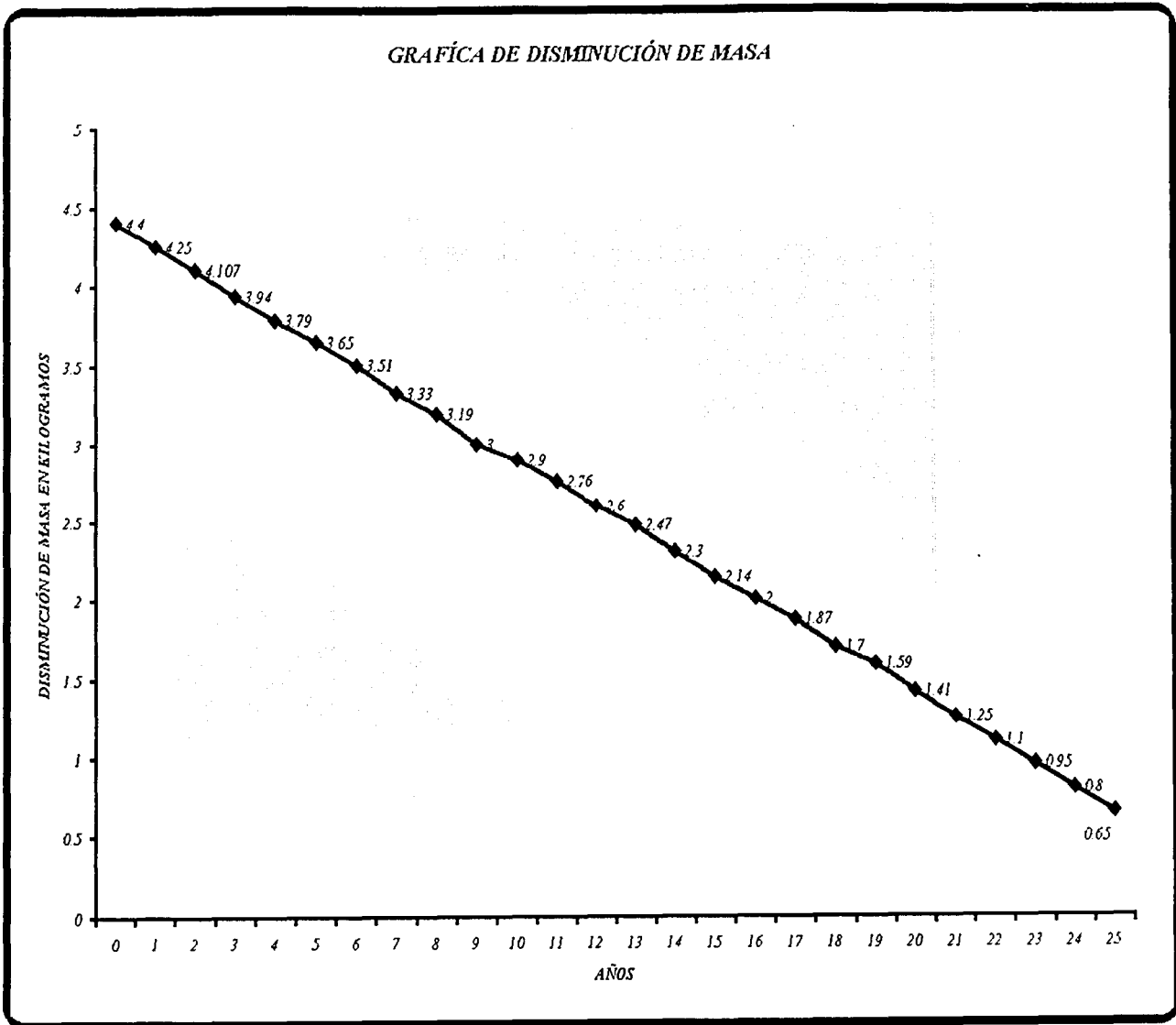


FIG. 9.3

CAPÍTULO 9
"RESULTADOS Y CONCLUSIONES"

De las gráficas anteriores podemos observar que para el caso en que un ánodo de Magnesio suministra continuamente 30 mA, tendrá un tiempo de cobertura cercana a los 25 años de vida, encontrándose dentro de las exigencias para el diseño de cualquier sistema de protección catódica.

CONCLUSIONES

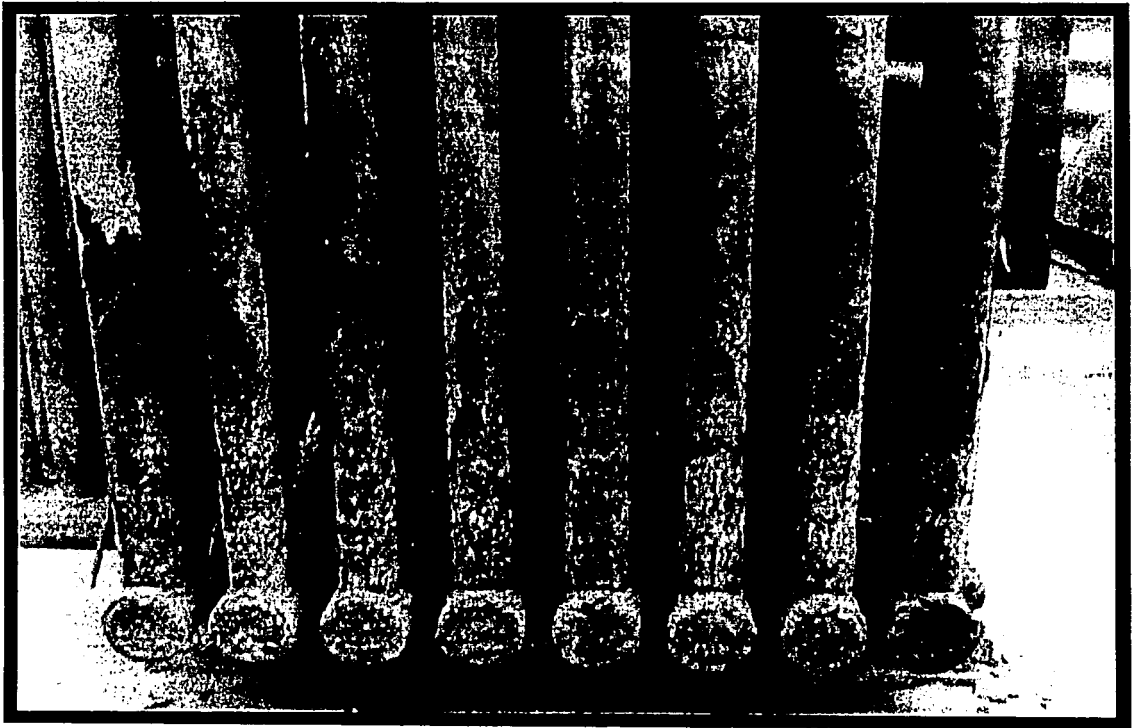


FIG. 9.4 TRANSFORMADOR SUMERGIBLE CORROÍDO

Con este trabajo de tesis tuvimos la posibilidad de investigar, y desarrollar una aplicación práctica en torno a la Protección Catódica, lo que nos permite ofrecer una importante información sobre el tema dentro de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

Debido a la cantidad de años en que pueden permanecer los equipos subterráneos operando, se puede hacer la recomendación de proteger a los equipos subterráneos con ánodos de sacrificio, la aplicación de inhibidores solubles a la larga puede resultar más costoso.

Lo ideal sería la colocación de los ánodos adheridos al tanque antes de ser instalados en el pozo, esto para aprovechar los beneficios de los recubrimientos aplicados.

Aunque actualmente la norma establece aplicaciones de recubrimientos especiales y materiales resistentes a la corrosión por lo menos de 10 años, la esperanza de vida aumentaría, por los ánodos de sacrificio que se puedan instalar, representaría una gran respaldo para mantener en óptimas condiciones a los equipos.

El objetivo de la realización de esta tesis se alcanza cuando encontramos una forma de desempeño y aplicación propia a la resolución de un problema que a todos puede afectar.

Ojalá en lo futuro a quien consulte este trabajo encuentre en ella la orientación necesaria y suficiente para obtener información referente a la corrosión y la Protección Catódica.

La protección catódica realizada al transformador, por medio del método propuesto, mediante ánodos de sacrificio, fue el correcto, ya que un solo ánodo galvánico proporciona la corriente necesaria para obtener el potencial de protección adecuado para el transformador.

El método utilizado de la curva de polarización catódica, para la obtención de la corriente de protección es el adecuado, ya que con esta corriente se obtiene el potencial mínimo de protección de -0.85 V respecto al electrodo de Cu/CuSO_4 saturado.

La densidad de corriente obtenida se recomienda utilizarse solo en el centro de la ciudad, dado que en otras zonas de la ciudad variara mucho el nivel freático, y la composición química de las aguas estancadas dentro de la bóveda.

La experiencia que nos deja la investigación, la indagación y recopilación de experiencias tanto de ingenieros del medio eléctrico como de la Protección Catódica, es para nosotros una causa de orgullo que queda registrado en esta tesis para la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Finalmente queremos expresar que la ayuda prestada por los ingenieros de la Gerencia Metropolitana Oriente y Cables Subterráneos de Compañía de Luz y Fuerza fue fundamental para el desarrollo de este trabajo y que sin su invaluable apoyo no se hubiere dado.



BIBLIOGRAFÍA

1-MAS ALLÁ DE LA HERRUMBRE I Y II
JUAN GENESCA
SEP
1993

2-BASIC CORROSION COURSE
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
1972

3-SCOPE AND LANGUAGE OF CORROSION
ANTON BRASUNAS
NORMAN HAMNER
NACE
1972

4-INTRODUCTION TO CORROSIÓN
F.L. LaQUE
INTERNACIONAL NICKEL CO.
NACE
1972

5-CORROSION RELATED CHEMISTRY AND
ELECTROCHEMISTRY
NORBERT D. GREENE
UNIVERSITY OF CONNECTICUT
NACE
1972

6-ATMOSPHERIC CORROSION
K.G. COMPTON
UNIVERSITY OF FLORIDA
NACE
1972

7-PRINCIPLES OF CATHODIC PROTECTION
A.W PEABODY
EBASCO SERVICES, NEW YORK
NACE
1972



8-CORROSION BY SOILS
MARSHAL E. PARKER
HOUSTON TX.
NACE
1972

9-CORROSION BY WATER AND STEAM
W.E. BERRY
BATTELLE MEMORIAL INSTITUTE
COLUMBUS OHIO
NACE
1972

10-LOCALIZED CORROSION
H.P. GODARD
ALUMINIUM LABORATORIES
ONTARIO CANADA
NACE
1972

11.-FUNDAMENTALS OF INHIBITORS
NORMAN HACKERMAN
E.S. SNAVELY
MOBIL RESEARCH & DEVELOPMENT CORP.
DALLAS TX.
NACE
1972

12.-STRESS CORROSION
H.L. LOGAN
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
NACE
1972

13.-METALLURGICAL FACTORS AFFECTING CORROSION
ROBERT F. HOCHMAN
GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ATLANTA GA.
NACE
1972



14.-CORROSION AT HIGH TEMPERATURES

J.J. MORAN
THE INTERNATIONAL NICKEL CO.
NEW YORK
NACE
1972

15.-ALLOY BEHAVOIR AT HIGH TEMPERATURES

ANTON DE S. BRASUNAS
UNIVERSITY OF MISSOURI
NACE
1972

16.-COATINGS FOR CORROSION PROTECTION

NORMAN E. HAMNER
NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS
HOUSTON TX.
NACE
1972

17.-CORROSION TESTING

BERNARD W. LIFKA
FRANK L. McGEARY
ALUMINIUM COMPANY OF AMERICA
NEW KENSINGTON
NACE
1972

18.-MATERIALS FOR CORROSION ENVIRONMENTS

M.G. FONTANA
J.H. PEACOCK
NACE
1972

19-PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN
CATÓDICA

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
1988

20-GUÍA DE DISEÑO E2.5.24 DE PROTECCIÓN CATÓDICA

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
1988



21-NORMAS DE MONTAJES 40115
LUZ Y FUERZA DEL CENTRO
1995

23-LA CORROSIÓN UN CÁNCER QUE ATACA Y DEGRADA PAULATINAMENTE EL
SISTEMA ELÉCTRICO SUBTERRÁNEO
ARMANDO LIRA MENESES
LUZ Y FUERZA DEL CENTRO
2001

24-PRUEBAS Y PUESTA EN SERVICIO DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN
CATÓDICA
COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
1988

25-GUÍA DE DISEÑO E2.5.24 DE PROTECCIÓN CATÓDICA
COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD

26- FATIGA DE LOS METALES
FORREST
UNAM

27-CORROSIONES METALICAS
U. R. EVANS

28-CFE D8500-01-1989
SELECCIÓN Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

29-CFE D8500-03-1989
RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA CENTRALES TERMoeLECTRICAS

30-CFE K0000-06
TRANSFORMADORES DE POTENCIA

31-CFE G0000-65
ESQUEMAS NORMALIZADOS PARA PROTECCIONES DE LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN Y SUBTRANSMISIÓN

32 CFE L0000-36-1990
SUPERVISIÓN DE MONTAJE Y PUESTA EN SERVICIO DE SISTEMAS DE PC.



33-PROTECCIÓN CATÓDICA PARA CIMENTACIONES METALICAS DE
ESTRUCTURAS AUTOSOPORTADAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN
LARA ZÚÑIGA CARLOS ALBERTO
UNAM

34-SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
ESPINOZA Y LARA ROBERTO
LIMUSA