



ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

“Estudio para la Aplicación de Protección
Catódica en Tuberías Metálicas de Acueductos
o Poliductos

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

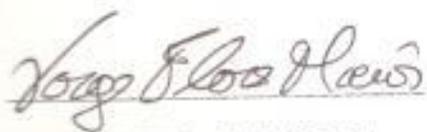
Especialización: **POTENCIA**

Presentado por:

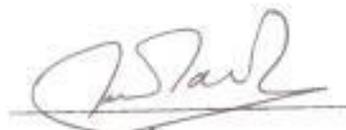
JUAN CARLOS PATIÑO A.

Guayaquil - Ecuador

1990



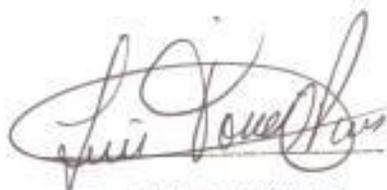
ING. JORGE FLORES M.
Sub-Decano de la F.I.E



ING. JUAN GALLO G.
Director de Tesis



ING. JORGE CHIRIBOGA
Tribunal de Tesis



ING. LUIS TORRES
Tribunal de Tesis

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).



JUAN CARLOS PATIRO ARCA

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo el realizar un estudio sobre la aplicación de la técnica de la Protección catódica, destacando su importancia en el control de la corrosión de las tuberías metálicas utilizadas en acueductos o poliductos de derivados de petróleo.

En la primera parte de este trabajo, se establecerán las causas que originan el proceso de corrosión de dichas tuberías al estar en contacto con un medio corrosivo como lo es el suelo.

Una vez conocidos los mecanismos de la corrosión, se procederá a establecer su relación con el uso de la técnica de la Protección catódica, como un medio efectivo y económico para el combate de la corrosión en tuberías metálicas enterradas. Se estudiará dentro de este ámbito, los dos métodos de aplicación de dicha técnica, a saber: a) los sistemas por ánodos galvánicos y b) los sistemas por corriente impresa, destacando las ventajas y desventajas de cada uno de ellos y los pasos a seguir para la obtención de un adecuado dimensionamiento de tales sistemas.

Se planteará además el extenso alcance de aplicación de la Protección catódica para combatir la corrosión en

otras estructuras enterradas o sumergidas, así como su respectiva limitación operacional.

Finalmente se realizará la ejecución de un proyecto de cálculo para el diseño de la Protección catódica del poliducto Tres Bocas-Pascuales, cuyos resultados serán evaluados y discutidos a lo largo del proyecto, con la finalidad de que sirvan como una guía para futuros trabajos que se realicen sobre este campo.

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

	Pág.
RESUMEN	7
INDICE GENERAL	9
INDICE DE FIGURAS	13
INDICE DE TABLAS	20
INTRODUCCION	23
I. CAUSAS DE LA CORROSION EN TUBERIAS ENTERRADAS.	25
1.1. Fundamentos y acción eléctrica de la co- rrusión	25
1.1.1. Electroquímica de la corrosión ...	26
1.1.2. Potencial de electrodo	30
1.1.3. Serie electromotriz	32
1.1.4. Polarización	34
1.2. Corrosión galvánica	41
1.2.1. Mecanismo de la corrosión galvá- nica	41
1.2.2. Serie galvánica	44
1.2.3. Celdas de corrosión galvánica en tuberías	47
1.2.4. Factores que influyen en la co- rrusión galvánica	53
1.2.5. Prevención de la corrosión galvá- nica	57
1.3. Corrosión electrolítica	59
1.3.1. Mecanismo de la corrosión elec- trolítica	59
1.3.2. Detección de las corrientes de interferencia	66
1.3.3. Métodos de control de la corro- sión electrolítica	70
1.4. Otros tipos de corrosión	72
1.4.1. Corrosión debido a celdas dife- renciales	72
1.4.2. Corrosión ocasionada por varia- ción de la resistividad	75
1.4.3. Corrosión microbiológica	79
II. MEDIOS DE PREVENCION DE LA CORROSION	83
2.1. Métodos de inspección de las tuberías enterradas	83
2.1.1. Introducción	83
2.1.2. Datos necesarios para una inspec- ción de la corrosión	84

2.1.3. Métodos de inspección	88
2.2. Mediciones eléctricas para el control de la corrosión	106
2.2.1. Introducción	106
2.2.2. Instrumentación para el control de la corrosión	107
2.2.3. Técnicas empleadas para las mediciones eléctricas	136
2.3. Clasificación de los medios de prevención	153
2.3.1. Revestimientos protectores anticorrosivos	153
2.3.2. Protección catódica	166
III. PROTECCION CATODICA	169
3.1. Principios básicos y fundamentos de la protección catódica	169
3.1.1. Generalidades	169
3.1.2. Mecanismo de la protección catódica	170
3.1.3. Criterios para la protección catódica	177
3.1.4. Sobreprotección	179
3.1.5. Consideraciones para el diseño de un sistema de protección catódica.	180
3.2. Mediciones en la ruta de la tubería	186
3.3. Resistividad del suelo	190
3.4. Resistividad de las tuberías	195
3.5. Cálculo de la corriente de protección	200
3.6. Cálculo de potenciales eléctricos	206
3.7. Métodos de aplicación de la protección catódica	217
IV. PROTECCION CATODICA POR ANODOS GALVANICOS	219
4.1. Principios generales	219
4.2. Consideraciones para el diseño	220
4.3. Elementos y tipos de ánodos	223
4.4. Dimensionamiento de los sistemas galvanicos	241
V. PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA	260
5.1. Principios generales	260
5.2. Consideraciones para el diseño	263
5.3. Elementos, rectificadores y ánodos inertes	265
5.4. Dimensionamiento de los sistemas por corriente impresa	302

VI. LIMITACIONES DEL USO DE LA PROTECCION CATODICA	319
6.1. Fuentes de corrientes parásitas	319
6.2. Factores de interferencia catódica	331
6.2.1. Generalidades	331
6.2.2. Casos de interferencia catódica en tuberías enterradas	333
6.2.3. Factores que afectan a la interferencia catódica	338
6.2.4. Determinación de problemas de interferencia catódica	342
6.2.5. Métodos para el control de la interferencia catódica	350
6.3. Cálculo de la interferencia catódica en tuberías enterradas cercanas	359
6.4. Presencia de líneas de Transmisión cercanas a las tuberías	370
6.4.1. El fenómeno eléctrico	370
6.4.2. Medios de prevención contra la interferencia causada por líneas de Transmisión	374
VII. APLICACIONES ADICIONALES DE LA PROTECCION CATODICA	379
7.1. En estructuras de muelles	379
7.1.1. Introducción	379
7.1.2. Características del agua de mar ..	380
7.1.3. Corrosión del acero en agua de mar	381
7.1.4. Sistemas de protección catódica ..	383
7.2. En tanques de almacenamiento	389
7.2.1. Introducción	389
7.2.2. Tipos de tanques de almacenamiento	390
7.2.3. Protección catódica interna	392
7.2.4. Protección catódica externa	395
7.2.5. Influencia de los aterrizamientos de los tanques, sobre la protección catódica	403
7.2.6. Criterios de protección	405
7.3. En los pies y anclajes de las torres de líneas de Transmisión	407
7.3.1. Protección catódica para los pies de las torres de las líneas de Transmisión	407
7.3.2. Protección catódica para anclajes.	408
7.3.3. Instalación de los ánodos galvánicos	410
7.3.4. Procedimiento para el estudio de la aplicación de un sistema de protección catódica en torres de líneas de Transmisión	411

7.4. En transformadores ubicados en cámaras subterráneas	412
7.4.1. Introducción	412
7.4.2. Pruebas de protección catódica en transformadores subterráneos.	414
7.4.3. Conclusiones sobre las pruebas de protección catódica	425
7.4.4. Guía de instalación de un sistema de protección catódica en transformadores subterráneos ...	426
VIII. PROYECTO DE CALCULO DE PROTECCION CATODICA DE UNA TUBERIA ENTERRADA	431
8.1. Especificaciones para la protección catódica	431
8.2. Tipos de suelos y clase de tuberías ...	435
8.2.1. Naturaleza del terreno	435
8.2.2. Clase de tubería	439
8.3. Elección del tipo de protección catódica	440
8.3.1. Selección del sistema	440
8.3.2. Proyecto del cálculo para el dimensionamiento del sistema de Protección catódica por corriente impresa para el poliducto Tres Bocas-Pascuales	446
8.3.3. Determinación del perfil de potenciales teóricos a partir de la característica de atenuación de la tubería	467
8.4. Ubicación de elementos protectores	474
8.5. Mediciones y control de la protección..	476
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	479
APENDICES	484
BIBLIOGRAFIA	490

I N D I C E D E F I G U R A S

Fig.	Pág.
1.1. Curva de polarización catódica	40
1.2. Curvas de polarización catódica y anódica de un metal en proceso de corrosión	40
1.3. Influencia de la caída óhmica del electrolito, sobre la corriente de corrosión	40
1.4. Corrosión galvánica de una tubería de acero debido a la unión eléctrica con una válvula de bronce	49
1.5. Corrosión galvánica de una tubería de acero ocasionada por su aterramiento eléctrico con varillas de cobre	49
1.6. Corrosión galvánica originada por la interconexión de una sección de tubería nueva con una tubería vieja	52
1.7. Corrosión galvánica debido a la diferencia en las condiciones de superficie de la tubería	52
1.8. Corrosión galvánica debido a la presencia de la cubierta protectora (cascarilla de laminación) sobre la tubería	52
1.9. Pila de corrosión electrolítica causada por un sistema eléctrico de tracción	64
1.10. Pila de corrosión por aereación diferencial.	76
1.11. Celda por aereación diferencial presente en el cruce de una tubería con el pavimento ...	76
1.12. Celda de corrosión ocasionada por el contacto de una tubería con suelos de diferente naturaleza	78
1.13. Macropilas de corrosión causadas por las variaciones en la resistividad eléctrica del suelo	78
1.14. Efecto del grado de humedad sobre la formación de pilas de corrosión	80
1.15. Efecto del contenido de sales solubles sobre la formación de pilas de corrosión	80

2.1.	Gráfico de pH vs potencial	91
2.2.	Medición del potencial tubería-suelo de una tubería enterrada	96
2.3.	Inspección de potenciales "sobre la línea" .	96
2.4.	Perfil de potenciales (Inspección "sobre la línea")	98
2.5.	Perfil de potenciales (Inspección con electrodo remoto)	98
2.6.	Gráfico de la corriente sobre la tubería ...	104
2.7.	Perfil de resistividades eléctricas	104
2.8.	Esquema de un voltímetro de alta resistencia	112
2.9.	Circuito básico de un voltímetro potenciométrico	112
2.10.	Circuito básico de un amperímetro	117
2.11.	Circuito de un amperímetro de resistencia cero	119
2.12.	Circuito simplificado de un Vibroground	119
2.13.	Diagrama del circuito de un Megger	124
2.14.	Diagrama del circuito de una varilla para medición de resistividades	127
2.15.	Caja para pruebas de suelos	127
2.16.	Electrodos de Cobre/Sulfato de cobre	135
2.17.	Electrodo de Plata/Cloruro de plata	135
2.18.	Determinación de una tierra eléctricamente remota	140
2.19.	Medición de la corriente sobre la tubería ..	140
2.20.	Medición de la resistencia eléctrica del revestimiento	150
2.21.	Método de los cuatro electrodos para la medición de resistividades del suelo	150

2.22.	Revestimiento de una tubería a base de esmalte de alquitrán de carbón	160
2.23.	Detector eléctrico de porosidad	160
3.1.	Pila de corrosión en una tubería metálica enterrada	172
3.2.	Circuito eléctrico equivalente de una pila de corrosión	172
3.3.	Circuito eléctrico equivalente de una estructura protegida catódicamente	176
3.4.	Prueba para la determinación del requerimiento de corriente de protección	188
3.5.	Efecto del contenido de humedad sobre la resistividad del suelo	196
3.6.	Efecto de la temperatura sobre la resistividad del suelo	196
3.7.	Variación de la densidad de corriente de protección con la resistividad del electrolito	203
3.8.	Factor de corrección de la corriente en función de la velocidad del electrolito	203
3.9	Curva de atenuación del potencial tubería-suelo en una tubería de longitud infinita ..	215
3.10.	Curva de atenuación del potencial tubería-suelo en un tramo de tubería protegida con dos puntos de drenaje	215
4.1.	Protección catódica por ánodos galvánicos ..	221
4.2.	Tipos de ánodos de magnesio	230
4.3.	Tipos de ánodos de zinc	230
4.4.	Esquema típico de una instalación para ánodos en posición vertical, en suelos que necesitan relleno	234
4.5.	Esquemas típicos de una instalación para ánodos en posición horizontal, en suelos que necesitan relleno	235
4.6.	Anodo galvánico y su relleno, acondicionados en sacos de liencillo	239

4.7.	Tipo de conexión utilizado en sistemas de Protección catódica	239
4.8.	Gráfico de diseño para cama de ánodos galvánicos instalados en posición vertical	249
4.9.	Gráfico de diseño para cama de ánodos galvánicos instalados en posición horizontal ..	249
4.10.	Gráfico de diseño para una cama continua de ánodos instalados en posición horizontal ...	252
4.11.	Ejemplos de arreglos de ánodos galvánicos a lo largo de la trayectoria de una tubería enterrada	259
5.1.	Protección catódica por corriente impresa ..	261
5.2.	Circuito básico de un rectificador monofásico de media onda	268
5.3.	Circuito básico de un rectificador monofásico tipo puente de onda completa	268
5.4.	Diagrama típico de un rectificador automático o de potencial constante	278
5.5.	Esquema de la utilización de equipos de protección en rectificadores	282
5.6.	Rectificador para montaje en poste	284
5.7.	Rectificador para montaje en piso	284
5.8.	Ejemplos de arreglos de los sistemas rectificador/cama de ánodos a lo largo de la trayectoria de una tubería enterrada	309
5.9.	Gráfico de diseño para una cama de ánodos de corriente impresa instalados en posición vertical	312
5.10.	Gráfico de diseño para una cama de ánodos de corriente impresa instalados en posición horizontal	312
5.11.	Distribución de la corriente que fluye a lo largo de la cama de ánodos	314
6.1.	Corrientes de interferencia provenientes de un sistema de transmisión eléctrica de corriente continua	322

6.2.	Interferencia ocasionada por un sistema de tracción eléctrica sobre una tubería enterrada	326
6.3.	Circuito eléctrico equivalente del proceso de corrosión electrolítica originado por un sistema de tracción eléctrica	326
6.4.	Esquema eléctrico de un equipo de drenaje tubería/riel con regulación de corriente ...	328
6.5.	Corrientes de fuga ocasionadas por una máquina de soldar de corriente continua	328
6.6.	Gradientes de potencial creados alrededor de una cama de ánodos	334
6.7.	Gradientes de potencial creados alrededor de una tubería protegida catódicamente	334
6.8.	Interferencia catódica entre dos tuberías que se cruzan	337
6.9.	Interferencia catódica entre dos tuberías con trayectorias paralelas	337
6.10.	Esquema de conexión para la utilización del método de "energización y desenergización"..	345
6.11.	Ejemplo de interferencia catódica entre una tubería protegida y varias tuberías vecinas.	345
6.12.	Utilización del método de "energización y desenergización" en tuberías con trayectorias paralelas	349
6.13.	Uso de uniones de drenaje de corriente (resistores) para el control de la interferencia catódica	355
6.14.	Uso de revestimientos anticorrosivos para el control de la interferencia catódica	355
6.15.	Uso de ánodos galvánicos para el control de la interferencia catódica	358
6.16.	Uso de barreras eléctricas para el control de la interferencia catódica	358
6.17.	Interferencia catódica: efecto del ánodo, efecto de la estructura y efecto neto	368

6.18.	Curvas para determinar la corriente de interferencia causada por el efecto de la estructura	368
7.1.	Variación de la tasa de corrosión de un pilote de acero sumergido	386
7.2.	Protección catódica galvánica para muelles..	386
7.3.	Protección catódica por corriente impresa para muelles	388
7.4.	Esquema básico de Protección catódica para pilotes en forma de plancha	388
7.5.	Protección catódica galvánica en el interior de tanques de almacenamiento	394
7.6.	Esquemas típicos de Protección catódica galvánica para el exterior de tanques de almacenamiento	398
7.7.	Esquemas típicos de Protección catódica por corriente impresa para el exterior de tanques de almacenamiento	402
7.8.	Prueba de potenciales tanque-suelo mediante el uso de un ánodo galvánico ubicado debajo del tanque del transformador	417
7.9.	Prueba de potenciales tanque-suelo mediante el uso de un ánodo galvánico ubicado a un lado del tanque del transformador	417
7.10.	Instalación para pruebas de un sistema de Protección catódica en transformadores subterráneos	420
7.11.	Datos de Protección catódica usando ánodos de magnesio en suelos de baja resistividad..	421
7.12.	Datos de Protección catódica usando ánodos de zinc en suelos de baja resistividad	421
7.13.	Datos de Protección catódica usando un sistema de corriente impresa en suelos de baja resistividad	421
7.14.	Datos de Protección catódica usando ánodos de magnesio en suelos de alta resistividad..	423

7.15.	Datos de Protección catódica usando un sistema de corriente impresa en suelos de alta resistividad	423
7.16.	Esquema que representa la mejor instalación de un sistema de Protección catódica para transformadores subterráneos	428
7.17.	Esquema que representa una instalación aceptable de un sistema de Protección catódica para transformadores subterráneos	429
8.1.	Planimetría del recorrido del poliducto Tres Bocas-Pascuales	434
8.2.	Perfil de resistividades eléctricas a lo largo de la trayectoria del poliducto Tres Bocas-Pascuales	438
8.3.	Detalle de la instalación de la cama de ánodos inertes para la Protección catódica del poliducto Tres Bocas-Pascuales	455
8.4.	Detalle de la instalación del sistema Rectificador/cama de ánodos para la Protección catódica del poliducto Tres Bocas-Pascuales.	460
8.5.	Perfil de potenciales teóricos basado en la característica de atenuación del poliducto Tres Bocas-Pascuales	475
8.6.	Localización de las estaciones de prueba para las mediciones eléctricas y control de la corrosión del poliducto Tres Bocas-Pascuales	478

I N D I C E D E T A B L A S

N ^o		Pág.
I	Serie electromotriz	33
II	Constantes de Tafel	37
III	Equivalentes electroquímicos	43
IV	Serie galvánica de varios metales y aleaciones en agua de mar	46
V	Serie galvánica práctica	47
VI	Pérdida de peso de varios metales sujetos a corrosión electrolítica	62
VII	Relación entre la conductividad del suelo y su corrosividad	102
VIII	Voltajes recomendados para la utilización del "detector holiday"	159
IX	Resistividades eléctricas de diferentes clases de terrenos	192
X	Efectos de la salinidad en la resistividad del suelo	195
XI	Características físicas y eléctricas de tuberías de acero e hierro forjado de diversos diámetros	199
XII	Valores típicos de requerimientos de corriente para estructuras de acero en diferentes medios ambientes	202
XIII	Factor de corrección de corriente en función de la velocidad del electrolito	204
XIV	Eficiencias medias de diversos tipos de revestimientos	205
XV	Comparación entre los sistemas galvánicos y por corriente impresa	218
XVI	Composiciones químicas de ánodos de zinc comerciales	225
XVII	Composiciones químicas de ánodos de magnesio comerciales	225

XXXV	Potenciales tanque-suelo obtenidos en pruebas efectuadas a un transformador	415
XXXVI	Potenciales tanque-suelo en un transformador conectado a un ánodo de magnesio	424
XXXVII	Valores de resistividad eléctrica del suelo a lo largo del poliducto Tres Bocas-Pascuales	437

I N T R O D U C C I O N

Con el desarrollo industrial que atravieza el Ecuador, especialmente en la industria petrolera, y con la implementación de nuevos proyectos de suministro de agua potable, la utilización de estructuras metálicas enterradas o sumergidas, tales como polductos, gasoductos, acueductos, etc, han sido cada vez más frecuentes. En consecuencia, los problemas de corrosión han ido aumentando en grandes proporciones, obligando al perfeccionamiento de nuevas técnicas para su combate y control, entre las cuales se encuentra la Protección catódica.

Mediante la utilización de la Protección catódica se consigue mantener las instalaciones antes referidas, completamente libres de corrosión por un extenso período de tiempo, que depende de la vida útil del sistema de protección catódica que haya sido utilizado. La gran ventaja de esta técnica es la de permitir el control seguro de la corrosión en instalaciones que, por estar enterradas o sumergidas, no pueden ser inspeccionadas o revestidas periódicamente, como sucede con las estructuras metálicas aéreas.

Su aplicación se vuelve aún más económica y más simple cuando las superficies a proteger son previamente revestidas. Su finalidad, en estos casos, consiste en

complementar la acción protectora de los revestimientos que, por mejor y bien aplicados que estén, siempre contienen poros y fallas que los vuelven deficientes con el pasar del tiempo. La Protección catódica y el revestimiento se convierten así, en aliados importantes que, de manera económica y segura, garantizan la integridad física a lo largo de los años de las estructuras metálicas enterradas o sumergidas, las cuales representan un patrimonio valioso.

Por todas estas consideraciones y con la finalidad de que se tome conciencia de la importancia, tanto técnica como económica, que representa el conservar libres de corrosión, a las tuberías enterradas, especialmente aquellas instaladas por organismos del Estado, garantizando con esto la seguridad operacional y la ausencia de costos por reposición de las partes afectadas; es que el presente trabajo propone la aplicación del sistema de Protección catódica a todas las tuberías enterradas o en proyecto de instalación, que por su carácter de estratégicas, se constituyen en instalaciones de vital importancia para el desarrollo y el bienestar del País.

CAPITULO I

CAUSAS DE LA CORROSION EN TUBERIAS ENTERRADAS

1.1. FUNDAMENTOS Y ACCION ELECTRICA DE LA CORROSION

La corrosión en tuberías instaladas bajo tierra, así como en otros ambientes naturales, está asociada con el flujo de corriente eléctrica entre áreas de diferentes potenciales eléctricos. Esta diferencia de potencial puede ser causada por variaciones en la composición química del suelo o por la no homogeneidad del material del cual está construida la tubería.

Debido a que la corriente fluye del área de mayor potencial, a través del suelo, hacia el área de menor potencial, se forma la llamada pila de corrosión. Cuando esto sucede, el metal que libera corriente hacia el suelo se corroe, adquiriendo comportamiento anódico, siendo llamado el ánodo y el metal que recibe la corriente del suelo queda protegido de la corrosión, adquiriendo comporta-

miento catódico, siendo llamado el cátodo de la pila de corrosión formada.

De lo indicado anteriormente y para poder comprender el fenómeno corrosivo como el resultado de una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones, es necesario disponer de algunos principios elementales de química y electroquímica, los cuales se enunciarán brevemente a continuación.

1.1.1. ELECTROQUIMICA DE LA CORROSION

Debido a que la corrosión metálica es casi siempre un proceso electroquímico, es de vital importancia comprender la naturaleza básica de las reacciones electroquímicas.

Una reacción electroquímica se define como una reacción química en la cual existe una transferencia de electrones en donde, los electrones son liberados por una reacción anódica (oxidación) y simultáneamente son absorbidos por una reacción catódica (reducción).

La definición anterior puede ser mejor comprendida analizando una reacción típica de

corrosión como por ejemplo la reacción del zinc con el ácido clorhídrico dada por:



La cual queda mejor expresada recordando que el ácido clorhídrico y el cloruro de zinc están ionizados en soluciones acuosas, por lo que podemos escribir:



Analizando esta reacción, se observa que el ión cloruro aparece en ambos miembros de la ecuación y no es alterado por la reacción de corrosión, es decir, no existe cambio en la valencia del ión cloruro. De acuerdo a lo anterior, la ecuación (1-2) puede ser escrita en forma simplificada como:



Esta última ecuación nos indica que la corrosión del zinc en ácido clorhídrico consiste simplemente en la reacción entre el zinc y los iones hidrógeno, produciéndose iones zinc y gas hidrógeno. Durante esta

reacción, el zinc es oxidado a iones zinc, es decir, ha ganado electrones y simultáneamente, los iones hidrógeno son reducidos a gas hidrógeno perdiendo electrones.

De acuerdo a esto, la reacción (1-3) puede ser simplificada aún más si la dividimos en una reacción de oxidación y otra de reducción:



La suma de estas dos reacciones parciales nos da la ecuación total de oxi-reducción (1-3).

Todo proceso de corrosión requiere por lo menos de una reacción de oxidación y otra de reducción, con la consecuente transferencia de electrones, por lo que podemos concluir, que las reacciones de la corrosión son electroquímicas por naturaleza y debido a esto el proceso de corrosión puede ser dividido en proceso anódico y proceso catódico.

a. Proceso anódico:

Es el proceso de corrosión propiamente dicho, donde ocurre la reacción anódica que es caracterizada por la producción de electrones. Genéricamente se lo representa por:



Donde "n" es el número de valencia del metal.

b. Proceso catódico:

Este proceso está caracterizado por el consumo de electrones producidos en el proceso de la corrosión; y puede ser representado por las siguientes reacciones:



o:



1.1.2. POTENCIAL DE ELECTRODO

La inmersión de un metal en soluciones electrolíticas, conteniendo iones del mismo metal, determina el establecimiento de una diferencia de potencial entre la fase sólida y líquida. Esta diferencia de potencial es, simultáneamente, de naturaleza eléctrica y química, es por esto que se la denomina diferencia de potencial electroquímico y es llamada normalmente potencial de electrodo. Dicho potencial de electrodo puede llegar a ser determinado, en función de la pureza del metal y de la concentración de los iones en el medio electrolítico, mediante la siguiente ecuación desarrollada por Nernst:

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{\text{Est. Oxida.}}}{a_{\text{Est. Red.}}} \quad (1-9)$$

Donde:

E = Potencial de electrodo (V).

E^o = Potencial patrón (V).

R = Constante de los gases perfectos.

T = Temperatura, en grados Kelvin.

n = Número de electrones involucrados en el proceso electroquímico.

F = Constante de Faraday.

$a_{\text{Est.Oxid.}}$ = Actividad del estado oxidado del electrodo.

$a_{\text{Est.Red.}}$ = Actividad del estado reducido del electrodo.

Para fines prácticos, se usan los valores:

$R = 8,314 \text{ J } ^\circ\text{K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$.

$T = 298 \text{ } ^\circ\text{K}$ (25 $^\circ\text{C}$).

$F = 96.500 \text{ Coulombs}$.

Transformando el logaritmo neperiano en decimal, se puede escribir la ecuación (1-8) en la siguiente forma:

$$E = E^{\circ} + \frac{0,0592}{n} \log \frac{a_{\text{Est.Oxid.}}}{a_{\text{Est.Red.}}} \quad (1-10)$$

Convencionalmente, para el caso de un metal puro inmerso en una solución diluida, la actividad del estado reducido es unitaria y, la actividad del estado oxidado es igual a la concentración en molaridad del mismo metal; por lo tanto, la ecuación (1-10) puede ser escrita de la siguiente forma:

$$E = E^{\circ} + \frac{0,0592}{n} \log a_{\text{Red.oxid.}} \quad (1-11)$$

En la práctica, los valores de E° han sido tabulados en forma de serie electromotriz siguiendo la convención de signos recomendada por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) en su XVII Conferencia.

1.1.3. SERIE ELECTROMOTRIZ

La serie electromotriz es un ordenamiento de los potenciales de oxi-reducción de todos los metales y determina el potencial solamente para metales en concentraciones particulares de sus propias sales a 25 °C. En otros electrolitos, las posiciones relativas entre los metales pueden cambiar. La Tabla I muestra la serie electromotriz en la que el electrodo de hidrógeno ha sido utilizado como referencia.

La serie electromotriz es muy útil para los estudios de corrosión ya que ayuda a predecir si un metal va a ser o no corroído en un ambiente dado; lo cual puede establecerse

siguiendo la siguiente regla generalizada:

En cualquier reacción electroquímica, la media celda más negativa tiende a oxidarse (corroerse); mientras que la media celda más positiva tiende a reducirse.

TABLA I
Serie electrotrix

Reacción en el electrodo	Potencial de reducción E° (voltios)	
$\text{Li} = \text{Li}^+ + e^-$	- 3,045	Activo ↑ Referencia ↓ Noble
$\text{K} = \text{K}^+ + e^-$	- 2,925	
$\text{Ca} = \text{Ca}^{+2} + 2e^-$	- 2,870	
$\text{Na} = \text{Na}^+ + e^-$	- 2,714	
$\text{Mg} = \text{Mg}^{+2} + 2e^-$	- 2,370	
$\text{Al} = \text{Al}^{+3} + 3e^-$	- 1,660	
$\text{Ti} = \text{Ti}^{+2} + 2e^-$	- 1,630	
$\text{Mn} = \text{Mn}^{+2} + 2e^-$	- 1,180	
$\text{Zn} = \text{Zn}^{+2} + 2e^-$	- 0,763	
$\text{Cr} = \text{Cr}^{+3} + 3e^-$	- 0,740	
$\text{Fe} = \text{Fe}^{+2} + 2e^-$	- 0,440	
$\text{Cd} = \text{Cd}^{+2} + 2e^-$	- 0,403	
$\text{Co} = \text{Co}^{+2} + 2e^-$	- 0,277	
$\text{Ni} = \text{Ni}^{+2} + 2e^-$	- 0,250	
$\text{Sn} = \text{Sn}^{+2} + 2e^-$	- 0,136	
$\text{Pb} = \text{Pb}^{+2} + 2e^-$	- 0,126	
$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2e^-$	0,000	
$\text{Cu} = \text{Cu}^{+2} + 2e^-$	+ 0,337	
$\text{Ag} = \text{Ag}^+ + e^-$	+ 0,799	
$\text{Hg} = \text{Hg}^{+2} + 2e^-$	+ 0,850	
$\text{Pd} = \text{Pd}^{+2} + 2e^-$	+ 0,987	
$\text{Au} = \text{Au}^{+3} + 3e^-$	+ 1,500	

Fuente: GENTIL, V., Corrosão, Guanabara Dois, R.J., Brasil, 1962.

1.1.4. POLARIZACION

Todo metal sumergido en una solución conteniendo sus propios iones, en ausencia de reacciones que interfieran, posee un potencial E , el cual es calculado por la ecuación de Nernst (1-9). Si una corriente circulara por dicho metal (electrodo), el potencial variará, y el nuevo valor de potencial E' dependerá de la corriente aplicada. La diferencia entre estos dos potenciales es conocida como sobrepotencial:

$$\eta = E' - E \quad (1-12)$$

Puede ocurrir, que debido a las diversas reacciones que intervienen en un proceso electroquímico, generalmente el potencial inicial de un metal sea diferente al potencial de equilibrio, siendo éste el caso más común que se presenta en un proceso de corrosión. A dicho potencial de equilibrio se lo conoce como potencial de corrosión. El potencial de corrosión también varía al circular una corriente por el electrodo, siendo esta variación conocida como "polarización del electrodo".

Cuando dos metales diferentes son conectados y sumergidos en un electrolito, se establece una diferencia de potencial entre ambos. Al cerrarse el circuito externo, se observa una disminución de esa diferencia de potencial con el tiempo. El potencial del ánodo se aproxima al del cátodo y el del cátodo se aproxima al del ánodo. Se tiene entonces lo que se llama polarización de los electrodos: polarización anódica en el ánodo y polarización catódica en el cátodo.

Las causas de esa variación pueden ser varias, pudiéndose citar entre ellas: las reacciones secundarias que conducen a la formación de películas protectoras o al refuerzo de la película ya existente, la destrucción de películas ya existentes y fenómenos de absorción de gases contenidos en la solución.

La relación entre la polarización de un metal y la densidad de corriente eléctrica correspondiente, fue establecida por la llamada Ley de Tafel. La expresión matemática de esta ley es conocida como ecuación de Tafel, y viene dada por:

$$E' - E = n = \beta \log \frac{i}{i_0} \quad (1-13)$$

Donde:

E' = Potencial del metal en el electrolito.

E = Potencial de equilibrio del metal en el electrolito (en ausencia de corriente eléctrica externa).

n = Polarización, que puede ser anódica o catódica.

β = Constante de Tafel.

i = Densidad de corriente eléctrica (A/cm²).

i_0 = Densidad de corriente de cambio, siendo ésta una constante para cada metal en un medio dado (A/cm²).

La Tabla II muestra valores de β , i_0 y de n , en base de una densidad de corriente $i = 1 \text{ ma/cm}^2$, de algunos metales con referencia a un electrodo de hidrógeno en equilibrio. Estos valores de n son llamados sobrepotencial del hidrógeno con respecto a un metal dado, el cual es muy utilizado en corrosión.

TABLA II
Constantes de Tafel

Sobrepotencial del Hidrógeno $i = 1 \text{ mA/cm}^2$					
Metal	Temp.	Solución	β (V)	i_0 (A/cm ²)	n (V)
Pt	20 °C	1N HCl	0,03	10^{-6}	0,00
Au	20 °C	1N HCl	0,05	10^{-6}	0,15
Ag	20 °C	0,1N HCl	0,09	5×10^{-7}	0,30
Ni	20 °C	0,1N HCl	0,10	8×10^{-7}	0,31
Fe	16 °C	1N HCl	0,15	10^{-6}	0,45
	25 °C	4% NaCl	0,10	10^{-7}	0,40
Cu	20 °C	0,1N HCl	0,12	2×10^{-7}	0,44
Al	20 °C	2N H ₂ SO ₄	0,10	10^{-10}	0,70
Sn	20 °C	1N HCl	0,15	10^{-8}	0,75
Hg	20 °C	0,1N HCl	0,12	7×10^{-13}	1,10
Pb	20 °C	0,01 - 0N HCl	0,12	2×10^{-13}	1,16

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion and corrosion control, John Wiley & Sons, New York, 1967

La graficación de la ecuación (1-13) es conocida como curva de polarización. La Fig. 1.1 muestra una curva típica de polarización catódica.

Cuando las reacciones anódicas y catódicas se realizan entre dos metales, ellas se polarizan mutuamente. Usando las curvas de polarización para dichas reacciones, Fig. 1.2, se pueden obtener los siguientes resultados:

a. Cuando I es cero, E_a y E_c representan

los potenciales de equilibrio de las medias celdas correspondientes;

b. el ánodo se vuelve más noble y el cátodo se vuelve más activo, teniéndose los valores de potenciales polarizados E'_a y E'_c ;

c. el voltaje de la pila formada es igual a la corriente I' que fluye en el circuito multiplicada por la resistencia total del circuito de corrosión R , la cual es la suma de las resistencias de los conductores metálicos y electrolíticos y de las resistencias de las películas formadas en la superficie del metal (óxido o productos de corrosión). Por lo tanto:

$$(E'_c - E'_a) = I'R \quad (1-14)$$

Si el ánodo y el cátodo estuviesen en cortocircuito y el electrolito fuese de alta conductividad, R sería muy pequeña y la corriente de corrosión tendría su valor máximo.

Teóricamente, la intersección de las curvas de polarización nos determina el potencial y la corriente de corrosión; pero en la realidad, el potencial de corrosión no es exactamente el potencial de intersección de las curvas anódica y catódica ya que existe una polarización por resistencia (caída óhmica). Esto hace que la corriente de corrosión sea menor que la determinada teóricamente, tal como se muestra en la Fig. 1.3. La caída óhmica en la práctica es pequeña, del orden de 1 mV, ya que el cátodo y el ánodo están generalmente muy próximos.

Evidentemente, para los procesos de corrosión, el fenómeno de la polarización es importante puesto que los potenciales de polarización se oponen a los potenciales calculados haciendo que las diferencias de potenciales de las pilas, en la práctica, tengan valores inferiores a los calculados. Cuanto mayor sea la polarización, menor será su acción perjudicial en la corrosión de un metal.

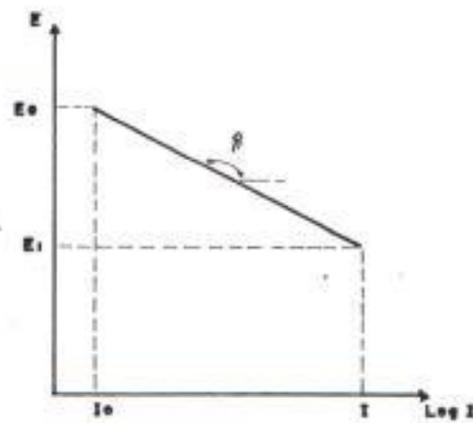


Fig. 1.1.- CURVA DE POLARIZACION CATODICA

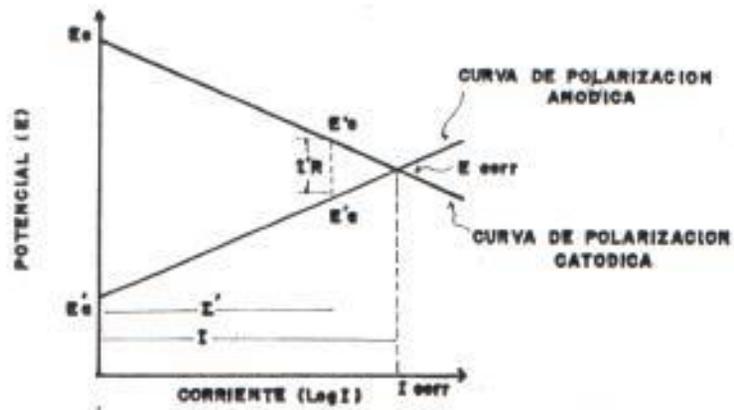


Fig. 1.2.- CURVAS DE POLARIZACION CATODICA Y ANODICA DE UN METAL EN PROCESO DE CORROSION.

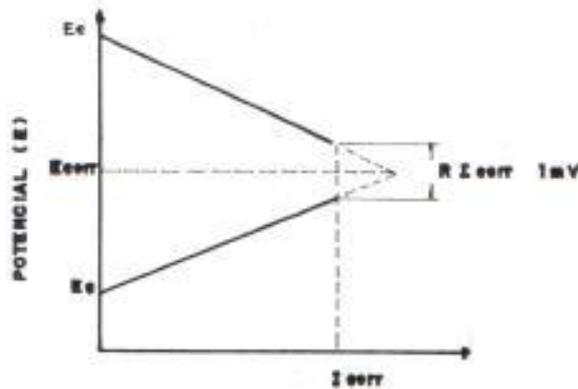


Fig. 1.3.- INFLUENCIA DE LA CAIDA OHMICA DEL ELECTROLITO, SOBRE LA CORRIENTE DE CORROSION.

1.2. CORROSION GALVANICA

1.2.1. MECANISMO DE LA CORROSION GALVANICA

Una corrosión por pares galvánicos, ocurre cuando dos metales de potenciales diferentes están en contacto eléctrico dentro de un electrolito. La diferencia de potencial existente causa un flujo de corriente (transferencia de electrones) desde un metal hacia el otro. El metal desde el cual la corriente fluye (ánodo), se corroerá y el metal hacia el cual la corriente fluye (cátodo), tenderá a protegerse de la corrosión.

Quando la corriente sale del ánodo, ésta lleva partículas cargadas del metal hacia el electrolito, lo que ocasiona que el metal se corroa y pierda peso. En general, la cantidad de metal que se corroe en el área anódica puede ser calculada usando una relación cuantitativa que existe entre la cantidad de corriente que pasa através de un electrolito y la masa del metal que se pierde. Esta relación se la conoce con el nombre de Ley de Faraday y puede ser expre-

sada como:

$$W = Kit \quad (1-15)$$

Donde:

W = Pérdida de peso del metal corroído (gr).

K = Equivalente electroquímico (peso del metal liberado por un $F = 96.500$ Coulombs).
Ver Tabla III.

i = Intensidad de corriente (A).

t = Tiempo (segundos).

En lo que se refiere al equivalente electroquímico de un determinado metal, éste lo podemos obtener mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{e}{F} = \frac{A}{F \cdot z} \quad (1-16)$$

Donde:

e = Peso equivalente (gramos/mol).

F = Número de Faraday (96.500 Coulomb/mol).

A = Peso atómico (gramos).

z = Valencia del elemento considerado.

TABLA III
Equivalentes electroquímicos

Elemento	Símbolo	Peso atómico A (g)	Valencia z	Equivalente electroquímico K	
				mg/C	g/Ah
Aluminio	Al	26,98	3	0,09320	0,33551
Cadmio	Cd	112,40	2	0,56241	2,0967
Calcio	Ca	40,08	2	0,20768	0,74763
Cromo	Cr	52,00	3	0,17962	0,64664
			6	0,089814	0,32332
Cobalto	Co	58,93	2	0,30535	1,0993
Cobre	Cu	63,54	1	0,65847	2,3705
			2	0,32924	1,1852
Oro	Au	196,97	1	2,0412	7,3484
			3	0,68041	2,4495
Hidrógeno	H	1,008	1	0,010446	0,037605
Hierro	Fe	55,85	1	0,57878	2,0836
			2	0,28939	1,0418
			3	0,19293	0,69454
Ploomo	Pb	207,2	2	1,0736	3,8650
Magnesio	Mg	24,31	2	0,12596	0,45347
Manganeso	Mn	54,938	2	0,28466	1,0248
Mercurio	Hg	200,59	1	2,0787	7,4834
			2	1,0394	3,7417
Níquel	Ni	58,71	2	0,30421	1,0951
Oxígeno	O	16,00	2	0,082905	0,29846
Paladio	Pd	106,4	2	0,55132	1,9847
Platino	Pt	195,09	2	1,0109	3,6391
			4	0,50544	1,8196
Potasio	K	39,102	1	0,40522	1,4588
Plata	Ag	107,868	1	1,1178	4,0242
Sodio	Na	22,99	1	0,23825	0,85769
Estaño	Sn	118,69	2	0,61500	2,2140
			4	0,30750	1,1070
Titanio	Ti	47,90	4	0,12410	0,44675
Zinc	Zn	65,37	2	0,33872	1,2194

Fuente: FINK, D.G. and BEATY, H.W., Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw-Hill Inc, New York, 1978

1.2.2. SERIE GALVANICA

Las limitaciones de la serie electromotriz para predecir relaciones galvánicas, así como la no inclusión de aleaciones dentro de ella, han determinado el desarrollo de la llamada serie galvánica. Esta serie es un arreglo de metales y aleaciones de acuerdo a los potenciales medidos en un ambiente dado. Los valores de los potenciales pueden cambiar de un ambiente a otro, o en el mismo ambiente cuando es influenciado por factores tales como: temperatura, aereación y velocidad de movimiento.

La tendencia relativa de los metales a corroerse, permanece la misma en muchos de los medios en los cuales se han realizado pruebas; consecuentemente, la posición relativa de metales y aleaciones en una serie galvánica puede ser considerada la misma para la mayoría de los medios ambientes.

Como ejemplo, una serie galvánica para algunos metales y aleaciones en contacto con agua de mar es dada en la Tabla IV. En esta serie, los metales y aleaciones encerrados

entre corchetes, forman grupos que no tienen una fuerte tendencia para reaccionar entre ellos y corroerse; por lo tanto pueden ser empleados juntos con relativa seguridad. Esto es debido a que están lo suficientemente próximos en la serie y el potencial generado entre ellos es muy pequeño. A medida que los metales o aleaciones se apartan más en la serie, mayor será el potencial generado y más acelerada la corrosión del metal menos noble.

Idealmente se requerirían series galvánicas para cada medio ambiente, lo cual resultaría impráctico. Por tal motivo, se ha desarrollado la denominada serie galvánica práctica (Tabla V), la cual es comunmente empleada en trabajos de control de corrosión en tuberías.

Los valores de potenciales dados en la Tabla V, son potenciales típicos, normalmente observados en suelos neutros y agua, medidos con respecto a un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre, el cual será estudiado en detalle en el Capítulo II.

TABLA IV
Serie galvánica de varios metales y aleaciones en agua de mar

Magnesio y aleaciones de magnesio	<p style="text-align: center;">↑</p> <p style="text-align: center;">Elemento Activo o Anódico</p>
Zinc	
Aluminio comercialmente puro (1100)	
Café	
Aluminio 2024 (4,5 Cu - 1,5 Mg - 0,6 Mn)	
Acero o hierro	
Hierro fundido	
Acero inoxidable cromado, 13 % Cr (Activo)	
Ni-Resistente (Hierro fundido con alto porcentaje de Níquel)	
18-8 Acero inoxidable	
18-8 Acero inoxidable, Mo (Activo)	
Soldaduras de estaño-plomo	
Plomo	
Estaño	
Níquel	
Inconel (80 Ni, 13 Cr, 7 Fe) (Activo)	
Hastelloy B (60 Ni, 30 Mo, 6 Fe, 1 Mn)	
Chlorimet 2 (66 Ni, 32 Mo, 1 Fe)	
Latón (Cu-Zn)	
Cobre	
Bronce (Cu-Sn)	
Caproníquel (60-90 Cu, 40-10 Ni)	
Monel (70 Ni, 30 Cu)	
Soldadura de plata	<p style="text-align: center;">↓</p> <p style="text-align: center;">Elemento Pasivo o Catódico</p>
Níquel (Pasivo)	
Inconel (Pasivo)	
Acero inoxidable cromado 11 - 30 % Cr (Pasivo)	
18-8 Acero inoxidable (Pasivo)	
18-8 Acero inoxidable, Mo (Pasivo)	
Hastelloy C (62 Ni, 17 Cr, 15 Mo)	
Chlorimet 3 (62 Ni, 18 Cr, 18 Mo)	
Plata	
Titanio	
Grafito	
Oro	
Platino	

Fuente: FINK, D.G. and BEATY, H.W, Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw-Hill Inc, New York, 1978.

TABLA V
Serie galvánica práctica

Metal o aleación	Voltios
Magnesio comercialmente puro	- 1,75
Aleación de magnesio (6% Al - 3% Zn - 0,15% Mn)	- 1,6
Zinc	- 1,1
Aleación de aluminio (5% Zn)	- 1,05
Aluminio comercialmente puro	- 0,8
Acero (limpio y brillante)	- 0,5 a - 0,8
Acero (oxidado)	- 0,2 a - 0,5
Hierro fundido (no grafitizado)	- 0,5
Plomo	- 0,5
Acero en concreto	- 0,2
Cobre, latón o bronce	- 0,2
Hierro fundido con alto contenido de silicio	- 0,2
Cascarilla de laminación	- 0,2
Carbón, grafito o coque	+ 0,3

Fuente: PEABODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967.

1.2.3. CELDAS DE CORROSION GALVANICA EN TUBERIAS

Este tipo de celdas se establecen cuando materiales metálicos diferentes, y por tanto de diferentes potenciales naturales, son empleados en la construcción e instalación de tuberías; siempre y cuando, exista un contacto eléctrico entre dichos metales y a la vez, que estén sumergidos en un electrolito común como es el caso de los suelos o el agua. Bajo tales condiciones, se establece una diferencia de potencial entre los metales involucrados cuya magnitud la pode-

mos obtener a partir de la serie galvánica práctica (Tabla V).

Como se estudió en el numeral 1.2.1., la diferencia de potencial establecida dará origen a un flujo de corriente, através del suelo, desde el metal con potencial más electronegativo (ánodo), el cual sufrirá la acción corrosiva, hacia el metal con potencial menos electronegativo (cátodo), el mismo que quedará protegido de la corrosión. Las Figs. 1.4 y 1.5 muestran ejemplos de corrosión galvánica debido al empleo de metales diferentes en la instalación de tuberías.

Desafortunadamente, la corrosión galvánica no está limitada solamente al contacto de metales diferentes, reconocibles fácilmente, como el acero y el cobre. Un potencial galvánico puede desarrollarse entre superficies del mismo metal, como sucede en los siguientes casos:

- a. Si una sección de tubería nueva es interconectada a una tubería vieja, la tubería nueva sufrirá una corrosión rela-

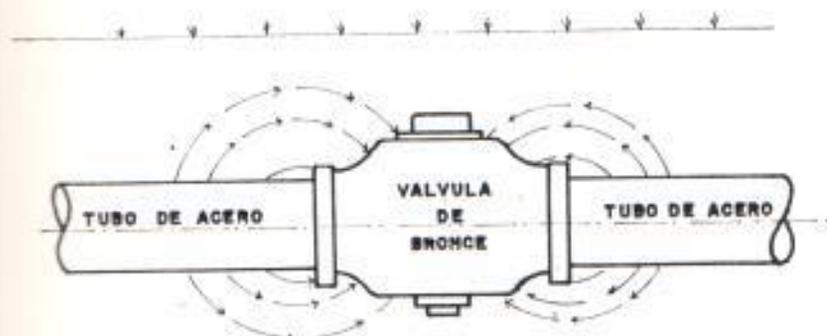


Fig. 1.4.- CORROSION GALVANICA DE UNA TUBERIA DE ACERO DEBIDO A LA UNION ELECTRICA CON UNA VALVULA DE BRONCE.

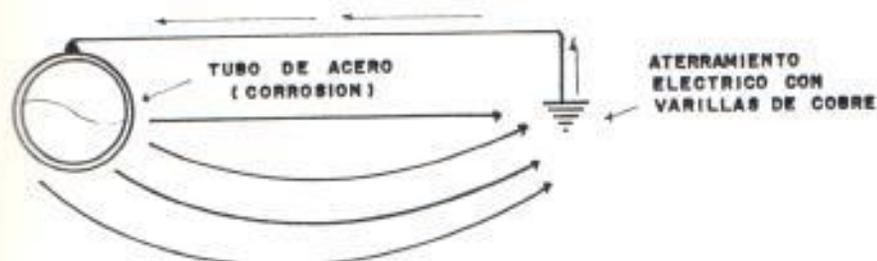


Fig. 1.5.- CORROSION GALVANICA DE UNA TUBERIA DE ACERO OCASIONADA POR SU ATERRAMIENTO ELECTRICO CON VARILLA DE COBRE

tivamente rápida; debido a que el acero nuevo se comporta anódicamente con respecto al acero viejo, tal como se puede deducir de la observación de la Tabla V. La Fig. 1.6 ilustra la trayectoria del flujo de la corriente que se establece en una interconexión de una tubería nueva con una vieja.

- b. Otro tipo de celda galvánica es la que se produce por diferencias en las condiciones de superficie de la tubería metálica. Por ejemplo: la superficie rasguñada de una tubería actúa como ánodo activo en relación al resto de ella, poco después que ésta es enterrada. Lo mismo sucede con las superficies cortadas brillantes, como las roscas de los tubos adyacentes a un acoplamiento, las cuales se comportan como áreas anódicas con respecto a las superficies lisas tal como se muestra en la Fig. 1.7.

- c. La capa de óxido de hierro, comúnmente llamada "cascarilla de laminación", formada sobre la superficie de la tubería durante su manufactura, actúa como un

metal no similar con respecto a la pared de la tubería. Analizando la Tabla V, la tubería adquirirá un comportamiento anódico con respecto a la cascarilla de laminación, pudiendo inclusive llegar a perforar las paredes de la tubería una vez que ésta es enterrada (Fig. 1.8).

- d. Las superficies deformadas son anódicas con respecto a las no, o menos, deformadas; por ejemplo las partes dobladas de los tubos.
- e. Los aceros al carbono, grandemente utilizados en instalaciones enterradas o sumergidas, no son homogéneos; ya que poseen inclusiones no metálicas, variaciones de composición química y tensiones diferentes, resultantes de los procesos de fabricación y soldaje. Esas variaciones hacen que la superficie del acero se comporte como si estuviese constituida de materiales metálicos diferentes. Las pilas de corrosión, formadas a lo largo de la superficie del acero, pueden ser microscópicas o macroscópicas; y la intensidad del proceso corrosivo depen-

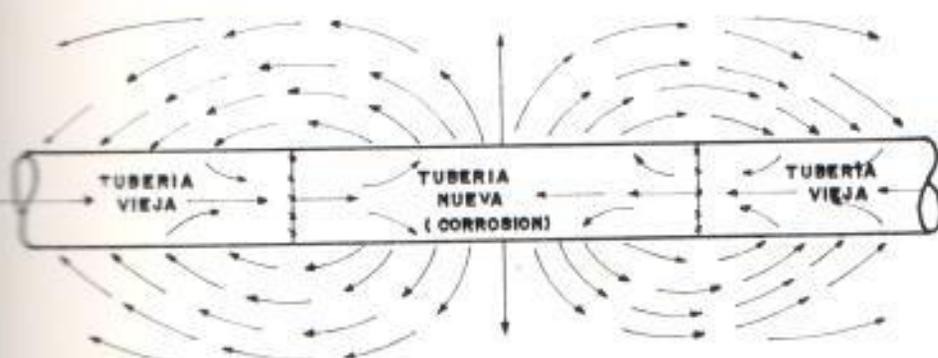


Fig. 1.6.- CORROSION GALVANICA ORIGINADA POR LA INTERCONEXION DE UNA SECCION DE TUBERIA NUEVA CON UNA TUBERIA VIEJA.

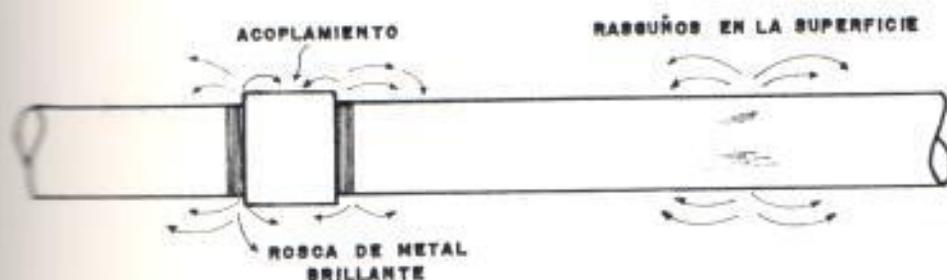


Fig. 1.7.- CORROSION GALVANICA DEBIDO A LA DIFERENCIA EN LAS CONDICIONES DE SUPERFICIE DE LA TUBERIA.

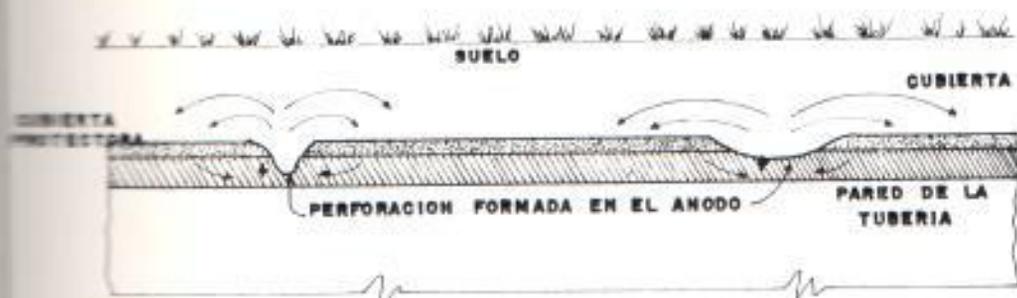


Fig. 1.8.- CORROSION GALVANICA DEBIDO A LA PRESENCIA DE LA CUBIERTA PROTECTORA (CASQUILLA DE LAMINACION) SOBRE LA TUBERIA.

derá de la magnitud de la diferencia de potencial que se establece en las pilas por estas circunstancias formadas. El ataque corrosivo, puede ser generalizado pero nunca uniforme y la superficie corroída presenta irregularidades con aspecto rugoso, resultante de la alternancia de áreas anódicas y catódicas a lo largo de la tubería, pudiendo incluso presentarse perforaciones en las paredes metálicas.

1.2.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSION GALVANICA

Existen varios factores que controlan la facilidad con la cual se producirá el flujo de corriente que dará lugar a daños por corrosión en las tuberías enterradas. Entre los principales factores que inciden en la magnitud de dicha corriente, la cual determina la velocidad de la corrosión galvánica, se encuentran:

a. Diferencia de potencial eléctrico entre dos metales.

Un factor predominante en el grado de corrosión, resultante del contacto entre dos metales diferentes, es el valor de la diferencia de potencial existente entre ellos. Un metal unido con otro, cercano a él en la serie galvánica, se corroerá más lentamente que cuando se lo une con otro que esté muy apartado de él en la misma serie; luego, mientras mayor sea la diferencia de potencial entre los metales, mayor será la tendencia para producir corrosión galvánica.

b. Resistividad del medio corrosivo.

La resistividad del medio es un factor predominante sobre la velocidad del proceso de corrosión, pues esta última aumenta cuando la resistividad del medio disminuye.

c. Polarización del ánodo y del cátodo.

A medida que avanza la corrosión galvá-

nica, el paso de la corriente por el suelo produce una acumulación de productos debido a las reacciones que se establecen en el ánodo y en el cátodo; los cuales actúan como películas protectoras que pueden ser caracterizadas como un potencial inverso o resistencia añadida a los electrodos, por lo cual se produce una disminución de la diferencia de potencial inicial. Este cambio de potencial, como se estudió en el numeral 1.1.4., se denomina "polarización".

La polarización catódica tiene una mayor importancia práctica, ya que se caracteriza por la formación de películas de hidrógeno gaseoso en la superficie catódica de la tubería enterrada, tendiéndola a aislarla del suelo que la circunda y reduciendo así la magnitud de la corriente de corrosión hasta que el hidrógeno sea eliminado, por algunas de las reacciones catódicas como lo son la evolución de los gases, la unión del hidrógeno con el oxígeno para formar agua, la presencia de bacterias, etc.

d. Separación geométrica entre el ánodo y el cátodo.

Los daños por corrosión debido a efecto galvánico, son mayores en zonas cerca de la unión ánodo-cátodo; es decir, donde la trayectoria de la corriente en el suelo es relativamente corta. El ataque corrosivo va disminuyendo a medida que se aleja de dicho punto de unión.

e. Efecto del área relativa ánodo-cátodo.

La velocidad de corrosión del ánodo aumenta cuando la relación del área del ánodo sobre el área del cátodo disminuye. Por lo tanto, una relación de áreas desfavorables consiste en el contacto entre un cátodo grande y un ánodo pequeño. Bajo tales condiciones, el ánodo pequeño estaría sujeto a una alta densidad de corriente descargada por unidad de área; mientras que la densidad de corriente tomada por unidad de área en el cátodo es relativamente baja y puede llegar a no ser suficiente para producir un grado de polarización tal, que tienda

a limitar el flujo de corriente; por lo tanto, la corrosión en el ánodo sería acelerada.

El caso diametralmente opuesto sería la presencia de un ánodo grande conectado a un cátodo pequeño. Para tal combinación, la corriente de corrosión seguirá siendo descargada por el ánodo pero en cambio, la densidad de corriente por unidad de área en el ánodo sería relativamente pequeña y por tanto, se tendría un bajo consumo de metal. Mientras que en el cátodo, la alta densidad de corriente tomada por unidad de área sería suficiente para polarizar el área catódica reduciendo el flujo total de corriente a un valor que no ocasiona problemas serios de corrosión.

1.2.5. PREVENCION DE LA CORROSION GALVANICA

Con el fin de prevenir o minimizar la corrosión galvánica, se pueden utilizar varios procedimientos; los cuales, pueden ser usados en forma aislada o combinada. Los procedimientos más aplicados son los

siguientes:

- a. Evitar el uso de metales diferentes. Si ésto no es práctico, tratar de combinar metales que se encuentren lo más cerca posible entre sí, en la serie galvánica (Tabla IV).
- b. Evitar una relación de áreas desfavorables. Es decir, bajo ninguna circunstancia conectar una área anódica pequeña a una área catódica grande.
- c. Si se utilizan metales diferentes, aislar eléctricamente uno del otro instalando juntas de aislamiento.
- d. Si se necesita utilizar metales diferentes; y no pueden ser aislados, las partes anódicas deberán ser diseñadas de manera de poder reemplazarlas fácilmente o construir las de materiales gruesos para alargar la vida del equipo bajo los efectos de la corrosión.
- e. Aplicar recubrimientos. El recubrimiento se debe mantener siempre en perfectas

condiciones, principalmente en el ánodo.

f. Si es posible, añadir inhibidores para disminuir la agresividad del medio ambiente.

g. Instalar un tercer metal el cual sea anódico con respecto a los otros dos en contacto galvánico.

1.3. CORROSION ELECTROLITICA

1.3.1. MECANISMO DE LA CORROSION ELECTROLITICA

Los casos de corrosión descritos anteriormente, involucran siempre procesos electroquímicos espontáneos, esto es, la diferencia de potencial se originaba de los potenciales naturales de los materiales metálicos involucrados en el proceso corrosivo. Sin embargo, existen corrientes ocasionadas por potenciales externos que producen casos severos de corrosión. Las tuberías enterradas, como oleoductos, gasoductos, tuberías de agua y cables telefónicos, están sujetas frecuentemente a este tipo de corrosión debido a la incidencia de corrientes eléc-

tricas de interferencia que abandonan su circuito normal, para fluir por el suelo o por el agua. Esas corrientes eléctricas son también llamadas de fuga, extrañas, perdidas, parásitas o de interferencia.

Siendo los materiales metálicos conductores de más baja resistividad, en comparación con el suelo o el agua, cualquier estructura metálica, enterrada en la zona de influencia de aquellos sistemas causantes de las corrientes de interferencia, serán de inmediato camino preferencial para el paso de la corriente eléctrica.

De esta forma, dependiendo de la disposición de la estructura, en relación al sistema causante de la corriente de interferencia, habrá siempre uno o más puntos de captación de corriente y uno o varios puntos de descarga. Los puntos de captación de corriente son áreas catódicas y las áreas de descarga son áreas anódicas, de la misma forma como sucede con una celda electrolytica.

Como consecuencia de la formación de áreas

catódicas y anódicas, surge un proceso de corrosión, con la consecuente deterioración de la estructura metálica en las regiones de descarga de corriente. Debido a que la magnitud de las corrientes de fuga son mayores que las corrientes galvánicas originadas en la propia estructura metálica, la corrosión será mucho más rápida.

Este tipo de corrosión electroquímica es llamada corrosión por electrólisis o electrolítica; y se la define como la deterioración de la superficie externa de un metal, forzado a funcionar como ánodo activo de una celda o pila electrolítica. Generalmente, las áreas corroídas se presentan libres de productos de la corrosión y, como es una forma de corrosión localizada, en poco tiempo se produce la perforación de las instalaciones.

La cantidad de metal destruido por la corrosión, debido a las corrientes de interferencia, puede ser calculada usando la ley de la electrólisis de Faraday estudiada en el numeral 1.2.1.

La Tabla VI muestra la pérdida de peso que experimentan varios metales, debido al paso de una corriente de un amperio fluyendo durante un año.

TABLA VI
Pérdida de peso de varios metales sujetos a corrosión
electrolítica

Metal	Peso equivalente (Kg)	Peso del metal corroído por Amperio-año	
		lb	Kg
Fe	$\frac{55,85}{2}$	20,1	9,1
Cu	$\frac{63,57}{2}$	22,8	10,4
Pb	$\frac{207,20}{2}$	74,5	33,8
Zn	$\frac{65,38}{2}$	23,6	10,7
Al	$\frac{26,98}{3}$	6,5	2,9

Fuente: UHLIG, H.H, Corrosion and corrosion control, John Wiley & Sons, New York, 1967

Las corrientes de fuga que ocasionan mayores daños, son las provenientes de corrientes continuas o las de corrientes alternas de baja frecuencia. La corrosión por electrólisis causada por una corriente alterna de 60 ciclos es considerada despreciable ya que se estima que causa cerca del 1 % del daño producido por una corriente continua equiva-

lente (de igual magnitud).

Las principales fuentes de corrientes de fuga son los sistemas de tracción eléctrica (tranvías), instalaciones de soldadura eléctrica y de electrodeposición y sistemas de Protección catódica. También puede considerarse la posibilidad de daños ocasionados por corrientes originadas por los campos magnéticos de la Tierra, conocidas como corrientes telúricas.

Un ejemplo de corrientes de fuga, provenientes de un sistema de tracción eléctrica que utiliza a los rieles para el retorno de la corriente a la fuente de energía eléctrica, es representado esquemáticamente en la Fig. 1.9.

Las corrientes de fuga, o de interferencia, pueden ser clasificadas en dos tipos:

- a. Estáticas: Son las que tienen amplitud y curso constante. Como ejemplo se tienen las corrientes de fuga provenientes de los sistemas de protección catódica por corriente impresa o forzada.

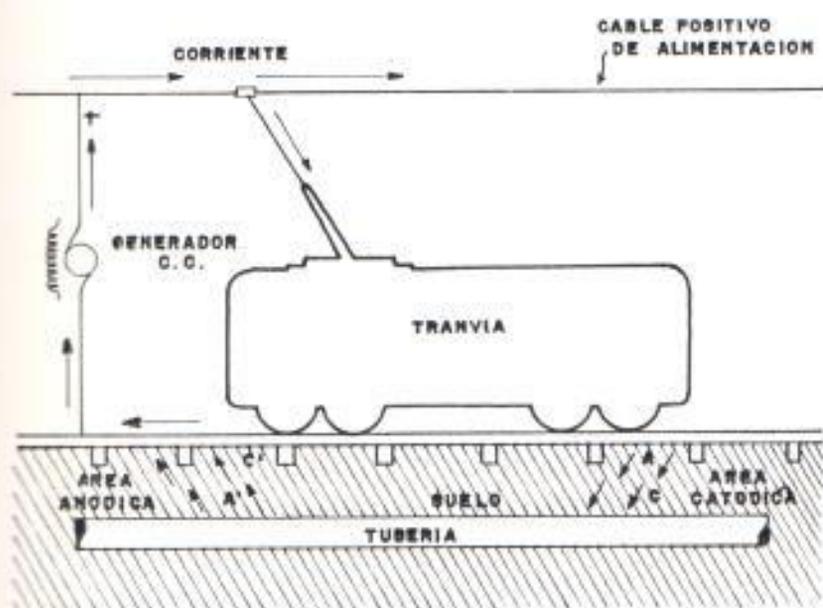


Fig.1.9.- PILA DE CORROSION ELECTROLITICA CAUSADA POR UN SISTEMA ELECTRICO DE TRACCION

b. Dinámicas: Son las que varían continuamente de amplitud y/o en su curso. Como ejemplo se tienen las corrientes de fuga provenientes de los sistemas de tracción eléctrica. En este caso, como existe un constante cambio en la ubicación de los vehículos traccionados, surge casi siempre una gran fluctuación en la intensidad y en la dirección del flujo de corriente y consecuentemente en la ubicación de las áreas catódicas y anódicas, pudiendo las áreas catódicas pasar a ser anódicas y viceversa.

La velocidad de corrosión resultante de las corrientes de interferencia depende principalmente de los siguientes factores:

- intensidad y densidad de la corriente;
- distancia entre las estructuras interferente e interferida;
- localización de la fuente de la corriente interferente;
- existencia o no del revestimiento y la calidad de éste;

- localización de las juntas aislantes;

- resistividad del medio.

1.3.2. DETECCION DE LAS CORRIENTES DE INTERFERENCIA

La detección de las corrientes de interferencia consiste básicamente en la determinación de las áreas anódicas y catódicas, o por lo menos, en la determinación de aquellas áreas que son anódicas con mayor frecuencia.

Para efectuar la detección de las corrientes de interferencia se dispone de algunos recursos, entre los cuales podemos citar:

- a. Un análisis de la disposición geográfica de la estructura interferida con relación al sistema causante de la interferencia.

Este análisis permitirá, en función de la localización de los puntos de retorno, hacer un esquema de la probable trayectoria de las corrientes de fuga con las posibles áreas de captación y descarga de la corriente.

b. Medición de los potenciales de la estructura interferida en relación al electrolito.

Se debe tomar en cuenta que para una estructura interferida, sin protección catódica, todas las áreas con potenciales más negativos que el natural de la estructura son áreas de captación de corriente; y todas las áreas con potenciales menos negativos o positivos son áreas de descarga de corriente.

Es importante también realizar mediciones de potenciales en la estructura causante de la interferencia, de tal manera que: potenciales negativos, en el conductor de retorno, denotan entrada de corriente y por lo tanto, descarga de la misma en la estructura interferida; y potenciales menos negativos o positivos denotan salida de corriente y por lo tanto captación de la misma en la estructura interferida.

Mediciones de potenciales pueden también ser tomadas entre varias estructuras

enterradas, entre diferentes puntos sobre el suelo, entre varias partes de la misma estructura enterrada y entre el conductor de retorno del sistema interferente y las estructuras enterradas.

c. Medición de las corrientes de interferencia.

Este recurso consiste en realizar la medición de la corriente que fluye sobre la estructura o en los puntos de drenaje. La intensidad de la corriente que entra o sale de una tubería enterrada puede ser calculada midiendo la diferencia de potencial entre una posición en la superficie del suelo directamente sobre la tubería y otra en la superficie del suelo a cierta distancia y formando un ángulo recto con la tubería. Llamando $\Delta \phi$ a la diferencia de potencial, medida en voltios; ρ a la resistividad del suelo, en $\Omega \cdot \text{cm}$; h a la altura del tubo debajo de la superficie, en metros y y a la distancia a lo largo de la superficie sobre el cual el potencial es medido, en metros; dicha diferencia de potencial

puede ser expresada por la ecuación:

$$\Delta \phi = \frac{\rho I_r}{2\pi} \ln \frac{y^2 + h^2}{h^2} \quad (1-17)$$

Donde I_r es la corriente de fuga total entrando o saliendo de la superficie del tubo por unidad de longitud (A/cm). Despejando I_r de la ecuación (1-17) tendremos:

$$I_r = \frac{2\pi \Delta \phi}{\rho} \frac{1}{\ln(y^2 + h^2) - \ln h^2} \quad (1-18)$$

Algunos resultados experimentales muestran que los valores de diferencia de potencial están comprendidos entre 0,65 V y 4,5 V. En lo que se refiere a las densidades de corriente, se ha encontrado que igualmente varían en un amplio rango, obteniéndose los siguientes valores:

0,1 - 0,3 mA/dm²: destrucciones locales poco acentuadas;

0,3 - 0,7 mA/dm²: regiones de intensa corrosión local;

0,7 - 2,0 mA/dm²: corrosión rápida de los tubos, ocasionando perforaciones en las paredes de los mismos.

En base a los estudios indicados anteriormente, es posible, por lo menos, en forma aproximada, determinar las áreas críticas y más sujetas a las corrientes de interferencia.

1.3.3. MÉTODOS DE CONTROL DE LA CORROSIÓN ELECTROLÍTICA

Los métodos más utilizados, en la práctica, para el combate de la corrosión electroli-tica son:

- a. Aumentar la resistencia del electrolito.
Para lograrlo, se rodea la tubería con un material de alta resistividad como, por ejemplo, arena limpia y seca.
- b. Aumentar la resistencia de la estructura metálica. Esto se logra intercalando, a intervalos apropiados, varias juntas aislantes en la tubería con la finalidad de

establecer una trayectoria menos favorable para el flujo de las corrientes de interferencia. Este método no es aplicable si se presentan voltajes elevados que podrían inducir corrientes, que fluyan alrededor de las juntas aislantes, causando una corrosión acentuada en el lugar de salida de la corriente.

- c. Drenar, las corrientes de interferencia, hacia el suelo en las áreas con predominancia anódica mediante el empleo de ánodos galvánicos o de chatarras de hierro o acero.
- d. Inyectar corriente en las áreas anódicas, mediante el uso de rectificadores, con la finalidad de proporcionar una corriente de sentido opuesto que anule las corrientes de fuga.
- e. Unir eléctricamente, mediante un conductor metálico de baja resistencia, las estructuras interferente e interferida.

2.4. OTROS TIPOS DE CORROSION

1.4.1. CORROSION DEBIDO A CELDAS DIFERENCIALES

La naturaleza y agresividad del medio ambiente, determina el grado de corrosión que se producirá entre dos metales o entre dos zonas de un mismo metal. Teóricamente la corrosión no ocurrirá en un ambiente uniforme u homogéneo; sin embargo, es difícil en la práctica encontrar este tipo de ambientes presentándose por lo general heterogeneidades que establecen celdas diferenciales. Entre las principales celdas diferenciales que pueden ocasionar problemas de corrosión se encuentran:

a. Celdas por calentamiento diferencial.

Este tipo de celdas suelen producirse cuando se tiene un metal sumergido en un electrolito que presenta áreas a diferentes temperaturas. Se forma entonces la llamada pila termogalvánica. Por lo general, para el caso del hierro, el área anódica es la que presenta la temperatura más elevada.

b. Celdas por iluminación diferencial.

Esta clase de celda se establece cuando una superficie metálica, inmersa en un electrolito, presenta áreas diferentemente iluminadas, lo cual ocasiona una diferencia de potencial entre dichas áreas. En este caso, la superficie más iluminada se torna catódica pudiendo, en el caso de la presencia de oxígeno disuelto en el electrolito, aumentar la acción de la luz formando películas protectoras.

c. Celdas por agitación diferencial.

Esta celda se produce cuando existe una agitación fuerte de un líquido en contacto con una parte de una superficie metálica, mientras que otras áreas de dicha superficie metálica permanece sin agitación o con una agitación menor. El hierro y el aluminio presentan como áreas anódicas las regiones en contacto con un líquido no agitado mientras que el cobre presenta un comportamiento inverso esto es, las áreas anódicas son las regiones

en contacto con el líquido agitado.

d. Celdas por concentración diferencial.

Se producen cuando un material metálico está inmerso en un electrolito que posee, en distintas partes del mismo, diferentes concentraciones de iones metálicos. En la celda formada, la región anódica, por tanto la corroída, es aquella donde la concentración de ión metálico es menor.

e. Celdas por aereación diferencial.

Se producen cuando un material metálico está enterrado en un electrolito que presenta regiones diferentemente aereadas. En este tipo de celda, el área con mayor concentración de oxígeno actúa como cátodo con respecto a las áreas de menor concentración de oxígeno.

Este tipo de celda se presenta principalmente en las tuberías enterradas de gran diámetro en donde se establecen con facilidad, áreas con diferentes grados de aereación (Ver Fig. 1.10).

Otro caso que se presenta con mucha frecuencia, es el de una tubería que pasa bajo un camino pavimentado. En estas circunstancias, la sección de tubería que se encuentra bajo el pavimento tiene un suministro restringido de oxígeno, en comparación con las secciones de tubería en contacto con el suelo a cada lado del camino pavimentado, por tal motivo se convierte en un área anódica y por tanto se corroerá, tal como se puede observar en la Fig. 1.11.

1.4.2. CORROSION OCASIONADA POR VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DEL MEDIO

En la generalidad de los casos, la trayectoria establecida para la instalación de una tubería, hace que ésta recorra por suelos que están constituidos por diferentes tipos de materiales, los cuales poseen diferentes resistividades eléctricas, ocasionando de esta manera la formación de corrientes de corrosión que atacan a la tubería.

La Fig. 1.12. muestra un ejemplo en el cual una tubería se encuentra en contacto con arcilla y con arena. Debido a que la

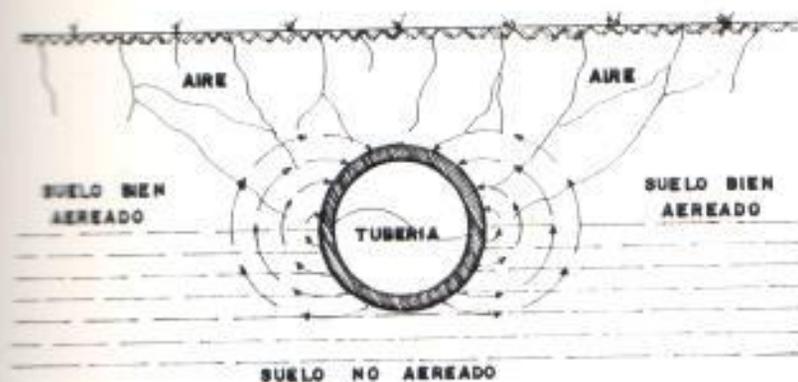


Fig. 1.10.- PILA DE CORROSION POR AERACION DIFERENCIAL

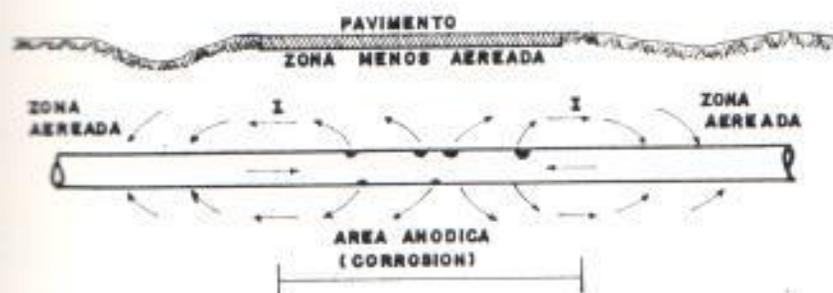


FIG. 1.11.- CELDA POR AERACION DIFERENCIAL PRESENTE EN EL CRUCE DE UNA TUBERIA CON EL PAVIMENTO.

arcilla tiene una menor resistividad que la arena, la primera establecerá un área anódica en la superficie de la tubería en contacto con ella. De igual forma, se establecerá un área catódica en la superficie de la tubería en contacto con la arena, produciéndose la formación de una pila de corrosión.

Sucede frecuentemente que, aunque una tubería sea construida en una franja de suelo de alta resistividad eléctrica (lo que nos llevaría inadvertidamente a pensar en una corrosión leve), ella podría atravesar algunos lugares de resistividad eléctrica más baja, siendo entonces severamente corroída. Esto se debe al desarrollo de las llamadas macropilas de corrosión en donde, los tramos en contacto con los suelos de más baja resistividad funcionan como áreas anódicas severas conforme a lo mostrado en la Fig. 1.13.

Factores tales como la temperatura, el contenido de humedad y la concentración de sales solubles presentes en el suelo, afectan considerablemente la resistividad eléc-

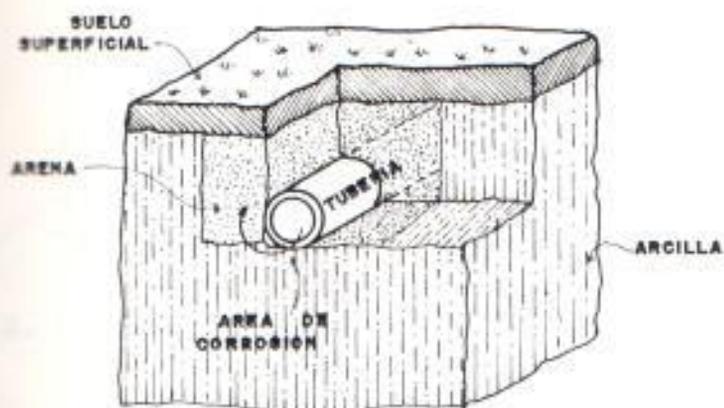


Fig. 1.12.- CELDA DE CORROSION OCASIONADA POR EL CONTACTO DE UNA TUBERIA CON SUELOS DE DIFERENTE NATURALEZA.

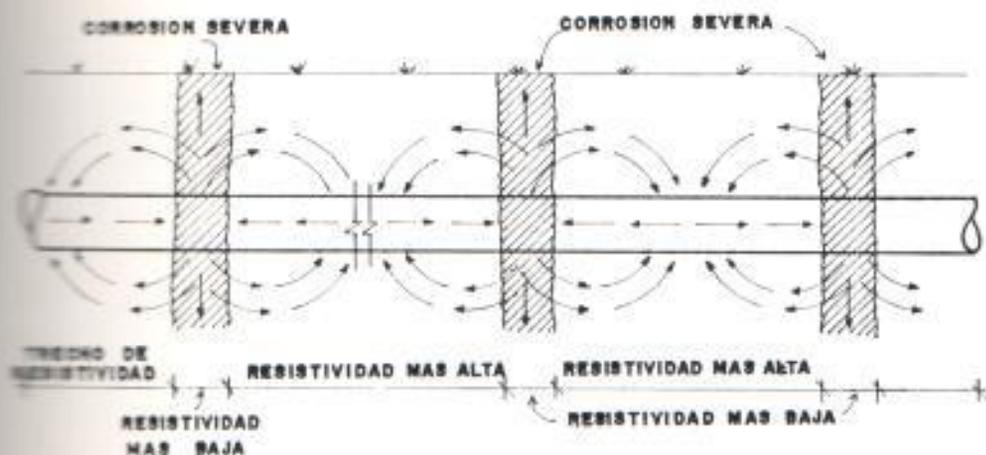


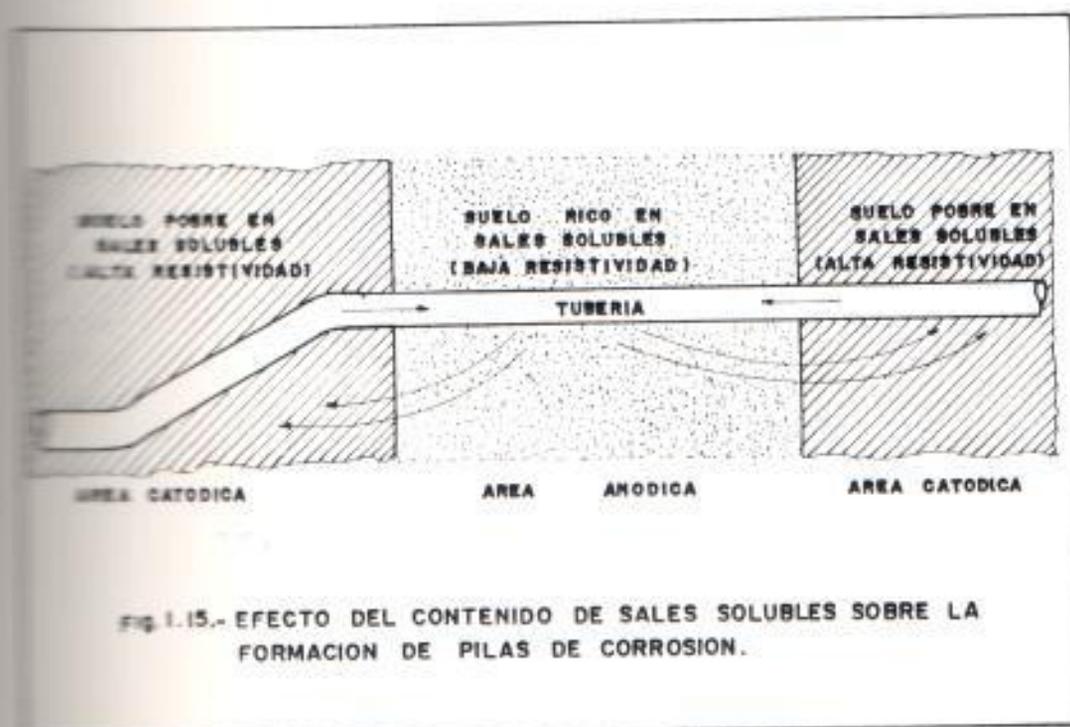
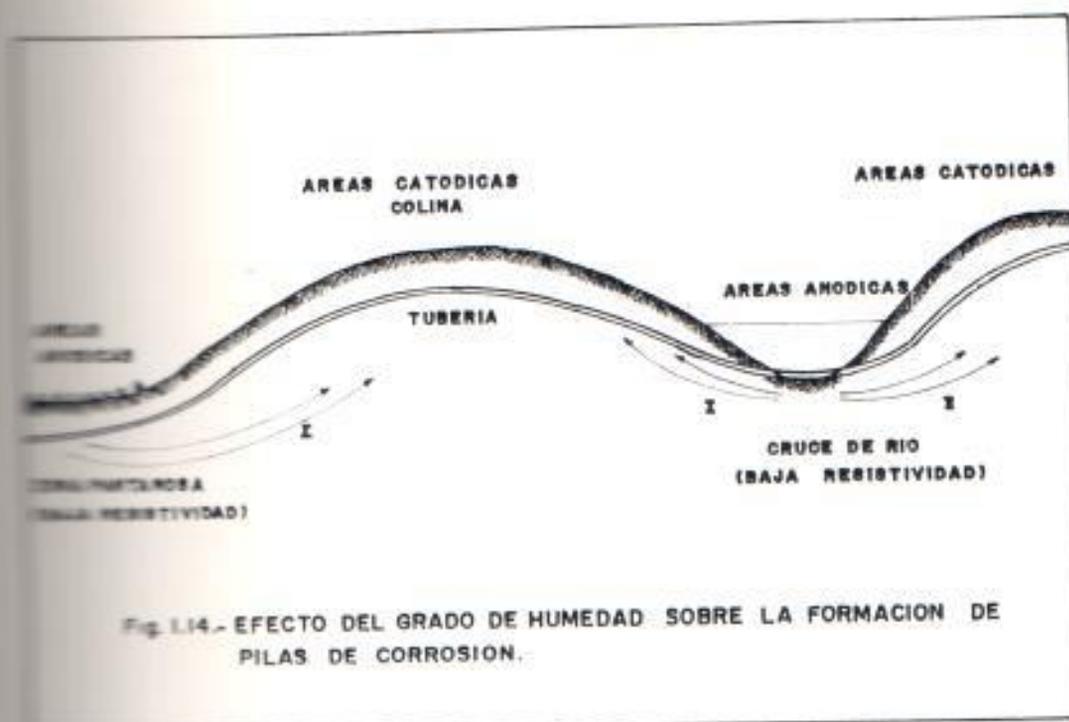
Fig. 1.13.- MACROPILAS DE CORROSION CAUSADAS POR LAS VARIACIONES EN LA RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL SUELO.

trica del mismo. Las Figs. 1.14. y 1.15., muestran el efecto de estos factores sobre la resistividad del suelo y por ende en la formación de áreas catódicas y anódicas que producen la corrosión de una instalación metálica enterrada.

1.4.3. CORROSION MICROBIOLOGICA

La corrosión microbiológica, también llamada microbiana o biológica, es aquella donde la corrosión del material metálico se procesa bajo la influencia de microorganismos, especialmente bacterias.

El mecanismo de este tipo de corrosión radica en que las bacterias encontradas en suelos o aguas, originan cambios en las propiedades físicas y químicas de los mismos creando un medio más corrosivo. Los ambientes más propensos para el desarrollo de bacterias son: el agua de mar, el agua de río, regiones pantanosas, sedimentos oleosos, suelos conteniendo residuos orgánicos o sales como sulfatos, nitratos, fosfatos y suelos conteniendo azufre.



La corrosión microbiológica puede ocurrir debido al establecimiento de los siguientes factores:

a. Despolarización catódica.

Este fenómeno ocurre bajo condiciones anaeróbicas en donde existen ciertas bacterias capaces de utilizar, en sus metabolismos, hidrógeno libre y por tanto, destruyendo la película protectora de hidrógeno que normalmente se adhiere a la superficie del cátodo.

b. Aereación diferencial.

Se producen debido a la presencia de películas o costras que están adheridas en diferentes partes de la superficie metálica y que no son otra cosa que productos insolubles del metabolismo de ciertas bacterias de tipo aeróbico o anaeróbico.

c. Formación de ácidos.

Un grupo de bacterias aeróbicas del gé-

nero Thiobacillus producen, como producto de sus metabolismos, ácido sulfúrico el cual funciona como agente corrosivo.

CAPITULO II

MEDIOS DE PREVENCION DE LA CORROSION

2.1. METODOS DE INSPECCION DE LAS TUBERIAS ENTERRADAS

2.1.1. INTRODUCCION

La inspección de la corrosión implica la formulación de métodos para determinar las condiciones físicas de las tuberías enterradas y las características corrosivas del medio.

Los objetivos específicos de la inspección de la corrosión en tuberías enterradas son:

1. Evitar la pérdida del producto transportado.
2. Determinar la necesidad de un reemplazo parcial o total de la estructura.

3. Evaluar las tuberías existentes con el propósito de futuras inversiones.
4. Evitar la interrupción del servicio debido a daños por corrosión ocasionados en la tubería.
5. Conocer las causas de la corrosión con el fin de establecer una política de control de la misma.
6. Especificar e instalar medios para reducir o controlar la corrosión.
7. Determinar los lugares donde la protección deberá ser instalada.
8. Observar la eficacia de un sistema de protección ya existente.

2.1.2. DATOS NECESARIOS PARA UNA INSPECCION DE LA CORROSION

Antes de proceder a la ejecución de un trabajo de inspección de una tubería, es necesario recopilar ciertos datos que ayudarán a determinar las condiciones de corrosi-

vidad que podrían presentarse. A continuación se enumeran los datos más importantes a ser acumulados:

1. Material del cual está fabricada la tubería; ejemplo: Acero (incluyendo el grado del acero), hierro fundido, hierro dulce, etc. Datos de sus resistencias eléctricas.
2. Especificar si la tubería está o no revestida. Si está revestida, especificar que material fue utilizado en su revestimiento.
3. Recopilación de los registros de fugas de los productos que transporta la tubería. Tal información deberá incluir la localización y la fecha de ocurrencia de cada fuga.
4. Diámetro, espesor y peso por unidad de longitud de la tubería en estudio. Información de cualquier cambio de estas características a lo largo de la ruta de la tubería.

5. Localización y detalles de construcción de todos los puntos de prueba que hayan sido instalados a lo largo de la tubería. En el caso de que ningún punto de prueba haya sido instalado, determinar las localizaciones donde se podrían hacer contactos con la tubería con el fin de hacer pruebas de corrosión.
6. Especificar si en su construcción, la tubería fue íntegramente soldada o existen acoplamientos mecánicos.
7. Localización de juntas aislantes y de acoplamientos.
8. Mapas que especifiquen las rutas de la tubería.
9. Localización de otras estructuras metálicas enterradas que crucen la tubería a ser inspeccionada. En el caso de que dichas estructuras estén protegidas catódicamente, determinar la localización de las fuentes de corriente de protección catódica.

10. Localización de posibles fuentes de corriente de interferencia que podrían afectar a la tubería bajo estudio.

11. Determinar si existen secciones de la tubería que estén cercanas (dentro de una distancia de 60 metros) a líneas de transmisión eléctrica. En el caso de que esto se presente, especificar: la distancia entre la tubería y las torres, el voltaje de operación de la línea y el método que ha sido empleado en el aterrizamiento de las torres. Esta información es muy importante debido a que, si no se toman las prevenciones necesarias, tanto los sistemas de rectificadores y el revestimiento de las tuberías pueden ser dañados por sobrevoltajes inducidos bajo condiciones de fallas en el sistema eléctrico.

12. Especificar si la tubería es operada a elevadas temperaturas, ya que una alta temperatura podría causar el deterioramiento del revestimiento que haya sido empleado.

2.1.3. MÉTODOS DE INSPECCION

a. Exposición de la tubería.

Este método es a menudo empleado para establecer las condiciones físicas de las tuberías, con la finalidad de obtener criterios para futuras inversiones. La tubería se expone completamente en su circunferencia y en una longitud no menor de 3 metros. Posteriormente es limpiada mediante la utilización de cepillos de alambre o lija, los cuales remueven la herrumbre y las escamaciones causadas por la corrosión. En los lugares en donde se presentan mayores problemas de corrosión, se realiza un conteo de las perforaciones en un área de 30 cm² y se miden sus profundidades por medio de un micrómetro de profundidad.

b. Determinación del pH del medio.

Un buen indicador del grado de corrosividad del medio es precisamente su pH. Se conoce que la existencia de condiciones ácidas en torno a una tubería enterrada,

posee el gran inconveniente de dificultar su polarización al potencial mínimo de protección (-0,85 V en relación al electrodo de Cu/CuSO₄), ya que el ácido actúa como un agente despolarizante; aumentando considerablemente la cantidad de corriente necesaria para la protección de la estructura.

Por ello, en las regiones donde se supone la existencia de condiciones químicas anormales, se recomienda la realización de un estudio del pH del suelo o del agua que rodea a la tubería en estudio. Los valores obtenidos ayudarán a la determinación de las localizaciones donde pueden ser ubicadas las fuentes de corriente del sistema de protección catódica.

Para la determinación del pH del medio, se toma una muestra del suelo a ser analizado y se le agrega agua destilada, luego se lo cierne y al agua que se obtiene se le agrega una solución indicadora de pH (solución Gramercy) la cual da una coloración al agua que, comparada con una carta de color se obtiene el valor

aproximado del pH.

Otro método muy utilizado para la determinación del pH del suelo en el campo de trabajo, está basado en las lecturas de potencial entre un electrodo de sulfato de cobre y un electrodo de antimonio los cuales están en contacto con el suelo que se está investigando. Para la determinación del valor aproximado del pH del suelo, el potencial medido es comparado con el gráfico de la Fig. 2.1.

c. Determinación de condiciones adecuadas para que se desarrolle una corrosión microbiológica.

Tal como se estudió en el numeral 1.4.3, existen ciertas bacterias anaeróbicas que consumen la película protectora de hidrógeno que se forma en la superficies catódicas de la tubería. El consumo del hidrógeno produce la despolarización del acero en las áreas catódicas, permitiendo un rápido consumo del metal ante la presencia de celdas galvánicas de corrosión.

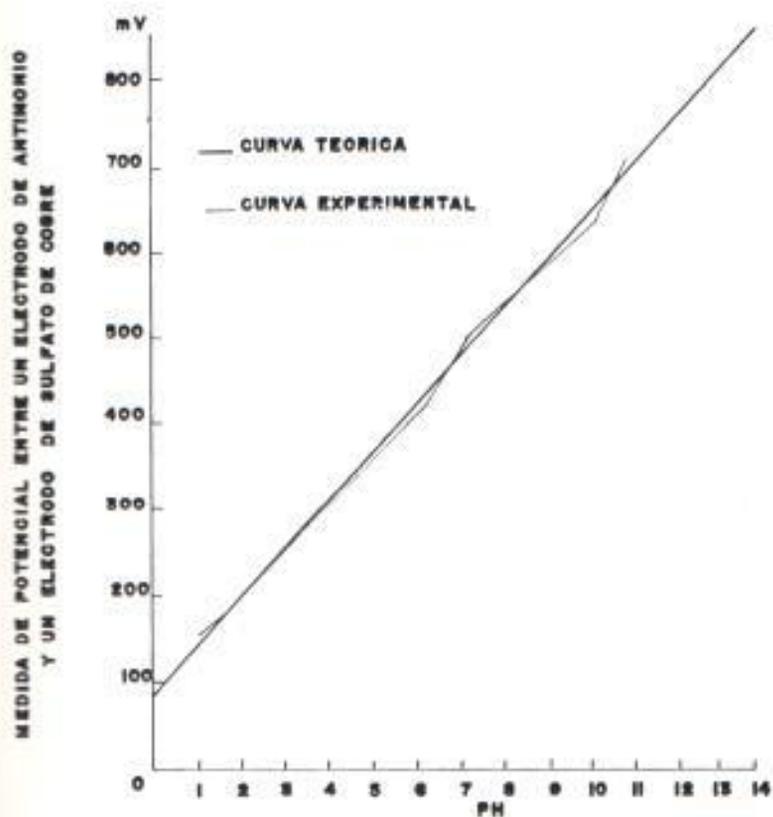


Fig. 2.1. GRAFICO DE PH vs POTENCIAL. Fuente: TEXAS DIVISION OF DOW CHEMICAL COMPANY.

El efecto práctico de la actividad de bacterias anaeróbicas sobre la aplicación de la protección catódica se refleja en un incremento de la cantidad de corriente requerida para mantener los niveles de protección. Estudios realizados al respecto, han sugerido un incremento de 0,1 V del potencial de protección, es decir - 0,95 V con respecto al electrodo de Cu/CuSO₄.

Para efectos de inspección, se debe realizar estudios de corrosión microbiológica en aquellos lugares donde la tubería cruce suelos saturados de agua; como por ejemplo en las proximidades de ríos, lagos y océanos, así como en lugares de poco drenaje donde se podrían presentar condiciones de aguas estancadas.

La herramienta básica para el estudio de la corrosión microbiológica es el llamado "Probador Redox", el cual es un dispositivo que mide el potencial de oxidoreducción del suelo estudiado. Este potencial se mide entre un electrodo limpio de platino y un electrodo de

referencia de calomel saturado. Las lecturas obtenidas dan una indicación de las cualidades de reducción o de oxidación del suelo y pueden ser usadas como un indicador del grado de corrosión que podría ser esperado debido a la presencia de bacterias anaeróbicas.

La siguiente tabla puede ser utilizada como una guía para determinar la posible severidad de la corrosión en el suelo estudiado:

Valores menores a 100 mV	-->	Severa
De 100 a 200 mV	-->	Moderada
De 200 a 400 mV	-->	Ligera
Valores sobre los 400 mV	-->	Ninguna

d. Inspecciones de potenciales.

La inspección de potenciales radica en la medición del potencial eléctrico entre la tubería metálica y el medio electrolítico que la circunda, sea este suelo, agua, etc. La medición de este potencial es realizada, en el campo de trabajo, por medio de un voltímetro de alta resisten-

cia interna (50.000 ohm/voltio en lo mínimo), en donde el terminal negativo es conectado a la tubería metálica que se desea examinar y el terminal positivo se conecta a un electrodo de referencia, normalmente medias celdas de cobre/sulfato de cobre (para suelos) o de plata/cloruro de plata (para agua de mar), colocado en contacto con el medio, tal como se muestra en la Fig. 2.2. El voltímetro utilizado requiere ser de alta resistencia interna para que las lecturas no sean influenciadas por la resistencia externa del circuito eléctrico establecido (electrodo/medio/tubería), lo que se traduce en una medición de buena precisión.

La inspección de potenciales constituye un método muy importante en el estudio de la corrosión ya que entregan informaciones bastantes valiosas, principalmente en los siguientes aspectos:

- Evaluación de las condiciones de corrosividad a la que está sujeta la tubería metálica.

- Localización de los llamados "hot spots" (puntos de corrosión severa).
- Detección de las áreas que están sujetas a problemas de corrosión electrolytica.
- Verificar si la estructura se encuentra protegida después de la instalación de un sistema de protección catódica.

Una técnica muy utilizada para establecer problemas de corrosión en una tubería enterrada, es realizando gráficos de potenciales tubería/suelo a lo largo de su recorrido, para lo cual se emplea comúnmente el método de mediciones "sobre la línea".

El principio involucrado en la inspección de potenciales "sobre la línea" se ilustra en la Fig. 2.3. La figura nos muestra dos lecturas tomadas a un intervalo no mayor de 30 metros y que presentan una ligera diferencia de potencial, diferencia que se establece debido a la caída de voltaje en el suelo en la

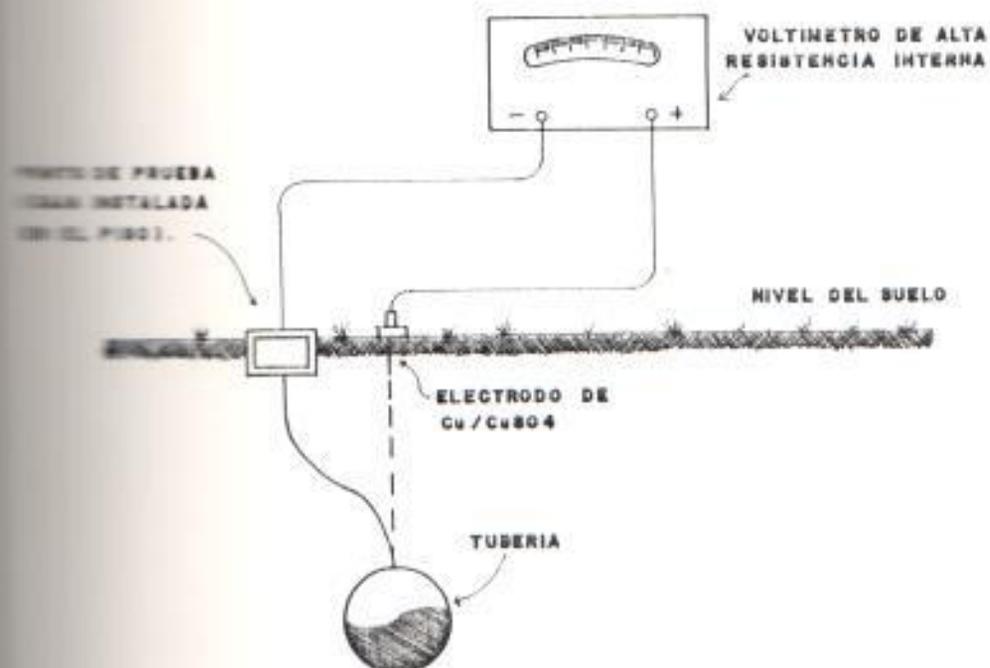


Fig. 2.2.- MEDICION DEL POTENCIAL TUBERIA-SUELO DE UNA TUBERIA ENTERRADA.

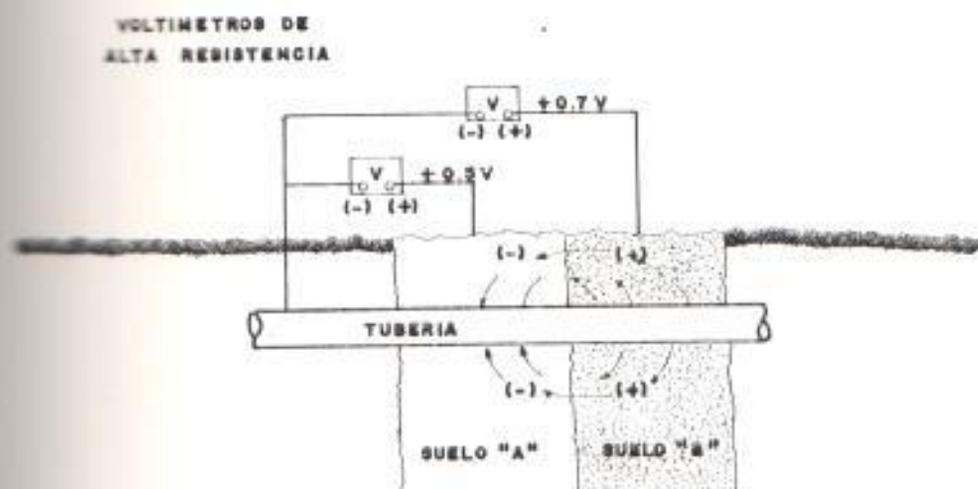


Fig. 2.3.- INSPECCION DE POTENCIALES "SOBRE LA LINEA"

vecindad de la tubería causada por el flujo de la corriente de corrosión. Analizando la figura, se establece que el suelo "B" es más positivo que el suelo "A" y por lo tanto el flujo de corriente es del suelo "B" hacia el suelo "A", produciéndose la corrosión del tramo de tubería que atravieza el suelo "B".

De lo anteriormente analizado se puede establecer el principio general que, cuando interpretemos los gráficos de potencial tubería/suelo (Fig 2.4), un potencial pico (o más alto) indicará la presencia de áreas anódicas mientras que los potenciales más bajos indicarán la presencia de áreas catódicas.

Si en vez de tomar los potenciales tubería/suelo con respecto a un electrodo de referencia ubicado directamente sobre la tubería, se lo hiciera con respecto a un electrodo ubicado en un lugar remoto a la misma, entonces los datos de potenciales podrían aparecer tal como se ilustra en la Fig. 2.5, en la cual se observa que es una curva más suave y con un sólo pico.

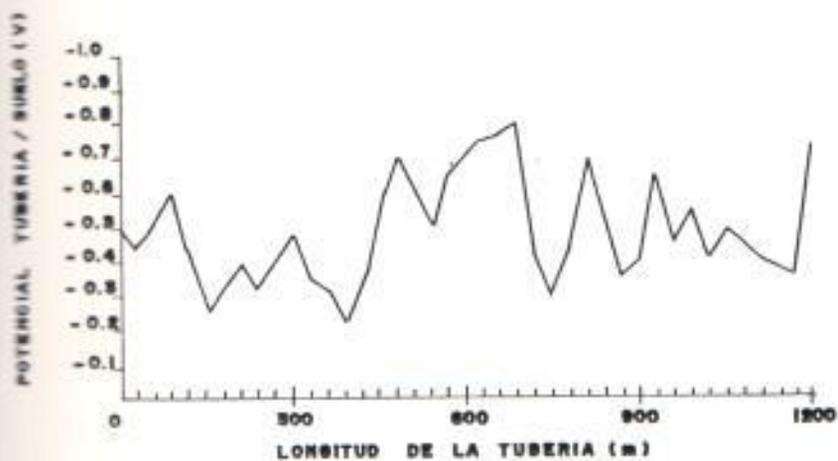


Fig. 2.4.- PERFIL DE POTENCIALES (INSPECCION "SOBRE LA LINEA")



Fig. 2.5.- PERFIL DE POTENCIALES (INSPECCION CON ELECTRODO REMOTO).

Este pico representa el punto de mayor descarga de corriente hacia el suelo (hot spot) y por tanto el área más corrosiva. Sin lugar a dudas, este último gráfico es mucho menos sensitivo, para el fin de revelar áreas corrosivas, que los gráficos obtenidos por el método "sobre la línea".

e. Inspección de la corriente de la tubería.

Si una tubería se encuentra bajo la acción de un proceso corrosivo, existirá en algunos puntos un flujo de corriente hacia la tubería, mientras que en otros puntos un flujo de corriente desde la tubería. Cuando las celdas de corrosión son muy grandes, la corriente podría fluir sobre la superficie de la tubería por varios cientos y hasta miles de metros antes de fluir hacia el suelo. La localización de las regiones de salida de la corriente, es decir las áreas anódicas, son determinadas precisamente mediante la inspección de la corriente que fluye sobre la tubería.

La técnica empleada para este tipo de inspección se basa en el cálculo de la corriente mediante la aplicación de la Ley de Ohm; para lo cual, se mide la caída de voltaje entre dos puntos de la tubería distanciados a no más de 30 metros y se registra los valores así obtenidos junto con la polaridad del instrumento de medición, esto último con el fin de determinar la dirección del flujo de corriente. La caída de potencial debe ser medida con un milivoltímetro de baja resistencia interna y las lecturas deberán ser corregidas considerando la resistencia de los conductores de prueba.

Para la aplicación de la Ley de Ohm se requiere conocer, además de las caídas de potencial, la resistencia por metro lineal de la tubería inspeccionada y el espaciamiento entre cada punto de prueba. Los valores de corriente así obtenidos, junto con la dirección del flujo, son graficados versus la longitud de la tubería. Los resultados presentan un gráfico similar al de la Fig. 2.6.

Analizando la figura, se puede observar que existe un punto de la tubería hacia el cual la corriente fluye desde ambas direcciones. Este debe ser un punto de descarga de corriente y, a menos que la corriente sea drenada hacia el suelo por el contacto con otro metal, existirán problemas de corrosión en esta Área.

f. Mediciones de la resistividad del suelo.

La medición de la resistividad del suelo es uno de los métodos más efectivos empleados en la inspección de la corrosión, puesto que nos entrega una buena idea del grado de corrosividad del suelo investigado. Esto se debe a la relación directa existente entre la conductividad del suelo y la corrosividad del mismo, la cual se ilustra en la Tabla VII.

TABLA VII
Relación entre la conductividad del suelo y su corrosividad

Resistividad del suelo (ohm-cm)	Corrosividad
De 0 a 1,000	Severa
De 1,000 a 10,000	Moderada
De 10,000 a 100,000	Leve
Más de 100,000	No corrosiva

Fuente: APLEGATE, L.M., Cathodic Protection, McGraw-Hill, New York, 1960.

Del análisis de la Tabla VII se concluye que los suelos de alta resistividad eléctrica ofrecen una mayor resistencia al flujo de la corriente limitando de esta manera el proceso corrosivo y viceversa, los suelos de baja resistividad ofrecen poca resistencia al flujo de la corriente de corrosión y por tanto son suelos corrosivos.

Para realizar una inspección de la corrosión, empleando las mediciones de resistividad eléctrica del suelo, se grafica un perfil de resistividades a lo largo de la trayectoria de la tubería, el cual se convierte no sólo en una invaluable ayuda para la determinación de las áreas corrosivas sino también en una ayuda

para la selección de los lugares donde van a ser instaladas las camas de ánodos de los sistemas de protección catódica.

La Fig. 2.7 muestra un típico perfil de resistividades. Los datos graficados en la figura, representan valores promedio de la resistividad del suelo a la profundidad de la tubería.

El método más empleado para la determinación de la resistividad del suelo es el método de Wenner o de los cuatro electrodos, el cual entrega lecturas de la resistividad promedio del suelo a una profundidad igual al espaciamento entre electrodos. Una explicación detallada de la aplicación del método de Wenner será dada en el numeral 2.2.3.

g. Medición de la resistencia eléctrica efectiva del aislamiento.

Una de las características principales de un excelente revestimiento es precisamente la de poseer una alta resistencia eléctrica efectiva, la cual le da la

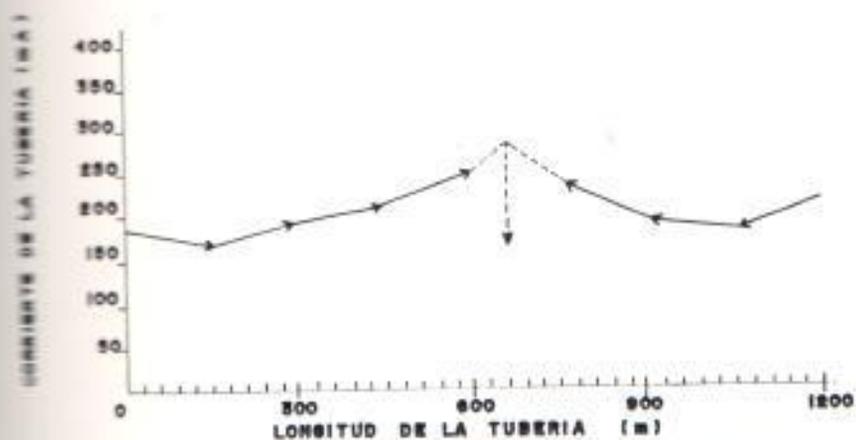


Fig. 2.6.- GRAFICO DE LA CORRIENTE SOBRE LA TUBERIA.

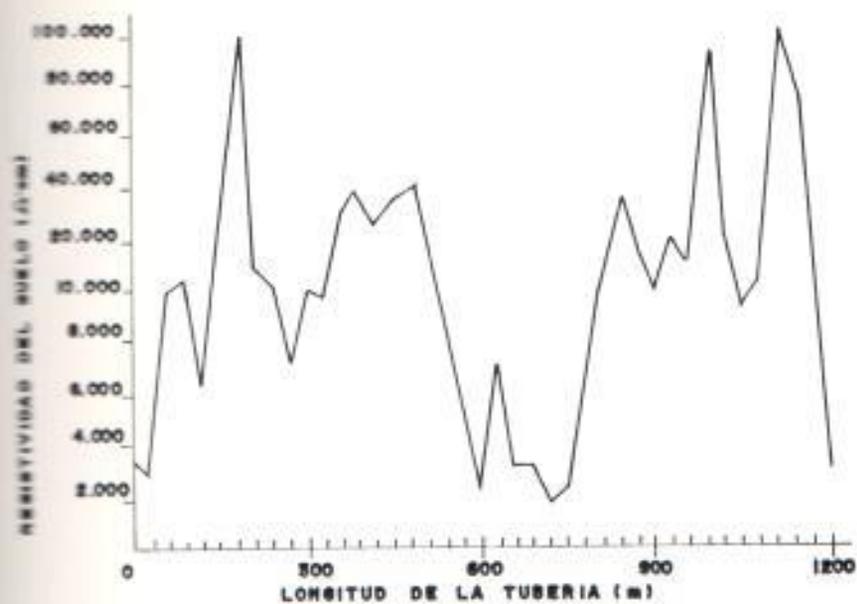


Fig. 2.7.- PERFIL DE RESISTIVIDAD ELECTRICA.

propiedad de aislar a la tubería del medio ambiente que lo rodea evitando de esta manera que se produzca un proceso corrosivo sobre ella.

Por tal motivo, resulta de gran importancia una inspección periódica de los valores de la resistencia eléctrica efectiva del revestimiento con el fin de establecer sus condiciones de aislamiento. El procedimiento aplicado para obtener los datos para el cálculo de dicha resistencia eléctrica es explicado en detalle en el numeral 2.2.3.

- h. Uso de instrumentos registradores para el estudio de condiciones inestables de corrosión (corrosión por corrientes de fuga).

Los instrumentos registradores (ver numeral 2.2.2) son de gran utilidad en áreas donde se han determinado la existencia de continuas variaciones en el potencial de la tubería y en la corriente que fluye sobre ella.

Mediante el análisis de los registros de voltaje y de corriente durante un período no menor de 24 horas, puede ser determinada la existencia o no de una fuente de corriente de fuga, su origen y sus efectos corrosivos sobre la tubería inspeccionada. Así por ejemplo, las cartas de registros permiten diferenciar entre una fuente de corriente de fuga fabricada por el hombre (tranvías, soldadoras eléctricas, etc.) y una corriente de fuga proveniente de variaciones telúricas, ya que la primera presenta un patrón repetitivo mientras que la segunda no.

2.2. MEDICIONES ELECTRICAS PARA EL CONTROL DE LA CORROSION

2.2.1. INTRODUCCION

El grado y la localización de la corrosión en las tuberías enterradas pueden ser determinadas mediante el análisis de datos obtenidos de mediciones eléctricas. Las principales mediciones eléctricas empleadas para el control de la corrosión son las de voltaje, corriente, resistencia y resistividad.

Debido a la gran importancia que tiene para el control de la corrosión la realización de las mediciones eléctricas nombradas en el párrafo anterior, se detallará a continuación los instrumentos empleados para tales mediciones así como las técnicas y procedimientos aplicados en el campo de trabajo para la utilización adecuada de dichos instrumentos.

2.2.2. INSTRUMENTACION PARA EL CONTROL DE LA CORROSION

La mayoría de los instrumentos utilizados para pruebas de corrosión deben servir esencialmente para mediciones en el mismo campo de trabajo y por lo tanto deben ser portátiles y lo suficientemente robustos para soportar el continuo manipuleo y su operación bajo condiciones climáticas adversas.

En lo que se refiere a sus lecturas, estos instrumentos deben estar bien calibrados y poseer una precisión de hasta 0,5 % a escala completa, ya que los valores con que se trabaja en las pruebas de corrosión son muy bajos y cualquier error en las lecturas, por

pequeña que sea, puede llevarnos a errores mayores en los resultados finales.

A continuación se dará una explicación de los instrumentos y dispositivos empleados para cada tipo de medición:

a. Instrumentos para mediciones de potenciales.

- Voltímetros de alta resistencia interna

El voltímetro de alta resistencia interna (o de alta sensibilidad) es el adecuado para medir potenciales entre estructuras metálicas y electrodos de referencia en lugares donde la resistencia del circuito externo es alta. La resistencia interna de estos instrumentos deberá ser no menor a 50.000 Ω/V . Estos instrumentos son generalmente fabricados para lecturas en varios rangos de voltaje mediante la inserción de resistencias en serie con la bobina móvil del instrumento, tal como se muestra en la Fig. 2.8.

Cualquier voltímetro convencional requiere de corriente para operar, si este requerimiento de corriente es alto, habrá una gran caída de voltaje en la resistencia del circuito externo y por lo tanto la lectura de potencial en el voltímetro no será la verdadera, estando sujeta a corrección por un factor que es igual a:

$$F_c = \frac{\text{Resist. del voltímetro} + \text{Resist. del circuito externo}}{\text{Resistencia del voltímetro}} \quad (2-1)$$

Observando la relación anterior, salta a la vista que si la resistencia del voltímetro es alta, con respecto a la resistencia del circuito externo, el factor de corrección F_c puede ser tan bajo como se desee y por tanto las lecturas serán más precisas.

La aplicación del factor de corrección, en las lecturas del potencial estructura-suelo se ilustra mediante el siguiente ejemplo:

Supóngase que deseamos medir el poten-

cial entre una tubería y un electrodo de Cu/CuSO_4 en una localización donde la resistividad es tal que la resistencia del circuito externo es de 2.000Ω . Supóngase también que el verdadero potencial es de $-0,9 \text{ V}$ y que empleamos para la medición un voltímetro que tiene una resistencia interna de $50.000 \Omega/\text{V}$ en su escala de 1 voltio. El factor de corrección, en este caso, será:

$$F_c = \frac{50.000 + 2.000}{2.000} = 1,04$$

La lectura del voltímetro será, entonces:

$$V_{\text{leído}} = \frac{V_{\text{correcta}}}{F_c} = \frac{0,9}{1,04} = 0,865 \text{ V}$$

- Voltímetros potenciométricos.

Este tipo de instrumento es utilizado para medir potenciales de estructuras metálicas en suelos de alta resistividad (mayores a $2.000 \Omega\text{-cm}$), debido a que eliminan el efecto de la elevada

resistencia del circuito externo.

El voltímetro potenciométrico opera igualando el potencial desconocido, a ser medido, con un voltaje variable suministrado por una batería que está ubicada en el interior del instrumento. La igualación de ambos potenciales es indicada por un galvanómetro. En el instante en que el galvanómetro marque el cero, se estará leyendo en el voltímetro el verdadero potencial tubería-suelo. En el balance, ninguna corriente fluye através del circuito externo evitando así los errores debido al efecto de la alta resistencia externa y eliminando la necesidad de la aplicación de factores de corrección en las lecturas.

El circuito básico de un voltímetro potenciométrico es ilustrado en la Fig. 2.9. Este tipo de instrumento no es práctico para hacer mediciones de potencial en lugares donde exista la influencia de corrientes de fuga debido a la dificultad de mantener en balance

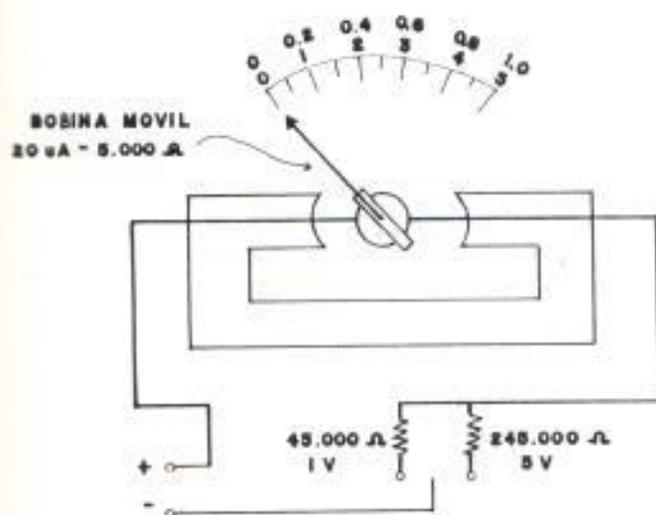


Fig. 2.8.- ESQUEMA DE UN VOLTIMETRO DE ALTA RESISTENCIA
RANGO: 0-1V y 0-5V. SENSIBILIDAD: 50.000 Ω / V

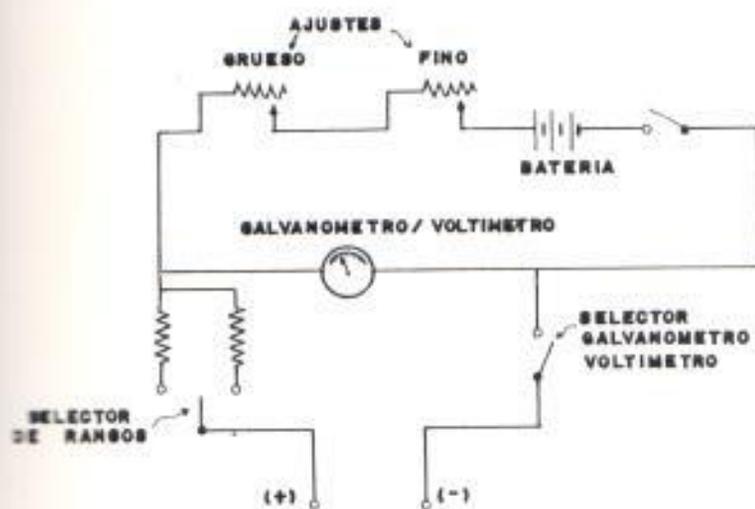


Fig. 2.9.- CIRCUITO BASICO DE UN VOLTIMETRO POTENCIOMETRICO

la lectura del galvanómetro.

- Voltímetros electrónicos.

Los voltímetros electrónicos pueden ser utilizados para realizar mediciones de potenciales en suelos de muy alta resistividad, debido a su altísima resistencia interna (50 MΩ o más), lo cual le permite entregar lecturas de mucha exactitud, evitando de esta manera el empleo de factores de corrección. Sin embargo, debido a su fragilidad y sensibilidad, su empleo resulta inadecuado para mediciones en el mismo campo de trabajo, limitando su uso a trabajos de laboratorio.

b. Instrumentos para mediciones de pequeñas caídas de voltaje.

- Voltímetros de baja resistencia interna

Los voltímetros de baja resistencia interna son los más adecuados para medir potenciales muy bajos, del orden de 1 a 2 milivoltios. Los valores

típicos de la resistencia interna de dichos instrumentos son del orden de 1.000 a 2.000 Ω/V .

Estos instrumentos son muy útiles cuando se requiere medir las caídas de potenciales a través de una sección de una tubería con el fin de aplicar la Ley de Ohm y obtener el valor de la corriente que circula por dicha sección de la tubería.

Las lecturas que se obtienen con estos instrumentos también están sujetas a corrección debido a la influencia de la resistencia del circuito externo, aplicándose la misma formulación descrita para los voltímetros de alta resistencia.

c. Instrumentos para medición de corrientes.

- Amperímetros.

Con frecuencia es necesario medir la intensidad de la corriente eléctrica en diferentes pruebas relacionadas con

trabajos del control de la corrosión y de Protección catódica, por ejemplo: medición de la corriente de salida de los rectificadores de corriente alterna, medición de la corriente de salida de las instalaciones temporales utilizadas en pruebas de requerimientos de corriente, medición de la corriente de salida de los ánodos galvánicos y otras aplicaciones similares. Los instrumentos que se emplean para hacer estas mediciones son precisamente los amperímetros, los cuales son instrumentos de baja resistencia interna.

La resistencia interna del instrumento está constituida exclusivamente por la resistencia de su bobina móvil. Esto indicaría que la corriente total a ser medida quedaría limitada a la capacidad de dicha bobina. Por lo tanto, para ampliar el rango de medición de corrientes, hasta valores más elevados, se utiliza, como en el caso de los voltímetros, el recurso de conectar resistores en conjunto con la bobina móvil; con la diferencia de que dichos

resistores están conectados en paralelo, desviando a través de los mismos aquella cantidad de corriente que podría sobrecargar y hasta dañar el conjunto de la bobina móvil. La Fig. 2.10 ilustra el esquema básico de un amperímetro con shunts (resistencias en paralelo) para medir en varios rangos de corriente.

- Amperímetros de resistencia cero.

Así como un voltímetro potenciométrico elimina el efecto de la alta resistencia del circuito externo en las mediciones de potencial, un amperímetro de resistencia cero elimina el efecto de la resistencia que se introduce al circuito de baja resistencia de un amperímetro convencional. Esto se logra utilizando corriente suministrada por una batería, que forma parte del instrumento, para compensar la caída de voltaje a través del amperímetro, obteniéndose de este modo el efecto de un amperímetro con una resistencia cero insertada en su circuito. La condición

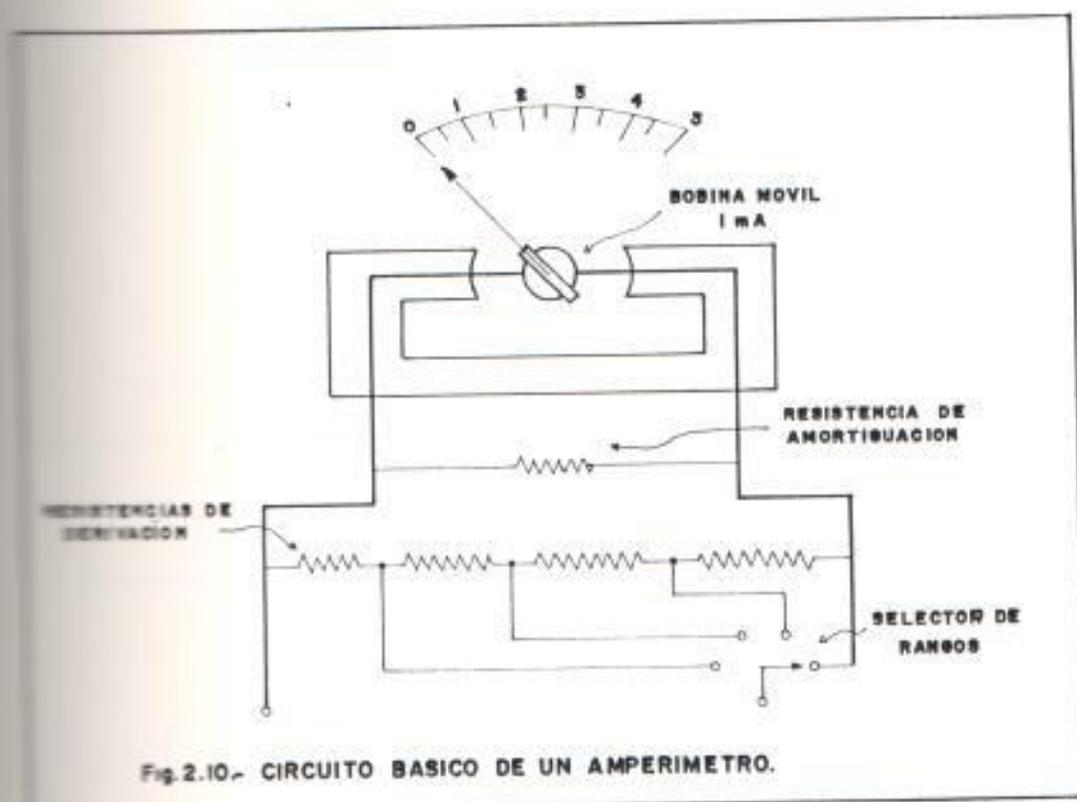


Fig. 2.10.- CIRCUITO BASICO DE UN AMPERIMETRO.

de "resistencia cero" es indicada por la obtención del cero en un galvanómetro. La Fig. 2.11 ilustra el circuito básico de este instrumento.

d. Instrumentos para medición de resistencias y resistividades.

- Vibroground.

Este instrumento emplea el método de los cuatro electrodos de Wenner (ver numeral 2.2.3. literal d) para la determinación de la resistividad promedio del suelo. Los rangos provistos en el instrumento hace posible las mediciones de resistividades desde 0 a 1'915.000 $\Omega \cdot \text{cm}$.

El Vibroground (Fig 2.12) consta de una fuente de potencia, un circuito de suministro de corriente y de un circuito de medición. La fuente de potencia cambia el bajo voltaje C.C. de la batería (B) en una corriente alterna con la que se alimenta el primario del transformador (T_1), mediante el empleo

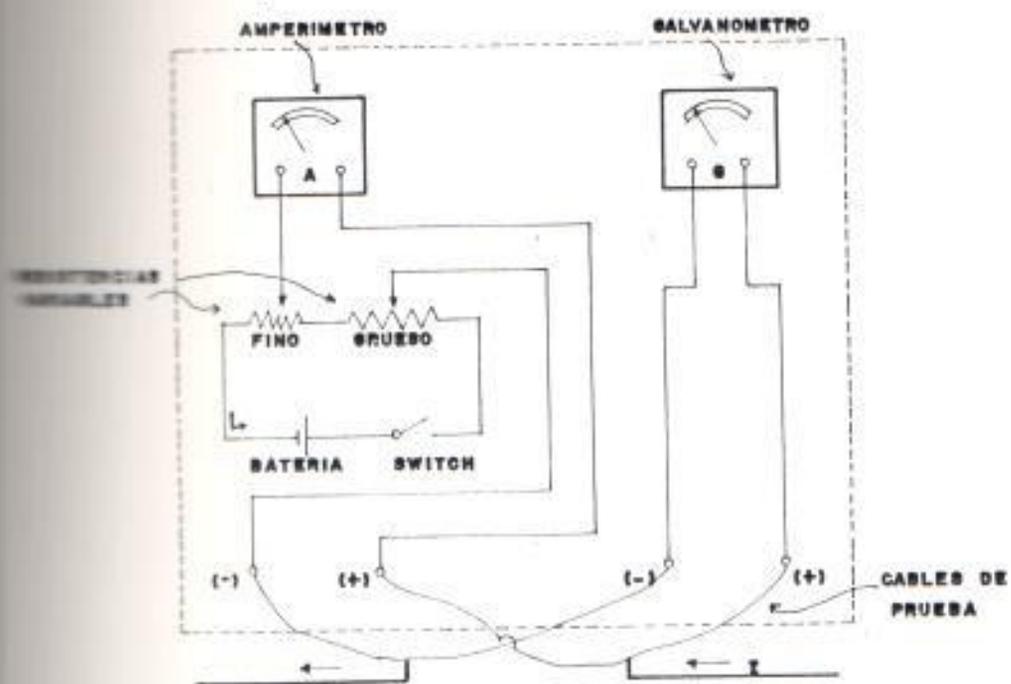


Fig. 2.11.- CIRCUITO DE UN AMPERIMETRO DE RESISTENCIA CERO.

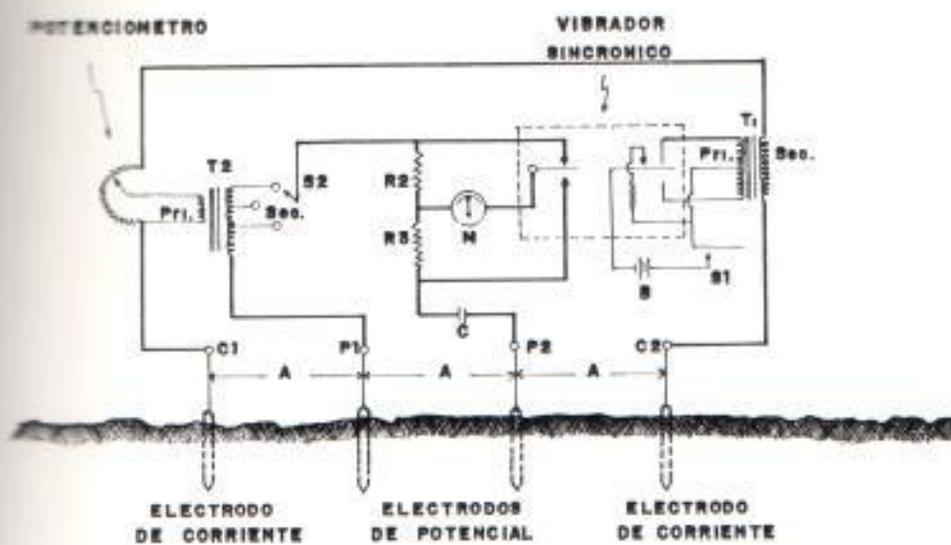


Fig. 2.12.- CIRCUITO SIMPLIFICADO DE UN VIBROGROUND.

de un vibrador sincrónico de 97 Hz (V). El voltaje alterno en el primario del transformador es elevado hasta 125 voltios C.A. en el secundario del mismo.

En el circuito de suministro de corriente, el secundario del transformador T_1 está conectado en serie con un potenciómetro calibrado y con los terminales C_1 y C_2 , a los que se conectan los dos electrodos de corriente. La resistencia del suelo entre los dos electrodos completa el circuito.

El circuito de medición está constituido por el secundario del transformador proporcional T_2 , un selector de rangos S_2 , dos resistencias R_2 y R_3 , el galvanómetro M , el condensador de bloqueo C (el cual previene que corrientes de fuga C.C. entren al circuito de medición) y los terminales P_1 y P_2 , a los que se conectan los dos electrodos de potencial. La resistencia del suelo entre los dos electrodos completa el circuito.

El Vibroground trabaja según el principio de operación de balance a cero. En el circuito ilustrado, el vibrador sincrónico es accionado presionando una botonera. El accionamiento del vibrador origina un flujo de corriente alterna en el primario del transformador T_1 el cual induce un voltaje C.A. en el secundario del mismo. Este voltaje C.A. origina un flujo de corriente que pasa a través de la resistencia del potenciómetro calibrado y de la resistencia del suelo entre los electrodos C_1 y C_2 . La corriente que fluye entre los electrodos C_1 y C_2 produce una caída de voltaje entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 , la cual es función de la resistividad del suelo. Dicha caída de voltaje es comparada con el potencial obtenido en el secundario del transformador T_2 , el cual es proporcional a la caída de voltaje producida en el potenciómetro calibrado. Cuando el potenciómetro calibrado y el selector de rangos son ajustados de tal manera que el voltaje de salida del transformador proporcio-

nal sea exactamente igual y opuesto al de la caída de voltaje entre los terminales P_1 y P_2 , entonces la condición de balance será indicada por la lectura del cero en el galvanómetro.

La resistencia leída en el dial del potenciómetro calibrado se multiplica por el valor que señale el selector de rangos, obteniéndose de esta manera el valor de la resistencia del suelo entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 . El valor de la resistencia así obtenida, es luego multiplicada por el factor apropiado (ver numeral 2.2.3. literal d), para de esta manera obtener el valor de la resistividad promedio del suelo a una profundidad igual al espaciamiento entre los electrodos.

- Megger.

Este instrumento se caracteriza por el uso de un generador propio accionado mediante una manivela, en sustitución de las pilas utilizadas en el Vibro-ground descrito anteriormente. La des-

cripción de los principios del funcionamiento hecha para el Vibroground es válida también para el Megger, excepto que el vibrador es sustituido por los contactos rotativos accionados por la manivela del generador o por un sistema transistorizado; y el control de ajuste para la medición es sustituido por un óhmetro de lectura directa, tal como se ilustra en la Fig. 2.13.

- Varilla de medición de resistividades.

Este instrumento es muy útil para una determinación rápida de la resistividad local del suelo, obteniéndose* valores aproximados de la misma.

La varilla de medición de resistividades, consiste básicamente de una varilla metálica la cual posee dos electrodos en su interior, uno en la punta de la varilla y el otro en el cuerpo de la misma. La punta de la varilla (cátodo) está debidamente aislada del resto de la misma (ánodo), con la finalidad de poder medir la resistencia entre ambos

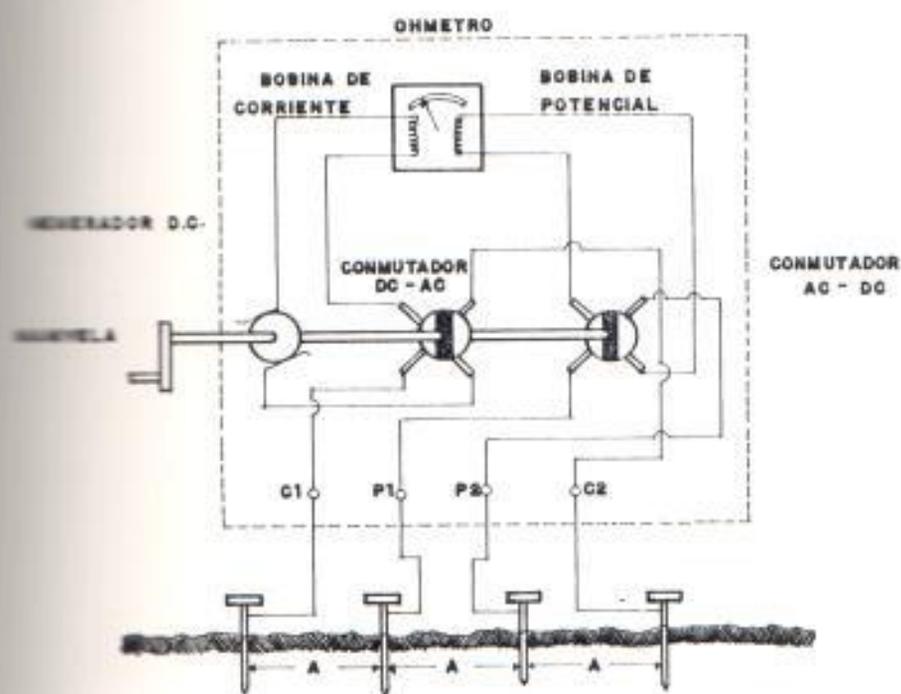


Fig. 2.13.- DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE UN MEGGER.

electrodos. La resistencia medida será función de la resistividad del suelo. El diagrama del circuito de medición de este instrumento es mostrado en la Fig. 2.14.

Tal como se ilustra en la figura, el instrumento trabaja bajo el principio de balance de voltajes el cual es indicado mediante un galvanómetro; para lo cual, un vibrador genera una corriente alterna la cual fluye através de los dos electrodos, produciendo una caída de voltaje entre los mismos. Esta caída de voltaje es comparada con la caída de voltaje producida en un potenciómetro calibrado en ohmios, el cual es ajustado hasta balancear el galvanómetro. La varilla tiene una constante de calibración, determinada por el área del electrodo positivo, la cual viene dada por el fabricante. En el balance, la resistividad del suelo será obtenida multiplicando el valor de la resistencia que señala el potenciómetro por la constante de calibración de la varilla.

- Caja para pruebas de suelos.

- Este equipo es utilizado principalmente en pruebas de laboratorio y sirve para realizar mediciones de resistividades eléctricas de muestras de cualquier tipo de terreno.

La caja para pruebas de suelos es básicamente un depósito de plástico transparente con placas metálicas en ambos extremos y con dos terminales (P_1 y P_2) para medición de voltaje, tal como se ilustra en la Fig. 2.15.

La medición de la resistividad de la muestra se basa en la aplicación de la ley de Ohm ($R=V/I$), para lo cual se aplica una corriente continua entre los extremos metálicos la cual fluye a través de la muestra y se mide la caída de potencial entre los terminales P_1 y P_2 . El valor de la resistividad de la muestra examinada se lo obtiene mediante la relación:

$$\rho = \frac{R W D}{L} \quad (2-2)$$

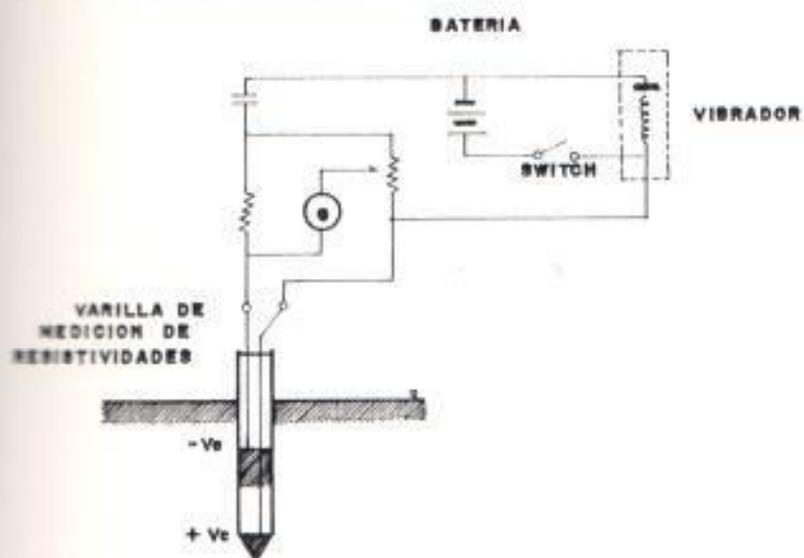


Fig. 2.14.- DIAGRAMA DEL CIRCUITO DE UNA VARILLA PARA MEDICION DE RESISTIVIDADES

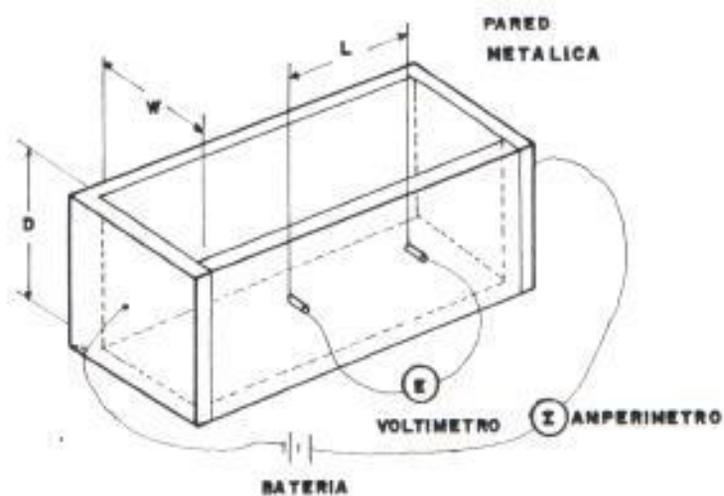


Fig. 2.15.- CAJA PARA PRUEBA DE SUELOS

Debido a que la caja posee una sección (W·D) numéricamente igual a la longitud (L) entre los dos terminales de potencial, el valor de la resistencia medida será igual al valor de la resistividad del electrolito.

e. Instrumentos multicombinados.

Una opción para reducir el número de equipos y el inconveniente de transportarlos durante los trabajos de campo, es el uso de un medidor de múltiples combinaciones. Los medidores multicombinados constan básicamente de dos instrumentos, uno con una bobina de alta resistencia, que actúa como voltímetro o galvanómetro; y otro con una bobina de baja resistencia, que actúa como milivoltímetro o amperímetro.

Por medio de la combinación de una o más llaves selectoras, el operador puede realizar las siguientes mediciones:

1. Para mediciones de potencial tubería-medio en la mayoría de suelos, se

emplea el instrumento de alta resistencia.

2. Para mediciones de potencial tubería-medio en suelos de muy alta resistividad se utiliza: la batería interna, el instrumento de baja resistencia para la lectura del potencial y el instrumento de alta resistencia como galvanómetro (medición potenciométrica).
3. Para mediciones de la resistencia del circuito externo se utiliza: el voltímetro, el amperímetro y la batería interna.
4. Para mediciones de la intensidad de corriente en circuitos externos se utiliza: la batería interna, el instrumento de baja resistencia para la lectura de la corriente y el instrumento de alta resistencia como galvanómetro (método del amperímetro de resistencia cero).
5. Para mediciones de la resistividad del suelo se utiliza: el voltímetro, el

amperímetro, la batería interna y un dispositivo para pruebas de resistividad.

f. Instrumentos registradores.

Son instrumentos capaces de realizar continuos registros de corrientes y voltajes C.C., los cuales son esenciales en los trabajos de control de la corrosión en aquellos lugares sujetos a corrientes de interferencia.

En líneas generales, un registrador es básicamente un instrumento de corriente continua arreglado de tal manera que imprima sobre un papel sensitivo, los valores de potencial o de corriente encontrados en la estructura. De lo expuesto se establece que el instrumento registrador emplea, en reemplazo de la aguja indicadora, una plumilla destinada a hacer los registros. El avance del papel sensitivo es realizado por un mecanismo de reloj cuya cuerda es accionada por un motor alimentado por las pilas del instrumento.

Los registros del instrumento permiten un análisis criterioso de las condiciones de corrosión o de protección de la estructura durante grandes periodos de tiempo, siendo comunes las observaciones bajo un periodo de 24 horas por cada punto probado.

g. Equipo auxiliar.

- Electrodos de referencia.

Los electrodos de referencia son los accesorios más importantes para el control de la corrosión. Ellos son utilizados, en complementación con los voltímetros, para las mediciones de los potenciales estructura-medio, permitiendo el cierre del circuito para la realización de las lecturas.

Los electrodos de referencia más utilizados son:

- El electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO_4), para mediciones en suelos y;

- El electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl), para mediciones en agua de mar.

1. Electrodo de Cobre/Sulfato de cobre.

Este electrodo es muy utilizado en el campo de trabajo debido a su gran resistencia a los golpes y al hecho de que minimiza los errores debido a la polarización. Consiste básicamente de una varilla de cobre metálico inmersa en una solución saturada de sulfato de cobre. Comercialmente puede ser encontrada en dos tipos, los cuales se ilustran en la Fig. 2.16.

En la figura se puede observar que el contacto entre el electrolito (suelo o agua) y el electrodo de cobre, se realiza por medio del tapón poroso hecho de madera o cerámica. Los cristales de sulfato de cobre sirven para mantener la actividad del ión cobre en un valor constante. Su potencial referido al

electrodo normal de hidrógeno es de 0,316 V y se vuelve más catódico con el incremento de la temperatura en un valor de 0,7 mV/°C. Para evitar errores debido a los efectos de la polarización, es necesario limitar la densidad de corriente en el electrodo de cobre a un valor que no exceda de 20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

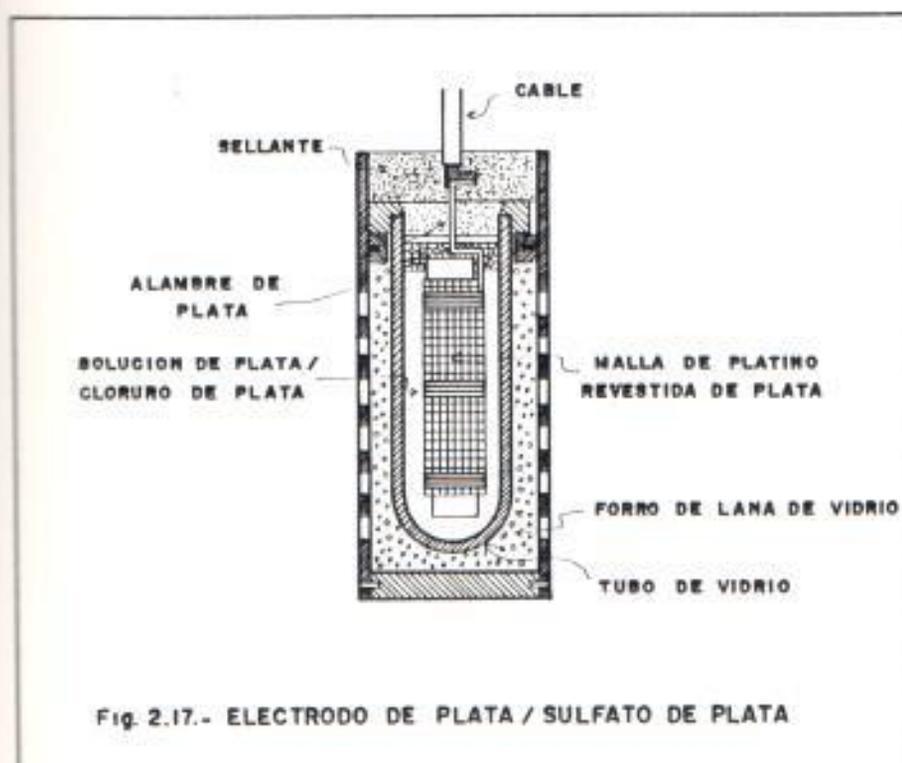
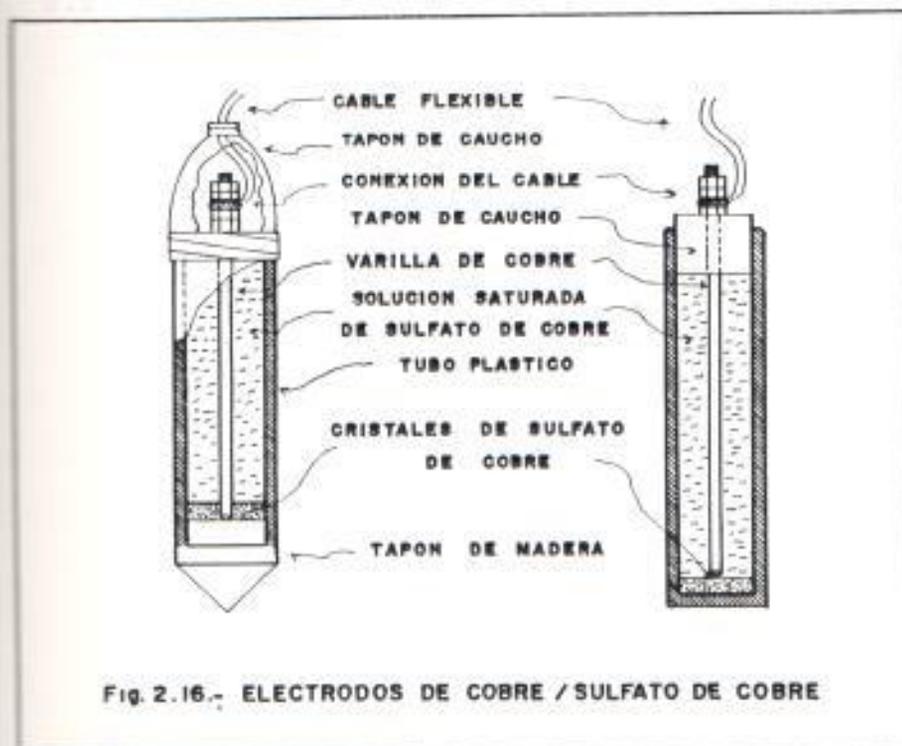
2. Electrodo de Plata/Cloruro de plata.

Este electrodo posee la característica de transportar más corriente que el electrodo de cobre/sulfato de cobre, sin presentar una *excesiva caída de voltaje que pueda afectar a las mediciones; por tal motivo es muy utilizado para mediciones de potenciales estructura-medio en agua de mar.

El electrodo de plata/cloruro de plata consiste básicamente de una malla de platino revestida de plata la cual está encerrada en un tubo de vidrio. Dicho revestimiento es con-

vertido parcialmente en cloruro de plata (AgCl) sumergiéndolo en una solución de ácido clorhídrico diluido, con lo cual el electrodo queda inmerso en una solución de cloruro de plata. La Fig. 2.17 muestra esquemáticamente los elementos que constituyen un electrodo de plata/cloruro de plata. Su potencial, referido al electrodo normal de hidrógeno, es de 0,288 V.

Una mayor información sobre todos los instrumentos utilizados en las pruebas de control de la corrosión pueden ser encontrados en el "Libro de referencia sobre instrumentos para pruebas de Electrólisis, Corrosión y Protección catódica" (X52164) preparado por el Grupo de instrumentación Task del Comité de corrosión de la A.G.A. (American Gas Association).



2.2.3. TECNICAS EMPLEADAS PARA LAS MEDICIONES ELECTRICAS

a. Mediciones de potenciales tubería-suelo.

Para una determinación correcta de los valores de potenciales tubería-suelo, es necesario, al realizar las mediciones, seguir las siguientes indicaciones:

Coloque el electrodo de referencia sobre el suelo en dirección perpendicular a la tubería, para el caso de lecturas por el método "sobre la línea" o lejos de la tubería, para lecturas "remotas". La base del electrodo deberá estar firmemente en contacto con suelo húmedo. En el caso de suelos extremadamente secos, será necesario humedecer la tierra alrededor del electrodo con el fin de obtener un buen contacto. Conecte el terminal positivo del voltímetro de alta resistencia interna o voltímetro potenciométrico al electrodo de referencia y el terminal negativo del instrumento a la tubería metálica a inspeccionar, tal como se ilustra en la Fig. 2.2.

- Mediciones de potencial "sobre la línea".

La inspección de potenciales empleando el método "sobre la línea", la misma que fue ilustrada en la Fig. 2.3, para la cual se toma una primera lectura del potencial tubería-suelo en la cercanía de un punto de prueba ubicado en la superficie. En el caso de no existir puntos de prueba en el área a inspeccionar, se procederá a hacer contacto con la tubería mediante el empleo de varillas metálicas y se realizará la medición de potencial. Luego se tomarán una serie de lecturas de potencial moviendo, a intervalos fijos, el electrodo de referencia a lo largo de la trayectoria de la tubería, usando para ello un cable de baja resistencia y lo suficientemente largo para mantener el circuito a medida que se traslada el electrodo. La localización de cada posición del electrodo junto con el potencial medido deberá ser registrado y graficado.

- Determinación de una tierra eléctrica-
mente "remota".

Para ciertas pruebas es necesario conocer la distancia, con respecto a la tubería, en que la tierra se comporta eléctricamente remota. Esta posición puede ser determinada mediante una serie de lecturas de potencial entre la estructura y un electrodo de cobre/sulfato de cobre, el cual es movido lejos de la tubería a intervalos fijos de distancia. Cuando estos datos son graficados, se obtendrá una curva similar a la de la Fig. 2.18.

En el ejemplo descrito por la curva de la Fig. 2.18, se puede observar que a partir de una distancia de 30 metros de la tubería, existe sólo un ligero incremento en el potencial; por lo tanto se puede considerar, para propósitos prácticos, que a una distancia de 30 metros existe una tierra eléctricamente remota.

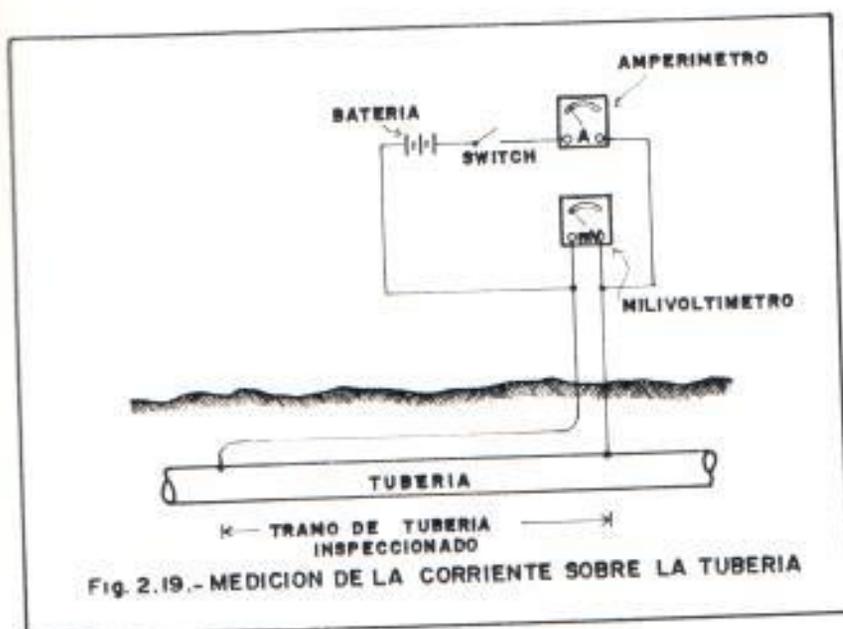
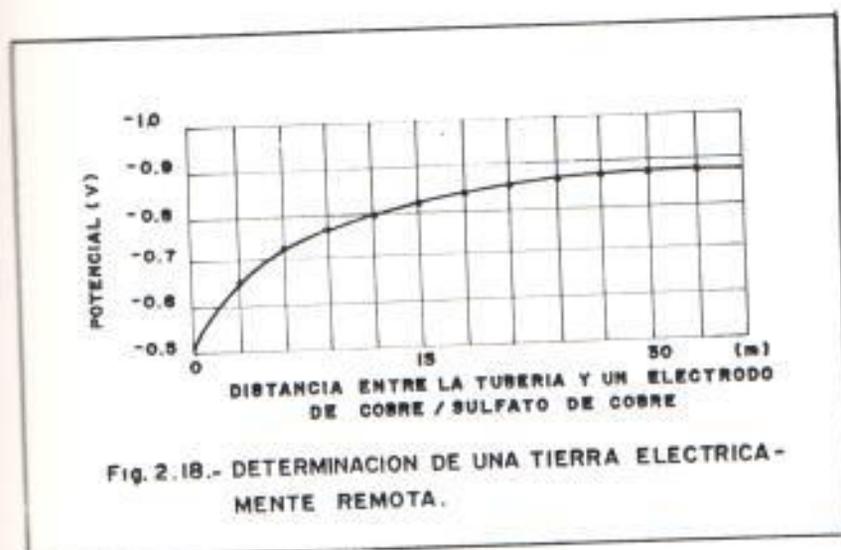
La distancia a una tierra eléctrica-

mente remota no será necesariamente la misma en todos los puntos a lo largo de la tubería, ya que esta distancia se ve influenciada por el efecto de la resistividad del terreno. Por ejemplo; en suelos de alta resistividad, la distancia a una tierra eléctricamente remota tiende a ser mayor.

b. Mediciones de la corriente de la tubería.

Uno de los procedimientos más utilizados para la determinación de la corriente que fluye sobre una tubería, se basa en la aplicación de la Ley de Ohm sobre la caída de voltaje originada por el paso de la corriente através de un tramo de tubería de resistencia conocida. La Fig. 2.19 ilustra el diagrama de conexiones para este tipo de medición, siendo el procedimiento a seguir el siguiente:

1. Mida la resistencia del circuito (constituido por los cables de prueba y el tramo de tubería a inspeccionar); para lo cual se inyecta, mediante el empleo de una batería, una corriente



de valor conocido la cual fluye a través del circuito originando una caída de voltaje entre los terminales de los cables de prueba. Este voltaje es medido y su valor es empleado para calcular la resistencia del circuito haciendo uso de la Ley de Ohm ($R=V/I$).

2. Desconecte la batería y mida la caída de voltaje entre los terminales de los cables de prueba causada por la corriente normal que fluye sobre la tubería. Generalmente este valor es del orden de los milivoltios. Es necesario conocer la resistencia interna del instrumento con el fin de aplicar el factor de corrección en las mediciones obtenidas. Anote la polaridad de la conexión del voltímetro e indique la dirección del flujo de la corriente a lo largo de la tubería.

3. Usando la tabla de resistencias de tuberías (Tabla XI), determine la resistencia del tramo de tubería inspeccionado.

4. Calcule la corriente que fluye sobre la tubería mediante el empleo de la Ley de Ohm, es decir:

$$\text{Corriente (mA)} = \frac{\text{Valor corregido de la caída de voltaje del paso 2 (mV)}}{\text{Resistencia del tramo de tubería inspeccionado (\Omega)}}$$

Para una mejor comprensión del procedimiento aplicado para la medición de la corriente que fluye sobre una tubería, se desarrollará un ejemplo considerando un tramo de 200 pies de una tubería de 30 pulgadas de diámetro construida de acero extra resistente, la cual pesa 119 libras por pie.

Paso 1:

- Corriente de la batería = 1,2 A.
- Caída de voltaje = 0,108 V.
- Resistencia del circuito = $\frac{0,108}{1,2}$
= 0,09 Ω

Paso 2:

- Caída de potencial entre los terminales de los cables de pruebas = 0,16 mV.
- Rango de lectura del instrumento = 2 mV
- Resistencia del instrumento = 1.000 Ω/V
- Terminal positivo del instrumento conectado en el extremo oeste del tramo de tubería inspeccionado.
- Factor de corrección = $\frac{(2 + 0,09)}{2}$
= 1,045
- Potencial corregido = $0,16 \times 1,045$
= 0,17 mV.

Paso 3:

Usando los datos de la Tabla XI se establece:

- Resistencia del tramo de tubería bajo prueba = $1,81 \times 10^{-6} \times 200 = 0,00036 \Omega$.

Paso 4:

$$- \text{Corriente} = \frac{0,17 \text{ mV}}{0,00036 \Omega} = 472 \text{ mA.}$$

- Dirección: de oeste a este.

c. Medición de la resistencia eléctrica del revestimiento.

Los métodos utilizados en la práctica para la determinación de la resistencia eléctrica efectiva del revestimiento, sobre un tramo de tubería, se basa en las mediciones de la resistencia a tierra del tramo de tubería inspeccionada. Este valor de resistencia incluye la resistencia eléctrica del revestimiento mas la resistencia eléctrica de contacto entre la tubería y la tierra. La resistencia de contacto varía en proporción directa a la resistividad efectiva del suelo a lo largo del tramo de tubería bajo prueba. Esto significa que la resistencia eléctrica efectiva del revestimiento en suelos de baja resistividad será substancialmente menor que en aquellos casos con

idéntico revestimiento pero que están ubicadas en suelos de alta resistividad.

La técnica empleada para la medición de la resistencia eléctrica del revestimiento, se ilustra en la Fig. 2.20 y su procedimiento es el siguiente:

1. En cada uno de los dos puntos de prueba, tome lecturas del potencial tubería-suelo con el interruptor en las dos posiciones es decir, "conectado" y "desconectado" y determine el cambio de potencial (ΔV) de la tubería. Luego obtenga el valor promedio de los dos valores ΔV .
2. Así mismo, en cada uno de los dos puntos de prueba calcule el valor de la corriente que fluye sobre la tubería (siguiendo el procedimiento aplicado en el literal b.) con el interruptor en las posiciones "conectado" y "desconectado" y determine el cambio de corriente (ΔI) de la tubería. Luego obtenga la diferencia entre los dos valores ΔI .

3. Posteriormente, divida el valor promedio de ΔV para la diferencia de corriente ΔI , obteniendo de esta manera la resistencia a tierra (R_T) del tramo de tubería bajo prueba. Luego multiplique la superficie de la tubería, en el tramo inspeccionado, por la resistencia a tierra con el fin de obtener la resistencia eléctrica efectiva del revestimiento (R_{RE}), la cual viene expresada en $\Omega \cdot m^2$.

Para una mejor comprensión del procedimiento antes citado, se procederá a desarrollar un ejemplo asumiendo que el tramo de tubería bajo prueba tiene una longitud de 4.500 metros y un diámetro de 0,32 metros (12,75 pulgadas), lo cual significa una superficie de tubería de 4.524 m^2 .

- Punto de prueba 1.

* Con el interruptor conectado:

$$V = - 1,75 \text{ V.}$$

$$I = + 2,25 \text{ A.}$$

* Con el interruptor desconectado:

$$V = - 0,89 \text{ V.}$$

$$I = + 0,09 \text{ A.}$$

Por lo tanto:

$$\Delta V = - 0,86 \text{ V.}$$

$$\Delta I = + 2,16 \text{ A.}$$

- Punto de prueba 2.

* Con el interruptor conectado:

$$V = - 1,70 \text{ V.}$$

$$I = + 2,03 \text{ A.}$$

* Con el interruptor desconectado:

$$V = - 0,88 \text{ V.}$$

$$I = - 0,05 \text{ A.}$$

Por lo tanto:

$$\Delta V = - 0,82 \text{ V.}$$

$$\Delta I = + 2,08 \text{ A.}$$

(Corrientes negativas indican flujo de corriente en dirección opuesta)

- Cálculo de la resistencia eléctrica del revestimiento.

$$\begin{aligned}\Delta V \text{ promedio} &= (-0,86 + (-0,82))/2 \\ &= -0,84 \text{ V.}\end{aligned}$$

$$\Delta I_{1-2} = 2,16 - 2,08 = 0,08 \text{ A.}$$

$$R_T = 0,84/0,08 = 10,5 \Omega.$$

$$R_{re} = 10,5 \times 4,524 = 47,502 \Omega \cdot m^2$$

d. Mediciones de resistividades del suelo.

- Método de los cuatro electrodos.

Este método es también conocido con el nombre de método de Wenner. Es el más práctico y utilizado en los trabajos de control de la corrosión, dando lecturas promedio de las resistividades del suelo a una profundidad equivalente al espaciamiento entre electrodos.

El procedimiento adoptado en este sistema de medición, consiste en alinear cuatro electrodos de acero enterrados en el suelo a una profundidad B , y manteniendo una distancia igual A entre electrodos adyacentes, tal como se ilustra en la Fig. 2.21. En este arreglo, los electrodos interiores son los de potencial en tanto que los exteriores son los de corriente.

El principio básico que involucra el método de los cuatro electrodos, consiste en inyectar, hacia el suelo, una corriente alterna por medio de los electrodos de corriente C_1 y C_2 y posteriormente medir la caída de potencial que se produce en el suelo entre los electrodos de potencial P_1 y P_2 . De este modo podemos obtener el valor de la resistencia mutua R mediante el empleo de la relación tensión/corriente.

La resistividad del suelo a una profundidad "A" es obtenida mediante la aplicación de la siguiente ecuación

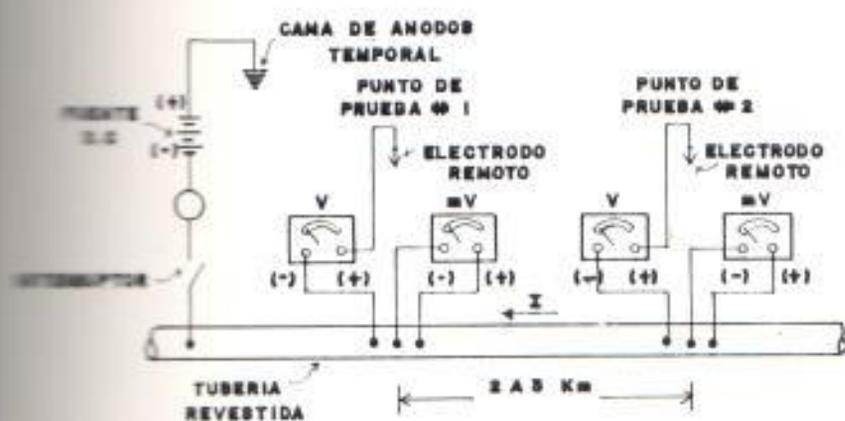


Fig. 2.20.- MEDICION DE LA RESISTENCIA ELECTRICA DEL REVESTIMIENTO.

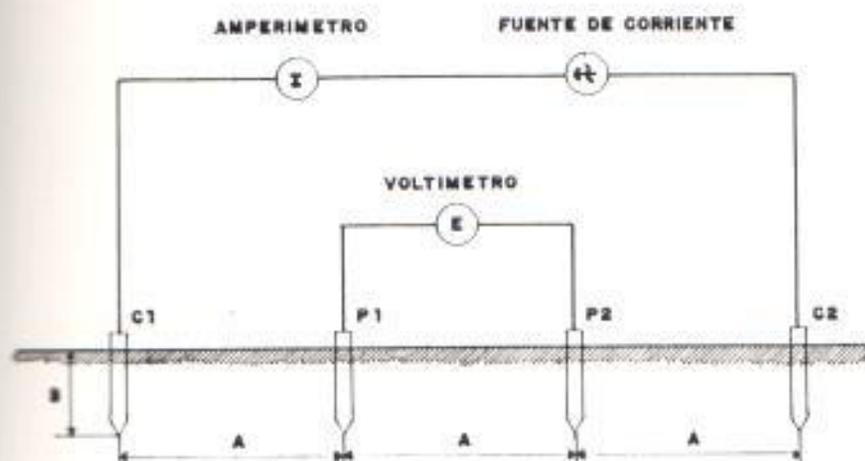


Fig. 2.21.- METODO DE LOS CUATRO ELECTRODOS PARA LA MEDICION DE RESISTIVIDADES DEL SUELO.

derivada por F. Wenner en el reporte No 258 del "Bulletin of the Bureau of Standards", Vol. 12, No 3, páginas 469-482 de Febrero 3 de 1916:

$$\rho_w = \frac{4\pi AR}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}} \quad (2-3)$$

Donde:

ρ_w = Resistividad del suelo en el lugar de la medición y a una profundidad igual a "A" ($\Omega \cdot \text{cm}$).

R = Resistencia mutua medida (Ω).

A = Distancia entre electrodos adyacentes (cm).

B = Profundidad de enterramiento de los electrodos de corriente y de potencial (cm).

Si la distancia "B" es muy pequeña comparada con "A", como es el caso de las pruebas realizadas en la práctica, la anterior ecuación puede ser simplificada a:

$$\rho_w = 2 \cdot \pi \cdot A \cdot R \quad (2-4)$$

Existen ciertos instrumentos tales como el Vibroground y el Megger, descritos en el numeral 2.2.2, los cuales emplean el método de los cuatro electrodos en su funcionamiento dando lecturas directas del valor de la resistencia mutua "R".

Para el empleo correcto del Vibroground, en las mediciones de resistividades del suelo, es necesario observar la siguiente indicación:

Evite alinear los electrodos en dirección paralela a la trayectoria de la tubería que se está inspeccionando, ya que la presencia de dicha estructura metálica puede ocasionar la obtención de valores de resistividad más bajos que los verdaderos. Esto se debe a que parte de la corriente de prueba inyectada al suelo, podría fluir a lo largo de la tubería, que es una trayectoria de más baja resistencia, antes que fluir por la tierra. Por lo tanto se recomienda, como una buena práctica de medición, alinear los electrodos en

dirección perpendicular a la tubería con el electrodo más cercano a una distancia no menor de 5 metros de la misma.

2.3. CLASIFICACION DE LOS MEDIOS DE PREVENCION

Los procesos corrosivos que se presentan en estructuras metálicas enterradas o sumergidas, como es el caso de las tuberías, pueden ser eliminados con relativa facilidad y a bajo costo mediante la utilización de técnicas o medios de prevención, de los cuales los más importantes son:

- a. La aplicación de revestimientos protectores y;
- b. La protección catódica.

Para una mayor y más segura protección contra la corrosión, se recomienda la combinación de los métodos antes nombrados.

2.3.1. REVESTIMIENTOS PROTECTORES ANTICORROSIVOS

Los revestimientos protectores empleados sobre estructuras metálicas enterradas o sumergidas, tienen la finalidad específica

de formar una barrera aislante entre el material metálico y el electrolito que lo circunda, evitando de esta manera la formación de las pilas de corrosión.

Por tal motivo, un buen revestimiento protector deberá tener las siguientes características:

1. Facilidad de aplicación.
2. Buena adhesión al material metálico.
3. Resistencia a los impactos.
4. Resistencia a las acciones mecánicas (contracciones y expansiones) de los suelos.
5. Resistencia al agua.
6. Alta resistencia eléctrica.
7. Resistencia a los productos químicos.
8. Resistencia a las bacterias del suelo.
9. Estabilidad de sus propiedades físicas, ante las variaciones de temperatura.
10. Durabilidad.

En la actualidad, existe una inmensa variedad de revestimientos anticorrosivos que pueden ser aplicados para la protección de tuberías enterradas, de los cuales los más utilizados son los siguientes:

- Esmalte de alquitrán de carbón.
- Esmalte de asfalto de petróleo.
- Cintas plásticas de cloruro de polivinil (PVC), polietileno o poliéster.
- Espuma rígida de poliuretano.
- Tintas betuminosas (epoxi con alquitrán de carbón)

a. Revestimientos a base de esmalte de alquitrán de carbón.

Este tipo de revestimiento es el más utilizado en la práctica, ya que presenta un mejor desempeño en las tuberías de acero enterradas.

Su aplicación sobre las tuberías es al caliente, siguiendo las siguientes etapas (Fig. 2.22):

- 1ª Etapa: Limpieza cuidadosa de la superficie metálica del tubo, por medio de cepillos de acero o lija de arena. Esta operación es de extrema importancia para el fin de lograr una perfecta adhesión del revestimiento del tubo.

- 2ª Etapa: Aplicación de una pintura base o "primario", compatible con el esmalte de alquitrán de carbón, la cual se aplica en forma de película húmeda en un espesor aproximado de 8 milésimas de centímetro. Los materiales más indicados para este "primario" son las tintas formadas por una solución de alquitrán mezclada con óxido de hierro y/u óxido de plomo. El objetivo de este "primario" es el de favorecer la adhesión del esmalte.

- 3ª Etapa: Aplicación de una película mínima de 0,25 cm de esmalte de alquitrán de carbón. Este material debe ser aplicado al caliente, con una temperatura recomendada por el fabricante, la cual se sitúa en un rango de 230 a 270 ° C. Se deberá tener especial

cuidado en aplicar el esmalte caliente una vez que el "primario" se encuentre completamente seco, lo que contribuirá a la obtención de un revestimiento de buena calidad.

- 4ª Etapa: Después que el esmalte es aplicado y aún en su fase líquida, se forra la tubería con tela de fibra de vidrio. Este forrado se hace con un traslape mínimo de 0,6 cm y máximo de 1,9 cm de modo que dicha tela quede embebida y centrada en el esmalte, sin mostrar arrugas ni torcimientos. La finalidad principal de este refuerzo de fibra de vidrio es la de dar al revestimiento una buena resistencia mecánica.

- 5ª Etapa: La siguiente etapa consiste en la aplicación, también embebida en el esmalte, de una capa de papel de fieltro de asbesto, de modo de obtener una superficie lisa y ausente de defectos visibles. Esa capa de papel de asbesto tiene como finalidades principales las de dar al revestimiento una

buena resistencia al impacto, buenas características de absorción de las tensiones del suelo sobre la tubería y la de aumentar la resistencia del revestimiento al paso de las corrientes eléctricas.

- 6ª Etapa: Aplicación de papel Kraft sobre el revestimiento de papel de fieltro, con las siguientes finalidades:

- a. Ayudar a proteger al revestimiento contra calentamiento excesivo (cuando la tubería está expuesta al sol por largo periodo).
- b. Proteger a la tubería contra daños por abrasión.
- c. Servir como indicador visual de daños causados al revestimiento durante los periodos de almacenamiento, manipulación, transporte, etc.

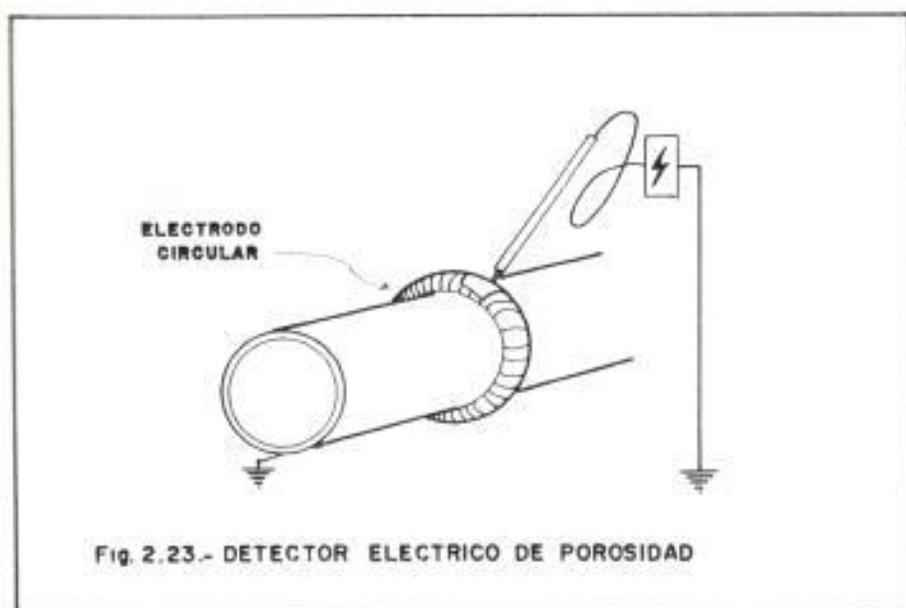
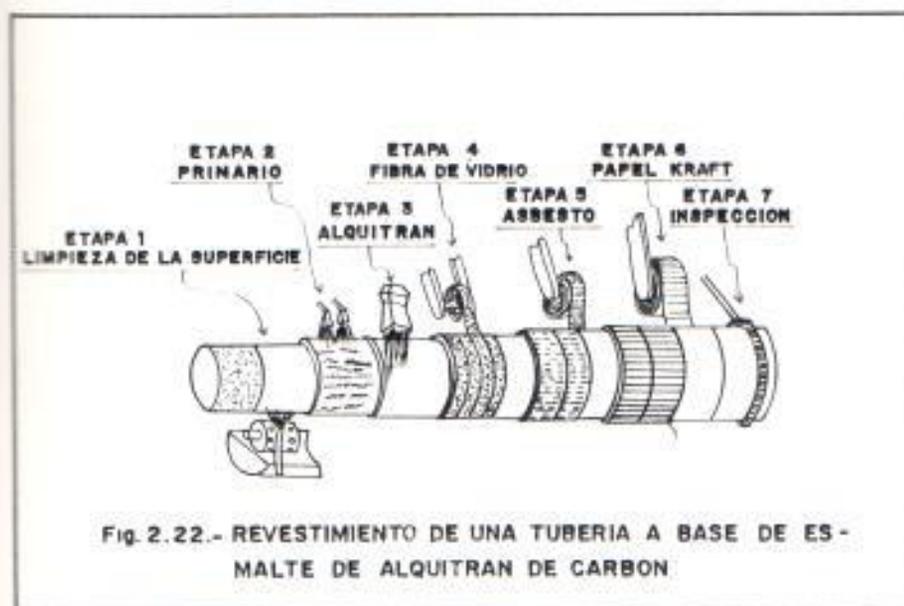
- 7ª Etapa: Finalmente, después de revestidos, las tuberías necesitan ser

inspeccionados para la localización y reparación de las fallas, utilizando para tal propósito un detector eléctrico de porosidad llamado "detector holiday". Este detector trabaja mediante la aplicación de un voltaje de varios miles de voltios, de acuerdo a la Tabla VIII, entre el metal protegido y un electrodo de metal colocado sobre el revestimiento (Fig. 2.23), localizando de esta manera las áreas donde ocurran cambios en la resistencia eléctrica y que significarían la existencia de porosidades que podrían escapar a la detección visual.

TABLA VIII
Voltajes recomendados para la utilización del "detector holiday"

Máximo espesor del revestimiento		Máximo voltaje (V)
pulgadas	centímetros	
3/32	0,238	7.200
4/32	0,317	9.600
5/32	0,397	12.000
6/32	0,476	14.400

Fuente: GENTIL, V., Proteção catódica, IEC - Instalações e Engenharia de corrosão Ltda., Rio de Janeiro, 1981



El revestimiento aplicado, siguiendo la secuencia de etapas anteriormente mencionadas, constituye el llamado revestimiento simple. En locales de mayor agresividad del suelo o en tuberías sujetas a fuertes corrientes de interferencia se emplea el llamado revestimiento doble. Para la ejecución del revestimiento doble, se repite, después de la 4^a etapa, las etapas 3^a y 4^a nuevamente, siguiendo después las etapas 5^a, 6^a y 7^a en su secuencia normal.

En lo que respecta a la eficiencia de los revestimientos utilizados en tuberías enterradas, ésta debe estar dentro de los siguientes valores:

- Para revestimientos simples: 95 % inicial y 90 % final.

- Para revestimientos dobles: 98 % inicial y 94 % final.

b. Revestimiento a base de esmalte de asfalto de petróleo.

Estos revestimientos, aunque en menor escala que los anteriores, son también muy utilizados en tuberías que van a ser enterradas, siendo los métodos de aplicación y sus cuidados, básicamente los mismos.

Con relación a su desempeño, poseen de un modo general las mismas cualidades que los revestimientos de alquitrán de carbón, en lo que se refiere a su facilidad de aplicación, buena adherencia, resistencia a los esfuerzos y resistencia química a la acción de los suelos y aguas; sin embargo, tienen entre sus grandes desventajas, la de no poseer una buena resistencia química a los productos del petróleo y la de envejecer más rápidamente con el pasar del tiempo, perdiendo de esta manera su eficiencia. Su rápido envejecimiento se debe, principalmente, a su mayor tasa de absorción de humedad.

Los valores de eficiencia, que presenta este tipo de revestimiento son los siguientes:

- Para revestimientos simples: 95 % inicial y 75 % final.
- Para revestimientos dobles: 98 % inicial y 85 % final.

c. Revestimientos con cintas plásticas.

Los revestimientos a base de cintas plásticas, normalmente las de polietileno, PVC y otras, deben ser aplicadas de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes, las cuales difieren de un producto a otro.

Estos revestimientos presentan la ventaja de ser aplicados en frío, normalmente en el mismo campo de trabajo; y poseen de un modo general las siguientes características:

1. Muy fácil aplicación.

2. Menor adherencia, en relación a los revestimientos a base de asfalto o alquitrán.
3. Buena resistencia a la acción química de los suelos y aguas, pero muy baja resistencia química a los productos del petróleo.
4. Muy baja resistencia a los esfuerzos del suelo y a los impactos, principalmente cuando son golpeados por materiales con punta, como las piedras.
5. Poca resistencia a la abrasión.
6. Presentan una eficiencia regular, siendo sus valores más usuales los siguientes:
 - Para revestimientos con una capa de cinta: 40% inicial y 30 % final.
 - Para revestimientos con dos capas de cinta: 50 % inicial y 40 % final.

Por estas razones, este tipo de revesti-

miento se utiliza con frecuencia para la protección de tuberías pequeñas, como es el caso de los ramales de servicio de tuberías principales.

d. Revestimientos a base de tintas betuminosas (Epoxi-alquitrán de carbón).

Es un revestimiento aplicado en frío, de fácil aplicación. Estos revestimientos combinan las propiedades de impermeabilidad del carbón con la buena resistencia a los agentes químicos de la resina epoxi; sin embargo presentan dos grandes desventajas, las cuales son:

- Baja resistencia mecánica y
- Poco espesor, lo cual implica una baja eficiencia del revestimiento.

Este revestimiento se obtiene mediante la aplicación, previa limpieza de las superficies metálicas, de dos capas de recubrimiento epóxico modificado con alquitrán de carbón, logrando una película seca con un espesor mínimo de 0,08 cm.

Los valores de eficiencia, usuales para este tipo de revestimiento son los siguientes:

- 60 % inicial y 50 % final.

e. Revestimiento con espuma rígida de poliuretano.

Este revestimiento es aplicado en tuberías que transportan fluidos calientes y se lo aplica hasta obtener un espesor mínimo de 5 cm. Es un excelente revestimiento anticorrosivo, por lo que su costo es muy alto, siendo aplicado solamente en los casos en que se desea combinar la protección contra la corrosión con el revestimiento térmico. Los valores de eficiencia más usuales son los siguientes:

- 95 % inicial y 90 % final.

2.3.2. PROTECCION CATODICA

El método más seguro y económico para la protección contra la corrosión de instala-

ciones metálicas enterradas, consiste en la aplicación de la Protección catódica complementada con el uso de un revestimiento adecuado.

La correcta aplicación de un sistema de Protección catódica equivale a la obtención de un revestimiento perfecto, es decir, totalmente ausente de fallas.

El método de Protección catódica se basa en la aplicación de la corriente necesaria para alterar el potencial eléctrico natural de la estructura metálica enterrada hasta lograr alcanzar el nivel de protección ($-0,85$ V con relación al electrodo de Cobre/sulfato de cobre). Debido a que dicha corriente es función del área expuesta al medio agresivo, y ya que la utilización de revestimientos reducen considerablemente dicha área, entonces, cuanto mejor sea la calidad del revestimiento, más bajo será el costo de la Protección catódica y viceversa, mientras más baja sea la calidad del revestimiento, mayor será el costo de la Protección catódica, ya que la cantidad de corriente necesaria para proteger la tubería será mayor.

Debido a que el tema central de la presente Tesis es precisamente la aplicación de la Protección catódica en tubería enterradas, por lo tanto, en el capítulo siguiente se describirán, detalladamente, los principios básicos y los métodos de aplicación de la Protección catódica.

CAPITULO III

PROTECCION CATODICA

3.1. PRINCIPIOS BASICOS Y FUNDAMENTOS DE LA PROTECCION CATODICA

3.1.1. GENERALIDADES

La Protección Catódica es definida como un método electroquímico que detiene o reduce la corrosión de un metal en contacto con un electrolito, haciendo que el metal a protegerse se convierta en el cátodo de la celda electroquímica, mediante el paso de una corriente eléctrica proveniente de un ánodo o de una fuente de corriente externa.

La aplicación de la técnica de Protección Catódica no es reciente, siendo utilizada por primera vez en Inglaterra, en el año 1824, por Sir Humphrey Davy, para retardar la corrosión de las planchas de cobre utili-

zadas en los cascos de los navíos del Almirantado Británico, mediante la fijación de pequeños pedazos de zinc sobre dichas planchas.

Después de este uso pionero, la Protección Catódica fue desarrollándose y encontrando nuevos campos de aplicación, hasta llegar a convertirse en la actualidad en el método más efectivo y utilizado para la prevención de la corrosión en estructuras metálicas enterradas o sumergidas.

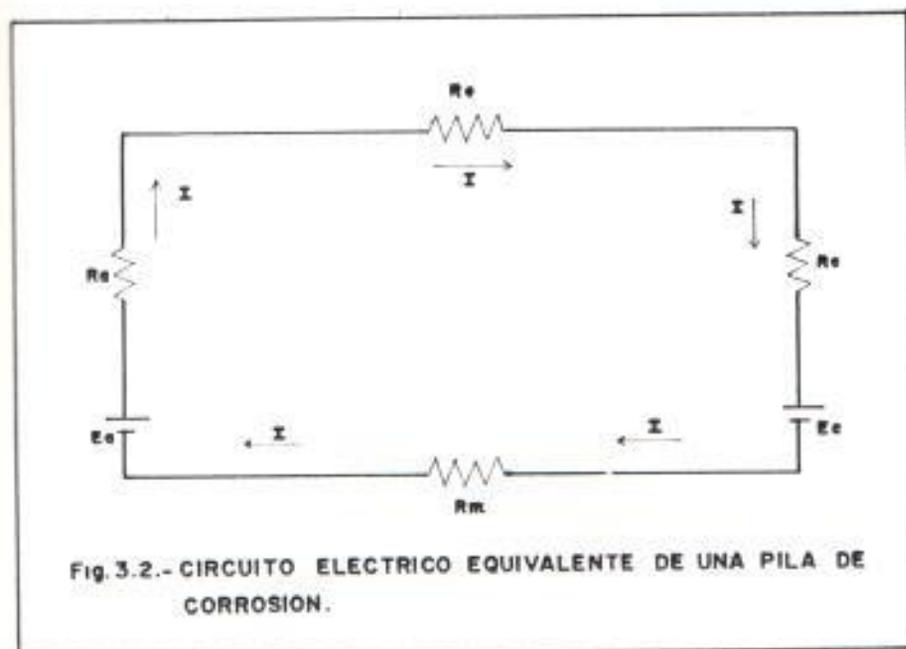
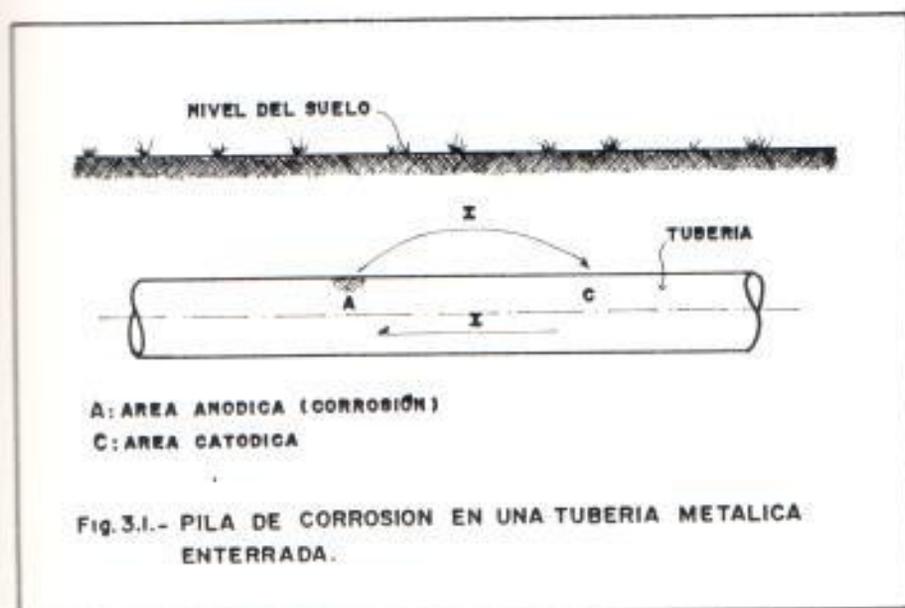
3.1.2. MECANISMO DE LA PROTECCION CATODICA

La Protección Catódica tiene su base en el hecho de que la corrosión de los metales en presencia de un electrolito, es de naturaleza electroquímica, esto es, las estructuras metálicas enterradas o sumergidas se corroen debido a la formación de pilas locales sobre su superficie, conforme a lo expuesto en el Capítulo I. Estas pilas están constituidas por áreas anódicas y catódicas con la consecuente generación de flujos de corriente eléctrica en el sentido convencional, esto es, desde las áreas anó-

dicas hacia las áreas catódicas a través del electrolito, produciéndose el retorno de la corriente a través de un circuito externo, que en el caso de las tuberías enterradas está constituido por los propios tubos, tal como se muestra en la Fig. 3.1. Como consecuencia de este proceso de corrosión, se tiene un desgaste del área anódica y consecuente protección del área catódica.

En función de estas consideraciones y usando el mismo principio de corrosión electroquímica, es fácil concluir que si conseguimos hacer que toda la superficie de una estructura metálica, enterrada o sumergida, adquiera un comportamiento catódico, la estructura no sufrirá ataque corrosivo quedando completamente protegida por la acción de la "Protección Catódica".

En la realidad, mediante el empleo de la Protección Catódica, la corrosión no es eliminada sino transferida desde la estructura a ser protegida hacia un material metálico de bajo costo que es forzado a actuar como ánodo de la pila de corrosión.



Para analizar mejor el mecanismo de la Protección Catódica, podemos establecer una red eléctrica que simule el proceso de corrosión que existiría en una estructura metálica, y la cual se ilustra en la Fig. 3.2. Observando la figura antes referida, puede llegar a determinarse la ecuación fundamental de la corrosión, la cual es:

$$I = \frac{E_a - E_c}{R_a + R_c + R_e + R_m} \quad (3-1)$$

Donde:

I = Corriente de corrosión (A).

E_a = Potencial del ánodo (V).

E_c = Potencial del cátodo (V).

R_a = Resistencia del ánodo (Ω).

R_c = Resistencia del cátodo (Ω).

R_e = Resistencia del electrolito (Ω).

R_m = Resistencia del metal, entre el ánodo y el cátodo (Ω).

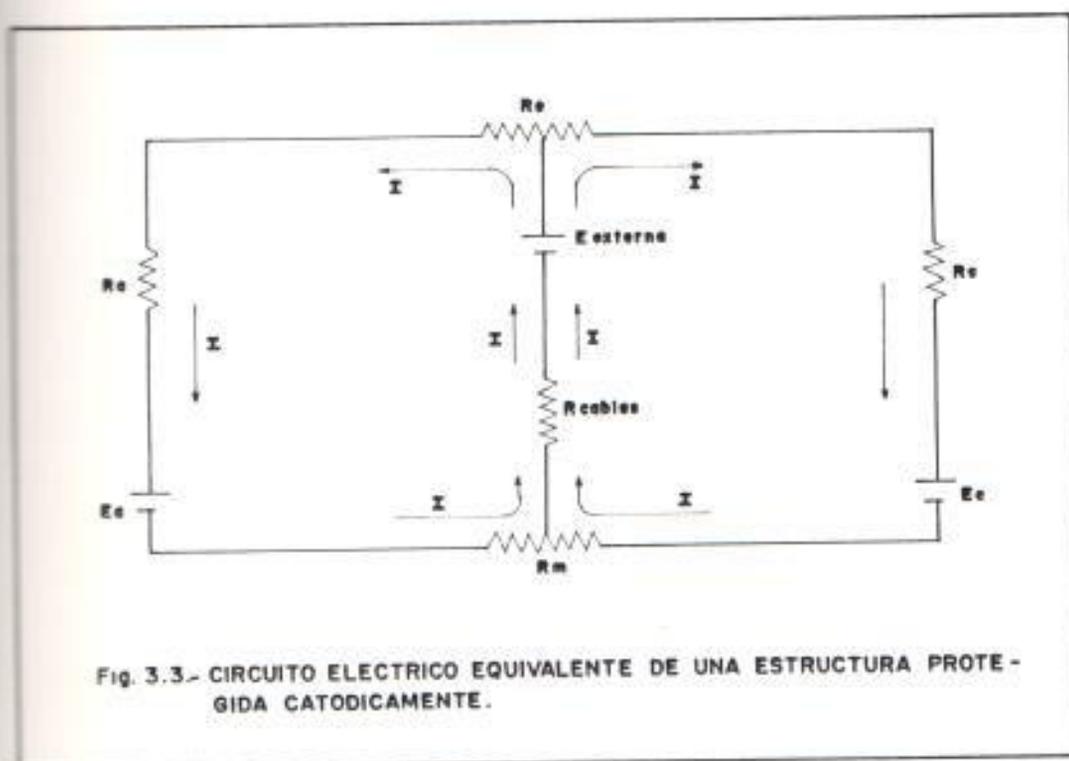
Examinando la ecuación (3-1), se determina que es posible eliminar el proceso corrosivo mediante la variación de una o más de las variables que controlan la corriente de corrosión. Para lograr este propósito, podemos:

- a. Anular la diferencia de potencial natural ($E_a - E_c$) de la estructura, para lo cual es necesario eliminar las heterogeneidades del electrolito y del metal. Este tipo de control resulta impracticable.
- b. Aumentar infinitamente el valor de las resistencias R_a y R_c , lo cual puede ser conseguido mediante la aplicación de un revestimiento "perfecto" sobre la superficie de la estructura, solución que no es práctica puesto que tal revestimiento es económicamente oneroso.
- c. Aumentar el valor de R_a , lo cual se lograría eliminando las sales solubles y la humedad del electrolito, pero aún logrando esto, el valor de R_c alcanzado continuaría siendo pequeño.
- d. Aumentar el valor de R_c , lo cual se lograría intercalando una junta aislante entre el ánodo y el cátodo, pero ya que la mayoría de las pilas de corrosión se establecen sobre la misma superficie de la tubería, entonces esta solución resultaría también impráctica.

Analizando todas estas soluciones propuestas, llegamos a la conclusión que la única manera de eliminar la corriente de corrosión es inyectando, a la estructura metálica, un flujo de corriente de protección, proveniente de una fuente externa, con una intensidad tal que sea capaz de anular las corrientes de corrosión de las diversas pilas existentes en la superficie metálica de la tubería. Este procedimiento es básicamente el fundamento de la Protección Catódica, el cual puede ser ilustrado mediante el circuito eléctrico equivalente de la Fig. 3.3, y en el que se observa que el área originalmente anódica pasa a recibir corriente del electrolito, paralizando el proceso corrosivo antes existente.

Fig. 3.3

Desde otro punto de vista, podemos concluir que la Protección Catódica consiste en tornar positivo el potencial del suelo o del agua que rodea a la estructura metálica que deseamos proteger, de tal manera que las corrientes de corrosión no puedan abandonar, directamente hacia el suelo, la superficie del metal.



3.1.3. CRITERIOS PARA LA PROTECCION CATODICA

El criterio más indicativo y universalmente aceptado para determinar si una estructura metálica se encuentra realmente protegida de la corrosión en toda su extensión, es el del potencial mínimo de protección que debe existir entre la estructura a proteger y el electrolito que lo circunda.

El criterio del potencial mínimo de protección establece que:

Para obtener una Protección Catódica completa de una estructura metálica, su potencial debe ser igual o menor que el potencial en circuito abierto del punto más anódico.

Aplicando dicho criterio para el caso de una estructura de hierro o acero, ésta se considera protegida cuando, con el funcionamiento del sistema de Protección Catódica, se consigue obtener cualquiera de las siguientes situaciones:

- a. Potenciales estructura/electrolito más negativos que $-0,85$ V C.C, con refe-

rencia a un electrodo de Cobre/Sulfato de cobre.

b. Potenciales estructura/electrolito más negativos que $-0,80$ V C.C, con referencia a un electrodo de Plata/Cloruro de plata.

c. Potenciales estructura/electrolito más negativos que $-0,95$ V DC, con referencia a un electrodo de Cobre/Sulfato de cobre, cuando el medio contiene bacterias anaeróbicas.

Para el caso de otros metales o aleaciones metálicas, los potenciales mínimos de protección van a variar, dependiendo del potencial natural de cada metal. Por lo tanto, un criterio bastante común para obtener el potencial mínimo de protección de otros metales y aleaciones, es la de producir una disminución de su potencial natural en un valor de $-0,25$ V C.C. Este criterio se aplica para el caso de mediciones realizadas con cualquier clase de electrodo de referencia.

3.1.4. SOBREPOTECCION

La sobreprotección de un material metálico es ocasionada por la aplicación de una elevada densidad de corriente, la cual se caracteriza por valores elevados de potenciales estructura/electrolito.

En el caso de estructuras de acero sin revestimiento, una sobreprotección no trae, en principio, ningún inconveniente al material del que está construida la tubería, pero lo que sí ocasiona es: un gasto de energía innecesario, consumo de los ánodos de sacrificio y sobrecarga del sistema.

Al contrario, para el caso de estructuras de acero revestidas, una sobreprotección no es deseable debido a que ocasiona una liberación del hidrógeno gaseoso que está depositado en la superficie catódica del metal, lo que puede traer como consecuencia un ampollamiento del revestimiento e inclusive, en aceros de alta resistencia, una fragilización del material.

Existe por lo tanto, un límite de potencial

de polarización, llamado el "sobrepotencial de hidrógeno" (ver numeral 1.1.4), más allá del cual se produce la liberación del hidrógeno gaseoso y que para el caso del hierro y del acero tiene un valor de 1,2 V (medido con un electrodo de referencia de Cobre/sulfato de cobre).

Debido a que el valor del sobrepotencial de hidrógeno varía con las condiciones del electrolito, el valor de 1,2 V dado en el párrafo anterior, es utilizado simplemente como una guía, lo cual implica que al aplicar un sistema de Protección Catódica, es conveniente no excederse demasiado del valor mínimo del potencial de protección, es decir de -0,85 V.

3.1.5. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA

El propósito de este numeral es el de recomendar procedimientos para el diseño de sistemas de Protección Catódica, de tal manera que se satisfaga los criterios listados en el numeral 3.1.3, garantizándonos con ello un máximo de seguridad en su operación

como medio efectivo de control de la corrosión.

1. Objetivos principales del diseño de un Sistema de Protección Catódica.

- Entregar, a la estructura a ser protegida, la cantidad adecuada de corriente de protección y distribuir dicha corriente de modo que el criterio seleccionado para la protección catódica sea logrado eficientemente.
- Minimizar las probabilidades de corrientes de interferencia que pudieran afectar a estructuras metálicas enterradas cercanas a la estructura protegida.
- Garantizar que la vida útil de operación del sistema de Protección Catódica, esté de acuerdo con la vida útil requerida para la estructura protegida.
- Dimensionar el sistema de Protección Catódica de tal manera que provea un adecuado margen para cambios en los

requerimientos de corriente en caso de expansión del sistema a proteger.

- Instalar el sistema de Protección Catódica en lugares donde la posibilidad de daños sea mínima.

2. Informaciones útiles para el diseño.

Un proyecto de Protección Catódica, para ser bien ejecutado, debe estar basado en una cuidadosa recopilación de datos con respecto a las características de la estructura a proteger y del medio en el que estará instalada dicha estructura. Todas estas informaciones deberán ser complementadas con las inspecciones y pruebas de corrosión que se realizan en el mismo campo de trabajo, y que al final determinarán el sistema de protección más adecuado.

a. Características de la estructura a ser protegida.

- Material del cual está fabricada la estructura a ser protegida.

- Características dimensionales y geométricas de la estructura.
 - Especificaciones y propiedades del revestimiento protector.
 - Características de construcción: existencias de juntas aislantes, acoplamientos, etc.
- b. Características del sitio en donde será instalada la estructura a proteger.
- Mapas que especifiquen la ubicación de la estructura a ser protegida.
 - Localización y características de otras estructuras metálicas enterradas existentes en las proximidades.
 - Determinación de la existencia o planeamiento de otros sistemas de Protección Catódica en las cercanías.
 - Localización de todas las fuentes de corriente continua existentes en las

proximidades, que pudieran causar problemas de corrosión electrolítica en la estructura en estudio.

- Localización y características de operación de líneas de transmisión eléctrica de alta tensión que puedan causar problemas de corrosión debido a la inducción de sobrevoltajes sobre la estructura a proteger.
- Accesibilidad a la estructura a ser protegida.
- Disponibilidad de fuentes de energía que sirvan para alimentar los rectificadores de Protección Catódica.
- Determinación de condiciones ambientales especiales.

c. Inspecciones de campo y pruebas de corrosión.

Para la realización de las inspecciones y pruebas de corrosión en el campo de trabajo, hay que considerar las

siguientes dos situaciones:

1. Estructura en proyecto.

Para este caso se requiere las siguientes inspecciones:

- Medición de la resistividad eléctrica del terreno.
- Localización de los lugares más adecuados para las instalaciones de la cama de ánodos y/o rectificadores.

2. Estructura existente.

Para el caso de una estructura ya construida, además de las inspecciones citadas para el caso anterior, se requiere:

- Inspección de potenciales.
- Pruebas de eficiencia del revestimiento.

- Determinación de la corriente necesaria de protección.
- Mediciones de corrientes de interferencia.
- Determinación del pH del suelo.
- Pruebas de corrosión bacterial.
- Pruebas de aislamiento entre la estructura a proteger y otras estructuras.

3.2. MEDICIONES EN LA RUTA DE LA TUBERIA

Como ya ha sido ampliamente estudiado en el Capítulo II, durante la etapa de inspección de la corrosión, resulta necesaria la realización de diversas mediciones eléctricas a lo largo de la ruta de la tubería, las cuales nos ayudan a determinar las características corrosivas a la cual se encontrará expuesta dicha tubería. Sin embargo, el alcance de este numeral es el de describir la realización de una prueba específica, la cual tiene como finalidad la de medir el requerimiento de corriente que exige un determinado tramo de tubería

para llegar a obtener un adecuado nivel de Protección catódica.

Dicha prueba consiste básicamente en inyectar, mediante el empleo de una fuente regulada de corriente continua y una cama de Ánodos provisional (chatarra de acero), una determinada cantidad de corriente hacia el tramo de tubería que está siendo estudiado. En esta prueba, la salida de la fuente de corriente continua debe ser ajustada hasta que los valores de potenciales de protección hayan sido obtenidos en cada uno de los extremos del tramo de tubería considerado. Una representación esquemática de esta prueba se muestra en la Fig 3.4.

Refiriéndonos a la Fig 3.4, una vez obtenidos los potenciales de protección en los puntos B y C, los cuales limitan el tramo de tubería en estudio, se procede a tomar la lectura del amperímetro que se encuentra instalado a la salida de la fuente de corriente continua. El valor de la corriente eléctrica así obtenido, se lo divide para el área de la tubería existente entre los puntos B y C, lo cual nos dará el valor de la densidad de corriente eléctrica que ha sido utilizada en la prueba. Este valor de densidad de corriente es el que deberá emplearse para el cálculo de la co-

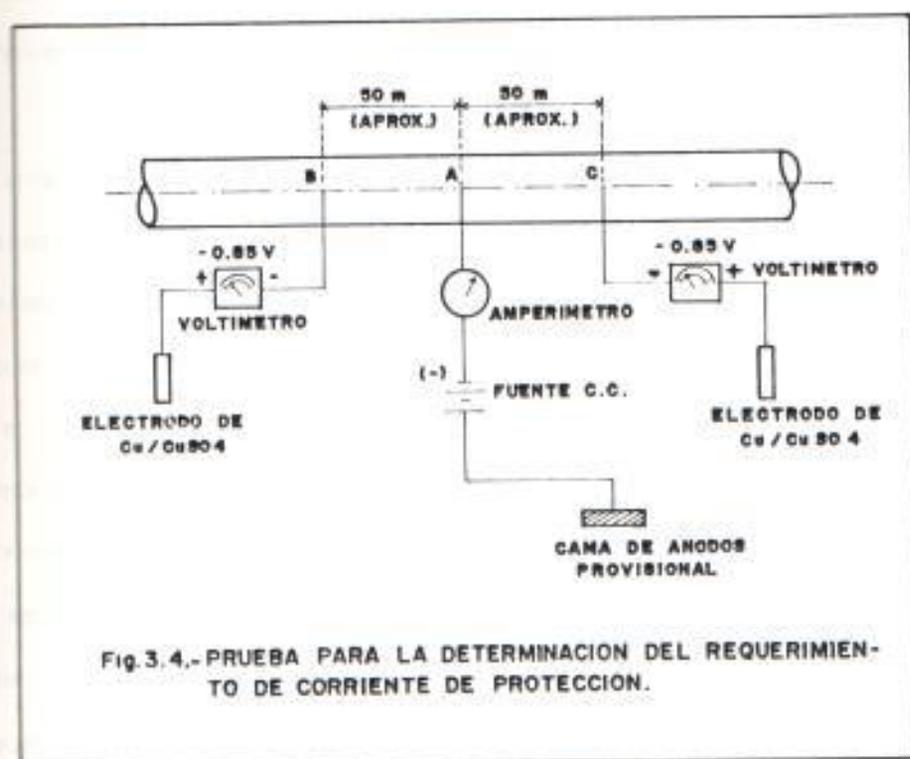


Fig. 3.4.-PRUEBA PARA LA DETERMINACION DEL REQUERIMIENTO DE CORRIENTE DE PROTECCION.

riente de protección que se requiere para proteger catódicamente la longitud total de la tubería.

Si bien es cierto que la metodología para la realización de la prueba de requerimiento de corriente es bastante sencilla, sin embargo existen ciertas limitaciones técnicas cuando se trata de aplicar dicha prueba para el caso de tuberías sin revestimiento.

La anterior afirmación se basa en que los requerimientos de corriente para una tubería sin revestimiento son usualmente elevados, por lo que existirá una considerable cantidad de corriente fluyendo a lo largo de la tubería, la misma que a su vez ocasionará una significativa caída de voltaje en el tramo de tubería considerado. Bajo estas consideraciones, se vuelve necesario limitar la longitud del tramo de tubería que puede ser estudiado, ya que si dicho tramo es muy largo, se corre el peligro de obtener un potencial excesivamente alto en el punto de drenaje de corriente. Con este antecedente, cuando se planea realizar una prueba de requerimiento de corriente sobre un tramo considerable de tubería sin revestimiento, será necesario contar, para dicha prueba, con una fuente de corriente continua capaz de suministrar una densi-

dad de corriente de por lo menos 30 mA/m² de superficie de tubería, y a su vez, el voltaje de la fuente de potencia deberá ser suficiente para forzar dicha corriente através de la cama de ánodos provisional hacia la tubería, por lo que generalmente se emplea para este caso, una máquina soldadora o un rectificador.

Es necesario anotar, que las pruebas de requerimiento de corriente, descritas en los párrafos anteriores, nos darán únicamente una razonable aproximación de la corriente de protección requerida para proteger catódicamente la tubería en estudio.

3.3. RESISTIVIDAD DEL SUELO

Uno de los factores que más influencia tiene en el proceso de corrosión de tuberías metálicas enterradas, es la resistividad del suelo donde ésta se encuentra instalada; por tal motivo, su estudio y posterior determinación resultan de fundamental importancia en el momento de efectuar el diseño del sistema de Protección catódica para la tubería considerada.

En general, la resistividad eléctrica del suelo

posee un amplio margen de variación, por lo que resulta estrictamente necesario realizar las mediciones de resistividad en el propio lugar donde se prevee instalar el sistema de Protección catódica.

Entre los varios factores que influyen en el establecimiento del amplio margen de variación en los valores de resistividad del suelo, se encuentran: la composición química del terreno, su contenido de humedad, la cantidad de sales disueltas y la temperatura del suelo.

a. Composición química del terreno.

La resistividad eléctrica del terreno varía considerablemente según su naturaleza química. Es así, como los varios materiales que conforman las capas de la tierra poseen resistividades que varían desde algunas centenas de $\Omega \cdot \text{cm}$ hasta varias centenas de mil de $\Omega \cdot \text{cm}$. Mediciones efectuadas bajo la responsabilidad de la "National Bureau of Standards" (Oficina de Normalización de los Estados Unidos), definió en el Boletín N^o 108, los valores de resistividad para diferentes clases de terrenos, los cuales han sido transcritos a la Tabla IX.

TABLA IX
Resistividades eléctricas de diferentes clases de terrenos

Clase de terreno	Resistividad en Ω-cm		
	Mínima	Máxima	Promedio
Rellenos conteniendo cenizas, escorias o desechos salinos	590	7.000	2.370
Arcillas, pizarra, adobe, pantano, tierra negra	340	16.300	4.060
Arcillas, pizarra, adobe, pantano, tierra negra mezclados con arena	1.020	135.000	15.800
Arena, piedras o cascajo mezclado con arcilla	59.000	458.000	94.000

Fuente: EATON, J.R., Sistemas de transmisión de energía eléctrica, Editorial Prentice/Hall Internacional, Madrid, 1973.

En otros casos, las variaciones de la resistividad del suelo se deben al fenómeno de estratificación en el cual, unas capas de terreno se han superpuesto a otras, especialmente en regiones en donde ha existido la presencia de glaciares. De esta manera, es muy posible encontrar en dichas zonas casi cualquier tipo imaginable de combinación de estratos, tales como el caso de capas superficiales de baja resistividad depositadas sobre rocas de alta resistividad.

b. Efecto de la humedad.

La resistividad eléctrica de los suelos se ve notablemente influenciada por su contenido de humedad, de tal forma que a mayor saturación de humedad le corresponde una menor resistividad. La anterior afirmación puede ser mejor comprendida analizando el gráfico de la Fig. 3.5. En dicha figura se observa que la resistividad eléctrica del terreno va experimentando ligeros aumentos a medida que la humedad disminuye a un 15 %. Por debajo de este valor, la resistividad aumenta rápidamente a medida que el porcentaje de humedad disminuye. De esta manera se establece que al reducirse el contenido de humedad a un 2 % aproximadamente, la resistividad del suelo puede llegar a tener un valor hasta 100 veces mayor que el valor mínimo esperado a un alto porcentaje de humedad. De lo cual se concluye que la mayoría de los terrenos son aislantes casi perfectos cuando su contenido de humedad es cero. Sin embargo, el estudio del comportamiento de la resistividad con humedades inferiores al 2 % es de poco interés práctico ya que tal estado rara vez se encuentra en la realidad, excepto tal vez, en lugares extremadamente desérticos.

Cuando se hace el estudio de la resistividad eléctrica de un terreno, es importante considerar de que dicha resistividad puede experimentar cambios en su valor, de una fecha a otra, debido a que el porcentaje de humedad existente en las diversas capas del suelo varía con las estaciones del año.

c. Efecto de la salinidad.

La presencia de sales en disolución en un terreno, es otro de los factores que influyen radicalmente en el valor de la resistividad eléctrica de dicho terreno. Su efecto se manifiesta en una reducción considerable de la resistividad eléctrica del suelo a medida que se incrementa el porcentaje de sales disueltas, tal como se puede observar en la Tabla X, donde se presentan datos obtenidos en un suelo arenoso con 15 % de humedad en relación al peso y a una temperatura de 17 °C.

TABLA X
Efectos de la salinidad en la resistividad del suelo

Porcentaje de sales disueltas relacionadas con el peso	Resistividad (Ω -cm)
0 %	10.700
0,1 %	1.800
1 %	460
5 %	190
10 %	130
20 %	100

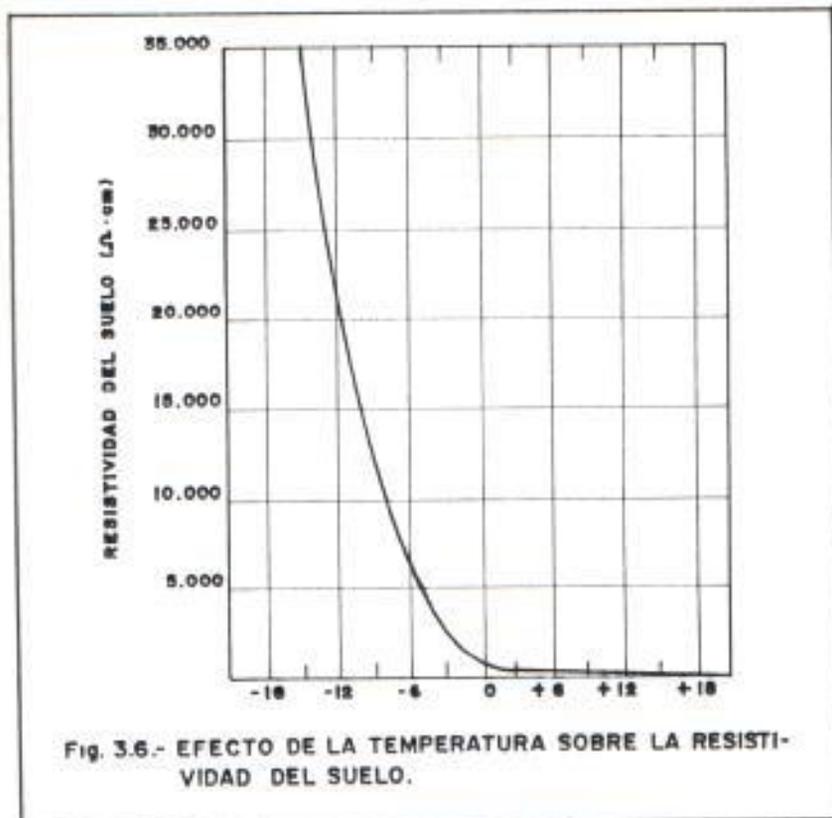
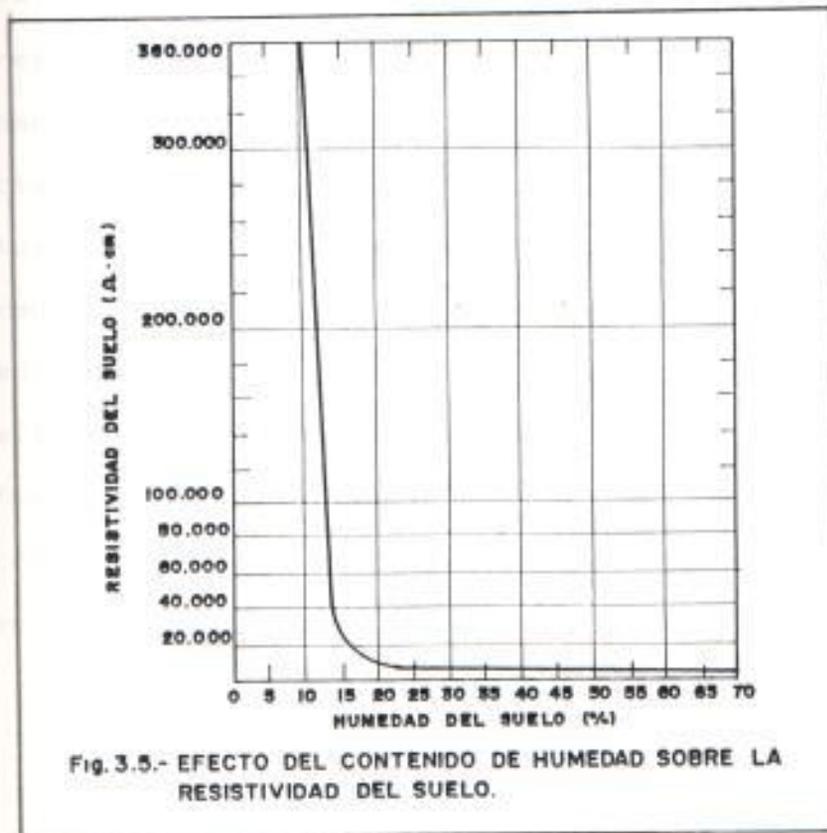
Fuente: DA SILVA, E., Criterios aplicados en el proyecto de mallas a tierra, CIER, Buenos Aires, 1974.

d. Efecto de la temperatura.

En la Fig. 3.6 se muestra la variación de la resistividad de un terreno con respecto a la temperatura. En dicha figura se puede observar que la resistividad aumenta lentamente a medida que la temperatura desciende hacia el punto de congelación del agua (0 °C). Por debajo de este punto, la resistividad crece muy rápidamente al descender aún más la temperatura.

3.4. RESISTIVIDAD DE LAS TUBERIAS

La resistividad eléctrica del acero y del hierro, del que están construidas las tuberías, varía en un rango entre 11 a 23 $\mu\Omega$ -cm, dependiendo de sus composiciones químicas.



La importancia de la determinación del valor de la resistividad de una tubería se basa, en que a partir de ésta, es posible determinar la resistencia longitudinal de dicha tubería, la cual constituye un parámetro de mucha importancia cuando se requiere calcular la resistencia total del circuito en un proyecto de Protección catódica. De acuerdo a lo expresado, la resistencia longitudinal de una tubería puede ser determinada mediante la aplicación de la siguiente fórmula, la cual está basada en un peso específico del acero de $7,83 \text{ g/cm}^3$:

$$R_L = \frac{16,061 \times \rho_s}{W_s} \quad (3-2)$$

Donde:

R_L = Resistencia longitudinal de la tubería ($\mu\Omega/\text{pie}$)

ρ_s = Resistividad del acero o del hierro del que está construida la tubería ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$).

W_s = Peso por unidad de longitud de la tubería (lb/pie).

Mediante la aplicación de la fórmula (3-2), es posible elaborar tablas, para diversos tamaños de tuberías, en donde conste su resistencia longitudinal, dependiendo lógicamente del tipo de acero que ha sido empleado en su fabricación. Un ejemplo de

lo anteriormente expuesto se presenta en la Tabla II, la cual puede servir de guía general cuando se requiera determinar con cierto grado de confiabilidad la resistencia de una tubería. Dicha tabla ha sido elaborada considerando una resistividad para el acero de $13,45 \mu\Omega\cdot\text{cm}$; y una resistividad para el hierro forjado de $13 \mu\Omega\cdot\text{cm}$.

TABLA XI

Características físicas y eléctricas de tuberías de acero e hierro forjado de diversos diámetros

Diámetro nominal (pulgadas)	Acero corriente		Acero Extraresistente		Hierro forjado			
	Peso	Resisten- cia	Peso	Resisten- cia	Peso	Resisten- cia	Peso	Resisten- cia
	(lb/pie)	($\mu\Omega$ /pie)	(lb/pie)	($\mu\Omega$ /pie)	(lb/pie)	($\mu\Omega$ /pie)	(lb/pie)	($\mu\Omega$ /pie)
0,125	0,24	900,00	0,31	700,00	0,24	870,00	0,29	720,00
0,250	0,42	514,00	0,54	400,00	0,42	498,00	0,54	387,00
0,375	0,57	379,00	0,74	292,00	0,56	374,00	0,74	283,00
0,500	0,85	254,00	1,09	198,00	0,84	249,00	1,09	192,00
0,750	1,13	191,00	1,47	147,00	1,12	187,00	1,39	150,00
1,000	1,68	129,00	2,17	100,00	1,67	125,00	2,17	96,00
1,250	2,27	95,00	3,00	72,00	2,25	93,00	3,00	70,00
1,500	2,72	79,00	3,63	60,00	2,69	78,00	3,63	58,00
2,000	3,65	59,00	5,02	43,00	3,65	57,00	5,02	41,70
2,500	5,79	37,30	7,65	28,20	5,77	36,30	7,67	27,30
3,000	7,58	28,50	10,25	21,10	7,54	27,80	10,25	20,40
3,500	9,11	23,70	11,51	17,30	9,05	23,10	12,47	16,80
4,000	10,79	20,00	14,98	14,40	10,72	19,50	14,97	14,00
4,500	-	-	-	-	12,49	16,80	18,22	11,50
5,000	14,62	14,80	20,78	10,40	14,56	14,40	20,54	10,20
6,000	18,97	11,40	28,57	7,60	18,76	11,20	28,58	7,30
7,000	23,54	9,20	38,05	5,70	23,41	8,90	37,67	5,60
8,000	28,55	7,60	43,39	4,93	28,34	7,40	43,00	4,87
9,000	33,91	6,40	48,73	4,43	33,70	6,20	48,73	4,29
10,000	40,48	5,30	54,74	3,94	40,00	5,20	54,74	3,82
11,000	45,56	4,74	60,03	3,59	45,00	4,70	60,08	3,68
12,000	49,56	4,36	65,42	3,30	49,00	4,27	65,42	3,20
13,000	54,57	3,96	72,09	3,00	-	-	-	-
14,000	58,57	3,69	77,43	2,79	-	-	-	-
15,000	62,58	3,45	82,77	2,61	-	-	-	-
16,000	57,47	3,75	62,57	3,44	-	-	-	-
20,000	72,16	2,99	78,59	2,74	-	-	-	-
22,000	72,38	2,98	85,61	2,49	-	-	-	-
24,000	79,05	2,73	94,70	2,29	-	-	-	-
26,000	85,73	2,51	102,62	2,10	-	-	-	-
28,000	92,40	2,33	110,62	1,95	-	-	-	-
30,000	99,00	2,18	119,00	1,81	-	-	-	-

Fuente: Brown S.S and Anney F.W., New Data on Electrical Resistivity of Line Pipe Steel, Materials Protection, 1964.

3.5. CALCULO DE LA CORRIENTE DE PROTECCION

Cuando la corriente eléctrica de protección no puede ser obtenida por intermedio de pruebas de corriente, tal como se describió en el numeral 3.2.2, o cuando se trata de estructuras en proyecto, entonces en estos casos dicha corriente necesita ser calculada.

El cálculo de la corriente de protección es independiente del tipo de sistema de Protección Catódica que se utilice y viene dada por la siguiente fórmula:

$$I = A \cdot D_e \cdot F \cdot (1-E) \quad (3-3)$$

Donde:

I = Corriente teórica de protección (mA).

A = Area de la estructura a ser protegida (m²).

D_e = Densidad de corriente eléctrica (mA/m²).

F = Factor de corrección de velocidad.

E = Eficiencia del revestimiento (expresada en decimales).

Los parámetros involucrados en la ecuación (3-3) deben ser calculados o estimados teniendo en consideración los siguientes factores:

- a. El área de la estructura a ser protegida (A), es obtenida a partir de la forma geométrica de la estructura, debiendo ser considerada solamente el Área que estuviera en contacto con el electrolito.
- b. La densidad de corriente (D_e), está en función de la resistividad eléctrica del electrolito y ambas pueden ser relacionadas mediante la siguiente ecuación:

$$D_e = 73,73 - 13,35 \log \rho \quad (3-4)$$

Donde:

D_e = Densidad de corriente eléctrica (mA/m²).

ρ = Resistividad eléctrica del electrolito ($\Omega \cdot \text{cm}$)

El valor teórico de la densidad de corriente también puede ser determinado mediante el gráfico de la Fig. 3.7, el cual es obtenido a partir de la ecuación (3-4).

El criterio para la selección de la densidad de corriente es muy discutido, siendo en muchas ocasiones obtenido en base a la experiencia del proyectista. Es en base a esta experiencia y a pruebas realizadas en el mismo campo de trabajo,

que se ha establecido valores típicos de requerimientos de corriente para estructuras de acero, las cuales han sido listados en la Tabla XII.

TABLA XII
Valores típicos de requerimientos de corriente para estructuras de acero en diferentes medios ambientes

Medio ambiente	Densidad de corriente requerida para una adecuada Protección Catódica (mA/m ²)
ACERO SIN REVESTIMIENTO	
Suelos neutros y estériles	4,3 a 16,1
Suelos neutros bien aireados	21,5 a 32,3
Suelos secos bien aireados	5,4 a 16,1
Suelos húmedos	26,9 a 64,6
Suelos altamente ácidos	53,8 a 161,4
Suelos conteniendo bacterias anaeróbicas	451,9
Concreto seco	5,4 a 16,1
Concreto húmedo	53,8 a 269,0
Agua dulce estancada	53,8
Agua dulce en movimiento	53,8 a 64,6
Agua dulce con alta turbulencia	53,8 a 161,4
Agua caliente	53,8 a 161,4
Agua sucia, polvuda	53,8 a 161,4
Agua de mar	53,8 a 269,0
Agua de mar en movimiento	97,0 a 269,4
ACEROS CON BUEN REVESTIMIENTO	
Suelos	0,01 a 0,2

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

- c. El factor de corrección de velocidad (F), es un coeficiente utilizado cuando existe movimiento relativo entre la estructura y el electrolito y su valor puede ser obtenido mediante el gráfico de la Fig. 3.8 o por el empleo de la Tabla XIII.

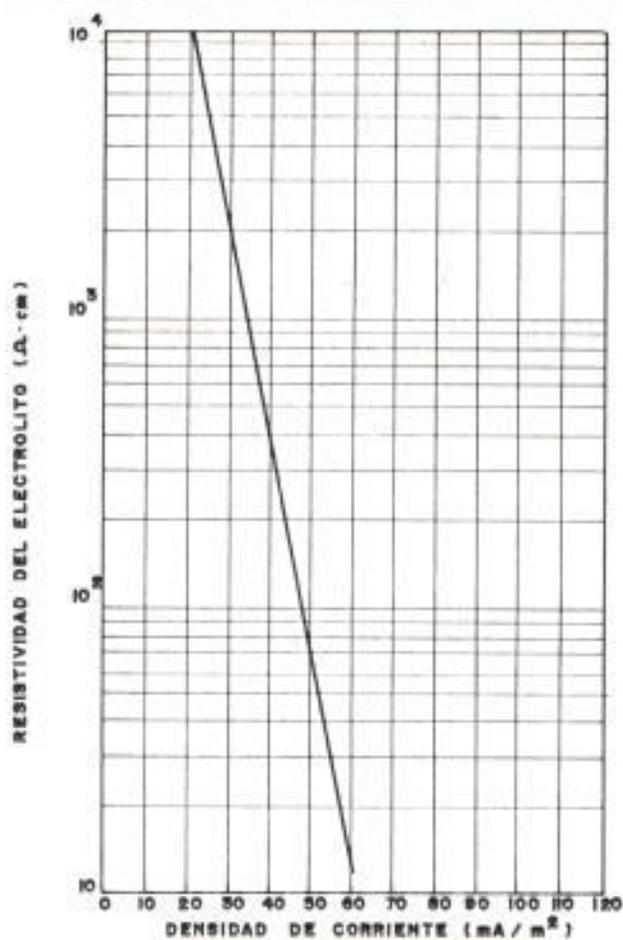


Fig. 3.7.- VARIACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE DE PROTECCION CON LA RESISTIVIDAD DEL ELECTROLITO.

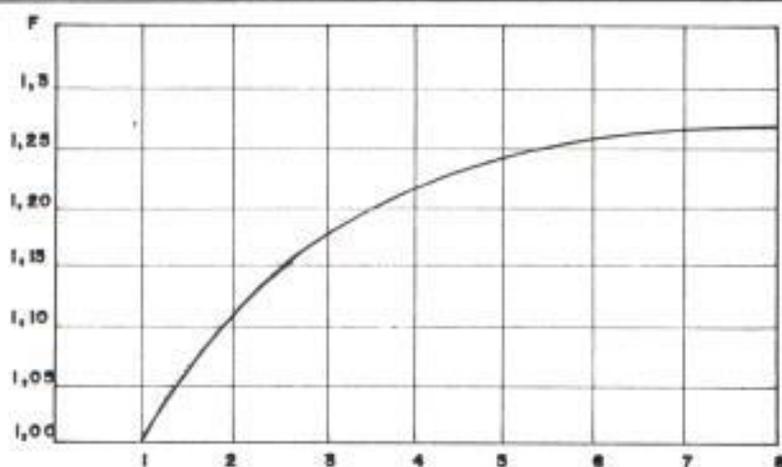


Fig. 3.8.- FACTOR DE CORRECCION DE LA CORRIENTE EN FUNCION DE LA VELOCIDAD DEL ELECTROLITO.

TABLA XIII
 Factor de corrección de corriente en
 función de la velocidad del electrolito

Velocidad (m/seg)	F
1	1,00
2	1,11
3	1,17
4	1,22
5	1,24
6	1,25
mayor de 7	1,27

Fuente: GENTIL, V., Corrosão, Guanabara
 Dois, R.J., Brasil, 1982.

La importancia de considerar el factor de corrección de velocidad F , en la determinación de la corriente de protección, radica en que al existir un movimiento del electrolito, su acción mecánica y la mayor aereación existente, causará una despolarización catódica sobre la estructura y por ende un mayor requerimiento de corriente de protección.

- d. Para el caso de la eficiencia del revestimiento (E), ésta depende del tipo y calidad del revestimiento utilizado. La Tabla XIV muestra los valores de eficiencia de los revestimientos más utilizados en proyectos de Protección Catódica.

TABLA XIV
Eficiencias medias de diversos tipos de revestimientos

Tipo de estructura a proteger	Calidad del revestimiento	Eficiencia (E)	
		Inicial	Final
Tuberías enterradas o sumergidas	Excelente	95 %	90 %
	Buena	90 %	80 %
	Regular	80 %	50 %
	Mala	50 %	0 %
Fondos de los tanques de almacenamiento (Parte externa)	Buena	80 %	60 %
	Regular	60 %	40 %
	Mala	40 %	0 %
Fondos de los tanques de almacenamiento (Parte interna)	Excelente	95 %	90 %
Embarcaciones	Excelente	95 %	90 %
	Buena	90 %	80 %
	Regular	80 %	50 %
	Mala	50 %	0 %

Fuente: Gentil, V., Proteção Catódica, IEC - Instalações e Engenharia de corrosão Ltda., Rio de Janeiro, 1981.

En la estimación de la eficiencia del revestimiento, es donde se establece el mayor o menor coeficiente de seguridad que se adoptará en el dimensionamiento de un sistema de Protección Catódica. El coeficiente de seguridad, en términos de corriente, es siempre beneficiosa al inicio de la operación del Sistema, puesto que permite el ajuste de la corriente de protección a medida que envejece el revestimiento; así como también establece la posibilidad de pequeñas ampliaciones de la estructura sin la necesidad

de redimensionar el sistema. Es en este particular donde la experiencia del proyectista se constituye en un factor fundamental para el perfecto dimensionamiento del sistema de Protección catódica.

3.6. CALCULO DE POTENCIALES ELECTRICOS

Cuando un sistema de Protección Catódica es aplicado a una tubería, la corriente es drenada desde la tubería, en el punto de conexión con la fuente de corriente continua (llamado punto de drenaje), y descargada a tierra por intermedio de la cama de ánodos. En estas circunstancias, tanto la corriente de la tubería como el potencial tubería-suelo presentarán sus valores máximos precisamente en el punto de drenaje e irán decreciendo en magnitud a medida que se vaya incrementando la distancia, a lo largo de la tubería, con relación a dicho punto. Este comportamiento de la corriente y del potencial tubería-suelo, es conocido con el nombre de "atenuación"; la misma que depende de la resistencia longitudinal de la tubería, de la resistencia del revestimiento y de la resistividad del suelo.

La determinación de los parámetros de atenuación de

una tubería es de gran importancia para el diseño de un sistema de Protección Catódica, ya que mediante ellos es posible calcular el potencial tubería-suelo esperado en un determinado punto sobre la tubería.

Por tal motivo, a continuación se realizará un análisis de las características de atenuación para tuberías consideradas de longitud infinita y posteriormente su aplicación en un tramo de tubería protegida por dos o mas puntos de drenaje.

a. Atenuación en tuberías de longitud infinita.

Para determinar las características de atenuación de tuberías de longitud infinita, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- La resistencia longitudinal de la tubería, la resistencia del revestimiento y la resistividad del suelo son uniformes y;
- La cama de ánodos se encuentra a una considerable distancia de la tubería de tal forma que su campo de gradientes de potencial no interfiera con la misma.

De esta manera, tanto el potencial tubería-suelo como la corriente que fluye sobre la tubería, pueden ser determinadas mediante funciones exponenciales con respecto a la distancia, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V_x = \Delta V_0 e^{-\alpha x} \quad (3-5)$$

e

$$I_x = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3-6)$$

Donde:

ΔV_x = Cambio del potencial tubería-suelo en un punto ubicado a una distancia "x" del punto de drenaje (V).

ΔV_0 = Cambio del potencial tubería-suelo en el punto de drenaje (V).

I_x = Corriente que fluye sobre la tubería en un punto ubicado a una distancia "x" del punto de drenaje (A).

I_0 = Corriente que fluye sobre la tubería en el punto de drenaje (A), y que es igual a la mitad de la corriente total descargada por la cama de ánodos.

α = Constante de atenuación (1/m).

x = Distancia, al punto considerado, desde el punto de drenaje (m).

La Fig. 3.9 muestra el tipo de curva de atenuación del potencial tubería-suelo, que se obtiene en el caso de una tubería de longitud infinita.

Es importante destacar que el valor de ΔV se refiere al cambio producido en el potencial tubería-suelo cuando el sistema de Protección Catódica es conectado ($\Delta V = V_{\text{conectado}} - V_{\text{desconectado}}$).

La constante de atenuación de la tubería, es aquella que determina la velocidad con que se atenúa o decae los valores de corriente y de potencial tubería-suelo y está definida por:

$$\alpha = \frac{R_L}{R_K} \quad (3-7)$$

Donde:

R_L = Resistencia longitudinal de la tubería (Ω/m)

R_K = Resistencia característica de la tubería (Ω)

La resistencia longitudinal de la tubería (R_L) puede ser determinada mediante el uso de tablas suministradas por el fabricante o, en el caso de no tenerlas, mediante la aplicación de cualquiera de las siguientes fórmulas:

$$R_L = 4,386 \times 10^{-6} \frac{1}{e \cdot d} \quad (3-8)$$

o

$$R_L = 1,247 \times 10^{-3} \frac{1}{w} \quad (3-9)$$

Donde:

e = Espesor de la pared de la tubería (cm).

d = Diámetro exterior de la tubería (cm).

w = Peso de la tubería (Kg/m).

En lo que se refiere a la resistencia característica de la tubería (R_k), ésta se define como la resistencia en el punto de drenaje pero considerando a la tubería en una sola dirección y puede ser calculada mediante la siguiente fórmula:

$$R_k = 2R_0 \quad (3-10)$$

Donde:

R_0 = Resistencia a tierra de la tubería en el punto de drenaje (Ω), la cual es equivalente a la conexión en paralelo de las dos resistencias características de la tubería existentes en ambos lados del punto de drenaje.

La resistencia tubería-tierra en el punto de drenaje, se la puede determinar mediante la aplicación de la Ley de Ohm en dicho punto, por lo tanto:

$$R_{\alpha} = \frac{V_{\alpha}}{I_{\alpha}} \quad (3-11)$$

Donde:

I_{α} = Corriente total de drenaje (A).

En el caso de que no sea tengan datos referentes a la corriente total de drenaje o del potencial tubería-suelo que sirvan para calcular el valor de R_{α} y consecuentemente de la constante de atenuación α , entonces dicho valor puede ser calculado por la fórmula:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_{\alpha}}{R_F}} \quad (3-12)$$

Donde:

R_F = Resistencia de fuga de la tubería ($\Omega \cdot m$).

La resistencia de fuga de la tubería (R_F) está directamente relacionada con la resistencia del revestimiento mediante la fórmula:

$$R_r = \frac{R_{rs}}{\pi \cdot d} \quad (3-13)$$

o

$$R_r = \frac{e_r \rho_r}{100\pi \cdot d} \quad (3-14)$$

Donde:

R_{rs} = Resistencia del revestimiento ($\Omega \cdot m^2$).

d = Diámetro efectivo de la tubería (m).

e_r = Espesor del revestimiento (m).

ρ_r = Resistividad del revestimiento ($\Omega \cdot cm$).

b. Atenuación en un tramo de tubería de longitud finita.

El estudio de la característica de atenuación que tiene lugar en un tramo de tubería de longitud finita es muy importante para el diseño de un sistema de Protección catódica, debido a que en la mayoría de los casos es precisamente ésta la condición que se presenta en la práctica. Las relaciones de tipo exponencial descritas para el cálculo de potenciales y de corrientes en el caso "a" son de carácter ideal por lo que no es aplicable en este caso. Sin embargo se han establecido relaciones de tipo hiperbólico las cuales simulan en forma

aceptable el comportamiento del potencial tubería-suelo, el cual puede llegar a ser determinado mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta V_r = \frac{\Delta V_o}{\text{Cosh } \alpha L} \quad (3-15)$$

Donde:

ΔV_r = Cambio del potencial tubería-suelo en el punto extremo del tramo de tubería considerado (V).

ΔV_o = Cambio del potencial tubería-suelo en el punto de drenaje (V).

α = Constante de atenuación (1/m).

L = Longitud del tramo de tubería (m).

Además del cálculo del potencial tubería-suelo, en muchas ocasiones resulta necesario calcular la corriente que se deberá inyectar en el punto de drenaje con el fin de obtener un valor determinado ΔV_r al final del tramo de tubería de longitud "L", dicha corriente puede ser determinada aplicando la siguiente ecuación:

$$I = \frac{\alpha \Delta V_r \text{ Sinh } \alpha L}{R_L} \quad (3-16)$$

Donde:

I = Corriente inyectada al tramo de tubería (A)

ΔV_r = Cambio del potencial tubería-suelo al final del tramo de tubería considerado (V).

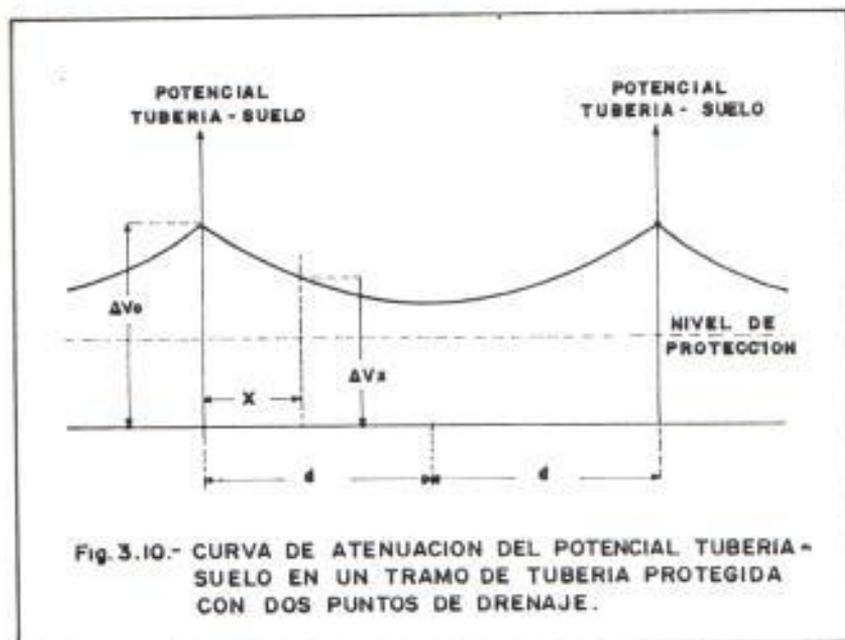
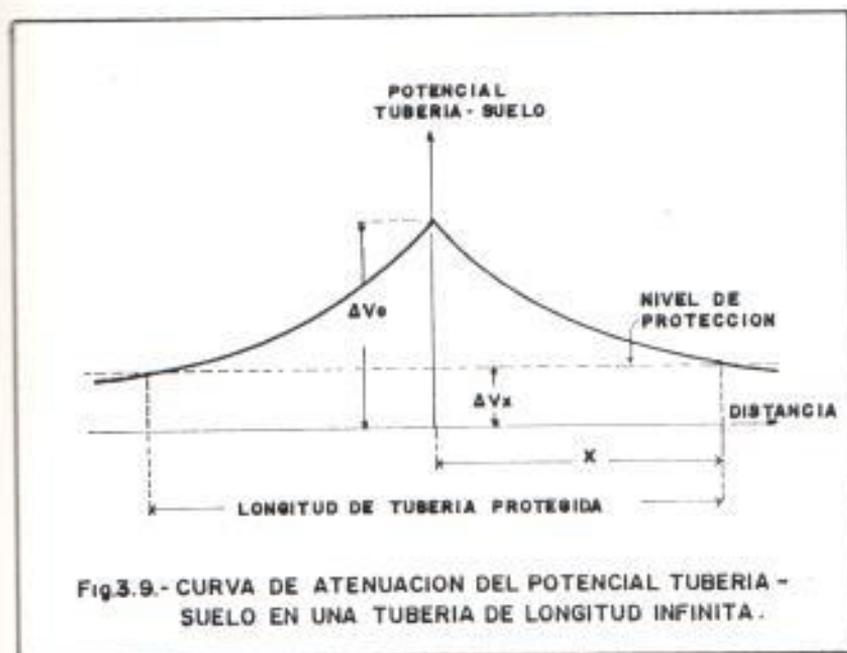
L = Longitud del tramo de tubería (m).

R_L = Resistencia longitudinal de la tubería (Ω/m)

c. Atenuación en un tramo de tubería protegido por dos o más puntos de drenaje.

Los cambios de potencial tubería-suelo, producidos individualmente por dos puntos de drenaje, pueden ser combinados con la finalidad de obtener una característica de atenuación más leve, asegurando con esto la obtención de un nivel de protección siempre adecuado. Es por ello, que la aplicación de dos o más puntos de drenaje de corriente sobre una tubería, con la finalidad de protegerla catódicamente, se convierte en el método más utilizado en la práctica.

Si el tramo de tubería, de longitud $2d$, está limitado entre dos puntos de drenaje de corriente (Fig 3.10), entonces tanto el potencial tubería-suelo como la corriente que fluye sobre la tubería pueden ser evaluados mediante la combinación de dos ecuaciones simultáneas de la



forma mostrada en (3-17) y (3-18). En el caso de ΔV_x , el potencial tubería-suelo existente a una distancia "x" de uno de los dos puntos de drenaje (escogido arbitrariamente como origen), es obtenido sumando las ecuaciones de potencial de cada punto de drenaje asumiendo que el otro está ausente, mientras que para el caso de la corriente que fluye sobre la tubería, se deben restar las ecuaciones de corriente de cada punto de drenaje. Siguiendo este procedimiento matemático, se llegan a establecer las siguientes ecuaciones:

$$\Delta V_x = \frac{\Delta V_0 \text{Cosh } \alpha(d-x)}{\text{Cosh } \alpha d} \quad (3-17)$$

e

$$I_x = \frac{I_0 \text{Sinh } \alpha(d-x)}{\text{Sinh } \alpha d} \quad (3-18)$$

Las ecuaciones (3-17) y (3-18) son válidas únicamente si:

- La resistencia del revestimiento es alta, uniforme y óhmica, es decir que su valor debe ser independiente de la caída de voltaje a través de ella y;

- Las camas de ánodos se encuentran ubicadas lejos de la tubería.

3.7. MÉTODOS DE APLICACION DE LA PROTECCION CATODICA

Para la aplicación de un sistema de Protección catódica existen dos métodos, los cuales se fundamentan en el mismo principio de funcionamiento, que consiste en la inyección de corriente eléctrica a la estructura através del electrolito. Los dos métodos utilizados, los mismos que serán detalladamente estudiados en los Capítulos IV y V, son:

- a. Protección catódica por ánodos galvánicos o de sacrificio y;
- b. Protección catódica por corriente impresa o forzada.

La selección del tipo de sistema más adecuado para una Protección catódica eficiente de una determinada estructura metálica, depende de un análisis completo, tanto de los factores técnicos como de los factores económicos del proyecto, siendo esta selección fundamentada básicamente en las características de la estructura metálica a proteger (material, condiciones de operación, dimensiones,

forma geométrica, tipo de revestimiento empleado, localización, etc.) y del medio en donde ella estuviera construida (suelo, agua de mar, agua dulce, etc).

Otro de los factores que influyen de manera decisiva en la definición del tipo de sistema de Protección catódica a utilizar, es sin lugar a duda la experiencia del proyectista. Sin embargo, para dar una orientación general que sea útil en el momento de la definición, se ha establecido una serie de comparaciones entre los dos sistemas antes mencionados los cuales han sido listados en la Tabla XV.

TABLA IV
Comparación entre los sistemas galvánicos y por corriente impresa

Sistema por ánodos galvánicos	Sistema por corriente impresa
1.- No requiere una fuente externa de corriente eléctrica.	1.- Requiere de una fuente externa de corriente eléctrica.
2.- Económico para requisitos de corriente eléctrica de hasta 5 A.	2.- Económico para requisitos de corriente eléctrica mayor a los 5 A.
3.- Mantenimiento simple.	3.- Mantenimiento más dificultoso.
4.- Posee una limitada vida útil.	4.- Puede ser proyectado para una vida útil bastante larga.
5.- Aplicable en electrolitos de muy baja resistividad eléctrica, en general hasta 3.000 Ω -cm.	5.- Aplicable en electrolitos de cualquier valor de resistividad eléctrica.
6.- No presenta problemas de interferencia con estructuras vecinas.	6.- Puede presentar problemas de interferencia con estructuras vecinas.
7.- No admite regulación	7.- Puede ser regulado con facilidad.

Fuente: GENTIL, V., Corrosão, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

CAPITULO IV

PROTECCION CATODICA POR ANODOS GALVANICOS

4.1. PRINCIPIOS GENERALES

La Protección catódica por ánodos galvánicos es una simple aplicación de la celda de corrosión galvánica o por metales diferentes en la cual, el metal más anódico se corroe mientras que el metal más catódico queda protegido.

En base a este principio, si conectamos eléctricamente la tubería metálica a ser protegida a un metal más electronegativo dentro de la serie galvánica y si ambos están en contacto con un mismo electrolito, como el suelo o el agua, entonces se establecerá una celda de corrosión galvánica en la cual el metal que funciona como ánodo se corroerá, descargando corriente hacia el electrolito. La corriente liberada por el ánodo penetrará en la tubería metálica bloqueando las corrientes de corrosión y retornará a su punto de partida através

del contacto eléctrico, cerrando de esta manera el circuito, tal como se muestra en la Fig. 4.1.

El método de Protección catódica a base de ánodos galvánicos, o ánodos de sacrificio, es el normalmente seleccionado cuando se requiere de poca cantidad de corriente de protección (generalmente para el caso de proteger estructuras metálicas con revestimiento de buena calidad o estructuras de pequeñas dimensiones) y cuando el suelo posee una baja resistividad eléctrica (en general hasta 3.000 Ω -cm).

4.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

Previo a ejecutar el dimensionamiento de un sistema de Protección catódica por ánodos galvánicos, es necesario presentar, como consideraciones para realizar un diseño satisfactorio, las principales ventajas y desventajas del sistema estudiado, con la finalidad de que el diseñador tenga las bases suficientes sobre las características principales de la instalación galvánica.

a. Ventajas:

- No necesita suministro de corriente alterna

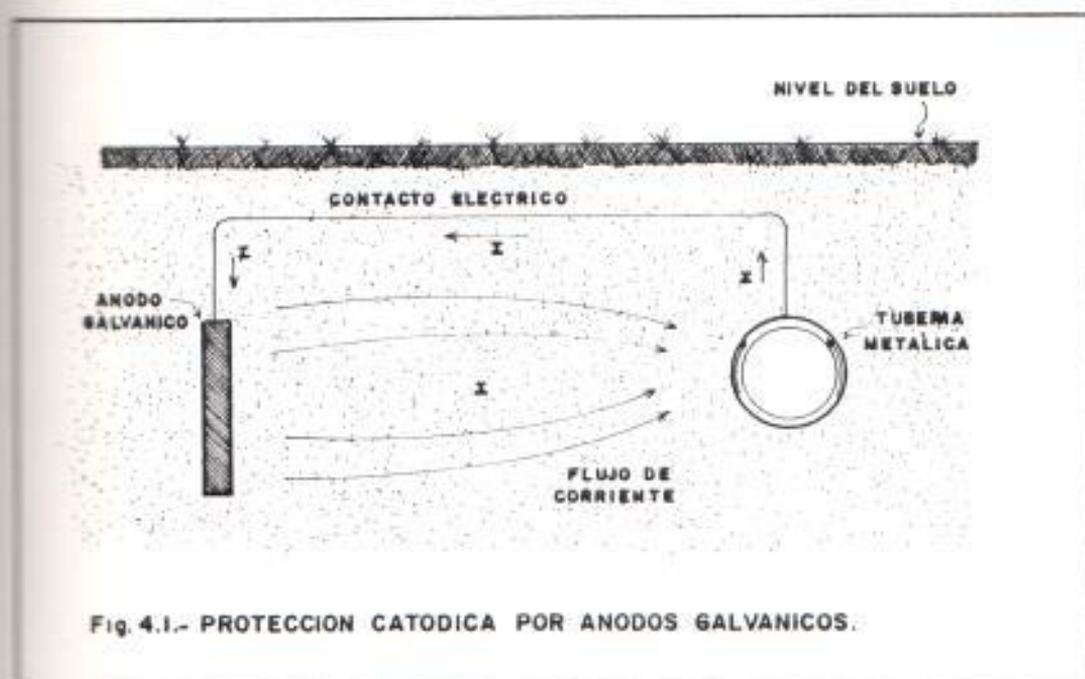


Fig. 4.1.- PROTECCION CATODICA POR ANODOS GALVANICOS.

en el lugar de la instalación.

- Bajo costo de instalación.
- Protección ideal para los puntos de corrosión severa.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Mínimos daños al recubrimiento debido a sobreprotección.
- Raramente aparecerán problemas de interferencia catódica con otras estructuras cercanas.
- Menos probabilidades de interrupción durante su funcionamiento.

b. Desventajas:

- La cantidad de corriente de protección entregada a la estructura está limitada por la diferencia de potencial, bastante baja, entre los ánodos y la tubería.
- Empleo de grandes cantidades de material anó-

dico, especialmente si se trata de tuberías con revestimiento deficiente o de grandes dimensiones.

- Reposición periódica de los ánodos galvánicos.
- No adaptables a regulación automática de salida de corriente.
- En el caso de que la tubería esté influenciada por corrientes de interferencia, el método de Protección catódica por ánodos galvánicos será ineficiente.

4.3. ELEMENTOS Y TIPOS DE ANODOS

Los principales elementos que forman parte de un sistema de Protección catódica por ánodos galvánicos son:

a. Ánodos.

Los materiales utilizados en la práctica como ánodos galvánicos son aleaciones de magnesio, zinc o aluminio. Si bien es cierto que dichos metales son lo suficientemente electronegativos para actuar como ánodos, protegiendo una estruc-

tura de acero, sin embargo en sus procesos de fabricación se los alea con otros metales. La ventaja de alearlos con otros metales, da como resultado un mejor desempeño del ánodo, suministrándole las siguientes propiedades:

1. Un potencial de circuito abierto lo suficientemente electronegativo, inclusive mayor que el del metal base, con el fin de asegurar el flujo de corriente.
2. Una alta eficiencia del ánodo, lo cual se logra eliminando las impurezas que puedan originar un efecto de autocorrosión o añadiendo elementos que anulen dicho efecto.
3. Una facilidad para que el ánodo permanezca activo y que se corraa uniformemente, evitando que se produzca la formación de películas apasivantes.

Las Tablas XVI, XVII y XVIII muestran las composiciones químicas recomendadas para la fabricación de ánodos de zinc, magnesio y aluminio respectivamente, según la especificación MIL-A-18001H de la Armada de los Estados Unidos.

TABLA IVJ
Composiciones químicas de ánodos de zinc comerciales

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
Cu	0,005 max.	0,005 max.	0,005 max.	0,002 max.
Al	0,3 - 0,5	0,1 - 0,5	0,4 - 0,6	-
Si	0,003 max.	0,125 max.	0,125 max.	-
Fe	0,002 max.	0,005 max.	0,0014 max.	0,0014 max.
Pb	0,005 max.	0,006 max.	0,3 max.	-
Cd	0,025 - 0,100	0,025 - 0,150	0,075 - 0,125	-
Hg	-	-	-	0,10 - 0,15
Zn	Saldo	Saldo	Saldo	Saldo
Eficiencia	95 %	95 %	95 %	95 %
Potencial vs. Cu/CuSO ₄ (V)	- 1,10	- 1,10	- 1,10	- 1,10
Capacidad (Ah/Kg)	780	780	780	780

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

TABLA IVII
Composiciones químicas de ánodos de magnesio comerciales

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
Cu	0,02 max.	0,01 max.	0,02	0,05 max.
Al	5,3 - 6,7	2,7 - 3,5	0,01 max.	-
Si	0,10 max.	0,03 max.	-	0,05 max.
Fe	0,003 max.	0,002 max.	0,03 max.	-
Mn	0,15 min.	0,20 min.	0,5 - 1,3	1,20 min.
Ni	0,002 max.	0,001 max.	0,001	0,01 max.
Zn	2,5 - 3,5	0,7 - 1,3	-	-
Mg	Saldo	Saldo	Saldo	Saldo
Stros	-	0,30 max.	-	0,30 max.
Eficiencia	50 %	50 %	50 %	50 %
Potencial vs. Cu/CuSO ₄ (V)	- 1,55	- 1,55	- 1,75	- 1,75
Capacidad (Ah/Kg)	1.230	1.230	1.230	1.230

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

TABLA XVIII
Composiciones químicas de ánodos de aluminio comerciales

	Nº 1	Nº 2	Nº 3	Nº 4
Si	0,11 - 0,21	0,10 max.	0,1	-
Fe	0,08 max.	0,13 max.	-	0,13 max.
Zn	0,35 - 0,50	0,50 - 5,00	5,0	4,00 - 5,00
Sn	-	-	-	0,1
Hg	0,035 - 0,500	-	-	-
In	-	0,005 - 0,050	0,02	-
Mg	-	-	0,8	-
Cu	0,006 max.	0,01 max.	0,01 max.	0,01 max.
Al	Saldo	Saldo	Saldo	Saldo
Eficiencia	95 % prom.	90 % max.	95 % aprox.	50 % - 80 %
Potencial vs. Cu/CuSO ₄ (V)	- 1,10	- 1,20	- 1,20	- 1,15
Capacidad (Ah/Kg)	2.830 prom.	2.700 max.	2.700 aprox.	Variable

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

La selección del tipo de ánodo a utilizar depende de las características de la estructura a proteger y del tipo de electrolito en contacto con el material metálico. En base a estas consideraciones, a continuación se presentan las aplicaciones más típicas de cada uno de los ánodos galvánicos.

- Los ánodos de zinc son generalmente utilizados para la protección de estructuras marítimas, pudiendo también ser empleados para proteger estructuras metálicas enterradas en suelos de baja resistividad eléctrica, del orden de hasta 1.000 $\Omega \cdot \text{cm}$. Esta limitación se debe a

- su bajo potencial de circuito abierto, el cual restringe su aplicación para circuitos de baja resistencia, de tal manera que pueda entregar la suficiente corriente de protección.
- Los ánodos de magnesio, debido a que poseen un mayor potencial de circuito abierto, tienen un rango de aplicación mucho más amplio, siendo por esta razón los más utilizados. Son comúnmente empleados para proteger estructuras metálicas inmersas en agua dulce o enterradas en suelos con resistividad eléctrica de hasta $3.000 \Omega \cdot \text{cm}$.

 - Los ánodos de aluminio, aunque poseen características electroquímicas superiores, en comparación a los dos tipos de ánodos antes mencionados, sin embargo su aplicación se limita a sistemas en donde el electrolito es exclusivamente líquido, particularmente en agua de mar en donde los resultados han sido los mejores. La experiencia en el empleo de este tipo de ánodos ha demostrado que no son indicados para la protección de estructuras enterradas, debido a su facilidad de desarrollar películas apasivantes en su superficie, lo cual le impide entregar una adecuada corriente de

protección.

En lo que se refiere a las características físicas de los ánodos galvánicos, estos pueden ser encontrados comercialmente en varias formas geométricas y pesos, dependiendo de su aplicación específica. Algunos de los tamaños disponibles de ánodos galvánicos, apropiados para usos en suelos, son mostrados en las Tablas XIX y XX.

TABLA XIX
Tamaños disponibles de ánodos de magnesio comerciales

Anodos desnudos		Anodos ensacados		
Dimensiones nominales (pulgadas)	Pesos nominales (libras)	Dimensiones nominales (pulgadas)		Pesos nominales (libras)
		Diámetro	Longitud	
3 x 3 x 8	5	5 1/4	11 1/4	13
3 1/2 x 3 1/2 x 14	9	6	19	25
3 x 3 x 14	9	5 1/4	20	27
4 x 4 x 12	12	7 1/2	18	32
4 x 4 x 17	17	7 1/2	24	45
3 1/2 x 3 1/2 x 19	17	6 1/2	29	44
2 1/2 x 2 1/2 x 59	20	5	66	60
5 x 5 x 20 1/2	32	8 1/2	28	68
5 1/2 x 5 1/2 x 22	32	8	28	65
5 1/2 x 5 1/2 x 32 1/2	48	8	38	100
7 x 7 x 16	50	10	24	100
4 1/2 x 4 1/2 x 60	60	7	66	125
1 1/2 x 1 1/2 x 70	10			
2 x 2 x 60	16			
3 x 3 x 60	40			
4 x 4 x 60	60			
Tiras de 3/8 x 3/4	0,23 lb/pie			

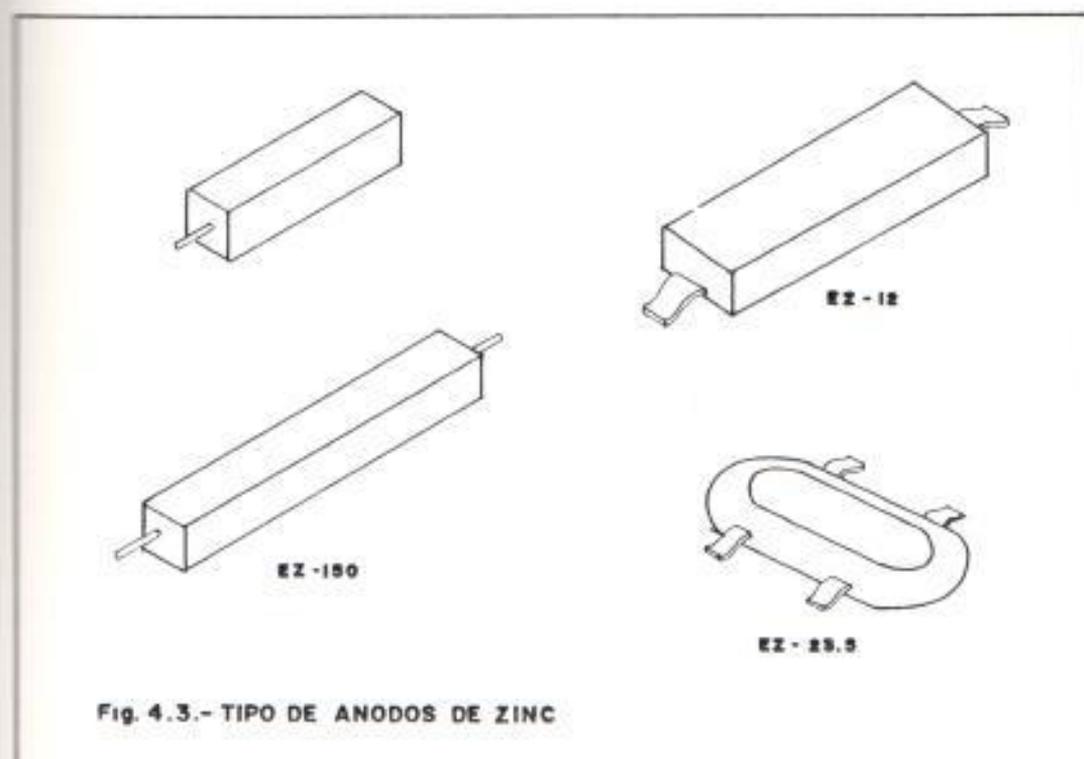
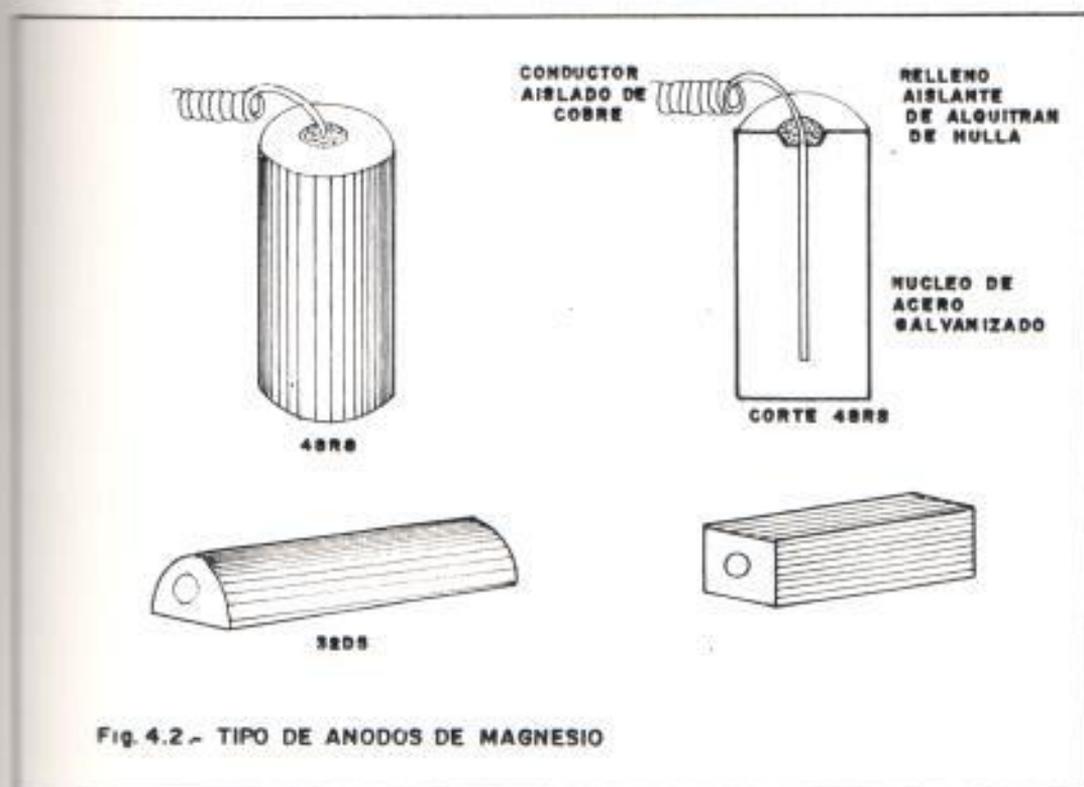
Fuente: PEABODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967.

TABLE XX
Tamaños disponibles de ánodos de zinc comerciales

Dimensiones nominales (pulgadas)	Pesos nominales (libras)	Designación AZI
1,4 x 1,4 x 9	5	2 - 5
1,4 x 1,4 x 60	30	2 - 30
2 x 2 x 45	50	4 - 50
2 x 2 x 60	60	4 - 60
4 x 4 x 36	150	16 - 150
Tiras de 1/2 x 9/16	0,6 lb/pie	-
Tiras de 5/8 x 7/8	1,2 lb/pie	-

Fuente: FEARODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967.

Algunos tipos de ánodos galvánicos vienen generalmente provistos de un núcleo de acero galvanizado el cual está soldado a un conductor de cobre No 10 o No 12 AWG con aislamiento TW, de una longitud de 3 metros, que sirve para realizar la conexión del ánodo con la estructura metálica a proteger, otros en cambio vienen únicamente con el núcleo de acero galvanizado con el fin de soldarlo directamente a la estructura. En las Figs. 4.2 y 4.3 se ilustran las formas geométricas más típicas de los ánodos galvánicos empleados en sistemas de Protección catódica.



b. relleno (Backfill).

Con la finalidad de obtener una operación segura y satisfactoria de un sistema de protección catódica por ánodos galvánicos, es conveniente, en la mayoría de los casos, envolver completamente los ánodos con un compuesto químico apropiado, evitando de esta manera el contacto directo de los ánodos con el suelo. Tal compuesto químico es conocido con el nombre de "relleno" o "backfill". Los principales beneficios de la utilización del relleno son:

- Conduce a un desgaste uniforme del ánodo.
- El relleno, debido a que es un material homogéneo, mejora la eficiencia del ánodo, ya que evita el contacto del mismo con capas de suelo de características diferentes, que acelerarían el proceso de autocorrosión del ánodo.
- El relleno tiene la propiedad de retener la humedad, incrementado con ello la conductividad del área alrededor del ánodo, lo que resulta beneficioso en suelos muy secos.

- El relleno posee una baja resistividad eléctrica, contribuyendo de esta manera a disminuir la resistencia eléctrica del contacto ánodo-suelo.

El material empleado como relleno para envolver a los ánodos galvánicos es una mezcla de yeso, bentonita y, en ciertas ocasiones, sulfato de sodio. La mezcla puede tener diversas composiciones, dependiendo del tipo de ánodo y de las características del suelo donde van a ser enterrados. La Tabla XXI nos presenta las composiciones químicas más empleadas en la fabricación de rellenos.

TABLA XXI
Composición química de varias clases de rellenos para ánodos galvánicos

Mezcla	Yeso (CaSO_4) %		Bentonita %	Sulfato de Sodio (Na_2SO_4) %	Resistividad aproximada Ω-cm
	Hidratado	Mate			
A	25	-	75	-	250
B	50	-	50	-	250
C	-	50	50	-	250
D	75	-	20	5	50

Fuente: FEABODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967

Analizando la tabla presentada anteriormente, se puede establecer las siguientes consideraciones:

- La mezcla A presenta la mejor característica de retención de humedad (debido a su alto porcentaje de bentonita), por lo cual es muy utilizada en suelos secos.

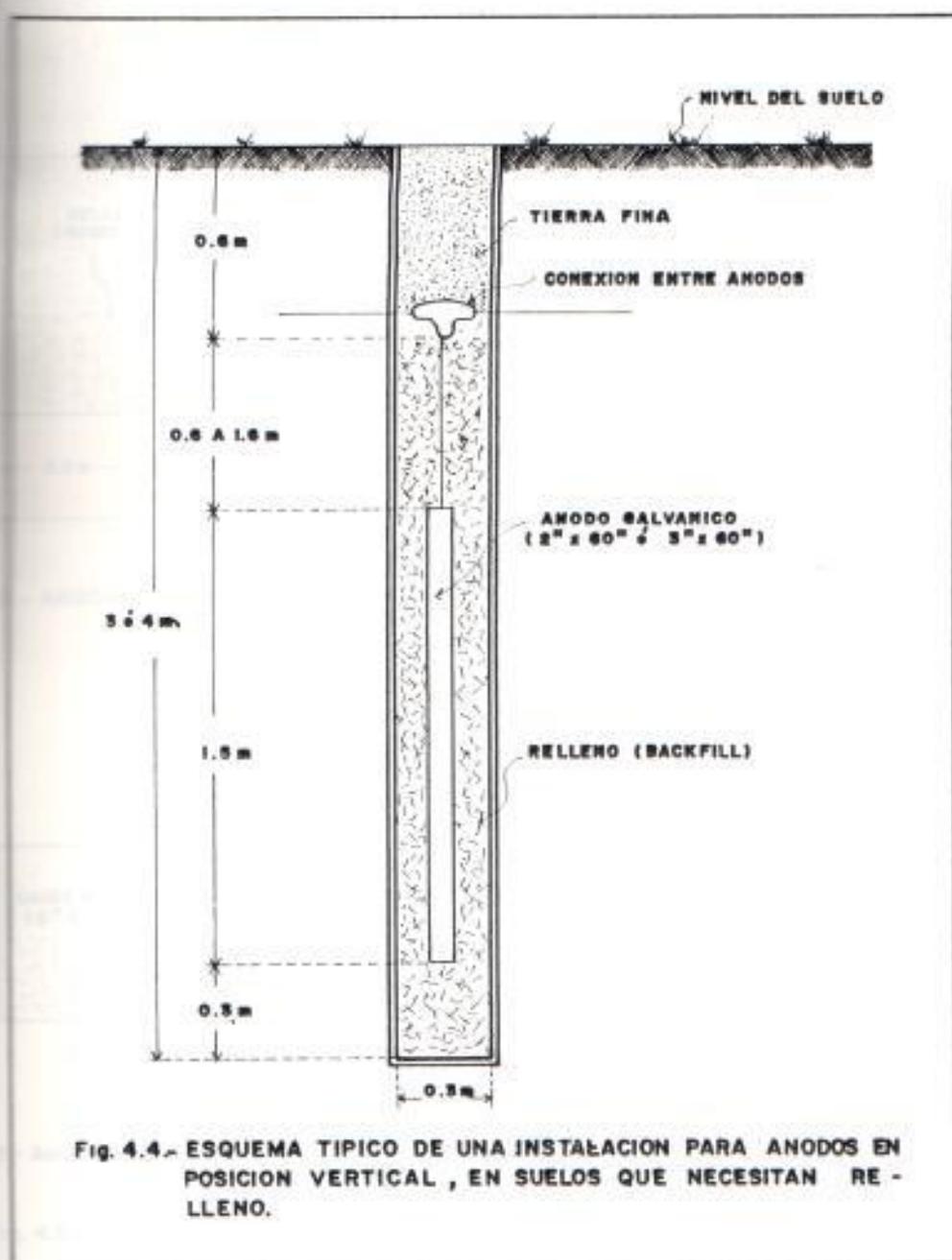
- La mezcla B es comunmente utilizada con ánodos de zinc.

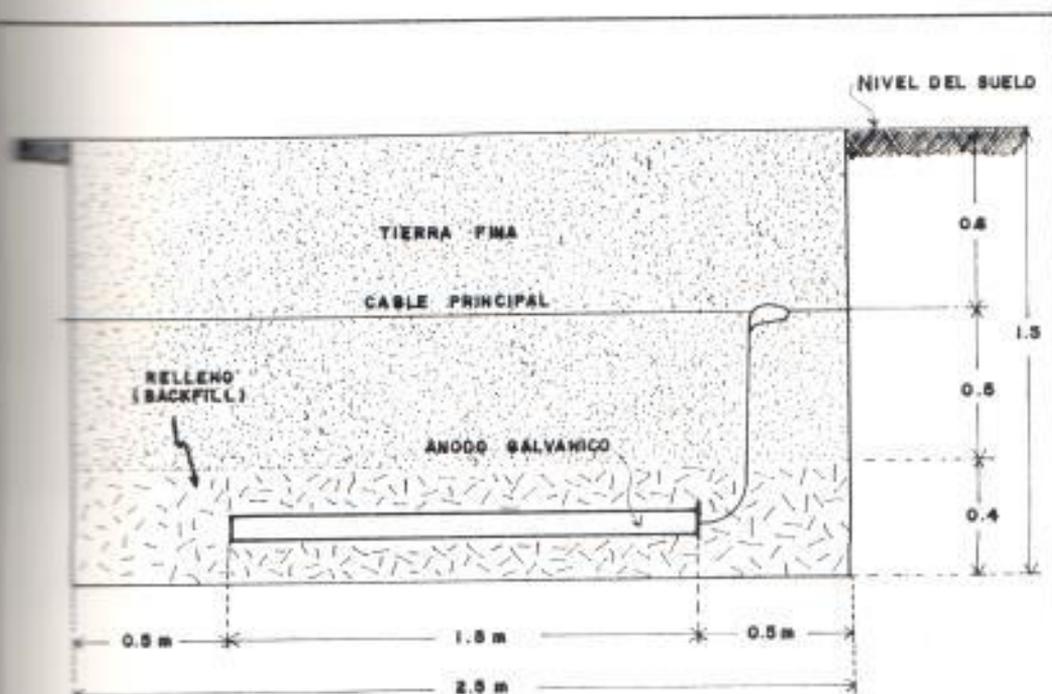
- La mezcla C se la puede emplear tanto con ánodos de zinc como de magnesio y es la más apropiada para suelos muy húmedos o pantanosos.

- La mezcla D se la utiliza en suelos que presenten una elevada resistividad eléctrica.

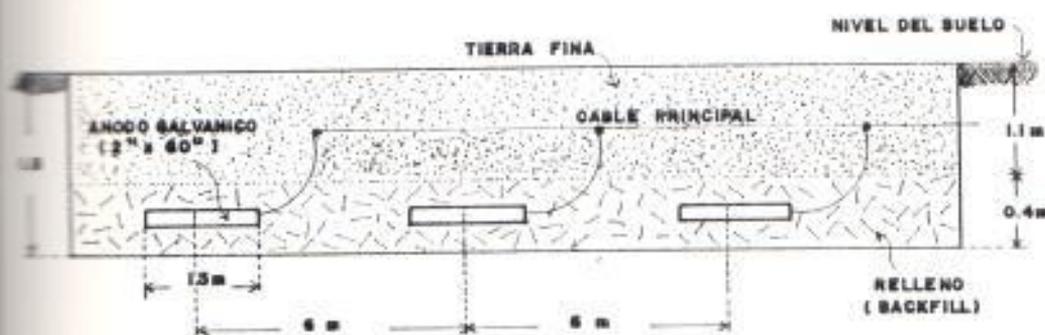
Las Figs. 4.4 y 4.5 muestran los esquemas típicos de instalación de los ánodos galvánicos (posicionados en forma vertical y horizontal respectivamente) en suelos donde se requiere la utilización de rellenos.

Los ánodos galvánicos, destinados exclusivamente a instalaciones enterradas, pueden ser encontrados comercialmente ya provistos del relleno, el cual es acondicionado dentro de sacos de lien-cillo, tal como se ilustra en la Fig. 4.6.





A.- ANODOS HORIZONTALES FORMANDO UNA CAMA DISCONTINUA.



B.- ANODOS HORIZONTALES FORMANDO UNA CAMA CONTINUA

Fig. 4.5.- ESQUEMAS TÍPICOS DE UNA INSTALACION PARA ANODOS EN POSICION HORIZONTAL, EN SUELOS QUE NECESITAN RELLENO

c. Cables.

En los sistemas de Protección catódica por ánodos galvánicos, los voltajes de operación son bajos y por lo tanto el nivel de aislamiento no es un factor determinante en la selección del cable. Para el dimensionamiento de los cables son observados principalmente las siguientes características:

- Resistencia eléctrica:

Debido a los bajos voltajes existentes en el sistema, es de fundamental importancia que la resistencia de los cables sea lo más baja posible ya que cualquier resistencia que se sume al circuito reducirá significativamente la corriente de protección.

- Capacidad de corriente:

En los sistemas de protección catódica por ánodos galvánicos, las intensidades de corriente que circulan por el circuito no son muy elevadas, siendo del orden de hasta 45 Amperios, por lo cual se utilizan generalmente conductores de cobre de calibres N^o 10 y N^o 8

AWG, los cuales satisfacen plenamente las consideraciones dadas referentes a la resistencia eléctrica y a la capacidad de corriente de los cables.

- Aislamiento:

Una de las características más importantes a considerar en la selección de los cables es su clase de revestimiento, el cual debe ser capaz de resistir las más adversas condiciones de trabajo a las que podrían estar expuestos. Esto se debe a que generalmente es una práctica usual el enterrar los cables directamente en el suelo y si el revestimiento no es de excelente calidad, su deterioración puede permitir la absorción de humedad, la cual ocasiona la oxidación del cable, introduciendo resistencias adicionales al circuito con evidente perjuicio para la Protección catódica de la estructura.

d. Conectores.

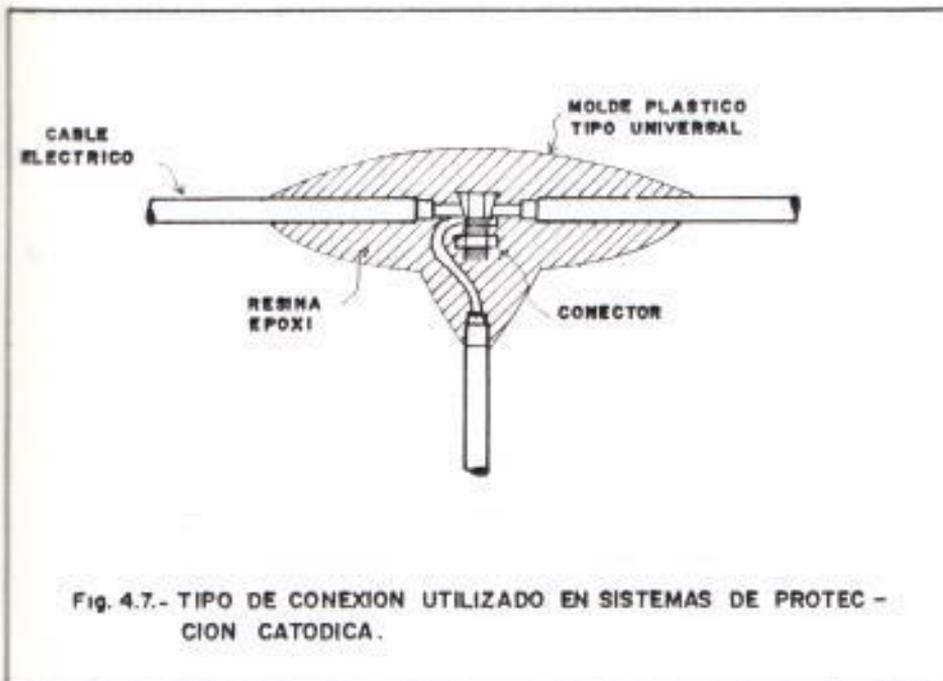
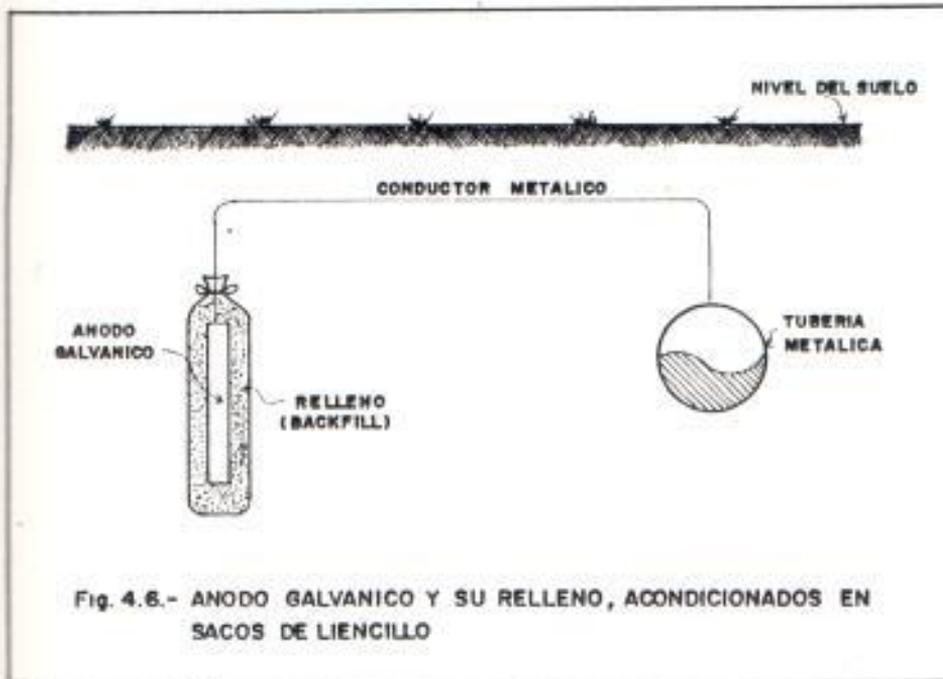
Una perfecta continuidad eléctrica del circuito es de fundamental importancia para el sistema de Protección catódica. Las conexiones eléctricas

deben ser hechas preferentemente con soldadura. Si se trata de conexiones entre dos o más cables, éstas deben realizarse por medio de conectores de tamaño adecuado al calibre de los mismos. Los conectores de presión tipo perno hendido o equivalente, son satisfactorios si es que la conexión queda bien ajustada. Es imprescindible que tales conexiones sean debidamente aisladas por medio de cintas plásticas aislantes o por resinas epoxi que rellenan un molde plástico tipo universal (Splice SK-40 o similar). La Fig. 4.7 ilustra en detalle una de los tipos de conexión más ampliamente utilizados en trabajos de Protección catódica.

e. Cajas de conexión.

Las cajas de conexión utilizadas en una instalación de ánodos galvánicos tienen como objetivo facilitar las siguientes operaciones:

- Conexión o desconexión entre dos estructuras, en el caso que ambas sean protegidas por el mismo sistema galvánico.
- Medir la corriente drenada por la cama de ánodos.



- Desconectar uno o más ánodos.

- Introducir una resistencia en el circuito con la finalidad de reducir la corriente inyectada por la cama de ánodos.

f. Resistores.

Un recurso bastante usual empleado para limitar la corriente inyectada por los ánodos, cuando se constata que tal corriente es demasiado elevada, es el de intercalar, en serie con el circuito, una resistencia de valor adecuado. Para tal fin, puede utilizarse ya sea un resistor de valor fijo o un reóstato. En sistemas galvánicos, tal práctica es particularmente común cuando se utilizan ánodos de magnesio.

g. Materiales diversos.

Además de los elementos descritos anteriormente, son también ampliamente utilizados en los sistemas de protección galvánica, los siguientes materiales:

- Soldadura "Cadweld", utilizada para efectuar soldajes del cable eléctrico con la estructura

de acero. Es un equipo de fácil manipulación, pequeñas dimensiones, ligero y excelente para aplicaciones en el campo de trabajo.

- Masa epoxi, utilizada para el recubrimiento de las conexiones cable-estructura, entregando una buena protección contra la oxidación de las mismas.
- Cinta aislante autofundente, utilizada para la protección y aislamiento de las conexiones eléctricas.
- Electroductos (PVC o hierro galvanizado), utilizados siempre que las condiciones ambientales y de seguridad lo exijan.

4.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS GALVANICOS

La metodología empleada para el dimensionamiento de un sistema de Protección catódica por ánodos galvánicos es bastante simple, siendo la secuencia de pasos a seguir la siguiente:

1. Determinación de la resistividad del suelo a lo largo de la trayectoria de la tubería.

(Ver numeral 2.2.3).

2. Determinación de los requerimientos de corriente de protección.

En este paso debemos considerar dos situaciones distintas:

a. Estructura en proyecto.

En el caso de que la estructura esté en proyecto, la determinación de la corriente total de protección se la realiza mediante el empleo de la fórmula (3-3), la cual fue citada y analizada en el numeral 3.5; sin embargo, con el propósito de recordarla, se la citará nuevamente a continuación:

$$I = A \cdot D_c \cdot F \cdot (1-E)$$

b. Estructura ya existente.

Para este otro caso, la corriente total de protección deberá ser determinada por intermedio de pruebas de corriente, las cuales deberán ser realizadas en el mismo lugar donde estará instalada la tubería y cuyos métodos de prueba han sido descritos en el numeral 3.2.2.

3. Selección del tipo de ánodo galvánico.

La selección del tipo de ánodo galvánico más adecuado, para un determinado diseño de Protección catódica, depende principalmente de la resistividad eléctrica del electrolito en donde va a ser enterrada la tubería. En base a esta consideración, en la Tabla XXII se presentan las aplicaciones típicas de los Ánodos galvánicos, de acuerdo a la resistividad eléctrica del electrolito; y que servirá como una guía para su adecuada selección.

TABLA XXII
Aplicaciones típicas de los ánodos galvánicos

Ánodos	Aplicaciones
Zinc	Estructuras metálicas inmersas en agua de mar o enterradas en suelos con resistividad eléctrica de hasta 1.000 Ω -cm.
Magnesio	Estructuras metálicas inmersas en agua dulce o enterradas en suelos con resistividad eléctrica de hasta 3.000 Ω -cm.
Aluminio	Estructuras metálicas inmersas en agua de mar.

Fuente: GENTIL, V., Corrosão, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.

Además de la selección del material del ánodo galvánico, es necesario estimar sus características dimensionales de tal manera que se obtenga un adecuado periodo de vida útil y una sufi-

ciente salida de corriente. Los catálogos de los fabricantes dan las características dimensionales de los ánodos de uso normal y sirven de gran ayuda en el momento de la selección del tipo de ánodo más adecuado. Como un ejemplo, las tablas XIX y XX, descritas en la sección 4.3, muestran algunos de los diversos tamaños disponibles en el comercio, tanto para ánodos de magnesio como para ánodos de zinc respectivamente.

4. Calcular la resistencia teórica del circuito.

La resistencia teórica total del circuito es obtenida mediante la aplicación de la ley de Ohm de acuerdo a la expresión:

$$R = \frac{V_a - V_p}{I} \quad (4-1)$$

Donde:

R = Resistencia teórica total del circuito (Ω).

V_a = Potencial de circuito abierto del ánodo (V).

V_p = Potencial de protección de la estructura (V)

I = Corriente total de protección (A).

La resistencia calculada por la expresión ante-

rior, corresponde a la resistencia total del circuito de Protección catódica y por lo tanto está constituida por la suma de las diversas resistencias que conforman dicho circuito, y que para el caso de un sistema galvánico se la puede determinar mediante la ecuación:

$$R = R_a + R_{ca} + R_t \quad (4-2)$$

Donde:

R_a = Resistencia de la cama de ánodos (Ω).

R_{ca} = Resistencia de los cables (Ω).

R_t = Resistencia de contacto entre la tubería y el suelo que lo rodea (Ω).

Es importante anotar que en la ecuación anterior, no se ha incluido las resistencias del electrolito y de la tubería debido a que sus valores son tan pequeños que no influyen significativamente en los resultados finales.

5. Determinar el número total de Ánodos requeridos, así como también el espaciamiento entre ánodos.

La determinación del número total de ánodos se lo realiza mediante la utilización de gráficos de diseño, previamente elaborados, los cuales

relacionan la resistencia total de los ánodos (sin incluir su resistencia interna) vs. el número de ánodos requeridos.

Los gráficos de diseño están basados de acuerdo a las dimensiones del ánodo y a la posición de instalación de los mismos y son obtenidos mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones desarrolladas por H.B. Dwight:

- Para el caso de un ánodo instalado en posición vertical.

$$R_v = \frac{0,00521}{L} \rho (2,3 \log \frac{4L}{d} - 1) \quad (4-3)$$

Donde:

R_v = Resistencia a tierra de un ánodo vertical (Ω).

ρ = Resistividad del suelo o del relleno, en el caso que se utilice ($\Omega \cdot \text{cm}$).

L = Longitud del ánodo (incluyendo el relleno) (pies).

d = Diámetro del ánodo (incluyendo el relleno) (pies).

- Para el caso de una cama de ánodos instalados en posición vertical.

$$R_{v0} = \frac{0,00521 \rho}{N} \left(2,3 \log \frac{L}{d} - 1 + \frac{2L}{S} 2,3 \log 0,636N \right) \quad (4-4)$$

Donde:

R_{v0} = Resistencia a tierra de los ánodos verticales en paralelo (Ω).

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$).

N = Número de ánodos en paralelo.

L = Longitud del ánodo (incluyendo el relleno) (pies).

d = Diámetro del ánodo (incluyendo el relleno) (pies).

S = Espaciamiento entre ánodos (pies).

- Para el caso de ánodos instalados en posición horizontal.

$$R_H = \frac{0,00521 \rho}{L} \left(2,3 \log \frac{4L^2 + 4L\sqrt{S^2 + L^2}}{dS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + L^2}}{L} - 1 \right) \quad (4-5)$$

Donde:

R_H = Resistencia a tierra de un ánodo horizontal (Ω).

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$).

L = Longitud del ánodo (incluyendo el relleno)
(pies).

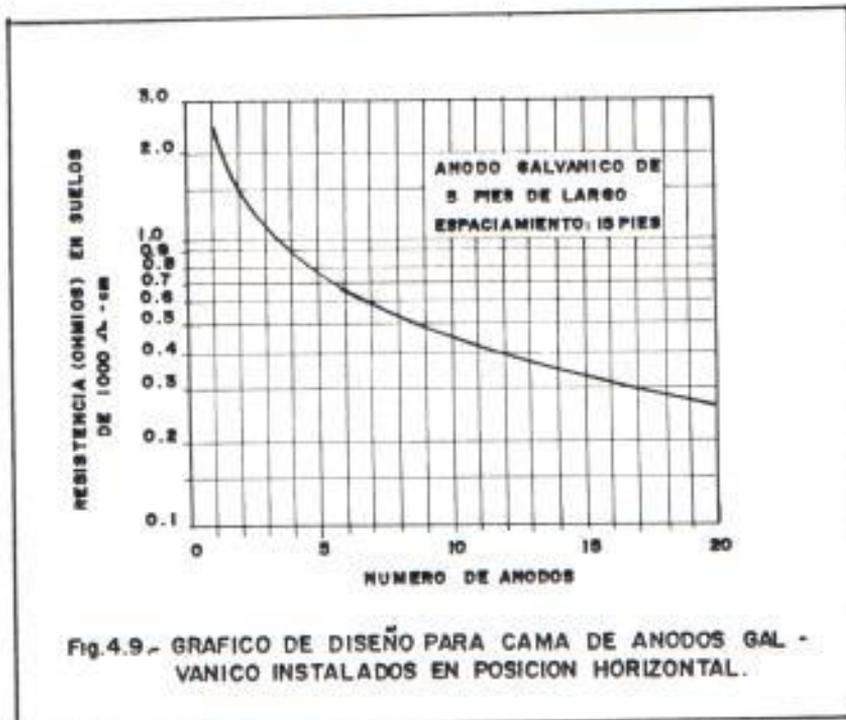
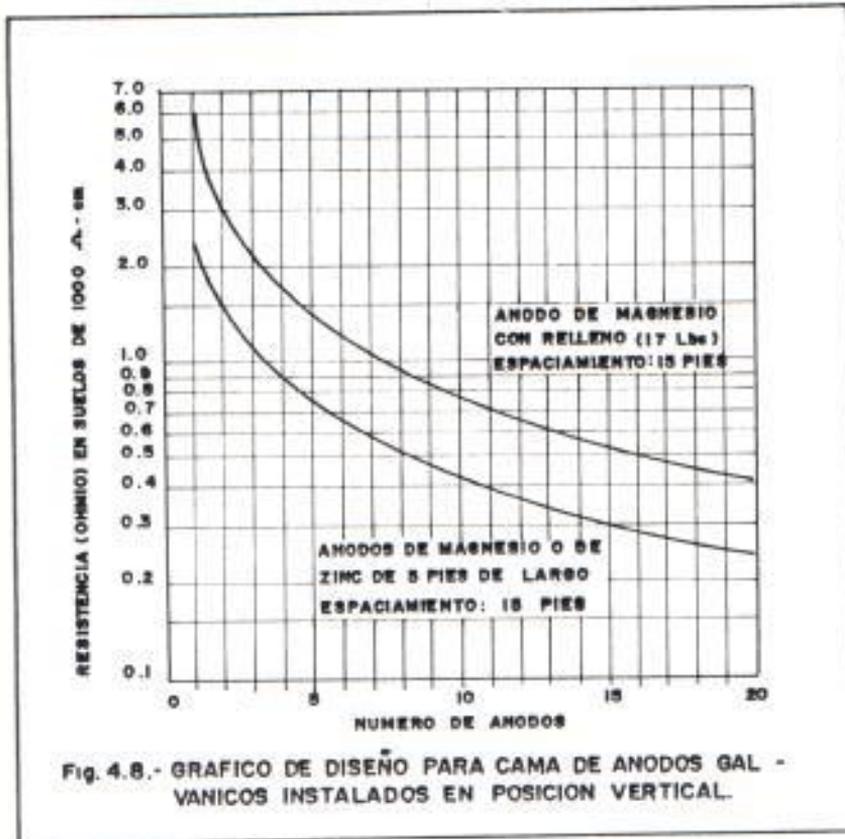
d = Diámetro del ánodo (incluyendo el relleno)
(pies).

S = Doble de la profundidad del ánodo (pies).

Las Figs. 4.8 y 4.9 muestran típicos gráficos de diseño tanto para cama de ánodos en posición vertical como en posición horizontal respectivamente.

Es importante anotar que no existe una fórmula específica aplicable para obtener directamente el gráfico de diseño de una cama de ánodos en paralelo posicionados horizontalmente por lo que la curva mostrada en la Fig. 4.9 fue obtenida dividiendo la resistencia de un ánodo en posición horizontal, sin incluir su resistencia interna (ecuación 4-5), para el número de ánodos en paralelo y el valor obtenido es multiplicado por el correspondiente factor de paralelismo. El factor de paralelismo puede obtenerse mediante la aplicación de la siguiente expresión:

$$F_p = \frac{R_{vn}}{(R_v/N)} \quad (4-6)$$



En la expresión (4-6), el valor de R_{vn} es obtenido aplicando la fórmula (4-4) pero tomando en cuenta la siguiente consideración: El valor del espaciamento S utilizado en esta fórmula será igual al del espaciamento requerido para la posición horizontal (desde el centro de un ánodo hasta el centro del siguiente ánodo) menos la longitud nominal del ánodo utilizado.

La determinación del gráfico de diseño para una cama de ánodos posicionados horizontalmente descrito en los párrafos precedentes, se aplica cuando los ánodos se encuentran individualmente rodeados por su respectivo relleno (ver Fig. 4.5a). Esta observación se la realiza debido a que existe otro tipo de construcción de cama de ánodos posicionados horizontalmente, el cual involucra la utilización de una faja continua de relleno (backfill) dentro de la cual son instalados los ánodos (ver Fig. 4.5b). Este tipo de configuración puede ser considerada, para fines de diseño, como que si fuera un sólo ánodo instalado horizontalmente con una longitud igual al de la faja de relleno. En este caso, la obtención del gráfico de diseño se lo realiza aplicando sencillamente la ecuación (4-5) pero considerando como variable el valor de "L", tal

como se ilustra en la Fig. 4.10. Para determinar la resistencia de una cama de ánodos, utilizando este último gráfico, se deberá emplear, como valor "L", la longitud de la faja de relleno que ocuparía los "N" ánodos.

Para hacer uso de cualquiera de los gráficos de diseño que han sido estudiados, es necesario previamente determinar la máxima resistencia permitida para los ánodos, la cual es obtenida a partir de la resistencia teórica total del circuito (R). Despejando R_a de la ecuación (4-2) obtendremos:

$$R_a \text{ teórica} = R - R_{ca} - R_c \quad (4-7)$$

Analizando cada término de la ecuación (4-7), se establece que:

- R_a es la resistencia de la cama de ánodos y está constituida por la resistencia a tierra del grupo de ánodos, determinada mediante los gráficos de diseño, mas su resistencia interna mas la resistencia efectiva del cable que los une. Tanto la resistencia interna del grupo de ánodos como la resistencia del cable que los une son valores variables que pueden ser

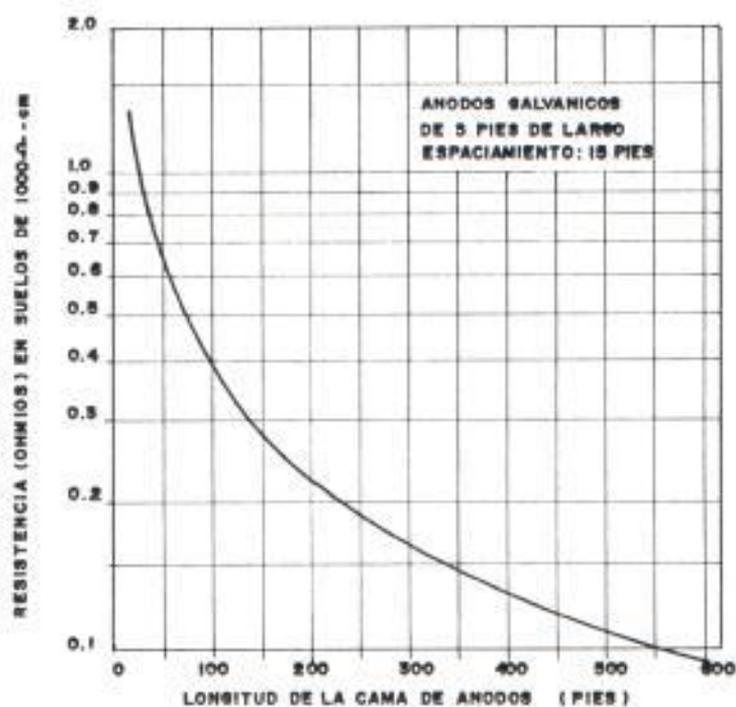


Fig. 4.10.- GRAFICO DE DISEÑO PARA UNA CAMA CONTINUA DE ANODOS INSTALADOS EN POSICION HORIZONTAL.

calculados una vez determinados el número de ánodos de la instalación galvánica.

La resistencia interna del grupo de ánodos se la calcula dividiendo la resistencia interna de un ánodo para el número de ánodos en paralelo que conforman la instalación. Para determinar la resistencia interna de un solo ánodo, es necesario restar la resistencia del ánodo propiamente dicho menos la resistencia de la columna que forma el conjunto ánodo-relleno, utilizando para ambos casos el valor de la resistividad del relleno y valiéndonos de la aplicación de las fórmulas (4-3) o (4-5), según la posición de los ánodos en la instalación.

En lo que se refiere a la resistencia efectiva del cable, ésta se la determina con la ayuda de tablas que contienen los valores de la resistencia longitudinal de los conductores de cobre comunmente empleados en los sistemas de Protección catódica y se considera para su cálculo tan sólo la mitad de la longitud del cable que unen los ánodos y esto se debe a que no toda la corriente de protección fluye por la longitud total del mismo.

- R_{ca} está constituida por la resistencia del cable que une a la tubería con el primer ánodo y para su determinación es una práctica muy común el considerar un incremento del 10 % en la longitud del cable, con el fin de proporcionar un rango de seguridad para que el cable no quede demasiado tenso.

La resistencia longitudinal de los cables son obtenidas a partir de tablas proporcionadas por los fabricantes. Como ejemplo, en la Tabla XXIII se proporcionan datos de la resistencia longitudinal de conductores de cobre de calibres comunmente empleados en trabajos de sistemas de Protección catódica por ánodos galvánicos.

TABLA XXIII

Resistencia eléctrica de los conductores de cobre usados en sistemas galvánicos

Uso general	Calibre (AWG)	Corriente máxima (A)	Resistencia (Ω/Km)
Instalaciones de ánodos galvánicos	8	45	2,1458
	10	30	3,4122
Puntos de prueba	12	20	5,4137
	14	15	8,5962
Cables de prueba de los instrumentos	16	8	13,7146
	18	6	21,8515
	20	5	34,7786
	22	3	55,7770

Fuente: PEABODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967

- La resistencia de contacto entre la tubería y el suelo que lo rodea (R_c), depende de la calidad del revestimiento; de tal manera que a mejor revestimiento, mayor será dicha resistencia. Su valor puede ser determinado mediante la aplicación de la fórmula:

$$R_c = \frac{0.00521 \rho}{L(1-E)} \left(2.3 \log \frac{4L^2 + 4L\sqrt{S^2 + LZ}}{dS} + \frac{S}{L} - \frac{\sqrt{S^2 + LZ}}{L} - 1 \right) \quad (4-8)$$

Donde:

R_c = Resistencia de contacto entre la tubería y el suelo (Ω).

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$).

L = Longitud de la tubería (pies).

S = Doble de profundidad de la tubería (pies).

d = Diámetro nominal de la tubería (pies).

E = Eficiencia del revestimiento (expresada en decimales).

Una vez determinada la máxima resistencia permitida para la cama de ánodos (R_a), se hace empleo del gráfico de diseño con el fin de determinar el número de ánodos de la instalación galvánica. Para ello, en primer lugar se asume por parte del diseñador, el espaciamiento entre ánodos (el cual está relacionado con las características de

las capas del suelo y el espacio físico de la instalación). Establecido el espaciamiento, se busca el número de ánodos que corresponde al valor de la R_a máxima. En el caso de que el valor hallado para el número de ánodos no sea una cantidad entera, se escogerá el número de ánodos inmediatamente superior.

Ya determinado el número de ánodos, se procede a calcular la resistencia de la cama de ánodos considerando cada uno de los términos que la componen.

El valor de la resistencia R_a total de diseño, se la compara con el valor R_a teórico de tal manera que se cumpla la siguiente condición:

$$R_a \text{ diseño} \leq R_a \text{ teórico} \quad (4-9)$$

En el caso de que no se cumpla la condición anterior, se deberá incrementar sucesivamente el número de ánodos hasta que tal condición se cumpla.

Otro factor que deberá ser considerado al momento de la selección definitiva del número de ánodos es la vida útil de la instalación galvá-

nica de tal manera que si el número de ánodos determinado por las cartas de diseño no cumplen con el tiempo mínimo de vida de la instalación, entonces se deberá incrementar el número de ánodos con el fin de satisfacer ambas condiciones.

6. Cálculo de la vida útil de la cama de ánodos.

La vida de los ánodos de una instalación galvánica puede ser determinada mediante la aplicación de la siguiente fórmula:

$$T = \frac{P \cdot C \cdot F_u}{8.760 \cdot I} \quad (4-10)$$

Donde:

T = Vida esperada de la cama de ánodos (años).

P = Peso total de los ánodos (Kg).

C = Capacidad de corriente del ánodo (Ah/Kg).

(Ver Tablas XVI, XVII y XVIII).

F_u = Factor de utilización (expresado en decimales).

I = Corriente de salida de la cama de ánodos (A)

El factor de utilización F_u determina el máximo porcentaje de consumo del ánodo antes de

ser reemplazado. Esto significa que una vez alcanzado dicho porcentaje de consumo, el ánodo debe ser reemplazado debido a que el material anódico residual no es suficiente como para mantener una razonable salida de corriente. El valor del factor de utilización empleado comúnmente tanto para ánodos de magnesio como para ánodos de zinc es de 0,85.

7. Distribución y arreglo de los ánodos.

La distribución y arreglo de los ánodos debe ser realizada de forma de obtener la máxima uniformidad posible en la inyección de corriente, de tal manera que todos los ánodos atiendan áreas iguales de la estructura. En el caso de que se requiera la instalación de más de una cama de ánodos, una práctica muy usual es el establecer un espaciamiento de 5 a 10 Km entre cada lecho de ánodos galvánicos. La Fig. 4.11 muestra algunos ejemplos de arreglos de ánodos galvánicos a lo largo de la trayectoria de una tubería.

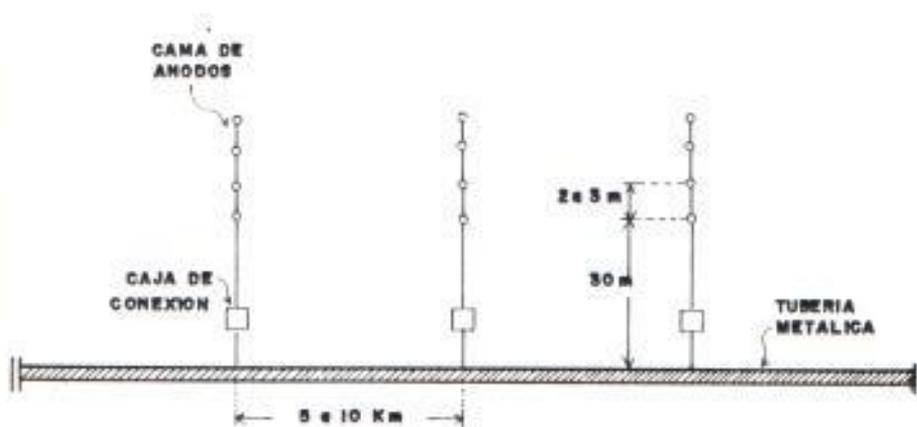


Fig. 4. II.- EJEMPLOS DE ARREGLOS DE ANODOS GALVANICOS A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA DE UNA TUBERIA ENTERRADA.

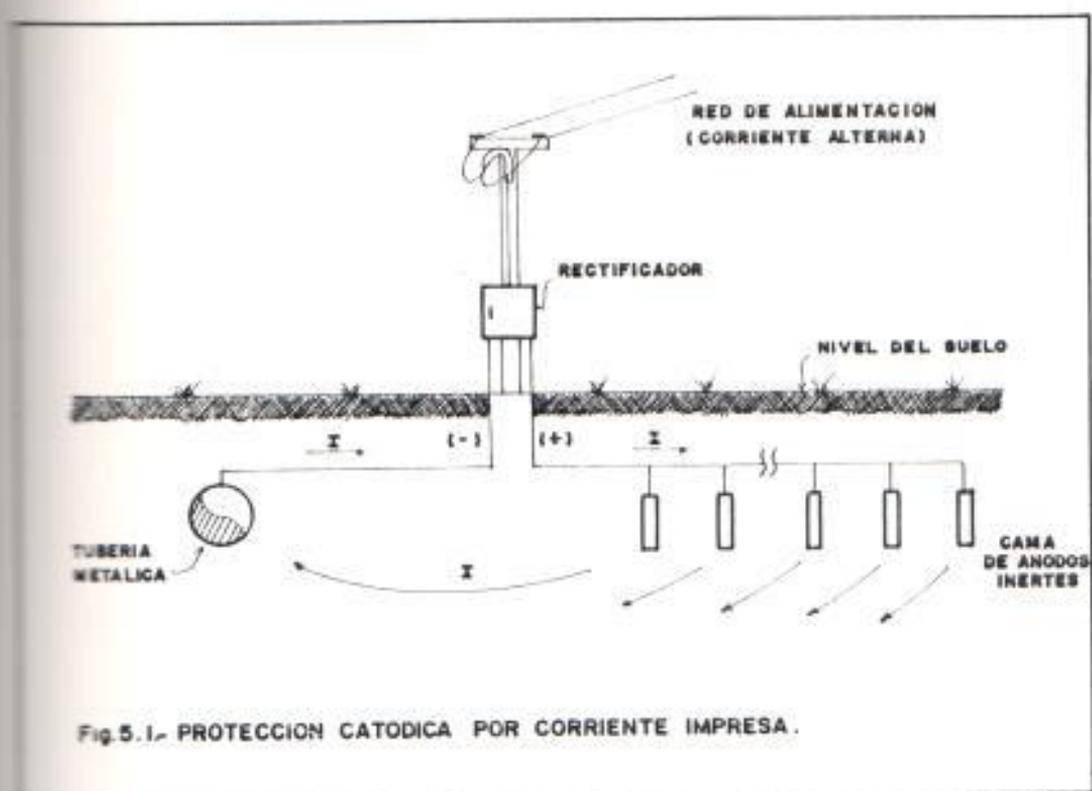
CAPITULO V

PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA

5.1. PRINCIPIOS GENERALES

La Protección catódica por corriente impresa utiliza el mismo mecanismo empleado para los sistemas por ánodos galvánicos es decir, se establece una pila electrolítica la cual tiene por finalidad inyectar una corriente de protección de una intensidad tal que anule las corrientes de corrosión de las diversas pilas existentes en la superficie metálica a ser protegida. La diferencia radica en que la fuerza electromotriz, generada espontáneamente en el sistema por ánodos galvánicos, es obtenida a partir de una fuente externa de corriente continua. La corriente producida se la disipa en el electrolito mediante la utilización de una cama de ánodos, tal como se ilustra en la Fig. 5.1.

Las fuentes externas de corriente continua amplia-



mente utilizadas son los rectificadores los cuales, alimentados con corriente alterna, suministran la corriente continua necesaria para la protección de la estructura metálica. Además de los rectificadores también pueden ser utilizadas otras fuentes de corriente continua tales como unidades generadoras alimentadas a gas, generadores termoeléctricos, generadores movidos por viento o cualquier otro equipo capaz de suministrar la suficiente cantidad de corriente continua para alimentar satisfactoriamente un sistema por corriente impresa.

Para la dispersión de la corriente de protección en el electrolito son utilizados ánodos especiales inertes, con características y aplicaciones que dependen del electrolito donde son utilizados.

La gran ventaja de este método consiste en el hecho de que la fuente generadora de corriente continua puede tener la potencia y la tensión de salida que se necesite, en función de las condiciones de resistividad eléctrica del electrolito. Esta flexibilidad permite que el método de protección catódica por corriente impresa pueda ser aplicado a estructuras en contacto con electrolitos de baja (3.000 a 10.000 $\Omega\cdot\text{cm}$), media (10.000 a 50.000 $\Omega\cdot\text{cm}$), alta (50.000 a 100.000 $\Omega\cdot\text{cm}$) y altísima

(mayor los 100.000 $\Omega \cdot \text{cm}$) resistividad eléctrica.

En el uso del sistema de protección catódica por corriente impresa, es extremadamente importante considerar que el polo negativo de la fuente generadora deberá ser conectada a la estructura metálica a proteger, mientras que el polo positivo deberá ser conectado a la cama de ánodos; en caso contrario, se produciría una corrosión super acelerada de la estructura.

5.2. CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO

En forma similar a lo descrito en el numeral 4.2, es necesario antes de la ejecución del dimensionamiento de un sistema de Protección catódica por corriente impresa, presentar, como consideraciones para realizar un diseño satisfactorio, las principales ventajas y desventajas del sistema estudiado, las mismas que son presentadas a continuación:

a. Ventajas:

- Los sistemas por corriente impresa pueden ser diseñados con una reserva de voltaje y de corriente con el fin de proveer una adecuada protección ante incrementos en los requeri-

mientos de corriente debido a la deterioración del revestimiento de la estructura metálica.

- Tales sistemas pueden ser diseñados para pequeños o grandes requerimientos de corriente.
- Una extensa área de superficie metálica puede ser protegida mediante una sola instalación.
- El voltaje aplicado y la corriente de salida pueden ser variados sobre un amplio rango, con el fin de satisfacer condiciones de cambio en los requerimientos de corriente.
- La corriente drenada puede ser leída^a fácilmente en el rectificador.
- Las instalaciones por corriente impresa pueden ser diseñadas para una vida útil sobre los 20 años.

b. Desventajas:

- Los sistemas por corriente impresa deben ser cuidadosamente diseñados con el fin de evitar las interferencias catódicas sobre otras

estructuras.

- Tales sistemas están expuestos a interrupciones en su funcionamiento debido a fallas en los equipos o por falta de energía eléctrica.
- Requieren de inspecciones y mantenimiento eléctrico periódico.
- Poseen un costo de operación por suministro de energía eléctrica.

3.3. ELEMENTOS, RECTIFICADORES Y ANODOS INERTES

Los principales elementos que forman parte de un sistema de Protección catódica por corriente impresa son:

a. Rectificadores.

La "American Standards Association" define a los rectificadores diciendo:

Es un aparato que convierte la corriente alterna en corriente unidireccional mediante el empleo de un dispositivo que tiene la propiedad de hacer que la corriente no pueda circular más que en una sola dirección.

El típico rectificador utilizado en trabajos de Protección catódica tiene, entre sus principales componentes: un transformador que se encarga de reducir el voltaje alterno disponible de la línea a un bajo voltaje alterno en el secundario, un elemento rectificador (usualmente con rectificación de onda completa) y un gabinete que sirve para el montaje externo del aparato. Estos componentes principales se complementan con el empleo de dispositivos tales como un breaker para la protección del aparato y de instrumentos de corriente continua conectados a la salida del mismo, los cuales sirven para dar las lecturas de los principales parámetros de protección, es decir corriente y voltaje.

Aunque no ha sido todavía ampliamente utilizado, los rectificadores de Protección catódica pueden ser equipados con filtros en la salida de la corriente continua, lo cual suaviza el rizo de la onda rectificada y permite una mayor eficiencia total. Estos filtros son prácticos donde el ahorro en el costo de la potencia es suficiente como para justificar esta inversión adicional.

Los rectificadores pueden tener una variedad de circuitos, entre los principales se encuentran

el circuito de media onda y el circuito puente de onda completa.

En el circuito de media onda, la corriente fluye en una sola dirección y únicamente durante el medio ciclo positivo de la onda del suministro de corriente alterna, dando una salida de corriente continua altamente pulsante y con un factor de rizado muy grande (Ver Fig. 5.2). Estas consideraciones hacen al circuito estudiado poco eficiente y en algunos casos no deseable para ser usado en sistemas de Protección catódica. En cambio, el circuito puente de onda completa tiene la ventaja de que la corriente fluye durante ambos semiciclos de la señal alterna de entrada y produce una salida continua pulsante con menos de la mitad del rizado que se obtiene en el circuito de media onda, dando de esta manera una corriente continua más uniforme (Ver Fig. 5.3), por lo cual es ampliamente utilizado.

Lo mismo que se ha descrito en los párrafos precedentes, para una línea monofásica de corriente alterna, se puede aplicar a circuitos trifásicos, con la particularidad de que un rectificador trifásico tiene una salida de co-

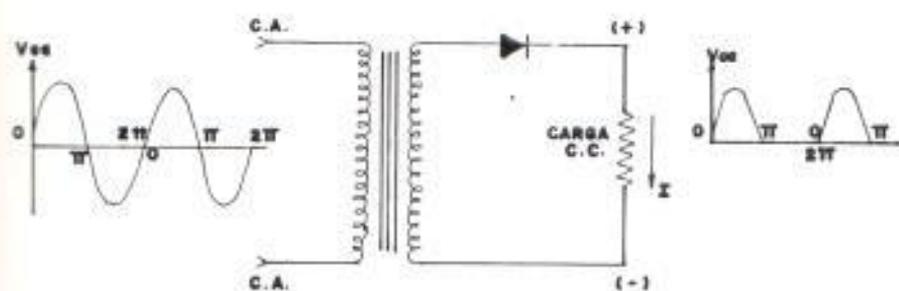


Fig. 5.2.- CIRCUITO BASICO DE UN RECTIFICADOR MONOFASICO DE MEDIA ONDA.

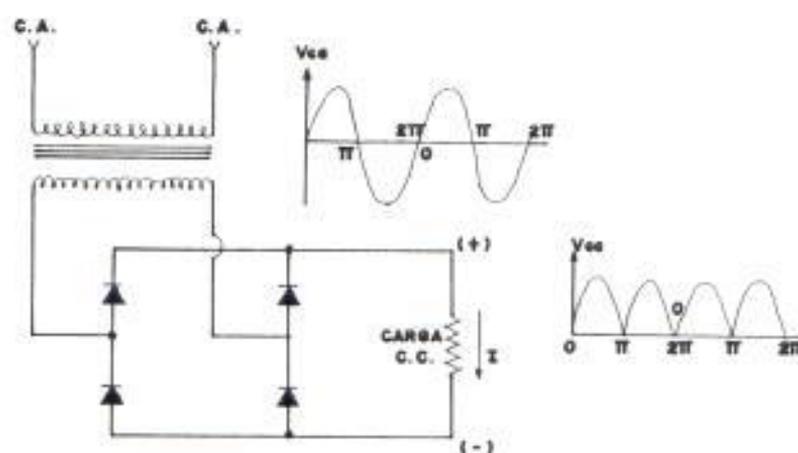


Fig. 5.3.- CIRCUITO BASICO DE UN RECTIFICADOR MONOFASICO TIPO PUENTE DE ONDA COMPLETA.

riente continua con mejores características de rectificación (rizado muy pequeño), por lo que se obtiene un rendimiento más elevado; pero su precio es también mayor.

- Especificaciones técnicas:

Debido a que el rectificador constituye el equipo principal de un sistema por corriente impresa, su especificación, instalación, operación y mantenimiento deben ser las más criteriosas posibles para asegurar un buen desempeño de la Protección catódica.

Entre las especificaciones principales que deben cumplir los rectificadores, se encuentran:

1. Alimentación de corriente alterna.

Está definida en función de la disponibilidad de la energía eléctrica en el local de la instalación. Se utilizan tensiones de 110, 220 y 440 V. En el caso de que haya la necesidad de una mayor flexibilidad, se pueden especificar rectificadores que admitan más de una tensión de alimentación. De

la misma manera, se deberá especificar el tipo de alimentación, sea ésta monofásica o trifásica y la frecuencia a la cual debe ser operado.

2. Salida máxima de voltaje y corriente continua.

Esta especificación es una de las más importantes puesto que los rectificadores son precisamente seleccionados de acuerdo a sus valores nominales de voltaje y corriente continua de salida. Son comercialmente disponibles en varias combinaciones de voltaje y amperaje, siendo las más comunes aquellas que se presentan* en la Tabla XXIV.

TABLA XXIV
Voltajes comunes de salida y sus correspondientes corrientes máximas en rectificadores para sistemas de corriente impresa

Voltaje CC (V)	Corriente CC (A)
9	9
12	9
18	14
24	14
30	18
36	18
48	22
60	22

Fuentes: Catálogo de rectificadores de Protección catódica MATCOR

Los rectificadores también deberán ser provistos con un amplio rango de selección de voltajes, por medio de taps en el transformador, para permitir flexibilidad en el ajuste de la corriente de salida.

3. Elementos rectificadores.

Aun cuando existen rectificadores de corriente alterna que emplean elementos rectificantes fabricados de muy diversos materiales, los más usados comunmente son los que utilizan diodos de selenio y diodos de silicio.

Entre las características principales de tales diodos podemos citar que los rectificadores de silicio tienen, en condiciones normales de operación, un tiempo de vida mayor que los de selenio. Además de eso, mantienen casi inalterables sus características eléctricas a lo largo del tiempo, lo que no ocurre con los de selenio cuyo rendimiento se va gradualmente reduciendo. Sin embargo, el selenio resiste mejor los transientes de tensión, mientras que los de silicio son particularmente vulnerables a

sobrecargas de corriente o sobrevoltajes (resultantes de los voltajes transientes en el momento de la conexión y desconexión del interruptor y de las ondas causadas por descargas atmosféricas) por lo que exigen mayor sofisticación en el circuito de protección de los elementos rectificadores, debiendo ser protegidos por interruptores especiales con fusibles accionantes de alta velocidad y supresores de voltaje de pico.

Debido a que no existe una notable diferencia de precio ni de eficiencia entre ambos tipos de diodos, resulta difícil establecer un criterio rígido de selección; sin embargo en base a lo expuesto en el párrafo anterior, es una regla muy común el de especificar la utilización de diodos de silicio en sistemas más estables, que presenten pequeñas variaciones tanto en la alimentación como en la demanda de corriente, mientras que los diodos de selenio se deberán utilizar en sistemas con características de operación no muy estables.

Entre las especificaciones principales de los diodos, las cuales servirán para selec-

cionar adecuadamente el tipo de diodo a utilizar, se encuentran: el máximo flujo de corriente a temperatura ambiente, tanto en sentido directo como en sentido inverso; y el máximo voltaje inverso PRV (el voltaje impuesto a través del elemento en la dirección de alta resistencia). De esta manera, para determinar la capacidad de los diodos, se deberá calcular el PRV necesario capaz de bloquear los picos de la onda sinusoidal. Dicho PRV, en el caso de circuitos de media onda y circuitos puente de onda completa, es igual al valor pico del voltaje alterno de entrada; sin embargo para dar un cierto rango de seguridad, se escoge normalmente un diodo con una capacidad PRV del doble del valor rms del voltaje alterno de entrada.

4. Sistemas de enfriamiento.

Los rectificadores usados en sistemas de Protección catódica pueden ser especificados en dos tipos:

- Unidades rectificadoras enfriadas por aire y;

- Unidades rectificadoras inmersas en aceite,

dependiendo de los requerimientos locales y del medio donde va a ser instalados.

Los rectificadores enfriados por aire usualmente tienen un costo inicial más bajo, son más livianos y más pequeños que las unidades inmersas en aceite, para una misma capacidad; sin embargo, están propensos al bloqueo de sus pantallas de enfriamiento debido a la acumulación de polvo, insectos y otras suciedades, lo cual dificulta la circulación del aire con la consecuente baja en su eficiencia o la falla completa del grupo rectificador con el tiempo. Este tipo de rectificadores se enfrían por medio de ventiladores que pasan una corriente de aire forzado a través del armazón que soporta los diodos los cuales se encuentran encerrados en el gabinete del rectificador.

En lo que respecta a los rectificadores inmersos en aceite, éstos tienen usualmente un mayor costo inicial pero poseen la

ventaja de ser más adaptables a ambientes de extremas temperaturas e indicados para locales cuya atmósfera es muy agresiva, como en el caso de ambientes marinos. Para localizaciones sujetas a peligros de explosión, equipos inmersos en aceite deben ser usados dentro de un gabinete a prueba de explosión. El sistema de enfriamiento de este tipo de rectificadores se basa en sumergir los componentes del rectificador en aceite aislante para uso eléctrico, cediendo a éste el calor desarrollado por el transformador y los diodos. El aceite es a su vez enfriado, por la parte exterior del rectificador, mediante la circulación continua de un líquido refrigerante. Los gabinetes de este tipo de rectificadores son completamente cerrados, por lo que el polvo, los insectos y la lluvia serán completamente excluidos manteniéndose libres de cualquier elemento extraño que pudiese afectar al rendimiento del aparato.

Ambos tipos de rectificadores tendrán una larga vida útil y un servicio satisfactorio cuando son apropiadamente localizados y mantenidos. En general, las unidades mono-

fásicas enfriadas al aire son especificadas para requerimientos de baja salida, mientras que las unidades inmersas en aceite son apropiadas para grandes demandas de corriente.

5. Regulación de la tensión y corriente continua de salida.

La corriente continua que el rectificador entrega a la estructura a ser protegida puede ser regulada, lo cual es conseguido por medio de la variación de la tensión de entrada. Tal regulación puede ser hecha manualmente (rectificadores manuales) o automáticamente (rectificadores automáticos).

Los rectificadores con regulación manual son usados en locales donde no ocurren variaciones continuas en la demanda de la corriente. Las regulaciones, hechas normalmente por medio de taps en el secundario del transformador son esporádicas, apenas para compensar el envejecimiento del revestimiento o el aumento de la resistencia de las camas de ánodos, factores que siempre

ocurren a lo largo del tiempo. Los taps deberán permitir un ajuste de voltaje desde cero hasta un voltaje igual al 15 % de sobrecarga en incrementos iguales no mayor a 2 voltios.

Los rectificadores automáticos o también llamados "de potencial constante", difieren de los rectificadores manuales en que la corriente de salida es cambiada automáticamente por un circuito sensor que mantiene un chequeo continuo del potencial tubería-suelo. Típicamente este chequeo puede ser establecido por un electrodo de referencia (generalmente un electrodo de Cu/CuSO_4 e inclusive un ánodo de zinc) enterrado en el punto donde el potencial tubería-suelo debe ser mantenido constante. Los cables de prueba, provenientes del electrodo de referencia y de la tubería, son conectados a un amplificador magnético o a un circuito equivalente, el cual a su vez alimenta la señal amplificada al devanado de control de un reactor saturable en serie con el primario del transformador reductor. Tal como se ilustra en la Fig. 5.4.

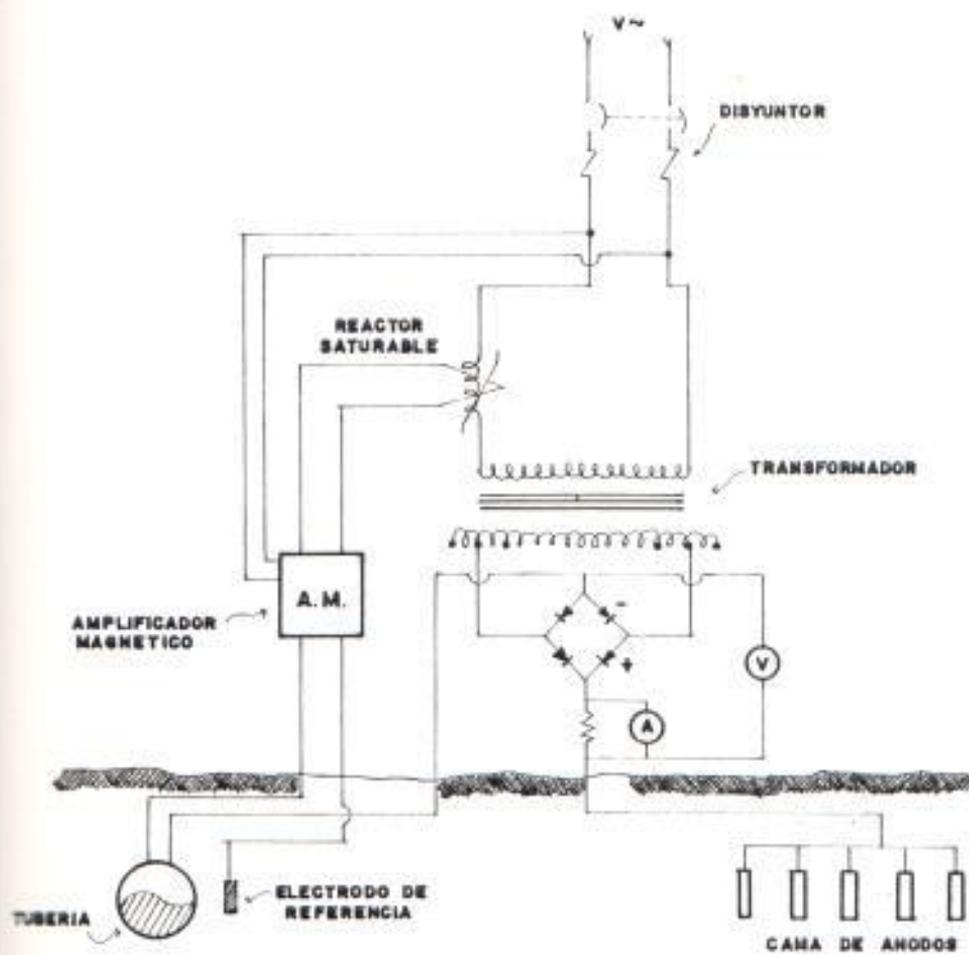


Fig.5.4.- DIAGRAMA TIPICO DE UN RECTIFICADOR AUTOMATICO O DE POTENCIAL CONSTANTE.

Una vez que el rectificador es ajustado al potencial tubería-suelo deseado, cualquier incremento en este potencial sirve (através del amplificador magnético) para incrementar la reactancia del reactor. Este reduce la salida de corriente hasta que el balance con el potencial preestablecido sea recuperado. Así mismo, cualquier reducción en el potencial entre la tubería y el electrodo de referencia podría causar que la salida de corriente del rectificador se incremente automáticamente hasta que el balance sea recuperado.

Los rectificadores automáticos son por lo tanto indicados para sistemas donde se presentan demandas variables de corriente causadas por agentes extraños al sistema, como en el caso de tuberías sujetas a corrientes de interferencia y a camas de ánodos con variaciones periódicas en su resistencia como consecuencia de los cambios de estaciones climáticas.

6. Instrumentos.

Instrumentos provistos para facilitar la

lectura de la corriente y el voltaje de salida deberán ser suministrados con la unidad rectificadora. Tales instrumentos deberán ser voltímetros y amperímetros de corriente continua con una exactitud dentro del 2 % de la lectura a escala completa y deben tener una mínima longitud de escala de 4,3 cm.

7. Equipos de protección.

Los interruptores, controles y dispositivos de seguridad deben estar diseñados para una apropiada regulación y control de la salida con el fin de proveer seguridad de operación. Los rectificadores usualmente incluyen un breaker externo en la proximidad del mismo con el fin de que la unidad entera pueda ser desconectada eléctricamente en caso de sobrecarga del sistema.

Donde existen altas posibilidades de descargas atmosféricas se hace necesaria la instalación de equipos de protección contra tales descargas. Una protección de este tipo debe ser analizada en dos direcciones:

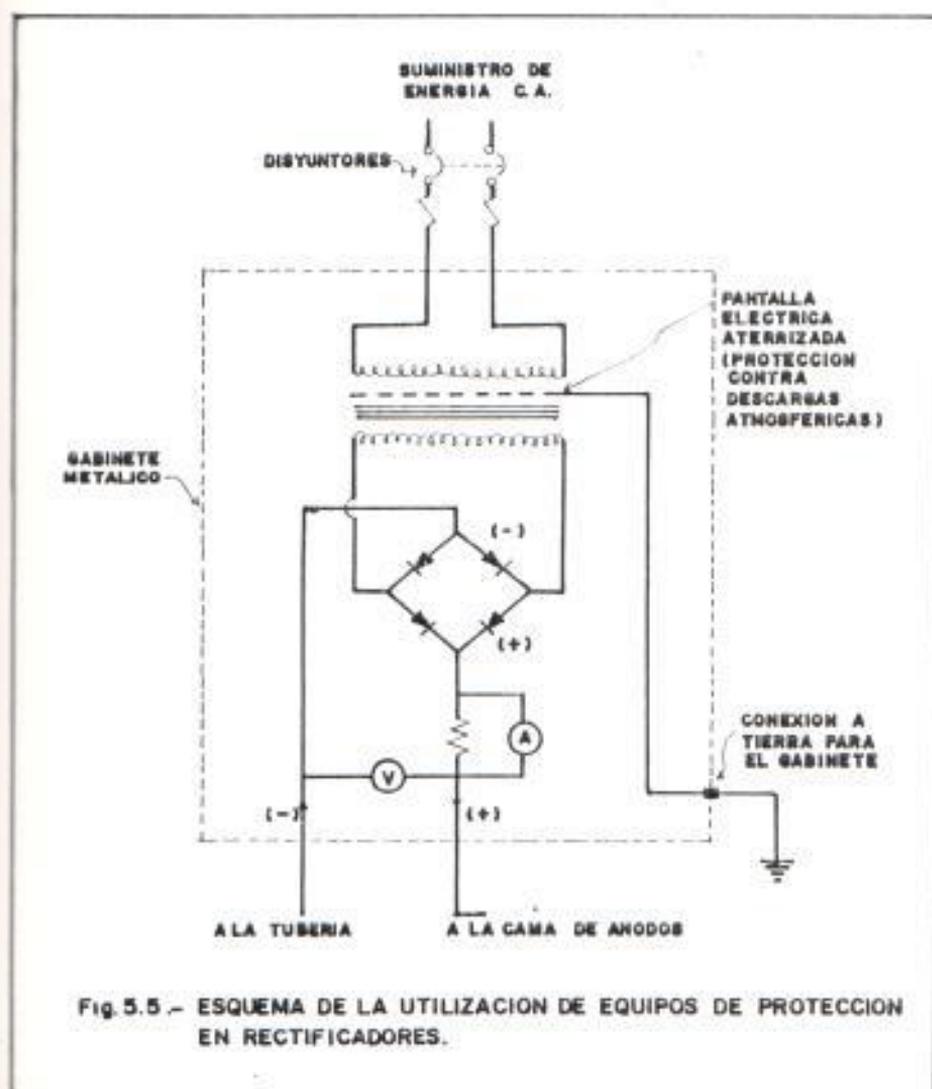
- a. Ondas acercándose hacia la unidad desde la línea de distribución eléctrica (la menos probable) y;
- b. Ondas viajando desde la tubería.

La protección para la primera eventualidad puede ser provista por rectificadores que tienen transformadores con una pantalla eléctrica entre los devanados del primario y del secundario, tal como se ilustra en la Fig. 5.5. Esta pantalla, cuando está aterrizada apropiadamente, intercepta los picos de alto voltaje de la onda de descarga y la envía hacia la tierra.

En cambio, la protección contra las ondas producidas por descargas atmosféricas que viajan desde la tubería puede ser provista por un pararrayos de bajo voltaje colocado entre los terminales del rectificador.

8. Tipo de montaje.

Se deberá especificar si el gabinete del rectificador está construido para un montaje en poste, en pared o en el piso (sobre



pedestales de concreto). Las Figs. 5.6 y 5.7 ilustran el detalle de instalación de los rectificadores para montajes en poste y en el piso respectivamente.

9. Rango de temperatura ambiente de operación.

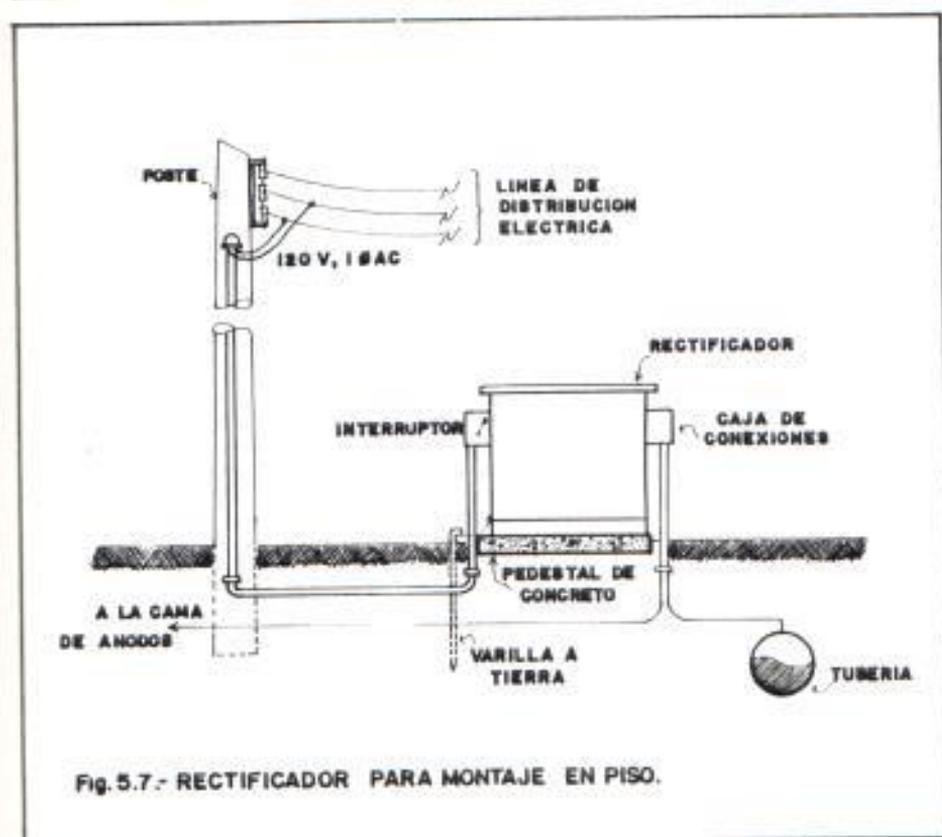
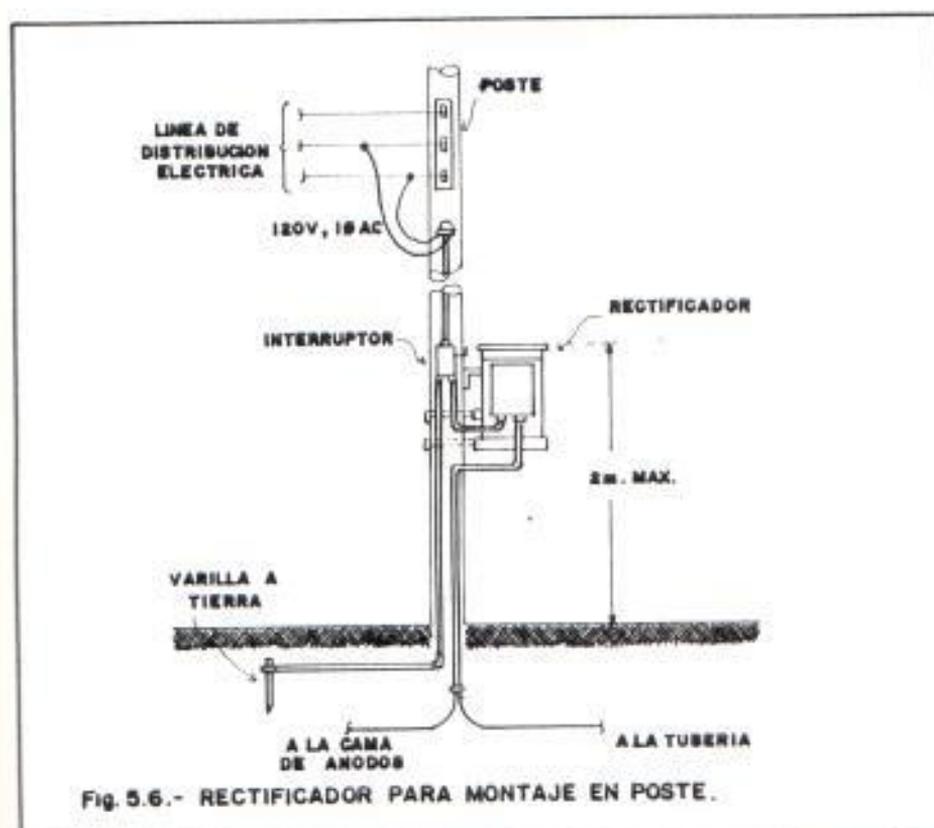
El rango de temperatura dependerá del medio y deberán ser especificado por el fabricante.

10. Construcción del gabinete.

El gabinete deberá ser construido con acero laminado en frío con un espesor no menor al calibre 11. Las entradas para ventilación, en el caso de unidades enfriadas al aire, deberán ser protegidas contra la entrada de insectos dañinos. El tipo de pintura utilizado para el gabinete se determinará en base al medio.

11. Operación.

Los rectificadores deberán ser capaces de una operación continua a 15 % de sobrecarga.



Cuando las unidades estandar no satisfacen los requerimientos de un proyecto específico, es necesario detallar las especificaciones adicionales necesarias. Estas pueden incluir la provisión de un filtro en la salida para el mejoramiento de la eficiencia, terminales negativos adicionales (cuando la corriente va a ser drenada a más de una tubería), para-rrayos u otros equipos especiales de protección, acabado especial en la construcción y/o en el diseño del gabinete, etc.

b. Anodos inertes.

Los Anodos que se utilizan en un sistema de Protección catódica por corriente impresa, difieren fundamentalmente de los utilizados en los sistemas galvánicos por el hecho de ser inertes, es decir que en contacto con el suelo se comportan químicamente inactivos.

Los Anodos inertes están contruidos de materiales altamente resistentes a la corrosión, presentando de esta manera un pequeño desgaste en función de la corriente liberada hacia el suelo, traduciéndose esto en una vida más prolongada del sistema. A continuación se presenta una

lista de los materiales más utilizados en la fabricación de ánodos inertes:

- Grafito.- Los ánodos de grafito son ampliamente utilizados en los sistemas por corriente impresa. Entre sus propiedades principales podemos citar que son químicamente resistentes y buenos conductores de la electricidad. Se consumen lentamente, dependiendo de las características del medio ambiente y de la densidad de corriente aplicada, teniendo una velocidad promedio de desgaste que varía entre 0,1 a 1 Kg/A-año, cuando se utilizan de acuerdo a las densidades de corrientes recomendadas; sin embargo el consumo de tales ánodos pueden ser reducidos significativamente mediante el uso de un relleno o backfill a base de carbón. Son además quebradizos y por tanto están sujetos a daños mecánicos durante el manipuleo.

Los ánodos de grafito están disponibles en varillas de varias dimensiones y tamaños y son suministrados con un cable debidamente aislado conectado en un extremo de la varilla y sellado con la finalidad que la humedad del medio ambiente no pueda estar en contacto con

el metal base. Además, resulta una práctica usual el impregnar los ánodos de grafito con aceite de linaza o alguna resina sintética con la finalidad de reducir su porosidad y de esta manera inhibir la evolución de gases y de dióxido de carbono en su superficie que podrían causar una falla temprana en su operación.

A continuación se presentan datos sobre las dimensiones geométricas y de las densidades de corriente recomendadas para los ánodos de grafito, los cuales son mostrados en la Tabla XXV.

TABLA XXV
Dimensiones geométricas y densidades de corriente recomendadas para ánodos de grafito.

Tamaño del ánodo (pulgadas)	Máxima densidad de corriente (A/m ²)		Corriente total permitida (A)	
	En agua dulce	En suelo con relleno	En agua dulce	En suelo con relleno
2 x/8 x 80	2,7	10,8	1,0	4,0
3 x 60	2,7	10,8	1,0	4,0
4 x 80	2,7	10,8	1,8	7,0
6 x 48	2,7	10,8	1,6	6,3
6 x 72	2,7	10,8	2,4	9,3

Fuente: MORGAN, J.H., Cathodic Protection, The Macmillan Company, 1960.

Los Ánodos de grafito pueden ser utilizados tanto en el suelo como en el agua, sin embargo su mayor aplicación es en la Protección catódica de instalaciones enterradas, esto se debe a que admiten una baja densidad de corriente.

- Hierro con alto contenido de silicio.- Este tipo de ánodo posee una alta resistencia química a la gran variedad de medios corrosivos y además buenas propiedades eléctricas, razón por la cual es el más utilizado en la actualidad. Ha sido probado por el comité T2-B de la NADE por varios años con resultados muy favorables. En lo que se refiere a sus propiedades mecánicas, tiene la desventaja de ser quebradizo e incapaz de resistir choques térmicos y mecánicos aunque es menos susceptible a romperse que los ánodos de grafito.

El ánodo de hierro con alto contenido de silicio fue desarrollado por The Duriron Company Inc. la cual es dueña de la marca registrada de los ánodos Duriron y cuya composición química es: 14,35 % de Si, 0,85 % de C, 0,65 % de Mn y 84,15 % de Fe.

La velocidad de desgaste de estos ánodos es

muy baja variando entre 0,1 a 0,5 Kg/A·año, si son utilizados de acuerdo a las densidades de corriente recomendadas por los fabricantes. De la misma manera que para los ánodos de grafito, su desgaste se reduce considerablemente si son utilizados con un relleno a base de carbón.

Los ánodos Duriron están disponibles en el mercado en forma de varillas, cuyas dimensiones típicas y sus principales aplicaciones se muestran en la Tabla XXVI.

TABLA XXVI
Dimensiones y aplicaciones típicas de los ánodos Duriron

Dimensiones (pulgadas)	Peso (lb)	Aplicación
1 x 60	14	Agua dulce
1 1/2 x 60	25	En suelos o en agua dulce
2 x 60	46	En suelos
3 x 60	115	En agua de mar

Fuente: GUERRERO, M., BAEUROS, H. y GUERRA, J., Protección catódica, Instituto Mexicano.

Son ideales para aplicaciones en agua dulce cuya temperatura no exceda a los 38 °C, y para suelos en donde no exista la presencia de iones cloruro. En medios donde los iones

cloruro estén presentes, es necesario adicionar un 4,5 % de Cromo a la aleación original con el fin de suministrarle un buen rendimiento bajo las condiciones anteriores.

- Plomo-Antimonio-Plata.- Este tipo de ánodos son utilizados específicamente para aplicaciones en agua de mar, debido a que admiten la liberación de elevadas densidades de corriente, mucho mayor que en los ánodos de Hierro-Silicio-Cromo.

En una aleación compuesta químicamente de 93 % de Pb, 6 % de Sb y 1% de Ag lo cual le da entre sus características principales un bajo riesgo de pasivación y así mismo una baja velocidad de consumo.

Entre sus características mecánicas se puede citar que es un material maleable y dúctil lo cual le permite ser maquinado con mucha facilidad. Debido a que el plomo tiene un punto de fusión muy bajo, su fundición se realiza sin ningún problema y su costo de fabricación es relativamente bajo.

Tiene un rango típico de operación, en lo que

se refiere a la densidad de corriente permitida, que es de 54 a 270 A/m² con un promedio de desgaste de 0,045 a 0,082 Kg/A·año.

- Titanio platinizado.- Son ánodos cuya aplicación en el campo de la Protección catódica ha sido recientemente desarrollada. Entre sus características principales se encuentra su muy bajo consumo (del orden de 8,63 mg/A·año), lo cual le da la propiedad de no deteriorarse con el tiempo por lo que son recomendables para instalaciones permanentes. Además permiten una alta densidad de corriente, en el rango de 540 hasta 5.400 A/m², lo cual determina que deba ser aplicado específicamente en instalaciones inmersas, ya sea en agua de mar o en agua dulce.

La gran densidad de corriente desarrollada en la superficie del ánodo de titanio-platinizado puede llegar a producir la evolución de oxígeno, convirtiéndose de esta manera en un factor potencialmente explosivo para ciertas instalaciones por lo que su utilización es restringida.

Tales ánodos son encontrados generalmente en

forma de varillas de titanio con una capa fina de platino de 2,5 μm de espesor, electrodepositado sobre ella. En lo que se refiere a sus dimensiones geométricas, los ánodos de titanio pueden ser encontrados comercialmente con diámetros desde los 6 hasta los 18 mm y con longitudes desde 150 hasta 450 mm.

- Chatarras de hierro y de acero.- Estos materiales también pueden ser utilizados como ánodos, teniendo la ventaja de ser de bajo costo y de fácil obtención aunque presentan como desventaja un elevado desgaste (cerca de 9 Kg/A-año) y una baja densidad de corriente permitida (5,4 A/m²), por lo que si una considerable cantidad de corriente es requerida, se deberá utilizar una gran cantidad de material; razón por la cual, su utilización se reduce al caso de que se requiera una Protección catódica temporal.

El procedimiento común no es el de enterrar chatarra para que sirva de ánodo, sino el de aprovechar las estructuras metálicas abandonadas tales como tuberías, estacas, pilares, etc. Sin embargo, resulta esencial, en el caso de que se utilice la chatarra, el reali-

zar múltiples conexiones a la misma con el fin de garantizar la continuidad eléctrica ya que una corrosión preferencial puede tomar lugar en el punto de contacto del cable con la chatarra, lo cual puede desconectarlos del sistema.

La práctica de utilizar chatarra de hierro o de acero como ánodos inertes presenta un serio inconveniente, ya que el desgaste y la acumulación de productos de corrosión a su alrededor modifica continuamente la resistencia del circuito exigiendo de esta manera constantes correcciones en la salida de los rectificadores.

c. Relleno (Backfill).

El material clásico utilizado como relleno para cubrir los ánodos de carbón, grafito y de hierro-silicio instalados bajo tierra, es el coque metalúrgico en gránulos.

Las especificaciones sobre la granulometría del coque ha utilizar, es de importancia fundamental para el proyecto, por lo que deberá ser procurado obtener un coque finamente dividido de tal

manera que permita asegurar una gran superficie de contacto con el ánodo, así como posibilitar una buena compactación, evitando de esta manera la posibilidad de vacíos. Se ha obtenido excelentes resultados con una granulometría en torno de 10 mm de diámetro, aunque proyectistas europeos prefieren 3mm.

La importancia de lograr obtener un "relleno" bien compactado alrededor del ánodo, radica en que en este caso, el ánodo y "relleno" funcionarán como si fuesen un ánodo de dimensiones externas equivalentes al del "relleno", logrando de esta manera una sensible reducción de la resistencia ánodo-suelo. Además de eso, el tiempo de vida útil del ánodo se incrementa significativamente, puesto que el desgaste se producirá en su mayor parte en el "relleno" de coque y no solamente en el ánodo propiamente dicho.

En la Tabla XXVII se presentan las especificaciones típicas más importantes que debe cumplir un buen "relleno" de coque.

TABLA XXVII
Especificaciones típicas de un "relleno" de coque

Granulometrias:	
Para pasar por un cedazo con orificios de 15 mm	100 %
Para pasar por un cedazo con orificios de 10 mm	85 % máx.
Para pasar por un cedazo con orificios de 5 mm	15 % máx.
Materiales volátiles	
Carbón fijo	3,25 % máx.
Cenizas	78 % mín.
Azufre	19 % máx.
Resistividad eléctrica (Ω·cm)	1,2 % máx.
Densidad (Kg/m ³)	55 máx.
Consumo (Kg/A-año)	650 a 800
	0,25 a 1

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

En suelos de resistividad elevada, es una práctica común adicionar una solución salina en el coque, normalmente sulfato de sodio, aunque también se admite cloruro de sodio. En cambio, para el caso de suelos de resistividad bastante elevada o extremadamente secos, se utiliza el recurso de envolver el coque con una mezcla de yeso (25 %) y bentonita (75 %). Las dimensiones externas de la columna de relleno varía, en general, de 1 a 2 m de diámetro. A esa mezcla se le puede opcionalmente agregar una solución de sulfato de sodio con el fin de mejorar la conductividad eléctrica del medio.

La operación anteriormente descrita se conoce con el nombre de tratamiento del suelo, siendo

común obtener con la misma, una reducción del 15 al 35 % sobre la resistencia de los ánodos calculada para un suelo sin tratamiento.

d. Cables.

En los sistemas de Protección catódica por corriente impresa, las características que normalmente definen el tipo de cables a utilizar son:

- Capacidad de corriente:

En virtud de los grandes requerimientos de corriente exigidos por un sistema de protección catódica por corriente impresa, se requiere el empleo de conductores de cobre de gran calibre, generalmente en el rango desde el Nº 6 hasta el Nº 4/0 AWG, los cuales satisfacen la apropiada conducción de la corriente; presentando además una muy baja resistencia eléctrica, por lo que la resistencia del cable constituye sólo una pequeña parte de la resistencia total del circuito.

- Aislamiento:

En los sistemas de Protección catódica por corriente impresa, la importancia del aislamiento de los cables es mucho mayor que en los sistemas galvánicos. Esta afirmación es de mayor valía para el cable que sale del polo positivo del rectificador y que se conecta a la cama de ánodos, puesto que cualquier defecto en el aislamiento permitirá un contacto directo del cable con el electrolito, estableciéndose un punto de salida de corriente en el lugar del defecto, con el consecuente desarrollo de un proceso intenso de corrosión del cable el cual, en un corto intervalo de tiempo, ocasionaría una falla del sistema debido al corte en la conducción de la corriente. Es interesante observar que en el cable que sale del polo negativo del rectificador (así como en los cables de los sistemas galvánicos) los problemas no son tan críticos, ya que en éstos, la tendencia de los cables es el de ser protegidos catódicamente en casos de ruptura del revestimiento.

Para la selección del revestimiento de los cables es extremadamente importante considerar

sus características de resistencia química y mecánica, de tal manera que pueda soportar las más adversas condiciones de trabajo, por lo que el revestimiento de los cables debe de ser de alta calidad, del tipo RHW (aislamiento de caucho resistente al calor y la humedad) y con un nivel mínimo de aislamiento para 1.000 V.

e. Conectores.

Las especificaciones sobre los métodos de ejecución y los cuidados que deben ser tomados al realizar las conexiones eléctricas, en los sistemas por corriente impresa, son las mismas que las explicadas en el numeral 4.3 literal d; poniéndose especial énfasis al empleo de conexiones soldadas con el fin de garantizar la continuidad eléctrica del circuito, así como al uso de cintas aislantes o resina epoxi para la protección de dichas conexiones.

f. Juntas aislantes.

Son dispositivos usados en las tuberías con la finalidad de aislar eléctricamente dos trechos de la misma. Con su aplicación se puede conseguir:

- Aislar eléctricamente una estructura protegida de otra no protegida, evitando de esta manera que la corriente de protección escape hacia otras estructuras que no se desea proteger.
- Dividir una estructura a proteger en trechos aislados, logrando con ello tratar cada trecho independientemente del otro. En ciertas circunstancias tal procedimiento facilita la protección de la estructura.

g. Cajas de conexión.

Las cajas de conexión tienen entre sus objetivos principales los siguientes:

- Conectar o desconectar dos estructuras que son protegidas por el mismo sistema de corriente impresa.
- Medir la corriente que circula por el circuito y los potenciales de protección.
- Introducir una resistencia en serie en el circuito con la finalidad de reducir la corriente inyectada por el rectificador.

- Permitir la conexión de pequeños equipos de protección, tales como: diodos, resistores, pararrayos, etc.

Como ejemplos típicos de aplicación, citamos los siguientes locales donde normalmente se instalan tales cajas:

- Próximo a juntas aislantes y;
- En los cruces o aproximación con tuberías vecinas.

La elección de dichos lugares se debe al hecho de que son los puntos más críticos en cuanto a la operación del sistema y por tanto es necesario un continuo chequeo de los datos de protección en dichos locales.

h. Resistores.

Las aplicaciones típicas de los resistores en sistemas por corriente impresa son:

- En la conexión de estructuras vecinas con la estructura a proteger. Dicha conexión puede ser justificable en el caso de que exista una

interferencia catódica entre las dos estructuras; pero la unión directa entre ambas podría acarrear una gran pérdida de corriente hacia la estructura vecina, con la consecuente caída de potencial de la estructura a proteger y por ende del nivel de protección. Se introduce entonces, en esa unión, una resistencia de valor tal, que la estructura a proteger alcance el punto ideal de protección.

- Para el balanceamiento de la corriente inyectada por más de una cama de ánodos que se encuentren trabajando con un sólo rectificador.

Los resistores utilizados para tales fines pueden ser de resistencia constante o variable (reóstatos). Además, en su dimensionamiento debe ser especificados los valores de resistencia, potencia y corriente.

i. Materiales diversos.

Además de los elementos descritos anteriormente, son frecuentemente utilizados en los sistemas por corriente impresa, los siguientes materiales:

- Soldadura "Cadweld", utilizada para soldar los cables eléctricos a la estructura de acero.
- Placas de asbesto, para aislar las tuberías de sus soportes.
- Electroductos, utilizados siempre que las condiciones ambientales y de seguridad lo exijan.

5.4. DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS POR CORRIENTE IMPRESA

De la misma forma que para el caso de sistemas galvánicos, la metodología empleada para el dimensionamiento de un sistema de Protección catódica por corriente impresa es bastante simple, siendo la secuencia de pasos a seguir la siguiente:

1. Determinación de la resistividad del suelo a lo largo de la trayectoria de la tubería.

(Ver numeral 2.2.3).

2. Determinación de los requerimientos de corriente de protección.

La determinación de la corriente de protección

es independiente del tipo de sistema de Protección catódica que se va a utilizar, por lo que se emplean las mismas consideraciones estudiadas en el numeral 4.4.

3. Selección de la capacidad de corriente del rectificador.

La corriente nominal del rectificador deberá ser mayor que la corriente de protección determinada en el paso "2". Esta consideración se basa en la necesidad de contar con un factor de seguridad el cual permita cubrir el incremento de corriente exigido, através del tiempo, debido a la deterioración del revestimiento de la tubería y del consumo de los ánodos; así como también para cubrir probables ampliaciones del sistema a proteger. Por lo general se recomienda un factor de seguridad del 15 al 25 %, el cual dará una corriente que deberá ser coordinada con las corrientes nominales estandar producidas por los fabricantes de rectificadores.

4. Seleccionar la localización más adecuada para la cama de ánodos.

Las principales características que debe presen-

tar el lugar donde va a ser instalada la cama de ánodos son:

- a. Suelos de baja hasta media resistividad.
- b. Disponibilidad de suministro de energía eléctrica.
- c. Puntos donde los problemas de interferencia catódica sean mínimos.
- d. Fácil acceso para las inspecciones y mantenimiento.

5. Selección del tipo de ánodo inerte.

La selección del tipo de ánodo inerte más adecuado, depende principalmente del medio en donde va a ser instalada la tubería, así como de la densidad de corriente que deberá liberar cada ánodo. En base a estas consideraciones, en la Tabla XXVIII se presentan las propiedades más importantes y las aplicaciones típicas de los ánodos inertes de acuerdo al medio en donde deben ser instalados, lo cual servirá como una guía para su apropiada elección.

TABLA XVIII
Propiedades más importantes y aplicaciones típicas de los ánodos inertes

Material del ánodo	Densidad de corriente recomendada (A/m ²)	Desgaste esperado "D" (Kg/A-año)	Densidad (g/cm ³)	Aplicaciones generales
Grafito	3 a 10	0,4	1,6	En suelos con backfill En agua dulce En agua de mar
Hierro-Silicio	10 a 60	0,2	7,0	Directamente en el suelo En suelos con backfill En agua dulce
Hierro-Silicio Cromo	10 a 60	0,4	7,0	Directamente en el suelo En suelos con backfill En agua de mar
Plomo-Antimonio Plata	54 a 270	0,1	10,9	En agua de mar
Titanio platinizado	540 a 5.400	0,01	4,5	En agua dulce En agua de mar

Fuente: UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1980.

Además de la selección del material del ánodo inerte, es necesario estimar sus características dimensionales y su masa, de tal manera que se obtenga un periodo de vida útil de acuerdo a lo proyectado. Los catálogos de los fabricantes dan las características dimensionales de los ánodos inertes de uso normal y sirven de gran ayuda en el momento de la selección del tipo de ánodo más adecuado.

6. Determinación de la masa total de los Ánodos.

La masa total de los Ánodos puede ser determinada mediante la ecuación:

$$M = \frac{D V I}{0,85} \quad (5-1)$$

Donde:

M = Masa total de los ánodos (Kg).

D = Desgaste esperado del ánodo (Kg/A·año).
Tabla XXVIII.

V = Tiempo de vida útil de la cama de ánodos (años).

I = Corriente inyectada por el rectificador(A)
0,85- Factor de utilización.

7. Cálculo del número de Ánodos.

Una vez determinada la masa total de los ánodos, y conociendo de antemano las características físicas del ánodo a ser utilizado y por lo tanto su masa, se procede al cálculo del número de Ánodos el cual puede ser obtenido en forma sencilla mediante la expresión:

$$N = \frac{M}{m} \quad (5-2)$$

Donde:

M = Masa total de los ánodos (Kg).

m = Masa de cada ánodo (Kg).

El número de ánodos así obtenido, es el mínimo para garantizar la vida del sistema durante el tiempo "V" proyectado.

Establecido el número de ánodos, se deberá verificar que la densidad de corriente por ánodo esté dentro de los límites recomendados para cada material, el cual está expresado en la Tabla XXVIII. En el caso de no cumplirse esta condición, se procederá a incrementar el número de ánodos hasta satisfacerla.

B. Distribución y arreglo de los ánodos.

Al igual que para los sistemas galvánicos, la distribución y el arreglo de los ánodos inertes deben ser realizadas de tal forma que la corriente inyectada por el rectificador se distribuya uniformemente a lo largo de la estructura, de tal manera que todos los ánodos atiendan áreas iguales de la misma.

El arreglo de los ánodos, no sólo involucra el

posicionamiento de los mismos en relación a la estructura, sino también a seleccionar su disposición más adecuada, sea ésta vertical u horizontal; y a determinar el espaciamiento entre ellos. En este paso del diseño, la experiencia del proyectista juega un papel fundamental.

La Fig. 5.8 muestra algunos ejemplos sobre arreglos de camas de ánodos en sistemas por corriente impresa para la protección catódica de tuberías.

En lo que se refiere al posicionamiento de los ánodos, es muy común en la práctica el uso de ánodos instalados en posición vertical; si embargo puede llegar a ser necesaria la utilización de una disposición horizontal de los mismos, debido a la presencia de condiciones desfavorables del suelo en aquellas profundidades alcanzadas por los ánodos instalados en posición vertical.

9. Calcular la resistencia teórica del circuito.

La resistencia teórica total del circuito es obtenida mediante la siguiente expresión:

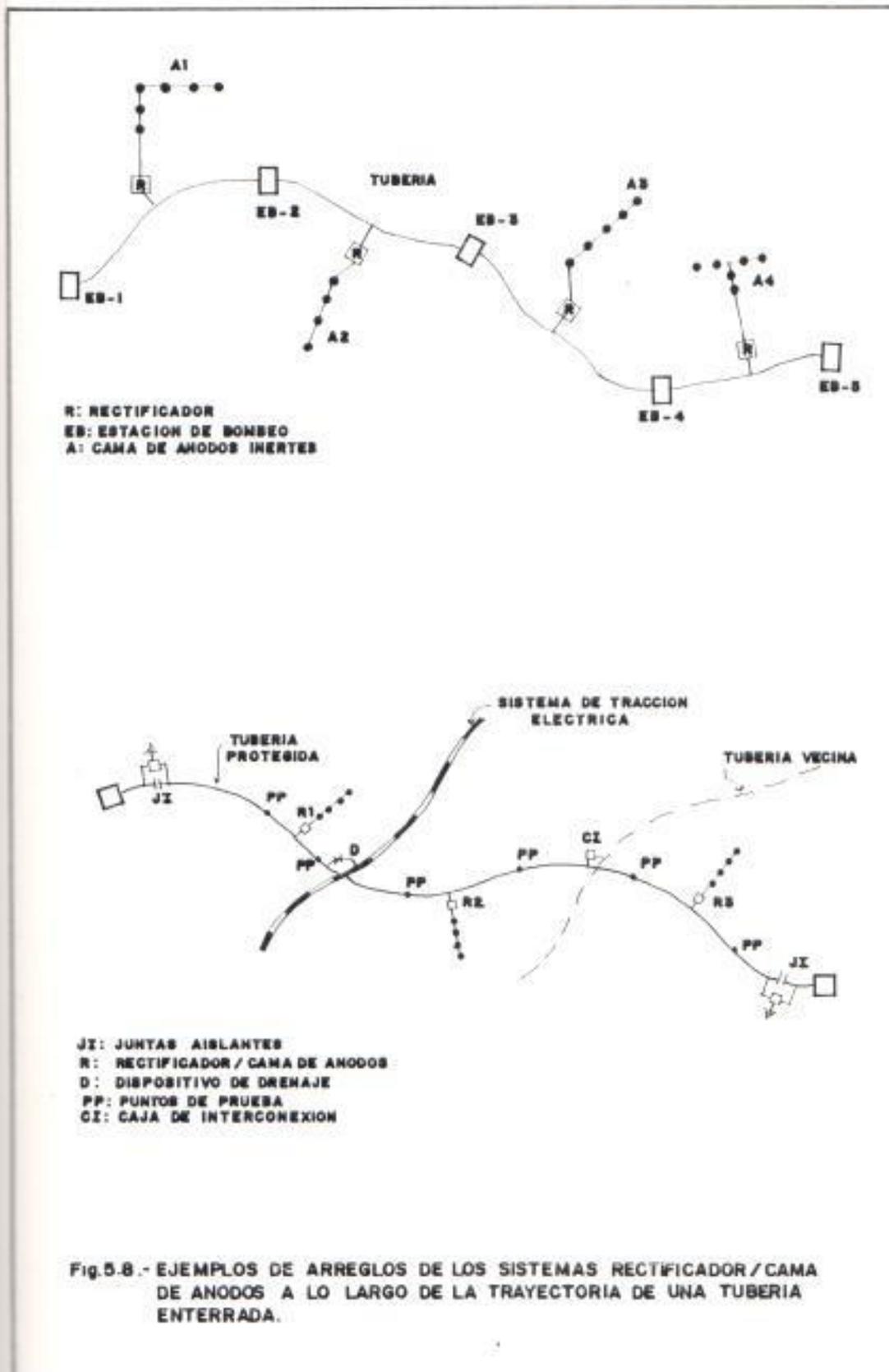


Fig.5.8.- EJEMPLOS DE ARREGLOS DE LOS SISTEMAS RECTIFICADOR /CAMA DE ANODOS A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA DE UNA TUBERIA ENTERRADA.

$$R = R_a + R_{ca} + R_c + R_l \quad (5-3)$$

Donde:

R = Resistencia total del circuito (Ω).

R_a = Resistencia de la cama de ánodos (Ω).

R_{ca} = Resistencia de los cables (Ω).

R_c = Resistencia de contacto entre la tubería y el suelo que la rodea (Ω).

R_l = Resistencia longitudinal de la tubería (Ω).

Es importante anotar que en la ecuación anterior, no se ha incluido la resistencia del electrolito, debido a que su valor es tan pequeño que no influye significativamente en los resultados finales.

Analizando cada término de la ecuación, se establece que:

- R_a es la resistencia de la cama de ánodos y está constituida por la resistencia a tierra del grupo de ánodos mas su resistencia interna. La resistencia a tierra del grupo de ánodos es obtenida mediante la aplicación de las fórmulas (4-4) y (4-5), según la posición de los ánodos en la instalación, o inclusive utilizando los gráficos de diseño cuya elabo-

ración fue explicada en el numeral 4.4. En lo que se refiere a la resistencia interna del grupo de ánodos, ésta se la calcula dividiendo la resistencia interna de un sólo ánodo para el número de ánodos en paralelo que conforman la instalación, de igual manera que para el caso de sistemas galvánicos.

Las Figs. 5.9 y 5.10 muestran gráficos típicos de diseño para cama de ánodos en posición vertical y en posición horizontal respectivamente.

La obtención del gráfico de diseño para una cama de ánodos inertes en posición horizontal (Fig. 5.10) se consigue aplicando las mismas consideraciones estudiadas en el numeral 4.4.

- R_{ca} está constituida por la suma de las resistencias de los cables que forman el sistema, es decir: la resistencia del cable que va desde el rectificador a la cama de ánodos mas la resistencia del cable que va desde el rectificador a la tubería.

La resistencia del cable que va desde el rectificador a la tubería se la calcula sim-

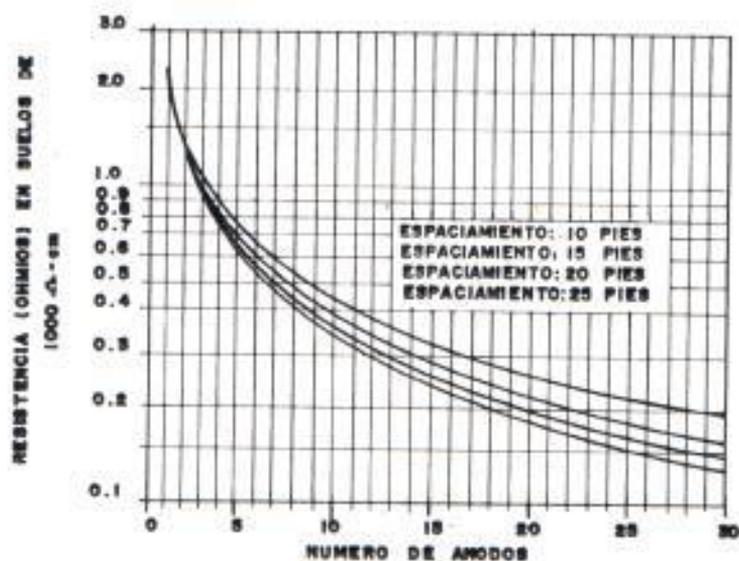


Fig. 5.9.- GRAFICO DE DISEÑO PARA UNA CAMA DE ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA INSTALADOS EN POSICION VERTICAL.

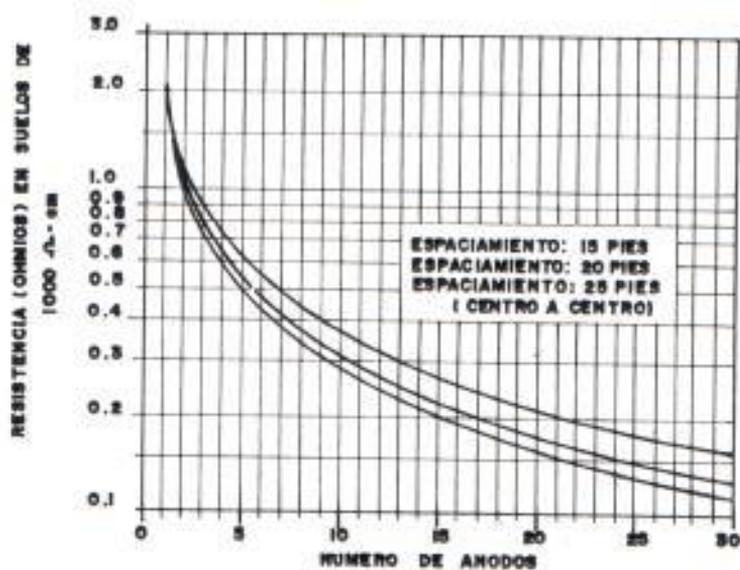


Fig. 5.10.- GRAFICO DE DISEÑO PARA UNA CAMA DE ANODOS DE CORRIENTE IMPRESA INSTALADOS EN POSICION HORIZONTAL.

plemente multiplicando la longitud del cable por la resistencia longitudinal del mismo. Para este cálculo, es una práctica muy común el considerar un incremento del 10% en la longitud real del cable con el fin de dar un factor de seguridad para que el cable no quede demasiado tenso.

En lo que se refiere al cálculo de la resistencia del cable que va desde el rectificador a la cama de ánodos, hay que considerar que no toda la corriente de protección fluye por la totalidad de la longitud de la cama de ánodos (Ver Fig. 5.11), por lo que dicha resistencia puede ser determinada aplicando la siguiente expresión:

$$R_{r-a} = R_L(D_{ca} + D_a[(N-1) - (1/N)(1+2+3+4\dots N-1)]) \quad (5-4)$$

Donde:

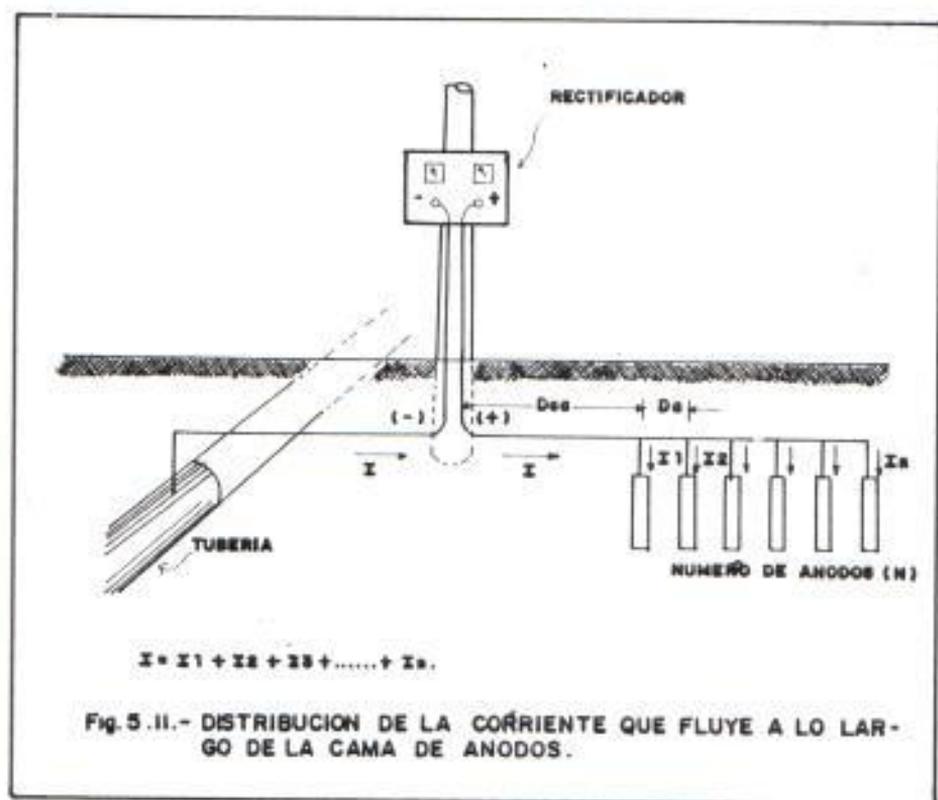
R_{r-a} = Resistencia del cable que va desde el rectificador a la cama de ánodos (Ω).

R_L = Resistencia longitudinal del cable (Ω/m)

D_{ca} = Distancia desde el rectificador al primer ánodo (m).

D_a = Distancia entre ánodos (m).

N = Número de ánodos.



La resistencia longitudinal de los cables son obtenidas a partir de tablas proporcionadas por los fabricantes. Como ejemplo, en la Tabla XXIX se proporcionan datos de la resistencia longitudinal de conductores de cobre de calibres comunmente empleados en trabajos de sistemas de Protección catódica por corriente impresa.

TABLA XXIX
Resistencia eléctrica de los conductores de cobre comunmente empleados en sistemas por corriente impresa

Uso general	Calibre (AWG)	Corriente máxima (A)	Resistencia (Ω/Km)
Instalaciones de cama de ánodos inertes	4/0	230	0,1670
	3/0	200	0,2106
	2/0	175	0,2661
	1/0	150	0,3347
	1	130	0,4232
	2	115	0,5315
Puntos de prueba	4	85	0,8498
	6	65	1,3452
	12	20	5,4137
Cables de prueba de los instrumentos	14	15	8,5962
	16	8	13,7146
	18	6	21,8515
	20	5	34,7786
	22	3	55,7770

Fuente: PEABODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, Texas, 1967

- La resistencia de contacto entre la tubería y el suelo que la rodea (R_c), depende de la calidad del revestimiento; de tal manera que a

mejor revestimiento, mayor será dicha resistencia. Su valor puede ser determinado mediante la aplicación de la fórmula (4-8) analizada en la sección 4.4.

- La resistencia longitudinal de la tubería (R_1), se la determina multiplicando la resistencia por unidad de longitud de dicha tubería, la cual es obtenida de la Tabla XI, por la longitud del tramo de tubería que está siendo protegida.

10. Selección de las características eléctricas del rectificador.

El tamaño del rectificador (características eléctricas nominales de salida) se lo especifica de acuerdo a los requerimientos de corriente del sistema y a la salida de voltaje requerido para forzar dicha corriente hacia la tubería, venciendo la resistencia del circuito.

En la determinación del voltaje del rectificador debe ser considerada las siguientes caídas de voltaje:

- Caída de voltaje causada por la resistencia de la cama de ánodos.
- Caída de voltaje causada por la resistencia del cable que une al rectificador con la tubería y del cable que va desde el rectificador a lo largo de los ánodos que comprenden la cama de ánodos.
- Caída de voltaje causada por la resistencia a tierra de la tubería en la localización de la cama de ánodos.
- Voltaje reverso de polarización entre la cama de ánodos y la tubería. Este voltaje es el que existe entre los ánodos y la estructura, en oposición al voltaje aplicado y que para el caso de camas de ánodos de grafito o de hierro-silicio, su valor ha sido establecido en 2 V.

Por lo tanto, el voltaje mínimo de salida del rectificador se lo puede determinar mediante la aplicación de la Ley de Ohm, estableciéndose la siguiente expresión:

$$V = IR + V_p \quad (5-5)$$

Donde:

V = Voltaje mínimo de salida del rectificador
(V).

I = Corriente inyectada por el rectificador (A)

R = Resistencia total del circuito (R).

V_r = Voltaje reverso de polarización = 2 V.

El voltaje de salida nominal del rectificador deberá ser mayor que el voltaje mínimo necesario para forzar la corriente nominal a través de la resistencia del circuito. Esto es deseable ya que permitirá mantener un adecuado flujo de corriente aún cuando la resistencia de la cama de ánodos se incremente debido a la deterioración de los ánodos con el tiempo. Generalmente se recomienda un factor de seguridad del 15 al 25 %, el cual dará un voltaje que deberá ser coordinado con los voltajes estandar producidos por los fabricantes de rectificadores.

CAPITULO VI

LIMITACIONES DEL USO DE LA PROTECCION CATODICA

6.1. FUENTES DE CORRIENTES PARASITAS

Tal como se estudió en el numeral 1.3.1, la presencia de corrientes parásitas en la vecindad de una estructura metálica dará lugar al desarrollo de un proceso de corrosión electrolítica acentuada, causando severos daños a la estructura metálica en consideración. Por tal motivo, resulta de vital importancia la identificación de las principales fuentes de corrientes parásitas, con la finalidad de tomar todas las precauciones posibles en el caso de su presencia, y evitar así que dichas corrientes puedan causar daños importantes a la estructura.

Las principales fuentes de corrientes de parásitas son:

- a. Los sistemas de transmisión de corriente continua.

- b. Los sistemas de tracción eléctrica.
- c. Las soldadoras eléctricas.
- d. Las corrientes telúricas.
- e. Los sistemas de Protección catódica.

A continuación se hará una breve descripción de cada una de estas fuentes de corrientes parásitas así como las medidas correctivas más aconsejables.

a. Sistemas de transmisión de corriente continua.

Aunque en la actualidad, la mayoría de las líneas de transmisión eléctrica son de corriente alterna, sin embargo estudios realizados han determinado que resulta más económico la utilización de sistemas de transmisión de corriente continua cuando se requiere transportar grandes cantidades de energía eléctrica através de muy largas distancias. Si bien es cierto que en nuestro país su utilización no es práctica, sin embargo el conocimiento sobre su efecto en estructuras metálicas enterradas es de mucha importancia para el ingeniero que va a trabajar en diseños de sistemas de Protección catódica, por lo que amerita un breve estudio del mismo.

En la Fig. 6.1 se ilustra un esquema básico de un sistema de transmisión eléctrica de corriente continua. Cuando tal sistema es puesto en operación, la corriente total de carga fluye a través de la línea de transmisión aérea y entra a la tierra desde el electrodo positivo viajando por el suelo hasta llegar al electrodo negativo, cerrándose de esta manera el circuito. La conducción de la corriente continua a través de la tierra es un fenómeno electrolítico, caracterizado por la presencia de campos eléctricos que rodean cada uno de los dos electrodos y cuya intensidad es directamente proporcional a la corriente de carga del sistema. Cuando los electrodos están espaciados varios cientos de kilómetros, el campo eléctrico estará formado por líneas equipotenciales concéntricas alrededor de cada electrodo; de tal manera que si una tubería pasa a través del campo eléctrico del electrodo positivo del sistema, se puede esperar una captación de corriente por parte de la tubería la cual fluirá a lo largo de la misma para posteriormente ser descargada hacia la tierra en algún punto de la tubería cercano al electrodo negativo del sistema.

Para este caso, la medida correctiva más efec-

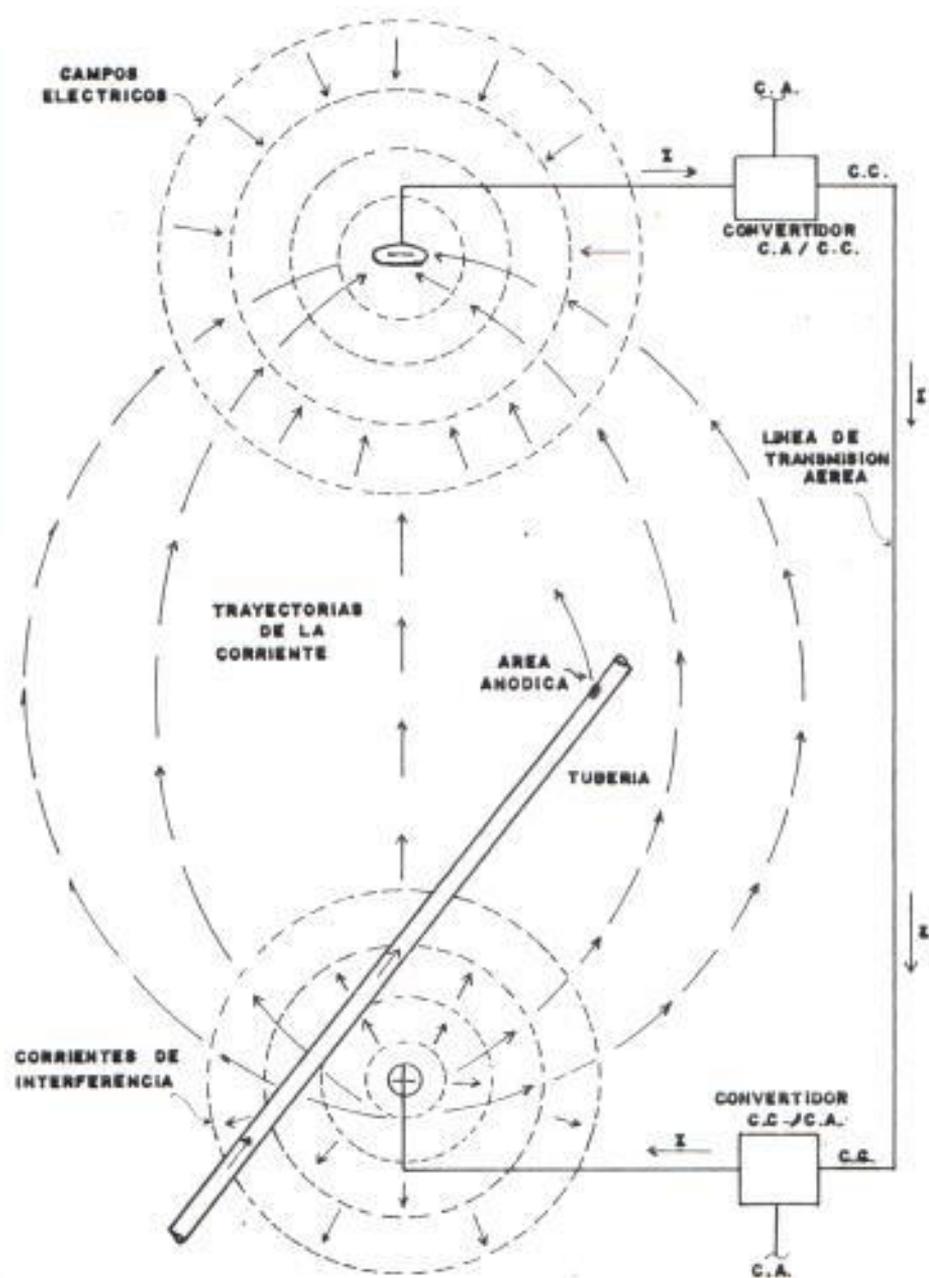


Fig. 6.1.- CORRIENTES DE INTERFERENCIA PROVENIENTES DE UN SISTEMA DE TRANSMISION ELECTRICA DE CORRIENTE CONTINUA.

tiva es la de instalar la tubería lo más lejos posible de la ubicación de los electrodos y diseñar lo mismos para que presenten una resistencia a tierra lo más baja posible con el fin de minimizar la diferencia de potencial entre el electrodo y una tierra remota.

b. Sistemas de tracción eléctrica.

Los problemas de corrosión electrolítica causados por corrientes parásitas o de fuga provenientes de sistemas de tracción eléctrica, son sin lugar a dudas los más frecuentes. Debido a su importancia y a la posibilidad de su aplicación en nuestro país, resulta necesario explicar brevemente los mecanismos de corrosión originados por este tipo de sistemas. Para ello, en la Fig. 6.2 se ilustra un ejemplo de corrientes de fuga provenientes de un sistema de tracción eléctrica en el cual los rieles de acero sirven de retorno para la corriente continua hacia la subestación generadora.

La fuga de corriente se explica fácilmente por los siguientes factores:

1. Las uniones entre los rieles, generalmente

deficientes, constituyen resistencias en serie, dificultando de esta manera el retorno de la corriente por los rieles y;

2. Los rieles reposan sobre durmientes que, al hundirse, permiten que los rieles entren también en contacto con el suelo, esto es, existe un aislamiento deficiente de los rieles con la tierra. En consecuencia, el suelo pasa a constituirse en una resistencia en paralelo asociada con los rieles.

Bajo estas consideraciones, parte de la corriente de retorno abandonará la riel, en algún punto de la misma, y fluirá por la tierra. Si en esa región existe una tubería enterrada y la corriente la alcanza, ésta fluirá preferencialmente por ella, debido a su baja resistencia eléctrica, hasta las proximidades de la subestación generadora en donde se producirá la descarga de la corriente desde la tubería hacia la tierra, fluyendo hacia la barra negativa de la subestación y cerrando de esta manera el circuito.

El proceso de corrosión electrolítica, analizado en este ejemplo, puede ser representado por el

circuito eléctrico mostrado en la Fig. 6.3, en la cual se muestran las áreas anódicas y catódicas, tanto de las rieles como de la tubería. La corrosión de los rieles en el punto A no causa grandes inconvenientes ya que éstos pueden ser fácilmente cambiados, lo cual no es posible hacerlo con la tubería, la cual presentará graves daños por corrosión en el área anódica A'.

Las empresas de transporte eléctrico admiten normalmente pérdidas de corriente entre el 3 al 5 %. Considerando que la demanda de corriente para este tipo de transporte es de 3.000 a 11.000 A, tales valores ocasionan corrientes de fuga elevadas, con los consecuentes grandes daños.

Para combatir la corrosión electrolítica originada por los sistemas de tracción eléctrica, se procede a la instalación de los llamados equipos de drenaje de corriente, los cuales son básicamente uniones eléctricas unidireccionales entre la tubería y la barra negativa de la subestación. Dichas uniones, en su forma más simple, están constituidas de diodos convenientemente protegidos mediante pararrayos y fusibles e instalados en el punto más anódico de la tube-

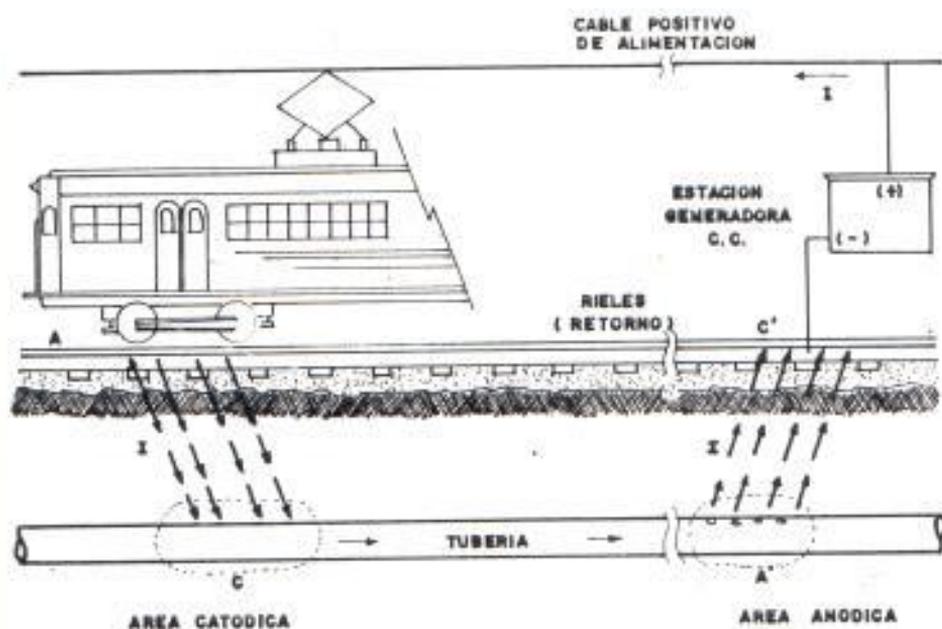


Fig. 6.2.- INTERFERENCIA OCASIONADA POR UN SISTEMA DE TRACCION ELECTRICA SOBRE UNA TUBERIA ENTERRADA.

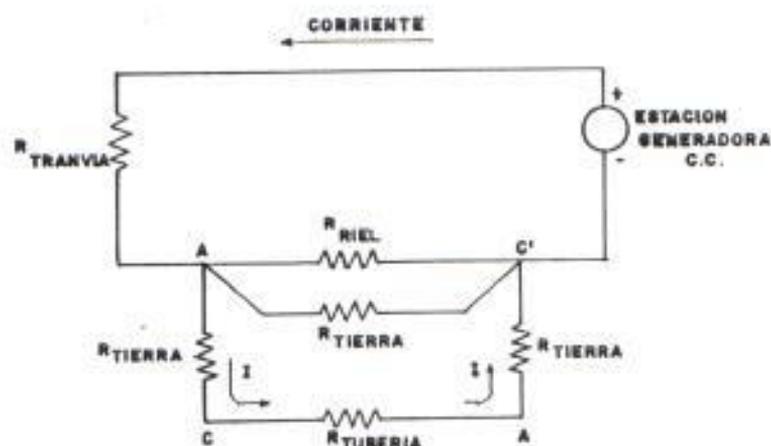


Fig. 6.3.- CIRCUITO ELECTRICO EQUIVALENTE DEL PROCESO DE CORROSION ELECTROLITICA ORIGINADA POR UN SISTEMA DE TRACCION ELECTRICA.

ria, tal como se ilustra en la Fig. 6.4. En el caso de que la subestación se encuentre lejos de la trayectoria de la tubería, se procederá a instalar el equipo de drenaje en las áreas anódicas cercanas al cruce con los rieles.

c. Máquinas soldadoras de corriente continua.

Una máquina soldadora de corriente continua, localizada por ejemplo sobre un muelle con el fin de realizar trabajos de reparación en un navío (Fig. 6.5), podría ocasionar serios daños por corrosión en el casco del mismo debido a que parte de la corriente de retorno se desvía, pasando desde los electrodos de la soldadora hacia el navío y de éste hacia el muelle, a través del agua la cual cierra el circuito, originando así un proceso de corrosión en el casco del navío en el punto en donde la corriente deja el mismo (área anódica) para entrar en el agua. En este caso, para evitar dicha corrosión, es conveniente instalar la máquina de soldar, junto con su alimentación de corriente alterna, en el propio navío puesto que en el caso de que dicha corriente se vaya a tierra, causará menos daño de corrosión electrolítica que el ocasionado por una corriente continua,

A: AMPERIMETRO
 V: VOLTIMETRO
 P/R: PARARRAYOS
 D: DIODO
 F: FUSIBLE
 S: SHUNT

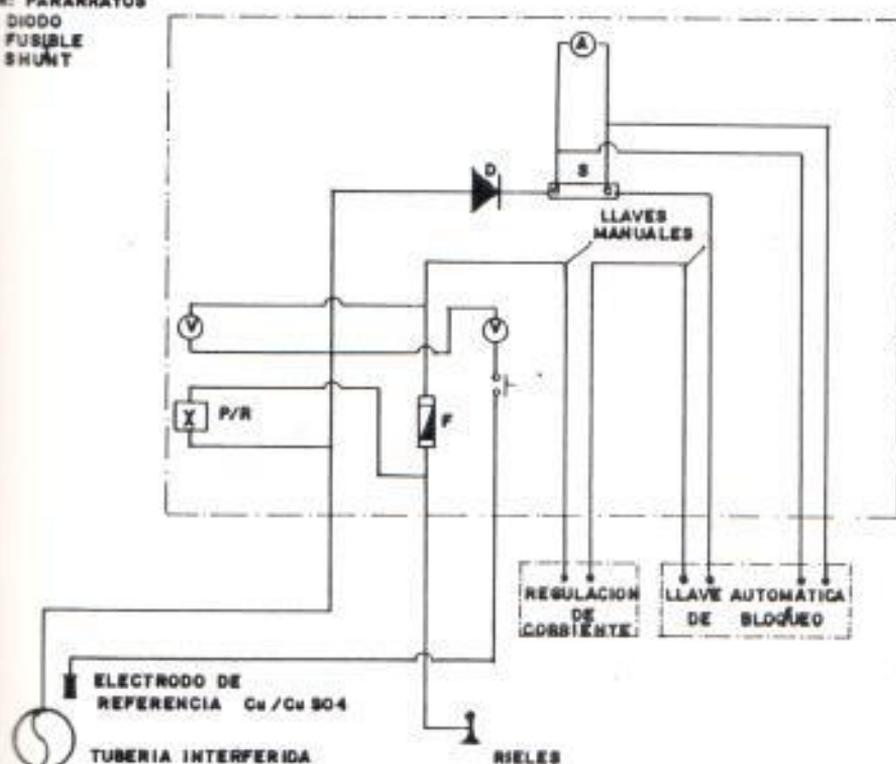


Fig. 6.4.- ESQUEMA ELECTRICO DE UN EQUIPO DE DRENAJE TUBERIA/RIEL CON REGULACION DE CORRIENTE.

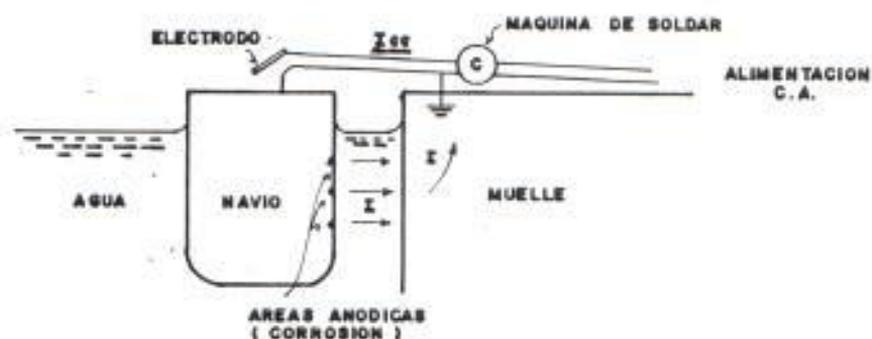


Fig. 6.5.- CORRIENTES DE FUGA OCASIONADAS POR UNA MAQUINA DE SOLDAR DE CORRIENTE CONTINUA.

tal como se explicó en el numeral 1.3.1.

d. Corrientes telúricas.

Ocasionalmente se han encontrado variaciones en el potencial tubería-suelo en áreas donde no existen fuentes de corrientes parásitas creadas por el hombre. Investigaciones realizadas asocian dichos cambios de potenciales con disturbios en el campo magnético de la Tierra causando las llamadas "tormentas magnéticas". Tales disturbios han sido encontrados con mayor frecuencia durante los períodos de mayor actividad en las manchas solares. Las corrientes parásitas originadas a partir de esta fuente son conocidas con el nombre de "corrientes telúricas".

La variación en el potencial de la tubería se explica recordando, que así como en un generador eléctrico el voltaje es generado debido al paso de un conductor aislado a través de un campo magnético, de tal manera que el conductor corte las líneas de fuerza de dicho campo; de igual manera, la variación del campo magnético de la Tierra interceptando la tubería, generará un voltaje en dicha tubería.

Afortunadamente, los efectos de las corrientes telúricas son muy pocas veces de larga duración y las áreas de la tubería afectada no son siempre las mismas, por lo que ninguna medida correctiva es requerida.

e. Sistemas de Protección Catódica.

Cuando un sistema de Protección catódica es aplicado a estructuras metálicas enterradas, la corriente de protección es forzada a fluir por el suelo antes de ser captada por la estructura a proteger. Ante esta situación, puede presentarse el caso de que una parte de la corriente de protección sea interceptada por alguna estructura metálica que haya sido instalada en las cercanías de aquella que está siendo protegida, llegando dicha corriente a causar un proceso de corrosión en la estructura vecina a que nos hemos referido, en aquellos puntos donde se produzca la descarga de corriente hacia la tierra. El fenómeno de intercepción de las corrientes de Protección catódica por parte de estructuras cercanas es conocido con el nombre de "interferencia catódica".

Debido a la gran importancia que representa,

para el diseñador de un sistema de Protección catódica, el conocimiento sobre los efectos perjudiciales de la interferencia catódica, así como el de los métodos más adecuados para su combate; resulta indispensable realizar un estudio más detallado de esta fuente de corrientes parásitas, el mismo que es presentado a continuación en el numeral 6.2.

6.2. FACTORES DE INTERFERENCIA CATODICA

6.2.1. GENERALIDADES

Cuando un sistema de Protección catódica es aplicado a una tubería enterrada, la corriente fluye desde la cama de ánodos, através del suelo, hasta la tubería; creando gradientes de potencial tanto en la vecindad de la cama de ánodos como alrededor de la tubería protegida. Las áreas del suelo donde se establecen los gradientes de potencial se las denomina "zonas de influencia".

Si consideramos a la cama de ánodos como un ánodo puntual en un suelo homogéneo, el campo eléctrico creado por dicha carga puntual establecerá superficies equipotenciales

esféricas, que tornan positivo al suelo con respecto a una tierra remota. Si una estructura metálica, como en el caso de una tubería, atravieza este campo eléctrico, lo hará cruzando varias líneas equipotenciales y por ende se establecerán gradientes de potencial que causarán flujos de corriente sobre la tubería. La dirección del flujo de la corriente sobre dicha tubería será desde el punto más cercano a la ubicación de la cama de ánodos, en ambas direcciones, hacia las líneas equipotenciales externas de la zona de influencia, tal como se indica en la Fig.6.6.

Al igual que para el caso de la cama de ánodos, alrededor de la tubería protegida catódicamente se establece también una zona de influencia debido a la presencia de gradientes de potencial. Estos gradientes son causados por la corriente de protección que fluye sobre la tubería proveniente de la cama de ánodos del sistema de Protección catódica. Es importante anotar que los gradientes de potencial existentes alrededor de la tubería protegida son de polaridad inversa que los existentes alrededor de la

cama de ánodos; es decir que el suelo en las cercanías de la tubería es negativo con respecto a una tierra remota, tal como se muestra en la Fig. 6.7.

La intensidad del área de influencia alrededor de la tubería protegida es directamente proporcional a la densidad de corriente que fluye hacia la misma.

6.2.2. CASOS DE INTERFERENCIA CATODICA EN TUBERIAS ENTERRADAS

Los casos de interferencia catódica más frecuentes que se presentan en tuberías enterradas son:

a. Interferencia catódica entre dos tuberías que se cruzan.

En este caso, si una tubería vecina pasa a través de la zona de gradientes de potenciales positivos (área de influencia) que rodea a la cama de ánodos de un sistema por corriente impresa, los potenciales de tierra positivos, forzarán a la tubería vecina a captar corriente de la



Fig. 6.6.- GRADIENTES DE POTENCIAL CREADOS ALREDEDOR DE UNA CAMA DE ANODOS.

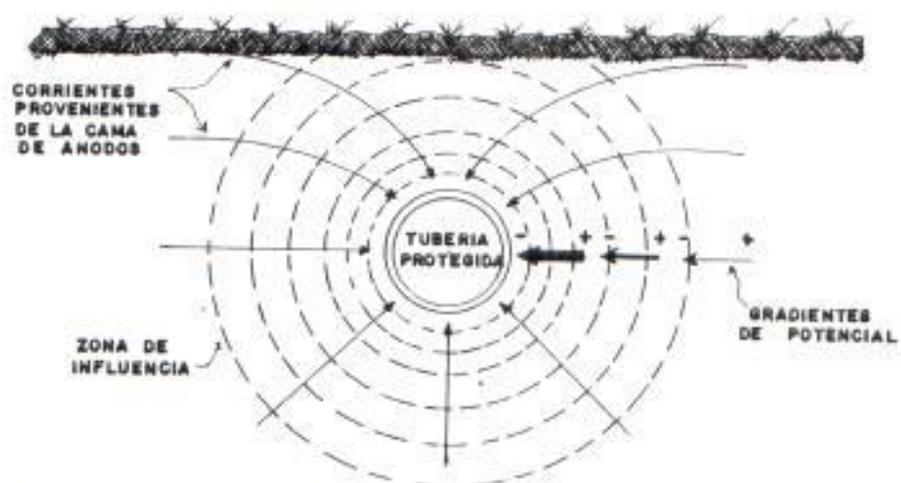


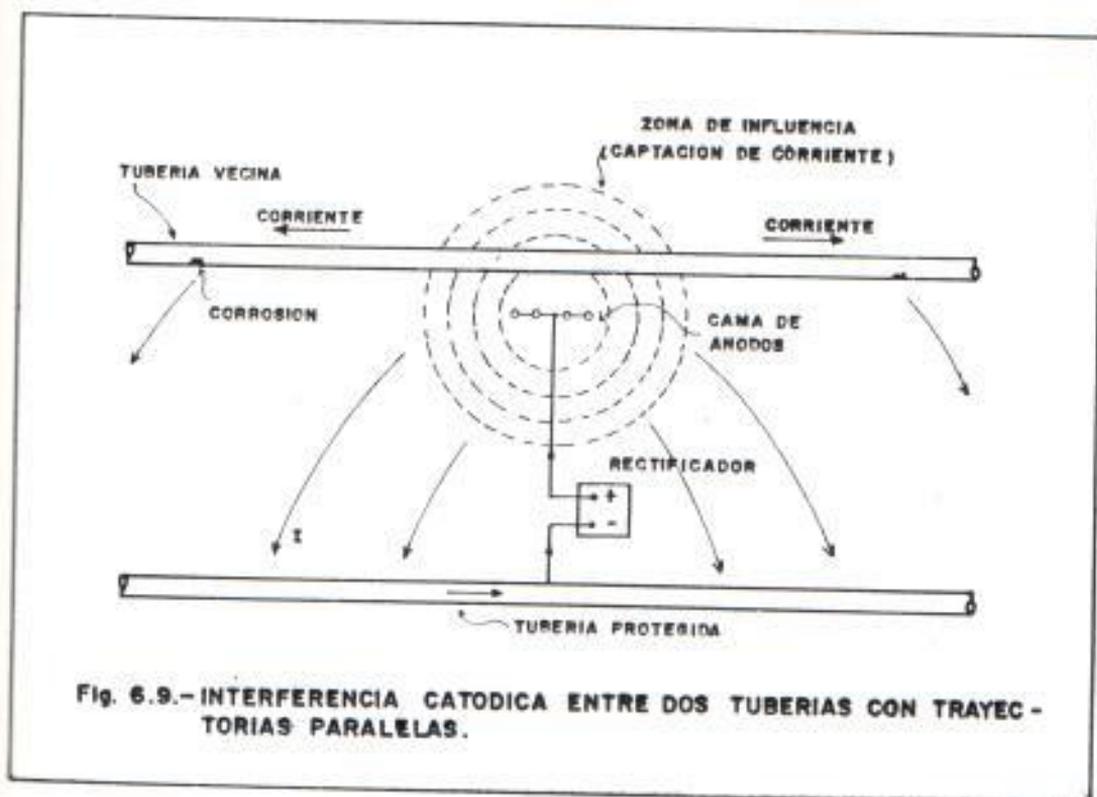
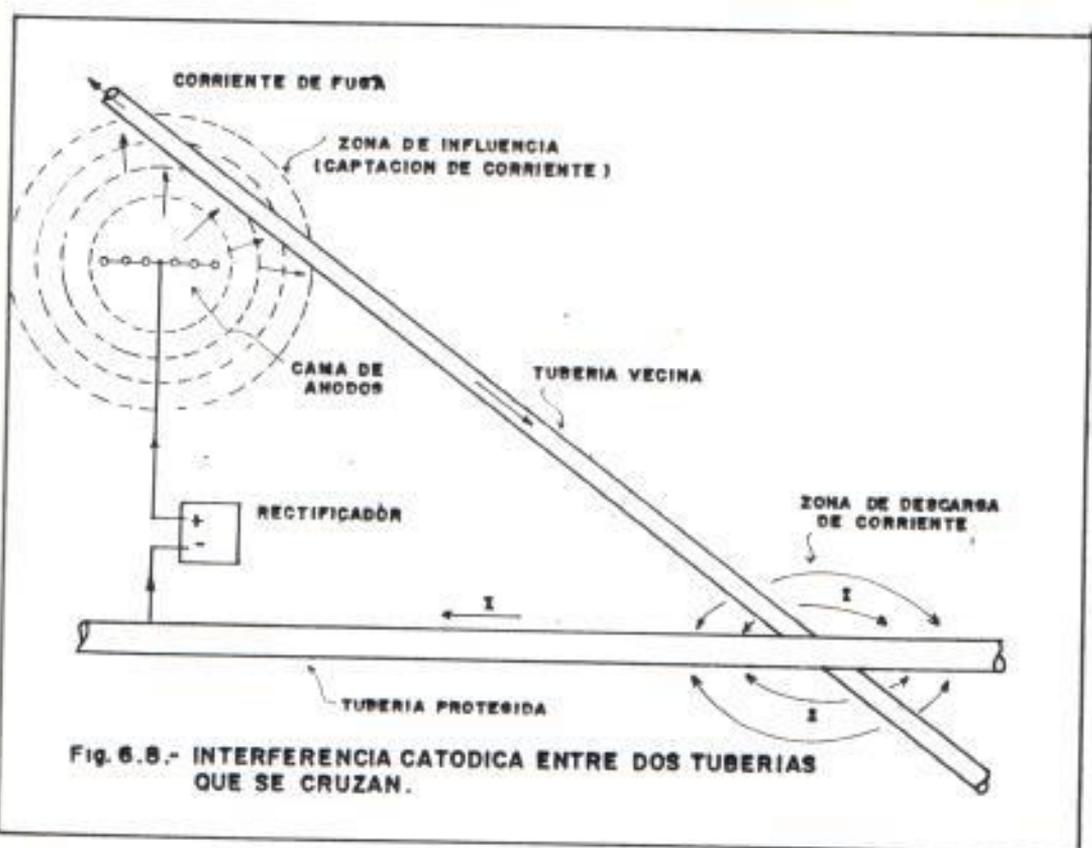
Fig. 6.7.- GRADIENTES DE POTENCIAL CREADOS ALREDEDOR DE UNA TUBERIA PROTEGIDA CATORDICAMENTE.

cama de ánodos en los puntos dentro del área de influencia. La corriente captada de esta manera, deberá fluir a lo largo de la tubería vecina en dirección al punto de cruce entre ambas tuberías. En este punto, la tubería vecina atraviesa los gradientes de potencial existentes alrededor de la tubería protegida, por lo cual, la primera será forzada a descargar la corriente que adquirió por el efecto de la zona de influencia de la cama de ánodos. Dicha corriente será luego captada por la tubería protegida y retornada al terminal negativo del rectificador, cerrando de esta manera el circuito. El caso de interferencia catódica descrito anteriormente se ilustra en forma clara en la Fig. 6.8. Es importante anotar que la mayor descarga de corriente y por ende mayor daño por corrosión electrolítica en la tubería vecina será normalmente en el punto de cruce.

b. Interferencia catódica entre dos tuberías con trayectorias paralelas.

Otro caso frecuente de interferencia

catódica, es el que se produce entre una tubería vecina y una tubería protegida catódicamente que tengan una trayectoria paralela. Como en el caso descrito anteriormente, la tubería vecina es forzada a captar corriente dentro del área de influencia que circunda la cama de ánodos (zona de potenciales positivos); de tal manera que dicha corriente fluirá a lo largo de la tubería vecina en ambas direcciones a partir del punto más cercano a la cama de ánodos y se descargará hacia la tierra en distancias remotas al área de influencia, especialmente en las zonas de más baja resistividad, siendo captada por la tubería protegida para luego fluir sobre ésta hacia el punto conectado al terminal negativo del rectificador, cerrando de esta manera el circuito eléctrico. De acuerdo a lo expuesto, pueden llegar a existir varias áreas de descarga de corriente y por lo tanto varias áreas con problemas de corrosión sobre la tubería vecina, lo cual puede ser claramente observado en la Fig.6.9.



6.2.3. FACTORES QUE AFECTAN A LA INTERFERENCIA CATODICA

Los problemas de interferencia catódica dependen generalmente de los siguientes tres factores:

- a. Influencia de la instalación protegida.
- b. Susceptibilidad de la estructura expuesta
- c. Acoplamiento entre las estructuras.

A continuación se hará una breve descripción de cada uno de estos tres factores.

a. Influencia de la instalación protegida.

Se entiende por "influencia" a la tendencia de una instalación de Protección catódica para producir corrientes de interferencia. Esta influencia depende de varios factores entre los que podemos citar:

- La cantidad de corriente utilizada.
- La localización, configuración y resis-

tencia a tierra de la cama de ánodos.

- El tipo y las características del revestimiento de la estructura protegida.

Para un arreglo fijo de un sistema de Protección catódica en lo que se refiere al tipo de cama de ánodos, tipo de estructura y resistividad del suelo; la influencia es directamente proporcional a la corriente de protección.

b. Susceptibilidad de la estructura expuesta

En este caso, se entiende por "susceptibilidad" a la habilidad de la estructura vecina para captar la corriente de interferencia y descargarla hacia el suelo produciendo la corrosión de la tubería. Los factores que inciden en la susceptibilidad de una estructura son:

- La calidad del revestimiento que recubre a la estructura. Una tubería desnuda es mucho más susceptible a

captar corrientes de interferencia que una con un buen revestimiento.

- La conductividad eléctrica longitudinal de la tubería, la cual establece el grado de facilidad con que puede fluir la corriente por la tubería.

c. Acoplamiento entre las estructuras.

Se entiende por "acoplamiento" al cambio en el potencial de una estructura no protegida cuando la corriente de protección es aplicada a una tubería cercana que está siendo protegida catódicamente.

•

Asumiendo una influencia y susceptibilidad constantes, la tendencia de una estructura protegida catódicamente y de su cama de ánodos, para causar los flujos de corriente de interferencia en una estructura cercana, depende de la separación física entre ambas estructuras y de la resistividad de la tierra. Mientras mayor sea la separación existente entre las tuberías, el acoplamiento entre éstas será menor, minimizando de esta manera la

posibilidad de captación y descarga de la corriente por parte de la tubería no protegida. De manera similar, el acoplamiento será menor en suelos de alta resistividad (mayores de $10.000 \Omega \cdot \text{cm}$).

Estas condiciones nos permiten establecer ciertos criterios para seleccionar la mejor localización de las camas de ánodos así como el mejor trazado de la trayectoria de las tuberías, de tal manera que se disminuya la posibilidad de interferencia catódica. Por ejemplo:

- Si dos estructuras deben cruzarse, se deberá procurar que el cruce se realice en zonas en la cual exista una alta resistividad.

- Si dos tuberías poseen una trayectoria paralela en un suelo de baja resistividad, lo aconsejable en este caso es ubicar a la tubería no protegida, lo más lejos posible de la tubería protegida de modo que el acoplamiento entre ambas estructuras sea mínimo.

6.2.4. DETERMINACION DE PROBLEMAS DE INTERFERENCIA CATODICA

La determinación de la existencia o no de problemas de interferencia catódica se la realiza mediante la aplicación del método conocido como de "energización y desenergización". Este método debe su nombre al hecho que la Protección catódica deberá ser conectada y desconectada intermitentemente para así determinar si existe alguna interferencia entre tuberías cercanas y también para ajustar los aparatos de drenaje de corriente que hayan sido instalados para combatir dicho problema.

El método se basa en la premisa de que ninguna pérdida de corriente debería ocurrir debido al sistema de Protección catódica, si la conexión y desconexión del mismo no causa un cambio de potencial en la tubería sin protección, en el punto de mayor exposición (punto de cruce por ejemplo).

En el caso de existir cambios en el potencial medido, se deberá instalar un sistema de drenaje de corriente y ajustarlo de tal

manera de que fluya la corriente necesaria desde la tubería no protegida hacia la que está protegida, con el fin de mantener el mismo potencial tanto cuando el rectificador esté energizado como cuando esté desenergizado. Este método es muy efectivo y requiere un mínimo de trabajo, por lo que es ampliamente utilizado en la práctica. La Fig. 6.10 muestra un esquema típico de conexión para la utilización de este método.

Para la aplicación del método de "energización y desenergización", es necesario instalar un interruptor de corriente a la salida del rectificador que protege catódicamente la tubería bajo prueba, el mismo que deberá ser accionado con la siguiente frecuencia: 20 segundos conectado y 10 segundos desconectado. Una vez operando el interruptor, cada una de las estaciones de las tuberías vecinas deberán ser visitadas y se procederá a medir los potenciales tubería-suelo con la ayuda de un electrodo de Cobre/Sulfato de cobre colocado directamente sobre el punto de cruce. Estas mediciones deberán ser realizadas en las condiciones de "energizado" y "desenergizado" del inte-

ruptor.

Debido a la importancia del método de "energización y desenergización", y para una mejor comprensión del mismo, se analizará el siguiente ejemplo:

La Fig. 6.11 ilustra condiciones hipotéticas de interferencia catódica entre una tubería protegida y varias tuberías vecinas a ésta, mientras que en la Tabla XXX se presenta los datos de potencial para este ejemplo y que han sido recogidos de las estaciones de prueba instaladas en los cruces de las tuberías.

TABLA XXX
Datos de potenciales para el ejemplo ilustrado en la Fig. 6.11.

Tubería vecina Designación y localización		Medición del potencial usando un electrodo de Cobre/Sulfato de cobre			
		Tubería bajo prueba (V)		Tubería vecina (V)	
Nombre	Estación de tubería	Con rectificador		Con rectificador	
		Energizado	Desenergizado	Energizado	Desenergizado
A	0 + 10	- 0,88	- 0,83	- 0,87	- 0,89
B	0 + 900	- 1,98	- 1,02	- 0,32	- 0,68
C	1 + 765	- 0,68	- 0,64	- 0,78	- 0,78
D	1 + 815	- 0,95	- 0,91	- 0,68	- 0,68

Fuente: PEARODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Houston, 1967.

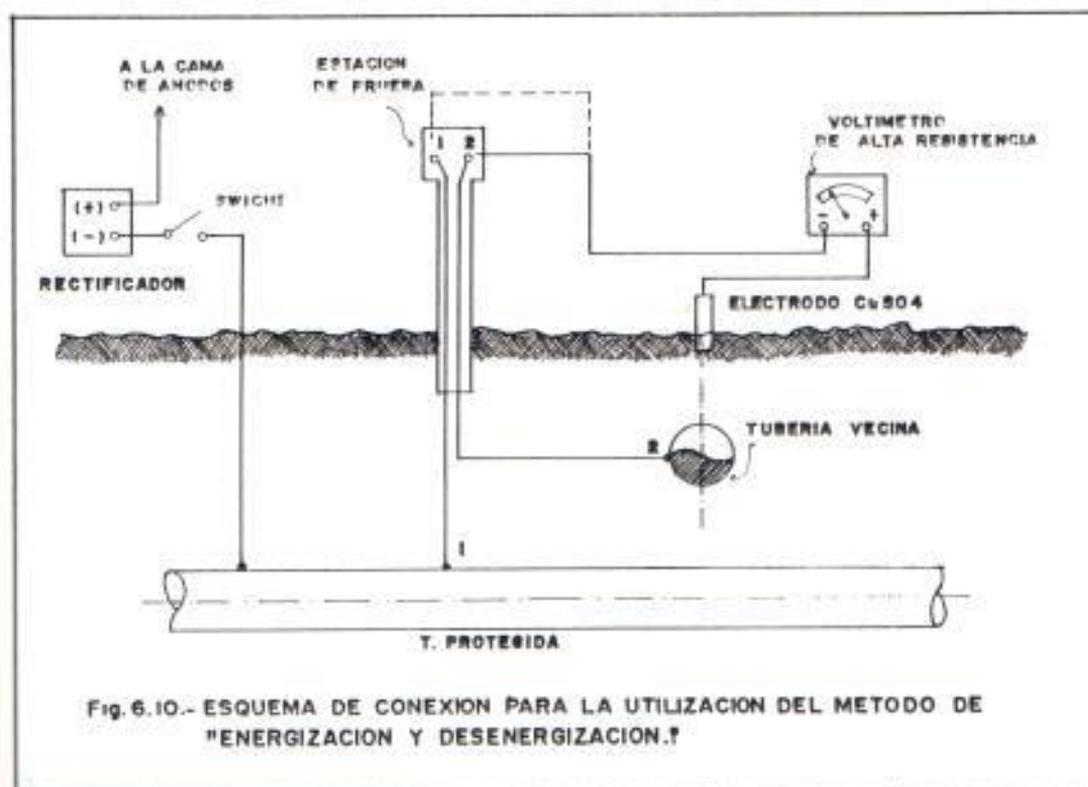


Fig. 6.10.- ESQUEMA DE CONEXION PARA LA UTILIZACION DEL METODO DE "ENERGIZACION Y DESENERGIZACION."

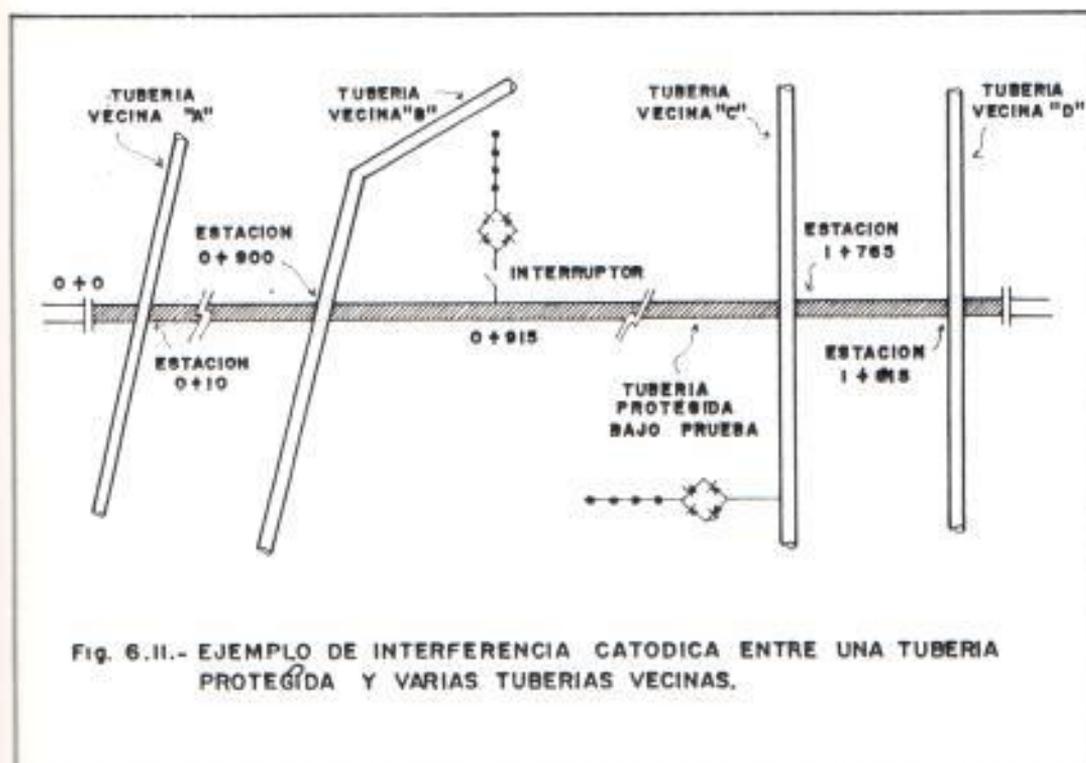


Fig. 6.11.- EJEMPLO DE INTERFERENCIA CATODICA ENTRE UNA TUBERIA PROTEGIDA Y VARIAS TUBERIAS VECINAS.

Analizando los datos de la Tabla XXX, en el punto de cruce "A" la tubería bajo prueba está completamente protegida aunque existe la probabilidad de la presencia de algún daño en el revestimiento en la cercanía del cruce. Esto se basa en la consideración de que el potencial de la tubería vecina decrece cuando el rectificador se lo pasa de la condición de "desenergizado" a "energizado", indicando una apreciable corriente fluyendo desde la tubería vecina hacia la tubería bajo prueba. En lo que se refiere a la tubería vecina, ésta también se considera que está protegida ya que la reducción de su potencial en el punto de cruce, debido a la operación del interruptor, no es lo suficientemente notable para indicar una pérdida de protección; por lo tanto, en este caso, no se requiere tomar ninguna medida correctiva.

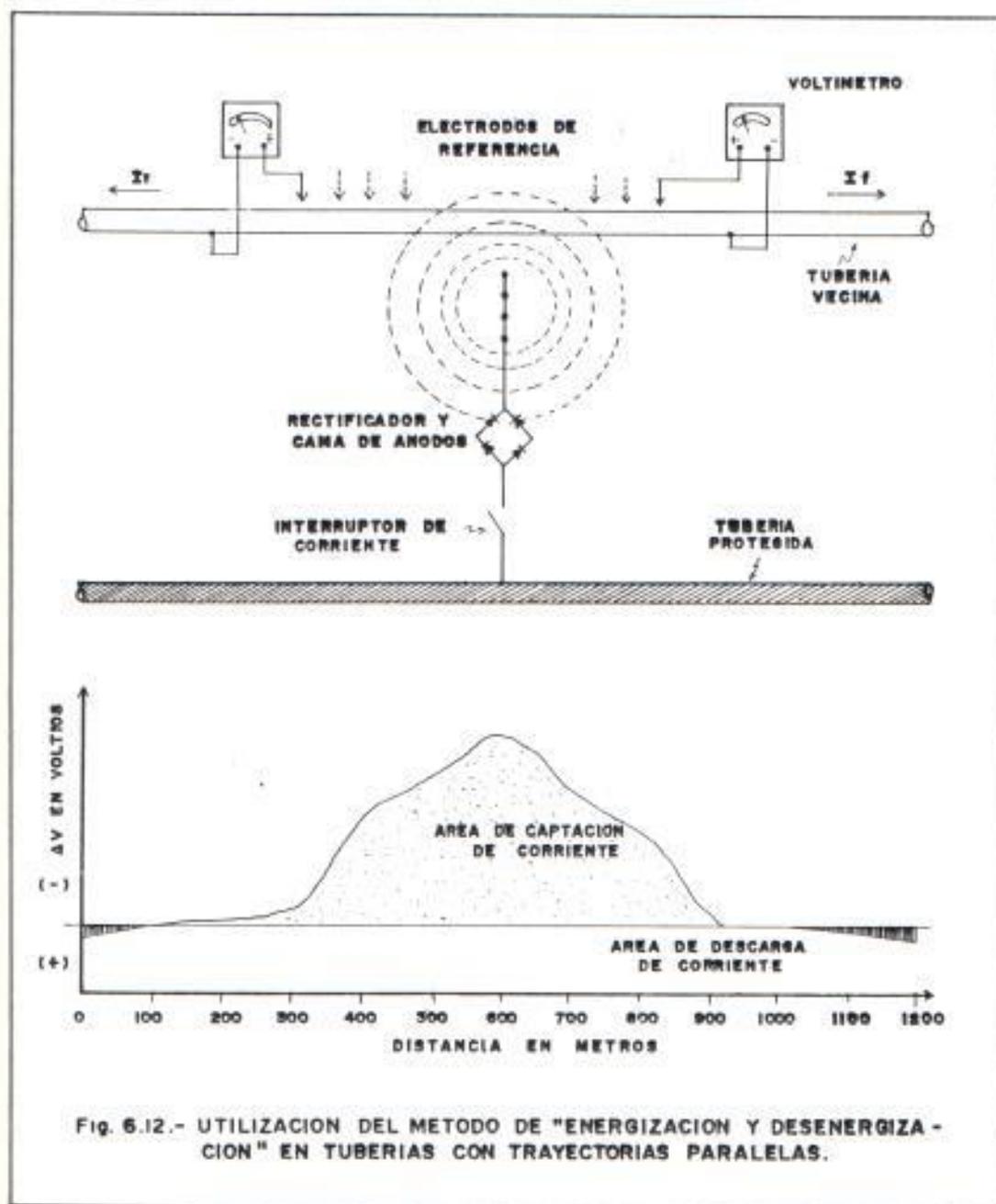
En el punto de cruce "B", la tubería bajo prueba está completamente protegida, mientras que la tubería vecina no lo está. Esto se concluye considerando que con el rectificador "energizado", el potencial de la tubería vecina cae considerablemente, indicando

la probabilidad de daños severos por corrosión en la misma. Esta fuerte interferencia es seguramente el resultado de la corriente adquirida por la tubería vecina que cruza a través del Área de influencia de la cama de ánodos que protege a la tubería bajo prueba y que es descargada hacia el suelo en el punto de cruce. En este caso, es necesario tomar medidas correctivas.

En el punto de cruce "C", la tubería bajo prueba está recibiendo una protección inadecuada, aparentemente debido a la interferencia producida por la tubería vecina que también está catódicamente protegida. Esto puede ser confirmado en el caso de que el potencial de la tubería bajo prueba, con respecto a un electrodo localizado a una cierta distancia del punto de cruce, presente un valor normal de protección (sobre los $-0,85$ V); entonces, el valor tomado en el cruce, indicaría un problema local causado por la tubería vecina la cual no se ve mayormente afectada; sin embargo, es necesario tomar medidas correctivas para eliminar la interferencia sobre la tubería bajo prueba.

Finalmente, en el punto de cruce "D", la tubería bajo prueba está protegida adecuadamente, mientras que la tubería vecina, aunque no está completamente protegida, no es afectada por el sistema de Protección catódica de la tubería bajo prueba; por lo tanto no se requiere tomar ninguna acción correctiva.

En el caso de que la tubería vecina tenga una trayectoria paralela a aquella que esté protegida catódicamente, la aplicación del método de "energización y desenergización" tiene la misma eficiencia en lo que respecta a la determinación de los puntos donde se presentan problemas de interferencia catódica. Un ejemplo de esta aplicación se muestra en la Fig. 6.12 mientras que la Tabla XXXI presenta los datos de potencial obtenidos para este ejemplo. Del análisis de la tabla considerada, se concluye que el mayor valor negativo de ΔV corresponde al punto más cercano a la cama de ánodos lo cual indica una mayor captación de corriente, mientras que los valores positivos de ΔV indican la iniciación del área de descarga de corriente y por ende la locali-



zación de posibles áreas de corrosión.

TABLA XXXI
Datos de potenciales registrados para el ejemplo de la Fig. 6.12.

Localización del electrodo con respecto al punto de origen "0" (m)	Potenciales medidos sobre la tubería vecina (V)			Observación
	Rectificador		ΔV	
	Energizado	Desenergizado		
0	- 0,48	- 0,52	+ 0,04	-> Exposición
100	- 0,58	- 0,58	0	
200	- 0,64	- 0,63	- 0,01	
300	- 0,69	- 0,64	- 0,05	
400	- 1,01	- 0,69	- 0,32	
500	- 1,20	- 0,77	- 0,43	
600	- 1,37	- 0,81	- 0,56	-> Localización de la rana de ánodos
700	- 1,18	- 0,78	- 0,40	
800	- 0,99	- 0,71	- 0,28	
900	- 0,66	- 0,65	- 0,01	
1.000	- 0,64	- 0,64	0	
1.100	- 0,57	- 0,59	+ 0,02	-> Exposición
1.200	- 0,48	- 0,53	+ 0,05	-> Exposición

Fuente: PEARBODY, A.W., Control of pipeline corrosion, NACE, Texas, 1967.

6.2.5. METODOS PARA EL CONTROL DE LA INTERFERENCIA CATODICA

Existen varios métodos que pueden ser utilizados de manera efectiva con el fin de reducir o eliminar las corrientes de interferencia originadas por sistemas de Protección catódica, entre los cuales se incluyen:

- a. Utilización de uniones de drenaje de corriente.
- b. Uso de revestimientos anticorrosivos.
- c. Uso de Anodos galvánicos.
- d. Uso de barreras eléctricas.

En algunas ocasiones, la aplicación de las medidas correctivas antes mencionadas pueden resultar muy complicadas o costosas, en tal caso la reubicación del rectificador puede ser la solución más económica.

A continuación se describirá la forma de aplicación de los distintos métodos para el control de la interferencia catódica, así como los casos en que deben ser utilizados.

- a. Utilización de uniones de drenaje de corriente.

Este método se basa en el balanceamiento del potencial de la estructura interferida; para lo cual, un resistor es instalado entre las dos tuberías y ajustado de tal manera que controle el flujo de

corriente eléctrica desde la tubería afectada a la tubería interferente.

Un correcto ajuste del resistor se establece cuando se logra drenar una cantidad de corriente tal, que cause que el potencial de la tubería interferida posea el mismo valor tanto con el rectificador "energizado" como cuando está "desenergizado". En otras palabras, cuando el potencial de la tubería vecina es reestablecido a su valor original.

En el caso de que la tubería interferida también esté bajo Protección catódica, la corriente drenada de la tubería interferida no deberá ser mayor que la requerida para reestablecer el potencial de la misma al valor de protección ($-0,85$ V) mientras el rectificador esté energizado.

La Fig. 6.13 ilustra una instalación para el drenaje de corriente por medio de resistores, de la cual se puede apreciar su simplicidad; sin embargo, la aplicación de este método sólo se recomienda en los casos en donde exista cruce entre

tuberías y donde el sentido de la corriente siempre sea desde la tubería interferida hacia la interferente. Es importante anotar que la instalación del resistor que une a las dos tuberías es generalmente en el punto de cruce entre ambas.

b. Uso de revestimientos anticorrosivos.

Este método se aplica cuando se establece que en el punto de cruce entre dos tuberías, la tubería vecina es la causante de una importante baja en el potencial de protección de la tubería bajo prueba, la cual se debe seguramente a la existencia de un revestimiento de baja calidad sobre la tubería vecina, justamente en las proximidades del punto de cruce.

Conociendo que una alta densidad de corriente fluyendo a través del suelo hacia la tubería vecina pobremente revestida, es la causa de la caída local en el potencial de protección de la tubería bajo prueba; una solución sería la de

reducir dicha densidad de corriente. Este propósito puede ser logrado mediante la utilización de revestimientos de excelente calidad, aplicado sobre la tubería vecina causante de la interferencia, en el área de cruce, tal como se ilustra en la Fig. 6.14. La longitud del tramo de la tubería vecina que va a ser revestida puede ser determinada a partir de los perfiles de potencial tubería-suelo obtenidos de la tubería bajo prueba; por lo tanto, dicha longitud debe ser igual a la longitud del tramo en donde los potenciales tubería-suelo han experimentado una baja en el nivel de protección.

c. Uso de ánodos galvánicos.

Otra de las medidas correctivas de la interferencia catódica involucra el uso de ánodos galvánicos conectados a la tubería bajo prueba, en el tramo donde dicha tubería está sujeta a la interferencia causada por la tubería vecina.

La Fig. 6.15 ilustra la aplicación de este método. Fundamentalmente, este

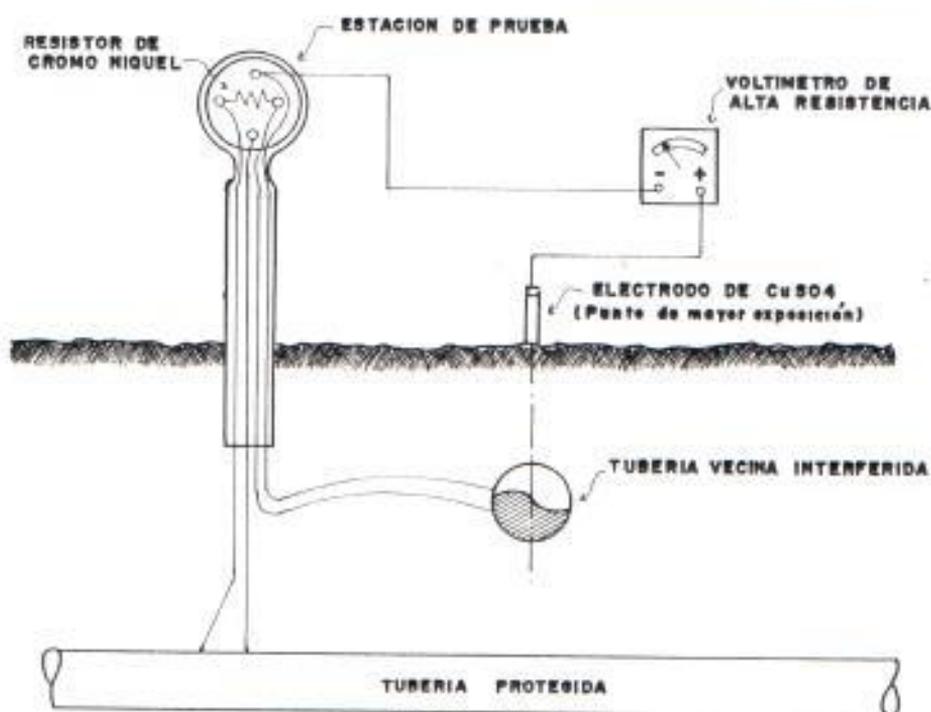


Fig. 6.13.- USO DE UNIONES DE DRENAGE DE CORRIENTE (RESISTORES) PARA EL CONTROL DE LA INTERFERENCIA CATODICA.

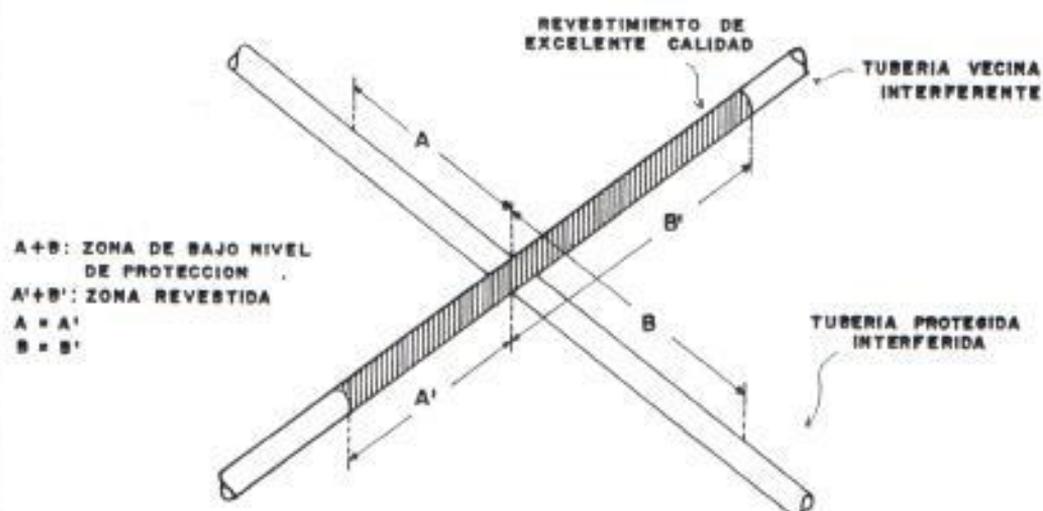


Fig. 6.14.- USO DE REVESTIMIENTOS ANTICORROSIVOS PARA EL CONTROL DE LA INTERFERENCIA CATODICA.

esquema se basa en la utilización de los gradientes de potencial anódicos existentes alrededor de los ánodos galvánicos, con la finalidad de compensar los gradientes de potencial catódicos existentes alrededor de la tubería. En la mayoría de los casos, una simple hilera de ánodos entre la tubería afectada y la tubería interferente sería suficiente para mitigar los efectos dañinos de la interferencia.

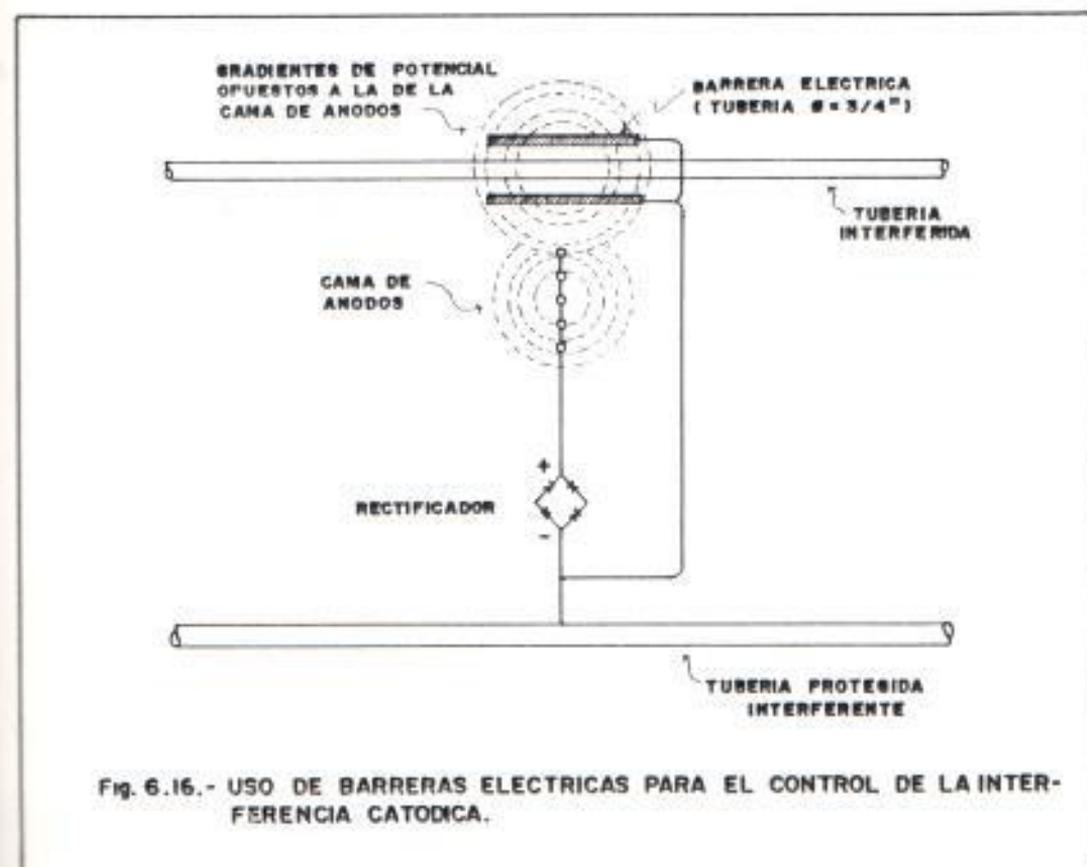
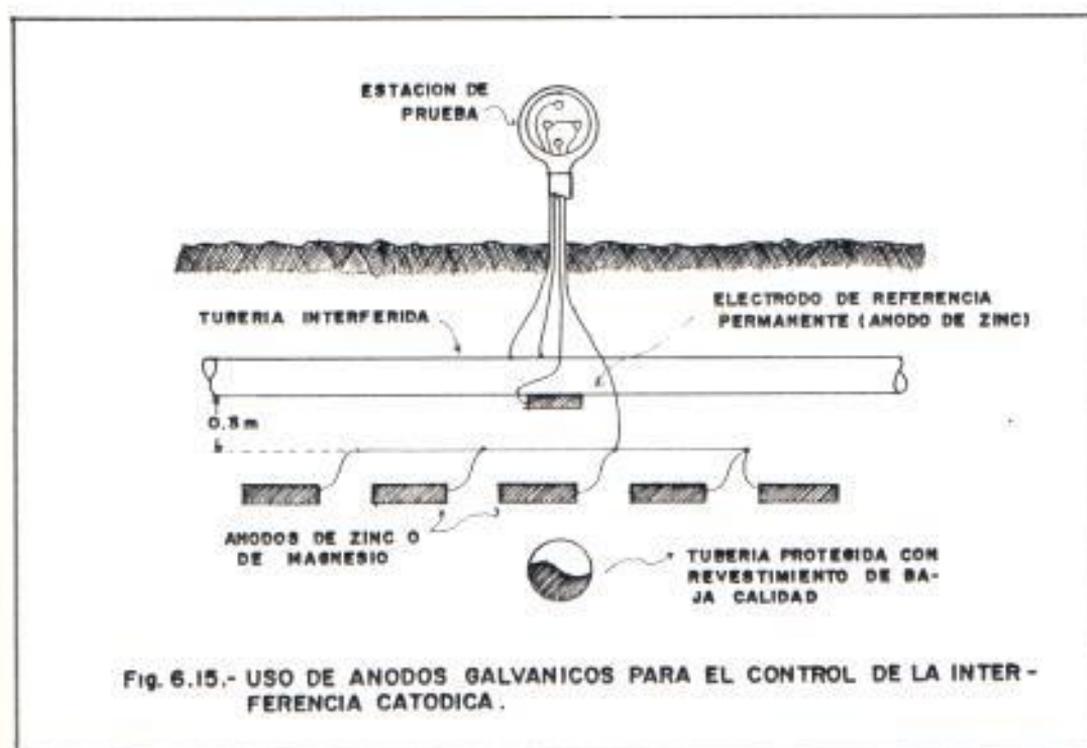
Los ánodos de magnesio son los más apropiados para ser usados en este método debido a que poseen un gradiente de potencial anódico mucho más fuerte que el de los ánodos de zinc. La longitud de la hilera de ánodos es determinada por medio del perfil de potenciales tubería-suelo tomados sobre la tubería afectada, la cual será igual a la longitud del tramo en donde existe la depresión del potencial.

d. Uso de barreras eléctricas.

Cuando una tubería pasa através del área

de influencia que rodea una cama de ánodos, es posible reducir la cantidad de corriente parásita que la tubería capta en esta zona, mediante la utilización de barreras eléctricas; las cuales son simplemente tuberías desnudas con un diámetro de 3/4" instaladas en el área de influencia, a ambos lados de la tubería interferida. La Fig. 6.16 ilustra el diagrama de conexiones utilizadas para la aplicación de este método, el cual se utiliza exclusivamente para el caso en que las dos tuberías sigan una trayectoria paralela en su recorrido.

La razón por la cual la utilización de barreras eléctricas son efectivas, es que permiten el aprovechamiento de los gradientes de potencial catódico que rodean dichas barreras, y que son producto de su conexión con el terminal negativo del rectificador. Con la tubería vecina instalada entre las dos barreras, ésta estará completamente dentro del campo de gradientes catódicos. Como sabemos, este campo catódico está en oposición con el campo positivo generado por la cama de



ánodos. El resultado neto será entonces una reducción en la cantidad de corriente parásita captada por la tubería vecina.

La utilización de este método, tiene una desventaja a ser considerada, ya que las barreras eléctricas conectadas al terminal negativo del rectificador podrían consumir una gran parte de la corriente de salida llegando a ocasionar de esta manera una disminución en los niveles de protección de la tubería a la cual el rectificador está conectado.

6.3. CALCULO DE LA INTERFERENCIA CATODICA EN TUBERIAS ENTERRADAS CERCANAS

Para determinar la corriente de interferencia catódica que fluye sobre una tubería no protegida, la cual se encuentra instalada en las cercanías de un sistema de Protección catódica, es necesario considerar por separado el efecto que produce, sobre dicha tubería, cada una de las "zonas de influencia" que ella atravieza. Es decir, que se deberán considerar los siguientes dos efectos:

a. El efecto del ánodo, causado por la corriente

que fluye desde la cama de ánodos hacia la tubería no protegida y;

- b. El efecto de la estructura, causado por la corriente de protección que fluye sobre la tubería protegida.

El efecto neto (c), en cualquier punto sobre la tubería interferida, será la suma de los efectos del ánodo y de la estructura.

Tanto el efecto del ánodo como el efecto de la estructura, dependen de las constantes de atenuación de las tuberías involucradas en el problema de la interferencia catódica, por lo cual el cálculo de dichas constantes resulta necesario. Tal como se estudió en el numeral 3.6, la constante de atenuación de una estructura puede ser determinada mediante el empleo de la ecuación (3-12):

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_L}{R_F}}$$

Donde:

α = Constante de atenuación (1/m).

R_L = Resistencia longitudinal de la tubería (Ω/m).

R_F = Resistencia de fuga de la tubería ($\Omega \cdot m$).

La resistencia de fuga R_F incluye la resistencia de la trayectoria del suelo y la resistencia longitudinal del revestimiento, tal como lo expresa la siguiente ecuación:

$$R_F = R_C + R_S \quad (6-1)$$

Donde:

R_C = Resistencia longitudinal del revestimiento ($\Omega \cdot m$)

R_S = Resistencia del suelo ($\Omega \cdot m$).

En lo que se refiere a la resistencia de la trayectoria del suelo R_S , ésta puede ser calculada a partir de la fórmula:

$$R_S = \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1.12}{a a'} \quad (6-2)$$

Donde:

ρ = Resistividad del suelo ($\Omega \cdot m$).

a' = Radio eléctrico equivalente de la tubería (m).

Para la aplicación de las fórmulas descritas anteriormente, existen dos casos a considerar, los cuales son:

1. Para el caso de que sólo exista la tubería

protegida; entonces, $a' = a_1$. El valor de a_1 puede ser determinado mediante la aplicación de la fórmula:

$$a_1 = \sqrt{2ad} \quad (6-3)$$

Donde:

a = Radio exterior de la tubería protegida (m).

d = Profundidad medida desde la superficie hasta el centro de la tubería (m).

2. Para el caso de la existencia de dos tuberías con trayectorias paralelas que originen problemas de interferencia catódica; en este caso, $a' = a_2$. El valor de a_2 se lo calcula mediante la expresión:

$$a_2 = \sqrt{a_1 y_1} \quad (6-4)$$

Donde:

a_2 = Radio eléctrico equivalente de las dos tuberías (m).

y_1 = Separación entre ambas tuberías (m).

En el caso de que no se pueda aplicar directamente la ecuación (3-12), debido a que no se conoce el valor de R_F , entonces se deberán combinar las

expresiones anteriores con el fin de obtener ecuaciones que sirvan para calcular las constantes de atenuación para cada uno de los dos casos antes descritos. Dichas ecuaciones son:

- Para el caso de que sólo exista la tubería protegida:

$$R_L = \alpha_1^2 \left(R_C + \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha_1 r_1} \right) \quad (6-5)$$

- Para el caso de la existencia de dos tuberías con trayectorias paralelas:

$$R_L = 2\alpha_2^2 \left(\frac{R_C}{2} + \frac{\rho}{\pi} \ln \frac{1,12}{\alpha_2 r_2} \right) \quad (6-6)$$

Una vez determinados los parámetros que caracterizan a las tuberías, se procederá a analizar cada uno de los dos efectos a los cuales está expuesta la tubería interferida. Hay que anotar que el referido análisis se hará en base al caso de la interferencia catódica que puede llegar a existir entre dos tuberías con trayectorias paralelas.

a. Efecto del Anodo.

La Fig. 6.6 ilustra las condiciones consideradas

en el efecto del ánodo, en la cual se toma a la zona de influencia de la cama de ánodos como la única causa que provoca la interferencia.

El efecto del ánodo se basa en que el potencial de la tierra cerca a la cama de ánodos de un sistema de Protección catódica, se vuelve más positivo mientras uno más se aproxime a la ubicación de los ánodos. De esta manera, una tubería enterrada muy cerca de la cama de ánodos captará corriente debido a los gradientes de potencial existentes en el suelo y dicha corriente fluirá sobre la tubería interferida en ambas direcciones a partir del punto más cercano a la cama de ánodos. La curva ABA' ilustrada en la Fig. 6.17 muestra como la corriente sobre la tubería interferida cambia con respecto a la distancia debido al efecto del ánodo.

Para calcular la corriente sobre la tubería interferida a una distancia "x" a partir del punto más cercano a la cama de ánodos, la siguiente ecuación es aplicada:

$$I_{\text{int}} = \frac{I_a}{8} \frac{2e^{-a_1 x} \ln \frac{1,12}{a_2 x} - f(a_2 x)}{\frac{\pi R_G}{2\rho} + \ln \frac{1,12}{a_2 a z}} \quad (6-7)$$

Donde:

I_a = Corriente inyectada por la cama anódica (A)

I_{ox} = Corriente sobre la tubería interferida debido al efecto del ánodo, a una distancia "x" de la ubicación de la cama de ánodos (A)

y = Distancia existente desde la cama de ánodos hasta la tubería interferida (m).

Los valores de $f(a_2x)$, utilizado en la ecuación (6-7), son dados en la Tabla XXXII. Hay que anotar que la ecuación anterior se aplica cuando "x" es mayor que "y" y " a_2y " es menor que 1.

TABLA XXXII
Valores de $f(a_2x)$

a_2x	$f(a_2x)$	a_2x	$f(a_2x)$
0,01	8,056	0,45	0,795
0,02	6,670	0,50	0,647
0,03	5,860	0,60	0,404
0,04	5,291	0,70	0,224
0,05	4,846	0,80	0,087
0,06	4,486	0,90	-0,021
0,07	4,182	1,00	-0,102
0,08	3,918	1,10	-0,163
0,09	3,688	1,20	-0,210
0,10	3,483	1,30	-0,244
0,15	2,704	1,40	-0,273
0,20	2,166	1,50	-0,288
0,25	1,763	1,60	-0,302
0,30	1,448	1,70	-0,303
0,35	1,190	1,80	-0,308
0,40	0,977	1,90	-0,315
		2,00	-0,351

Fuente: POPE, R., Interference from forced drainage, Corrosion 6, 201-7, 1950.

b. Efecto de la estructura.

Para el análisis de este efecto, se considera que la cama de ánodos está ubicada a una distancia muy remota con respecto a la tubería no protegida, de tal forma que su efecto resulte despreciable.

El efecto de la estructura se basa en la consideración de que si dos tuberías se encuentran cercanas entre sí, el campo de gradientes de potencial creado por la corriente de protección que fluye sobre la tubería protegida puede interactuar con la tubería no protegida dando lugar a la fuga de una parte de la corriente de protección a través del suelo, de tal manera de que dicha corriente es captada por la tubería no protegida y fluye sobre ella en dirección hacia donde se encuentra ubicado el punto de conexión del equipo de Protección catódica. El cambio de la corriente que fluye sobre la tubería no protegida, debido al efecto de la estructura, es indicado por la curva $S6S'$ en la Fig. 6.17.

Para determinar la corriente en la tubería interferida, una serie de curvas son derivadas, las cuales relacionan la corriente de interfe-

rencia a una distancia "x" desde el punto de drenaje, en términos de la relación μ (resistencia mutua de fuga entre las tuberías). Esta relación es calculada en forma aproximada por la ecuación:

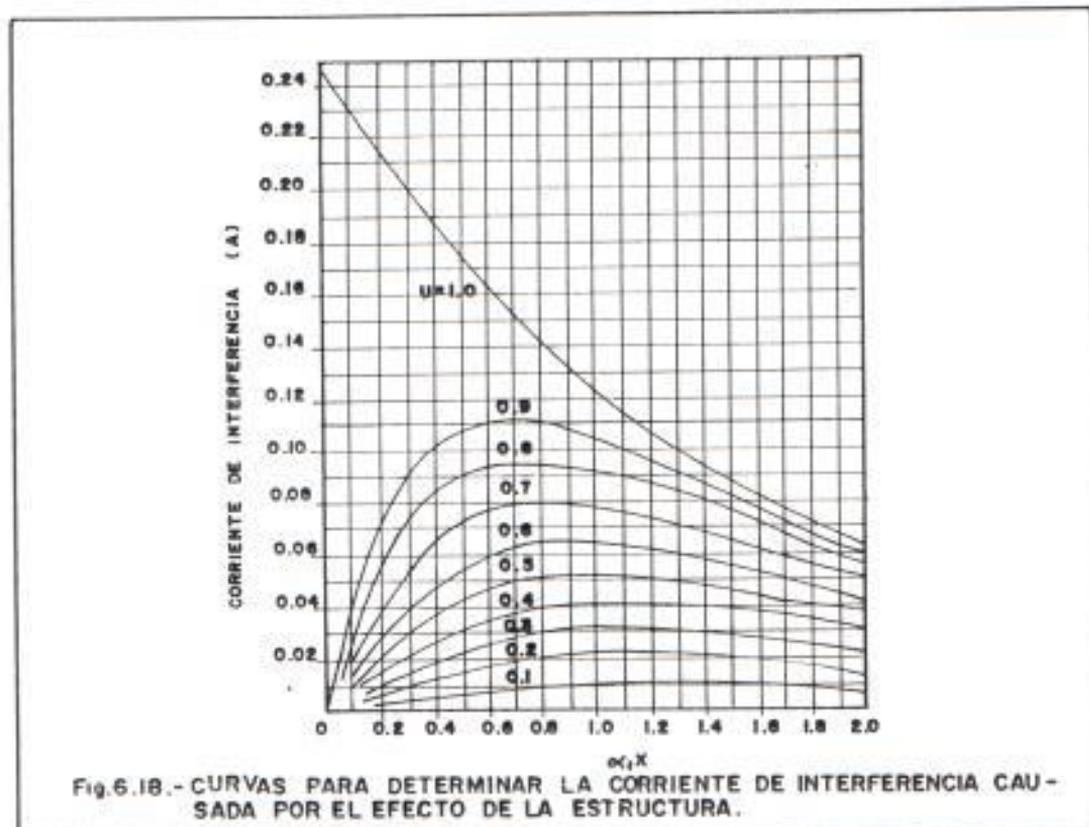
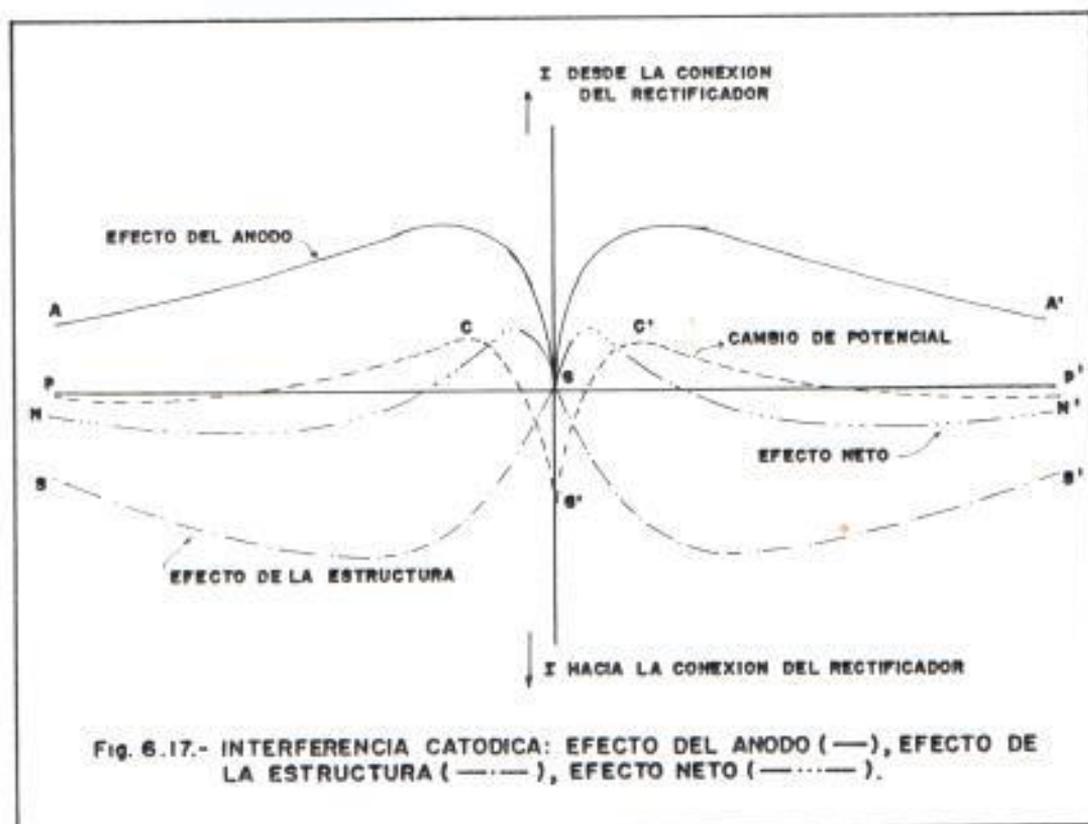
$$\mu = \frac{\ln \frac{1.12}{\alpha_1 \gamma_1}}{\ln \frac{1.12}{\alpha_1 \alpha_1} + \frac{\pi R_G}{\rho}} \quad (6-8)$$

La Fig. 6.18 muestra las curvas utilizadas para determinar las corrientes de interferencia sobre una tubería en función de " $\alpha_1 x$ ", para varios valores de μ .

Como se puede observar, la amplitud relativa de las curvas establecidas por el efecto del ánodo y de la estructura, dependerá de las constantes de atenuación de las tuberías protegida y no protegida, del espaciamiento entre ellas y de la distancia entre cada tubería y la cama de ánodos.

c. Efecto neto.

El efecto neto en cualquier punto sobre la tubería no protegida, es obtenido sumando las



corrientes creadas debido al efecto del ánodo y debido al efecto de la estructura, tal como se muestra por la curva NGN' de la Fig. 6.17. En dicha figura, se observa que la corriente neta de interferencia se va incrementando progresivamente desde el punto de la ubicación de la cama de ánodos hasta alcanzar un valor máximo (zona de captación de corriente) y luego decrece hasta un valor cero e inclusive haciéndose negativo en el resto de la longitud de la tubería (zona de pérdida de corriente).

La velocidad a la cual la corriente neta es captada o descargada, será proporcional al cambio en el potencial tubería-suelo a lo largo de la tubería no protegida, lo cual es mostrado en la curva PCB'C'P' de la Fig. 6.17. En dicha figura se observa que los puntos donde la corriente es captada corresponde a la zona donde el cambio de potencial es negativo por lo que la velocidad de corrosión es reducida. En cambio, los puntos donde la corriente neta de interferencia es descargada hacia el suelo está representada por la zona donde el potencial tubería-suelo se vuelve más positivo y por ende la velocidad de corrosión en tales puntos se incrementa.

De lo anteriormente expuesto, si la cama de ánodos es instalada muy cerca de la tubería no protegida, puede llegar a producirse grandes cambios de potencial negativo sobre dicha tubería en aquellos puntos que se encuentran más próximos a la ubicación de la cama de ánodos. En lo que respecta al máximo cambio de potencial positivo, éste usualmente puede ser encontrado, sobre una tubería no protegida, a una distancia entre 270 a 450 m a partir del punto exactamente opuesto a la ubicación de la cama de ánodos. Si las dos tuberías no tuviesen trayectorias paralelas, el máximo cambio de potencial positivo podría ocurrir en los puntos de cruce o en otros lugares en donde las tuberías estén muy cercanas la una con la otra.

6.4. PRESENCIA DE LINEAS DE TRANSMISION CERCANAS A LAS TUBERIAS

6.4.1. EL FENOMENO ELECTRICO

Una corriente eléctrica que circula a través de un conductor, origina un campo magnético a su alrededor cuyas líneas de fuerza son circunferencias concéntricas. Cuando la corriente varía, se produce un cambio en el

flujo de dicho campo magnético lo cual induce una fuerza electromotriz en el conductor. Este fenómeno se lo denomina autoinducción.

De igual manera, si un circuito se encuentra bajo la acción del campo magnético creado por la corriente que circula en otro circuito, una variación en el flujo del campo magnético inducirá una fuerza electromotriz en el primer circuito.

Bajo estas premisas se establece que si una tubería metálica se encuentra instalada en la proximidades de una línea de transmisión de energía eléctrica, dicha tubería puede quedar sujeta a fuerzas electromotrices que pueden llegar a ocasionar daños de carácter material y/o de carácter personal.

Una tensión inducida sobre la tubería puede ocurrir, generalmente, si se presentan cualquiera de los siguientes casos:

1. Al producirse una falla en la línea de Transmisión entre línea y tierra, la corriente de cortocircuito se descargará

hacia el suelo a través de la torre metálica. Esa corriente de falla elevará el potencial del suelo próximo a la torre, en relación a un punto distante, por lo que una tubería instalada cerca de la torre quedará expuesta a la inducción de una fuerza electromotriz.

2. Cuando una línea de Transmisión estuviese recorrida por una corriente monofásica, se inducirá una fuerza electromotriz en el tramo de la tubería que esté instalada próxima a la línea. El potencial del suelo, en este caso, permanece igual al de un punto distante.

La importancia de conocer el efecto de inducción que puede causar una línea de Transmisión cercana a una tubería metálica enterrada, radica en el hecho de que cuando una tensión eléctrica de valor elevado es aplicado al revestimiento de una tubería, puede ocasionar la formación de un arco eléctrico cuyos efectos térmicos podrían perforar dicha tubería.

De acuerdo con ensayos realizados por la

"Electricité de France", se han establecido algunos valores extremos de tensión inducida y sus efectos sobre tuberías con revestimiento de alquitrán de hulla, lana de vidrio y papel fieltro. Los resultados de tales ensayos han sido recopilados en la Tabla XXXIII presentada a continuación:

TABLE XXXIII
Efectos que tiene una tensión inducida sobre el metal de una tubería con revestimiento de alquitrán de hulla.

Máxima tensión inducida	Efectos al término de un segundo de aplicación de la tensión inducida
5 Kv	Ningún ataque al metal de la tubería.
10 Kv	El metal de la tubería es dañado.
15 Kv	El metal de la tubería es perforado.

Fuente: GENTIL, V., Proteção catódica, IEC - Instalações e Engenharia de corrosão Ltda., Rio de Janeiro, 1981

Las tensiones inducidas en las tuberías por efecto de las corrientes de carga que fluyen por las líneas de Transmisión, son normalmente de valores inferiores a 5 Kv, por lo que no se espera ningún daño sobre la tubería en estas condiciones. Sin embargo, en el caso de corrientes de falla debidos a cortocircuito, la tensión inducida puede

ultrapasar los valores máximos, por lo que seguramente existirán daños graves sobre la tubería.

6.4.2. MEDIOS DE PREVENCIÓN CONTRA LA INTERFERENCIA CAUSADA POR LINEAS DE TRANSMISIÓN

De lo anteriormente expuesto, se establece que siempre que sea posible, se deberá estudiar juiciosamente el trazado de la tubería de modo que se la instale en una zona libre de cualquier influencia de líneas de alta tensión.

Estudios teóricos y prácticos han demostrado que, en una primera aproximación, la distancia mínima entre la tubería y la línea de alta tensión, para la cual las influencias del campo magnético son despreciables, está dada por la fórmula:

$$d = 10 \sqrt{\rho} \quad (6-9)$$

Donde:

d = Distancia mínima entre la tubería y la línea de Transmisión (m).

ρ = Resistividad eléctrica del suelo ($\Omega \cdot \text{cm}$).

En el caso de que no fuera posible la aplicación de esta distancia mínima, existirán influencias sobre la tubería y por lo tanto deberán ser aplicadas otras medidas correctivas. Estas medidas correctivas se dividen en dos grupos básicos:

a. Medidas correctivas dependientes del proyecto de la línea de alta tensión:

- Instalación de un pararrayos.- Los pararrayos contribuyen enormemente en la reducción de las tensiones de conducción.

- Aterrizamiento de las torres.- Los aterrizamientos de las torres deberán tener el menor valor de resistencia posible, de modo de disminuir el potencial a tierra de una determinada torre con falla.

- Instalación de un cable contrapeso.- La existencia de un cable contrapeso proporcionará una reducción extremadamente grande en el efecto de inducción y conducción sobre la tubería.

b. Medidas correctivas dependientes del proyecto de la tubería:

- Reducción del aislamiento anticorrosivo.- Como sabemos, todas las tuberías enterradas reciben un revestimiento anticorrosivo; la disminución de la eficiencia del aislamiento dada por el revestimiento, reduce enormemente la influencia ocasionada por las corrientes inducidas.

- Instalación de dispositivos especiales de aterrizamiento.- Cuando los cálculos demuestran que los potenciales sobre la tubería pueden superar los límites de seguridad de la misma o del personal que opera en mantenimiento, se vuelve necesario la instalación de dispositivos especiales de aterrizamiento para la tubería, los cuales son elementos de bajísima resistencia conectados en paralelo con la tubería.

Como se puede observar, los medios de prevención contra la interferencia ocasionada por líneas de alta tensión, en lo que

respecta al proyecto de la tubería, constituyen prácticas antagónicas a los medios convencionales de combate de la corrosión; así, mientras que para aplicar una protección anticorrosiva lo ideal sería un revestimiento de excelente calidad, en cambio en lo que concierne a la interferencia con líneas de alta tensión lo ideal sería precisamente lo opuesto, o sea, en el caso extremo, una tubería completamente sin revestimiento. En lo que respecta a los dispositivos especiales de aterrizamiento, éstos son elementos que deben ser considerados en el dimensionamiento del sistema de Protección catódica ya que al tener dichos elementos una bajísima resistencia, se produciría la pérdida de una considerable cantidad de corriente de protección por estos dispositivos y por tanto se acentúa las dificultades de la protección.

Por todo lo expuesto, lo ideal sería realizar un estudio completo del trazado de la tubería a instalar, de tal manera que se evite pasar por un área donde exista o esté en proyecto una línea de transmisión de energía eléctrica o por lo menos establecer

la distancia mínima requerida para anular su influencia.

CAPITULO VII

APLICACIONES ADICIONALES DE LA PROTECCION CATODICA

7.1. EN ESTRUCTURAS DE MUELLES

7.1.1. INTRODUCCION

El empleo de estructuras de acero en las construcciones marítimas se vuelve cada vez más difundido y aceptado en el mundo entero, en virtud de sus excelentes propiedades mecánicas asociadas a un costo global muy atractivo, especialmente en las instalaciones de gran tamaño. Sin embargo, el verdadero suceso de este material se debe fundamentalmente al desarrollo de una tecnología de prevención y combate de la corrosión en agua de mar, de bajo costo y de gran eficacia, lo cual fue conseguido con el empleo adecuado de la protección catódica, asociada o no, con un revestimiento; logrando de esta manera preservar, por un

período de tiempo muy largo, la integridad de las estructuras de acero en contacto con el agua de mar.

7.1.2. CARACTERISTICAS DEL AGUA DE MAR

Las propiedades corrosivas del agua de mar se encuentran directamente relacionadas con la cantidad de sal que ésta posea. En general, la salinidad de los océanos es prácticamente constante, situándose alrededor de 3,5% a 4%. Esta salinidad está representada, aproximadamente, por la composición química mostrada en la Tabla XXXIV.

TABLA XXXIV
Cantidades aproximadas de sales que componen el agua de mar

Sal	Cantidades (%)
NaCl	77,8
MgCl ₂	10,9
MgSO ₄	4,7
CaSO ₄	3,6
K ₂ SO ₄	2,5
CaCO ₃	0,3
MgBr ₂	0,2

Fuente: GENTIL, V, Proteção Catódica, IEC - Instalações e Engenharia de corrosão Ltda., Rio de Janeiro, 1981

Las sales que se encuentran disociadas en el agua de mar hacen que ésta se convierta en un excelente electrolito, presentando una baja resistividad eléctrica.

La resistividad media del agua de mar, determinada en función de trabajos realizados en varios países, se sitúa entre 20 a 100 ohm-cm. En lugares como bahías que reciben ríos, podemos encontrar resistividades de hasta 1.200 ohm-cm.

Es importante citar que ciertos iones son particularmente agresivos a varios materiales, principalmente el ión cloruro (Cl^-) que destruye la pasividad de los aceros inoxidables ocasionando la corrosión.

Otro factor que agrava el índice de corrosividad del agua de mar es la polución, la cual produce una disminución de la resistividad del agua.

7.1.3. CORROSION DEL ACERO EN AGUA DE MAR

La corrosión del acero en agua de mar, de un modo general y en función de experiencias

realizadas en diversas instalaciones marítimas de varios países, puede ser considerada aproximadamente como de 0,005 pulgadas por año cuando las condiciones son normales.

Existe, sin embargo, una serie de factores que hacen que esta tasa sea considerablemente mayor, ocasionando la destrucción de la estructura en un tiempo bastante corto. La literatura especializada registra casos de estructuras metálicas de muelles que fallaron apenas después de 10 años de servicio.

Los factores que más influyen en la variación de la tasa de corrosión son: el empleo de revestimientos protectores, la velocidad del agua de mar, las mareas, la polución, el tipo de estructura, la resistividad eléctrica del agua, el pH y el grado de aereación del medio.

La corrosión en tales condiciones es de naturaleza electroquímica y ocurre en función de los factores descritos anteriormente, asociada a las heterogeneidades que existen en los aceros comunes. En conse-

cuencia, se produce la formación de pilas de corrosión en la superficie metálica, causando su destrucción.

En general, en las estructuras marítimas distinguimos cinco zonas distintas, presentando tasas de corrosión también diferentes. Las zonas correspondientes a las variaciones de la marea y oleajes, ilustradas en la Fig. 7.1., son las zonas más críticas para la estructura, ya que están sujetas a condiciones alternadas de aereación. Las regiones permanentemente sumergidas y la región enterrada, sufren ataques corrosivos menos intensos.

7.1.4. SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA

La Protección catódica se constituye en el método más eficiente para la protección de estructuras metálicas constantemente sumergidas en agua de mar. Consiste básicamente en suministrar, a la superficie que se desea proteger, un flujo permanente de electrones con el fin de obtener sólo reacciones catódicas, eliminando con eso el desgaste de la estructura.

De acuerdo a la manera en que el flujo de electrones es inyectado a la superficie metálica, existen dos sistemas básicos de Protección catódica, que son: el sistema galvánico y el sistema de corriente impresa.

La selección de uno u otro sistema depende de las condiciones de instalación, asociadas al factor económico.

a. Sistema galvánico.

En el sistema galvánico, conectamos eléctricamente un material anódico a la estructura de acero, formando de esta manera, pilas electrolíticas que establecen un flujo de electrones que alcanza a la estructura metálica modificándole el potencial natural.

Los materiales normalmente empleados para ser conectados a la estructura metálica, son las aleaciones de zinc, aleaciones de magnesio y, más recientemente, las aleaciones de aluminio. Estos materiales son mucho más activos que el acero, en el

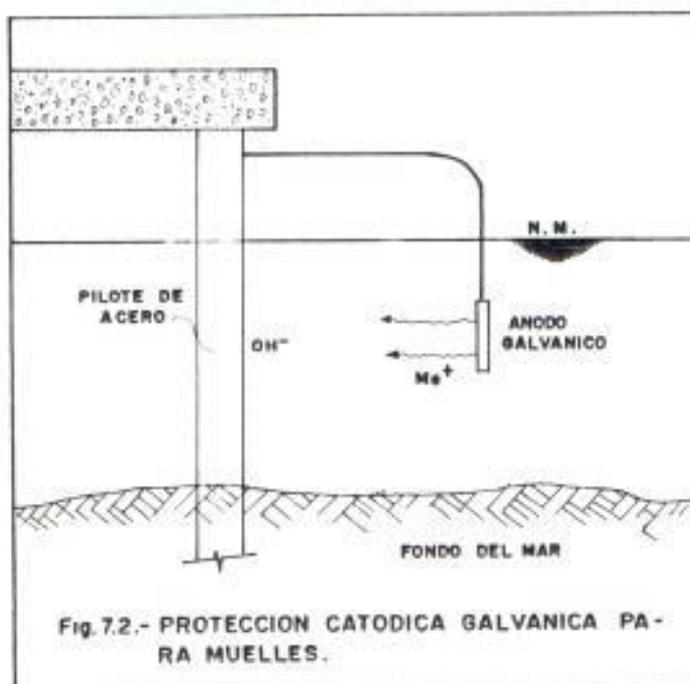
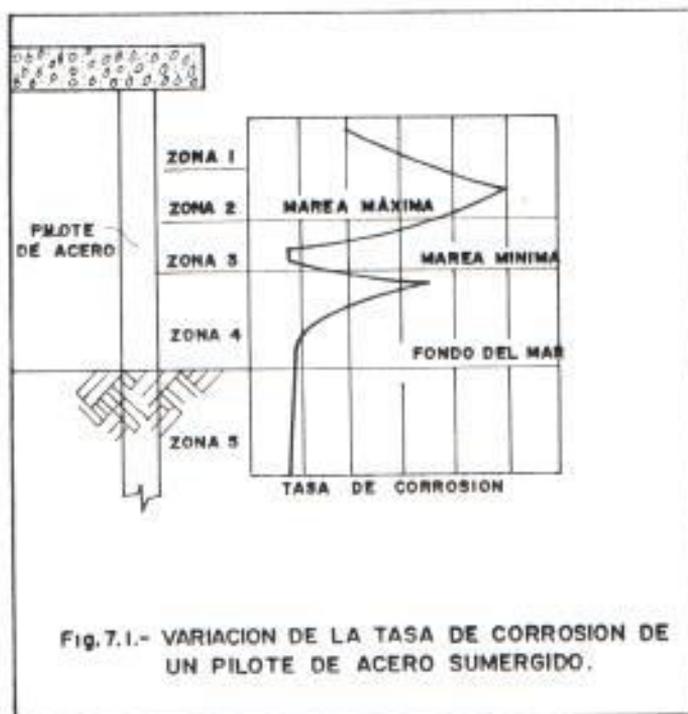
agua de mar, funcionando de esta manera como ánodos de sacrificio, conforme a lo ilustrado en la Fig. 7.2

El potencial natural (sin protección) del acero en el agua de mar es del orden de $-0,55$ V, medido en relación al electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl). En cambio, las aleaciones de zinc y las de aluminio presentan, en relación al mismo electrodo, un potencial natural de $-1,05$ V y las de magnesio pueden alcanzar un potencial de hasta $-1,75$ V, lo cual establece sus propiedades para ser empleados como ánodos de sacrificio.

La polarización del acero a un potencial de $-0,8$ V, en relación al electrodo Ag/AgCl, es universalmente aceptado como un criterio de protección integral de la estructura.

b. Sistema por corriente impresa.

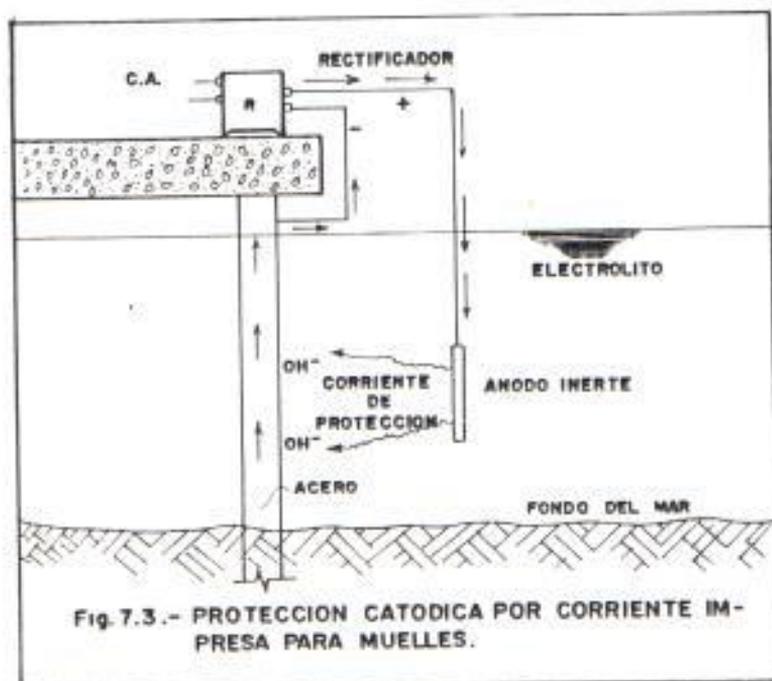
En el sistema de protección catódica por corriente impresa, la corriente eléctrica de protección es entregada por una fuente



externa de fuerza electromotriz combinada con el uso de ánodos, conforme a lo ilustrado en las Figs. 7.3 y 7.4. El empleo de los ánodos es con el objeto de completar el circuito.

Los materiales normalmente utilizados como ánodos en sistemas de corriente impresa, para la Protección catódica de estructuras metálicas sumergidas, son: el grafito, una aleación de hierro con un alto contenido de silicio y bajo contenido de cromo, una aleación de plomo-antimonio-plata, y el titanio con revestimiento de platino (titanio platinizado); los cuales presentan la característica de ser inertes en medios acuosos. De los ánodos nombrados anteriormente, el de titanio platinizado presenta la ventaja de una vida más larga.

En cuanto a la fuente externa de fuerza electromotriz continua, podemos utilizar una batería, un generador de corriente continua o un rectificador de corriente. En aquellos lugares donde existe suministro de corriente alterna, el empleo del



rectificador es la mejor solución.

Considerando la agresividad de la atmósfera marítima, el tipo de rectificadores más adecuado para una instalación de Protección catódica en este ambiente es el tipo sumergido en aceite.

En aquellos muelles donde se opera con productos explosivos, la instalación del sistema de Protección catódica necesita ser realizada con mayores cuidados, empleando para ello rectificadores y accesorios a prueba de explosión.

7.2. EN TANQUES DE ALMACENAMIENTO

7.2.1. INTRODUCCION

Los tanques metálicos para almacenamiento de petróleo y sus derivados, están sujetos a procesos corrosivos internos y externos, ocasionados por la presencia de electrolitos agresivos.

La protección anticorrosiva para las partes aéreas se logra con la aplicación de pintu-

ras o revestimientos; mientras que para las partes enterradas o en contacto con el suelo, así como para las partes sumergidas, tanto externas como internas, la aplicación de la protección catódica ha demostrado ser el medio más eficaz para el control de la corrosión.

La importancia de un control efectivo de la corrosión en tanques de almacenamiento ha ido aumentando considerablemente a medida que se proyectan tanques de mayor capacidad, en los cuales los costos de parada y de mantenimiento son extremadamente elevados.

7.2.2. TIPOS DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO

a. Tanques aéreos apoyados en el suelo.

En su mayoría, los tanques utilizados en la industria del petróleo son tanques aéreos cuyo fondo se encuentra en contacto con el suelo. Estos tanques son utilizados para el almacenamiento de petróleo bruto así como para la mayoría de sus derivados.

Los problemas de corrosión en estos tanques, los cuales pueden ser controlados por la aplicación de Protección catódica, se restringen al fondo del mismo (partes externas e internas).

b. Tanques enterrados.

Los tanques metálicos totalmente enterrados tienen un uso poco común cuando se trata de almacenamiento en gran escala. Su uso más generalizado es en la distribución de derivados del petróleo.

En estos tanques, es común la aplicación de la Protección catódica para su parte externa y, en algunos casos, para su parte interna cuando existe presencia de agua permanente en el interior del tanque.

c. Tanques sumergidos.

Los tanques sumergidos tienen un uso restringido y son usados solamente en casos especiales, tales como en el almacenamiento de petróleo proveniente de

campos submarinos.

La Protección catódica de estos tanques incluye la protección externa, principalmente para tanques sumergidos en agua salada; y protección interna, en el caso de acumulación de agua en su interior.

7.2.3. PROTECCION CATODICA INTERNA

El petróleo bruto y sus derivados no son electrolitos, lo cual nos llevaría a pensar en la no justificación de protección catódica interna; sin embargo, de un modo general, los tanques de petróleo bruto poseen pequeños depósitos de agua salada en el fondo y, por tanto, deben recibir protección de dicha región en contacto con el agua.

a. Protección catódica galvánica.

La utilización de Protección catódica galvánica es, en general, la más adecuada para la protección anti-corrosiva interna de tanques metálicos, debido a que las áreas a proteger son casi siempre pequeñas.

La protección galvánica interna de los tanques es efectuada con ánodos de zinc o de aluminio. Los ánodos de magnesio son utilizados sólo cuando el electrolito es agua dulce, ya que para el agua salada la eficiencia de los mismos es extremadamente pequeña.

Después de haber sido dimensionado el sistema de protección galvánica, los ánodos son distribuidos en el interior del electrolito de modo que la corriente sea inyectada en toda la superficie a proteger. La Fig. 7.5 muestra un tipo de distribución de ánodos en el fondo del tanque, con el objetivo de proteger únicamente la superficie interna del fondo.

b. Protección catódica por corriente impresa

La Protección catódica interna por corriente impresa es muy poco utilizada para tanques de almacenamiento; sólo se justifica técnica y económicamente su utilización cuando las áreas a proteger son muy grandes y suficientemente próximas. La utilización de este tipo de



sistema puede ser aún más justificable cuando se requiere una protección de los tanques por un período muy largo de tiempo (superior a los 15 años).

7.2.4. PROTECCION CATODICA EXTERNA

Todos los tipos de tanques están sujetos a procesos corrosivos en sus partes externas, especialmente aquellos tanques que se encuentran sumergidos y enterrados, ya que la totalidad de su superficie externa está en contacto con el electrolito, de aquí que se establezca la necesidad inevitable del empleo de un sistema de Protección catódica para la superficie externa de los tanques de almacenamiento.

Para una aplicación eficiente del sistema de Protección catódica, es necesario cubrir con un adecuado revestimiento la superficie externa de los tanques; así mismo es importante aislar eléctricamente los tanques, ya sea en forma individual o en conjunto, a fin de poder concentrar la corriente de protección hacia la estructura que se desea proteger, evitando de esta manera las fugas de

corriente hacia estructuras metálicas vecinas.

a. Protección catódica galvánica.

La protección galvánica externa de los tanques puede ser efectuada con ánodos de zinc, aluminio o magnesio; siendo común la aplicación de los dos primeros para electrolitos de muy baja resistividad, entre 300 a 1.000 ohm-cm, y los de magnesio para electrolitos de hasta 3.000 ohm-cm.

Para la aplicación del sistema de Protección catódica galvánica existen dos métodos o prácticas aconsejables, las cuales son:

- Protección individual: La protección individual exige el aislamiento eléctrico de cada tanque, siendo cada uno tratado como un sistema aparte. Esta práctica es considerada buena, sólo cuando los tanques están lo suficientemente apartados uno del otro y cuando se dispone de un aislamiento eléctrico

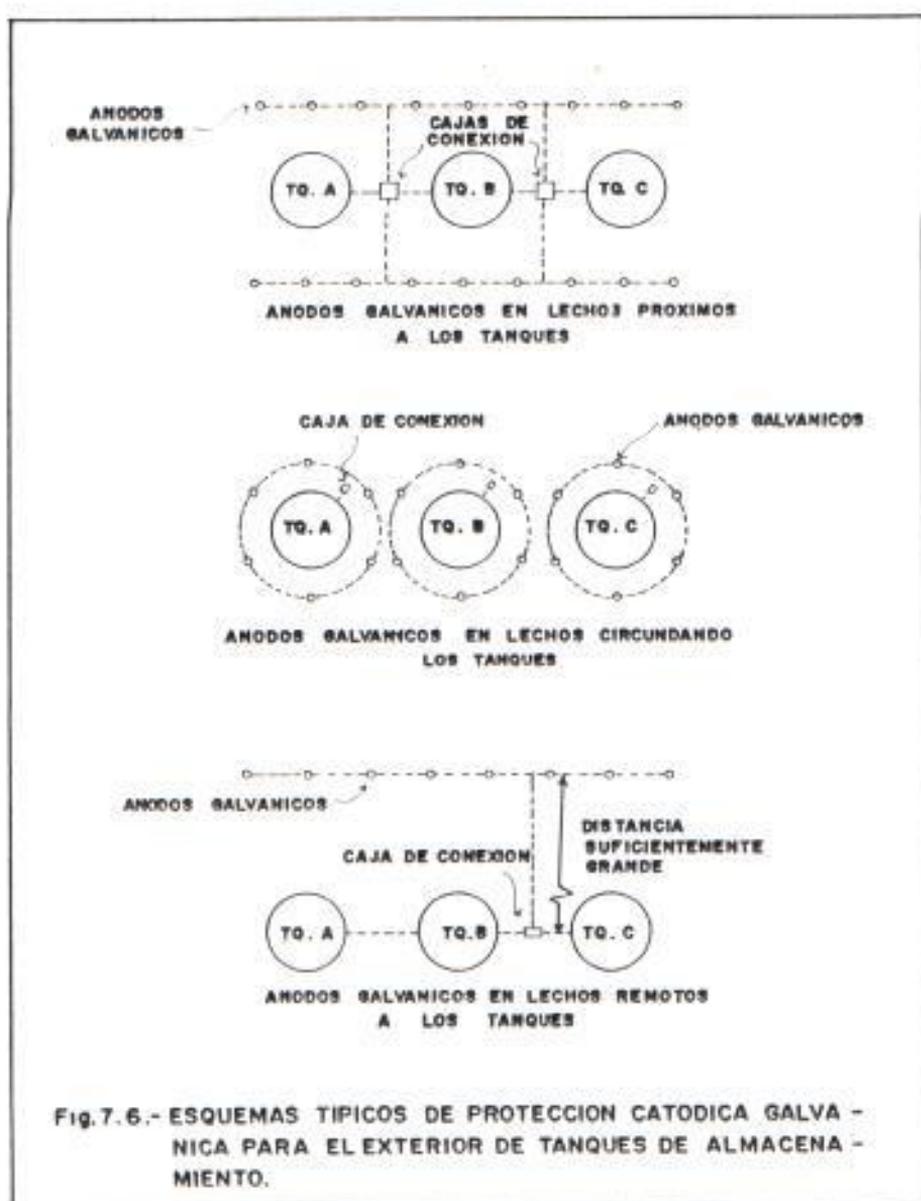
eficiente entre los mismos.

- Protección para un grupo de tanques:
Este es el tipo más común de protección de tanques de almacenamiento, en el cual un grupo de tanques es considerado como un sistema único, requiriendo el aislamiento eléctrico sólo entre el grupo de tanques y otras estructuras vecinas.

La ubicación de los ánodos, tanto para la protección individual como para la protección por grupos, puede ser escogida entre las diversas alternativas posibles, las cuales se muestran en la Fig. 7.6, dependiendo de la disponibilidad de espacio y de la filosofía adoptada para el proyecto.

b. Protección catódica por corriente impresa

La Protección catódica externa por corriente impresa, es utilizada, de modo general, para todos los tipos de tanques, con cualquier disposición y en todos los tipos de electrolito; constituyéndose



así, en la práctica más común de control de la corrosión externa en tanques metálicos.

El dimensionamiento del sistema es efectuado considerando los siguientes factores:

- Corriente necesaria de protección: Se emplea una densidad de corriente que varía entre 10 mA/m^2 y 60 mA/m^2 , dependiendo de la resistividad del electrolito (desde suelos de alta resistividad hasta suelos conteniendo agua salada) y considerando la eficiencia del revestimiento, si existiere.
- Ánodos inertes: Se utilizan ánodos de bajo consumo (grafito, hierro-silicio e hierro-silicio-cromo), comúnmente envueltos en su backfill e instalados en forma vertical u horizontal.
- Equipos para la inyección de la corriente: Se emplean rectificadores seleccionados en función de la corriente necesaria, de la resistencia

del circuito y de la disponibilidad de corriente alterna para su alimentación.

Al igual como en el caso de la aplicación de la Protección catódica galvánica externa, existen dos prácticas o métodos comunmente utilizados para la Protección catódica por corriente impresa los cuales son:

- Protección dirigida únicamente a los tanques: Para este tipo de protección se vuelve necesario el aislamiento de todos los tanques en relación a las demás estructuras vecinas, empleándose una conexión entre los tanques mediante cables eléctricos.

- Protección global: Este tipo de protección es utilizada con mayor frecuencia, ya que la protección está dirigida no solamente a los tanques, sino también a todas las estructuras ubicadas en la vecindad de los mismos, incluyéndose entre éstas: tuberías, electroductos, mallas de aterramiento, etc. Para ello, se aísla eléctricamente tan sólo

la salida del parque de tanques en relación a las estructuras extrañas al mismo.

La desventaja de este procedimiento radica en el menor aprovechamiento de la corriente inyectada, en lo que concierne a la protección de los tanques, principalmente debido a la inclusión de la malla de aterramiento.

En lo que se refiere a la ubicación de los ánodos, ésta no difiere, de un modo general, si la protección está dirigida únicamente a los tanques o si es aplicada en forma global.

Los esquemas más comunes de ubicación de la cama de ánodos son mostrados en la Fig. 7.7. Todos los esquemas indicados son eficientes en su utilización, debiendo el proyectista definir el esquema más adecuado para cada caso, basándose, entre otros factores, en: el congestionamiento del Área en términos de estructuras enterradas, el espacio disponible para la instalación de los áno-

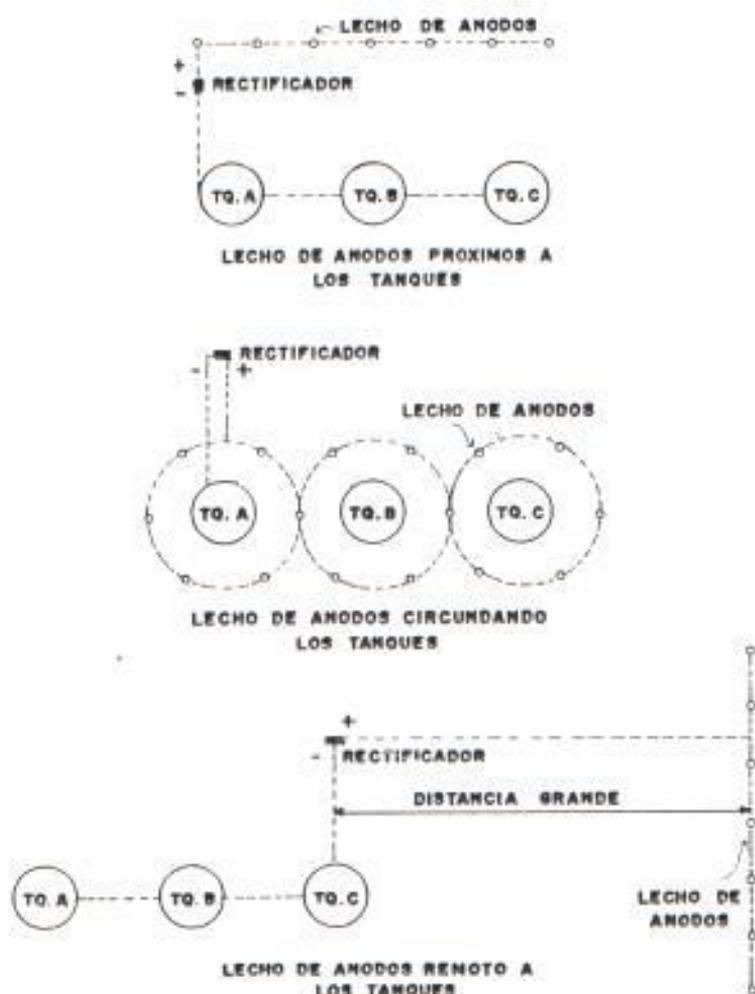


Fig. 7.7.- ESQUEMAS TÍPICOS DE PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA PARA EL EXTERIOR DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO.

dos, el tamaño de los tanques (diámetro), el número de tanques, etc.

7.2.5. INFLUENCIA DE LOS ATERRIZAMIENTOS DE LOS TANQUES SOBRE LA PROTECCION CATODICA

El aterrizamiento eléctrico de los tanques metálicos ha sido una práctica común contra el peligro que encierra la electricidad estática, caída de rayos, etc. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que el aterrizamiento de tanques metálicos en contacto con el suelo es innecesario. La razón principal en que se basa dicha conclusión, radica en el hecho que en climas húmedos, e inclusive en los secos, una resistencia tanque-tierra del orden de 10^6 ohm es suficiente para disipar la electricidad estática.

Otra razón fundamental que influye en la no aplicación de un aterrizamiento en los tanques metálicos, constituye el serio problema que ocasionan a la Protección catódica de los mismos, debido a las siguientes razones:

- Siendo los aterrizamientos, estructuras de

baja resistencia eléctrica conectadas en paralelo a los tanques, éstos ocasionan un desvío de cantidades considerables de corriente de protección.

- Las superficies de los aterrizamientos son áreas adicionales a ser protegidas, las cuales consumen grandes cantidades de corriente.
- Los aterrizamientos, cuando son realizados con cobre, consumen grandes cantidades de corriente, en virtud de que este metal es muy catódico en relación al acero y es muy difícil de ser colocado en el mismo potencial de protección del acero.

Los tanques metálicos, debido a que poseen grandes superficies en contacto con el suelo, principalmente en los grandes tanques y/o en grupo de tanques, son considerados auto-aterrados; sin embargo, cuando es estrictamente necesario aterrarlos, deben ser preferidos, para este propósito, materiales metálicos anódicos con respecto al acero (Zn, Al, Mg). El aterrizamiento convencional de cobre debe ser siempre evitado

porque, además de dificultar la protección catódica, también ha sido causa frecuente de grandes problemas de corrosión, debido a la fuerte pila formada por el cobre y el acero, con el inevitable consumo de este último.

7.2.6. CRITERIOS DE PROTECCION

a. Potenciales de protección.

Los potenciales de protección, para tanques metálicos de acero, son los valores universalmente aceptados de $-0,85$ V en relación al electrodo de Cu/CuSO_4 y de $-0,89$ V en relación al electrodo de Ag/AgCl .

Para tanques aéreos apoyados en el suelo, es común verificar el potencial de protección en cuatro puntos ubicados en los bordes de los tanques y, excepcionalmente, en otras posiciones, como en la parte central del fondo, lo cual se logra cuando han sido instalados electrodos de referencia permanentes durante la fase de montaje del tanque.

b. Distribución de la corriente en un grupo de tanques.

La distribución de la corriente en los tanques, en el caso de un grupo de tanques, está en función directa de la ubicación de los ánodos y de la resistividad del suelo a lo largo de los tanques.

c. Distribución de la corriente en tanques de gran diámetro.

En los tanques de gran diámetro, la mayor dificultad consiste en proteger el centro del tanque. Por lo tanto, para garantizar la protección en el centro del tanque, se deberá realizar un estudio minucioso sobre la ubicación de los ánodos; ya que, una ubicación inadecuada de los mismos, llevaría a restringir la protección únicamente hacia un anillo próximo a la periferia.

En sistemas bien proyectados es común adoptar, como criterio de protección, un valor de potencial en los bordes, de -1 V

en relación al electrodo de Cu/CuSO_4 para de esta manera garantizar un potencial mínimo de $-0,85 \text{ V}$ en el centro. Es preferible en este caso, la instalación de electrodos de referencia permanentes en el centro del tanque.

7.3. EN LOS PIES Y ANCLAJES DE LAS TORRES DE LINEAS DE TRANSMISION

7.3.1. PROTECCION CATODICA PARA LOS PIES DE LAS TORRES DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

Los pies de las torres de las líneas de transmisión eléctrica son generalmente contruidos de acero o acero galvanizado y por lo tanto están sujetos a las mismas condiciones corrosivas que afectan a otras estructuras metálicas enterradas, como tuberías de agua, oleoductos y gasoductos.

La galvanización de las estructuras de acero provee normalmente una protección razonable contra la corrosión tan sólo por varios años pero, cuando la torre se encuentra en suelos altamente corrosivos, o donde existen contrapesos contruidos de cobre, la galva-

nización se vuelve ineficiente mucho antes que la torre llegue al final de su periodo económico de vida (que se sitúa entre veinte y treinta años).

Las experiencias demuestran que la mayor parte de los daños por corrosión ocurren en suelos con resistividades eléctricas inferiores a 5.000 ohm-cm, teniéndose consecuencias desastrosas en locales con menos de 1.000 ohm-cm. De lo anteriormente expuesto, se establece que la protección catódica con ánodos galvánicos (magnesio o zinc), constituye una solución simple, económica, práctica y eficiente para la eliminación de la corrosión en estructuras de torres de líneas de transmisión, siendo su aplicación recomendada en suelos de hasta 10.000 ohm-cm.

7.3.2. PROTECCION CATODICA PARA ANCLAJES

Cuando son empleados anclajes metálicos en las torres de las líneas de transmisión, es común realizar una conexión entre los anclajes y el conductor neutro de la línea eléctrica, con el objetivo de obtener una

baja resistencia de aterrizamiento. Como la mayoría de las varillas y componentes del aterramiento son de cobre (o de acero revestido de cobre), esta conexión, ocasiona la formación de pilas de corrosión debido a la diferencia de potencial que se establece entre el cobre y el zinc de galvanización de los anclajes (o entre el cobre y el acero, en el caso que los anclajes no estén galvanizados), ocasionando la corrosión de los anclajes en beneficio de las varillas y componentes de cobre del sistema de aterrizamiento. Una corriente continua de origen galvánica de apenas 10 mA, producida por la pila formada, puede producir daños severos en las estructuras de los anclajes, llegando a causar fallas mecánicas en tan sólo 5 años.

En este caso, el uso de los ánodos de zinc proporciona una solución económica y duradera, evitando la corrosión de los anclajes. Igualmente, la utilización de ánodos de zinc en sustitución de los materiales de cobre (o acero con revestimiento de cobre) empleados en los sistemas de aterrizamientos, elimina las indeseables pilas galvánicas

causadas por el contacto del cobre con el acero, siendo inclusive recomendable esta sustitución en los sistemas que ya se encuentran en operación, principalmente en los lugares donde se tengan bajas resistividades eléctricas.

7.3.3. INSTALACION DE LOS ANODOS GALVANICOS

Tanto para el primer caso como para el segundo, los ánodos galvánicos son instalados en una envoltura conductora (backfill) compuesta en un 50% de yeso hidratado y un 50% de sodio. La cantidad y dimensiones de los ánodos, así como la distancia entre cada ánodo y la estructura, deberán ser determinadas en función de las dimensiones de las partes enterradas de las estructuras, del tratamiento de las superficies metálicas (galvanizadas, pintadas, etc), de la existencia o no de un aterrizamiento eléctrico de cobre y de la resistividad eléctrica del suelo.

7.3.4. PROCEDIMIENTO PARA EL ESTUDIO DE LA APLICACION DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA EN TORRES DE LINEAS DE TRANSMISION

Con el fin de garantizar una completa seguridad operacional, en lo que respecta a problemas de corrosión, de las líneas de transmisión de energía eléctrica construidas con torres metálicas, el siguiente procedimiento deberá ser adoptado rutinariamente para el estudio de la aplicación de la Protección catódica en dichas torres:

1. Realizar un levantamiento criterioso de las resistividades eléctricas del suelo a lo largo de la trayectoria de la línea, principalmente en las inmediaciones de la construcción de cada una de las torres.
2. Analizar los datos obtenidos en el punto 1 para definir sobre la necesidad o no de la instalación de un sistema de protección catódica.
3. En el caso que resulte necesaria la utilización de un sistema de Protección catódica, se deberá definir si dicha

aplicación se la realiza en todas las torres o solamente en algunas de ellas. Así mismo, en base a las mediciones de campo y considerando los factores técnicos y económicos de la instalación, se deberá escoger el sistema de ánodos galvánicos más adecuado (ánodos de magnesio o de zinc).

4. En lo que respecta a la construcción de nuevas líneas de transmisión, se deberá evitar, siempre que sea posible, la utilización de componentes de cobre conectados a las estructuras de acero, principalmente si la resistividad eléctrica del suelo en el lugar de la construcción fuese baja.

7.4. EN TRANSFORMADORES UBICADOS EN CAMARAS SUBTERRANEAS

7.4.1. INTRODUCCION

En los actuales momentos, las compañías eléctricas empiezan a ser más conscientes del problema que representa el ambiente corrosivo bajo tierra para los sistemas de distribución subterráneos, especialmente en

lo que se refiere a los problemas de corrosión en los transformadores.

Uno de los pasos tomados para eliminar los problemas de corrosión en dichos transformadores es el desarrollo de estudios con el fin de encontrar el material más adecuado para la fabricación de los tanques de los transformadores. Tales estudios, realizados por la Boston Edison Company, demostraron que el empleo de tanques de acero dulce, recubierto de 0,5 milímetros de zinc y pintado con un revestimiento de pintura de asfalto, garantizaba una resistencia adecuada contra la corrosión.

Sin embargo, existen reportes de fallas en los transformadores debido a problemas de corrosión lo cual demuestra que, aunque el tanque de acero dulce recubierto de zinc es bastante resistente a la corrosión, su protección debe ser complementada mediante el empleo adecuado de un sistema de Protección catódica para eliminar completamente dichos problemas.

7.4.2. PRUEBAS DE PROTECCION CATODICA EN TRANSFOR- MADORES SUBTERRANEOS

Con el fin de establecer que la aplicación de un sistema de Protección catódica es el método más efectivo para el combate de la corrosión en transformadores subterráneos, se realizaron pruebas de Protección catódica en transformadores cuyos tanques fueron fabricados de acero dulce revestido con material epoxi.

Una de las pruebas realizadas consistía en mediciones de potenciales tanque-suelo con y sin ánodos de sacrificio y con y sin el neutro del sistema conectado al tanque del transformador. Las mediciones fueron tomadas en el suelo a una distancia no mayor de 8 cm. del transformador y los valores obtenidos se muestran en la Tabla XXXV.

Esta prueba se realizó con la finalidad de mostrar la influencia que ejerce la conexión de los ánodos de sacrificio y/o del neutro sobre los potenciales tanque-suelo y por ende en la velocidad de corrosión a que está sujeto el tanque del transformador.

TABLA XXXV
Potenciales tanque-suelo obtenidos en pruebas efectuadas a un transformador

Conexión al tanque del :		Potenciales tanque-suelo (V)		
Anodo	Neutro de cobre	Lado del tanque cercano al neutro	Sobre el tanque	Lado del tanque opuesto al neutro
Ninguno	No	- 0,63	- 0,62	- 0,63
Ninguno	Si	- 0,21	- 0,16	- 0,26
Magnesio	No	- 1,24	- 1,08	- 1,40
Magnesio	Si	- 0,69	- 0,26	- 1,09
Zinc	No	- 0,92	- 0,85	- 0,97
Zinc	Si	- 0,46	- 0,22	- 0,71

Fuente: SMYTH, D.W. and WALDON, P.L., IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-91 #3, New York, May/June 1972.

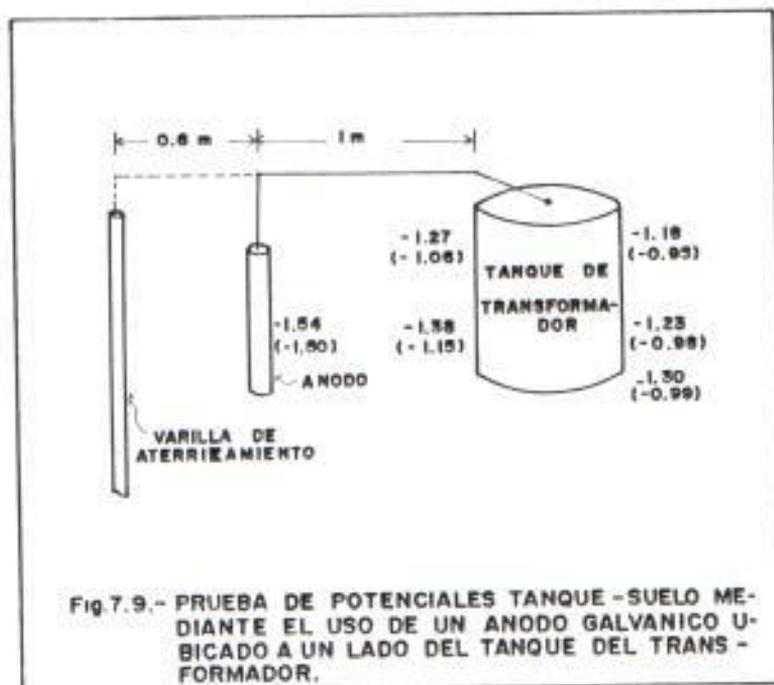
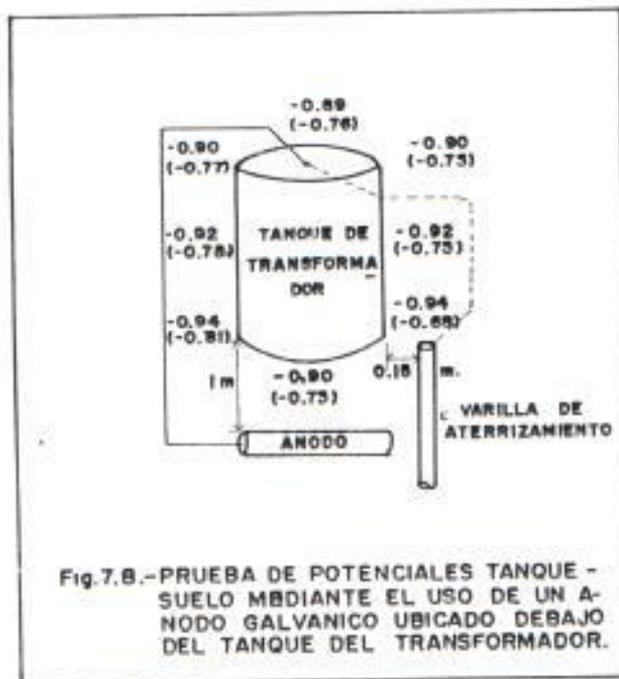
Del análisis de la Tabla XXXV se establece que la conexión de cualquiera de los dos tipos de ánodos, ya sea de magnesio o de zinc, al tanque del transformador, produce un incremento negativo en los potenciales tanque-suelo, estableciéndose la Protección catódica del mismo. De manera contraria, cuando el neutro de cobre es conectado al tanque del transformador, los potenciales tanque-suelo se incrementan positivamente debido a que el cobre es catódico (potencial natural más positivo) con respecto al acero dulce.

Otra de las pruebas consistía en determinar la ubicación más adecuada para los ánodos y

para las varillas de aterrizamiento, para lo cual, tanto el ánodo como la varilla de aterrizamiento fueron trasladados hacia varias localizaciones hasta que los potenciales medidos alrededor del tanque fuesen uniformes. En adición, una serie de mediciones de potenciales fueron tomadas con la varilla de aterrizamiento desconectada del tanque, de tal manera que este tipo de instalación también fuese evaluada. Estas pruebas fueron hechas en suelos preparados con una resistividad promedio de 2.000 ohm-cm.

Las Fig. 7.8 y 7.9 muestran dos de las varias localizaciones que fueron estudiadas. En tales figuras, los valores dados en paréntesis son los potenciales tanque-suelo medidos con la varilla de aterrizamiento conectada al tanque del transformador.

Como se muestra en la Fig. 7.8, las mediciones de potenciales realizadas con la varilla de aterrizamiento desconectada del tanque dieron valores uniformes. Sin embargo, con la varilla de aterrizamiento conectada, los potenciales alrededor del tanque cambiaron significativamente llegándose inclusive a



obtener un potencial tanque-suelo de $-0,68$ V en la esquina del tanque cercana a la ubicación de la varilla de aterrizamiento, de tal manera que problemas de corrosión pueden ser esperados en dicha esquina del tanque cuyo potencial es el menor.

Con el arreglo mostrado en la Fig. 7.9, los potenciales medidos alrededor del tanque dieron valores razonablemente uniformes tanto con la varilla de aterrizamiento conectada al tanque como desconectada del mismo.

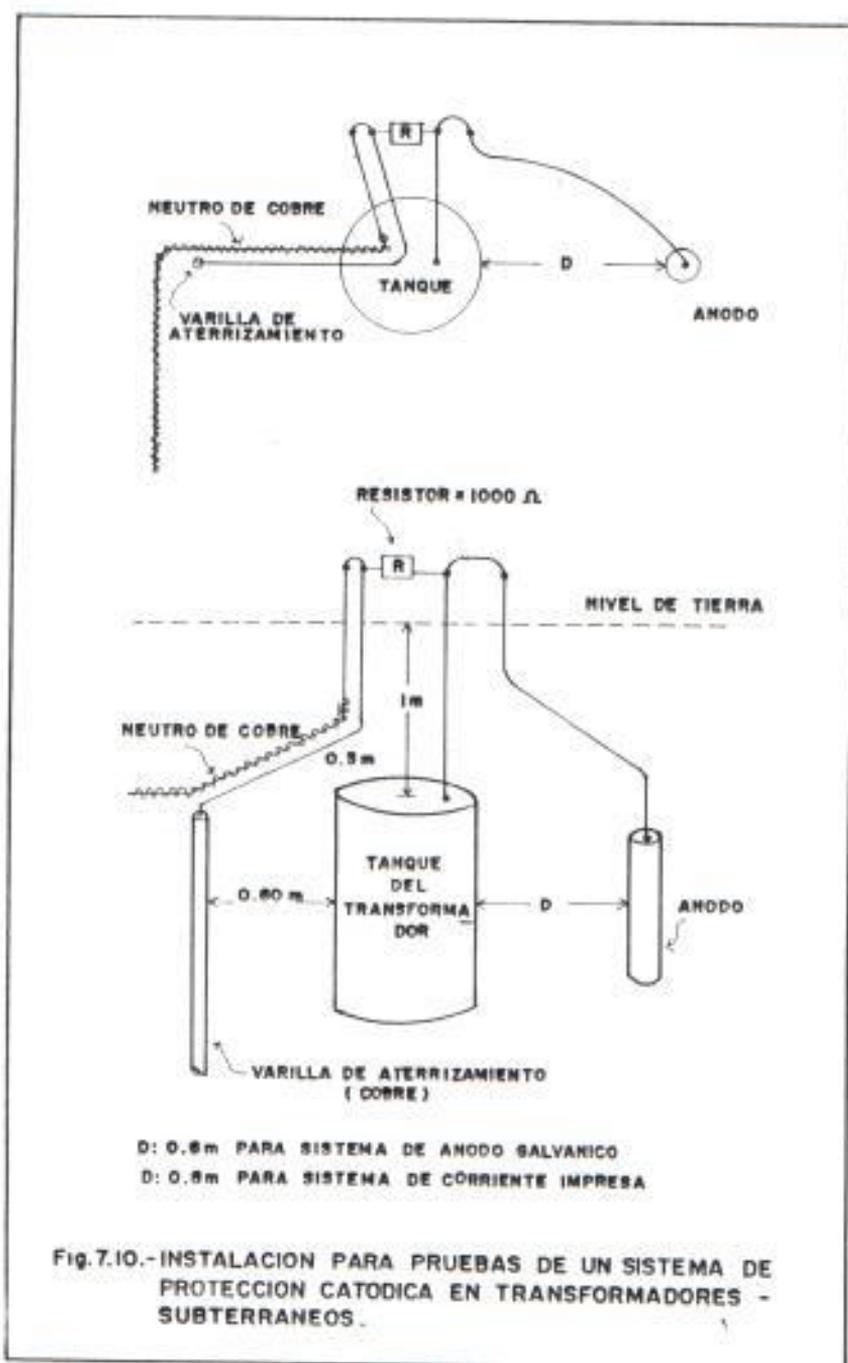
Estas pruebas revelaron que para obtener potenciales tanque-suelo uniformes alrededor de todo el tanque, los ánodos deben estar localizados a una distancia de $0,6$ a $1,2$ metros con respecto a uno de los lados del transformador. La mejor ubicación para la varilla de aterrizamiento fue encontrada en el mismo lado que se instala el ánodo pero a una distancia de $0,3$ a 1 metro a partir de la ubicación del ánodo. En lo que sea posible, tanto la varilla de aterrizamiento como el neutro del sistema, deberán estar aislados del tanque del transformador de tal

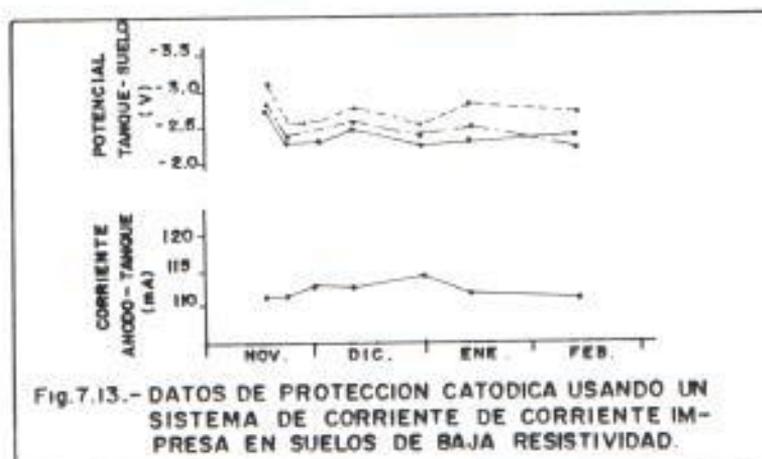
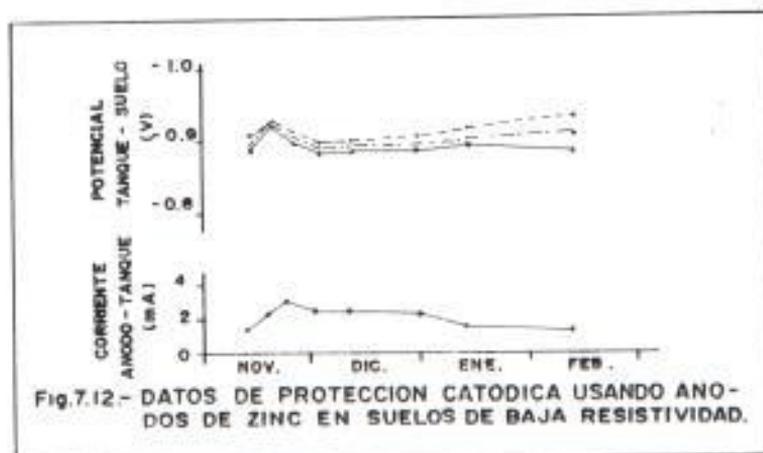
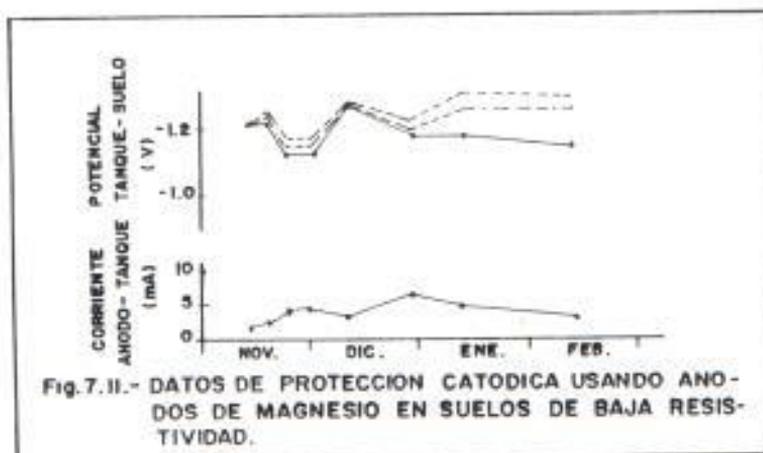
manera de obtener un campo de potenciales mucho más uniformes.

Una vez determinado el mejor arreglo, en cuanto a la ubicación de los ánodos y de la varilla de aterrizamiento, se realizaron las pruebas de Protección catódica utilizando los dos sistemas ya estudiados, esto es, de ánodos galvánicos y de corriente impresa, con la finalidad de evaluar sus resultados y determinar cual sistema es el más adecuado.

La instalación realizada para esta prueba se muestra en la Fig. 7.10. En dicha figura se indica la instalación de un resistor de 1.000 ohm conectada entre el tanque y la interconexión de la varilla de aterrizamiento y el neutro, el cual tiene como finalidad el de simular la mínima resistencia esperada para limitar un alto voltaje.

En las Figs. 7.11, 7.12 y 7.13 se ilustran los datos obtenidos de las pruebas de Protección catódica realizadas en transformadores enterrados en suelos de baja resistividad, para cada uno de los diferentes sistemas de protección.





- LADO DEL TANQUE CERCANO AL ANODO
- · - · - LADO DEL TANQUE CERCANO AL NEUTRO
- CARA SUPERIOR DEL TANQUE

NOTA: POTENCIALES TANQUE-SUELO MEDIDOS UTILIZANDO ELECTRODOS Cu/CuSO_4 .

En lo que se refiere al empleo del sistema de ánodos galvánicos, el análisis de los resultados gráficos establece que el ánodo de zinc provee una adecuada protección al tanque del transformador, mientras que el ánodo de magnesio presenta una ligera sobreprotección del mismo. De la misma forma se establece que el empleo del sistema de corriente impresa provee una considerable mayor protección que la necesitada, produciéndose daños severos en el revestimiento del tanque debido al fenómeno de sobreprotección.

Los datos del mismo tipo de pruebas pero en suelos de alta resistividad se muestran en las Figs. 7.14 y 7.15.

Analizando la Fig. 7.14, en donde el transformador se encuentra conectado a un ánodo de magnesio de 17 libras, se establece que a pesar de que los valores de los potenciales tanque-suelo alrededor del transformador son menores que $-0,85$ V, sin embargo, el transformador puede considerarse catódicamente protegido basado en el criterio del incremento del potencial natural del transforma-

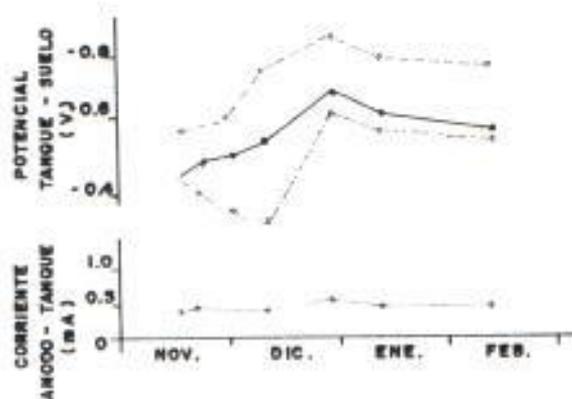


Fig. 7.14.- DATOS DE PROTECCION CATODICA USANDO ANODOS DE MAGNESIO EN SUELOS DE ALTA RESISTIVIDAD.

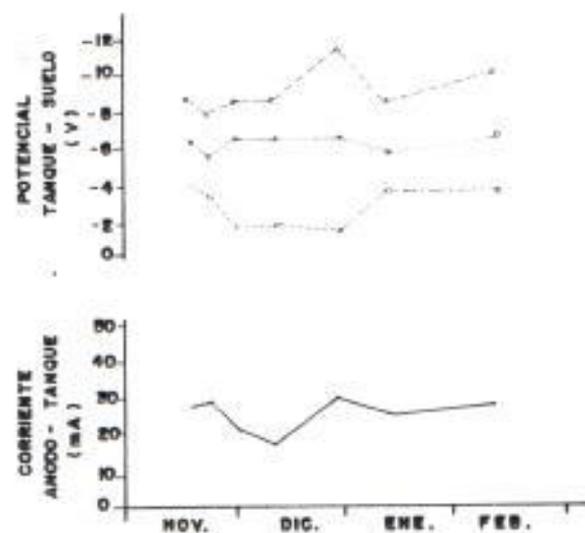


Fig. 7.15.- DATOS DE PROTECCION CATODICA USANDO UN SISTEMA DE CORRIENTE IMPRESA EN SUELOS DE ALTA RESISTIVIDAD.

dor en 300 mV, tal como se puede observar de los datos recopilados para esta prueba en la Tabla XXXVI.

TABLA XXXVI
Potenciales tanque-suelo en un transformador conectado a un ánodo de magnesio

Condiciones	Tiempo de prueba	Potencial tanque-suelo (V)		
		Lado superior cercano al neutro	Sobre el tanque	Lado superior opuesto al neutro
Tanque solo	Inicial	- 0,34	- 0,34	- 0,22
Tanque conectado al ánodo de magnesio	6 semanas	- 0,64	- 0,70	- 0,85

Fuente: SMYTH, D.W. and WALDON, P.L., IEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-91 #3, New York, May/June 1972.

La Fig. 7.15 nos muestra que el uso de un rectificador provee una mayor cantidad de corriente que la necesaria para obtener el potencial mínimo requerido de $- 0,85$ V, lo cual causa problemas de sobreprotección con el consecuente deterioro del revestimiento del transformador y por lo tanto su aplicación no es la más aconsejable.

7.4.3. CONCLUSIONES SOBRE LAS PRUEBAS DE PROTECCION CATODICA

- a. Las pruebas descritas en el numeral 7.4.2 establecen, que para obtener una Protección catódica completa con potenciales tanque-suelo uniformes alrededor del transformador, es fundamental instalar apropiadamente el sistema tal como se sugiere en los arreglos mostrados en el numeral 7.4.4.
- b. Para asegurar una distribución uniforme del potencial tanque-suelo, las varillas de aterrizamiento y los neutros no deberán ser conectados metálicamente al tanque del transformador.
- c. Los Ánodos de magnesio proveen una Protección catódica completa del transformador en suelos de baja y alta resistividad.
- d. Los Ánodos de zinc proveen una Protección catódica completa del transformador en suelos de baja resistividad, hasta los 1.000 ohm-cm.

- e. Los sistemas de corriente impresa elevan los potenciales tanque-suelo a un valor mucho mayor de lo necesario, lo que causaría serios problemas de deterioro del revestimiento del transformador, por lo que su uso no es aconsejable.

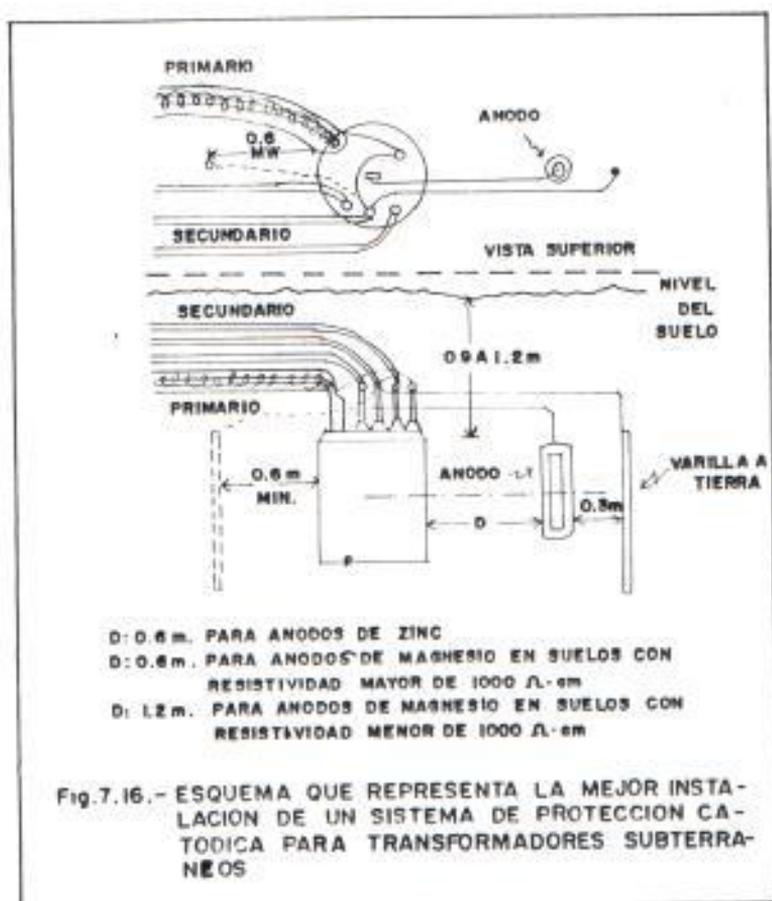
7.4.4. GUIA DE INSTALACION DE UN SISTEMA DE PROTECCION CATODICA EN TRANSFORMADORES SUBTERRANEOS

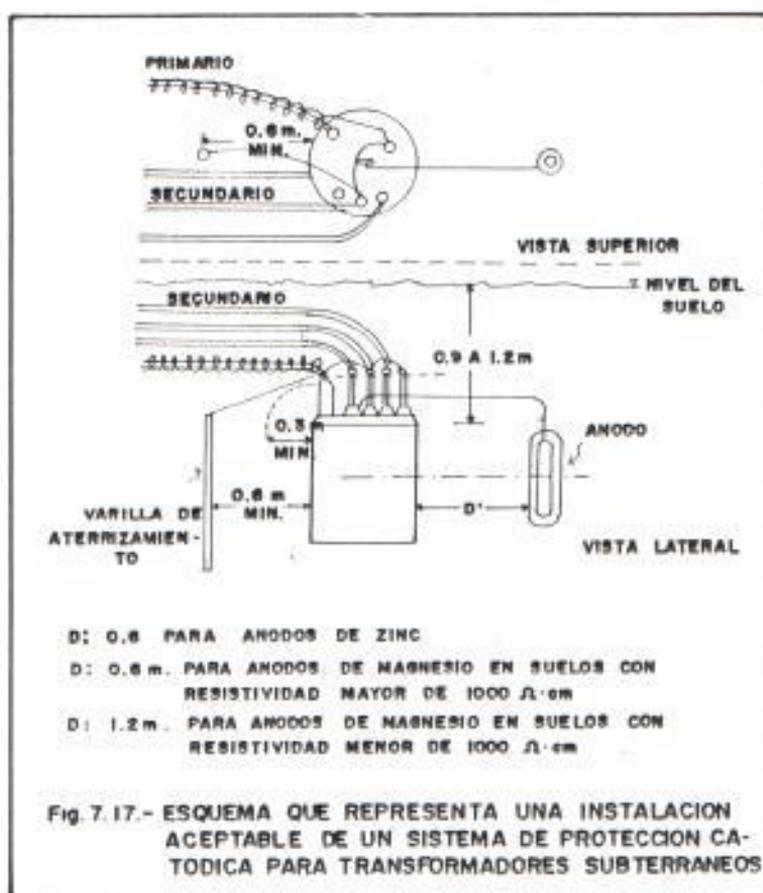
- a. Se deberá tener mucho cuidado en el manipuleo del transformador con el fin de evitar daños en el revestimiento del mismo.
- b. Es muy importante rellenar completamente el espacio alrededor del transformador. La existencia de vacíos alrededor del mismo podría impedir la transmisión adecuada del calor y la recepción de la corriente de protección por parte del tanque.
- c. Todos los conductores metálicos que se encuentran al desnudo deberán ser aislados y alejados del tanque del transforma-

dor. Este procedimiento se realiza debido a las siguientes razones:

1. Para minimizar la posibilidad de un contacto directo de los conductores de cobre con el tanque del transformador, evitando de esta manera una mal funcionamiento del sistema de Protección catódica.
2. Para proveer una mejor Protección catódica del tanque evitando la interacción a través del suelo entre el tanque y los conductores, aunque entre ellos no exista un contacto directo.
3. Para minimizar la posibilidad de corrosión de cualquier conductor desnudo, resultante de la distribución de las corrientes de corrosión desde el ánodo al tanque.

Siguiendo las guías dadas anteriormente, se ha establecido dos arreglos para la instalación de transformadores subterráneos, los cuales se muestran en las Figs. 7.16 y 7.17.





La Fig. 7.16 muestra lo que se ha establecido como la mejor instalación, la cual requiere la aislación (mediante tubería plástica o cinta aislante apropiada para ambientes bajo tierra) de todos los conductores desnudos dentro de un radio de 2,5 metros del transformador.

La Fig. 7.17 muestra un tipo de instalación aceptable, la cual requiere un espaciamiento mínimo de 0,3 metros entre el tanque y todos los demás conductores que se encuentren al desnudo.

CAPITULO VIII

PROYECTO DE CALCULO DE PROTECCION CATODICA DE UNA TUBERIA ENTERRADA

8.1. ESPECIFICACIONES PARA LA PROTECCION CATODICA

El presente numeral se orienta a establecer los aspectos fundamentales que deben ser tomados en consideración para el diseño y ejecución del sistema de Protección catódica para el poliducto TRES BOCAS-PASCUALES.

Antes de la iniciación del proyecto de Protección catódica, resulta necesario conocer la importancia gravitante que tiene para la vida económica del país el adecuado funcionamiento del poliducto antes citado. El poliducto Tres Bocas-Pascuales ha sido estudiado y construido con la finalidad de transportar productos hidrocarburíferos acabados desde los buques tanqueros acoderados en el terminal Tres Bocas, ubicado en la zona del estero salado al suroeste de Guayaquil, hasta el patio de almacena-

miento existente en el terminal Pascuales, desde donde se realiza la distribución del combustible para la ciudad de Guayaquil y la zona sur del país, cuyo consumo es del 60 % de la necesidad nacional. Los productos hidrocarburíferos destinados a ser transportados através del poliducto son:

- Gasolina Super 92
- Gasolina 80
- Kerosene
- Diesel-oil

Bajo las consideraciones antes citadas, resulta imprescindible el diseño de un sistema de Protección catódica para dicho poliducto a fin de protegerlo contra daños por corrosión que pudiesen causar la paralización total del transporte de combustible con las consecuentes pérdidas económicas que ésto conllevaría.

Una vez establecida la imperiosa necesidad de instalar un sistema de Protección catódica para el poliducto Tres Bocas-Pascuales, y con la finalidad de que el proyecto sea adecuadamente ejecutado, será necesario contar con ciertas informaciones preliminares acerca del poliducto en estudio.

Una de las principales fuentes de información es la planimetría, con las correspondientes coordenadas, de la región donde será instalado el poliducto. Dicha planimetría permite obtener datos que ayudan a determinar la existencia o no de estructuras metálicas cercanas a la tubería o la presencia de otros sistemas de protección catódica que pudiesen ocasionar problemas de interferencia catódica. Así mismo, permite determinar la existencia o no de líneas de alta tensión próximas al poliducto que pudiesen originar corrientes de fuga que ataquen al mismo, o en el mejor de los casos para considerar la probable utilización de dichas líneas de energía eléctrica con el fin de alimentar los rectificadores, si es que el sistema seleccionado es por corriente impresa. Para este proyecto específico, la planimetría que indica el recorrido de la tubería se ilustra en la Fig. 8.1.

Otras informaciones de vital importancia para el proyecto, tales como la naturaleza del terreno y el tipo de tubería que va a ser utilizada, se estudiarán más ampliamente en la sección 8.2 de este Capítulo.

Con todas estas informaciones, el sistema de Protección catódica se orientará a proteger, contra la

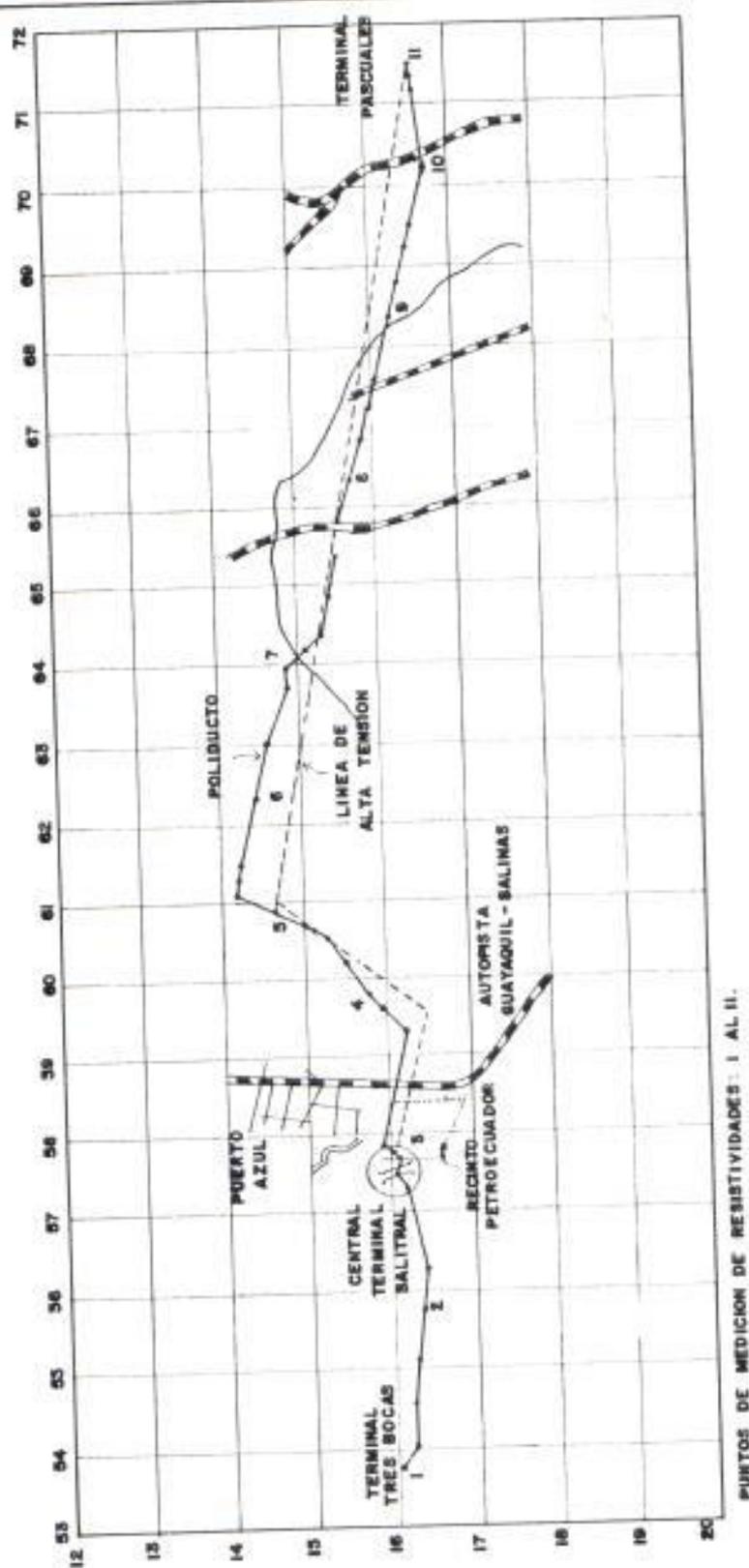


Fig. 8.1.- PLANIMETRIA DEL RECORRIDO DEL POLIDUCTO. TRES BOCAS - PASCUALES.

corrosión, la superficie externa de la tubería en toda su longitud, para cuyo fin se deberá obtener un adecuado nivel de protección (mayor que $-0,85$ V con referencia a un electrodo de Cu/CuSO_4) en los puntos extremos del poliducto. Otra de las especificaciones a ser tomadas en cuenta para la realización del proyecto, es que el sistema tenga una vida útil entre 15 a 20 años, con la finalidad de que sea económica y operativamente atractivo.

Una vez seleccionado y dimensionado el sistema, la ejecución de la instalación del mismo, deberá cumplir con todos los detalles señalados en los planos tanto en dimensionamiento como en calidad de materiales a fin de evitar problemas en su funcionamiento.

8.2. TIPOS DE SUELOS Y CLASE DE TUBERIAS

8.2.1. NATURALEZA DEL TERRENO

Para determinar las características corrosivas de la zona donde ha sido instalado el poliducto, resulta necesaria la ejecución de mediciones de resistividad eléctrica a lo largo del recorrido del mismo.

Haciendo referencia al plano presentado en la Fig. 8.1, en éste se indica los puntos (del 1 al 11), donde se procedió a medir la resistividad eléctrica del terreno. Dichas mediciones se realizaron utilizando un Vibroground modelo 263 en un día soleado. Los datos de resistividad así obtenidos han sido recopilados en la Tabla XXXVII y a su vez utilizados para construir el perfil de resistividades del terreno, el cual se ilustra en la Fig. 8.2.

Tabla XXXVII
Valores de resistividad eléctrica del suelo a lo largo del poliducto Tres Bocas-Pascuales

Localización		Profundidad "a" (cm)	Lectura "R" (Ω)	Resistividad " ρ " = $2\pi aR$ (Ω -cm)	Resistividad promedio " $\bar{\rho}$ " (Ω -cm)	Observaciones
Punto	Km					
1	0+000	100	0,56	351,86	347,67	Suelo corrosivo
		200	0,31	389,56		
		300	0,16	301,59		
2	2+000	100	3,02	1.897,52	2.119,53	Corrosividad moderada
		200	1,75	2.199,11		
		300	1,20	2.261,95		
3	4+000	100	13,54	8.507,43	9.106,43	*
		200	7,05	8.859,29		
		300	5,28	9.952,57		
4	6+000	100	12,73	7.998,49	8.496,96	*
		200	6,60	8.293,80		
		300	4,88	9.198,58		
5	8+000	100	15,60	9.801,77	11.621,80	Corrosividad leve
		200	8,20	10.304,42		
		300	7,83	14.759,20		
6	10+000	100	7,80	4.900,88	5.652,77	Corrosividad moderada
		200	4,54	5.705,13		
		300	3,37	6.352,30		
7	12+000	100	10,18	6.396,28	6.909,41	*
		200	5,57	6.999,47		
		300	3,89	7.332,48		
8	14+000	100	3,18	1.998,05	2.159,32	*
		200	1,75	2.199,11		
		300	1,21	2.280,80		
9	16+000	100	1,99	1.250,35	1.501,68	*
		200	1,27	1.595,93		
		300	0,88	1.658,76		
10	18+000	100	3,90	2.450,44	2.599,14	*
		200	2,11	2.651,50		
		300	1,43	2.695,49		
11	20+000	100	5,57	3.499,73	3.887,20	*
		200	2,94	3.694,51		
		300	2,37	4.467,34		

Fuente: Mediciones efectuadas a lo largo de la trayectoria de la tubería en estudio.

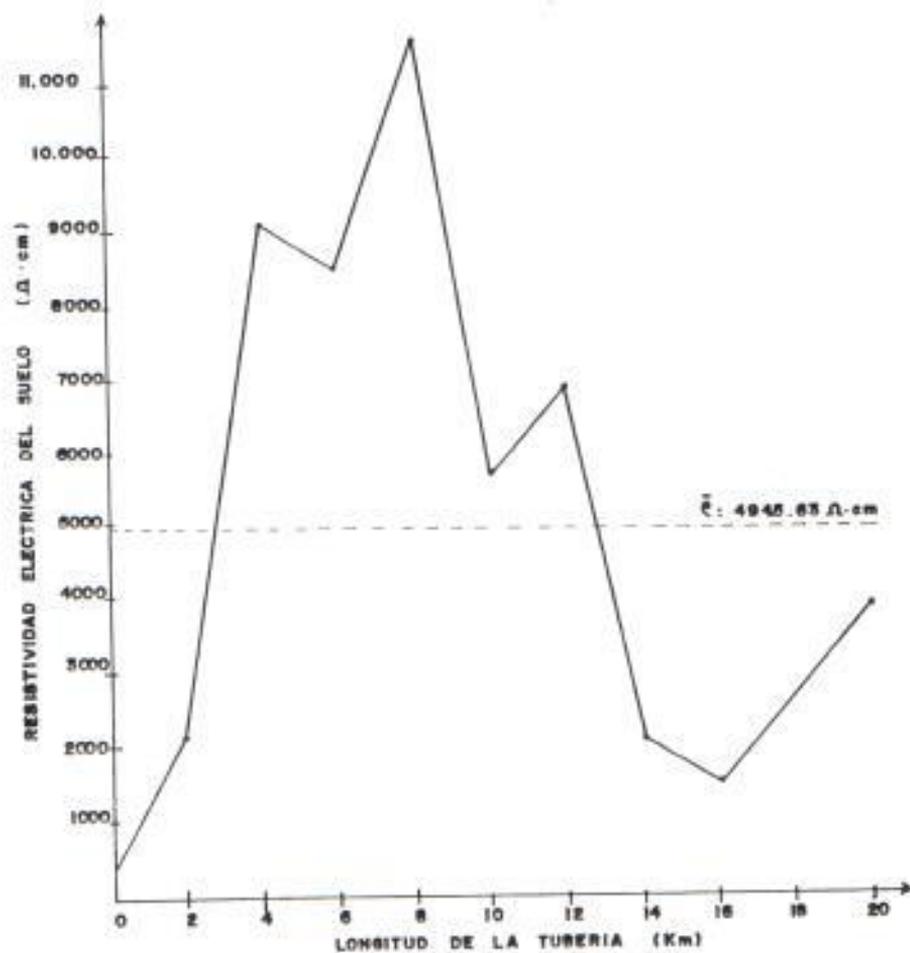


Fig. 8.2.- PERFIL DE RESISTIVIDADES ELECTRICAS A LO LARGO DE LA TRAYECTORIA DEL POLIDUCTO TRES BOCAS - PASCUALES.

Analizando los datos de la Tabla XXXVII y el perfil de resistividades presentado en la Fig. 8.2, se establece que en el tramo cercano al estero (punto 1) se presentan condiciones de muy baja resistividad eléctrica, lo cual convierte a este punto, altamente corrosivo. Esta baja resistividad se debe al alto contenido de humedad de la zona, sumando a esto la presencia de agua salada en el subsuelo. La parte restante del terreno, donde se encuentra instalada la mayor extensión del poliducto (entre los puntos 2 y 11), es un tramo de naturaleza variable, el cual presenta resistividades que van desde media hasta alta, por lo que su corrosividad es considerada como moderada.

8.2.2. CLASE DE TUBERIA

La clase de tubería utilizada en la construcción del poliducto Tres Bocas- Pascuales fue determinada de acuerdo a las especificaciones de operación del sistema de bombeo, especialmente en lo que se refiere al caudal de combustible a transportar ($715 \text{ m}^3/\text{h}$), así como a la presión necesaria para ejecutar

convenientemente dicho transporte (45 kg/cm²). Entre las principales especificaciones físicas y técnicas de la tubería utilizada se encuentran:

- Diámetro nominal (ϕ)= 12"
- Diámetro efectivo (D)= 12 $\frac{3}{4}$ " = 0,32385 m
- Espesor (e)= $\frac{3}{8}$ " = 0,9525 cm
- Longitud (L)= 20 Km
- Material= Acero al carbono extra-resistente (API 5LX-X42)
- Revestimiento= Laminación plástica (polietileno)
- Espesor del revestimiento (e_r)= 0,5 cm
- Resistencia eléctrica del revestimiento (R_r)= 2.000 $\Omega \cdot m^2$

8.3. ELECCION DEL TIPO DE PROTECCION CATODICA

8.3.1. SELECCION DEL SISTEMA

Para lograr una adecuada selección del tipo de sistema de Protección catódica a utilizar, resulta necesario, además de contar con los datos sobre las características del terreno y de la tubería a proteger, tener información sobre el valor promedio de la

resistividad del suelo donde será instalada la tubería, así como del requerimiento de corriente de protección.

El valor de la resistividad promedio del suelo a lo largo de la trayectoria de la tubería, es obtenido sumando los valores de resistividad promedio de cada localización, los cuales están recopilados en la Tabla XXXVII, y dividiendo este último resultado para el número de localizaciones. De acuerdo a lo antes expresado, se establece que dicho valor es:

$$\bar{\rho} = 4.745,63 \Omega \cdot \text{cm}$$

En lo que se refiere a la corriente de protección, ésta es independiente del tipo de sistema de Protección catódica a utilizar por lo que su valor puede ser obtenido a partir de la ecuación 3-3, es decir:

$$I = A \cdot D_e \cdot F \cdot (1-E)$$

Donde:

- A: Área de la estructura a proteger.

$$\begin{aligned}
 A &= \pi DL \\
 &= \pi(0,32385)(20.000) \\
 &= 20.348,10 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- D_c : Densidad de corriente de protección.

Tal como se estudió en la sección 3.5, el criterio para seleccionar la adecuada densidad de corriente de protección es muy discutido, siendo la experiencia del proyectista un aspecto fundamental para su acertada selección. Sin embargo, con el fin de establecer una comparación y un análisis adecuado, se procederá a determinar las densidades de corriente tanto de manera teórica (mediante el empleo de la ecuación 3-4), como de manera práctica (mediante el empleo de la Tabla XII). De lo anteriormente citado, tenemos que:

$$\begin{aligned}
 D_{cteórica} &= 73,73 - 13,35 \log \bar{\rho} \\
 &= 73,73 - 13,35 \log(4.945,63) \\
 &= 24,41 \text{ mA/m}^2
 \end{aligned}$$

$$D_{cp\acute{a}ctico} = 4,3 \text{ mA/m}^2$$

(Ver Tabla XII para suelos neutros)

Analizando estos dos valores y comparándolos con otros trabajos de diseño de protección catódica de tuberías, se procederá a elegir la D_e práctica, ya que la D_e teórica nos llevará a obtener un sistema sobredimensionado, con el consecuente incremento de costos y mantenimiento. Por lo tanto, el valor de densidad de corriente a utilizar en los posteriores cálculos será:

$$D_e = 4,3 \text{ mA/m}^2$$

- F : Factor de corrección de velocidad.

De acuerdo a la Tabla XIII, al no existir movimiento relativo del electrolito con la tubería, el valor del factor de corrección de velocidad deberá ser:

$$F = 1$$

- E : Eficiencia del revestimiento.

Considerando que el revestimiento de laminación plástica (polietileno) utilizado para recubrir el poliducto, es de excelente calidad, y refiriéndonos a la Tabla

XIV, se establece que para esta clase de revestimiento $E = 90\%$ al final de la vida útil del mismo, por lo tanto:

$$E = 0,9$$

Una vez determinados los valores de los diferentes parámetros que intervienen en la ecuación 3-3, se procederá a determinar la corriente de protección requerida para el sistema, la cual será:

$$\begin{aligned} I &= A \cdot B_c \cdot F \cdot (1-E) \\ &= (20,348,10)(4,3)(1)(1-0,9) \\ &= 8,749,68 \text{ mA} \\ &= 8,75 \text{ A} \end{aligned}$$

Ante la alternativa de utilizar un sistema de Protección catódica por "ánodos galvánicos" o por "corriente impresa", será necesario analizar cuidadosamente todas las informaciones, hasta este punto recopiladas, de tal manera que podamos seleccionar acertadamente el sistema a utilizar. Entre los principales datos que se han podido obtener de las informaciones que se tienen a disposición, y que van a ser objeto de análisis,

se encuentran:

- a. La estructura a proteger (poliducto) es considerada como de mediano tamaño (20 Km).
- b. Debido a la importancia del poliducto, se requiere un sistema de protección catódica que tenga una vida útil entre 15 y 20 años.
- c. La resistividad promedio del terreno es mayor que $3,000 \Omega \cdot \text{cm}$.
- d. El requerimiento de corriente es superior a 5 A.
- e. Existe disponibilidad de energía eléctrica en el sector.
- f. Se debe considerar la posibilidad de ampliaciones en las instalaciones a proteger.

Analizando todas estas consideraciones, y con la ayuda de la guía dada en la Tabla XV, llegamos a la conclusión de que el sistema

más adecuado para la Protección catódica del poliducto. Tres Bocas-Pascuales será un sistema por CORRIENTE IMPRESA.

8.3.2. PROYECTO DE CALCULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE PROTECCION CATODICA POR CORRIENTE IMPRESA PARA EL POLIDUCTO TRES BOCAS-PASCUALES

Para la obtención de un adecuado dimensionamiento del sistema de Protección catódica para el poliducto Tres Bocas-Pascuales, simplemente será necesario seguir la secuencia de pasos y los criterios dados en la sección 5.4, que se refiere al dimensionamiento de sistemas por corriente impresa. Por lo tanto, los pasos a seguir son:

1. Determinación de la resistividad del suelo a lo largo de la trayectoria de la tubería.

Tal como se analizó en el numeral 8.3.1, la resistividad promedio del suelo a lo largo de la trayectoria de la tubería es obtenida a partir de los datos recopilados en la Tabla XXXVII. De acuerdo a

esta consideración, el valor de la resistividad promedio del suelo es:

$$\bar{\rho} = 4.945,63 \Omega \cdot \text{cm}$$

2. Determinación de los requerimientos de corriente de protección.

El valor de requerimiento de corriente de protección para el sistema en estudio, fue determinada en el numeral 8.3.1, siendo este valor:

$$I = 8,75 \text{ A}$$

3. Selección de la capacidad de corriente nominal del rectificador.

Considerando un factor de seguridad del 25 %, la capacidad de corriente del rectificador no deberá ser menor a:

$$\begin{aligned} I_n &= 1.25 I \\ &= (1,25)(8,75) \\ &= 10,94 \text{ A} \end{aligned}$$

Coordinando el valor antes obtenido con las capacidades nominales de los rectificadores que existen comercialmente, se deberá seleccionar un rectificador cuyo valor de corriente de salida sea el inmediato superior a 10,94 A C.C., en este caso específico se deberá seleccionar:

$$I = 14 \text{ A}$$

4. Seleccionar la localización más adecuada para la cama de ánodos.

Analizando la planimetría de la tubería (Fig. 8.1) así como el perfil de resistividades (Fig. 8.2), se establece que el punto más adecuado para la instalación del sistema Rectificador/cama de ánodos es en el recinto de Petro-Ecuador (punto 4+000 Km), debido a las siguientes consideraciones:

- a. Disponibilidad de energía eléctrica,
- b. Facilidad de inspección y mantenimiento y

c. Seguridad para las instalaciones.

Es importante anotar, que si bien en el punto seleccionado (4+000 Km) la resistividad promedio no corresponde a la mas baja de todas las resistividades obtenidas, lo cual seria lo aconsejable para una mejor disipación de la corriente de protección; sin embargo, los otros factores anteriormente citados se constituyen en premisas de mayor peso, por lo que se tiene la completa seguridad que la selección del recinto de Petro-Ecuador, para la instalación de la cama de ánodos, es el más aconsejable.

5. Selección del tipo de ánodo inerte.

La selección adecuada del material de ánodo de inerte a utilizar, así como de sus dimensiones geométricas, dependen de la naturaleza del terreno en donde van a ser enterrados, de la densidad de corriente por ánodo y de su aplicación específica. De acuerdo a la Tabla XXVIII, los ánodos recomendados para instalaciones enterradas son los de gra-

fito y los de hierro-silicio, sin embargo debido a que la densidad de corriente necesaria para éste proyecto es baja, el tipo de ánodo más aconsejable es el de GRAFITO.

Las especificaciones físicas y técnicas del ánodo de grafito que se va a utilizar en este proyecto, son las siguientes:

Dimensiones = 3 " x 60 "

$A_a = 0,15 \text{ m}^2$

$V = 6.950 \text{ cm}^3$

$\rho = 1,6 \text{ g/cm}^3$ (Ver Tabla XXVIII)

$m \approx 12 \text{ Kg}$

6. Determinación de la masa total de los ánodos.

La masa total de los ánodos es determinada mediante la aplicación de la ecuación 5-1, es decir:

$$M = \frac{DVI}{0,85}$$

Donde:

$$D = 0,4 \text{ Kg/A}\cdot\text{año} \quad (\text{Ver Tabla XXVIII})$$

$$V = 20 \text{ años} \quad (\text{estimado})$$

$$I = 14 \text{ A}$$

Por lo tanto:

$$M = \frac{(0,4)(20)(14)}{0,85}$$

$$= 131,76 \text{ Kg}$$

7. Cálculo del número de ánodos.

El número total de ánodos a utilizar será determinado de manera sencilla mediante la aplicación de la ecuación 5-2, la misma que se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} N &= \frac{M}{m} \\ &= (131,76)/(12) \\ &= 10,98 \end{aligned}$$

Debido a que la determinación del número de ánodos debe basarse en un valor entero y no decimal, se deberá escoger el valor entero inmediatamente superior al calculado, es decir:

$N = 11$ ánodos

Una vez establecido el número de ánodos, se deberá verificar que la densidad de corriente por ánodo, esté dentro de los límites especificados en la Tabla XXVIII. De la tabla antes referida se establece que el rango de densidades de corriente para el caso de ánodos de grafito es de 3 a 10 A/m². Realizando los cálculos respectivos, se establece que:

$$i_a = \frac{I}{NA_a}$$

Donde:

i_a = Densidad de corriente por ánodo (A/m²)

A_a = Área lateral de cada ánodo (m²).

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{14}{(11)(0,15)} \\ &= 8,48 \text{ A/m}^2 \end{aligned}$$

Ya que $8,48 < 10$, por lo tanto, estamos dentro de los límites de densidad de corriente recomendada.

B. Distribución y arreglo de los ánodos.

Con el propósito de que la cama de ánodos inyecte la corriente de protección de tal manera que proteja de forma uniforme la longitud total de la tubería, se aconseja instalar los ánodos inertes siguiendo una trayectoria paralela a la de la tubería. En lo que se refiere al arreglo de los ánodos, resulta apropiada una disposición horizontal de los mismos, esto es debido a que se ha logrado establecer, con la ayuda de los datos de resistividades del suelo dados en la Tabla XXXVII, que en los estratos inferiores del terreno existe la tendencia de una mayor resistividad del suelo, lo cual dificultaría la disipación de la corriente de protección através del mismo.

Tomando en cuenta todas estas consideraciones, se ha definido utilizar, para este proyecto, una cama de 11 ánodos de grafito instalados en posición horizontal, dentro de un relleno de polvo de coke metalúrgico, y siguiendo una trayectoria paralela a la de la tubería, cuya

instalación deberá regirse de acuerdo a los detalles presentados en la Fig. 8.3.

De la observación de la figura antes referida y valiéndonos de las dimensiones frecuentemente utilizadas para esta clase de arreglos de cama de ánodos, se definen las siguientes características dimensionales:

$$\begin{aligned} I &= 1,5 \text{ m} \approx 5' \\ a &= 2 \text{ m} \approx 6,5' \\ b &= 3 \text{ m} \approx 10' \\ c &= 4,5 \text{ m} \approx 15' \\ d &= 0,3 \text{ m} \approx 1' \\ e &= 1,5 \text{ m} \approx 5' \\ L &= 50,5 \text{ m} \approx 168' \end{aligned}$$

9. Calcular la resistencia teórica del circuito.

La resistencia teórica total del circuito es determinada mediante la ya conocida expresión:

$$R = R_a + R_{e_a} + R_b + R_1$$

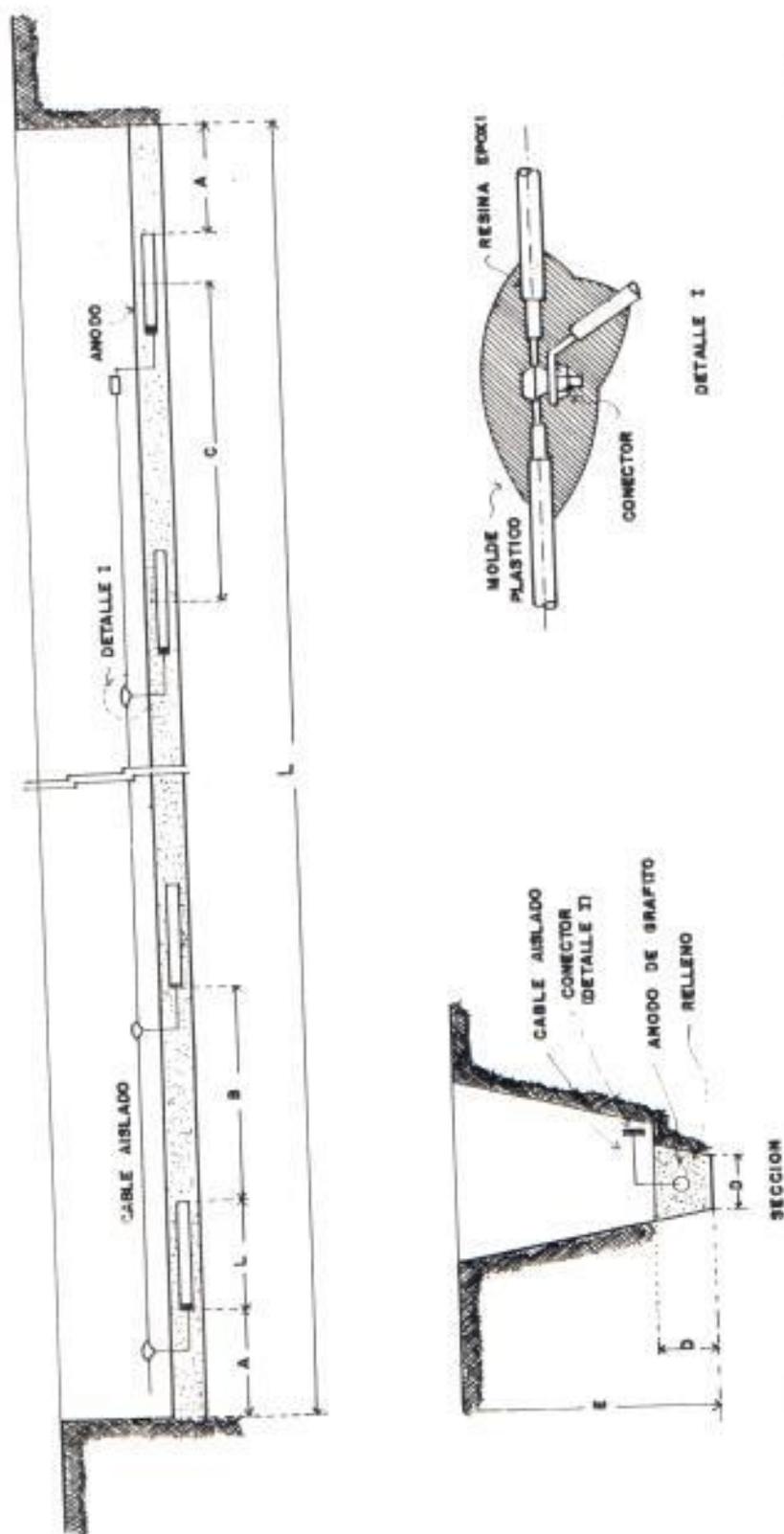


Fig. 8.3.- DETALLE DE LA INSTALACION DE LA CAMA DE ANODOS INERTES PARA LA PROTECCION CATORICA DEL POLIDUCTO TRES BOCAS - PASCUALES.

Donde:

- R_a : Resistencia de la cama de ánodos.

Esta resistencia es calculada utilizando la fórmula que corresponde para ánodos posicionados horizontalmente (ecuación 4-5):

$$R_a = \frac{0,00521 \rho}{L} \left(2,31 \log \frac{4L^2 + 4L\sqrt{L^2 + S^2}}{dS} + \frac{S}{L} + \frac{\sqrt{L^2 + S^2}}{L} - 1 \right)$$

Es importante anotar que para la aplicación de esta fórmula, el valor de la resistividad empleada, es la resistividad promedio que encontramos en la zona donde va a ser ubicada la cama de ánodos, en este caso en el punto 3 (Fig. 8.1) que corresponde a la ubicación 4+000 Km. Tomando en cuenta esta consideración, y basándonos en la tabla XXXVII y en la Fig. 8.3, los valores de los parámetros a utilizarse serán:

$$\rho = 9.106,43 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$L = 168'$$

$$d = 1'$$

$$S = 2e = 10'$$

La aplicación de la fórmula para cama de ánodos posicionados horizontalmente, nos dará un valor de resistencia de:

$$R_a = 2,28 \Omega$$

A este último valor de R_a hay que agregar el valor de la resistencia interna del grupo de ánodos, el cual se obtiene siguiendo el siguiente proceso de cálculo:

$$R_{int} = (R_{ain\ relleno} - R_{ean\ relleno})/N$$

Para determinar la $R_{ain\ relleno}$, se considera las dimensiones nominales del ánodo utilizado y una $\rho = 50 \Omega \cdot \text{cm}$, la cual corresponde al valor de la resistividad eléctrica del relleno. Aplicando la ecuación 4-5, obtendremos:

$$R_{ain\ relleno} = 0,19 \Omega$$

Para el caso de la determinación de la $R_{ean\ relleno}$, se considera las dimensiones del relleno y el valor de su resistividad, es decir $\rho = 50 \Omega \cdot \text{cm}$.

Igual que en el caso anterior se deberá aplicar la ecuación 4-5, con lo cual se obtiene el siguiente valor:

$$R_{\text{con. retiene}} = 0,10 \Omega$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} R_{\text{int}} &= (0,19 - 0,10)/11 \\ &= 0,01 \Omega \end{aligned}$$

Ya establecido el valor de la resistencia interna de la cama de ánodos, se deberá agregar dicho valor al de la R_{ca} calculada por la ecuación 4-5, obteniendo de esta manera el verdadero valor de la resistencia de la cama de ánodos, el cual será:

$$\begin{aligned} R_{ca} &= 2,28 + R_{\text{int}} \\ &= 2,28 + 0,01 \\ &= 2,29 \Omega \end{aligned}$$

- R_{ca} : Resistencia de los cables.

El valor de la resistencia eléctrica de los cables incluye: la resistencia del

Cable que va desde la tubería hasta el rectificador y la resistencia del cable que va desde el rectificador hasta la cama de ánodos, por lo tanto:

$$R_{ca} = R_{t-r} + R_{r-a}$$

Para poder determinar la resistencia eléctrica de cada uno de los tramos de cables antes citados, es necesario establecer sus correspondientes longitudes. Para ello se debe considerar que según normas de instalación para cama de ánodos inertes, éstas deben ser instaladas a una distancia mínima de 100 m con respecto a la tubería. Con esta última consideración y teniendo en cuenta las instalaciones propias del recinto donde va a ser ubicado el sistema rectificador/cama de ánodos, se ha definido los valores de las correspondientes distancias, las cuales son detalladas en la Fig. 8.4. De acuerdo a la figura, las distancias a utilizar en los cálculos serán:

$$D_{t-r} = 1,1 D_{rea1} \quad (10 \% \text{ de holgura})$$

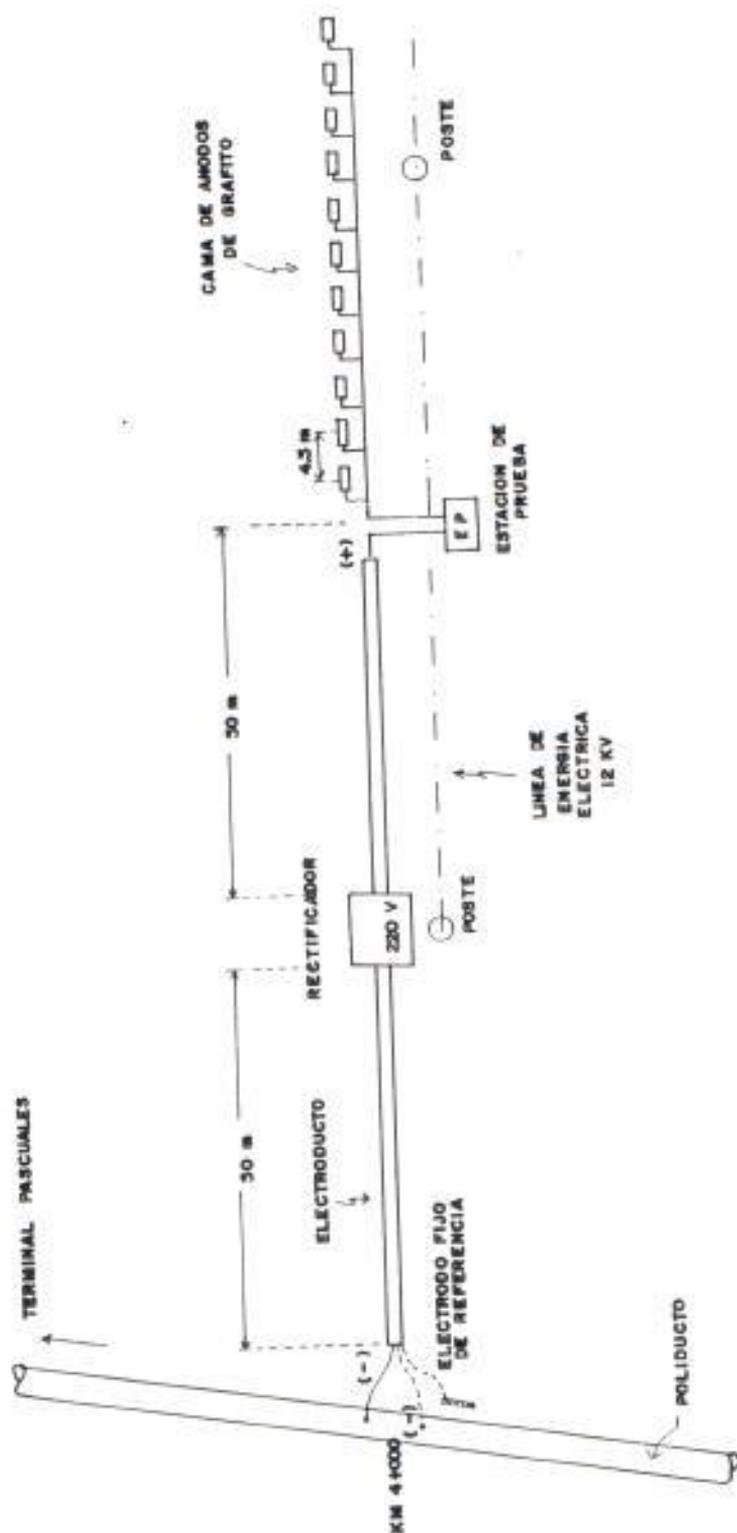


Fig. 8.4.- DETALLE DE LA INSTALACION DEL SISTEMA RECTIFICADOR / CAMA DE ANODOS PARA LA PROTECCION CATORICA DEL POLIDUCTO TRES BOCAS - PASCUALES.

$$D_{e-r} = (1,1)(50) \\ = 55$$

$$D_{r-a} = 50 \text{ m}$$

$$D_a = 4,5 \text{ m}$$

El siguiente paso es el de determinar el valor de cada uno de los parámetros R_{e-r} y R_{r-a} , los cuales son calculados mediante las siguientes expresiones:

$$R_{e-r} = D_{e-r} R_{AWG}$$

y

$$R_{r-a} = R_{AWG}(D_{ra} + D_a[(N-1) - (1/N)(1+2+\dots+(N-1))])$$

En lo que se refiere al valor de R_{AWG} , hay que anotar que aunque la demanda de corriente es de 14 A, lo cual implicaría el uso de cable # 14 AWG, sin embargo se utilizará un cable # 6 AWG, ya que éste es el calibre mínimo recomendado para instalaciones de sistemas de protección catódica por corriente impresa. Según la Tabla XXIX la resistencia por unidad de longitud del cable a utilizar es:

$$R_{\text{cable}} = 0,0013452 \text{ } \Omega/\text{m}$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} R_{\text{c-r}} &= (55)(0,0013452) \\ &= 0,07 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} R_{\text{c-a}} &= (0,0013452) \{ 50 + 4,5 [10 - (1/11)(55)] \} \\ &= 0,10 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

Una vez obtenidos estos dos valores, la resistencia total de los cables será:

$$\begin{aligned} R_{\text{ca}} &= 0,07 + 0,10 \\ &= 0,17 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

- R_c : Resistencia de contacto entre la tubería y el suelo.

La resistencia de contacto entre la tubería y el suelo es determinada mediante el empleo de la ecuación 4-8, es decir:

$$R_c = 0,0021 \rho \left(\frac{2,31 \log R^2 + 4L \sqrt{57} L^2}{(1-E)L} + \frac{s}{L} + \frac{\sqrt{57} L^2}{L} - 1 \right)$$

Donde:

$$\rho = 9.106,43 \Omega \cdot \text{cm}$$

$$L = 20,000 \text{ m} = 65,620'$$

$$d = 0,32385 \text{ m} = 1,0625'$$

S = Doble de la profundidad a la cual está enterrada la tubería.

$$= (2)(2) = 4 \text{ m}$$

$$= 13,124'$$

$$E = 0,9$$

Aplicando la fórmula antes citada obtendremos:

$$R_e = 0,14 \Omega$$

- R_1 : Resistencia longitudinal de la tubería.

Debido a que la longitud de la tubería es significativa, por lo tanto, se deberá considerar la influencia de su resistencia eléctrica longitudinal sobre el valor de la resistencia eléctrica total del circuito. De acuerdo a la Tabla XI, el valor de tal resistencia, para tuberías de acero Extra-resistentes, es:

$$\begin{aligned}
 R_L &= 3,3 \mu\Omega/\text{pie} \\
 &= 10,8273 \mu\Omega/\text{m}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, la resistencia longitudinal total de la tubería será:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= L \cdot R_L \\
 &= (20,000)(10,8273) = 216.546 \mu\Omega \\
 &= 0,22 \Omega
 \end{aligned}$$

Una vez halladas todas las resistencias involucradas en la primera ecuación de este paso del dimensionamiento, se procederá a la suma de ellas con el fin de obtener el valor de la resistencia total del circuito, el cual será: *

$$\begin{aligned}
 R &= 2,29 + 0,17 + 0,14 + 0,22 \\
 &= 2,82 \Omega
 \end{aligned}$$

10. Selección de las características eléctricas del rectificador.

La obtención del requerimiento de voltaje para el rectificador es determinado mediante la aplicación de la Ley de Ohm, através de la ecuación 5-5:

$$V_{ca} = IR + V_r$$

Donde:

$$V_r = 2 \text{ V} \quad (\text{para el caso de ánodos de grafito})$$

Reemplazando cada uno de los parámetros de la ecuación 5-5 por sus correspondientes valores, obtendremos:

$$\begin{aligned} V_{ca} &= (14)(2,82) + 2 \\ &= 41,48 \text{ V} \end{aligned}$$

A este último valor se aconseja aplicarle un factor de seguridad del 25 % para cubrir posibles ampliaciones del sistema a proteger, por lo tanto el voltaje requerido deberá ser:

$$\begin{aligned} V_{ca} &= (1,25)(41,48) \\ &= 51,85 \text{ V} \end{aligned}$$

Coordinando este valor de voltaje con los voltajes nominales de rectificadores existentes comercialmente, se concluye que habrá que seleccionar un rectificador con voltaje nominal C.C de:

$$V_n = 60 \text{ V.}$$

Una vez establecidas las principales características eléctricas de salida del rectificador ($I_n = 14 \text{ A C.C}$ y $V_n = 60 \text{ V C.C}$) y considerando las condiciones ambientales y de suministro de energía eléctrica en el sector, se procederá a sugerir el tipo de rectificador más adecuado para el sistema proyectado. Las principales características del rectificador son:

- Voltaje de entrada: 115/230 V CA
- Voltaje del secundario: 20-40-60 V CA
- Regulación del secundario: Manual
- Alimentación: Monofásica - 60 ciclos
- Voltaje nominal de salida: 60 V CC
- Corriente nominal de salida: 14 A CC
- Rendimiento: 80 %.
- Elemento rectificador: Placas de Selenio.
- Circuito rectificador: Monofásico tipo puente.
- Sistema de enfriamiento: Inmerso en aceite.
- Tipo de control: Potencial constante

8.3.3. DETERMINACION DEL PERFIL DE POTENCIALES TEORICOS A PARTIR DE LA CARACTERISTICA DE ATENUACION DE LA TUBERIA.

En esta parte del diseño, se busca determinar de una manera teórica, el valor de los potenciales tubería-suelo, tanto en el punto de drenaje como en los puntos extremos de la tubería; así como el valor de las corrientes que deberán fluir por cada tramo de la tubería a fin de obtener dichos valores de potenciales.

a. Cálculo de potenciales tubería-suelo.

Considerando que el sistema de Protección catódica diseñado para el poliducto Tres Bocas-Pascuales cae dentro de las consideraciones de una tubería de longitud finita protegida por un solo punto de drenaje de corriente, entonces el cambio de potencial en dicho punto de drenaje ΔV_0 estará determinado por la aplicación de la ecuación (3-15), es decir:

$$\Delta V_0 = \Delta V_r - \text{Cosh} \alpha L$$

Donde:

- ΔV_r : Cambio de potencial tubería-suelo en el punto final de la tubería.

Ya que el sistema de protección catódica ha sido diseñado de tal manera que se obtenga un potencial mínimo de protección de -1 V en el punto más lejano de la tubería en relación al punto de drenaje de corriente, y siendo este punto la localización 20+000 Km, por lo tanto el cambio de potencial tubería-suelo, con respecto al potencial natural de la tubería, en el punto referido será:

$$\Delta V_r = \Delta V_{20}$$

$$\Delta V_{20} = V_{20} - V_{pn}$$

Donde:

$$V_{20} = -1 \text{ V} \quad (\text{potencial mínimo de protección})$$

$$V_{pn} = -0,5 \text{ V.} \quad (\text{potencial natural del acero})$$

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} \Delta V_{20} &= -1 - (-0,5 \text{ V}) \\ &= -0,5 \text{ V} \end{aligned}$$

- α : Constante de atenuación de la tubería.

La constante de atenuación de la tubería es determinada mediante la aplicación de la ecuación 3-12:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_L}{R_F}}$$

Donde, de acuerdo a la Tabla XI para tuberías de 12" de acero extra-resistente, el valor de R_L , es:

$$\begin{aligned} R_L &= 3,3 \mu\Omega/\text{pie} \\ &= 1,08273 \times 10^{-8} \Omega/\text{m} \end{aligned}$$

En lo que se refiere al valor de R_F , éste será obtenido aplicando la ecuación 3-13, es decir:

$$R_F = \frac{R_{B-L}}{\pi \cdot d}$$

De datos proporcionados por el fabricante del revestimiento, y que han sido debidamente indicados dentro de las características de la tubería utilizada (numeral 8.2.2), se obtiene el valor de

su resistencia eléctrica, el cual es:

$$R_R = 2.000 \Omega \cdot m^2$$

Por lo tanto, el valor de la resistencia de fuga R_F , será:

$$\begin{aligned} R_F &= \frac{2.000}{\pi(0,32385)} \\ &= 1.965,79 \Omega \cdot m \end{aligned}$$

Una vez determinados todos los parámetros involucrados en la ecuación 3-12, entonces se procederá a calcular el valor de la constante de atenuación, la cual será definida por:

$$\begin{aligned} \alpha &= \sqrt{\frac{1,08273 \times 10^{-8}}{1.965,79}} \\ &= 7,42 \times 10^{-5} \text{ (1/m)} \end{aligned}$$

Debido a que el punto de drenaje de corriente estará ubicado en la localización 4+000 Km, por lo tanto, para fines de cálculo, se dividirá a la tubería en dos tramos bien definidos:

1. Tramo 1: Desde el punto 0+000 Km hasta el punto 4+000 Km y,
2. Tramo 2: Desde el punto 4+000 Km hasta el punto 20+000 Km.

- Considerando el segundo tramo, el cual es el más largo ($L_2 = 16.000$ m), éste nos servirá para determinar el cambio de potencial tubería-suelo en el punto de drenaje:

$$\Delta V_o = \Delta V_r \cdot \text{Cosh} \alpha L$$

$$\Delta V_o = \Delta V_{zo} \cdot \text{Cosh} \alpha L_2$$

$$= (-0,5) \cdot \text{Cosh}[(7,42 \times 10^{-9})(16.000)]$$

$$= -0,90 \text{ V}$$

Por lo que, el voltaje tubería-suelo en el punto de drenaje será:

$$V_o = \Delta V_o + V_{po}$$

$$V_o = (-0,9) + (-0,5)$$

$$= -1,40 \text{ V}$$

- Para determinar el cambio de potencial tubería suelo en el otro extremo

de la tubería es decir en el punto 0+000 Km, se aplicará igualmente la ecuación 3-15, con la consideración de que el tramo considerado tiene una longitud $L_1 = 4.000$ m, por lo tanto:

$$\Delta V_r = \frac{\Delta V_a}{\text{Cosh}aL}$$

$$\begin{aligned} \Delta V_{00} &= \frac{\Delta V_a}{\text{Cosh}aL_1} \\ &= \frac{-0,90}{\text{Cosh}[(7,42 \times 10^{-2})(4.000)]} \\ &= -0,86 \text{ V} \end{aligned}$$

Por lo que, el potencial tubería-suelo al final del primer tramo será:

$$\begin{aligned} V_{00} &= \Delta V_{00} + V_{pn} \\ &= (-0,86) + (-0,5) \\ &= -1,36 \text{ V} \end{aligned}$$

b. Cálculo de las corrientes inyectadas.

En lo que se refiere al valor de las corrientes que deberán ser inyectadas por el rectificador, para cada tramo de tubería en estudio, con el fin de obtener los valores de potenciales tubería-suelo pre-

viamente calculados, éstas deberán ser determinadas utilizando la ecuación 3-16 para cada tramo de tubería, es decir:

$$I = \frac{g \Delta V_r \operatorname{Sinh} \alpha L}{R_L}$$

- Aplicando la anterior ecuación para el tramo 1:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{g \Delta V_{D01} \operatorname{Sinh} \alpha L_1}{R_L} \\ &= \frac{(7,42 \times 10^{-9})(0,86) \operatorname{Sinh}[(7,42 \times 10^{-9})(4.000)]}{1,06273 \times 10^{-9}} \\ &= 1,78 \text{ A} \end{aligned}$$

- Similarmente para el tramo 2: *

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{g \Delta V_{20} \operatorname{Sinh} \alpha L_2}{R_L} \\ &= \frac{(7,42 \times 10^{-9})(0,50) \operatorname{Sinh}[(7,42 \times 10^{-9})(16.000)]}{1,06273 \times 10^{-9}} \\ &= 9,17 \text{ A} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la corriente total que deberá ser inyectada por el rectificador, será la suma de las corrientes inyectadas a cada tramo de tubería, es decir:

$$\begin{aligned}
 I &= I_1 + I_2 \\
 &= 1,78 + 9,17 \\
 &= 10,95 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Una vez calculados los potenciales tubería-suelo; así como las corrientes que deberán ser inyectadas para obtener dichos potenciales, y con el fin de tener una visualización de la característica de atenuación de la tubería analizada, se procederá a ilustrar dichos valores por medio del perfil de potenciales teóricos presentados en la Fig. 8.5.

8.4. UBICACION DE ELEMENTOS PROTECTORES

La localización más adecuada para la ubicación de los elementos protectores, es decir, para la instalación del rectificador y de la cama de ánodos inertes, fue previamente analizada y posteriormente definida en el paso 4 del numeral 8.3.2.

En dicho paso del dimensionamiento del sistema de protección catódica, se definió instalar los elementos protectores, en la localización 4+000 Km que corresponde a las instalaciones de Petro-Ecuador. Entre las razones principales que llevaron a selec-

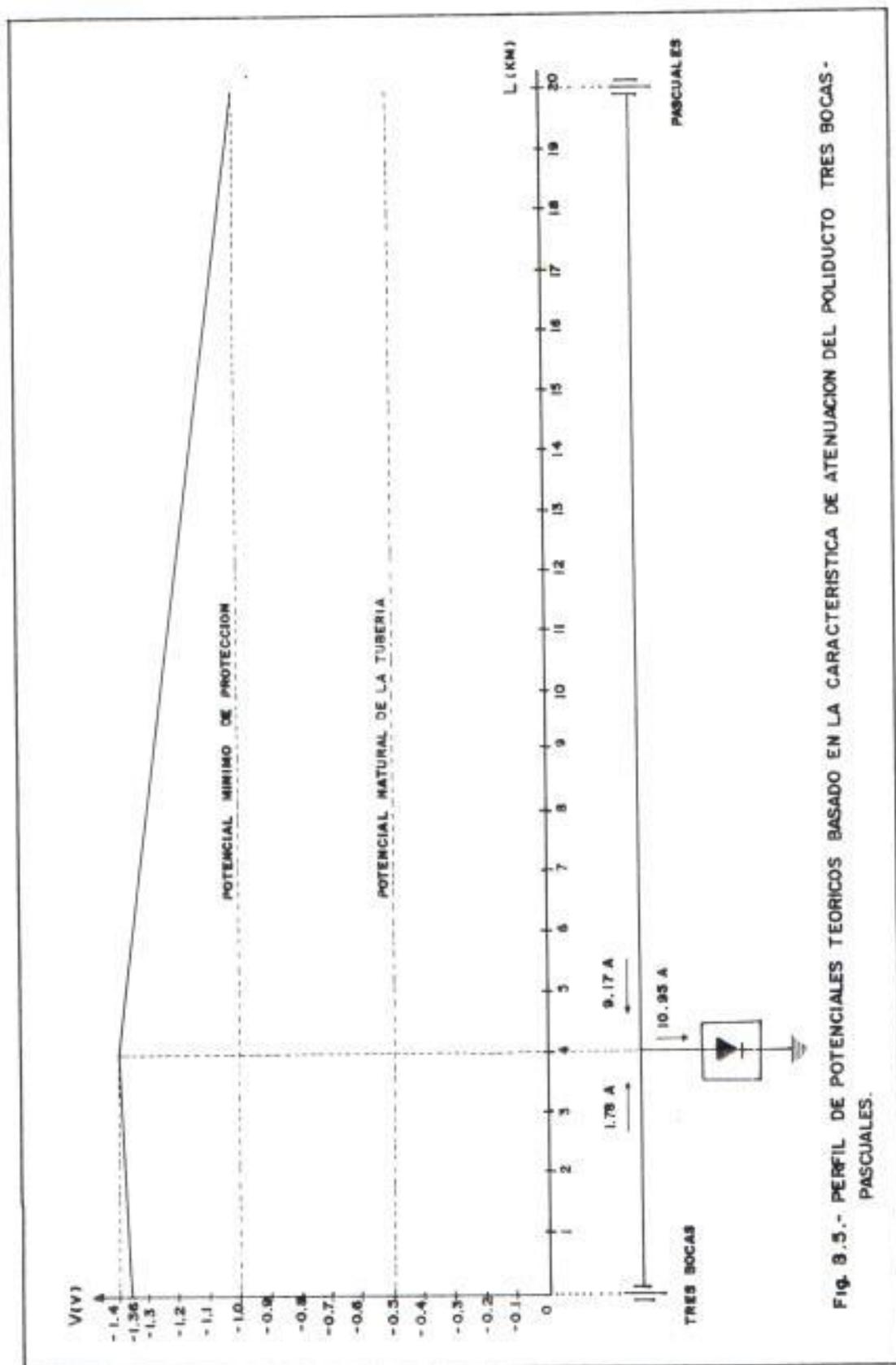


Fig. 8.5.- PERFIL DE POTENCIALES TEORICOS BASADO EN LA CARACTERISTICA DE ATENUACION DEL POLIDUCTO TRES BOCAS - PASCUALES.

cionar esta localización como la más adecuada, se encuentran su disponibilidad de energía eléctrica, puesto que por dicha zona atravieza una línea de 13,2 Kv, y la innegable garantía de seguridad operacional y de mantenimiento.

Si bien la ubicación de los elementos protectores hubiera sido ideal definirla a la mitad del poliducto, ya que de esta manera obtendríamos una distribución más uniforme de la corriente de protección, sin embargo por las razones antes expuestas, la ubicación finalmente seleccionada se justifica plenamente.

8.5. MEDICIONES Y CONTROL DE LA PROTECCION

Con el fin de asegurar de que el sistema de Protección catódica del poliducto Tres Bocas-Pascuales esté funcionando debidamente, resulta indispensable que el sistema tenga una constante y permanente inspección.

La inspección del sistema involucra la organización de un programa de mediciones de los parámetros de protección, principalmente del potencial tubería-suelo, y un control del funcionamiento adecuado de los elementos protectores, es decir del rectificador.

dor y de la cama de ánodos. Para ello, resulta necesario la instalación de estaciones de pruebas a todo lo largo del recorrido de la tubería. La ubicación de tales estaciones de prueba deben ser cuidadosamente seleccionadas con el fin de que suministren una información confiable sobre el estado operativo del sistema.

Como una guía para la adecuada selección de los sitios donde deberán ser instaladas las estaciones de prueba, podemos citar prioritariamente los siguientes puntos: localización donde se encuentran instalados los elementos protectores, localizaciones próximas a juntas aislantes, cruce con carreteras, cruce o aproximación con otras estructuras metálicas y puntos cercanos a una línea de alta tensión.

Siguiendo las consideraciones dadas en el párrafo anterior, y analizando el recorrido del poliducto (Fig. 8.1), se han localizado los puntos más adecuados donde serán instaladas las estaciones de prueba, necesarias para un buen control del potencial de protección y eventuales balanceos con otras estructuras enterradas. La ubicación de tales localizaciones son debidamente indicadas en el gráfico de la Fig. 8.6.

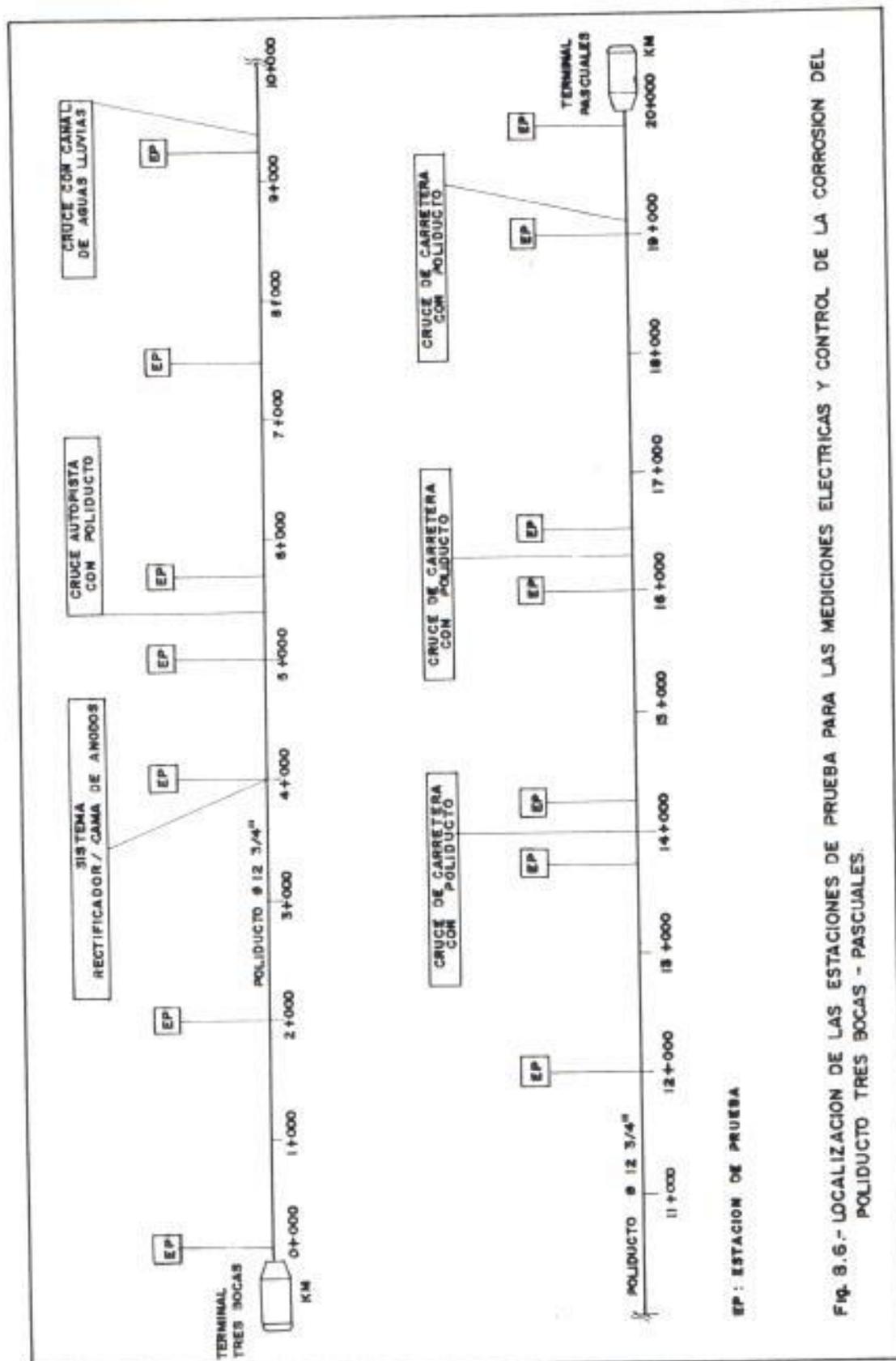


Fig. 8.6.- LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE PRUEBA PARA LAS MEDICIONES ELECTRICAS Y CONTROL DE LA CORROSION DEL POLIDUCTO TRES BOCAS - PASCUALES.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de haber discutido en forma amplia los principios y técnicas de aplicación de la Protección catódica, a lo largo de la presentación de este trabajo, y una vez obtenidos los resultados del proyecto de cálculo para su implementación en el poliducto Tres Bocas-Pascuales, se pueden llegar a establecer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. La aplicación de la técnica de la Protección catódica se presenta como una solución técnicamente eficiente y económicamente conveniente para garantizar la protección contra la corrosión de estructuras metálicas enterradas, tales como tuberías de acueductos o poliductos.
2. Mediante la aplicación de la Protección catódica se logra controlar la corrosión, incrementando con ello la vida útil de las tuberías metálicas enterradas o sumergidas.

3. Se garantiza la continuidad operacional de las tuberías y en consecuencia se salvaguarda la costosa inversión realizada en dichas instalaciones.
4. Para una operación más efectiva y económica de un sistema de Protección catódica, se recomienda la aplicación de un revestimiento de óptima calidad, con el fin de reducir al máximo la superficie en contacto con el suelo y que podría estar expuesta a daños por corrosión.
5. El éxito para un adecuado dimensionamiento de un sistema de protección catódica, depende de una criteriosa recopilación de datos tanto de las características y ubicación de la estructura a proteger, así como de las mediciones eléctricas realizadas (medición de la resistividad eléctrica del terreno y medición del potencial tubería-suelo a lo largo del recorrido de la tubería).
6. Como se analizó previamente, la elaboración del perfil de resistividades eléctricas a lo largo de la trayectoria de la tubería, se constituye en una herramienta de vital importancia, especialmente para seleccionar el valor de la densidad de corriente de protección, así como para determinar la ubicación más adecuada para los elementos protectores.

7. Una vez calculado el requerimiento de corriente de protección, se recomienda comprobar que dicho valor teórico no esté alejado del verdadero valor requerido en la práctica. Para lo cual se deberá aplicar un sistema de protección catódica provisional que estará compuesto por una fuente regulable de corriente y una cama de ánodos constituida por chatarra de hierro o acero.

8. Si bien los dos sistemas de Protección catódica estudiados (sistema por ánodos galvánicos y por corriente impresa) se fundamentan bajo el mismo principio de funcionamiento, y sus primeras etapas de dimensionamiento son similares; sin embargo, existe un criterio claro que marca la diferencia de aplicación entre ambos. Este criterio se basa en los valores de resistividad eléctrica del terreno y de la corriente de protección requerida, de esta manera establecemos que:

- a. Para el caso de sistemas por ánodos galvánicos su utilización se limita a estructuras enterradas en suelos con resistividades menores a $3.000 \Omega \cdot \text{cm}$ y requerimientos de corriente inferiores a 5 A.
- b. En cambio el sistema por corriente impresa, si bien puede ser utilizado en suelos de cualquier valor de resistividad, su utilización es econó-

mica sólo para requerimientos de corriente superiores a 5 A.

9. Del análisis del proyecto de cálculo realizado en el Capítulo VIII, se puede concluir que, si bien el dimensionamiento de sistemas de Protección catódica aparenta ser una tarea sencilla, sin embargo constituye un factor de vital importancia la experiencia que tenga el proyectista, especialmente en lo que se refiere a la selección de la adecuada densidad de corriente y de la utilización criteriosa de los factores de seguridad.
10. Una vez establecido y puesto en operación el sistema, se requerirá de la ejecución de un criterioso programa de inspecciones, especialmente en lo que se refiere al chequeo de los potenciales tubería-suelo, ya que éste es el parámetro más confiable para revelarnos el verdadero estado de protección de la tubería.
11. Por todo lo expuesto anteriormente, se recomienda la aplicación de la Protección catódica a todas las tuberías metálicas enterradas, especialmente a los acueductos y poliductos de derivados del petróleo. La razón de ello se basa en que, la no aplicación de un sistema de protección catódica contra la corrosión de dichas tuberías, provocaría los siguientes

resultados:

- a. En el caso de poliductos, una fuga de combustible, aparte de traer la consecuente pérdida económica para el País, también causaría una degradación de los sistemas ecológicos existentes a lo largo de la trayectoria del poliducto, ya que la reacción del combustible con el suelo privaría de los nutrientes necesarios para el desarrollo de la vegetación en dichas zonas.
- b. En el caso de acueductos, los daños por corrosión originarían una fuga de ese vital elemento como lo es el agua potable, causando con ello grandes pérdidas económicas y lo que es más grave aún, la casi segura contaminación del agua, con la consecuente deterioración de la salud del consumidor.

B I B L I O G R A F I A

1. APPLGATE, L.M., Cathodic Protection, McGraw-Hill, New York, 1960.
2. CIER, Criterios aplicados en el proyecto de Mallas de Tierra, Tomo II, Comisión de Integración Eléctrica Regional, Buenos Aires, 1974, Sección 23-109.
3. EATON, J.R., Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica, Prentice/Hall, Madrid, 1973, pp. 310-312.
4. FINK, D.G. and BEATY, H.W., Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw Hill, New York, 1978, Cap. 24.
5. GENTIL, V., Corrosão, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
6. GUERRERO, M., BARUELOS, C., y GUERRA, R., Protección Catódica, Instituto Mexicano del Petróleo, México D.F, 1980.

7. IEC, Proteção Catódica, Instalações e Engenharia de Corrosão, Rio de Janeiro, 1981.
8. IPT, Corrosão e Proteção contra Corrosão de Metais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1983.
9. LAQUE, F.L., Introduction to Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1969.
10. NACE, Computer Calculations for Cathodic Protection, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1983.
11. NUNES, L., Proteção Catódica, Petrobras, Rio de Janeiro, 1980.
12. PARKER, M.E., Pipeline Corrosion and Cathodic Protection, Gulf Publishing Co., Houston, 1954.
13. FEABODY, A.W., Control of Pipeline Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1967.
14. PERA, J., Protección Catódica de Estructuras Metálicas, Seminario de la Facultad de Ingeniería Mecánica ESPOL, Guayaquil, 1988.

15. POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Cathodic Protection of Direct Buried Transformers, Volume PAS-91, Number 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, May/June 1972, pp. 1007-1014.
16. SUNDE, E.D., Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Van Nostrand, New York, 1949, pp. 177-214.
17. UHLIG, H.H., Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, New York, 1963.
18. UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1958.
19. VITERI, A., Corrosión y Prevención de la Corrosión, Folleto ESPOL, Guayaquil, 1984.

A P E N D I C E S

A P E N D I C E A

FRECUENCIA DE INSPECCION DE LOS SISTEMAS DE PROTECCION CATODICA

La frecuencia con que los sistemas de Protección catódica deben ser inspeccionados, varía mucho con la importancia, tipo y grado de inestabilidad del sistema.

Con vista a una orientación, en cuanto a la frecuencia de las inspecciones, se consideran tres casos:

a. Estructuras protegidas por sistemas galvánicos

Como el uso de los sistemas galvánicos está asociado con estructuras no sujetas a corrientes de interferencia, la frecuencia de las inspecciones serán relativamente espaciadas. Como base se puede tomar el siguiente esquema:

- Inspección de la cama de ánodos, lo cual incluye la medición de corriente drenada y el potencial de los ánodos en circuito abierto: Cada 2 meses.
- Mediciones del potencial estructura/electrolito: Mensual.

b. Estructuras protegidas por sistemas de corriente impresa.

Cuando estos sistemas están instalados en estructuras no sujetas a corrientes de interferencia, su frecuencia de inspección también puede realizarse en intervalos espaciados. Como guía, puede ser adoptado el siguiente esquema:

- Inspección de los rectificadores: Semanal.
- Inspección de la cama de ánodos inertes, con el fin de verificar si ningún ánodo está fuera de operación: Semestral.
- Mediciones del potencial estructura/electrolito: Mensual.

c. Estructuras protegidas por sistemas de corriente impresa asociado con drenajes.

Estos sistemas son sin lugar a duda los más críticos, por que involucran corrientes de interferencia. En este caso, la frecuencia de las inspecciones debe ser mayor, ya que cualquier descuido puede ocasionar daños de corrosión de gran intensidad a la estructura. Como base, el siguiente esquema puede ser

adoptado:

- Inspección de rectificadores y equipos de drenaje:
En días alternados y si es posible, a diario.

- Inspección de la cama de ánodos inertes: Semestral.

- Mediciones del potencial estructura/electrolito,
lo cual incluye:

Mediciones de potencial instantáneo: Quincenal.

Registros de potenciales por períodos de 24 horas
en los puntos o trechos más críticos: Bimensual.

A P E N D I C E BGUIA DE COMO ORDENAR RECTIFICADORES PARA SISTEMAS DE
PROTECCION CATODICA

La siguiente es una guía que servirá de ejemplo para saber como ordenar rectificadores para sistemas de protección catódica. Si bien existen diversas marcas de fabricantes de rectificadores, sin embargo la forma de ordenar tales dispositivos no presentan mucha disparidad entre ellas, salvo el caso de la primera letra que representa la marca o la línea de patente. Con este antecedente, se utilizará como ejemplo, una de las diversas marcas existentes comercialmente, la cual es GOOD-ALL.

CODIGO

1^{ra} letra
LINEA
6000-ALL

C - CUSTOM
K - CUSTOM II
S - ESPECIAL

2^{da} letra
CONTROL

S - Rectificador estandar
P - Control de potencial
V - Voltaje regulado
A - Corriente regulada
Z - Otro tipo (especificar)

3^{ra} letra
ENFRIAMIENTO

A - Enfriado por aire (convección)
O - Inmerso en aceite
X - Inmerso en aceite (a prueba de explosión)
D - Sumergible
F - Enfriado por ventilador
Z - Otro tipo (especificar)

4^{ta} letra
ELEMENTO
RECTIFICANTE

W - Selenio
Y - Silicio
Z - Otro tipo (especificar)

5^{ta} letra
CIRCUITO

C - Monofásico, tap central
S - Monofásico, tipo puente
Y - Trifásico Y
T - Trifásico, tipo puente
Z - Otro circuito (especificar)

6^{ta} letra
VOLTAJE
C.A. DE
ENTRADA

A - 115 V C.A.
B - 208 V C.A.
C - 230 V C.A.
D - 460 V C.A.
E - 115/230 V C.A.
F - 230/460 V C.A.
G - 115/460 V C.A.
Z - Otros voltajes (especificar)

7^{mo} número

Voltaje nominal C.C.

8^{vo} número

Corriente nominal C.C.

últimas
letras

Dispositivos opcionales

C S O W S E 60 14 AS (EJEMPLO)

B I B L I O G R A F I A

1. APPLEGATE, L.M., Cathodic Protection, McGraw-Hill, New York, 1960.
2. CIER, Criterios aplicados en el proyecto de Mallas de Tierra, Tomo II, Comisión de Integración Eléctrica Regional, Buenos Aires, 1974, Sección 23-109.
3. EATON, J.R., Sistemas de Transmisión de Energía Eléctrica, Prentice/Hall, Madrid, 1973, pp. 310-312.
4. FINK, D.G. and BEATY, H.W., Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw Hill, New York, 1978, Cap. 24.
5. GENTIL, V., Corrosão, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
6. GUERRERO, M., BAÑUELOS, C., y GUERRA, R., Protección Catódica, Instituto Mexicano del Petróleo, México D.F, 1980.

7. IEC, Proteção Catódica, Instalações e Engenharia de Corrosão, Rio de Janeiro, 1981.
8. IPT, Corrosão e Proteção contra Corrosão de Metais, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1983.
9. LaQUE, F.L., Introduction to Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1969.
10. NACE, Computer Calculations for Cathodic Protection, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1983.
11. NUNES, L., Proteção Catódica, Petrobras, Rio de Janeiro, 1980.
12. PARKER, M.E., Pipeline Corrosion and Cathodic Protection, Gulf Publishing Co., Houston, 1954.
13. PEABODY, A.W., Control of Pipeline Corrosion, National Association of Corrosion Engineers, Houston, 1967.
14. PEÑA, J., Protección Catódica de Estructuras Metálicas, Seminario de la Facultad de Ingeniería Mecánica ESPOL, Guayaquil, 1988.

15. POWER APPARATUS AND SYSTEMS, Cathodic Protection of Direct Buried Transformers, Volume PAS-91, Number 3, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, May/June 1972, pp. 1007-1014.
16. SUNDE, E.D., Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Van Nostrand, New York, 1949, pp. 177-214.
17. UHLIG, H.H., Corrosion and Corrosion Control, John Wiley & Sons, New York, 1963.
18. UHLIG, H.H., Corrosion Handbook, John Wiley & Sons, New York, 1958.
19. VITERI, A., Corrosión y Prevención de la Corrosión, Folleto ESPOL, Guayaquil, 1984.



A.F. 142460